



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería

Ingeniería Civil – Estructuras

**APLICACIÓN DEL CRITERIO DE DISEÑO ÓPTIMO EN EL
DISEÑO DE ELEMENTOS DE RECUBRIMIENTO**

TESIS

Que para optar por el grado de:

MAESTRO EN INGENIERÍA

Presenta:

ING. JONATHAN LÓPEZ ESPINOSA

Tutor:

Dr. Adrián Pozos Estrada

Instituto de Ingeniería UNAM

Ciudad de México, México, junio de 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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 ^{er} Vocal	Dr. Adrián Pozos Estrada
2 ^{do} Vocal	Dr. Orlando Javier Díaz López
3 ^{er} 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 brindarme la oportunidad de desarrollar este trabajo bajo su supervisión, la constante orientación y el conocimiento compartido.

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

Finalmente, agradecer a mi esposa quien ha sido un apoyo invaluable durante el desarrollo de mis estudios de posgrado.



RESUMEN

*Aplicación del criterio de diseño óptimo en el diseño de elementos de recubrimiento**

M.I. Jonathan López Espinosa

Instituto de Ingeniería de la UNAM, 2023

El costo inicial de construcción de las fachadas representa un porcentaje desde un 15% (Abu Bakar, 2021) hasta un 40% del costo inicial total de la edificación (Hall, 2002). El costo inicial de construcción de las fachadas depende de varios factores como los materiales, propiedades de la edificación o factores macroeconómicos, entre otros (Lesniak et al., 2020). La metodología de diseño óptimo permite obtener un balance entre el máximo beneficio y el costo mínimo de construcción la estructura (Pozos-Estrada et al., 2015). Se obtienen las curvas que presentan la variación del costo inicial de los materiales de cada elemento de la fachada en función de la velocidad de viento de diseño. Las curvas se generan con base en los valores del costo real de los materiales y de datos experimentales. Se describe el procedimiento mediante el cual se generan las curvas para obtener la variación del costo inicial de la fachada por unidad de área. Se comparan los resultados de la curva de costo inicial obtenida al considerar únicamente el costo de los materiales con la curva que incluye el costo asociado a diferentes procesos de fabricación y producción. Posteriormente se obtienen las curvas del valor presente de las pérdidas esperadas considerando tanto el costo inicial asociado únicamente a los materiales como el costo calculado para el caso en el que se consideran los procesos de fabricación y producción. Se grafican las curvas de costo total y se identifica el valor óptimo para la velocidad de viento de diseño de los sistemas de fachada. Se discuten los resultados y se realizan observaciones sobre los valores obtenidos para las diferentes curvas.

* **Palabras clave:** Velocidad óptima de viento; Fachadas; Aluminio; Costo Total

ABSTRACT

*Optimal design criteria application to envelope elements design **

M.I. Jonathan López Espinosa

Institute of Engineering, UNAM, 2023

Facade construction initial cost represents a percentage from 15% (Abu Bakar, 2021) up to 40% of building initial total cost (Hall, 2002). Facade initial construction cost depends on several factors as materials, building properties or macroeconomic factors among others (Lesniak et al., 2020). Optimum design methodology allows to obtain a balance between structure maximum benefit and minimum construction cost (Pozos-Estrada et al., 2015). Curves that show variation of initial cost of materials of each element from facade depending on design wind speed are obtained. Curves are generated based on actual cost from materials and experimental data. Procedure through curves to obtain facade initial cost variation per unit area are generated is described. Results from initial cost curve obtained by just considering materials cost to the curve that includes different production and fabrication processes associated cost are compared. Subsequently, present value of expected losses curves considering both initial costs associated only to materials and calculated cost for the case in which fabrication and production processes are considered are obtained. Total cost curves are plotted, and facade systems design wind velocity optimal value is identified. Results are discussed and observations about obtained values from different curves are made.

* **Key words:** Optimal wind speed; Facades; Aluminum; Total Cost

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	i
RESUMEN iii	
ABSTRACT iv	
LISTA DE TABLAS.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	xii
NOMENCLATURA.....	xv
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.2 Objetivo y metodología.....	2
1.3 Justificación.....	2
1.4 Alcance y limitaciones.....	3
CAPÍTULO 2 REVISIÓN DE LA LITERATURA.....	4
2.1 Diseño óptimo.....	4
2.1.2 <i>Costo de pérdidas esperadas</i>	4
2.1.3 <i>Costo total</i>	5
2.1.3.1 <i>Relación entre tasa de demanda excedente $v(v)$ y periodo de retorno R en la ocurrencia de eventos extremos</i>	5
2.1.3.2 <i>Estimación de las velocidades de viento para las diferentes categorías de riesgo definidas en ASCE 7-22</i>	7
2.1.3.2.1 <i>Selección de periodos de retorno</i>	7
2.1.3.2.2 <i>Estimación de las velocidades de viento</i>	8
2.1.3.2.3 <i>Combinación de los datos de las velocidades de viento huracanados y no huracanados</i>	8
2.1.3.2.3 <i>Relación entre probabilidad anual de excedencia, intervalo medio de recurrencia y periodo de retorno</i>	9
2.2 Cálculo de presiones de viento para componentes y recubrimientos según ASCE 7-22..	9
2.2.1 <i>Velocidad básica de diseño V</i>	10
2.2.2 <i>Direccionalidad del viento K_d</i>	11
2.2.3 <i>Categoría de exposición</i>	12

2.2.4 Factor topográfico K_t	15
2.2.5 Factor de elevación del suelo K_e	15
2.2.6 Coeficiente de exposición a la presión de velocidad K_z o K_d	16
2.3.7 Presión de velocidad q_z	17
2.3.8 Coeficiente de presión interna GC_{pi}	17
2.3.9 Clasificación del cerramiento.....	18
2.3.10 Coeficiente de presión externa GC_p	18
CAPÍTULO 3 CASO DE ESTUDIO	20
3.1 Descripción de la edificación.....	20
3.2 Curvas de costo inicial de los componentes del sistema.....	21
3.2.1 Curvas de costo inicial de montantes.....	22
3.2.2 Curvas de costo inicial de soportes.....	26
3.2.3. Curvas de costo inicial de paneles.....	30
3.2.4 Curvas de costo inicial de tornillos de fijación de paneles.....	34
3.2.5 Curvas de costo inicial de tornillos de fijación de montantes a soportes.....	37
3.2.5 Curvas de costo inicial de anclajes a concreto.....	41
3.3 Curvas de costo inicial del sistema de fachada por unidad de área.....	45
3.4 Curvas de costo inicial del sistema de fachada por unidad de área incluyendo procesos.....	52
3.5 Curvas de costo de pérdidas esperadas.....	56
3.6 Curvas de costo de total.....	61
CAPÍTULO 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	67
4.1 Discusión de resultados.....	67
4.2 Procedimiento para determinar las velocidades de viento de diseño a partir de simulaciones de huracanes.....	70
4.2.1 Metodología de simulación de huracanes.....	70
4.2.2 Modelación del seguimiento de tormentas.....	71
4.2.3 Modo de decaída.....	72
4.2.4 Predicción de velocidades de viento de diseño.....	73

4.3 Recomendaciones para futura investigación.....	73
--	----

APÉNDICE A 75

COMPARATIVO ENTRE ASCE 7-22 Y OTRAS METODOLOGÍAS PARA EL CÁLCULO DE LAS PRESIONES DE VIENTO PARA COMPONENTES Y RECUBRIMIENTOS 75

<i>A.1 NBC 2020 (Canadá)</i>	<i>75</i>
<i>A.1.1 Factor de importancia.....</i>	<i>75</i>
<i>A.1.2 Factores de exposición.....</i>	<i>75</i>
<i>A.1.3 Factores de efectos de ráfaga</i>	<i>76</i>
<i>A.1.4 Coeficientes de presión externa</i>	<i>76</i>
<i>A.1.5 Coeficientes de presión interna</i>	<i>76</i>
<i>A.2 EN.1991-1-4 (Eurocódigo).....</i>	<i>77</i>
<i>A.2.1 Presión de velocidad pico.....</i>	<i>77</i>
<i>A.2.2 Coeficientes de presión externa</i>	<i>77</i>
<i>A.2.3 Coeficientes de presión interna</i>	<i>80</i>
<i>A.3 NTC 2017 (Gaceta Oficial de la Ciudad de México).....</i>	<i>81</i>
<i>A.3.1 Velocidad de diseño</i>	<i>81</i>
<i>A.3.2 Velocidad regional V_n.....</i>	<i>82</i>
<i>A.3.3 Factor de variación con la altura, F_α</i>	<i>82</i>
<i>A.3.4 Factor correctivo por topografía y rugosidad, F_{TR}</i>	<i>83</i>
<i>A.3.5 Diseño de elementos de recubrimiento.....</i>	<i>84</i>
<i>A.3.6 Presiones interiores.....</i>	<i>86</i>
<i>A.4 MDOC 2020 (México).....</i>	<i>87</i>
<i>A.4.1 Presión dinámica de base q_s.....</i>	<i>87</i>
<i>A.4.2 Velocidad básica de diseño V_b.....</i>	<i>88</i>
<i>A.4.3 Categorías de terrenos según su rugosidad</i>	<i>88</i>
<i>A.4.4 Velocidad regional para un periodo de retorno fijo</i>	<i>89</i>
<i>A.4.5 Velocidad regional para un periodo de retorno fijo</i>	<i>93</i>
<i>A.4.6 Factor de topografía, F_T.....</i>	<i>93</i>

<i>A.4.7 Presión actuante en estructuras, p_z</i>	96
<i>A.4.8 Fuerza actuante en estructuras</i>	97
<i>A.4.9 Presiones y fuerzas debidas a la acción del viento</i>	97
<i>A.4.9.1 Construcciones cerradas</i>	97
<i>A.4.9.1.1 Presiones exteriores</i>	98
<i>A.4.9.1.2 Factor de reducción de presión por tamaño de área, K_d</i>	101
<i>A.4.9.1.3 Factor de presión local, K_L</i>	102
<i>A.4.9.1.4 Factor de presión para recubrimientos y anclajes, K_{ra}</i>	104
<i>A.4.9.2 Presiones interiores</i>	108
REFERENCIAS	111

LISTA DE TABLAS

CAPÍTULO 2

Tabla 2.1 Confiabilidades objetivo (Probabilidad anual de falla P_r) e índices de confiabilidad asociados (\square) para condiciones de carga que no incluyen sismos, tsunamis o eventos extraordinarios. <i>Nota.</i> Adaptado de “Minimum Design Loads for Buildings and other Structures” (p. 3) por American Society of Civil Engineers, 2021.	7
Tabla 2.2 Valores del factor de direccionalidad K_r . <i>Nota.</i> Adaptado de “Minimum Design Loads for Buildings and other Structures” (p. 274) por American Society of Civil Engineers, 2021.	12
Tabla 2.3 Valores para factores K_s , K_e y K_f del factor topográfico K_a . <i>Nota.</i> Adaptado de “Minimum Design Loads for Buildings and other Structures” (p. 276) por American Society of Civil Engineers, 2021.	15
Tabla 2.4 Valores del factor de elevación del terreno K_z . <i>Nota.</i> Adaptado de “Minimum Design Loads for Buildings and other Structures” (p. 275) por American Society of Civil Engineers, 2021.	16
Tabla 2.5 Valores de los coeficientes de exposición a la presión de velocidad K_d y K_e . <i>Nota.</i> Adaptado de “Minimum Design Loads for Buildings and other Structures” (p. 277) por American Society of Civil Engineers, 2021.	16
Tabla 2.6 Valores de los coeficientes de exposición del terreno \square y z_g . <i>Nota.</i> Adaptado de “Minimum Design Loads for Buildings and other Structures” (p. 278) por American Society of Civil Engineers, 2021.	17
Tabla 2.7 Valores del coeficiente de presión interna G_{Cpi} . <i>Nota.</i> Adaptado de “Minimum Design Loads for Buildings and other Structures” (p. 280) por American Society of Civil Engineers, 2021.	18
Tabla 2.8 Factor de topografía local F_T (Tomado de MDOC 2020).....	94

CAPÍTULO 3

Tabla 3.1 Secciones de perfiles tubulares utilizados para los montantes de la estructura.....	22
Tabla 3. 2 Relación de capacidad para estados límite de resistencia y servicio en montantes.....	24
Tabla 3.3 Parámetros CR y \square obtenidos para determinar el costo experimental de los montantes.....	25
Tabla 3.4 Secciones de ángulos utilizados para los soportes de la estructura.....	26
Tabla 3.5 Relación de capacidad para estados límite de resistencia y servicio en soportes.....	28
Tabla 3.6 Parámetros CR y \square obtenidos para determinar el costo experimental de los soportes.....	29
Tabla 3.7 Espesores de lámina asumidos para los paneles de la estructura.....	32
Tabla 3.8 Relación de capacidad para estados límite de resistencia y servicio en paneles.....	32
Tabla 3.9 Parámetros CR y \square obtenidos para determinar el costo experimental de los paneles.....	33
Tabla 3.10 Referencias de tornillos de fijación de paneles.....	34
Tabla 3.11 Relación de capacidad para estados límite de tornillos de fijación de paneles.....	35
Tabla 3.12 Parámetros CR y \square obtenidos para determinar el costo experimental de los tornillos de fijación de paneles.....	36
Tabla 3.13 Referencias de tornillos de fijación de montantes a soportes.....	37
Tabla 3.14 Relación de capacidad para estados límite de tornillos de fijación de montantes a soportes.....	39
Tabla 3.15 Parámetros CR y \square obtenidos para determinar el costo experimental de los tornillos de fijación de montantes a soportes.....	40
Tabla 3.16 Referencia del adhesivo utilizado en el anclaje a concreto.....	41
Tabla 3.17 Referencias de las barras utilizadas en el anclaje a concreto.....	41
Tabla 3.18 Relación de capacidad para estados límite de anclajes a concreto.....	43
Tabla 3.19 Parámetros CR y \square obtenidos para determinar el costo experimental de los anclajes a concreto.....	44
Tabla 3.20 Características de la elevación oeste.....	45
Tabla 3.21 Distribución de paneles en elevación oeste.....	46
Tabla 3.22 Distribución de montantes en elevación oeste.....	47
Tabla 3.23 Distribución de soportes y tornillos en elevación oeste.....	48
Tabla 3.24 Distribución de tornillos de fijación de paneles.....	48
Tabla 3.25 Distribución de anclajes a concreto.....	49

Tabla 3.26 Costo inicial de los elementos de la fachada en función de la velocidad de viento de diseño.....	49
Tabla 3.27 Porcentaje del costo inicial de los elementos de la fachada en función de la velocidad de viento de diseño.....	50
Tabla 3.28 Parámetros CR y \square obtenidos para determinar el costo experimental por unidad de área del sistema de fachada.....	50
Tabla 3.29 Costo de procesos de fabricación para paneles.....	52
Tabla 3.30 Parámetros para el cálculo del costo de los procesos de fabricación en paneles.....	52
Tabla 3.31 Costo de procesos de fabricación para paneles.....	53
Tabla 3.32 Costo inicial de los elementos de la fachada incluyendo procesos de fabricación en función de la velocidad de viento de diseño.....	53
Tabla 3.33 Porcentaje del costo inicial de los elementos de la fachada incluyendo procesos de fabricación en función de la velocidad de viento de diseño.....	54
Tabla 3.34 Parámetros CR y \square obtenidos para determinar el costo experimental por unidad de área del sistema de fachada incluyendo los procesos de fabricación.....	54
Tabla 3.35 Vida útil de diseño de las estructuras. <i>Nota.</i> Adaptado de “EN 1990:2002+A1 Eurocode - Basis of structural design” (p. 28) por European Committee for Standardization, 2002.....	56
Tabla 3.36 Parámetros estimados de distribución Weibull inversa. <i>Nota.</i> Adaptado de “Estimation of Hurricane Wind Speed Probabilities: Application to New York City and Other Coastal Locations” por Yeo et al., 2015. Journal of Structural Engineering. 140.....	57
Tabla 3.37 Tasa de demanda excedente en función de la velocidad de viento.....	59
Tabla 3.38 Tasa de demanda excedente en función de la velocidad de viento.....	60

CAPÍTULO 4

Tabla 4.1 Velocidades de viento óptimas [mph].....	68
Tabla 4.2 Velocidades básicas de viento definidas en ASCE 7-22 para la ubicación de la edificación [mph].....	68

APÉNDICE A

Tabla A.1 Factores de importancia para carga de viento. <i>Nota.</i> Adaptado de “National Building Code of Canada 2020” (p. 4-30) por Canadian Commission on Building and Fire Codes - National Research Council of Canada, 2022.....	75
Tabla A.2 Coeficientes de presión interna. <i>Nota.</i> Adaptado de “National Building Code of Canada 2020” (p. 4-43) por Canadian Commission on Building and Fire Codes - National Research Council of Canada, 2022.....	77
Tabla A.3 Valores recomendados de coeficientes de presión externa para muros verticales de edificaciones con planta rectangular. <i>Nota.</i> Adaptado de “EN 1991-1-4:2005+A1 Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: General actions – Wind actions” (p. 37) por European Committee for Standardization, 2010.....	79
Tabla A.4 Velocidades regionales VR, según la importancia de la construcción y la zonificación eólica, m/s. <i>Nota.</i> Adaptado de “Norma Técnica Complementaria para la Revisión de la Seguridad Estructural de las Edificaciones (NTC-RSEE)” (p. 89) por Administración Pública de la Ciudad de México, 2017.....	82
Tabla A.5 Rugosidad del terreno \square y $\square\square\square$ <i>Nota.</i> Adaptado de “Norma Técnica Complementaria para la Revisión de la Seguridad Estructural de las Edificaciones (NTC-RSEE)” (p. 90) por Administración Pública de la Ciudad de México, 2017.....	83
Tabla A.6 Factor de topografía FTR. <i>Nota.</i> Adaptado de “Norma Técnica Complementaria para la Revisión de la Seguridad Estructural de las Edificaciones (NTC-RSEE)” (p. 90) por Administración Pública de la Ciudad de México, 2017.....	84
Tabla A.7 Coeficientes de presión para elementos de recubrimiento en edificios con altura mayor o igual a 20m. <i>Nota.</i> Adaptado de “Norma Técnica Complementaria para la Revisión de la Seguridad Estructural de las Edificaciones (NTC-RSEE)” (p. 97) por Administración Pública de la Ciudad de México, 2017.....	85
Tabla A.8 Coeficientes de presión para elementos de recubrimiento en edificios con altura menor a 20m. <i>Nota.</i> Adaptado de “Norma Técnica Complementaria para la Revisión de la Seguridad Estructural de las Edificaciones (NTC-RSEE)” (p. 98) por Administración Pública de la Ciudad de México, 2017.....	86
Tabla A.9 Coeficiente Cp para presiones interiores. <i>Nota.</i> Adaptado de “Norma Técnica Complementaria para la Revisión de la Seguridad Estructural de las Edificaciones (NTC-RSEE)” (p. 96) por Administración Pública de la Ciudad de México, 2017.....	87

Tabla A.10 Relación entre la altitud y la presión barométrica. Nota. Adaptado de “Manual de Diseño de Obras Civiles Cap. C.1.4 Diseño por Viento. Sección C: Estructuras Tema 1: Criterios Generales de Análisis y Diseño.” (p. 30) por Comisión Federal de Electricidad, 2020.	88
Tabla A.11 Categoría del terreno según su rugosidad. Nota. Adaptado de “Manual de Diseño de Obras Civiles Cap. C.1.4 Diseño por Viento. Sección C: Estructuras Tema 1: Criterios Generales de Análisis y Diseño.” (p. 14) por Comisión Federal de Electricidad, 2020.	89
Tabla A.12 Valores de c , \square y $\square\square\square$ Nota. Adaptado de “Manual de Diseño de Obras Civiles Cap. C.1.4 Diseño por Viento. Sección C: Estructuras Tema 1: Criterios Generales de Análisis y Diseño.” (p. 24) por Comisión Federal de Electricidad, 2020.	93
Tabla A.13 Factor de topografía local FT. Nota. Adaptado de “Manual de Diseño de Obras Civiles Cap. C.1.4 Diseño por Viento. Sección C: Estructuras Tema 1: Criterios Generales de Análisis y Diseño.” (p. 25) por Comisión Federal de Electricidad, 2020.	94
Tabla A.14 Coeficiente de presión exterior Cpe para muros laterales (ML) de construcciones con planta rectangular cerrada. Nota. Adaptado de “Manual de Diseño de Obras Civiles Cap. C.1.4 Diseño por Viento. Sección C: Estructuras Tema 1: Criterios Generales de Análisis y Diseño.” (p. 35) por Comisión Federal de Electricidad, 2020.	99
Tabla A.15 Coeficiente de presión exterior Cpe para muros en barlovento (MB) y sotavento (MS) de construcciones con planta rectangular cerrada. Nota. Adaptado de “Manual de Diseño de Obras Civiles Cap.	99
Tabla A.16 Factor de reducción KA para techos y muros laterales. Nota. Adaptado de “Manual de Diseño de Obras Civiles Cap. C.1.4 Diseño por Viento. Sección C: Estructuras Tema 1: Criterios Generales de Análisis y Diseño.” (p. 35) por Comisión Federal de Electricidad, 2020.	101
Tabla A.17 Factor de presión local KL para recubrimientos y sus soportes. Nota. Adaptado de “Manual de Diseño de Obras Civiles Cap. C.1.4 Diseño por Viento. Sección C: Estructuras Tema 1: Criterios Generales de Análisis y Diseño.” (p. 43) por Comisión Federal de Electricidad, 2020.	103
Tabla A.18 Factor de reducción de presión local Kr por parapetos. Nota. Adaptado de “Manual de Diseño de Obras Civiles Cap. C.1.4 Diseño por Viento. Sección C: Estructuras Tema 1: Criterios Generales de Análisis y Diseño.” (p. 46) por Comisión Federal de Electricidad, 2020.	107
Tabla A.19 Coeficiente de presión interior Cpi para construcciones con planta rectangular cerrada para muros permeables sin aberturas mayores al 0.5% del área del muro y el techo impermeable. Nota. Adaptado de “Manual de Diseño de Obras Civiles Cap. C.1.4 Diseño por Viento. Sección C: Estructuras Tema 1: Criterios Generales de Análisis y Diseño.” (p. 49) por Comisión Federal de Electricidad, 2020.	109
Tabla A.20 Coeficiente de presión interior Cpi para construcciones con planta rectangular cerrada para muros permeables con aberturas mayores al 0.5% del área del muro o techo correspondiente. Nota. Adaptado de “Manual de Diseño de Obras Civiles Cap. C.1.4 Diseño por Viento. Sección C: Estructuras Tema 1: Criterios Generales de Análisis y Diseño.” (p. 50) por Comisión Federal de Electricidad, 2020.	110

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

Fig 2.1 Relación entre periodo de retorno e intervalo medio de recurrencia. Nota. Adaptado de “Exceedance rate, exceedance probability, and the duality of GEV and GPD for extreme hazard analysis” (p. 1309) por Wang, CH., et al., 2020. Nat Hazards 102, 1305–1321.	6
Fig 2.2 Velocidades básicas de viento para edificaciones y otras estructuras de categoría de riesgo II. Nota. Adaptado de “Minimum Design Loads for Buildings and other Structures” (p. 269) por American Society of Civil Engineers, 2021.....	11
Fig 2.3 Ejemplo de rugosidad de terreno tipo B. Nota. Adaptado de “Minimum Design Loads for Buildings and other Structures” (p. 876) por American Society of Civil Engineers, 2021.....	13
Fig 2.4 Ejemplo de rugosidad de terreno tipo C. Nota. Adaptado de “Minimum Design Loads for Buildings and other Structures” (p. 877) por American Society of Civil Engineers, 2021.....	13
Fig 2.5 Ejemplo de rugosidad de terreno tipo D. Nota. Adaptado de “Minimum Design Loads for Buildings and other Structures” (p. 877) por American Society of Civil Engineers, 2021.....	14
Fig 2.6 Valores del coeficiente de presión externa C_{Gp} para muros y techos planos en edificaciones de altura $h > 60\text{ft}$. Nota. Adaptado de “Minimum Design Loads for Buildings and other Structures” (p. 334) por American Society of Civil Engineers, 2021.....	19
Fig 2.7 Coeficiente de presión interna C_{pi} para edificaciones sin una cara dominante. Nota. Adaptado de “EN 1991-1-4:2005+A1 Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: General actions – Wind actions” (p. 52) por European Committee for Standardization, 2010.	81

CAPÍTULO 3

Fig 3.1 Vista en planta de la edificación con sus respectivas zonas de viento para muros y techos según ASCE 7-22.....	21
Fig 3.2 Curva de costo inicial $CI(v)$ vs V para montantes.....	25
Fig 3.3 Curva de costo inicial normalizado $CI(v)/Co$ vs V para montantes.....	26
Fig 3.4 Curva de costo inicial $CI(v)$ vs V para montantes.....	29
Fig 3.5 Curva de costo inicial normalizado $CI(v)/Co$ vs V para montantes.....	30
Fig 3.6 Dimensiones de panel de aluminio - Vista en planta.....	31
Fig 3.7 Dimensiones de panel de aluminio - Sección.....	31
Fig 3.8 Curva de costo inicial $CI(v)$ vs V para paneles.....	33
Fig 3.9 Curva de costo inicial normalizado $CI(v)/Co$ vs V para paneles.....	34
Fig 3.10 Curva de costo inicial $CI(v)$ vs V para tornillos de fijación de paneles.....	36
Fig 3.11 Curva de costo inicial normalizado $CI(v)/Co$ vs V para tornillos de fijación de paneles.....	37
Fig 3.12 Curva de costo inicial $CI(v)$ vs V para tornillos de fijación de montantes a soportes.....	40
Fig 3.13 Curva de costo inicial normalizado $CI(v)/Co$ vs V para tornillos de fijación de montantes a soportes.....	41
Fig 3.14 Curva de costo inicial $CI(v)$ vs V para anclajes a concreto.....	44
Fig 3.15 Curva de costo inicial normalizado $CI(v)/Co$ vs V para anclajes a concreto.....	45
Fig 3.16 Distribución de paneles en fachada oeste.....	46
Fig 3.17 Curva de costo inicial por unidad de área $CI(v)$ vs V para el sistema de fachada.....	51
Fig 3.18 Curva de costo normalizado inicial por unidad de área $CI(v)/Co$ vs V para el sistema de fachada.....	51
Fig 3.19 Curva de costo inicial por unidad de área $CI(v)$ vs V para el sistema de fachada incluyendo procesos de fabricación.....	55
Fig 3.20 Curva de costo inicial normalizado por unidad de área $CI(v)/Co$ vs V para el sistema de fachada incluyendo procesos de fabricación.....	55
Fig 3.21 Costos de intervención esperados (mantenimiento y reparación) normalizados al costo inicial de construcción. Nota. Adaptado de “Simulation and analysis of intervention costs due to wind-induced.....	57
Fig 3.22 Curva de costo total por unidad de área $CT(v)$ vs V para el sistema de fachada - $Q=3.5$	61
Fig 3.23 Curva de costo total por unidad de área $CT(v)$ vs V para el sistema de fachada - $Q=5$	61
Fig 3.24 Curva de costo total por unidad de área $CT(v)$ vs V para el sistema de fachada - $Q=15$	62

Fig 3.25 Curva de costo total por unidad de área $CT(v)$ vs V para el sistema de fachada incluyendo procesos de fabricación - $Q=3.5$	62
Fig 3.26 Curva de costo total por unidad de área $CT(v)$ vs V para el sistema de fachada incluyendo procesos de fabricación - $Q=5.0$	63
Fig 3.27 Curva de costo total por unidad de área $CT(v)$ vs V para el sistema de fachada incluyendo procesos de fabricación - $Q=15$	63
Fig 3.28 Curva de costo total normalizado por unidad de área $CT(v)$ vs V para el sistema de fachada - $Q=3.5$	64
Fig 3.29 Curva de costo total normalizado por unidad de área $CT(v)$ vs V para el sistema de fachada - $Q=5$	64
Fig 3.30 Curva de costo total normalizado por unidad de área $CT(v)$ vs V para el sistema de fachada - $Q=15$	65
Fig 3.31 Curva de costo total normalizado por unidad de área $CT(v)$ vs V para el sistema de fachada incluyendo procesos de fabricación - $Q=3.5$	65
Fig 3.32 Curva de costo total normalizado por unidad de área $CT(v)$ vs V para el sistema de fachada incluyendo procesos de fabricación - $Q=5$	66
Fig 3.33 Curva de costo total normalizado por unidad de área $CT(v)$ vs V para el sistema de fachada incluyendo procesos de fabricación - $Q=15$	66

CAPÍTULO 4

Fig 4.1 Curva de costo total por unidad de área $CT(v)$ vs V para el sistema de fachada - $Q=0.717$	69
Fig 4.2 Curva de costo total por unidad de área $CT(v)$ vs V para el sistema de fachada - $Q=3.5 - \mu=3\%$	70

APÉNDICE A

Fig A.1 Altura de referencia z_e que depende de h y b y su perfil de velocidad correspondiente. Nota. Adaptado de "EN 1991-1-4:2005+A1 Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: General actions – Wind actions" (p. 35) por European Committee for Standardization, 2010.	78
Fig A.2 Clasificación de zonas de muros verticales. Nota. Adaptado de "EN 1991-1-4:2005+A1 Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: General actions – Wind actions" (p. 36) por European Committee for Standardization, 2010.	79
Fig A. 3.	81
Fig A.4 Rugosidad del terreno α y δ . Nota. Adaptado de "Norma Técnica Complementaria para la Revisión de la Seguridad Estructural de las Edificaciones (NTC-RSEE)" (p. 89) por Administración Pública de la Ciudad de México, 2017.	83
Fig A.5 Formas topográficas locales. Nota. Adaptado de "Norma Técnica Complementaria para la Revisión de la Seguridad Estructural de las Edificaciones (NTC-RSEE)" (p. 90) por Administración Pública de la Ciudad de México, 2017.	84
Fig A.6 Definición de zonas para elementos de recubrimiento en paredes y cubierta en edificios con altura mayor o igual a 20 m. Nota. Adaptado de "Norma Técnica Complementaria para la Revisión de la Seguridad Estructural de las Edificaciones (NTC-RSEE)" (p. 98) por Administración Pública de la Ciudad de México, 2017.	85
Fig A.7 Definición de zonas para elementos de recubrimiento en paredes y cubierta en edificios con altura menor a 20 m. Nota. Adaptado de "Norma Técnica Complementaria para la Revisión de la Seguridad Estructural de las Edificaciones (NTC-RSEE)" (p. 98) por Administración Pública de la Ciudad de México, 2017.	86
Fig A.8 Mapa de isotacas para velocidades regionales con periodo de retorno de 200 años. Nota. Adaptado de "Manual de Diseño de Obras Civiles Cap. C.1.4 Diseño por Viento. Sección C: Estructuras Tema 1: Criterios Generales de Análisis y Diseño." (p. 18) por Comisión Federal de Electricidad, 2020.	90
Fig A.9 Mapa de isotacas para velocidades regionales con periodo de retorno de 50 años. Nota. Adaptado de "Manual de Diseño de Obras Civiles Cap. C.1.4 Diseño por Viento. Sección C: Estructuras Tema 1: Criterios Generales de Análisis y Diseño." (p. 19) por Comisión Federal de Electricidad, 2020.	91
Fig A.10 Mapa de isotacas para velocidades regionales con periodo de retorno de 10 años. Nota. Adaptado de "Manual de Diseño de Obras Civiles Cap. C.1.4 Diseño por Viento. Sección C: Estructuras Tema 1: Criterios Generales de Análisis y Diseño." (p. 20) por Comisión Federal de Electricidad, 2020.	92

Fig A.11 Zona de afectación local en promontorios. Nota. Adaptado de “Manual de Diseño de Obras Civiles Cap. C.1.4 Diseño por Viento. Sección C: Estructuras Tema 1: Criterios Generales de Análisis y Diseño.” (p. 27) por Comisión Federal de Electricidad, 2020.	95
Fig A.12 Zona de afectación local en terraplenes. Nota. Adaptado de “Manual de Diseño de Obras Civiles Cap. C.1.4 Diseño por Viento. Sección C: Estructuras Tema 1: Criterios Generales de Análisis y Diseño.” (p. 27) por Comisión Federal de Electricidad, 2020.	95
Fig A.13 Zona de separación del flujo para pendientes mayores que 0.45. Nota. Adaptado de “Manual de Diseño de Obras Civiles Cap. C.1.4 Diseño por Viento. Sección C: Estructuras Tema 1: Criterios Generales de Análisis y Diseño.” (p. 28) por Comisión Federal de Electricidad, 2020.	96
Fig A.14 Convención de signos para las presiones ejercidas por el viento en una edificación con aberturas en barlovento o sotavento. Nota. Adaptado de “Manual de Diseño de Obras Civiles Cap. C.1.4 Diseño por Viento. Sección C: Estructuras Tema 1: Criterios Generales de Análisis y Diseño.” (p. 32) por Comisión Federal de Electricidad, 2020.	98
Fig A.15 Definición de parámetros de construcciones con planta cerrada. Nota. Adaptado de “Manual de Diseño de Obras Civiles Cap. C.1.4 Diseño por Viento. Sección C: Estructuras Tema 1: Criterios Generales de Análisis y Diseño.” (p. 39) por Comisión Federal de Electricidad, 2020.	100
Fig A.16 Definición de zonas de muros laterales para aplicar los coeficientes de presión exterior. Nota. Adaptado de “Manual de Diseño de Obras Civiles Cap. C.1.4 Diseño por Viento. Sección C: Estructuras Tema 1: Criterios Generales de Análisis y Diseño.” (p. 40) por Comisión Federal de Electricidad, 2020.	101
Fig A.17 Zonas para la determinación de los factores de presión local KL, para recubrimientos y sus soportes. Construcciones sin aleros, Dirección del viento normal a la cumbrera, $\theta=0^\circ$. Nota. Adaptado de “Manual de Diseño de Obras Civiles Cap. C.1.4 Diseño por Viento. Sección C: Estructuras Tema 1: Criterios Generales de Análisis y Diseño.” (p. 44) por Comisión Federal de Electricidad, 2020.	104
Fig A.18 Zonas para la determinación de los factores de presión local KL, para recubrimientos y sus soportes. Construcciones sin aleros, Dirección del viento paralela a la cumbrera, $\theta=90^\circ$. Nota. Adaptado de “Manual de Diseño de Obras Civiles Cap. C.1.4 Diseño por Viento. Sección C: Estructuras Tema 1: Criterios Generales de Análisis y Diseño.” (p. 44) por Comisión Federal de Electricidad, 2020.	105
Fig A.19 Zonas para la determinación de los factores de presión local KL, para recubrimientos y sus soportes. Construcciones sin aleros, Dirección del viento paralela a la cumbrera, $\theta=90^\circ$. Nota. Adaptado de “Manual de Diseño de Obras Civiles Cap. C.1.4 Diseño por Viento. Sección C: Estructuras Tema 1: Criterios Generales de Análisis y Diseño.” (p. 45) por Comisión Federal de Electricidad, 2020.	105
Fig A.20 Zonas para la determinación de los factores de presión local KL, para recubrimientos y sus soportes. Construcciones con aleros, Dirección del viento paralela a la cumbrera, $\theta=90^\circ$. Nota. Adaptado de “Manual de Diseño de Obras Civiles Cap. C.1.4 Diseño por Viento. Sección C: Estructuras Tema 1: Criterios Generales de Análisis y Diseño.” (p. 45) por Comisión Federal de Electricidad, 2020.	106
Fig A.21 Zonas para la determinación de los factores de presión local KL, para recubrimientos y sus soportes. Construcciones con techos planos y alturas mayores que 25 m. Nota. Adaptado de “Manual de Diseño de Obras Civiles Cap. C.1.4 Diseño por Viento. Sección C: Estructuras Tema 1: Criterios Generales de Análisis y Diseño.” (p. 46) por Comisión Federal de Electricidad, 2020.	106
Fig A.22 Altura del parapeto medida desde el nivel de la cubierta. Nota. Adaptado de “Manual de Diseño de Obras Civiles Cap. C.1.4 Diseño por Viento. Sección C: Estructuras Tema 1: Criterios Generales de Análisis y Diseño.” (p. 47) por Comisión Federal de Electricidad, 2020.	107
Fig A.23 Ejemplos que muestran diferentes casos de permeabilidad en muros de edificaciones. La flecha indica la dirección del viento. Nota. Adaptado de “Manual de Diseño de Obras Civiles Cap. C.1.4 Diseño por Viento. Sección C: Estructuras Tema 1: Criterios Generales de Análisis y Diseño.” (p. 49) por Comisión Federal de Electricidad, 2020.	109
Fig A.24 Ejemplos que muestran diferentes casos de aberturas en muros de edificaciones. La flecha indica la dirección del viento. Nota. Adaptado de “Manual de Diseño de Obras Civiles Cap. C.1.4 Diseño por Viento. Sección C: Estructuras Tema 1: Criterios Generales de Análisis y Diseño.” (p. 50) por Comisión Federal de Electricidad, 2020.	110

NOMENCLATURA

Símbolos de Variables y Constantes

A	Área efectiva de viento (ft ²)
A	Área total de todas las aberturas exteriores del volumen (m ²)
A	Área cargada para el cálculo de los coeficientes de presión externos
A	Área tributaria del elemento a diseñar (m ²)
A_{ref}	Área de referencia correspondiente a la estructura, o parte de ella, en m ² , a la altura z , sobre la que actúa la presión (m ²)
A_s	Área total de la superficie interior del volumen (Excluyendo las losas sobre el terreno) (m ²)
a	Ancho de la zona del coeficiente de presión (ft)
a	Constante de llenado
B	Dimensión horizontal de una edificación medida normal a la dirección del viento (ft)
B	Parámetro B de Holland
C_e	Factor de exposición
C_{ei}	Factor de exposición para presión interna
C_g	Factor de efectos de ráfaga externos
C_{gi}	Factor de efectos de ráfaga internos
C_o	Costo inicial del componente estructural que resiste las presiones de viento asociadas a la velocidad v .
C_p	Coefficiente de presión externa promediado sobre el área de la superficie considerada
C_p	Coefficiente local de presión, que depende de la forma de la estructura
C_p	Coefficiente de presión
C_p	Coefficiente de presión externa para ser utilizado en la determinación de las cargas de viento para edificaciones
C_{pe}	Coefficiente de presión exterior
C_{pi}	Coefficiente de presión interna
C_t	Factor topográfico
$CI(v)$	Costo inicial del componente estructural
$CI(v)_{Datos}$	Costo inicial del componente estructural determinado mediante el análisis de los estados límite del elemento
$CI(v)_{Exp}$	Costo inicial del componente estructural determinado de manera experimental
$CP(v)$	Costo de las pérdidas generadas por la acción del viento
CR	Constante de la función de costo inicial
$CT(v)$	Costo total del componente estructural
c	Velocidad de translación
c	Coefficiente de escala de rugosidad
$c_z(z)$	Factor de exposición
c_{pe}	Coefficiente de presión para la presión externa
$c_{pe,1}$	Coefficiente de presión externa para un área cargada de 1m ²
$c_{pe,10}$	Coefficiente de presión externa para un área cargada de 10m ²

c_{pi}	Coefficiente de presión para la presión interna
D	Ancho del edificio
$EVP(v)$	Valor actual de las pérdidas esperadas
e_s	Presión de vapor de saturación (hPa)
F_T	Factor que depende de la topografía local
F_{TR}	Factor correctivo que toma en cuenta las condiciones locales relativas a la topografía y a la rugosidad del terreno en los alrededores del sitio de desplante
F_z	Factor que toma en cuenta el efecto de las características de exposición local
F_α	Factor que toma en cuenta la variación de la velocidad con la altura
f	Parámetro de Coriolis
G	Factor de corrección por temperatura y por altura con respecto al nivel del mar
G	Factor de efecto de ráfaga
GC_p	Producto del coeficiente de presión externa y el factor de efecto de ráfaga para ser utilizado en la determinación de cargas de viento para edificaciones
GC_{pi}	Producto del coeficiente de presión interna y el factor de efecto de ráfaga para ser utilizado en la determinación de cargas de viento para edificaciones
H	Altura de la colina, pico o acantilado (ft)
H_i	Altura del promontorio o terraplén, medida verticalmente desde el inicio de la cuesta hasta la cresta (m)
h	Altura media del techo (ft)
h_m	Altitud (msnm)
h_{strip}	Altura de franjas horizontales para edificaciones cuya altura h es más grande que $2b$
I	Intensidad relativa del ciclón tropical
I_w	Factor de importancia para cargas de viento
K_1, K_2, K_3	Multiplicadores para obtener K_z
K_A	Factor de reducción de presión por tamaño de área
K_d	Factor de direccionalidad del viento
K_e	Factor de elevación del terreno
K_b	Coefficiente de exposición a la presión de velocidad evaluado a una altura $z=h$
K_L	Factor de presión local
K_{ra}	Factor de presión para recubrimientos y anclajes
K_z	Coefficiente de exposición a la presión de velocidad evaluado a una altura z
K_{zt}	Factor topográfico
L	Dimensión horizontal de una edificación medida paralela a la dirección del viento (ft)
L_b	Distancia contra el viento de la colina, pico o acantilado a donde la diferencia en la elevación del terreno es la mitad de la colina, pico o acantilado
L_w	Distancia horizontal en barlovento medida desde $H_i/2$ hasta la cresta del promontorio o terraplén (m)
L_v	Escala longitudinal para determinar la variación vertical de FT, se toma el valor mayor entre $0.36 L_w$ y $0.4 H_i$ (m)
L_w	Escala longitudinal para determinar la variación horizontal de FT, se toma igual a $4 L_1$ para promontorio o terraplén en barlovento e igual a $10 L_1$ para terraplenes en sotavento (m)

N_c	Proceso de Poisson
n	Periodo de referencia (años)
P_s	Probabilidad anual de la velocidad del viento que excede una magnitud dada
$P_s (v > V)$	Probabilidad anual de excedencia para los vientos combinados
P_n	Probabilidad de exceder la velocidad de viento de diseño durante n años
$P_{NH} (v < V)$	Probabilidad anual de no excedencia para los vientos no huracanados
$P_H (v < V)$	Probabilidad anual de no excedencia para los vientos huracanados
p	Presión de viento de diseño (psf)
p	Presión externa especificada actuando estáticamente y en una dirección normal a la superficie ya sea actuando como una presión direccionada hacia la superficie (presión positiva) o como una succión direccionada alejándose de la superficie (presión negativa)
p_c	Presión central (Pa)
p_{da}	Presión ambiente que se toma igual a 101300 (Pa)
p_{dc}	Valor mínimo sostenible de la presión central de superficie de aire seco (Pa)
p_e	Presión exterior (N/m ²)
p_i	Presión interior (N/m ²)
p_i	Presión interna especificada actuando estáticamente y en una dirección normal a la superficie ya sea actuando como una presión direccionada hacia la superficie (presión positiva) o como una succión direccionada alejándose de la superficie (presión negativa)
p_n	Presión neta (N/m ²)
Q	Factor proporcional del costo inicial que mide la importancia de las pérdidas en las edificaciones.
q	Presión de velocidad (psf)
q	Presión de velocidad de referencia (Pa)
q_b	Presión de velocidad básica
q_b	Presión de velocidad evaluada a una altura $z=h$ (lb/ft ²)
$q_p(z)$	Presión de velocidad pico
$q_p(z_s)$	Presión de velocidad pico
$q_p(z_i)$	Presión de velocidad pico
q_z	Presión de velocidad evaluada a una altura z (lb/ft ²)
q_z	Presión dinámica de base del viento (N/m ²)
R	Periodo de retorno
R_{max}	Radio a las velocidades máximas de viento medido desde el centro del ciclón tropical
T_s	Temperatura de la superficie del mar (°K)
\bar{T}	Tiempo medio de llegada
t	Horas después de la llegada a tierra del ciclón tropical
V	Velocidad básica de viento de diseño (mi/h)
V_A	Máxima velocidad de viento huracanado
V_D	Velocidad de diseño (m/s)
V_D	Velocidad de diseño (km/h)
V_o	Volumen interno (m ³)
V_R	Velocidad regional según la zona que le corresponde al sitio en donde se construirá la estructura (m/s)

V_r	Velocidad regional de ráfaga que le corresponde al sitio en donde se construirá la estructura (km/h)
v	Velocidad de viento de diseño
v_o	Velocidad de viento de diseño para la cual el componente estructural resiste las presiones de viento resultantes
W	Ancho del edificio
w_e	Presiones de viento que actúan en las superficies externas de la estructura
w_i	Presiones de viento que actúan en las superficies internas de la estructura
X_r	Distancia horizontal en barlovento o sotavento, medida entre la estructura y la cresta del promontorio o terraplén. Puede tener valor positivo o negativo (m)
X_r	Variable indicadora
x	Distancia en contra o a favor del viento en de la cresta (ft)
z	Altura por encima del terreno natural, a la cual se desea conocer la velocidad de diseño (m)
z	Altura sobre el nivel del terreno (ft)
z_e	Altura de referencia para la presión externa
z_g	Altura nominal de la capa límite atmosférica (ft)
z_i	Altura de referencia para la presión interna
z_{min}	Constante de exposición (ft)
z_r	Altura de referencia de la estructura medida desde el nivel promedio del terreno (m)
Δp	Diferencia entre la presión central de la tormenta y el campo lejano de presión en el momento en el cual la tormenta llega a tierra
$\Delta p(t)$	Diferencia entre la presión central de la tormenta y el campo lejano de presión (tomado normalmente como la presión asociada con la isobara cerrada más externa) (mb)
Ω	Presión barométrica (mm Hg)
Ω	Rotación de la tierra con 2π /día
α	Constante de la función de costo inicial
α	Exponente de la ley de potencia de velocidad de ráfaga de 3 segundos
α	Exponente que determina la forma de la variación de la velocidad del viento con la altura
α	Exponente que determina la forma de la variación de la velocidad del viento con la altura
δ	Medida de la flexibilidad de la envolvente de la edificación y es el promedio de la deflexión hacia afuera del volumen de la envolvente por incremento unitario en la presión interna (m^3/N)
δ	Altura gradiente, medida a partir del nivel del terreno de desplante, por encima de la cual la variación de la velocidad del viento no es importante y se puede suponer constante (m)
δ	Altura gradiente (m)
ϵ_B	Variable aleatoria normalmente distribuidas de media cero
ϵ_e	Residual de las ecuaciones predictivas, las cuales se modelan como variables aleatorias normalmente distribuidas de media cero
ϵ_r	Residual de las ecuaciones predictivas, las cuales se modelan como variables aleatorias normalmente distribuidas de media cero
ϵ_{inRmax}	Variable aleatoria normalmente distribuidas de media cero
$\epsilon\theta$	Residual de las ecuaciones predictivas, las cuales se modelan como variables aleatorias normalmente distribuidas de media cero

λ	Tasa de ocurrencia para el proceso de Poisson \mathcal{N} .
μ	Tasa neta anual de descuento del valor del dinero
$\nu(v)$	Tasa de demanda excedente que produce una falla estructural cuando el componente ha sido diseñado para una velocidad de viento " v "
ρ	Densidad del aire, que depende de la altitud, temperatura y presión barométrica que se espera en la región durante tormentas de viento
θ	Dirección definida de 0° a 180° y de 0° a -180° del ciclón tropical, con los valores positivos y negativos que representan los sentidos en dirección de las manecillas del reloj y en contra de las manecillas del reloj respectivamente
ψ	Latitud (Grados)

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

Las pérdidas obtenidas debido a los daños ocasionados por la acción del viento sobre aquellas estructuras que están ubicadas en regiones propensas a este tipo de eventos pueden representar una cantidad significativa en torno al valor de las pérdidas materiales. La región de la Florida es una de las regiones más afectadas por la acción de tormentas tropicales y huracanes que llegan a tierra. En el periodo comprendido entre el año 1851 y el año 2021 se registraron un total de 154 tormentas tropicales y 123 huracanes.

Un ejemplo claro de la magnitud de los daños ocasionados por la acción de estos fenómenos observa en el reporte de las pérdidas residenciales no deducibles por huracanes para cada código postal de la región de Florida en el año 2004, las cuales alcanzan a ser del orden de hasta el 8.09% del valor residencial total de cada zona (Florida International University, 2019). Este tipo de escenarios muestran la necesidad de desarrollar nuevas metodologías de diseño para mejorar el desempeño de las estructuras, entre las cuales destaca el diseño basado por desempeño. Se pueden destacar algunos ejemplos de la aplicación de esta metodología a estructuras sometidas a la acción del viento como lo es el abordaje del criterio de diseño para el costo mínimo de vida útil de edificaciones (Wen et al., 2001) o los costos de intervención resultantes del daño inducido por viento en edificios altos (Cui et al., 2015).

En la actualidad no se cuenta con información documentada sobre la aplicación de un criterio de diseño por desempeño y específicamente, de un criterio de diseño óptimo aplicado a estructuras de recubrimiento compuestas por elementos de aluminio. El costo inicial de la envolvente de una edificación, específicamente para estructuras compuestas por elementos de aluminio, está influenciado principalmente por la magnitud de las presiones de viento a las cuales estará sujeta la estructura. Estas presiones no sólo se ven afectadas por la velocidad básica de diseño, la cual depende de la ubicación geográfica de la edificación, sino que también intervienen otros factores como lo son aquellos de carácter topográfico, la rugosidad del terreno que rodea la estructura y su extensión o las dimensiones de la edificación. Otro factor que influencia el costo de los elementos que componen la envolvente de la edificación es la resistencia al impacto de misiles en regiones propensas a huracanes; sin embargo, la variación del costo inicial de los sistemas de fachada debido a este fenómeno no está incluida en el alcance de este trabajo.

1.2 Objetivo y metodología

El objetivo principal de esta investigación es determinar el valor óptimo de la velocidad de viento de diseño para un sistema de fachada compuesta por elementos de aluminio, minimizando el costo total por tiempo de vida útil de la estructura. Para obtener este valor, se estimará la variación de los costos iniciales asociados a los elementos estructurales a medida que se aumenta la velocidad básica de diseño y a su vez, la presión de viento de diseño. Se determinarán también las curvas del valor presente de pérdidas esperadas de acuerdo con los valores reportados en la literatura para los costos de intervención.

La metodología definida para lograr el objetivo principal de este trabajo consiste en lo siguiente:

- Determinar la presión de viento de diseño con base en la metodología definida en ASCE 7-22 para componentes y recubrimientos para el intervalo de velocidades definidas en el presente trabajo.
- Especificar los diferentes elementos que componen el sistema de fachada con base en el cumplimiento de los estados límite definidos para cada uno de estos bajo la acción de las presiones de diseño calculadas anteriormente.
- Determinar las curvas de costo inicial real de los materiales con base en costos reportados por los diferentes proveedores.
- Obtener los coeficientes CR y α para cada uno de los elementos estructurales analizados, los cuales permiten obtener datos experimentales del costo inicial de dichos elementos.
- Estimar la influencia del costo inicial de cada uno de los elementos estructurales en el costo inicial por unidad de área de los sistemas de fachada a medida que se aumenta la velocidad de viento de diseño.
- Determinar la variación de los costos obtenidos por unidad de área al considerar procesos de fabricación y producción propios de los sistemas de fachadas respecto a los definidos al considerar únicamente el costo de los elementos que componen el sistema.
- Comparar los resultados obtenidos para los valores óptimos de las velocidades de viento de diseño en función de los diferentes valores de los coeficientes del factor Q .

1.3 Justificación

La necesidad de definir un criterio de diseño óptimo para los elementos que componen la fachada de la edificación está justificada en que los códigos de diseño, como lo es ASCE 7-22 para el caso de estudio, define unas velocidades regionales que están asociadas a unos periodos de retorno fijos que no consideran el impacto del costo total de la estructura durante su vida de servicio.

Mediante el criterio de diseño óptimo se define a una velocidad óptima de diseño asociado a un periodo de retorno que podrá variar en comparación a los definidos en las normativas, la cual permitirá determinar si la envolvente de la estructura en análisis está subdimensionada o sobredimensionada.

1.4 Alcance y limitaciones

Este trabajo se limita a estudiar la variación de los costos iniciales de los elementos que componen un sistema de fachada en aluminio bajo la metodología definida en ASCE 7-22 para componentes y recubrimientos. Adicionalmente, se considera que la edificación en estudio consiste en un edificio con una altura de 250 pies, la geometría y ubicación definidas en el capítulo 3 de este trabajo.

Únicamente se considerarán las fallas asociadas a los estados límite de cada elemento en la estimación de los costos esperados por pérdidas y la relación de estas fallas con la variación de la velocidad de viento de diseño. La variación del costo inicial de los sistemas de fachada debido a la resistencia al impacto de misiles en regiones propensas a huracanes no estará incluida en el alcance de este trabajo.

Se presentarán los resultados de la capacidad de los diferentes elementos estructurales bajo la acción de las presiones de viento calculadas. No se incluirá en la revisión de la literatura de este trabajo la definición de cada uno de dichos estados límite.

En las consideraciones de la estimación de los costos presentes del valor de las pérdidas esperadas, se considera que la excedencia de un estado límite en cualquiera de los elementos implica una falla total en el elemento en estudio. No se consideran fallas parciales en los elementos de la envolvente.

La estimación del valor óptimo para las velocidades de viento de diseño bajo la acción de presiones de viento definidas mediante otras metodologías, diferentes geometrías, ubicaciones, categorías de riesgo, categorías de exposición o bajo la acción del impacto de misiles en regiones propensas a huracanes se analizarán en estudios posteriores.

CAPÍTULO 2

REVISIÓN DE LA LITERATURA

En este capítulo se describe de forma general la metodología de diseño óptimo, haciendo énfasis en la relación entre la tasa de demanda excedente y el periodo de retorno en la ocurrencia de eventos extremos. Posteriormente, se detalla la metodología definida en ASCE 7-22 para el cálculo de las presiones de viento de diseño para componentes y recubrimientos.

2.1 Diseño óptimo

Las velocidades de viento de diseño óptimas se determinarán mediante el procedimiento definido por Esteva (1970), aplicado inicialmente para la regionalización sísmica en territorio mexicano.

El costo inicial del componente estructural $CI(v)$ está dado por la siguiente expresión

$$CI(v) = \begin{cases} C_o & \text{si } v < v_o \\ C_o + C_R(v - v_o)^\alpha & \text{si } v \geq v_o \end{cases} \quad (2.1)$$

Si se normaliza la ecuación 2.1 respecto al costo inicial de los componentes estructurales C_o , se tiene la siguiente ecuación

$$\frac{CI(v)}{C_o} = \begin{cases} 1 & \text{si } v < v_o \\ 1 + \frac{C_R}{C_o}(v - v_o)^\alpha & \text{si } v \geq v_o \end{cases} \quad (2.2)$$

2.1.2 Costo de pérdidas esperadas

Se propone un modelo simplificado similar al presentado por López et al. (2008), en el cual se asume que cada vez que se excede la velocidad de viento de diseño v , se producirá un costo de pérdida del componente estructural que se analiza.

De acuerdo con Rosenbleuth (1976), si se asume que el peligro del viento sigue un proceso de Poisson y que el valor actualizado del dinero está descrito adecuadamente por una función exponencial, el valor actual de las pérdidas esperadas, $EVP(v)$, cuando la estructura se diseña para resistir la velocidad de viento está dada por:

$$EVP(v) = CP(v) * \frac{\nu(v)}{\mu} \quad (2.3)$$

El costo de las pérdidas incluye más que sólo considerar el daño componentes de la edificación; dado que las pérdidas en la edificación afectan el desempeño económico de alguna manera, las pérdidas totales son mayores que justo las pérdidas materiales (Ordaz et al, 1989). Tomando esto en cuenta, se tiene la siguiente expresión

$$CP(v) = CI(v) * (1 + Q) \quad (2.4)$$

La ecuación 2.3 se puede expresar de la siguiente forma

$$EVP(v) = CI(v) * (1 + Q) * \frac{v(v)}{\mu} \quad (2.5)$$

2.1.3 Costo total

El costo total $CT(v)$ es el costo objetivo que se debe minimizar, el cual está dado por

$$CT(v) = CI(v) + EVP(v) = CI(v) * [1 + (1 + Q) * \frac{v(v)}{\mu}] \quad (2.6)$$

o,

$$\frac{CT(v)}{c_o} = \frac{CI(v)}{c_o} * [1 + (1 + Q) * \frac{v(v)}{\mu}] \quad (2.7)$$

donde $\frac{CI(v)}{c_o}$ está dado en la ecuación 2.2

2.1.3.1 Relación entre tasa de demanda excedente $v(v)$ y periodo de retorno R en la ocurrencia de eventos extremos

De acuerdo con Wang (2020), para el análisis de valores extremos las distribuciones estadísticas más ampliamente utilizadas para describir valores extremos son la distribución generalizada de Pareto (GPD por sus siglas en inglés) y la distribución generalizada de valores extremos en cualquiera de sus tres formas (GEV por sus siglas en inglés). En las secciones posteriores se hará referencia a la distribución generalizada de Pareto y la distribución generalizada de valores extremos como GPD y GEV, respectivamente.

Se puede establecer una relación entre la tasa de demanda excedente $v(v)$ y el periodo de retorno R . En primer lugar, se asume que la ocurrencia de extremos que exceden un límite grande sigue un proceso de Poisson para ser consistente con el modelo GPD.

Si N_T es un proceso de Poisson con tasa de ocurrencia λ , entonces la probabilidad de que al menos un evento en el intervalo de tiempo $(0, T]$ es $1 - e^{-(\lambda T)}$ y el tiempo medio de llegada es $\bar{T} = \frac{1}{\lambda}$. Por lo tanto, la probabilidad de que hay al menos un evento en $(0, T]$ es $1 - e^{(-T/\bar{T})}$ y $1 - e^{(-1/\bar{T})}$ es la probabilidad de que hay al menos un evento dentro de un intervalo unitario de tiempo (Por ejemplo 1 año).

El término tiempo medio de llegada es más comúnmente llamado como intervalo medio de recurrencia (MRI por sus siglas en inglés) o intervalo promedio de recurrencia (ARI por sus siglas en inglés). En las secciones posteriores se hará referencia al intervalo medio de recurrencia como MRI.

Sea X_t una variable indicadora que muestra si en $(t, t+1]$ al menos un evento ocurre o no, por ejemplo

$$X_t = f(x) = \begin{cases} 1, & \text{cuando } N_{t+1} - N_t > 0 \\ 0, & \text{de lo contrario} \end{cases} \quad (2.8)$$

Luego X_t es Bernoulli distribuida con probabilidades

$$P\{X_t = 1\} = 1 - e^{-\frac{1}{\bar{T}}} \quad (2.9)$$

$$P\{X_t = 0\} = e^{-\frac{1}{\bar{T}}} \quad (2.10)$$

El tiempo τ tomado de un evento a siguiente tiene una distribución geométrica

$$P\{\tau = k\} = e^{-(k-1)/\bar{T}} (1 - e^{-1/\bar{T}}) \quad (2.11)$$

El valor esperado de τ es $\frac{1}{1 - e^{-1/\bar{T}}}$, el cual se define convencionalmente en aplicaciones de ingeniería como periodo de retorno R . Por lo tanto,

$$\frac{1}{R} = 1 - e^{-1/\bar{T}} \quad (2.12)$$

El dominio de R es $(1, \infty)$ y el de \bar{T} es $(0, \infty)$. La diferencia en los dominios de R y \bar{T} se vuelve consecuente cuando, por ejemplo, R es el periodo de retorno en años de un evento, este será incapaz de considerar la ocurrencia de eventos sub anuales, mientras \bar{T} está libre de esta limitación, como se muestra en la Fig 2.1. La Fig 2.1 muestra que la diferencia entre el periodo de retorno y el tiempo medio de recurrencia es significativa cuando son menores a 5.

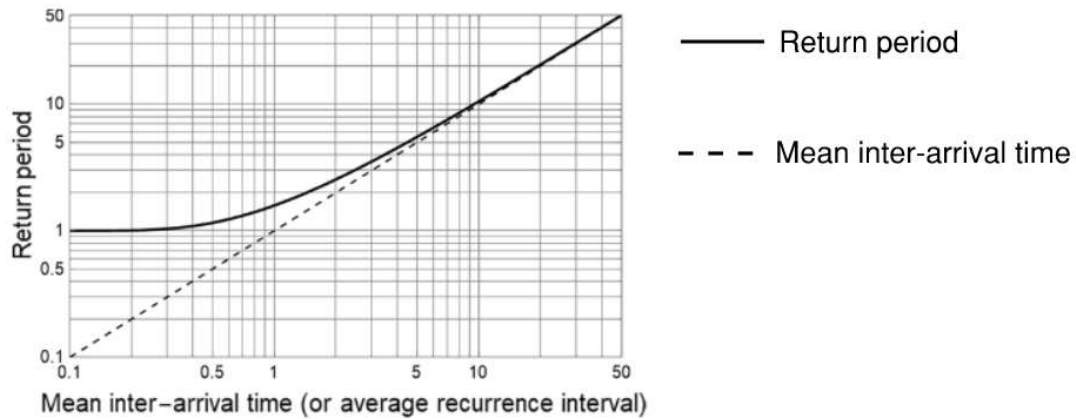


Fig 2.1 Relación entre periodo de retorno e intervalo medio de recurrencia. *Nota.* Adaptado de “Exceedance rate, exceedance probability, and the duality of GEV and GPD for extreme hazard analysis” (p. 1309) por

Wang, CH., et al., 2020. *Nat Hazards* 102, 1305–1321.

Nótese que

$$\lim_{\bar{T} \rightarrow \infty} [R(\bar{T}) - \bar{T}] = \lim_{\bar{T} \rightarrow \infty} \left[(1 - e^{-1/\bar{T}})^{-1} - \bar{T} \right] = \frac{1}{2} \quad (2.13)$$

La diferencia asintótica de $1/2$ puede ser considerada insignificante cuando son mayores a 10, dependiendo de las aplicaciones.

Si existen múltiples mecanismos de generación en un sitio para un tipo de peligro, por ejemplo, peligro de ráfaga de viento generado por tormentas de viento sinópticas y no sinópticas, los peligros individuales necesitan ser combinados estadísticamente. Denote las ráfagas de viento no sinópticas y sinópticas con V_{ns} y V_s , respectivamente. Por independencia estadística, la probabilidad de las ráfagas de viento combinadas, V_c , que no excede v es

$$P\{V_c \leq v\} = P\{V_{ns} \leq v\}P\{V_s \leq v\} \quad (2.14)$$

Lo cual es

$$\begin{aligned} P\{V_c > v\} &= 1 - (1 - P\{V_{ns} > v\})(1 - P\{V_s > v\}) \\ &= P\{V_{ns} > v\} + P\{V_s > v\} - P\{V_{ns} > v\}P\{V_s > v\} \end{aligned} \quad (2.15)$$

2.1.3.2 Estimación de las velocidades de viento para las diferentes categorías de riesgo definidas en ASCE 7-22

En la sección C.26.5 de ASCE 7-22 se describe el procedimiento mediante el cual se construyen los mapas de peligro de viento.

2.1.3.2.1 Selección de periodos de retorno

Se encontró que los siguientes periodos de retorno para cada categoría de riesgo son consistentes con las confiabilidades objetivo en la primera fila de la Tabla 2.1.

Categoría de riesgo I: 300 años

Categoría de riesgo II: 700 años

Categoría de riesgo III: 1700 años

Categoría de riesgo IV: 3000 años

Tabla 2.1 Confiabilidades objetivo (Probabilidad anual de falla P_f) e índices de confiabilidad asociados (β) para condiciones de carga que no incluyen sismos, tsunamis o eventos extraordinarios. *Nota.* Adaptado de “Minimum Design Loads for Buildings and other Structures” (p. 3) por American Society of Civil Engineers, 2021.

Basis	Risk Category			
	I	II	III	IV
Failure that is not sudden and does not lead to widespread progression of damage	$P_f = 1.25 \times 10^{-4}$ per year $\beta = 2.5$	$P_f = 3.0 \times 10^{-5}$ per year $\beta = 3.0$	$P_f = 1.25 \times 10^{-5}$ per year $\beta = 3.25$	$P_f = 5.0 \times 10^{-6}$ per year $\beta = 3.5$
Failure that is either sudden or leads to widespread progression of damage	$P_f = 3.0 \times 10^{-5}$ per year $\beta = 3.0$	$P_f = 5.0 \times 10^{-6}$ per year $\beta = 3.5$	$P_f = 2.0 \times 10^{-6}$ per year $\beta = 3.75$	$P_f = 7.0 \times 10^{-7}$ per year $\beta = 4.0$
Failure that is sudden and results in widespread progression of damage	$P_f = 5.0 \times 10^{-6}$ per year $\beta = 3.5$	$P_f = 7.0 \times 10^{-7}$ per year $\beta = 4.0$	$P_f = 2.5 \times 10^{-7}$ per year $\beta = 4.25$	$P_f = 1.0 \times 10^{-7}$ per year $\beta = 4.5$

Notes:

¹The target reliability indexes are provided for a 50-year reference period, and the probabilities of failure have been annualized. The equations presented in Section 2.3.6 are based on reliability indexes for 50 years, because the load combination requirements in Section 2.3.2 are based on the maximum loads for the 50-year reference period.

²Commentary to Section 2.5 includes references to publications that describe the historic development of these target reliabilities for earthquake, tsunami, or extraordinary events.

2.1.3.2.2 Estimación de las velocidades de viento

Las velocidades de viento corresponden a velocidades de ráfaga de 3 segundas a 33 ft (10 m) sobre el nivel del terreno para categoría de exposición C (La exposición C corresponde a todos los casos donde la exposición B o D no aplican. La exposición B aplica para las edificaciones donde prevalece la rugosidad B, que corresponde a áreas urbanas y suburbanas, áreas arboladas u otros terrenos con numerosas obstrucciones estrechamente espaciadas que tienen el tamaño de una vivienda unifamiliar o mayor. La exposición D aplica para las edificaciones donde prevalece la rugosidad D, que corresponde a terrenos planos, áreas no obstruidas y superficies acuáticas. Esta categoría incluye pantanos, salares y superficies de hielo intactas.)

Las velocidades de viento no huracanados para los Estados Unidos continuos se estimaron de datos de velocidades pico de ráfaga recolectadas en 575 estaciones meteorológicas. La estimación se realizó en dos etapas. En la primera, se ajustó un modelo de picos sobre el límite (POT) a los datos de cada estación. El modelo utilizado fue el modelo de proceso de Poisson para permitir que los parámetros del proceso de Poisson sean dependientes del tiempo. Los modelos POT permitieron la estimación de las velocidades de viento para cualquier intervalo medio de recurrencia en todas las estaciones. En la segunda etapa, se utilizó la regresión local para interpolar velocidades de viento en todos los puntos de una malla fina que cubre los estados contiguos para todos los intervalos medios de recurrencia requeridos.

Las velocidades de viento huracanados están basadas en los resultados de un modelo de simulación Monte Carlo. Se utilizan también modelos de simulación de huracanes y de campo de viento, que presentan pequeñas mejoras con respecto a los modelos utilizados en las versiones anteriores de ASCE 7

2.1.3.2.3 Combinación de los datos de las velocidades de viento huracanados y no huracanados

Las velocidades de viento huracanados y no huracanados se estimaron para periodos de retorno que van desde los 10 años hasta los 100,000 años. Los vientos huracanados y no huracanados luego se combinaron como eventos estadísticamente independientes utilizando la ecuación 2.16, de manera similar al procedimiento descrito en la sección 2.1.3.1.

$$P_a(v > V) = 1 - P_{NH}(v < V)P_H(v < V) \quad (2.16)$$

Los vientos combinados fueron interpolados para producir las curvas de peligro de vientos combinados para los intervalos medios de recurrencia para cada uno de los mapas de velocidades del viento.

2.1.3.2.3 Relación entre probabilidad anual de excedencia, intervalo medio de recurrencia y periodo de retorno

La probabilidad P_n de que la velocidad del viento asociada con cierta probabilidad anual P_a sea igualada o excedida al menos una vez durante un periodo de exposición de n años es

$$P_n = 1 - (1 - P_a)^n \quad (2.17)$$

$$P_a = 1 - e^{\left(-\frac{1}{MRI}\right)} \quad (2.18)$$

Para intervalos medios de recurrencia de alrededor de 10 años o más, P_a es muy estrechamente aproximado al recíproco del intervalo medio de recurrencia: $P_a = \frac{1}{MRI}$.

Como un ejemplo, si una velocidad del viento está basada en una probabilidad anual $P_a = 0.02$ /año (MRI de 50 años), la probabilidad de que esta velocidad sea igualada o excedida (al menos una vez) durante un periodo de 25 años es 0.40 (por ejemplo 40%) y la probabilidad de ser igualada o excedida en un periodo de 50 años es 64%. De manera similar, si una velocidad de viento está basada en $P_a = 0.00143$ (MRI de 700 años), la probabilidad de que esta velocidad sea igualada o excedida durante un periodo de 25 años es 3.5% y la probabilidad de ser igualada o excedida en un periodo de 50 años es 6.9%.

De la ecuación 2.18 se puede verificar también que para intervalos medios de recurrencia de 10 o más años se cumple que

$$\frac{1}{R} = P_a \quad (2.19)$$

2.2 Cálculo de presiones de viento para componentes y recubrimientos según ASCE 7-22

Los recubrimientos son aquellos elementos presentes en la envolvente de la edificación que se encargan de recibir directamente las cargas de viento y transmitirlas a los elementos denominados como componentes. Los componentes reciben las cargas directamente de los recubrimientos y transfieren la carga al sistema principal de resistencia a la fuerza del viento (American Society of Civil Engineers, 2021).

Las presiones de viento de diseño derivadas de la metodología definida en el capítulo 30 de ASCE 7-22 representan la diferencia de presión entre las superficies exterior e interior de la envolvente externa de la edificación, ya sea que considere sistemas de muro o de techo. Cada elemento de los componentes y recubrimientos debe ser diseñado para las presiones máximas positivas y negativas (incluyendo las presiones internas aplicables) actuando sobre él. Los valores de los coeficientes de presión deben ser determinados para cada elemento de los componentes y recubrimientos con base en su ubicación sobre la edificación y el área efectiva del elemento.

La presión de viento de diseño que actúa sobre los componentes y recubrimientos de edificaciones con una altura media del techo $h > 60\text{ft}$ está dada por la ecuación 30.4-1 de ASCE 7-22, la cual se muestra a continuación.

$$p = q * K_d(G * C_p) - q_i * K_d(G * C_{pi}) \quad (2.8)$$

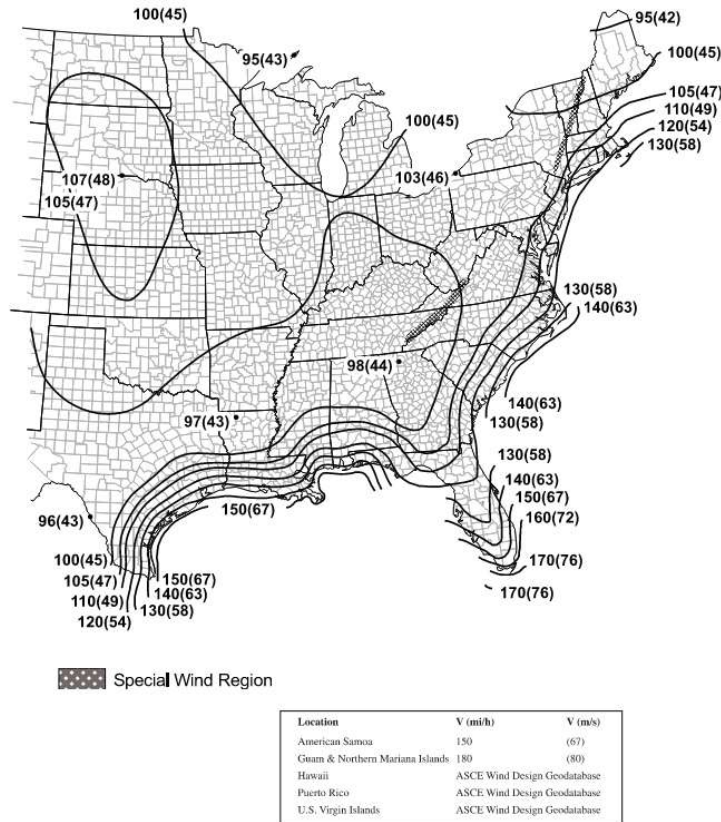
A continuación, se describen los diferentes parámetros que intervienen en el cálculo de la presión de viento de diseño.

2.2.1 Velocidad básica de diseño V

La velocidad básica de diseño utilizada en las cargas de viento de diseño en edificaciones y otras estructuras debe ser determinada de las figuras 26.5-1A a 26.5-1D de ASCE 7-22. Estas velocidades corresponden a valores de ráfagas de viento de 3s en mi/h (ó m/s) a 33 pies (10 m) sobre el nivel del suelo para categoría de exposición C. La probabilidad de excedencia varía en función de la categoría de riesgo definida para la edificación.

Se debe asumir que el viento viene de cualquier dirección horizontal. La velocidad básica de viento debe ser incrementada donde los registros o la experiencia indiquen que las velocidades de viento son mayores que las reflejadas en las figuras 26.5-1A a 26.5-1D de ASCE 7-22

Se muestran a continuación las velocidades básicas de viento con probabilidad de excedencia de aproximadamente 15% en 50 años (Probabilidad anual de excedencia = 0.00143, Periodo de retorno = 700 años) para una estructura clasificada en categoría de riesgo II, correspondiente a la edificación en estudio.



5. Wind speeds for Hawaii, US Virgin Islands, and Puerto Rico shall be determined from the ASCE Wind Design Geodatabase.
 6. Mountainous terrain, gorges, ocean promontories, and special wind regions shall be examined for unusual wind conditions. Site-specific values for selected special wind regions shall be permitted to be determined using the ASCE Wind Design Geodatabase.
 7. Wind speeds correspond to approximately a 15% probability of exceedance in 50 years (Annual Exceedance Probability = 0.0033, MRF = 300 years).
 8. The ASCE Wind Design Geodatabase can be accessed at the ASCE 7 Hazard Tool (<https://asce7hazardtool.online>) or approved equivalent.

Fig 2.2 Velocidades básicas de viento para edificaciones y otras estructuras de categoría de riesgo II. *Nota.* Adaptado de “Minimum Design Loads for Buildings and other Structures” (p. 269) por American Society of Civil Engineers, 2021.

2.2.2 Direccionalidad del viento K_d

El factor de direccionalidad del viento K_d debe ser determinado de la tabla 26.6-1 de ASCE 7-22 y debe ser incluido en las cargas de viento calculadas. Este factor considera dos efectos: la probabilidad reducida de vientos máximos que vienen de una dirección dada y la probabilidad reducida del coeficiente máximo de presión que ocurren de una dirección de viento dada.

En la Tabla 2.1 se muestran los valores definidos en ASCE 7-22 para el factor de direccionalidad del viento K_d en función del tipo de estructura.

Tabla 2.2 Valores del factor de direccionalidad K_d Nota. Adaptado de “Minimum Design Loads for Buildings and other Structures” (p. 274) por American Society of Civil Engineers, 2021.

Structure Type	Directionality Factor K_d
Buildings	
Main wind force resisting system	0.85
Components and cladding	0.85
Arched roofs	0.85
Circular domes	1.0*
Chimneys, tanks, and similar structures	
Square	0.90
Hexagonal	0.95
Octagonal	1.0*
Round	1.0*
Solid freestanding walls, roof top equipment, and solid freestanding and attached signs	0.85
Open signs and single-plane open frames	0.85
Trussed towers	
Triangular, square, or rectangular	0.85
All other cross sections	0.95

*Directionality factor $K_d = 0.95$ shall be permitted for round or octagonal structures with nonaxisymmetric structural systems.

2.2.3 Categoría de exposición

Para cada dirección seleccionada, la exposición contra el viento debe estar basada en la rugosidad de la superficie del suelo que está determinada por la topografía natural, la vegetación y las instalaciones construidas.

Para cada dirección seleccionada en la cual se determinarán las cargas de viento, la exposición de la edificación o estructura debe ser determinada para los dos sectores contra el viento extendidos 45 grados en cada lado de la dirección del viento seleccionada. La exposición en estos dos sectores debe ser determinada de acuerdo con las secciones 26.7.2 y 26.7.3 de ASCE 7-22 y se debe utilizar la exposición que resulte en las mayores cargas de viento para representar las cargas de viento desde esa dirección.

Categorías de rugosidad de superficie: Se debe determinar una rugosidad de la superficie del suelo dentro de cada sector a 45 grados para una distancia contra el viento del sitio como se define en la sección 26.7.3 de ASCE 7-22 para las categorías definidas en el siguiente texto, para el propósito de asignar una categoría de exposición como se define en la sección 26.7.3 de ASCE 7-22.

Rugosidad del terreno B: Áreas urbanas y suburbanas, áreas arboladas u otros terrenos con numerosas obstrucciones estrechamente espaciadas que tienen el tamaño de una vivienda unifamiliar o mayor.



Fig 2.3 Ejemplo de rugosidad de terreno tipo B. *Nota.* Adaptado de “Minimum Design Loads for Buildings and other Structures” (p. 876) por American Society of Civil Engineers, 2021.

Rugosidad del terreno C: Terreno abierto con obstrucciones dispersas que tienen alturas generalmente menores que 30 ft (9.1 m). Esta categoría incluye terrenos planos, campo abierto y pastizales.



Fig 2.4 Ejemplo de rugosidad de terreno tipo C. *Nota.* Adaptado de “Minimum Design Loads for Buildings and other Structures” (p. 877) por American Society of Civil Engineers, 2021.

Rugosidad del terreno D: Terrenos planos, áreas no obstruidas y superficies acuáticas. Esta categoría incluye pantanos, salares y superficies de hielo intactas.



Fig 2.5 Ejemplo de rugosidad de terreno tipo D. *Nota.* Adaptado de “Minimum Design Loads for Buildings and other Structures” (p. 877) por American Society of Civil Engineers, 2021.

Categorías de exposición

Exposición B: Para edificaciones u otras estructuras con una altura media del techo menor o igual a 30 ft (9.1 m), la exposición B aplicará donde la rugosidad de la superficie del suelo, según lo definido en la rugosidad de superficie B, prevalece en la dirección contra el viento para una distancia mayor a 1500 ft (457 m). Para edificaciones u otras estructuras con una altura media del techo mayor a 30 ft (9.1 m), la exposición B aplicará donde la rugosidad de superficie B prevalece en la dirección contra el viento para una distancia mayor a 2600 ft (792 m) o 20 veces la altura de la edificación o estructura, cualquiera sea la mayor.

Exposición C: La exposición C aplica para todos los casos dónde la exposición B o D no aplican.

Exposición D: La exposición D aplicará donde la rugosidad de la superficie del suelo, según lo definido en la rugosidad de superficie D, prevalece en la dirección contra el viento para una distancia mayor a 5000 ft (1524 m) o 20 veces la altura de la edificación o estructura, cualquiera sea la mayor. La exposición D también aplicará donde inmediatamente, la superficie del suelo del sitio contra el viento sea B o C y la edificación o estructura está dentro de una distancia de 600 ft (183 m) o 20 veces la altura de la edificación o estructura, cualquiera sea la mayor, desde una condición de exposición D según lo definido en la frase anterior.

Para una edificación localizada en una zona de transición entre categorías de exposición, se utilizará la categoría para la cual resulten en las mayores fuerzas de viento.

2.2.4 Factor topográfico K_z

El efecto de aceleración del viento se incluirá en el cálculo de las cargas de viento de diseño mediante el uso del factor K_z , el cual se define en la ecuación 26.8-1 de ASCE 7-22, como se muestra a continuación.

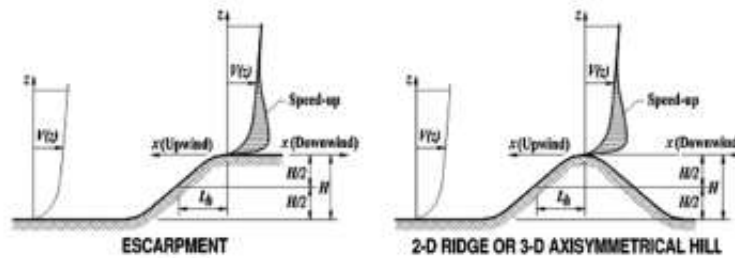
$$K_{zt} = (1 + K_1 K_2 K_3)^2 \tag{2.9}$$

donde K_1 , K_2 y K_3 están dados en la Tabla 2.3. Los valores de K_2 y K_3 no deben ser menores que 0. Las ecuaciones para K_1 , K_2 y K_3 deben ser utilizadas en lugar de utilizar los valores tabulares cuando se requiere mayor precisión en el cálculo de K_z . Para $H/L_h > 0.5$, asumir que $H/L_h = 0.5$ para evaluar K_1 y sustituir $2H$ por L_h para evaluar K_2 y K_3 .

Si las condiciones de sitio y las ubicaciones de las edificaciones y otras estructuras no cumplen todas las condiciones especificadas en la sección 26.8.1 de ASCE 7-22, entonces $K_z = 1.0$.

Tabla 2.3 Valores para factores K_1 , K_2 y K_3 del factor topográfico K_z . *Nota.* Adaptado de “Minimum Design Loads for Buildings and other Structures” (p. 276) por American Society of Civil Engineers, 2021.

Diagrams



Topographic Multipliers^{a,b,c,d}

H / L_h	K_1 Multiplier			x / L_h	K_2 Multiplier			z / L_h	K_3 Multiplier		
	2D Ridge	2D Escarpment	3D Axisymmetrical Hill		2D Escarpment	All Other Cases	2D Ridge		2D Escarpment	3D Axisymmetrical Hill	
0.20	0.29	0.17	0.21	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	
0.25	0.36	0.21	0.26	0.50	0.88	0.67	0.10	0.74	0.78	0.67	
0.30	0.43	0.26	0.32	1.00	0.75	0.33	0.20	0.55	0.61	0.45	
0.35	0.51	0.30	0.37	1.50	0.63	0.00	0.30	0.41	0.47	0.30	
0.40	0.58	0.34	0.42	2.00	0.50	0.00	0.40	0.30	0.37	0.20	
0.45	0.65	0.38	0.47	2.50	0.38	0.00	0.50	0.22	0.29	0.14	
0.50	0.72	0.43	0.53	3.00	0.25	0.00	0.60	0.17	0.22	0.09	
				3.50	0.13	0.00	0.70	0.12	0.17	0.06	
				4.00	0.00	0.00	0.80	0.09	0.14	0.04	
							0.90	0.07	0.11	0.03	
							1.00	0.05	0.08	0.02	
							0.50	0.01	0.02	0.00	
							2.00	0.00	0.00	0.00	

2.2.5 Factor de elevación del suelo K_e

El factor de elevación del suelo para ajustar la densidad del aire K_e se determinará de acuerdo con la Tabla 2.4. Se permite tomar $K_e = 1$ para todas las elevaciones.

Tabla 2.4 Valores del factor de elevación del terreno K_e . *Nota.* Adaptado de “Minimum Design Loads for Buildings and other Structures” (p. 275) por American Society of Civil Engineers, 2021.

Ground Elevation above Sea Level		Ground Elevation Factor, K_e
ft	m	
<0	<0	See note 2
0	0	1.00
1,000	305	0.96
2,000	610	0.93
3,000	914	0.90
4,000	1,219	0.86
5,000	1,524	0.83
6,000	1,829	0.80
>6,000	>1,829	See note 2

Notes:

1. Conservative approximation $K_e = 1.00$ is permitted in all cases.
2. Factor K_e shall be determined from Table 26.9-1 using interpolation or from the following formula for all elevations: $K_e = e^{-0.0000362z_e}$ (z_e = ground elevation above sea level, ft); or $K_e = e^{-0.000119z_e}$ (z_e = ground elevation above sea level, m).
3. K_e is permitted to be taken as 1.00 in all cases.

2.2.6 Coeficiente de exposición a la presión de velocidad K_z o K_h

Con base en la categoría de exposición determinada en la sección 26.7.3 de ASCE 7-22, se determinará un coeficiente de exposición a la presión de velocidad K_z o K_h , según corresponda, de la tabla 26.10-1 de ASCE 7-22. Para un sitio localizado en una zona de transición entre categorías de exposición que están cerca de un cambio en la rugosidad de la superficie del suelo, se permiten valores intermedios de K_z o K_h entre aquellos mostrados en la Tabla 2.5 siempre que sean determinados mediante un método de análisis racional definido en literatura reconocida.

Tabla 2.5 Valores de los coeficientes de exposición a la presión de velocidad K_h y K_z . *Nota.* Adaptado de “Minimum Design Loads for Buildings and other Structures” (p. 277) por American Society of Civil Engineers, 2021.

Height above Ground Level, z or h		Exposure		
ft	m	B	C	D
0-15	0-4.6	0.57 (0.70)*	0.85	1.03
20	6.1	0.62 (0.70)*	0.90	1.08
25	7.6	0.66 (0.70)*	0.94	1.12
30	9.1	0.70	0.98	1.16
40	12.2	0.74	1.04	1.22
50	15.2	0.79	1.09	1.27
60	18.3	0.83	1.13	1.31
70	21.3	0.86	1.17	1.34
80	24.4	0.90	1.21	1.38
90	27.4	0.92	1.24	1.40
100	30.5	0.95	1.26	1.43
120	36.6	1.00	1.31	1.48
140	42.7	1.04	1.34	1.52
160	48.8	1.08	1.39	1.55
180	54.9	1.11	1.41	1.58
200	61.0	1.14	1.44	1.61
250	76.2	1.21	1.51	1.68
300	91.4	1.27	1.57	1.73
350	106.7	1.33	1.62	1.78
400	121.9	1.38	1.66	1.82
450	137.2	1.42	1.70	1.86
500	152.4	1.46	1.74	1.89

*Use 0.70 in Chapter 28, Exposure B, when $z < 30$ ft (9.1 m).

Notas:

1. El coeficiente de exposición a la presión de velocidad K_z se debe determinar de la siguiente fórmula

$$\text{Para } z < 15 \text{ ft} \quad K_z = 2.41 * \left(\frac{15}{z_g}\right)^{\frac{2}{\alpha}} \quad (2.10)$$

$$\text{Para } 15 \text{ ft} \leq z \leq z_g \quad K_z = 2.41 * \left(\frac{z}{z_g}\right)^{\frac{2}{\alpha}} \quad (2.11)$$

$$\text{Para } z_g < z \leq 3280 \text{ ft} \quad K_z = 2.41 \quad (2.12)$$

Los valores de α y z_g están tabulados en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6 Valores de los coeficientes de exposición del terreno α y z_g . Nota. Adaptado de “Minimum Design Loads for Buildings and other Structures” (p. 278) por American Society of Civil Engineers, 2021.

Customary Units										
Exposure	α	z_g (ft)	$\hat{\alpha}$	\hat{b}	$\bar{\alpha}$	\bar{b}	c	l (ft)	\bar{E}	z_{min} (ft)*
B	7.5	3,280	1/7.5	0.84	1/4.5	0.47	0.30	320	1/3.0	30
C	9.8	2,460	1/9.8	1.00	1/6.4	0.66	0.20	500	1/5.0	15
D	11.5	1,935	1/11.5	1.09	1/8.0	0.78	0.15	650	1/8.0	7
SI Units										
Exposure	α	z_g (m)	$\hat{\alpha}$	\hat{b}	$\bar{\alpha}$	\bar{b}	c	l (m)	\bar{E}	z_{min} (m)*
B	7.5	1,000	1/7.5	0.84	1/4.5	0.47	0.30	97.54	1/3.0	9.14
C	9.8	750	1/9.8	1.00	1/6.4	0.66	0.20	152.40	1/5.0	4.57
D	11.5	590	1/11.5	1.09	1/8.0	0.78	0.15	198.12	1/8.0	2.13

* z_{min} = Minimum height used to ensure that the equivalent height \bar{z} is the greater of $0.6h$ or z_{min} . For buildings or other structures with $h \leq z_{min}$, \bar{z} shall be taken as z_{min} .

2. Se acepta la interpolación lineal para valores intermedios de altura z .
3. Las categorías de exposición se definen en la sección 26.7 de ASCE 7-22.

2.3.7 Presión de velocidad q_z

La presión de velocidad q_z evaluada a la altura z sobre el suelo se calculará mediante la ecuación 2.13, como se muestra a continuación.

$$q_z = 0.00256 K_z K_{zt} K_e V^2 \left(\frac{lb}{ft^2}\right); V \left(\frac{mi}{h}\right) \quad (2.13)$$

La presión de velocidad a la altura media del techo se calcula como $q_h = q_z$ evaluada de la ecuación 2.13 utilizando K_z a la altura media del techo h .

2.3.8 Coeficiente de presión interna GC_{pi}

Los coeficientes de presión interna (GC_{pi}) se determinarán de la Tabla 2.7 con base en las clasificaciones del cerramiento de la edificación determinados de la sección 26.12 de ASCE 7-22.

Tabla 2.7 Valores del coeficiente de presión interna GC_{pi} . Nota. Adaptado de “Minimum Design Loads for Buildings and other Structures” (p. 280) por American Society of Civil Engineers, 2021.

Enclosure Classification	Criteria for Enclosure Classification	Internal Pressure	Internal Pressure Coefficient (GC_{pi})
Enclosed buildings	A_o is less than the smaller of $0.01A_g$ or 4 ft^2 (0.37 m^2), and $A_{oi}/A_{gi} \leq 0.2$	Moderate	+0.18 -0.18
Partially enclosed buildings	$A_o > 1.1A_{oi}$, and $A_o >$ the lesser of $0.01A_g$ or 4 ft^2 (0.37 m^2), and $A_{oi}/A_{gi} \leq 0.2$	High	+0.55 -0.55
Partially open buildings	A building that does not comply with Enclosed, Partially Enclosed, or Open classifications	Moderate	+0.18 -0.18
Open buildings	Each wall is at least 80% open	Negligible	0.00

Notas:

1. Los signos más y menos significan presiones actuando hacia y en sentido opuesto de las superficies internas, respectivamente.
2. Los valores de (GC_{pi}) se utilizarán con q_e o q_i según lo especificado.
3. Se considerarán dos casos para determinar los requerimientos de carga crítica para la condición apropiada:

Un valor positivo de (GC_{pi}) aplicado a todas las superficies internas, o

Un valor negativo de (GC_{pi}) aplicado a todas las superficies internas

2.3.9 Clasificación del cerramiento

General: Para el propósito de determinar los coeficientes de presión interna, las edificaciones y otras estructuras para las cuales los coeficientes de presión interna (GC_{pi}) aplican se clasificarán como encerrados, parcialmente encerrados, parcialmente abiertos o abiertos, según lo definido en la sección 26.2 de ASCE 7-22. Si una edificación u otra estructura satisface las dos definiciones de clasificaciones de cerramiento “abierta” y “parcialmente encerrada”, se clasificará como una edificación u otra estructura “parcialmente abierta”.

Aberturas: Se realizará una determinación de las aberturas en la envolvente de la edificación para determinar la clasificación del cerramiento. Para realizar esta determinación, cada muro de la edificación se asumirá como el muro a barlovento para la consideración de la cantidad de aberturas presentes con respecto a la envolvente restante de la edificación.

2.3.10 Coeficiente de presión externa GC_p

. Se muestran los valores definidos para los coeficientes de presión externa de muros y techos planos en la Fig 2.6, los cuales se emplearán en el cálculo de la presión de viento actuante sobre los componentes y recubrimientos de la envolvente.

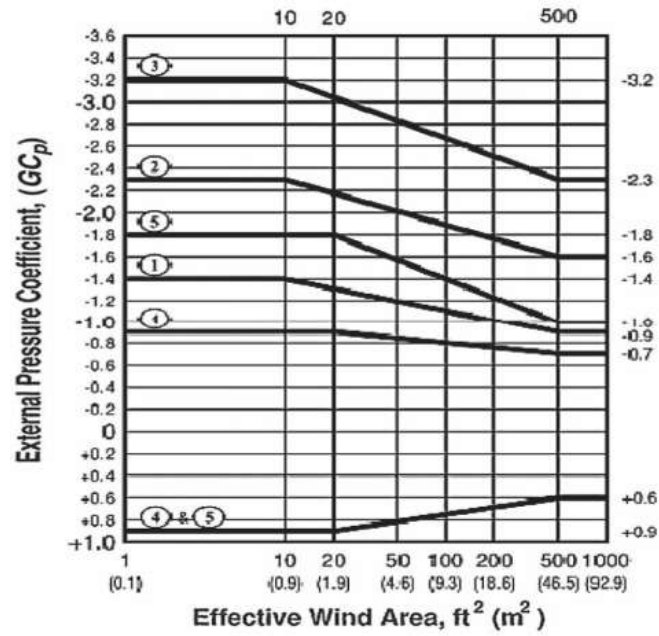


Fig 2.6 Valores del coeficiente de presión externa CG_p para muros y techos planos en edificaciones de altura $h > 60ft$. *Nota.* Adaptado de “Minimum Design Loads for Buildings and other Structures” (p. 334) por American Society of Civil Engineers, 2021.

CAPÍTULO 3

CASO DE ESTUDIO

En este capítulo se realiza una descripción de la edificación que se considerará en el estudio. Posteriormente, se obtendrán las curvas de costo inicial y costo total de los componentes de la fachada y del sistema. Finalmente, se obtienen los valores de las velocidades óptimas de viento para el sistema de fachada considerando diferentes valores del coeficiente Q .

3.1 Descripción de la edificación

Como hipótesis para el desarrollo de la investigación, se considera que la edificación para la cual se evaluará el impacto de la carga de viento sobre los elementos de recubrimiento posee las siguientes características:

- **Altura de la edificación h :** 250 pies
- **Ubicación:** Miami Beach, Florida C.P. 33107
- **Rugosidad de la superficie:** D (La construcción se ubica en la proximidad de una superficie de agua)
- **Categoría de exposición:** C (Según las categorías de exposición definidas en ASCE 7-22)
- **Categoría de riesgo de la edificación:** II (Según las categorías definidas en ASCE 7-22)
- **Velocidad básica de diseño V :** 175 mph
- **Clasificación de la estructura según su irregularidad:** Estructura irregular (Se considera que la estructura es torsionalmente regular bajo carga de viento según lo definido en ASCE 7-22)

A pesar de que el método definido en el capítulo 30 de ASCE 7-22 para el cálculo de la presión de viento actuante en los componentes y recubrimientos indica que está limitado a estructuras con forma regular, se considera que la metodología propuesta cubre un intervalo más amplio que las edificaciones consideradas regulares, como se indica en el comentario de la sección C.26.2.

Se muestra una vista en planta donde se aprecia la irregularidad de la edificación y se definen las zonas de viento tanto para techos (Zonas 1 a 3) como para los muros de la edificación (Zonas 4 y 5) según lo definido en la figura C30.3-2 de ASCE 7-22 para edificaciones con planos no rectangulares.

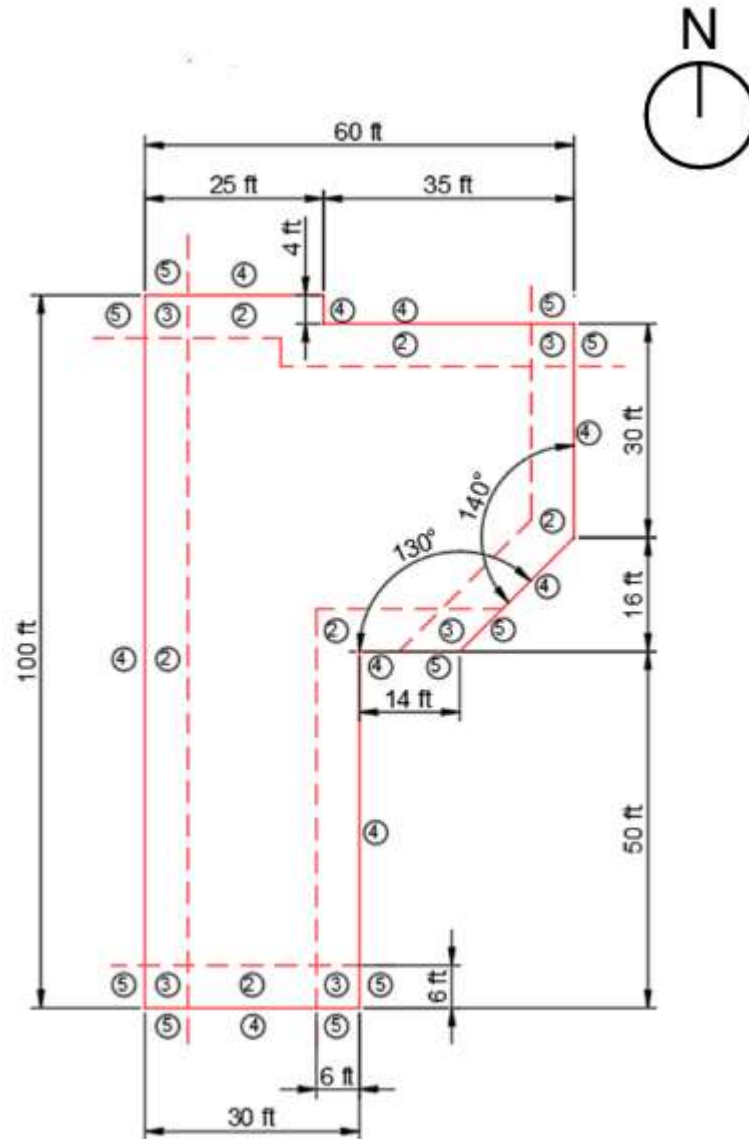


Fig 3.1 Vista en planta de la edificación con sus respectivas zonas de viento para muros y techos según ASCE 7-22

3.2 Curvas de costo inicial de los componentes del sistema

Inicialmente se determinará el costo inicial de los elementos que componen la envolvente de la edificación en función de la velocidad de viento de diseño y, por consiguiente, la presión de viento actuante sobre la fachada.

Las curvas correspondientes al costo inicial real de los componentes de la fachada se construyen con base en el costo del material. Para los elementos de aluminio se tomará como referencia el valor reportado por el London Metal Exchange, el cual es considerado el centro mundial en torno a la actividad relacionada a los metales industriales. El valor utilizado en este estudio es de 2359.5

USD/tonne, correspondiente al reportado el día 11/10/2022 (London Metal Exchange, s.f.). Para la construcción de las curvas de costo inicial de los pernos de anclaje de acero inoxidable, se utilizarán los costos reportados por unidad por Hilti para cada referencia el día 07/04/2023 (Hilti, s.f.)

Adicionalmente, se presentarán las curvas de variación del costo inicial experimental con los datos obtenidos experimentalmente mediante la ecuación 2.1. El cálculo de los parámetros α y CR para cada una de las curvas se realiza mediante un proceso iterativo en la cual se busca minimizar el error obtenido al comparar los datos obtenidos del costo inicial real de los componentes y los estimados mediante la ecuación 2.1. El error se define mediante la siguiente expresión

$$error = \sum (CI(v)_{Datos} - CI(v)_{Exp})^2 \quad (3.1)$$

Se presentan las curvas obtenidas para los diferentes componentes del sistema

3.2.1 Curvas de costo inicial de montantes

La curva correspondiente a la variación del costo inicial de los montantes de la estructura $CI(v)$ vs V se construyó con base en una serie de perfiles tubulares de sección transversal rectangular en aluminio de aleación 6061 T6, los cuales fueron obtenidos de catálogos de proveedores dedicados a la producción de perfiles de aluminio. Se muestran a continuación las secciones consideradas en el análisis.

Tabla 3.1 Secciones de perfiles tubulares utilizados para los montantes de la estructura

Sección Perfil Tubular	Peso [lb/ft]	Peso [kg/m]	Costo [USD/m]
3"x2"x1/8"	1.389	2.07	4.88
4"x2"x1/8"	1.682	2.50	5.91
4"x4"x3/32"	1.714	2.55	6.02
4"x1"x5/16"	1.737	2.59	6.10
5"x2"x1/8"	1.975	2.94	6.94
6"x2"x1/8"	2.267	3.38	7.96
6"x2-1/2"x3/16"	3.093	4.60	10.87
7"x1-1/2"x3/16"	3.575	5.32	12.56
6"x4"x3/16"	4.224	6.29	14.84

Se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones de diseño para determinar la resistencia de los montantes:

- La distancia entre puntos de apoyo es de 10 pies (3048 mm).
- La separación medida entre centros de montantes será de 3.5 pies (1066.8 mm).

En la Tabla 3.2 se muestra la relación de capacidad para los estados límite correspondientes a los montantes. Los estados límite de resistencia se verifican para las cargas de compresión, flexión, cortante y cargas combinadas, tal como lo especifica el código de diseño de estructuras de aluminio

(The Aluminum Association, 2015). Los estados límite de servicio corresponden a los límites definidos en la normativa correspondiente al estado de Florida para las deflexiones de miembros secundarios que soportan recubrimientos de paredes de metal, el cual está definido como $\Delta_{lim} = L/90$ (International Code Council, 2020)

Tabla 3. 2 Relación de capacidad para estados límite de resistencia y servicio en montantes

V [mph]	Elementos Mecánicos		Propiedades Perfiles Tubulares				Relación de Estados Límite de Flexión				Relación de Estados Límite de Cortante			Relación de Estado Límite de Deflexiones			
	Mu [kip-ft]	Vu [kip]	Sección HSS	Peso [lb/ft]	Peso [kg/m]	Costo [USD/m]	Fluencia	Rotura	Pandeo Local	Pandeo Lateral Torsional	Fluencia	Rotura	Pandeo	Fuerzas Combinadas (Flexión + Axial)	Δ [in]	Δ_{adm} [in]	Ratio
80	2.03	1.02	3"x2"x1/8"	1.389	2.07	4.88	65%	72%	50%	78%	7%	8%	29%	78%	0.41	1.33	31%
85	2.30	1.15	3"x2"x1/8"	1.389	2.07	4.88	74%	81%	56%	88%	8%	9%	32%	88%	0.47	1.33	35%
90	2.58	1.29	4"x2"x1/8"	1.682	2.50	5.91	53%	59%	35%	65%	7%	8%	27%	65%	0.26	1.33	19%
95	2.86	1.44	4"x2"x1/8"	1.682	2.50	5.91	59%	65%	39%	72%	8%	8%	30%	72%	0.29	1.33	22%
100	3.18	1.59	4"x2"x1/8"	1.682	2.50	5.91	66%	72%	43%	80%	8%	9%	34%	80%	0.32	1.33	24%
105	3.50	1.75	4"x2"x1/8"	1.682	2.50	5.91	72%	80%	47%	88%	9%	10%	37%	88%	0.35	1.33	26%
110	3.84	1.93	4"x2"x1/8"	1.682	2.50	5.91	79%	88%	52%	96%	10%	11%	41%	96%	0.38	1.33	29%
115	4.20	2.10	4"x4"x3/32"	1.714	2.55	6.02	74%	82%	99%	83%	15%	16%	63%	99%	0.34	1.33	25%
120	4.57	2.29	5"x2"x1/8"	1.975	2.94	6.94	53%	59%	24%	90%	4%	5%	17%	90%	0.32	1.33	24%
125	4.96	2.49	5"x2"x1/8"	1.975	2.94	6.94	72%	79%	43%	89%	11%	12%	44%	89%	0.29	1.33	21%
130	5.37	2.69	5"x2"x1/8"	1.975	2.94	6.94	78%	86%	47%	96%	11%	13%	47%	96%	0.31	1.33	23%
135	5.79	2.90	6"x2"x1/8"	2.267	3.38	7.96	62%	69%	35%	78%	10%	11%	46%	78%	0.21	1.33	16%
140	6.22	3.12	6"x2"x1/8"	2.267	3.38	7.96	67%	74%	38%	84%	11%	12%	49%	84%	0.23	1.33	17%
145	6.67	3.34	6"x2"x1/8"	2.267	3.38	7.96	72%	79%	41%	90%	12%	13%	53%	90%	0.24	1.33	18%
150	7.15	3.58	6"x2"x1/8"	2.267	3.38	7.96	77%	85%	44%	96%	13%	14%	57%	96%	0.26	1.33	19%
155	7.63	3.82	6"x2-1/2"x3/16"	3.093	4.60	10.87	58%	64%	34%	70%	12%	13%	49%	70%	0.19	1.33	14%
160	8.12	4.07	6"x2-1/2"x3/16"	3.093	4.60	10.87	62%	68%	36%	74%	12%	14%	53%	74%	0.20	1.33	15%
165	8.63	4.33	6"x2-1/2"x3/16"	3.093	4.60	10.87	66%	73%	38%	79%	13%	15%	56%	79%	0.21	1.33	16%
170	9.16	4.60	6"x2-1/2"x3/16"	3.093	4.60	10.87	70%	77%	40%	84%	13%	14%	54%	84%	0.23	1.33	17%
175	9.71	4.87	6"x2-1/2"x3/16"	3.093	4.60	10.87	74%	82%	43%	89%	15%	16%	62%	89%	0.24	1.33	18%
180	10.27	5.15	6"x2-1/2"x3/16"	3.093	4.60	10.87	78%	86%	45%	94%	16%	17%	67%	94%	0.25	1.33	19%
185	10.85	5.44	6"x4"x3/16"	4.224	6.29	14.84	68%	76%	32%	96%	11%	12%	44%	96%	0.21	1.33	16%
190	11.44	5.74	6"x4"x3/16"	4.224	6.29	14.84	59%	66%	46%	67%	13%	15%	54%	67%	0.19	1.33	14%
195	12.05	6.05	6"x4"x3/16"	4.224	6.29	14.84	63%	69%	48%	71%	14%	16%	57%	71%	0.20	1.33	15%
200	12.67	6.36	6"x4"x3/16"	4.224	6.29	14.84	66%	73%	51%	74%	15%	16%	60%	74%	0.21	1.33	16%

En la Tabla 3.3 se muestran los parámetros CR y α con los cuales se obtiene el valor mínimo posible mediante la ecuación 3.1 para la curva correspondiente a los montantes de la estructura.

Tabla 3.3 Parámetros CR y α obtenidos para determinar el costo experimental de los montantes

Parámetros Ecuación - Montantes	
CR	0.01
α	1.57
V_0 [mph]	85
C_0 [USD/m]	4.88

En las Fig 3.2 y 3.3 se muestran las curvas $CI(v)$ vs V y $CI(v)/C_0$ vs V respectivamente para los montantes de la estructura.

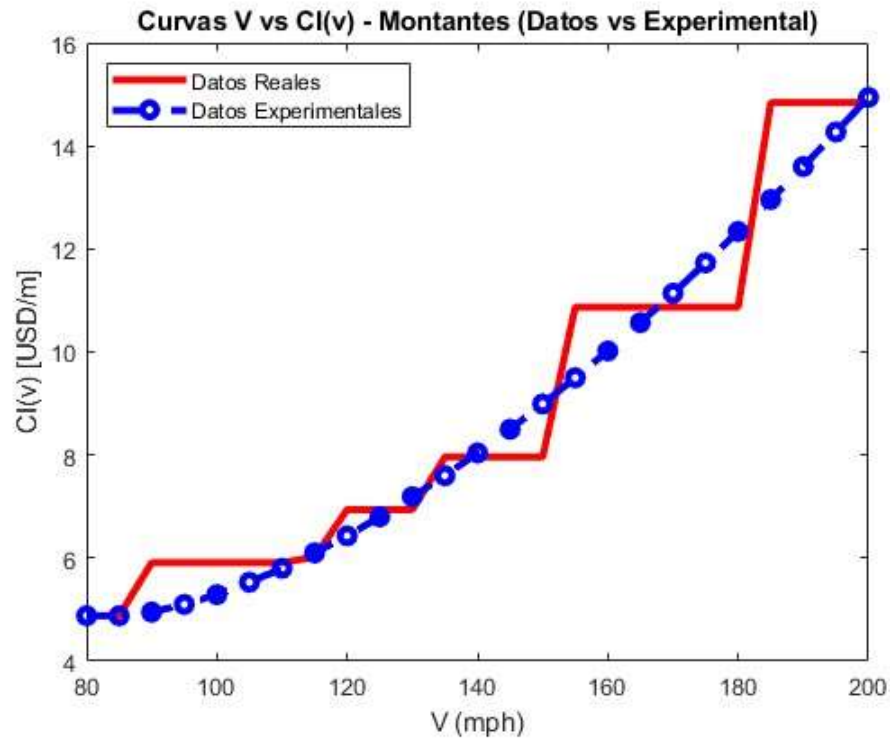


Fig 3.2 Curva de costo inicial $CI(v)$ vs V para montantes

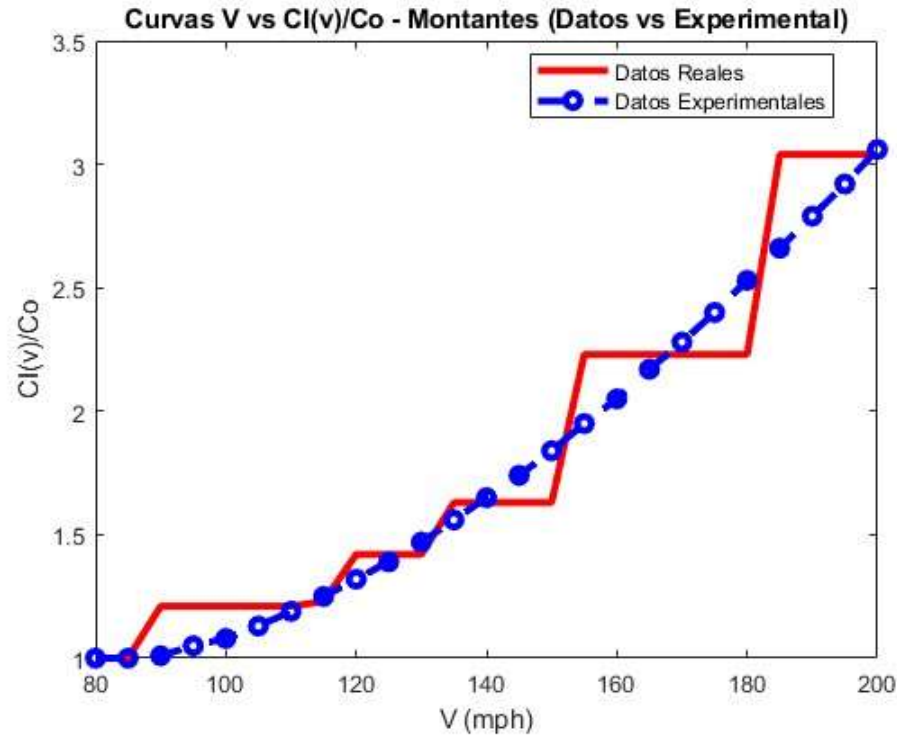


Fig 3.3 Curva de costo inicial normalizado CI(v)/Co vs V para montantes

3.2.2 Curvas de costo inicial de soportes

La curva correspondiente a la variación del costo inicial de los soportes CI(v) vs V se construyó con base en una serie de ángulos de lados iguales y/o desiguales en aluminio de aleación 6061 T6, los cuales fueron obtenidos de catálogos de proveedores dedicados a la producción de perfiles de aluminio. Para la construcción de la curva, se consideró que todas las secciones poseen una longitud de 8" y el costo se determina para un par de ángulos, lo cual es característico en los sistemas de fijación de los montantes de la envolvente a la estructura de soporte. En la Tabla 3.4 se muestran las secciones consideradas en el análisis.

Tabla 3.4 Secciones de ángulos utilizados para los soportes de la estructura

Sección Ángulo	L [in]	Peso [kg]	Costo [USD]
T1 - 3 x 3 x 1/8	8	0.26	1.23
T2 - 3 x 2 x 3/16	8	0.33	1.56
T2 - 3 x 2 x 3/16	8	0.33	1.56
T3 - 3 x 2 x 1/4	8	0.42	2.00
T4 - 3 x 2 x 3/8	8	0.62	2.92

En la Tabla 3.5 se muestra la relación de capacidad para los estados límite correspondientes a los soportes. Los estados límite de resistencia se verifican para las cargas de compresión, flexión y cortante, tal como lo especifica el código de diseño de estructuras de aluminio (The Aluminum

Association, 2015). Los estados límite de servicio corresponden a los límites definidos en la normativa correspondiente al estado de florida para las deflexiones de miembros secundarios en voladizo que soportan recubrimientos de paredes de metal, el cual está definido como $\Delta_{lim} = 2L/90$ (International Code Council, 2020)

Tabla 3.5 Relación de capacidad para estados límite de resistencia y servicio en soportes

V [mph]	Elementos Mecánicos			Propiedades de Soportes				Relación de Estados Límite de Fuerzas Axiales		Relación de Estados Límite de Flexión		Relación de Estados Límite de Cortante		Relación de Estados Límite de Deflexión	
	M2 [kip-ft]	V3 [kip]	P [kip]	Sección Transversal [in]	L [in]	Peso [kg]	Costo [USD]	Pandeo Axial	Fluencia por Flexión - Eje Débil	Rotura por Flexión - Eje Débil	Fluencia	Rotura	Δ [in]	Δ_{adm} [in]	Relación
80	0.04	1.02	0.56	T1 - 3 x 3 x 1/8	8	0.26	1.23	20%	52%	57%	16%	9%	0.014	0.022	61%
85	0.05	1.14	0.63	T1 - 3 x 3 x 1/8	8	0.26	1.23	22%	59%	65%	18%	10%	0.015	0.022	68%
90	0.05	1.27	0.70	T1 - 3 x 3 x 1/8	8	0.26	1.23	25%	65%	72%	20%	12%	0.017	0.022	77%
95	0.06	1.42	0.78	T1 - 3 x 3 x 1/8	8	0.26	1.23	28%	73%	81%	22%	13%	0.019	0.022	86%
100	0.07	1.57	0.87	T2 - 3 x 2 x 3/16	8	0.33	1.56	9%	42%	46%	10%	10%	0.005	0.022	23%
105	0.08	1.75	0.96	T2 - 3 x 2 x 3/16	8	0.33	1.56	10%	46%	51%	11%	11%	0.006	0.022	25%
110	0.09	1.92	1.05	T2 - 3 x 2 x 3/16	8	0.33	1.56	11%	50%	56%	12%	12%	0.006	0.022	27%
115	0.10	2.10	1.15	T2 - 3 x 2 x 3/16	8	0.33	1.56	12%	54%	60%	13%	13%	0.007	0.022	30%
120	0.11	2.28	1.25	T2 - 3 x 2 x 3/16	8	0.33	1.56	13%	60%	66%	14%	14%	0.007	0.022	32%
125	0.12	2.48	1.36	T2 - 3 x 2 x 3/16	8	0.33	1.56	14%	65%	72%	15%	15%	0.008	0.022	35%
130	0.13	2.68	1.47	T2 - 3 x 2 x 3/16	8	0.33	1.56	16%	70%	78%	16%	16%	0.009	0.022	38%
135	0.14	2.89	1.58	T2 - 3 x 2 x 3/16	8	0.33	1.56	17%	75%	83%	18%	17%	0.009	0.022	41%
140	0.15	3.10	1.70	T2 - 3 x 2 x 3/16	8	0.33	1.56	18%	81%	90%	19%	19%	0.010	0.022	44%
145	0.16	3.33	1.82	T2 - 3 x 2 x 3/16	8	0.33	1.56	19%	87%	96%	20%	20%	0.011	0.022	47%
150	0.17	3.57	1.95	T3 - 3 x 2 x 1/4	8	0.42	2.00	9%	53%	58%	15%	16%	0.005	0.022	23%
155	0.18	3.81	2.08	T3 - 3 x 2 x 1/4	8	0.42	2.00	9%	55%	61%	15%	17%	0.005	0.022	23%
160	0.20	4.06	2.22	T3 - 3 x 2 x 1/4	8	0.42	2.00	10%	61%	67%	16%	18%	0.006	0.022	25%
165	0.21	4.32	2.36	T3 - 3 x 2 x 1/4	8	0.42	2.00	11%	64%	71%	18%	19%	0.006	0.022	27%
170	0.22	4.58	2.51	T3 - 3 x 2 x 1/4	8	0.42	2.00	11%	67%	74%	19%	21%	0.006	0.022	28%
175	0.23	4.85	2.66	T3 - 3 x 2 x 1/4	8	0.42	2.00	12%	70%	77%	20%	22%	0.006	0.022	27%
180	0.25	5.13	2.81	T3 - 3 x 2 x 1/4	8	0.42	2.00	13%	76%	84%	21%	23%	0.007	0.022	32%
185	0.26	5.42	2.97	T3 - 3 x 2 x 1/4	8	0.42	2.00	13%	79%	88%	22%	24%	0.008	0.022	34%
190	0.28	5.72	3.13	T3 - 3 x 2 x 1/4	8	0.42	2.00	14%	85%	94%	23%	26%	0.008	0.022	36%
195	0.29	6.02	3.30	T3 - 3 x 2 x 1/4	8	0.42	2.00	15%	88%	98%	24%	27%	0.008	0.022	37%
200	0.31	6.35	3.47	T4 - 3 x 2 x 3/8	8	0.62	2.92	6%	42%	46%	17%	19%	0.003	0.022	13%

En la Tabla 3.6 se muestran los parámetros CR y α con los cuales se obtiene el valor mínimo posible mediante la ecuación 3.1 para la curva correspondiente a los soportes de la estructura.

Tabla 3.6 Parámetros CR y α obtenidos para determinar el costo experimental de los soportes

Parámetros Ecuación - Soportes	
CR	0.02
α	0.86
V_0 [mph]	95
C_0 [USD]	1.23

En las Fig 3.4 y 3.5 se muestran las curvas $CI(v)$ vs V y $CI(v)/C_0$ vs V respectivamente para los soportes de la estructura.

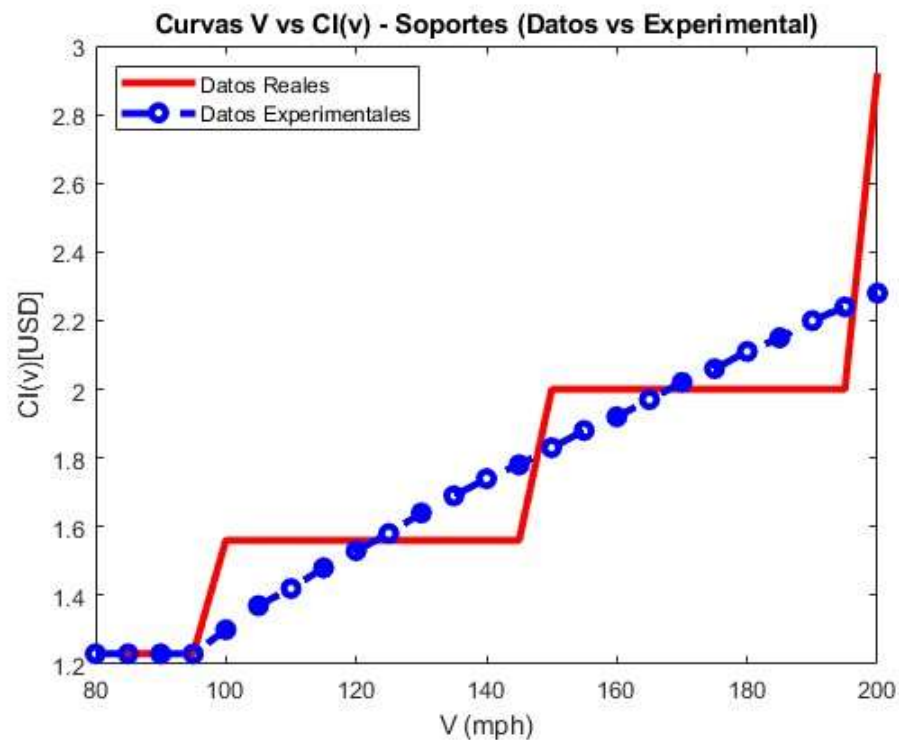


Fig 3.4 Curva de costo inicial $CI(v)$ vs V para montantes

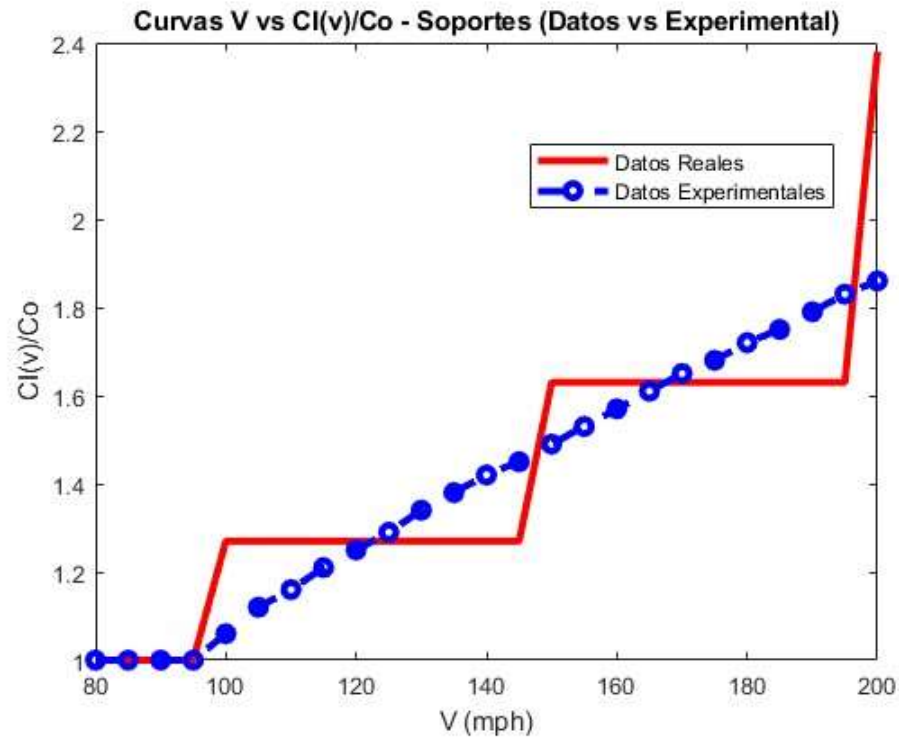


Fig 3.5 Curva de costo inicial normalizado $CI(v)/Co$ vs V para montantes

3.2.3. Curvas de costo inicial de paneles

La curva correspondiente a la variación del costo inicial de los paneles $CI(v)$ vs V se construyó con base en paneles formados a partir de láminas aluminio de aleación 5052 H32, cuyas dimensiones se muestran en las Figs 3.6 y 3.7.

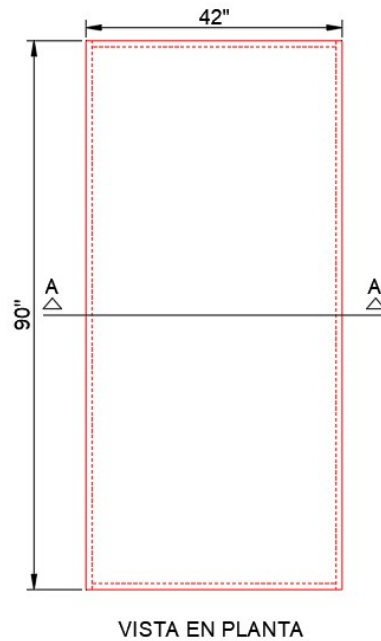


Fig 3.6 Dimensiones de panel de aluminio - Vista en planta



Fig 3.7 Dimensiones de panel de aluminio - Sección

Es importante mencionar que la disponibilidad comercial de las láminas de aluminio tiende a ser limitada a diferencia de los montantes o soportes. Las láminas ofertadas comúnmente se encuentran en espesores de 3.0, 4.5 y/o 6.0mm, lo cual no permite determinar la variación del costo inicial del elemento en ciertos intervalos de velocidades

Para la construcción de la curva, se considera que el espesor de la lámina varía en incrementos de 0.3mm. Esta hipótesis permite obtener una mejor estimación de la variación del costo inicial de estos elementos con relación al aumento de la velocidad de viento de diseño. Se muestran los espesores de lámina considerados en el análisis.

Tabla 3.7 Espesores de lámina asumidos para los paneles de la estructura

Espesor [mm]	Peso [kg]	Costo [USD]
2.4	19.16	45.22
2.7	21.48	50.68
3	23.91	56.41
3.3	26.29	62.02
3.6	28.68	67.68
3.9	31.08	73.32
4.2	33.27	78.49
4.5	35.68	84.19
4.8	38.03	89.72
5.1	40.40	95.32
5.4	42.77	100.91

En la Tabla 3.8 se muestra la relación de capacidad para los estados límite correspondientes a los paneles. Los estados límite de resistencia se definen con base en los criterios de falla elástica de materiales dúctiles y de flexión en placas delgadas de espesor uniforme con bordes rectos (Roark, 2002). Los estados límite de servicio corresponden a los límites definidos en la normativa correspondiente al estado de florida para las deflexiones de recubrimientos de paredes de metal, el cual está definido como $\Delta_{lim} = L/60$ (International Code Council, 2020)

Tabla 3.8 Relación de capacidad para estados límite de resistencia y servicio en paneles

V [mph]	Espesor [mm]	Costo [USD]	Relación de Estado Límite de Esfuerzos		Relación de Estado Límite de Deflexiones		Relación
			Esfuerzos Von Mises [ksi]	Relación Esfuerzos Von Mises	Δ [in]	Δ_{adm} [in]	
80	2.4	45.22	9.18	40%	0.60	0.70	86%
85	2.4	45.22	9.99	43%	0.64	0.70	92%
90	2.4	45.22	10.62	46%	0.68	0.70	97%
95	2.7	50.68	10.62	46%	0.63	0.70	90%
100	2.7	50.68	11.25	49%	0.66	0.70	94%
105	3	56.41	11.88	52%	0.65	0.70	92%
110	3	56.41	12.69	55%	0.68	0.70	97%
115	3.3	62.02	11.61	50%	0.60	0.70	86%
120	3.3	62.02	12.33	54%	0.63	0.70	90%
125	3.3	62.02	13.14	57%	0.66	0.70	94%
130	3.6	67.68	12.78	56%	0.61	0.70	88%
135	3.6	67.68	13.68	59%	0.64	0.70	91%
140	3.6	67.68	14.22	62%	0.67	0.70	95%
145	3.9	73.32	14.18	62%	0.62	0.70	89%
150	3.9	73.32	14.89	65%	0.65	0.70	93%
155	4.2	78.49	14.58	63%	0.61	0.70	86%
160	4.2	78.49	15.32	67%	0.63	0.70	90%
165	4.5	84.19	15.03	65%	0.59	0.70	84%
170	4.5	84.19	15.71	68%	0.61	0.70	87%
175	4.8	89.72	15.41	67%	0.57	0.70	82%
180	4.8	89.72	16.07	70%	0.59	0.70	85%
185	5.1	95.32	15.79	69%	0.56	0.70	79%
190	5.1	95.32	16.45	72%	0.57	0.70	82%
195	5.4	100.91	15.48	67%	0.52	0.70	74%
200	5.4	100.91	16.42	71%	0.56	0.70	79%

En la Tabla 3.9 se muestran los parámetros CR y α con los cuales se obtiene el valor mínimo posible mediante la ecuación 3.1 para la curva correspondiente a los paneles de la estructura.

Tabla 3.9 Parámetros CR y α obtenidos para determinar el costo experimental de los paneles

Parámetros Ecuación - Paneles	
CR	0.59
α	0.97
V_0 [mph]	90
C_0 [USD]	45.22

En las Fig 3.8 y 3.9 se muestran las curvas $CI(v)$ vs V y $CI(v)/C_0$ vs V respectivamente para los paneles de la estructura.

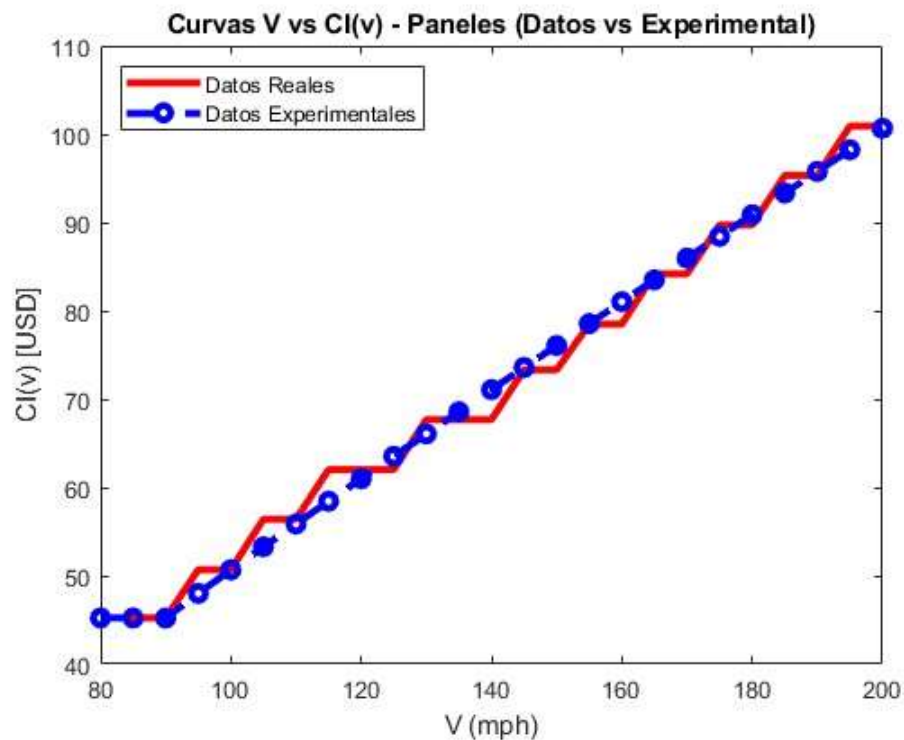
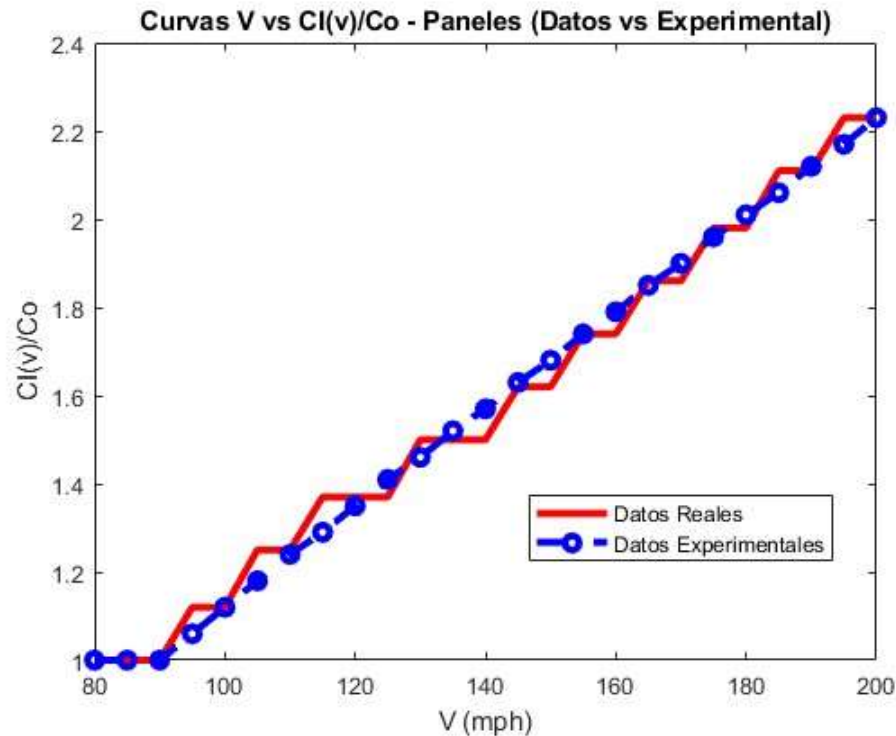


Fig 3.8 Curva de costo inicial $CI(v)$ vs V para paneles

Fig 3.9 Curva de costo inicial normalizado $CI(v)/Co$ vs V para paneles

3.2.4 Curvas de costo inicial de tornillos de fijación de paneles

La curva correspondiente a la variación del costo inicial de los tornillos de fijación de paneles $CI(v)$ vs V se construyó con base en una serie de referencias de tornillos en acero inoxidable AISI 316, los cuales fueron obtenidos de catálogos de proveedores dedicados a la comercialización de tornillos. Para la construcción de la curva, se consideró que todos los tornillos poseen una longitud de 1". En la Tabla 3.10 se muestran las referencias de tornillos consideradas en el análisis.

Tabla 3.10 Referencias de tornillos de fijación de paneles

Referencia	Costo del Paquete [USD]	Unidades	Costo del Tornillo [USD]
T1 - #8-32	5.55	25	0.22
T2 - #10-24	7.41	25	0.30
T3 - #12-24	9.41	25	0.38
T4 - #14-20	13.06	25	0.52

Se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones de diseño para determinar la resistencia de los tornillos de fijación de paneles:

- La distancia máxima medida entre centros de tornillos es de 6" (152.4mm)
- Los tornillos poseen arandela integrada cumpliendo con los requisitos definidos para conexiones tipo "Screw".
- La distancia mínima al borde de la parte conectada será de 1.5 veces el diámetro del tornillo.

En la Tabla 3.11 se muestra la relación de capacidad para los estados límite correspondientes a los tornillos de fijación de los paneles. Los estados límite se verifican según lo definido en el código de diseño de estructuras de aluminio para conectores tipo “Screw” para cargas de tensión y cortante (The Aluminum Association, 2015).

Tabla 3.11 Relación de capacidad para estados límite de tornillos de fijación de paneles

Datos de las Superficies a Conectar			Relación de estados Límites del Tornillo			Relación de estados Límites de la Superficie 1 (En contacto con la cabeza)			Relación de estados Límites de la Superficie 2 (No está en contacto con la cabeza)			
V [mph]	Sección Montante	Espesor Panel [mm]	Referencia	Costo [USD]	Tensión	Cortante	Tensión y Cortante Combinadas	Pull-Over del Tornillo	Aplastamiento del Tornillo	Pull-Out del Tornillo	Aplastamiento del Tornillo	Inclinación del Tornillo
80	3"x2"x1/8"	2.4	T1 - #8-32	0.22	21%	68%	21%	75%	17%	37%	10%	-
85	3"x2"x1/8"	2.4	T1 - #8-32	0.22	23%	75%	23%	85%	19%	42%	12%	-
90	4"x2"x1/8"	2.4	T1 - #8-32	0.22	26%	81%	26%	94%	19%	46%	12%	-
95	4"x2"x1/8"	2.7	T1 - #8-32	0.22	27%	90%	27%	88%	20%	49%	14%	-
100	4"x2"x1/8"	2.7	T1 - #8-32	0.22	30%	99%	30%	96%	20%	53%	14%	-
105	4"x2"x1/8"	3	T2 - #10-24	0.30	23%	80%	23%	72%	17%	48%	13%	-
110	4"x2"x1/8"	3	T2 - #10-24	0.30	26%	87%	26%	81%	19%	54%	15%	-
115	4"x4"x3/32"	3.3	T2 - #10-24	0.30	26%	91%	26%	73%	17%	72%	20%	57%
120	5"x2"x1/8"	3.3	T3 - #12-24	0.38	22%	77%	22%	88%	17%	53%	14%	38%
125	5"x2"x1/8"	3.3	T3 - #12-24	0.38	24%	82%	24%	93%	18%	56%	16%	40%
130	5"x2"x1/8"	3.6	T3 - #12-24	0.38	25%	86%	25%	88%	17%	58%	16%	42%
135	6"x2"x1/8"	3.6	T3 - #12-24	0.38	27%	92%	27%	96%	17%	63%	16%	45%
140	6"x2"x1/8"	3.6	T4 - #14-20	0.52	21%	73%	21%	81%	16%	58%	15%	45%
145	6"x2"x1/8"	3.9	T4 - #14-20	0.52	22%	75%	22%	77%	15%	59%	15%	46%
150	6"x2"x1/8"	3.9	T4 - #14-20	0.52	23%	80%	23%	82%	16%	64%	16%	49%
155	6"x2-1/2"x3/16"	4.2	T4 - #14-20	0.52	22%	77%	22%	71%	14%	36%	10%	-
160	6"x2-1/2"x3/16"	4.2	T4 - #14-20	0.52	25%	86%	25%	82%	15%	42%	10%	-
165	6"x2-1/2"x3/16"	4.5	T4 - #14-20	0.52	25%	87%	25%	75%	14%	41%	10%	-
170	6"x2-1/2"x3/16"	4.5	T4 - #14-20	0.52	26%	93%	26%	80%	15%	44%	11%	-
175	6"x2-1/2"x3/16"	4.8	T4 - #14-20	0.52	26%	93%	26%	75%	13%	44%	10%	31%
180	6"x2-1/2"x3/16"	4.8	T4 - #14-20	0.52	28%	98%	28%	80%	14%	47%	11%	33%
185	6"x4"x3/16"	5.1	T4 - #14-20	0.52	28%	98%	28%	75%	12%	47%	10%	33%
190	6"x4"x3/16"	5.1	T4 - #14-20	0.52	30%	104%	30%	80%	13%	50%	11%	35%
195	6"x4"x3/16"	5.4	T4 - #14-20	0.52	29%	104%	29%	74%	11%	49%	10%	35%
200	6"x4"x3/16"	5.4	T4 - #14-20	0.52	31%	109%	31%	78%	11%	51%	10%	36%

Se observa que para una velocidad de viento de diseño mayor o igual a 190 mph se excede el estado límite de cortante del tornillo. En las consideraciones del análisis se asume que los tornillos poseen un espaciamiento entre centros de máximo 152.4mm. Se recomienda que para evitar que se exceda el estado límite de cortante se reduzca la separación a centros entre tornillos a un valor de máximo 100mm para velocidades de viento mayores o iguales a 190 mph.

En la Tabla 3.12 se muestran los parámetros CR y α con los cuales se obtiene el valor mínimo posible mediante la ecuación 3.1 para la curva correspondiente a los tornillos de fijación de los paneles.

Tabla 3.12 Parámetros CR y α obtenidos para determinar el costo experimental de los tornillos de fijación de paneles

Parámetros Ecuación - Tornillos para Paneles	
CR	0.04
α	0.49
Vo [mph]	100
Co [USD]	0.22

En las Fig 3.10 y 3.11 se muestran las curvas $CI(v)$ vs V y $CI(v)/Co$ vs V respectivamente para los tornillos de fijación de paneles.

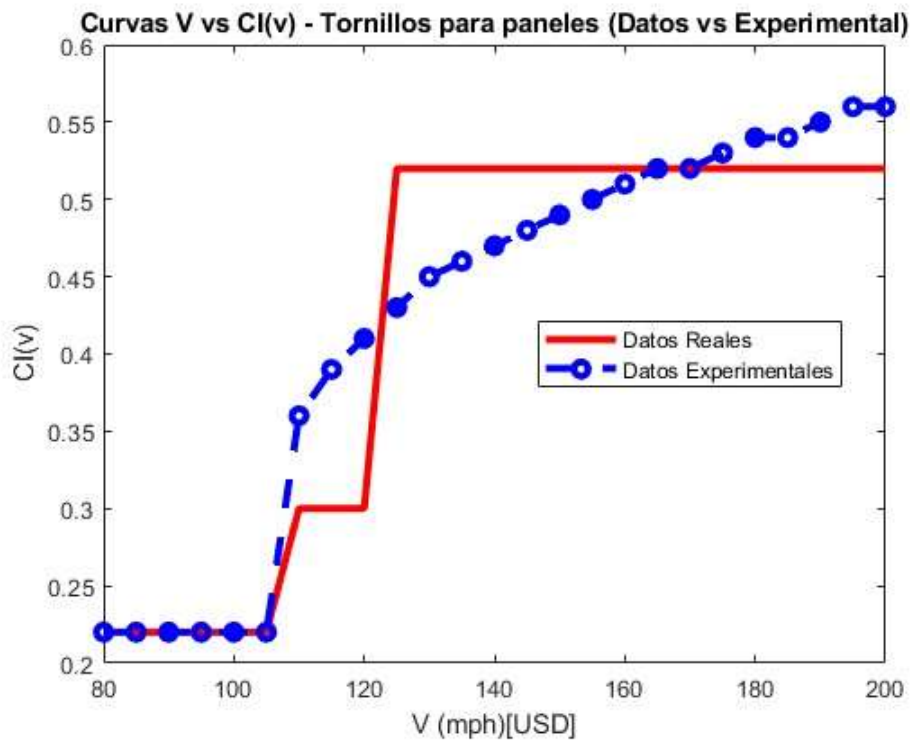


Fig 3.10 Curva de costo inicial $CI(v)$ vs V para tornillos de fijación de paneles

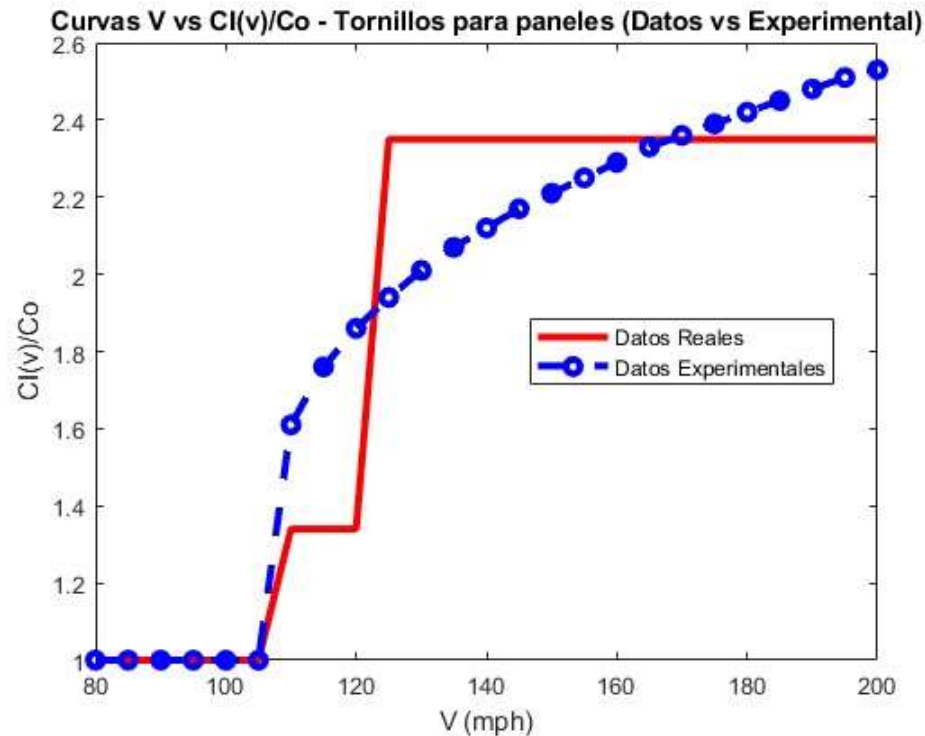


Fig 3.11 Curva de costo inicial normalizado $CI(v)/Co$ vs V para tornillos de fijación de paneles

3.2.5 Curvas de costo inicial de tornillos de fijación de montantes a soportes

La curva correspondiente a la variación del costo inicial de los tornillos de fijación de montantes a soportes $CI(v)$ vs V se construyó con base en una serie de referencias de tornillos en acero inoxidable AISI 316, los cuales fueron obtenidos de catálogos de proveedores dedicados a la comercialización de tornillos. En la Tabla 3.13 se muestran las referencias de tornillos consideradas en el análisis.

Tabla 3.13 Referencias de tornillos de fijación de montantes a soportes

Referencia	Costo del Paquete [USD]	Unidades	Costo del Tornillo [USD]
T1 - 1/4-20"x3"	15.31	10	1.53
T2 - 1/4-20"x4"	9.73	5	1.95
T3 - 3/8-16"x3"	12.64	5	2.53
T4 - 3/8-16"x4"	3.01	1	3.01
T5 - 3/8-16"x5"	4.43	1	4.43
T6 - 1/2-13"x3"	4.98	1	4.98
T7 - 1/2-13"x4"	6.26	1	6.26
T8 - 1/2-13"x5"	8.10	1	8.10
T9 - 1/2-13"x6"	8.83	1	8.83
T10 - 5/8-11"x3"	9.62	1	9.62

Se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones de diseño para determinar la resistencia de los tornillos de fijación de paneles:

- La separación mínima medida entre centros de tornillos será de 3 veces el diámetro del tornillo.
- La distancia mínima al borde de la parte conectada será de 1.5 veces el diámetro del tornillo.
- Se utilizan 2 tornillos por cada punto de fijación.
- Se consideran 2 planos de corte por cada tornillo del punto de fijación.

En la Tabla 3.14 se muestra la relación de capacidad para los estados límite correspondientes a los tornillos de fijación de los montantes a los soportes. Los estados límite se verifican según lo definido en el código de diseño de estructuras de aluminio para conexiones de tipo aplastamiento (The Aluminum Association, 2015).

Tabla 3.14 Relación de capacidad para estados límite de tornillos de fijación de montantes a soportes

nph]	Referencia	Costo [USD]	Relación de Estados Límite						
			Cortante del Tornillo	Aplastamiento del Tornillo en el Soporte	Aplastamiento del Tornillo en el Montante	Fluencia del Soporte	Rotura del Soporte	Bloque de Cortante del Soporte	Aplastamiento del Soporte
80	T1 - 1/4-20"x3"	1.53	43%	38%	38%	3%	43%	3%	43%
85	T1 - 1/4-20"x3"	1.53	49%	43%	43%	3%	48%	3%	49%
90	T1 - 1/4-20"x3"	1.53	55%	48%	48%	4%	54%	4%	54%
95	T1 - 1/4-20"x3"	1.53	61%	54%	54%	4%	60%	4%	61%
100	T1 - 1/4-20"x3"	1.53	67%	40%	60%	3%	45%	3%	45%
105	T1 - 1/4-20"x3"	1.53	74%	44%	66%	3%	49%	3%	49%
110	T1 - 1/4-20"x3"	1.53	82%	48%	72%	4%	45%	4%	54%
115	T1 - 1/4-20"x3"	1.53	89%	53%	79%	4%	59%	4%	59%
120	T1 - 1/4-20"x3"	1.53	97%	57%	86%	4%	64%	4%	64%
125	T3 - 3/8-16"x3"	2.53	47%	41%	62%	5%	47%	5%	47%
130	T3 - 3/8-16"x3"	2.53	51%	45%	67%	5%	50%	5%	50%
135	T3 - 3/8-16"x3"	2.53	55%	48%	72%	6%	54%	5%	54%
140	T3 - 3/8-16"x3"	2.53	59%	52%	78%	6%	58%	6%	58%
145	T3 - 3/8-16"x3"	2.53	63%	56%	83%	6%	63%	6%	63%
150	T3 - 3/8-16"x3"	2.53	67%	45%	89%	5%	50%	5%	50%
155	T4 - 3/8-16"x4"	3.01	72%	48%	64%	5%	54%	5%	54%
160	T4 - 3/8-16"x4"	3.01	77%	51%	68%	6%	57%	6%	57%
165	T4 - 3/8-16"x4"	3.01	82%	54%	72%	6%	61%	6%	61%
170	T4 - 3/8-16"x4"	3.01	86%	57%	76%	7%	64%	6%	65%
175	T4 - 3/8-16"x4"	3.01	92%	61%	81%	7%	68%	7%	69%
180	T4 - 3/8-16"x4"	3.01	97%	64%	86%	7%	72%	7%	72%
185	T9 - 1/2-13"x6"	8.83	58%	51%	68%	8%	57%	8%	57%
190	T9 - 1/2-13"x6"	8.83	61%	54%	72%	8%	60%	8%	61%
195	T9 - 1/2-13"x6"	8.83	64%	57%	75%	9%	64%	9%	64%
200	T9 - 1/2-13"x6"	8.83	67%	60%	79%	9%	67%	9%	67%

En la Tabla 3.15 se muestran los parámetros CR y α con los cuales se obtiene el valor mínimo posible mediante la ecuación 3.1 para la curva correspondiente a los tornillos de fijación de los montantes a los soportes.

Tabla 3.15 Parámetros CR y α obtenidos para determinar el costo experimental de los tornillos de fijación de montantes a soportes

Parámetros Ecuación - Tornillos de Fijación de Montantes a Soportes	
CR	0.01
α	1.40
V_0 [mph]	105
C_0 [USD]	1.53

En las Fig 3.12 y 3.13 se muestran las curvas $CI(v)$ vs V y $CI(v)/C_0$ vs V respectivamente para los tornillos de fijación de montantes a soportes.

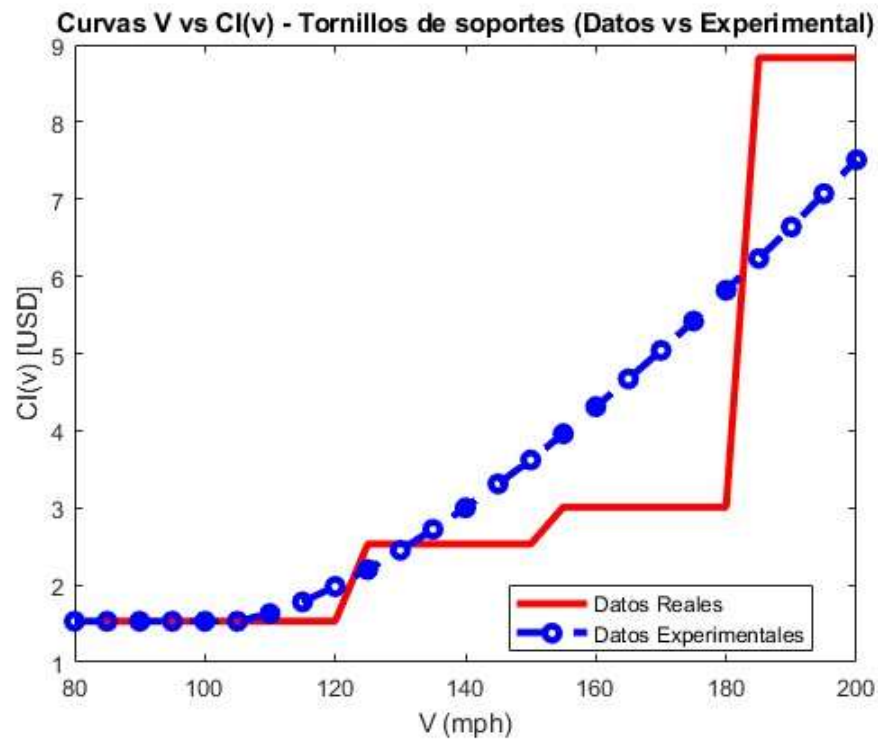


Fig 3.12 Curva de costo inicial $CI(v)$ vs V para tornillos de fijación de montantes a soportes

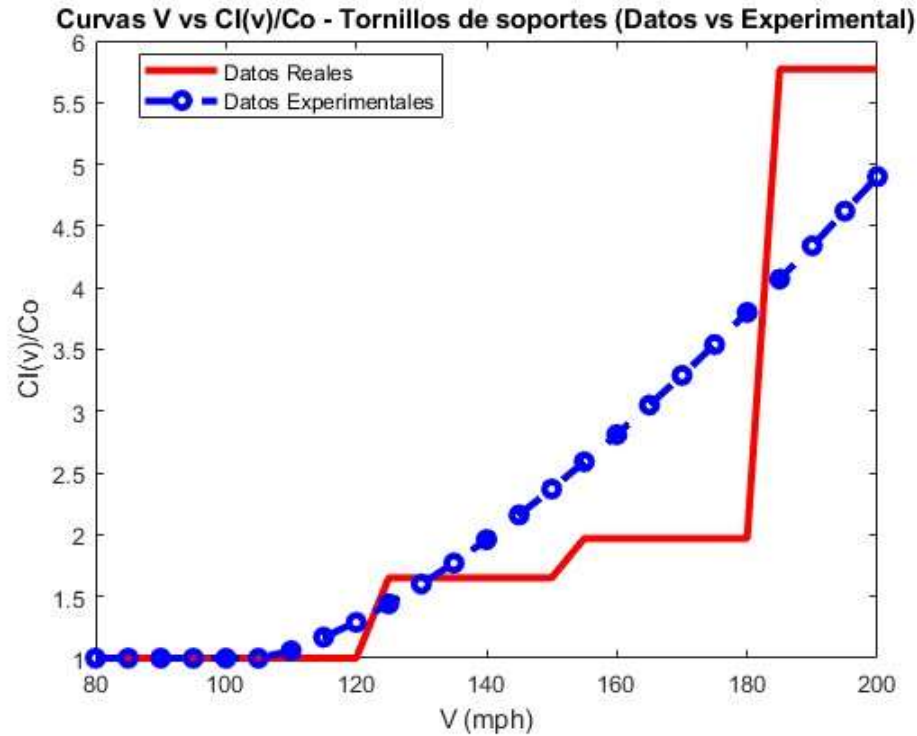


Fig 3.13 Curva de costo inicial normalizado $CI(v)/Co$ vs V para tornillos de fijación de montantes a soportes

3.2.5 Curvas de costo inicial de anclajes a concreto

La curva correspondiente a la variación del costo inicial de los anclajes a concreto $CI(v)$ vs V se construyó con base en el sistema de anclaje HIT HY 200-R V3 con barras HAS-R 316 SS (Hilti, s.f.). En las Tabla 3.16 y 3.17 se muestran las referencias del adhesivo y de las barras consideradas en el análisis respectivamente.

Tabla 3.16 Referencia del adhesivo utilizado en el anclaje a concreto

Referencia	Volumen de Adhesivo [ml]	Costo de la Unidad [USD]	Desperdicio [%]
HIT HY 200-R V3	330	75.25	10%

Tabla 3.17 Referencias de las barras utilizadas en el anclaje a concreto

Referencia	Costo del Paquete [USD]	Unidades	Costo de la Barra [USD]
T1 - 3/8"x5-1/8"	158	20	7.90
T2 - 3/8"x8"	109	10	10.90
T3 - 1/2"x6-1/2"	286	20	14.30
T4 - 1/2"x8"	163	10	16.30
T5 - 5/8"x7-5/8"	496	20	24.80

Se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones de diseño para determinar la resistencia del anclaje:

- La fijación se realiza a una estructura de concreto agrietado de 8" (203.2mm) de espesor.
- La resistencia a la compresión a los 28 días será de 4000 psi.
- La separación entre centros de las barras de anclaje será de 6" (152.4mm).
- La distancia mínima al borde del concreto, medida desde el centro de la barra de anclaje será de 8" (203.2mm).

En la Tabla 3.18 se muestra la relación de capacidad para los estados límite correspondientes a los anclajes adheridos post instalados. Los estados límite se verifican según lo definido en los Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural para anclajes adheridos post instalados American Concrete Institute, 2019).

Tabla 3.18 Relación de capacidad para estados límite de anclajes a concreto

V [mph]	Referencia de la Barra	Diámetro de la Barra [in]	Empotramiento Efectivo [in]	Costo del Adhesivo [USD]	Costo de la Barra [USD]	Costo/Ancilaje [USD]	Relación de Estados Límite del Ancilaje						Combinación de Tensión y Cortante
							Falla del Acero por Tensión	Arrancamiento del Concreto por Tensión	Desizamiento por Tensión	Falla del Acero por Cortante	Arrancamiento del Concreto por Cortante	Desprendimiento del Concreto por Cortante	
80	T1 - 3/8"x5-1/8"	3/8	2.38	0.43	7.90	8.33	13%	27%	42%	5%	0%	9%	25%
85	T1 - 3/8"x5-1/8"	3/8	2.38	0.43	7.90	8.33	15%	31%	47%	6%	0%	9%	30%
90	T1 - 3/8"x5-1/8"	3/8	2.38	0.43	7.90	8.33	16%	35%	53%	6%	0%	10%	36%
95	T1 - 3/8"x5-1/8"	3/8	2.38	0.43	7.90	8.33	18%	38%	58%	7%	0%	11%	43%
100	T1 - 3/8"x5-1/8"	3/8	2.38	0.43	7.90	8.33	25%	54%	82%	6%	0%	10%	73%
105	T1 - 3/8"x5-1/8"	3/8	2.38	0.43	7.90	8.33	28%	59%	90%	7%	0%	12%	84%
110	T1 - 3/8"x5-1/8"	3/8	2.38	0.43	7.90	8.33	31%	65%	99%	8%	0%	13%	92%
115	T1 - 3/8"x5-1/8"	3/8	2.57	0.47	7.90	8.37	33%	65%	100%	8%	0%	7%	90%
120	T1 - 3/8"x5-1/8"	3/8	2.81	0.51	7.90	8.41	36%	65%	99%	9%	0%	7%	90%
125	T1 - 3/8"x5-1/8"	3/8	3.04	0.56	7.90	8.46	39%	64%	99%	10%	0%	7%	91%
130	T1 - 3/8"x5-1/8"	3/8	3.28	0.60	7.90	8.50	43%	64%	100%	11%	0%	7%	92%
135	T1 - 3/8"x5-1/8"	3/8	3.52	0.64	7.90	8.54	46%	64%	100%	11%	0%	7%	93%
140	T1 - 3/8"x5-1/8"	3/8	3.79	0.69	7.90	8.59	49%	63%	100%	12%	0%	7%	93%
145	T1 - 3/8"x5-1/8"	3/8	4.07	0.74	7.90	8.64	53%	62%	100%	13%	0%	7%	94%
150	T1 - 3/8"x5-1/8"	3/8	4.34	0.79	7.90	8.69	57%	62%	100%	14%	0%	7%	95%
155	T2 - 3/8"x8"	3/8	4.66	0.85	10.90	11.75	60%	61%	100%	15%	0%	7%	95%
160	T2 - 3/8"x8"	3/8	4.97	0.91	10.90	11.81	64%	60%	100%	16%	0%	7%	96%
165	T2 - 3/8"x8"	3/8	5.29	0.97	10.90	11.87	68%	59%	100%	17%	0%	7%	97%
170	T2 - 3/8"x8"	3/8	5.60	1.02	10.90	11.92	72%	58%	100%	18%	0%	7%	98%
175	T2 - 3/8"x8"	3/8	5.92	1.08	10.90	11.98	77%	58%	100%	19%	0%	7%	99%
180	T2 - 3/8"x8"	3/8	6.27	1.15	10.90	12.05	81%	57%	100%	20%	0%	7%	100%
185	T2 - 3/8"x8"	3/8	6.63	1.21	10.90	12.11	86%	56%	100%	21%	0%	7%	100%
190	T3 - 1/2"x6-1/2"	1/2	5.31	1.25	14.30	15.55	50%	77%	100%	12%	0%	7%	93%
195	T3 - 1/2"x6-1/2"	1/2	5.59	1.31	14.30	15.61	52%	77%	100%	13%	0%	7%	94%
200	T3 - 1/2"x6-1/2"	1/2	5.86	1.38	14.30	15.68	55%	76%	100%	14%	0%	7%	95%

En la Tabla 3.19 se muestran los parámetros CR y α con los cuales se obtiene el valor mínimo posible mediante la ecuación 3.1 para la curva correspondiente a los anclajes a concreto.

Tabla 3.19 Parámetros CR y α obtenidos para determinar el costo experimental de los anclajes a concreto

Parámetros Ecuación - Anclajes a Concreto	
CR	0.30
α	0.64
V_0 [mph]	110
C_0 [USD]	8.33

En las Fig 3.14 y 3.15 se muestran las curvas $CI(v)$ vs V y $CI(v)/C_0$ vs V respectivamente para los anclajes a concreto.

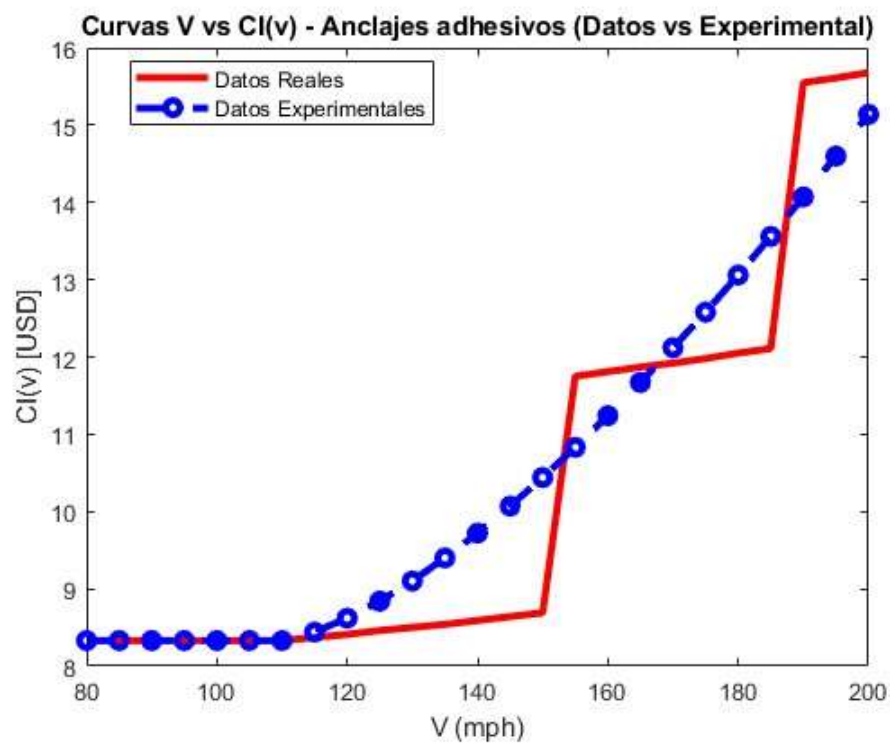


Fig 3.14 Curva de costo inicial $CI(v)$ vs V para anclajes a concreto

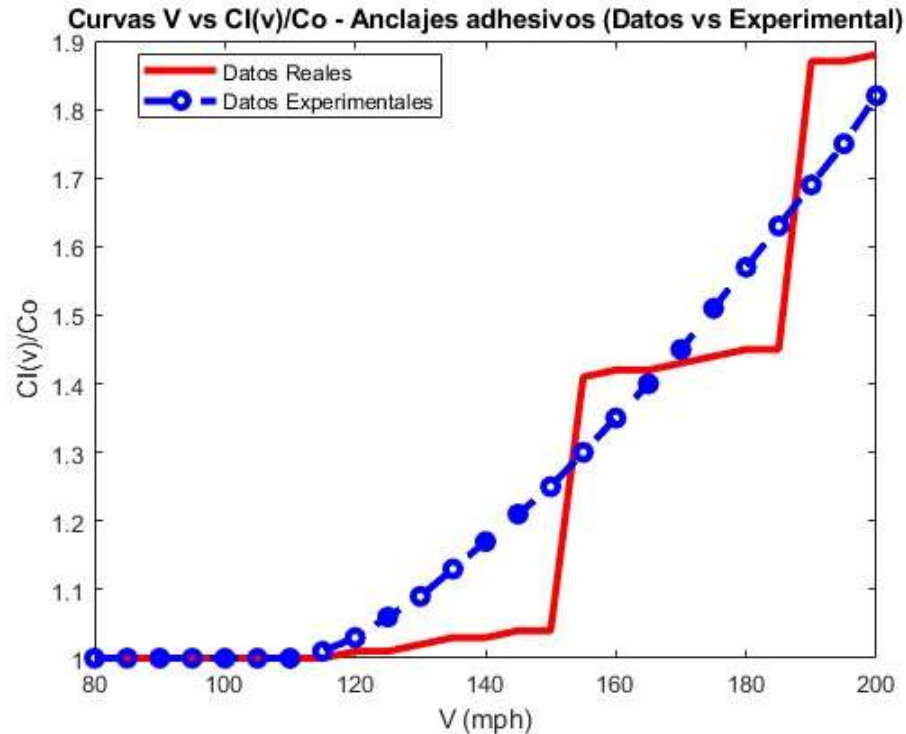


Fig 3.15 Curva de costo inicial normalizado $CI(v)/Co$ vs V para anclajes a concreto

3.3 Curvas de costo inicial del sistema de fachada por unidad de área

Para determinar el costo por unidad de área del sistema de fachada en primer lugar se seleccionará una elevación de la edificación mostrada en la Fig 3.1, la cual se asume que será representativa para las demás elevaciones de la edificación. En la Tabla 3.20 se muestran las características de la elevación Oeste.

Tabla 3.20 Características de la elevación oeste

Dimensiones - Elevación Oeste	
Ancho [ft]	100
Alto [ft]	250
Área Superficial [ft ²]	25000
Área Superficial [m ²]	2322.5

Teniendo en cuenta el área superficial de la elevación en estudio, se procede a realizar la distribución de los diferentes componentes del sistema de fachada para determinar el costo inicial real por unidad de área.

El cálculo de la distribución en altura de los paneles de aluminio consiste en dividir la altura de la elevación seleccionada sobre la altura del panel y el valor obtenido se redondea al número entero mayor. El mismo procedimiento se realiza para calcular la cantidad de paneles a lo ancho de la elevación. La cantidad total de paneles está determinada por la ecuación 3.1.

$$\text{Cantidad Paneles} = \text{Cantidad Ancho} * \text{Cantidad Alto} * (1 + \text{Desperdicio}) \quad (3.1)$$

En la Tabla 3.21 se muestra la distribución de los paneles de aluminio, asumiendo un porcentaje de desperdicio del 20%. En la Fig 3.16 se muestra un croquis de la distribución de los paneles en la fachada oeste.

Tabla 3.21 Distribución de paneles en elevación oeste

Distribución Paneles	
Ancho [ft]	3.5
Alto [ft]	7.5
Cantidad Ancho	29
Cantidad Alto	34
Desperdicio	20%
Cantidad Total	1183

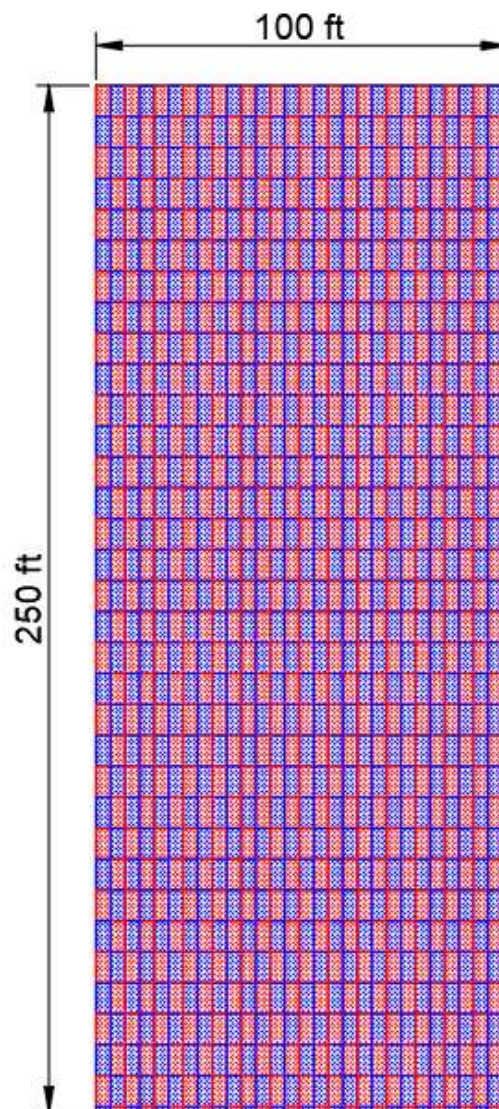


Fig 3.16 Distribución de paneles en fachada oeste

El cálculo de la distribución en altura de los montantes consiste en dividir la altura de la elevación seleccionada sobre la longitud estándar de los tubos, la cual es de 19.69 pies y el valor obtenido se redondea al número entero mayor. Para calcular la cantidad de montantes a lo ancho de la elevación se divide el ancho de la elevación entre la separación medida a centros de montantes que es de 3.5 pies. El valor obtenido se redondea al número entero mayor y se suma una unidad a este valor para tener en cuenta que cada uno de los montantes se encarga de dar soporte a dos paneles a excepción de los montantes ubicados en los extremos de la elevación. La cantidad total de montantes está determinada por la ecuación 3.2.

$$\text{Cantidad Montantes} = \text{Cantidad Ancho} * \text{Cantidad Alto} * (1 + \text{Desperdicio}) \quad (3.2)$$

En la Tabla 3.22 se muestra la cantidad de montantes en la elevación, asumiendo un porcentaje de desperdicio del 5%.

Tabla 3.22 Distribución de montantes en elevación oeste

Distribución Montantes	
Longitud Estándar [ft]	19.69
Longitud Estándar [m]	6.0
Separación Horizontal [ft]	3.5
Cantidad Ancho	30
Cantidad Alto	13
Desperdicio	5%
Cantidad Total	410

El cálculo de la cantidad de soportes consiste en dividir la altura de la elevación seleccionada sobre la distancia entre apoyos de los montantes, la cual es de 10 pies. El valor obtenido se redondea al número entero mayor y se suma una unidad a este valor para considerar los soportes que se ubican en el extremo inferior de la elevación. Para calcular la cantidad de soportes a lo ancho de la elevación se divide el ancho de la elevación entre la separación medida a centros de montantes que es de 3.5 pies. Adicionalmente, los valores obtenidos se deben multiplicar por dos ya que cada punto de soporte de los montantes posee dos ángulos. La cantidad total de soportes está determinada por la ecuación 3.3.

$$\text{Cantidad Soportes} = [\text{Cantidad Ancho} * (\text{Cantidad Alto} + 1)] * 2 * (1 + \text{Desperdicio}) \quad (3.3)$$

La cantidad de tornillos de conexión de montantes es similar a la calculada para los soportes debido a que cada punto de sujeción de los montantes consiste en un par de ángulos y un par de tornillos para conectar ambos elementos.

En la Tabla 3.23 se muestra la cantidad de soportes y tornillos en la elevación, asumiendo un porcentaje de desperdicio del 5%.

Tabla 3.23 Distribución de soportes y tornillos en elevación oeste

Distribución de Soportes y Tornillos	
Longitud Soporte [in]	8
Distancia entre Apoyos [ft]	10.00
Cantidad Alto	25
Separación Horizontal [ft]	3.5
Desperdicio	5%
Cantidad Total Soportes	1638
Cantidad Total Tornillos	1638

El cálculo de los tornillos de conexión de los paneles consiste en dividir la altura efectiva del panel, la cual es de 7.5 pies (2286mm) entre la separación de los tornillos que es de 6 pulgadas (152.4). El valor obtenido se redondea al número entero mayor y se suman tres unidades a este valor para considerar los tornillos que están ubicados en los extremos del panel, cuyo punto de fijación consiste en dos tornillos con un espaciamiento máximo de 1 pulgada (25.4mm). Adicionalmente, el valor obtenido se multiplica por dos debido a que la fijación del panel al montante se realiza a través de los bordes largos del panel. Finalmente, este último valor se multiplica por la cantidad total de paneles calculada mediante la ecuación 3.1. La cantidad total de tornillos de fijación de paneles está determinada por la ecuación 3.4.

$$\text{Cantidad Tornillos} = [\text{Cantidad tornillos de panel} + 3] * 2 * \text{Cantidad paneles} * (1 + \text{Desperdicio}) \quad (3.4)$$

En la Tabla 3.24 se muestra la cantidad de soportes y tornillos en la elevación, asumiendo un porcentaje de desperdicio del 5%.

Tabla 3.24 Distribución de tornillos de fijación de paneles

Distribución de Tornillos de Paneles	
Espaciamiento [in]	6
Cantidad/Panel	36.00
Desperdicio	5%
Cantidad Total	37271

El cálculo de la cantidad de anclajes a concreto consiste en multiplicar por dos la cantidad total de soportes obtenida mediante la ecuación 3.2 debido a que cada soporte está sujeto a la estructura de concreto mediante dos puntos de anclaje, compuestos por la barra de anclaje y el adhesivo. La cantidad total de anclajes a concreto está determinada por la ecuación 3.5.

$$\text{Cantidad Anclajes a Concreto} = \text{Cantidad Soportes} * 2 \quad (3.5)$$

En la Tabla 3.25 se muestra la cantidad de anclajes a concreto en la elevación. En este caso no se asume un valor de desperdicio en el cálculo ya que este está incluido al determinar el número de aplicaciones, como se observa en la Tabla 3.16

Tabla 3.25 Distribución de anclajes a concreto

Distribución de Anclajes a Concreto	
Cantidad Puntos Anclaje	420
Cantidad Total Anclajes	1680

En las Tablas 3.26 y 3.27 se muestra la variación de los costos iniciales por unidad de área para los elementos que componen el sistema de fachada en función de la velocidad y los porcentajes que representa cada elemento respecto al costo total inicial del sistema por unidad de área, respectivamente.

Tabla 3.26 Costo inicial de los elementos de la fachada en función de la velocidad de viento de diseño

Costo de los Elementos de la Fachada							
	Paneles de Aluminio [USD/m ²]	Montantes de Aluminio [USD/m ²]	Soportes de Aluminio [USD/m ²]	Tornillos de Fijación de Montantes [USD/m ²]	Tornillos de Fijación de Paneles [USD/m ²]	Anclajes a Concreto [USD/m ²]	Precio Total [USD/m ²]
80	23.03	5.16	0.43	1.08	3.56	6.03	39.30
85	23.03	5.16	0.43	1.08	3.56	6.03	39.30
90	23.03	6.25	0.43	1.08	3.56	6.03	40.39
95	25.82	6.25	0.43	1.08	3.56	6.03	43.17
100	25.82	6.25	0.55	1.08	3.56	6.03	43.29
105	28.74	6.25	0.55	1.08	4.76	6.03	47.40
110	28.74	6.25	0.55	1.08	4.76	6.03	47.40
115	31.60	6.37	0.55	1.08	4.76	6.05	50.41
120	31.60	7.34	0.55	1.08	6.04	6.09	52.69
125	31.60	7.34	0.55	1.78	6.04	6.12	53.43
130	34.48	7.34	0.55	1.78	6.04	6.15	56.34
135	34.48	8.42	0.55	1.78	6.04	6.18	57.46
140	34.48	8.42	0.55	1.78	8.38	6.22	59.83
145	37.36	8.42	0.55	1.78	8.38	6.25	62.75
150	37.36	8.42	0.71	1.78	8.38	6.29	62.94
155	39.99	11.49	0.71	2.12	8.38	8.50	71.19
160	39.99	11.49	0.71	2.12	8.38	8.54	71.24
165	42.89	11.49	0.71	2.12	8.38	8.58	74.18
170	42.89	11.49	0.71	2.12	8.38	8.62	74.22
175	45.71	11.49	0.71	2.12	8.38	8.67	77.08
180	45.71	11.49	0.71	2.12	8.38	8.71	77.13
185	48.56	15.70	0.71	6.23	8.38	8.76	88.34
190	48.56	15.70	0.71	6.23	8.38	11.25	90.82
195	51.41	15.70	0.71	6.23	8.38	11.29	93.72
200	51.41	15.70	1.03	6.23	8.38	11.34	94.09

Tabla 3.27 Porcentaje del costo inicial de los elementos de la fachada en función de la velocidad de viento de diseño

Porcentaje del Costo de los Elementos de la Fachada							
	Precio Total [USD/m ²]	Paneles de Aluminio	Montantes de Aluminio	Soportes de Aluminio	Tornillos de Fijación de Montantes	Tornillos de Fijación de Paneles	Anclajes a Concreto
80	39.30	58.6%	13.1%	1.1%	2.7%	9.1%	15.3%
85	39.30	58.6%	13.1%	1.1%	2.7%	9.1%	15.3%
90	40.39	57.0%	15.5%	1.1%	2.7%	8.8%	14.9%
95	43.17	59.8%	14.5%	1.0%	2.5%	8.3%	14.0%
100	43.29	59.6%	14.4%	1.3%	2.5%	8.2%	13.9%
105	47.40	60.6%	13.2%	1.2%	2.3%	10.0%	12.7%
110	47.40	60.6%	13.2%	1.2%	2.3%	10.0%	12.7%
115	50.41	62.7%	12.6%	1.1%	2.1%	9.4%	12.0%
120	52.69	60.0%	13.9%	1.0%	2.0%	11.5%	11.5%
125	53.43	59.1%	13.7%	1.0%	3.3%	11.3%	11.4%
130	56.34	61.2%	13.0%	1.0%	3.2%	10.7%	10.9%
135	57.46	60.0%	14.7%	1.0%	3.1%	10.5%	10.8%
140	59.83	57.6%	14.1%	0.9%	3.0%	14.0%	10.4%
145	62.75	59.5%	13.4%	0.9%	2.8%	13.4%	10.0%
150	62.94	59.3%	13.4%	1.1%	2.8%	13.3%	10.0%
155	71.19	56.2%	16.1%	1.0%	3.0%	11.8%	11.9%
160	71.24	56.1%	16.1%	1.0%	3.0%	11.8%	12.0%
165	74.18	57.8%	15.5%	1.0%	2.9%	11.3%	11.6%
170	74.22	57.8%	15.5%	1.0%	2.9%	11.3%	11.6%
175	77.08	59.3%	14.9%	0.9%	2.8%	10.9%	11.2%
180	77.13	59.3%	14.9%	0.9%	2.8%	10.9%	11.3%
185	88.34	55.0%	17.8%	0.8%	7.0%	9.5%	9.9%
190	90.82	53.5%	17.3%	0.8%	6.9%	9.2%	12.4%
195	93.72	54.9%	16.7%	0.8%	6.6%	8.9%	12.0%
200	94.09	54.6%	16.7%	1.1%	6.6%	8.9%	12.1%

Con los datos obtenidos, se muestran en las Fig 3.17 y 3.18 las curvas $CI(v)$ vs V y $CI(v)/Co$ vs V_2 respectivamente, para el costo inicial del sistema de fachada por unidad de área. En la Tabla 3.28 se muestran los parámetros CR y α con los cuales se obtiene el valor mínimo posible mediante la ecuación 3.1 para la curva correspondiente al costo por unidad de área del sistema de fachada.

Tabla 3.28 Parámetros CR y α obtenidos para determinar el costo experimental por unidad de área del sistema de fachada.

Parámetros Ecuación - Sistema de Fachada	
CR	0.12
α	1.29
V_0 [mph]	85
C_0 [USD/m ²]	39.30

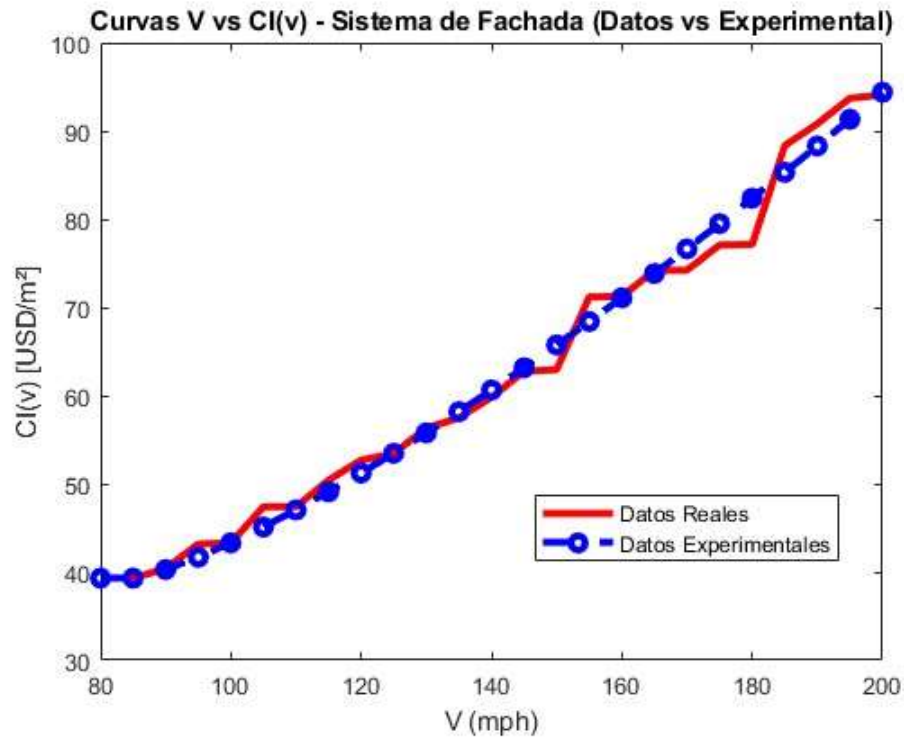


Fig 3.17 Curva de costo inicial por unidad de área $CI(v)$ vs V para el sistema de fachada

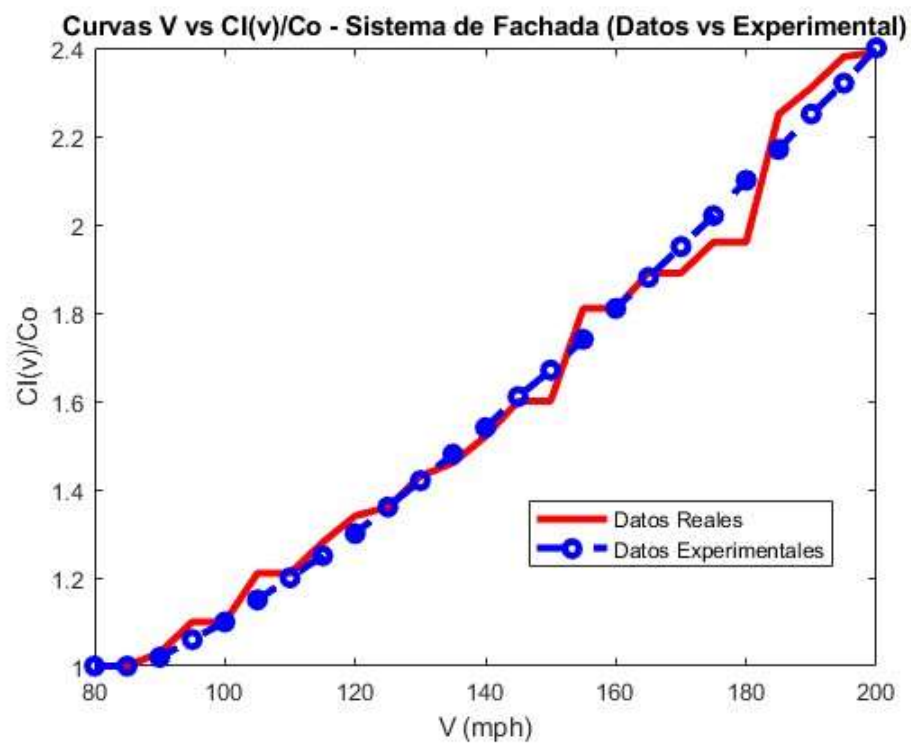


Fig 3.18 Curva de costo normalizado inicial por unidad de área $CI(v)/Co$ vs V para el sistema de fachada

3.4 Curvas de costo inicial del sistema de fachada por unidad de área incluyendo procesos

Con base en el costo inicial definido previamente para cada uno de los componentes del sistema, se determina el impacto que tienen los procesos de fabricación en aquellos elementos en los cuales son aplicables.

La fabricación de los paneles de aluminio consiste en el corte de la lámina plana de aluminio para garantizar las dimensiones requeridas, seguido de un proceso de doblez en los bordes de la lámina para dar la forma mostrada en las Figs 3.6 y 3.7. El proceso de pintura se cuantifica teniendo en cuenta el área superficial de la lámina. Finalmente, se contempla un costo asociado a los elementos de protección de los paneles. En la Tabla 3.29 se muestran los costos asociados a los procesos y elementos mencionados anteriormente y en la Tabla 3.30 se muestran los parámetros del panel para el cálculo del costo de los procesos. El costo de los procesos de fabricación asociados a los paneles se determina mediante la ecuación 3.6.

$$\begin{aligned} \text{Costo Procesos} = & \text{Área Superficial [m}^2\text{]} * \text{Costo Pintura} \left[\frac{\text{USD}}{\text{m}^2} \right] + \text{Cantidad} \frac{\text{Dobleces}}{\text{Panel}} * \\ & \text{Costo Doblez [USD]} + \text{Costo Corte [USD]} + \text{Costo Protector de Panel [USD]} + \\ & \text{Costo Tableros de Esquina [USD]} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Tabla 3.29 Costo de procesos de fabricación para paneles

Costos de Procesos de Fabricación de Paneles	
Costo Pintura Panel 2 Caras [USD/m ²]	40.00
Costo/Doblez Panel [USD]	0.56
Corte Lámina [USD]	3.33
Protector Panel [USD]	2.22
Tablero de Esquina [USD]	0.44

Tabla 3.30 Parámetros para el cálculo del costo de los procesos de fabricación en paneles

Parámetros del Panel para Procesos de Fabricación	
Ancho Lámina [ft]	4
Alto Lámina [ft]	8
Área Superficial [ft ²]	32
Área Superficial [m ²]	2.97
Dobleces	8

La fabricación de los montantes y ángulos de soporte de aluminio consiste en el corte de los perfiles extruidos para garantizar la longitud requerida seguido de un proceso de pintura que se cuantifica teniendo en cuenta el peso de cada uno de los perfiles cortados a medida. En la Tabla 3.31 se muestran los costos asociados a los procesos mencionados anteriormente. El costo de los procesos

de fabricación de los montantes y ángulos de soporte de aluminio se determina mediante la ecuación 3.7.

$$\text{Costo Procesos} = \text{Peso del Elemento [kg]} * \text{Costo Pintura} \left[\frac{\text{USD}}{\text{kg}} \right] + \text{Costo Corte [USD]} \quad (3.7)$$

Tabla 3.31 Costo de procesos de fabricación para paneles

Costos de Procesos de Fabricación de Montantes y Ángulos de Soporte	
Costo Pintura Extrusión [USD/kg]	2.50
Corte Extrusión [USD]	2.22

Los tornillos de fijación de paneles a montantes, tornillos de fijación de montantes a soportes y anclajes adhesivos no requieren de ningún proceso de fabricación previo a su uso en el sitio de instalación del sistema, por lo cual los costos iniciales calculados anteriormente no se verán afectados.

En las Tablas 3.32 y 3.33 se muestra la variación de los costos iniciales por unidad de área incluyendo los procesos de fabricación para los elementos que componen el sistema de fachada en función de la velocidad y los porcentajes que representa cada elemento respecto al costo total inicial del sistema por unidad de área, respectivamente.

Tabla 3.32 Costo inicial de los elementos de la fachada incluyendo procesos de fabricación en función de la velocidad de viento de diseño

Costo de los Elementos de la Fachada							
V [mph]	Paneles de Aluminio [USD/m ²]	Montantes de Aluminio [USD/m ²]	Soportes de Aluminio [USD/m ²]	Tornillos de Fijación de Montantes [USD/m ²]	Tornillos de Fijación de Paneles [USD/m ²]	Anclajes a Concreto [USD/m ²]	Precio Total [USD/m ²]
80	88.94	11.02	1.25	0.58	3.56	6.03	111.39
85	88.94	11.02	1.25	0.58	3.56	6.03	111.39
90	88.94	13.27	1.25	0.58	3.56	6.03	113.63
95	91.72	13.27	1.25	0.58	3.56	6.03	116.41
100	91.72	13.27	1.37	0.58	3.56	6.03	116.52
105	94.64	13.27	1.37	0.58	4.76	6.03	120.63
110	94.64	13.27	1.37	0.58	4.76	6.03	120.63
115	97.50	13.51	1.37	0.58	4.76	6.05	123.77
120	97.50	15.51	1.37	0.58	6.04	6.09	127.08
125	97.50	15.51	1.37	0.96	6.04	6.12	127.49
130	100.38	15.51	1.37	0.96	6.04	6.15	130.40
135	100.38	17.74	1.37	0.96	6.04	6.18	132.67
140	100.38	17.74	1.37	0.96	8.38	6.22	135.05
145	103.26	17.74	1.37	0.96	8.38	6.25	137.96
150	103.26	17.74	1.52	0.96	8.38	6.29	138.15
155	105.89	24.07	1.52	1.14	8.38	8.50	149.49
160	105.89	24.07	1.52	1.14	8.38	8.54	149.54
165	108.79	24.07	1.52	1.14	8.38	8.58	152.48
170	108.79	24.07	1.52	1.14	8.38	8.62	152.52
175	111.61	24.07	1.52	1.14	8.38	8.67	155.38
180	111.61	24.07	1.52	1.14	8.38	8.71	155.43
185	114.46	32.72	1.52	3.35	8.38	8.76	169.20
190	114.46	32.72	1.52	3.35	8.38	11.25	171.68
195	117.31	32.72	1.52	3.35	8.38	11.29	174.58
200	117.31	32.72	1.82	3.35	8.38	11.34	174.93

Tabla 3.33 Porcentaje del costo inicial de los elementos de la fachada incluyendo procesos de fabricación en función de la velocidad de viento de diseño

Porcentaje del Costo de los Elementos de la Fachada							
V [mph]	Precio Total [USD/m ²]	Paneles de Aluminio	Montantes de Aluminio	Soportes de Aluminio	Tornillos de Fijación de Montantes	Tornillos de Fijación de Paneles	Anclajes a Concreto
80	111.39	79.8%	9.9%	1.1%	0.5%	3.2%	5.4%
85	111.39	79.8%	9.9%	1.1%	0.5%	3.2%	5.4%
90	113.63	78.3%	11.7%	1.1%	0.5%	3.1%	5.3%
95	116.41	78.8%	11.4%	1.1%	0.5%	3.1%	5.2%
100	116.52	78.7%	11.4%	1.2%	0.5%	3.1%	5.2%
105	120.63	78.4%	11.0%	1.1%	0.5%	3.9%	5.0%
110	120.63	78.4%	11.0%	1.1%	0.5%	3.9%	5.0%
115	123.77	78.8%	10.9%	1.1%	0.5%	3.8%	4.9%
120	127.08	76.7%	12.2%	1.1%	0.5%	4.8%	4.8%
125	127.49	76.5%	12.2%	1.1%	0.8%	4.7%	4.8%
130	130.40	77.0%	11.9%	1.0%	0.7%	4.6%	4.7%
135	132.67	75.7%	13.4%	1.0%	0.7%	4.6%	4.7%
140	135.05	74.3%	13.1%	1.0%	0.7%	6.2%	4.6%
145	137.96	74.8%	12.9%	1.0%	0.7%	6.1%	4.5%
150	138.15	74.7%	12.8%	1.1%	0.7%	6.1%	4.6%
155	149.49	70.8%	16.1%	1.0%	0.8%	5.6%	5.7%
160	149.54	70.8%	16.1%	1.0%	0.8%	5.6%	5.7%
165	152.48	71.3%	15.8%	1.0%	0.7%	5.5%	5.6%
170	152.52	71.3%	15.8%	1.0%	0.7%	5.5%	5.7%
175	155.38	71.8%	15.5%	1.0%	0.7%	5.4%	5.6%
180	155.43	71.8%	15.5%	1.0%	0.7%	5.4%	5.6%
185	169.20	67.7%	19.3%	0.9%	2.0%	5.0%	5.2%
190	171.68	66.7%	19.1%	0.9%	2.0%	4.9%	6.6%
195	174.58	67.2%	18.7%	0.9%	1.9%	4.8%	6.5%
200	174.93	67.1%	18.7%	1.0%	1.9%	4.8%	6.5%

En las Fig 3.19 y 3.20 se muestran respectivamente las curvas $CI(v)$ vs V y $CI(v)/Co$ vs V para el costo inicial del sistema de fachada por unidad de área incluyendo los procesos de fabricación. En la Tabla 3.34 se muestran los parámetros CR y α con los cuales se obtiene el valor mínimo posible mediante la ecuación 3.1 para la curva correspondiente al costo por unidad de área del sistema de fachada.

Tabla 3.34 Parámetros CR y α obtenidos para determinar el costo experimental por unidad de área del sistema de fachada incluyendo los procesos de fabricación.

Parámetros Ecuación - Sistema de Fachada + Procesos de Fabricación	
CR	0.14
α	1.29
V_0 [mph]	85
C_0 [USD/m ²]	111.39

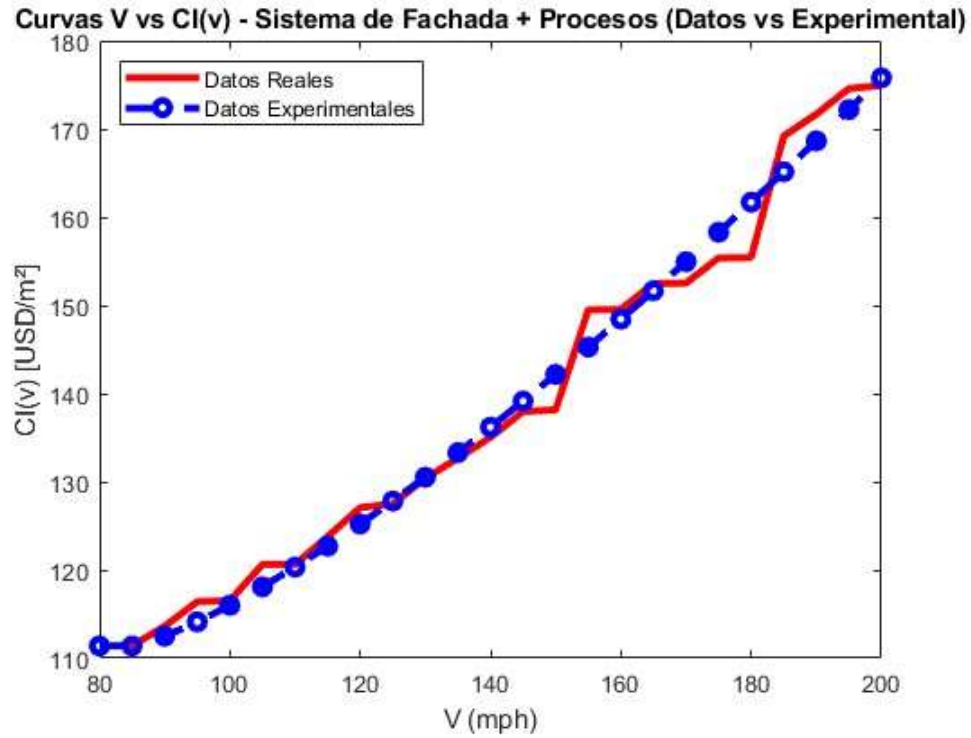


Fig 3.19 Curva de costo inicial por unidad de área $CI(v)$ vs V para el sistema de fachada incluyendo procesos de fabricación

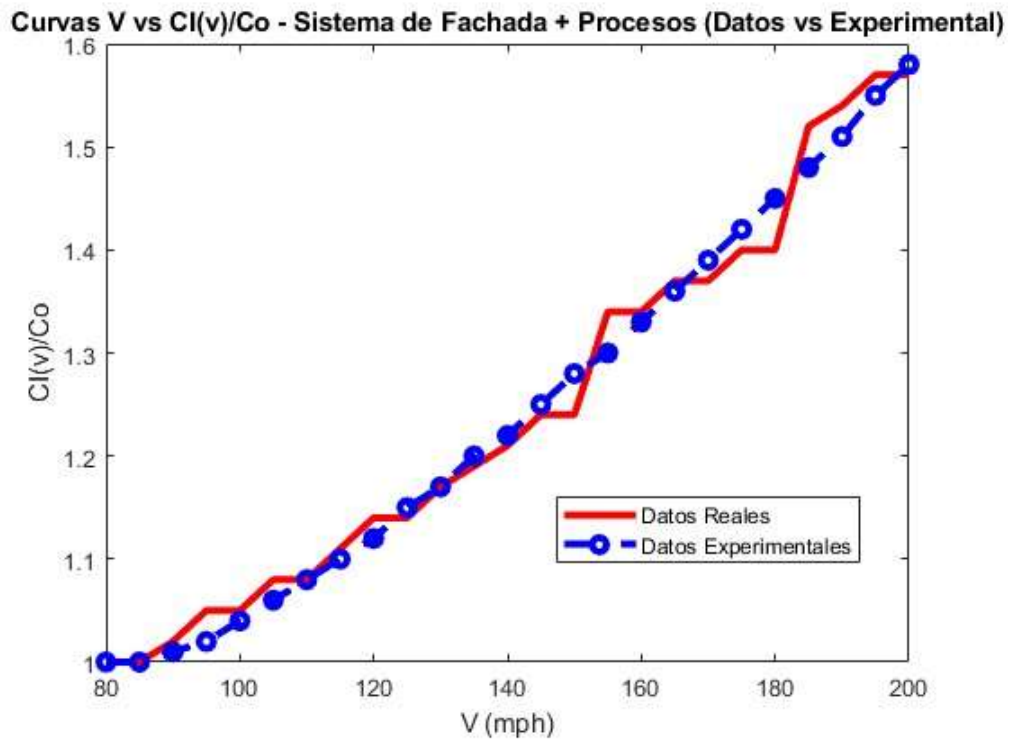


Fig 3.20 Curva de costo inicial normalizado por unidad de área $CI(v)/Co$ vs V para el sistema de fachada incluyendo procesos de fabricación

3.5 Curvas de costo de pérdidas esperadas

Las curvas de costo de pérdidas esperadas se construyen mediante la ecuación 2.5, para la cual se deben definir los parámetros que la componen. El valor de la tasa neta anual de descuento del valor del dinero μ se fija en un 5% por año de manera similar a las investigaciones realizadas por Wen et al. (2001) y Cui et al. (2015). Se consideran diferentes valores del factor proporcional del costo inicial que mide la importancia de las pérdidas en las edificaciones Q . En la literatura no se cuenta con un requisito específico para la vida de servicio de las fachadas; sin embargo, se puede considerar que la vida útil de las fachadas es similar a la definida para la edificación (Abelli, 2019). En la Tabla 3.35 se muestran diferentes valores de la vida de servicio de las estructuras en función de la categoría de vida útil en la cual clasifican (European Committee for Standardization, 2002).

Tabla 3.35 Vida útil de diseño de las estructuras. *Nota.* Adaptado de “EN 1990:2002+A1 Eurocode - Basis of structural design” (p. 28) por European Committee for Standardization, 2002.

Design working life category	Indicative design working life (years)	Examples
1	10	Temporary structures ⁽¹⁾
2	10 to 25	Replaceable structural parts, e.g. gantry girders, bearings
3	15 to 30	Agricultural and similar structures
4	50	Building structures and other common structures
5	100	Monumental building structures, bridges, and other civil engineering structures
(1) Structures or parts of structures that can be dismantled with a view to being re-used should not be considered as temporary.		

Se define entonces una vida útil de diseño de 50 años para el sistema de fachada, considerando que esta se instalará sobre una edificación cuya categoría de vida útil de diseño es 4. De acuerdo con los resultados mostrados por Wei (2015), en la Fig 3.21 se observa que para una vida útil de 50 años los costos de intervención normalizados al costo inicial son del orden de 3.5.

Adicionalmente, se adoptan los valores definidos para el factor Q , también llamado factor de importancia de las pérdidas, utilizados en el diseño de estructuras del grupo A y B en México, los cuales son 15 y 5 respectivamente (Comisión Federal de Electricidad, 2020).

Por último, se definen los valores de la tasa de demanda excedente $v(v)$ de acuerdo con lo definido en el capítulo 2.1.3.1. Las velocidades de viento de diseño corresponden a las velocidades de vientos huracanados y no huracanados combinada como eventos estadísticamente independientes. Las velocidades no huracanadas se determinan mediante una distribución de valor extremo tipo I cuyos parámetros de ubicación y escala son $\mu=54.3\text{mph}$ y $\sigma=9.1\text{mph}$, respectivamente (Yeo et al., 2014).

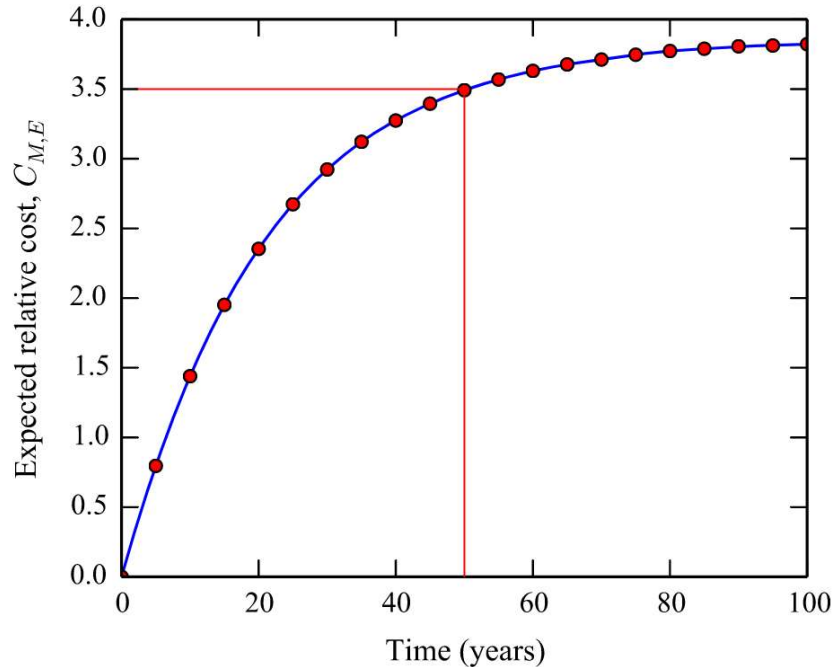


Fig 3.21 Costos de intervención esperados (mantenimiento y reparación) normalizados al costo inicial de construcción. *Nota.* Adaptado de “Simulation and analysis of intervention costs due to wind-induced damage on tall buildings” por Cui et al., 2015. *Engineering Structures*, 87, p. 193. Derechos de autor (Elsevier Ltd.) año (2015). Reimpreso o adaptado con permiso. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.01.001>

Para determinar las velocidades de viento huracanados, Yeo et al. (2014) muestra que la distribución que mejor se acopla a la modelación de la distribución de las velocidades de viento huracanados es la Weibull invertida. En la Tabla 3.36 se muestran los parámetros de la distribución Weibull invertida obtenidos para diferentes regiones de los Estados Unidos.

Tabla 3.36 Parámetros estimados de distribución Weibull inversa. *Nota.* Adaptado de “Estimation of Hurricane Wind Speed Probabilities: Application to New York City and Other Coastal Locations” por Yeo et al., 2015. *Journal of Structural Engineering*. 140.

	ASCE 7-10			ASCE 7-10 and NRC		
	c	b [mph]	a [mph]	c	b [mph]	a [mph]
Boston, MA	-0.047	416.82	397.19	-0.214	179.56	218.05
Ocean City, MD	-0.064	318.44	299.27	-0.152	199.13	209.63
Miami Beach, FL	-0.092	323.15	278.54	-0.097	317.59	276.74
Biloxi, MS	-0.115	301.30	292.49	-0.121	294.04	287.71
Galveston, TX	-0.093	273.59	227.85	-0.059	343.38	286.51

Se seleccionarán los parámetros definidos según ASCE 7-10 para la región de Miami Beach, FL. Las velocidades de diseño en la península de florida no presentan cambios en la versión 2022 con respecto a la versión 2010 de ASCE 7 (American Society of Civil Engineers, 2021), por lo cual se considera que los parámetros seleccionados son adecuados para la estimación de las velocidades de viento huracanados. En las Tablas 3.37 y 3.38 se muestran los valores de la tasa de demanda excedente en función de las velocidades de viento combinadas por medio de la ecuación 2.16.

Tabla 3.37 Tasa de demanda excedente en función de la velocidad de viento

Tasa de Demanda Excedente						
V [mph] - No Huracanados	F(v) - No Huracanados	V [mph] - Huracanados	F(v) - Huracanados	F(v) - Combinados	Tr [años] - Combinados	v(v)
80	0.9424	80	0.7959	0.7500	4	0.2500
81	0.9482	81	0.8039	0.7622	4	0.2378
82	0.9535	82	0.8116	0.7739	4	0.2261
83	0.9582	83	0.8191	0.7849	5	0.2151
84	0.9625	84	0.8264	0.7954	5	0.2046
85	0.9663	85	0.8335	0.8054	5	0.1946
86	0.9698	86	0.8403	0.8149	5	0.1851
87	0.9729	87	0.8469	0.8239	6	0.1761
88	0.9757	88	0.8532	0.8325	6	0.1675
89	0.9782	89	0.8594	0.8406	6	0.1594
90	0.9804	90	0.8653	0.8484	7	0.1516
91	0.9824	91	0.8711	0.8558	7	0.1442
92	0.9842	92	0.8766	0.8628	7	0.1372
93	0.9859	93	0.8819	0.8695	8	0.1305
94	0.9873	94	0.8871	0.8758	8	0.1242
95	0.9886	95	0.8920	0.8819	8	0.1181
96	0.9898	96	0.8968	0.8876	9	0.1124
97	0.9909	97	0.9014	0.8931	9	0.1069
98	0.9918	98	0.9058	0.8984	10	0.1016
99	0.9927	99	0.9100	0.9033	10	0.0967
100	0.9934	100	0.9141	0.9081	11	0.0919
101	0.9941	101	0.9180	0.9126	11	0.0874
102	0.9947	102	0.9218	0.9169	12	0.0831
103	0.9953	103	0.9254	0.9210	13	0.0790
104	0.9958	104	0.9289	0.9249	13	0.0751
105	0.9962	105	0.9322	0.9287	14	0.0713
106	0.9966	106	0.9354	0.9322	15	0.0678
107	0.9970	107	0.9385	0.9356	16	0.0644
108	0.9973	108	0.9414	0.9388	16	0.0612
109	0.9976	109	0.9442	0.9419	17	0.0581
110	0.9978	110	0.9469	0.9448	18	0.0552
111	0.9980	111	0.9495	0.9476	19	0.0524
112	0.9982	112	0.9519	0.9503	20	0.0497
113	0.9984	113	0.9543	0.9528	21	0.0472
114	0.9986	114	0.9566	0.9552	22	0.0448
115	0.9987	115	0.9587	0.9575	24	0.0425
116	0.9989	116	0.9608	0.9597	25	0.0403
117	0.9990	117	0.9628	0.9618	26	0.0382
118	0.9991	118	0.9646	0.9638	28	0.0362
119	0.9992	119	0.9664	0.9656	29	0.0344
120	0.9993	120	0.9682	0.9674	31	0.0326
121	0.9993	121	0.9698	0.9692	32	0.0308
122	0.9994	122	0.9714	0.9708	34	0.0292
123	0.9995	123	0.9728	0.9723	36	0.0277
124	0.9995	124	0.9743	0.9738	38	0.0262
125	0.9996	125	0.9756	0.9752	40	0.0248
126	0.9996	126	0.9769	0.9765	43	0.0235
127	0.9997	127	0.9781	0.9778	45	0.0222
128	0.9997	128	0.9793	0.9790	48	0.0210
129	0.9997	129	0.9804	0.9801	50	0.0199
130	0.9998	130	0.9815	0.9812	53	0.0188
131	0.9998	131	0.9825	0.9823	56	0.0177
132	0.9998	132	0.9834	0.9832	60	0.0168
133	0.9998	133	0.9844	0.9842	63	0.0158
134	0.9998	134	0.9852	0.9851	67	0.0149
135	0.9999	135	0.9860	0.9859	71	0.0141
136	0.9999	136	0.9868	0.9867	75	0.0133
137	0.9999	137	0.9876	0.9874	80	0.0126
138	0.9999	138	0.9883	0.9882	84	0.0118
139	0.9999	139	0.9889	0.9888	90	0.0112

Tabla 3.38 Tasa de demanda excedente en función de la velocidad de viento

Tasa de Demanda Excedente						
V [mph] - No Huracanados	F(v) - No Huracanados	V [mph] - Huracanados	F(v) - Huracanados	F(v) - Combinados	Tr [años] - Combinados	v(v)
140	0.9999	140	0.9896	0.9895	95	0.0105
141	0.9999	141	0.9902	0.9901	101	0.0099
142	0.9999	142	0.9907	0.9907	107	0.0093
143	0.9999	143	0.9913	0.9912	114	0.0088
144	0.9999	144	0.9918	0.9917	121	0.0083
145	1.0000	145	0.9923	0.9922	128	0.0078
146	1.0000	146	0.9927	0.9927	137	0.0073
147	1.0000	147	0.9932	0.9931	145	0.0069
148	1.0000	148	0.9936	0.9935	155	0.0065
149	1.0000	149	0.9940	0.9939	164	0.0061
150	1.0000	150	0.9943	0.9943	175	0.0057
151	1.0000	151	0.9947	0.9946	187	0.0054
152	1.0000	152	0.9950	0.9950	199	0.0050
153	1.0000	153	0.9953	0.9953	212	0.0047
154	1.0000	154	0.9956	0.9956	226	0.0044
155	1.0000	155	0.9959	0.9958	241	0.0042
156	1.0000	156	0.9961	0.9961	257	0.0039
157	1.0000	157	0.9964	0.9964	274	0.0036
158	1.0000	158	0.9966	0.9966	293	0.0034
159	1.0000	159	0.9968	0.9968	313	0.0032
160	1.0000	160	0.9970	0.9970	334	0.0030
161	1.0000	161	0.9972	0.9972	358	0.0028
162	1.0000	162	0.9974	0.9974	382	0.0026
163	1.0000	163	0.9976	0.9976	409	0.0024
164	1.0000	164	0.9977	0.9977	438	0.0023
165	1.0000	165	0.9979	0.9979	469	0.0021
166	1.0000	166	0.9980	0.9980	503	0.0020
167	1.0000	167	0.9981	0.9981	539	0.0019
168	1.0000	168	0.9983	0.9983	578	0.0017
169	1.0000	169	0.9984	0.9984	620	0.0016
170	1.0000	170	0.9985	0.9985	665	0.0015
171	1.0000	171	0.9986	0.9986	714	0.0014
172	1.0000	172	0.9987	0.9987	768	0.0013
173	1.0000	173	0.9988	0.9988	825	0.0012
174	1.0000	174	0.9989	0.9989	887	0.0011
175	1.0000	175	0.9990	0.9990	955	0.0010
176	1.0000	176	0.9990	0.9990	1027	0.0010
177	1.0000	177	0.9991	0.9991	1107	0.0009
178	1.0000	178	0.9992	0.9992	1192	0.0008
179	1.0000	179	0.9992	0.9992	1285	0.0008
180	1.0000	180	0.9993	0.9993	1386	0.0007
181	1.0000	181	0.9993	0.9993	1496	0.0007
182	1.0000	182	0.9994	0.9994	1616	0.0006
183	1.0000	183	0.9994	0.9994	1745	0.0006
184	1.0000	184	0.9995	0.9995	1887	0.0005
185	1.0000	185	0.9995	0.9995	2041	0.0005
186	1.0000	186	0.9995	0.9995	2208	0.0005
187	1.0000	187	0.9996	0.9996	2391	0.0004
188	1.0000	188	0.9996	0.9996	2591	0.0004
189	1.0000	189	0.9996	0.9996	2809	0.0004
190	1.0000	190	0.9997	0.9997	3047	0.0003
191	1.0000	191	0.9997	0.9997	3307	0.0003
192	1.0000	192	0.9997	0.9997	3592	0.0003
193	1.0000	193	0.9997	0.9997	3903	0.0003
194	1.0000	194	0.9998	0.9998	4245	0.0002
195	1.0000	195	0.9998	0.9998	4619	0.0002
196	1.0000	196	0.9998	0.9998	5030	0.0002
197	1.0000	197	0.9998	0.9998	5480	0.0002
198	1.0000	198	0.9998	0.9998	5976	0.0002
199	1.0000	199	0.9998	0.9998	6520	0.0002
200	1.0000	200	0.9999	0.9999	7119	0.0001

3.6 Curvas de costo de total

En las Fig 3.22, 3.23 y 3.24 se muestran las curvas de costo total, obtenidas mediante la ecuación 2.6, considerando el costo inicial de los materiales para los valores del factor Q de 3.5, 5 y 15, respectivamente.

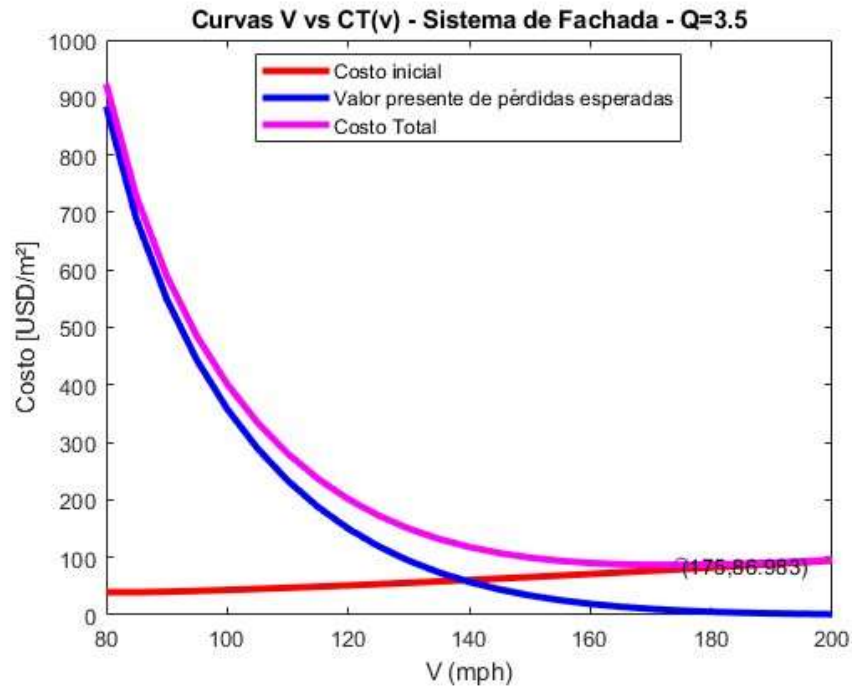


Fig 3.22 Curva de costo total por unidad de área $CT(v)$ vs V para el sistema de fachada - $Q=3.5$

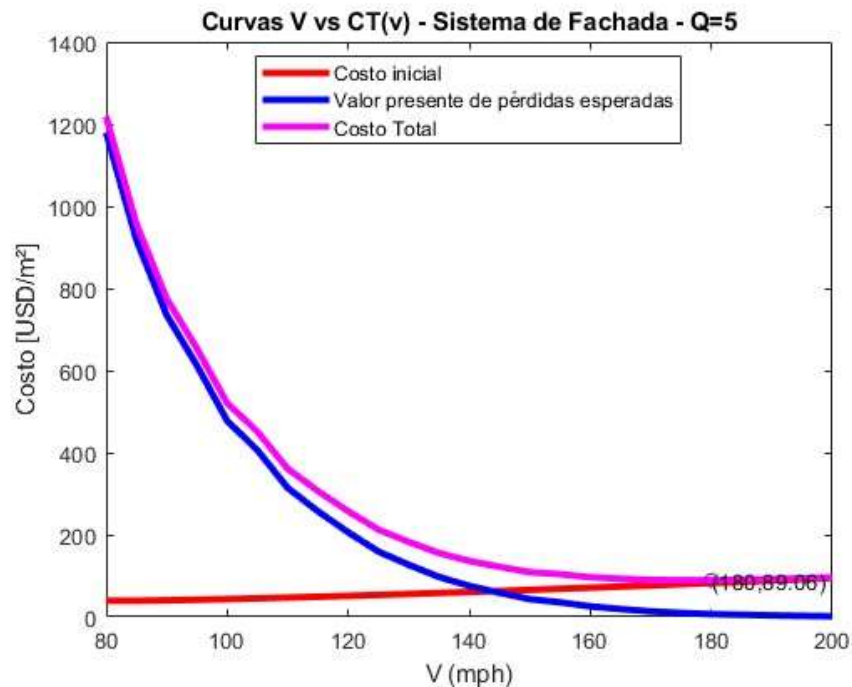


Fig 3.23 Curva de costo total por unidad de área $CT(v)$ vs V para el sistema de fachada - $Q=5$

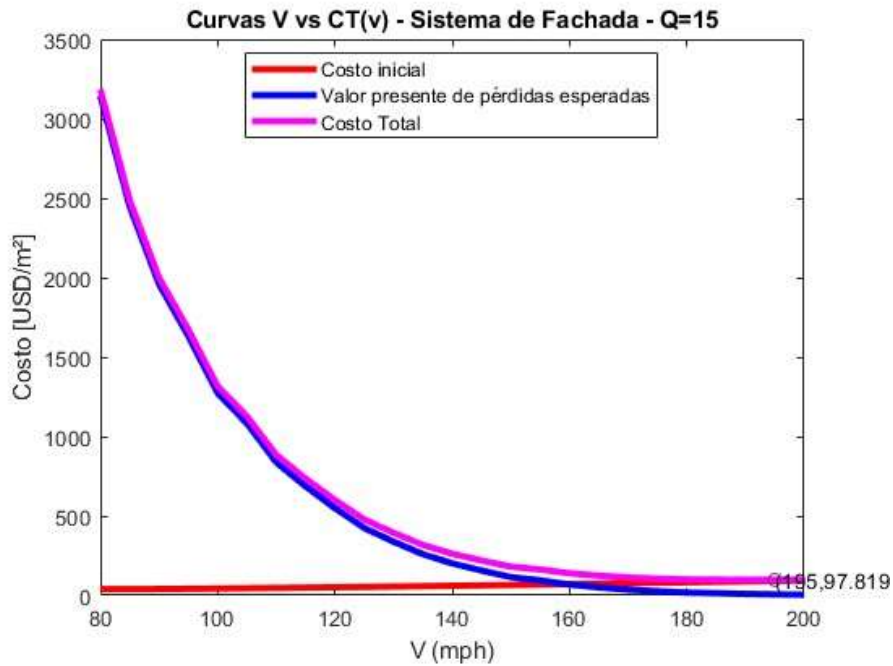


Fig 3.24 Curva de costo total por unidad de área $CT(v)$ vs V para el sistema de fachada - $Q=15$
 En las Fig 3.25, 3.26 y 3.27 se muestran las curvas de costo total, obtenidas mediante la ecuación 2.6, considerando el costo inicial de los materiales y los procesos de fabricación para los valores del factor Q de 3.5, 5 y 15, respectivamente.

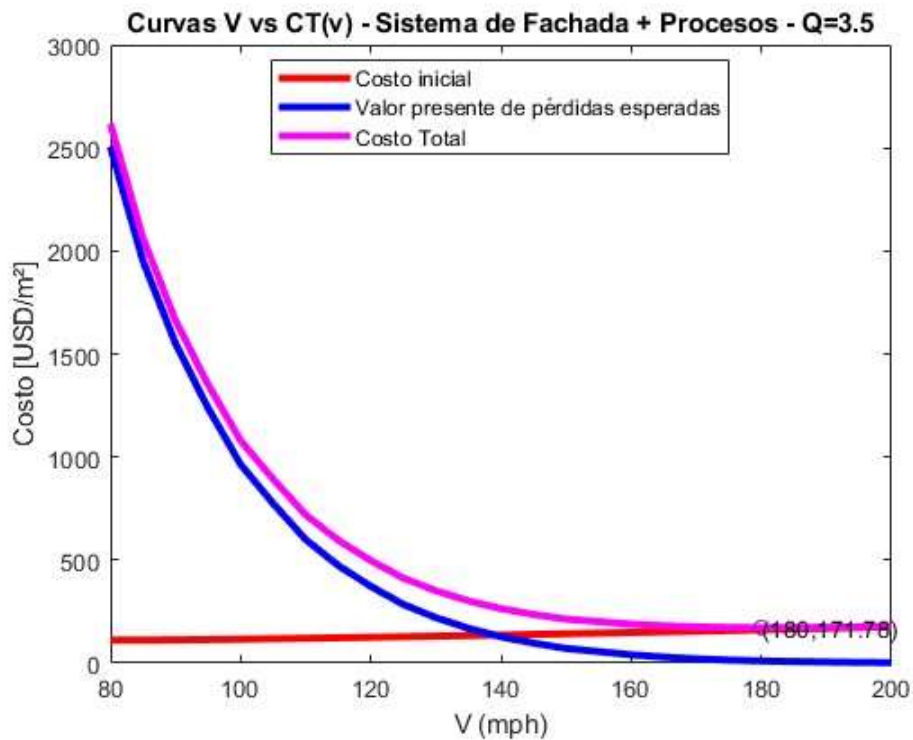


Fig 3.25 Curva de costo total por unidad de área $CT(v)$ vs V para el sistema de fachada incluyendo procesos de fabricación - $Q=3.5$

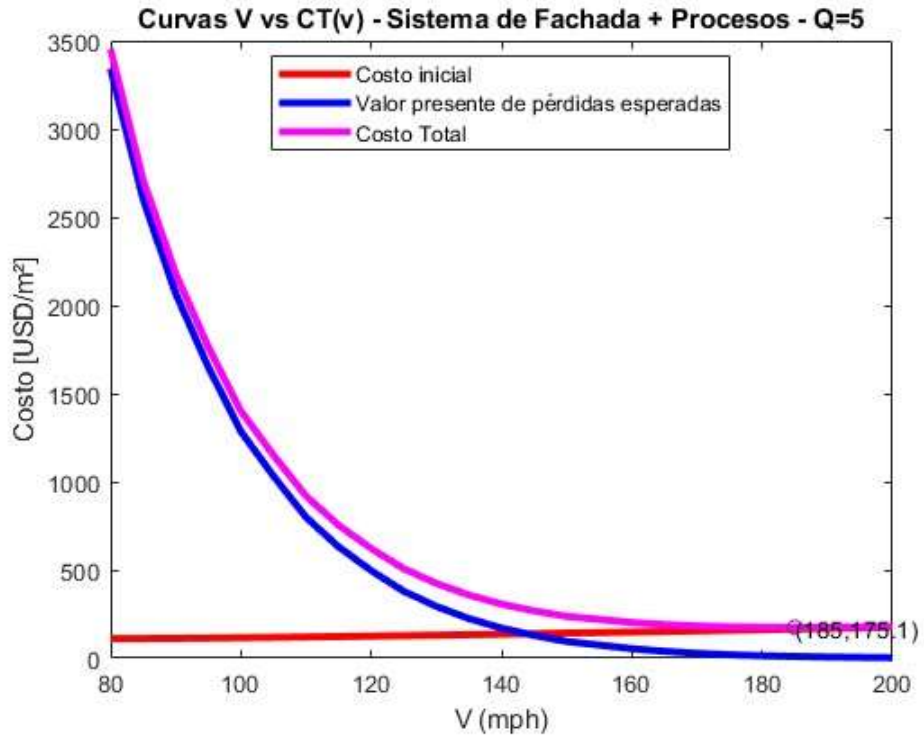


Fig 3.26 Curva de costo total por unidad de área CT(v) vs V para el sistema de fachada incluyendo procesos de fabricación - Q=5.0

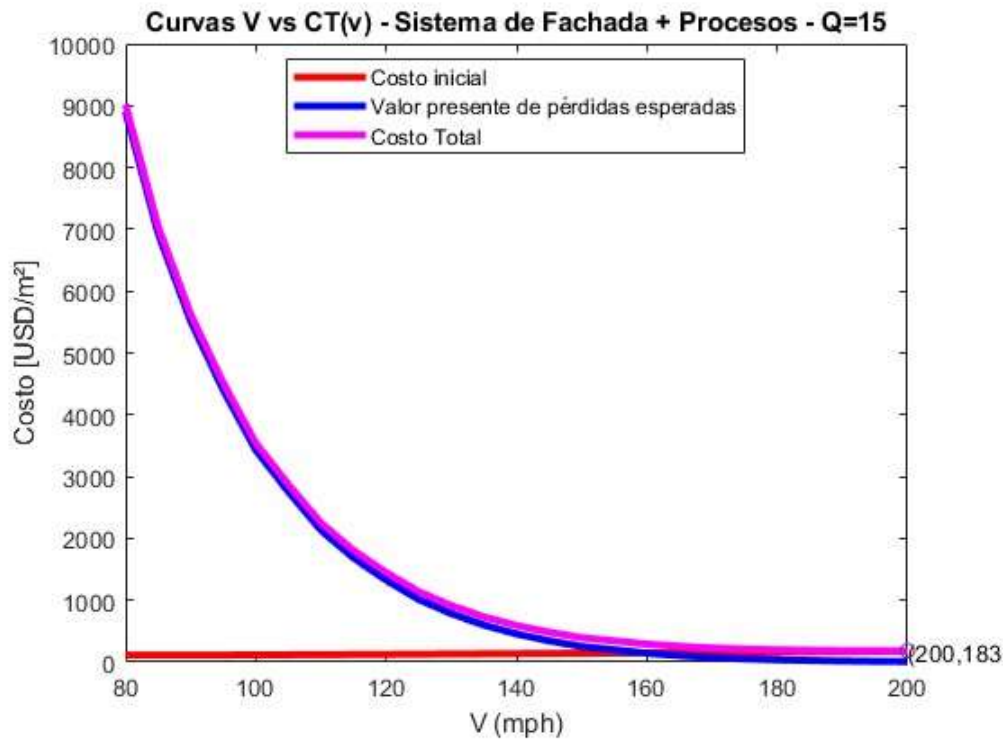


Fig 3. 27 Curva de costo total por unidad de área CT(v) vs V para el sistema de fachada incluyendo procesos de fabricación - Q=15

En las Fig 3.28, 3.29 y 3.30 se muestran las curvas de costo total normalizado, obtenidas mediante la ecuación 2.7, considerando el costo inicial de los materiales para los valores del factor Q de 3.5, 5 y 15, respectivamente.

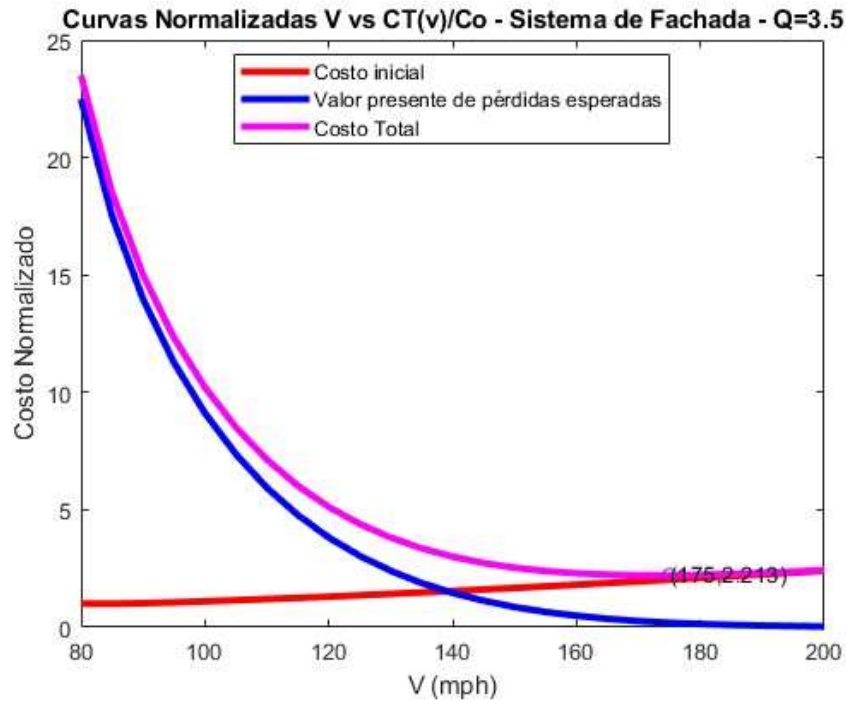


Fig 3.28 Curva de costo total normalizado por unidad de área $CT(v)$ vs V para el sistema de fachada - $Q=3.5$

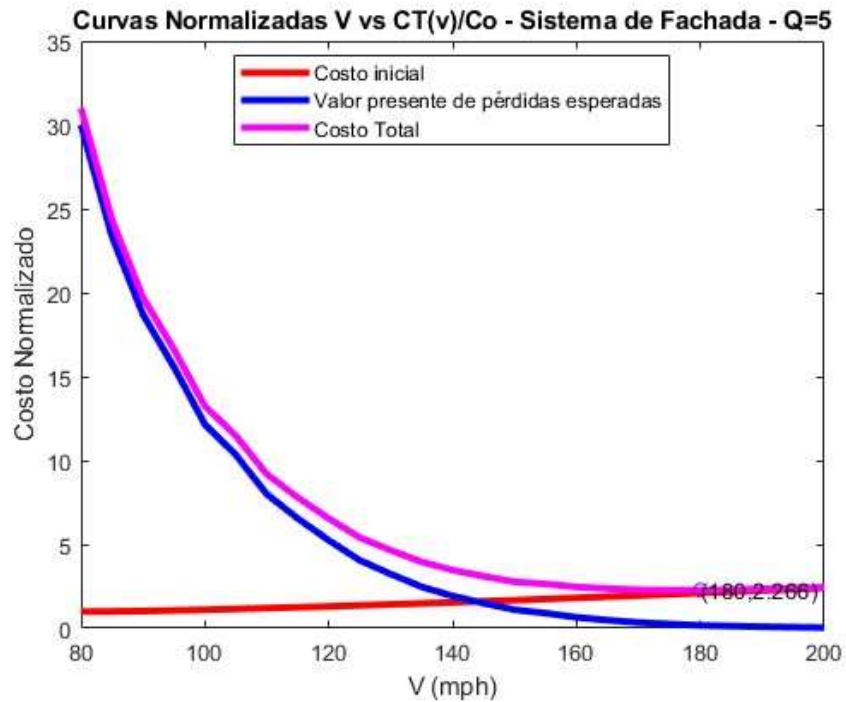


Fig 3.29 Curva de costo total normalizado por unidad de área $CT(v)$ vs V para el sistema de fachada - $Q=5$

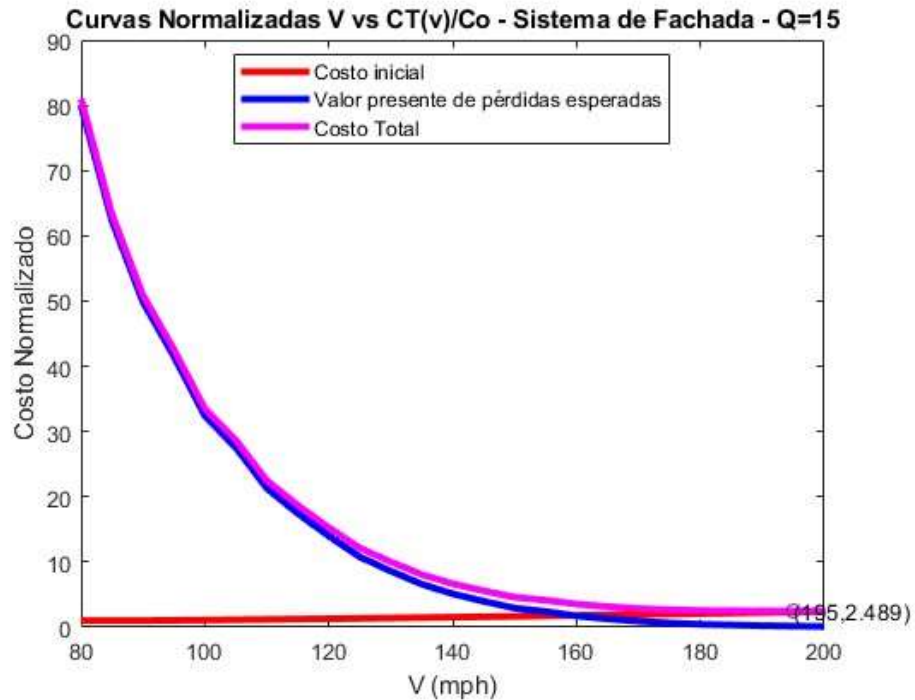


Fig 3.30 Curva de costo total normalizado por unidad de área $CT(v)$ vs V para el sistema de fachada - $Q=15$. En las Fig 3.31, 3.32 y 3.33 se muestran las curvas de costo total normalizado, obtenidas mediante la ecuación 2.7, considerando el costo inicial de los materiales y los procesos de fabricación para los valores del factor Q de 3.5, 5 y 15, respectivamente.

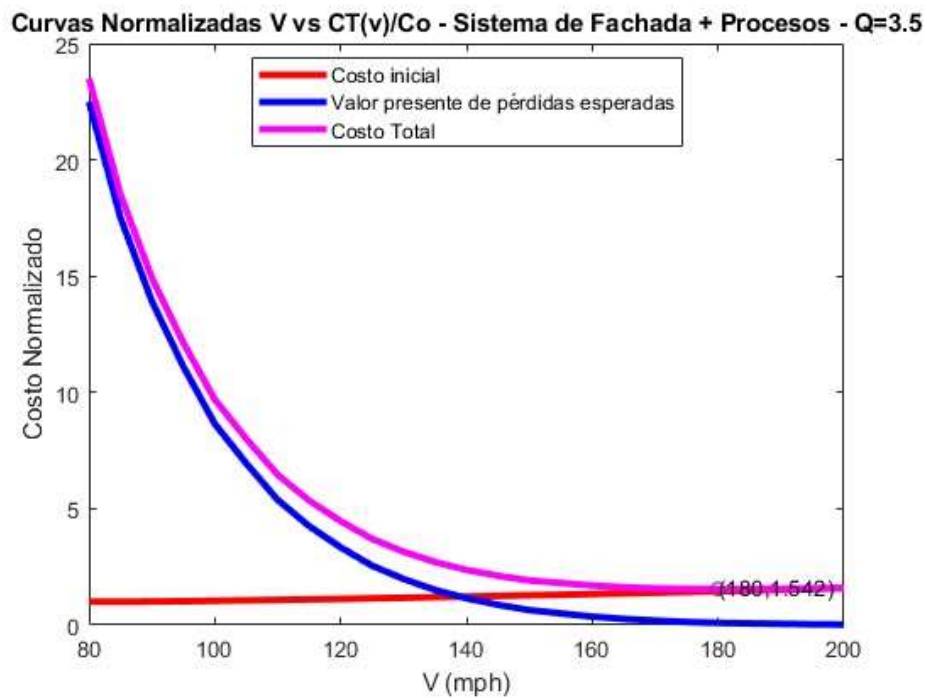


Fig 3.31 Curva de costo total normalizado por unidad de área $CT(v)$ vs V para el sistema de fachada incluyendo procesos de fabricación - $Q=3.5$

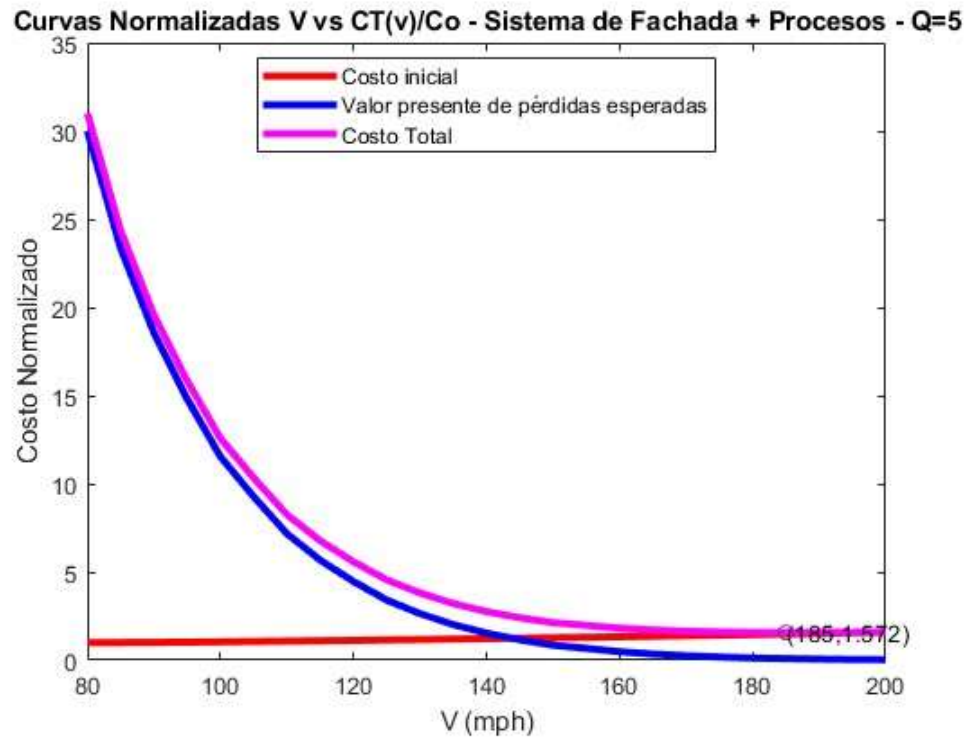


Fig 3.32 Curva de costo total normalizado por unidad de área $CT(v)$ vs V para el sistema de fachada incluyendo procesos de fabricación - $Q=5$

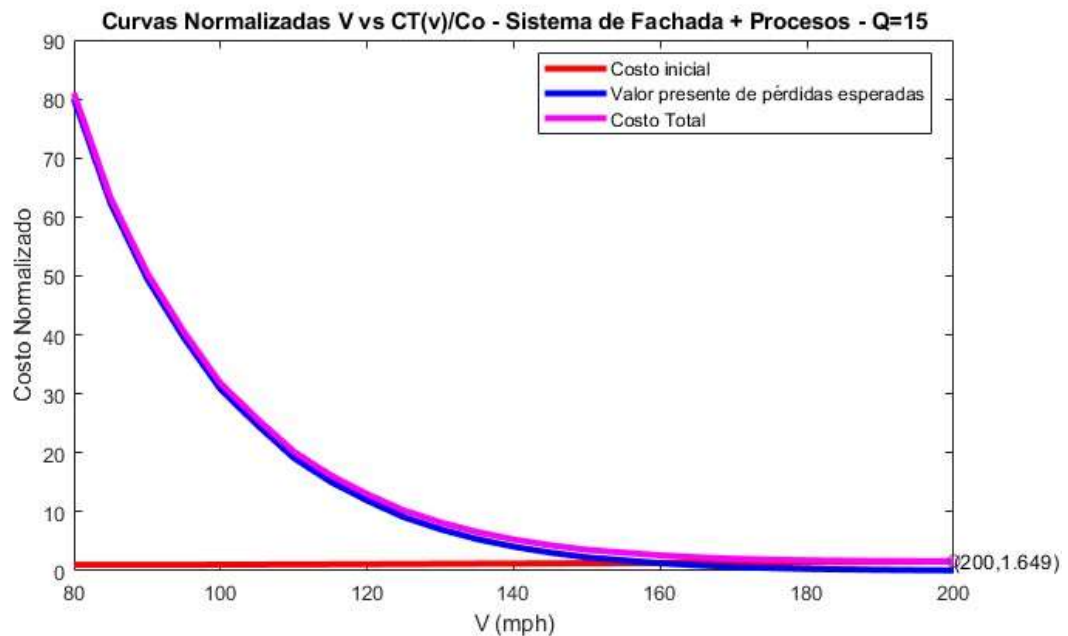


Fig 3.33 Curva de costo total normalizado por unidad de área $CT(v)$ vs V para el sistema de fachada incluyendo procesos de fabricación - $Q=15$

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Discusión de resultados

Se obtuvieron las curvas de costo inicial y costo inicial normalizado para cada uno de los componentes que hacen parte del sistema de fachada analizado, las cuales se muestran en las Fig 3.2 a 3.5 y 3.8 a 3.15. En las curvas correspondientes al costo inicial real, se observa que aquellas asociadas a los soportes, tornillos para paneles y tornillos de soportes presentan incrementos de costo representativos en comparación a los demás elementos del sistema cuyo comportamiento muestra incrementos graduales a medida que se incrementa la velocidad de viento de diseño. Este comportamiento se debe a la limitación en las referencias consideradas en el análisis para cada elemento, que para este estudio se definieron con base en la disponibilidad comercial de estos.

Otro aspecto importante para resaltar de las curvas obtenidas es la relación de los datos experimentales con respecto a los datos reales de cada elemento. Se observa en la Fig 3.8 que los datos experimentales se ajustan de manera aproximada a los reales y, además, la relación entre el costo inicial y la velocidad de viento de diseño es aproximadamente lineal. Para los montantes y los anclajes a concreto, en las Fig 3.2 y 3.14 se muestra que la relación entre el costo inicial y la velocidad de viento de diseño puede ser representada con suficiente precisión por un polinomio de grado dos. Las curvas obtenidas para soportes, tornillos para soportes y especialmente los tornillos para paneles, mostradas en las Fig 3.4, 3.12 y 3.10, respectivamente, no se identifica claramente la relación entre el costo inicial y la velocidad de viento de diseño, lo cual posiblemente esté influenciado por los incrementos abruptos del costo inicial mencionados en el párrafo anterior.

De las Tablas 3.27 y 3.33 se observa que los soportes, tornillos para paneles y tornillos para soportes representan en conjunto un porcentaje que se encuentra en un intervalo del 12 al 18% del costo total considerando únicamente el costo inicial de los materiales y un porcentaje entre el 5% y el 8% considerando el costo de los materiales y los procesos de fabricación. Las Fig 3.17 y 3.19 muestran que las curvas obtenidas experimentalmente para determinar el costo inicial por unidad de área del sistema de fachada considerando únicamente los costos de los elementos e incluyendo los procesos de fabricación se ajustan a las obtenidas para el costo inicial real del sistema. Esto demuestra que, aunque el porcentaje que representan los tres componentes mencionados anteriormente sobre el costo inicial del sistema puede ser representativo, especialmente al considerar sólo el costo de los elementos, el costo inicial experimental de estos componentes no influye de manera significativa en las curvas obtenidas para el sistema.

Las curvas de costo total y costo total normalizado del sistema de fachada se muestran en las Fig 3.22 a 3.27, en las cuales se observa que el valor asociado a la velocidad óptima para cada una de

estas corresponde a una velocidad relacionada con la intersección de las curvas de costo inicial y valor presente de pérdidas esperadas. En la Tabla 4.1 se muestran los valores obtenidos para la velocidad de viento óptima obtenidas para los diferentes valores del factor Q . En la Tabla 4.2 se muestran las velocidades definidas en ASCE 7-22 para la ubicación de la edificación definida en la sección 3.1 para cada categoría de riesgo de la edificación.

Tabla 4.1 Velocidades de viento óptimas [mph]

Ítem	Q	V [mph]
Sistema de Fachada	3.5	175
Sistema de Fachada	5	180
Sistema de Fachada	15	195
Sistema de Fachada + Procesos	3.5	180
Sistema de Fachada + Procesos	5	185
Sistema de Fachada + Procesos	15	200

Tabla 4.2 Velocidades básicas de viento definidas en ASCE 7-22 para la ubicación de la edificación [mph]

V [mph]	Tr [Años]	Categoría de Riesgo
158	300	I
170	700	II
183	1700	III
191	3000	IV

Al comparar las velocidades óptimas obtenidas para cada valor del factor Q con la asociada a una edificación clasificada en categoría de riesgo II, se observa que para los valores de Q definidos se obtienen velocidades de viento óptimas mayores a la definida en ASCE 7-22 para la categoría de riesgo II.

Las Fig 4.1 muestra la curva de costo total del sistema de fachada considerando únicamente el costo de los materiales para un factor $Q=0.717$. Este factor se define bajo la suposición que se excederá el valor de V_o definido en la Tabla 3.28 y que esta excedencia de la velocidad implica un costo de reparación del 100% en los paneles y montantes de aluminio, los cuales representan un 71.7% del costo total por unidad de área del sistema.

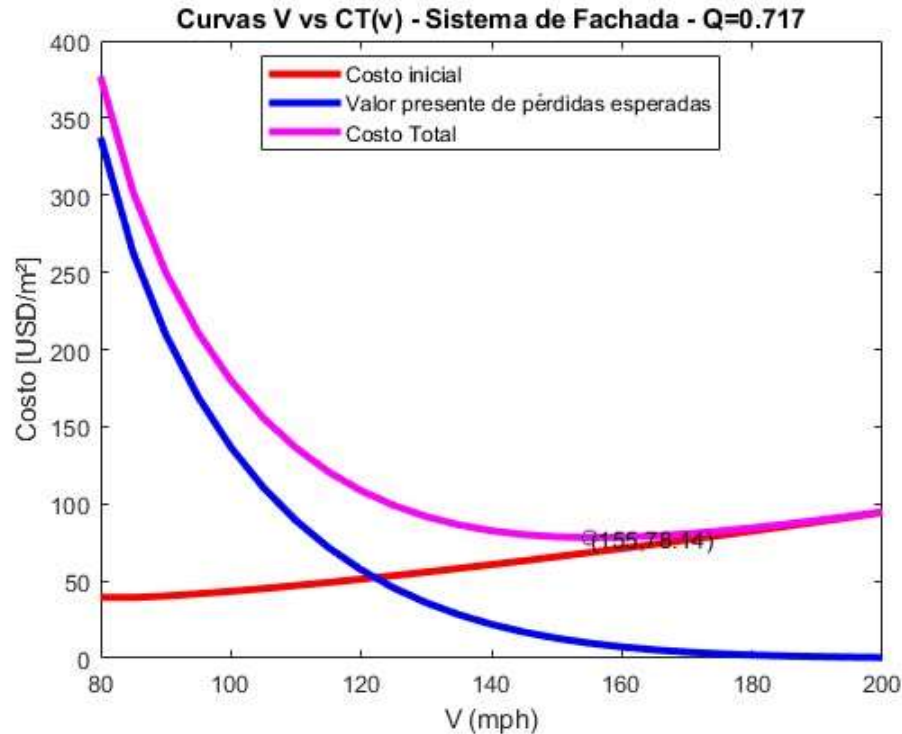


Fig 4.1 Curva de costo total por unidad de área $CT(v)$ vs V para el sistema de fachada - $Q=0.717$

Al igual que en las Fig 3.22 a 3.27, la velocidad de viento óptima es mayor a la velocidad correspondiente a la intersección de las curvas de costo inicial y valor presente de pérdidas esperadas para el valor de Q utilizado. Sin embargo, esta velocidad es menor a la velocidad definida en ASCE 7-22 para edificaciones clasificadas en categoría de riesgo II. Se puede inferir de estos resultados que las velocidades básicas de viento definidas en la normativa están asociadas a valores de Q que no solo consideran el daño y reparación total de los componentes del sistema, sino que pueden estar implícitos otros factores como lo son el daño del interior de la edificación, el contenido de su interior, pérdidas económicas, costos de reubicación o fatalidades y lesiones humanas entre otros posibles factores.

La Fig 4.2 muestra la curva de costo total para el sistema de fachada considerando un factor $Q=3.5$ y un valor de la tasa de descuento $\mu=3\%$. A diferencia de la curva obtenida en la Fig 3.22, la Fig 4.2 muestra que la velocidad de viento óptima es mayor, lo cual indica que el valor seleccionado de μ tiene influencia significativa en el valor obtenido de la velocidad de viento óptima.

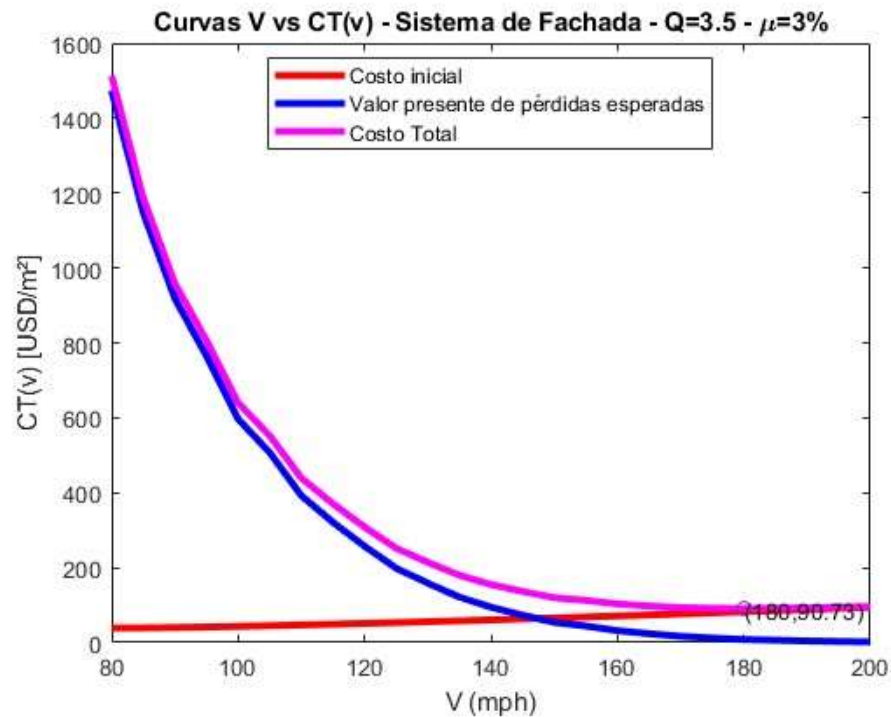


Fig 4.2 Curva de costo total por unidad de área $CT(v)$ vs V para el sistema de fachada - $Q=3.5$ - $\mu=3\%$

4.2 Procedimiento para determinar las velocidades de viento de diseño a partir de simulaciones de huracanes

En esta sección se describe el procedimiento para obtener las velocidades de viento de diseño con base en el manual técnico Hazus Hurricane Model 4.2 (Federal Emergency Management Agency, 2021) y el modelo estocástico de seguimiento desarrollado por Hong et al. (2022) para determinar el peligro de vientos huracanados que afecta las regiones costeras mexicanas.

4.2.1 Metodología de simulación de huracanes

La simulación matemática de huracanes probabilísticos es el enfoque más utilizado para la estimación de velocidades de viento para el diseño de estructuras y la evaluación del riesgo de huracanes. El enfoque consiste en obtener inicialmente los parámetros claves de huracanes (Δp , B , R_{max} , θ , c , d_{min}). Posteriormente se utiliza una aproximación de Monte Carlo para generar valores de muestra para cada uno de estos parámetros y se traza una representación matemática a lo largo de una línea recta que satisfaga los datos de la muestra, mientras que las velocidades de viento son grabadas. La intensidad del huracán se mantiene constante hasta que se consigue la llegada a tierra y posteriormente el huracán se deteriora utilizando modelos de tasa de llenado. Mediante este enfoque se modela el seguimiento completo de un huracán o tormenta tropical que comienza con su inicio sobre el océano y termina con su disipación final. La presión central se modela como una

función de la temperatura de la superficie del mar y el rumbo de la tormenta, velocidad, etc se actualizan en puntos de seis horas en la historia de la tormenta. El enfoque se valida comparando las estadísticas específicas del sitio para los parámetros claves de los huracanes modelados con las estadísticas obtenidas de datos históricos. Se utiliza la interpolación lineal entre los puntos de seis horas.

4.2.2 Modelación del seguimiento de tormentas

De acuerdo con lo propuesto por Hong et al. (2022) la ocurrencia de ciclones tropicales puede ser modelado utilizando un modelo binomial negativo y el origen de los eventos de ciclones tropicales puede ser seleccionado aleatoriamente del origen de eventos históricos de ciclones tropicales. Los ciclones tropicales que son definidos por la intensidad relativa, dirección y velocidad de traslación pueden ser previstos probabilísticamente utilizando un modelo estocástico de tipo autorregresivo, donde los parámetros del modelo y los residuales serán evaluados con base en los registros históricos de los ciclones tropicales.

El modelo autorregresivo estima o predice probabilísticamente el estado del seguimiento del ciclón tropical en el instante de tiempo $i+1$ dado que se conoce el estado actual en el instante de tiempo i . El modelo se define mediante las ecuaciones 4.1 a 4.4

$$\Delta \ln c = a_1 + a_2 \Delta \ln c_i + a_3 \theta_i + \varepsilon_c \quad (4.1)$$

$$\Delta \theta = b_1 + b_2 c_i + b_3 \theta_i + \varepsilon_\theta \quad (4.2)$$

$$\ln(I_{i+1}) = d_1 + d_2 \ln(I_i) + d_3 T_{s_i} + d_4 (T_{s_{i+1}} - T_{s_i}) + \varepsilon_I \quad (4.3)$$

$$I = (p_{da} - p_c + 100e_s)/(p_{da} - p_{dc}) \quad (4.4)$$

Dónde $\Delta \ln c = \ln c_{i+1} - \ln c_i$; $\Delta \theta = \theta_{i+1} - \theta_i$; a_j , b_j y d_j son parámetros del modelo geográficamente dependientes, c es la velocidad de traslación en m/s; θ es la dirección definida de 0° a 180° y de 0° a -180° , con los valores positivos y negativos que representan los sentidos en dirección de las manecillas del reloj y en contra de las manecillas del reloj respectivamente; T_s ($^\circ\text{K}$) es la temperatura de la superficie del mar; I es la intensidad relativa del ciclón tropical y ε_c , ε_θ y ε_I son los residuales de las ecuaciones predictivas, las cuales se modelan como variables aleatorias normalmente distribuidas de media cero, p_{da} (Pa) es la presión ambiente que se toma igual a 101300 Pa, p_c (Pa) es la presión central, p_{dc} (Pa) es el valor mínimo sostenible de la presión central de superficie de aire seco. La presión de vapor de saturación e_s (hPa) está dada por

$$e_s = 6.112 * \exp\left[\frac{17.67(T_s - 273)}{(T_s - 29.5)}\right] \quad (4.5)$$

Si T_{s_i} no está disponible, se utiliza la temperatura promedio mensual de la superficie del mar, derivada del set de datos HadISST desde 1870 al 2011. Una vez se desarrolla el modelo y se evalúa

el valor de I_{i+1} , se puede calcular el valor correspondiente de p_c con base en la definición de la intensidad relativa y la diferencia de presión central se estima mediante la ecuación 4.6.

$$\Delta p = p_{da} - p_c \quad (4.6)$$

Los coeficientes geográficamente dependientes a_j , b_j y d_j se desarrollan separando los registros históricos en dos grupos (registros orientales y occidentales) por medio de celdas mutuamente exclusivas de $5^\circ \times 5^\circ$ que cubren la región de interés. Los registros orientales representan ciclones tropicales dirigiéndose del oriente al occidente y los registros occidentales se dirigen del occidente al oriente.

Para la evaluación del peligro de viento por medio del uso de modelos de campo de viento como los mencionados en Hong et al. (2022), se necesita conocer la velocidad de traslación c , el valor de B conocido como el parámetro B de Holland y el radio a las velocidades máximas de viento R_{max} . Los valores de R_{max} y B se pueden obtener de las ecuaciones 4.7 y 4.8 respectivamente.

$$\ln(R_{max}) = 3.015 - 6.291 * 10^{-9} \Delta p^2 + 0.0337 \psi + \varepsilon_{\ln R_{max}} \quad (4.7)$$

$$B = 1.833 - 0.326 \sqrt{f R_{max}} + \varepsilon_B \quad (4.8)$$

Dónde $f = 2\Omega \sin \Psi$ (rad/s) es el parámetro de Coriolis en la latitud Ψ (grados) en la cual Ω (rad/s) es la rotación de la tierra con 2π /día, $\varepsilon_{\ln R_{max}}$ y ε_B son variables aleatorias normalmente distribuidas de media cero.

El modelo descrito en esta sección se evaluará a través de comparaciones de los datos estadísticos de huracanes simulados y observados en la región de interés con los obtenidos por medio de las simulaciones realizadas.

4.2.3 Modo de decaída

La forma del modelo de decaída es una función de decaída exponencial (Federal Emergency Management Agency, 2021). Esta función se muestra en la ecuación 4.9

$$\Delta p(t) = \Delta p_o * \exp(-at) \quad (4.9)$$

Dónde $\Delta p(t)$ es la diferencia entre la presión central de la tormenta y el campo lejano de presión (tomado normalmente como la presión asociada con la isobara cerrada más externa) (mb) t horas después de la llegada a tierra y Δp_o es la diferencia entre la presión central de la tormenta y la presión de campo lejano en el momento en el cual la tormenta llega a tierra.

La magnitud de la constante de llenado a se modela como una función de características definidas de un ciclón tropical en el momento de la llegada a tierra. En las ecuaciones 4.10 a 4.13 se muestran los modelos empleados para las regiones del golfo costero, la costa de la península de Florida, la costa media atlántica y la costa de Nueva Inglaterra respectivamente.

$$a = 0.0413 + 0.0018 \left[\frac{\Delta p_o c}{R_{max}} \right]; \sigma \varepsilon = 0.0169 \quad (4.10)$$

$$a = 0.0225 + 0.0017 \left[\frac{\Delta p_o c}{R_{max}} \right]; \sigma \varepsilon = 0.0158 \quad (4.11)$$

$$a = 0.0364 + 0.0016 \left[\frac{\Delta p_o c}{R_{max}} \right]; \sigma \varepsilon = 0.0161 \quad (4.12)$$

$$a = 0.0034 + 0.0010 \Delta p_o; \sigma \varepsilon = 0.0114 \quad (4.13)$$

El valor mínimo permisible del coeficiente de llenado a se define como 0.015, con un error de muestreo restringido a quedar en el intervalo $\pm \sigma \varepsilon$

4.2.4 Predicción de velocidades de viento de diseño

Para determinar las velocidades de viento de diseño se determina el número de años de tormentas que se simularán utilizando el modelo de seguimiento de tormentas combinado con los modelos de campo de viento y de factor de ráfaga. Posteriormente, se sobrepone el rastro de la tormenta en el mapa y se calculan los parámetros del campo de viento para el centro del ciclón tropical ($c, \Delta p, R_{max}, B$) para el intervalo de tiempo definido en el modelo (Si el periodo de tiempo definido es inferior a 6 horas, se realiza una interpolación lineal para ajustar el modelo al nuevo intervalo definido). Finalmente, al extraer el campo de viento para los parámetros identificados y sobreponer el campo de viento en el mapa considerando el centro del ciclón tropical y la dirección de traslación, se extraen las velocidades de viento en los sitios de interés. Este proceso se repite para todos los registros de tormentas dentro de un periodo de interés.

Para evaluar la máxima velocidad de viento huracanado anual V_A en una ubicación, se extraen muestras de V_A de la malla definida en el modelo de seguimiento de tormentas para obtener la distribución empírica de V_A . Esta distribución empírica se utiliza directamente para evaluar el periodo de retorno de V_A en años.

4.3 Recomendaciones para futura investigación

El trabajo desarrollado consiste en determinar las curvas de costo total y posteriormente las velocidades de viento óptimas para un sistema de fachada compuesta por elementos de aluminio. Con base en las limitaciones y el alcance de este trabajo, se dan las siguientes recomendaciones para complementar la información obtenida:

- Se recomienda evaluar el sistema de fachada bajo la acción de presiones de viento calculadas mediante otras metodologías, como las mencionadas en el Apéndice A, para un mismo intervalo de velocidades básicas de viento. De esta manera se puede evaluar la variación de las presiones de viento calculadas y, por consiguiente, el impacto en los costos totales y las velocidades óptimas de viento con respecto a los valores obtenidos bajo la metodología definida en ASCE 7-22.

- Se aconseja calcular las velocidades de viento óptimas para el sistema de fachada utilizado en el desarrollo de este trabajo considerando la resistencia al impacto de misiles en regiones propensas a huracanes de los elementos y estimar el impacto de este requerimiento de resistencia sobre los costos totales y las velocidades óptimas de viento en comparación a los obtenidos en el presente trabajo.
 - Se sugiere replicar el procedimiento desarrollado en este trabajo considerando otros materiales, por ejemplo, sistemas de fachada compuestos exclusivamente por elementos de acero o sistemas mixtos compuestos por elementos de aluminio y acero. Este procedimiento permitirá definir un valor óptimo de costo de ciclo de vida para el sistema de fachada en una determinada región de interés.
-

APÉNDICE A

COMPARATIVO ENTRE ASCE 7-22 Y OTRAS METODOLOGÍAS PARA EL CÁLCULO DE LAS PRESIONES DE VIENTO PARA COMPONENTES Y RECUBRIMIENTOS

Se muestra un comparativo entre las metodologías empleadas en algunos códigos de diseño para el cálculo de las presiones de viento para componentes y recubrimientos, resaltando las diferencias que estos pueden tener en comparación a la metodología definida en la normativa ASCE 7-22.

A.1 NBC 2020 (Canadá)

El cálculo de las presiones de viento que actúa en los recubrimientos de la edificación está dado por el procedimiento estático, las cuales se obtienen mediante las siguientes expresiones

$$p = I_w q C_e C_t C_g C_p \quad (\text{A.1})$$

$$p_i = I_w q C_{ei} C_t C_{gi} C_{pi} \quad (\text{A.2})$$

A.1.1 Factor de importancia

A diferencia de los factores de importancia definidos en ASCE 7-22, en NBC 2020 se definen valores para el estado límite último (ULS) como para el estado límite de servicio (SLS) los cuales se muestran en la Tabla A.1.

Tabla A.1 Factores de importancia para carga de viento. *Nota.* Adaptado de “National Building Code of Canada 2020” (p. 4-30) por Canadian Commission on Building and Fire Codes - National Research Council of Canada, 2022.

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

A.1.2 Factores de exposición

Los factores de exposición se dividen en únicamente dos categorías (Edificaciones en terreno abierto y edificaciones en terreno rugoso) como se muestra a continuación

Para terreno abierto

$$C_e = \left(\frac{h}{10}\right)^{0.2} \geq 0.9 \quad (\text{A.3})$$

Para terreno rugoso

$$C_e = 0.7 \left(\frac{h}{12}\right)^{0.3} \geq 0.7 \quad (\text{A.4})$$

El coeficiente de exposición para presión interna C_{ei} será igual al coeficiente de exposición para presión externa C_e .

En ASCE 7-22 se definen tres categorías de exposición, basadas en la rugosidad del terreno y los factores de exposición son dependientes tanto de la altura de referencia como de la exposición definida para el terreno donde se encuentra ubicada la edificación.

A.1.3 Factores de efectos de ráfaga

En NBC 2020 se define un factor de efectos de ráfaga de $C_g=2.5$ para presiones externas y succiones en elementos pequeños, incluyendo recubrimientos. El coeficiente de ráfaga interno C_{gi} se toma como 2.0 o se puede calcularse mediante la siguiente expresión

$$C_{gi} = 1 + \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{V_0}{6950A}}} \quad (\text{A.5})$$

En comparación con la metodología definida en ASCE 7-22, no es necesario calcular los coeficientes de ráfaga C_p para el cálculo de las cargas de viento que actúan sobre los componentes y recubrimientos, ya que los coeficientes de presión se presentan en la forma GC_p .

A.1.4 Coeficientes de presión externa

Los coeficientes de presión externa para el diseño de recubrimientos y elementos secundarios que soportan el recubrimiento en muros, el valor de C_p se tomará como ± 0.9 , excepto que a una distancia de una esquina de la edificación igual al mayor de $0.1D$ y $0.1W$, el valor negativo de C_p se tomará como -1.2 .

Para edificaciones con altura, H , menor o igual a 20m y menor que la menor dimensión en planta, se permite usar los valores del producto de los coeficientes de presión y el factor de ráfaga $C_g C_p$. En la Fig A.1 se muestran sus valores picos externos de

En ASCE 7-22, los coeficientes de presión externa para los componentes y recubrimientos de los muros de la edificación se presentan en la forma GC_p y se dividen en dos grupos (Edificaciones con altura $h \leq 60\text{ft}$ y con altura $h > 60\text{ft}$). Estos coeficientes varían a su vez en función de la clasificación del cerramiento de la edificación.

A.1.5 Coeficientes de presión interna

En la Tabla A.2 se muestran los coeficientes de presión interna C_{pi} definidos en NBC 2020.

Tabla A.2 Coeficientes de presión interna. *Nota.* Adaptado de “National Building Code of Canada 2020” (p. 4-43) por Canadian Commission on Building and Fire Codes - National Research Council of Canada, 2022.

Building Openings	Values for C_{pi}
Uniformly distributed small openings amounting to less than 0.1% of the total surface area of the <i>building</i>	-0.15 to 0.0
Non-uniformly distributed openings of which none is significant or significant openings that are wind-resistant and closed during storms	-0.45 to +0.30
Large openings likely to remain open during storms	-0.70 to +0.70

En ASCE 7-22 se definen cuatro categorías para la clasificación de la edificación y los diferentes valores de los coeficientes C_{pi} asociados a cada clasificación.

A.2 EN.1991-1-4 (Eurocódigo)

El cálculo de las presiones de viento que actúan en las superficies externas w_e y en las superficies internas de la estructura w_i , están dadas por las siguientes expresiones

$$w_e = q_p(z_e) * c_{pe} \quad (\text{A.6})$$

$$w_i = q_p(z_i) * c_{pi} \quad (\text{A.7})$$

A.2.1 Presión de velocidad pico

La presión de velocidad pico $q_p(z)$ a la altura z , que incluye las fluctuaciones de velocidad media y de corto plazo, debe ser determinada

$$q_p(z) = [1 + 7 * I_v(z)] * \frac{1}{2} * \rho * v_m^2(z) = c_e(z) * q_b \quad (\text{A.8})$$

$$c_e(z) = \frac{q_p(z)}{q_b} \quad (\text{A.9})$$

$$q_b = \frac{1}{2} * \rho * v_b^2 \quad (\text{A.10})$$

A.2.2 Coeficientes de presión externa

Los coeficientes de presión externos están dados para área cargadas A de 1m^2 y 10m^2 en la Tabla A.3 para las configuraciones de edificaciones apropiadas como $c_{pe,1}$, para coeficientes locales, y $c_{pe,10}$, para coeficientes globales, respectivamente.

Los valores de para $c_{pe,1}$ están destinados para el diseño de elementos pequeños y fijaciones con un área por elemento de 1m^2 o menos como elementos de recubrimiento y elementos de techo. Valores de $c_{pe,10}$ deben ser utilizados para el diseño de la estructura portante general de la edificación.

La altura de referencia, z_e , para muros a barlovento de edificaciones con planta rectangular (Zona D, ver Fig A.2) dependen de la relación de aspecto h/b y son siempre las alturas superiores de las diferentes partes de los muros. Están dadas en la Fig A.1 para los siguientes tres casos:

- Una edificación, cuya altura h es menor que b debe considerarse como una parte.

- Una edificación, cuya altura h es más grande que b , pero menor que $2b$, debe ser considerada de dos partes, que comprenden: una parte inferior extendiéndose hacia arriba desde el terreno una altura igual a b ; una parte superior que consiste en el restante.
- Una edificación, cuya altura h es más grande que $2b$ se considerará en múltiples partes que comprenden: una parte inferior extendiéndose hacia arriba desde el terreno a una altura igual a b ; una parte superior extendiéndose hacia abajo desde la parte superior a una altura igual a b y una región intermedia, entre las partes superior e inferior, que se dividirá en franjas horizontales con una altura h_{strip} como se muestra en la Fig A.1.

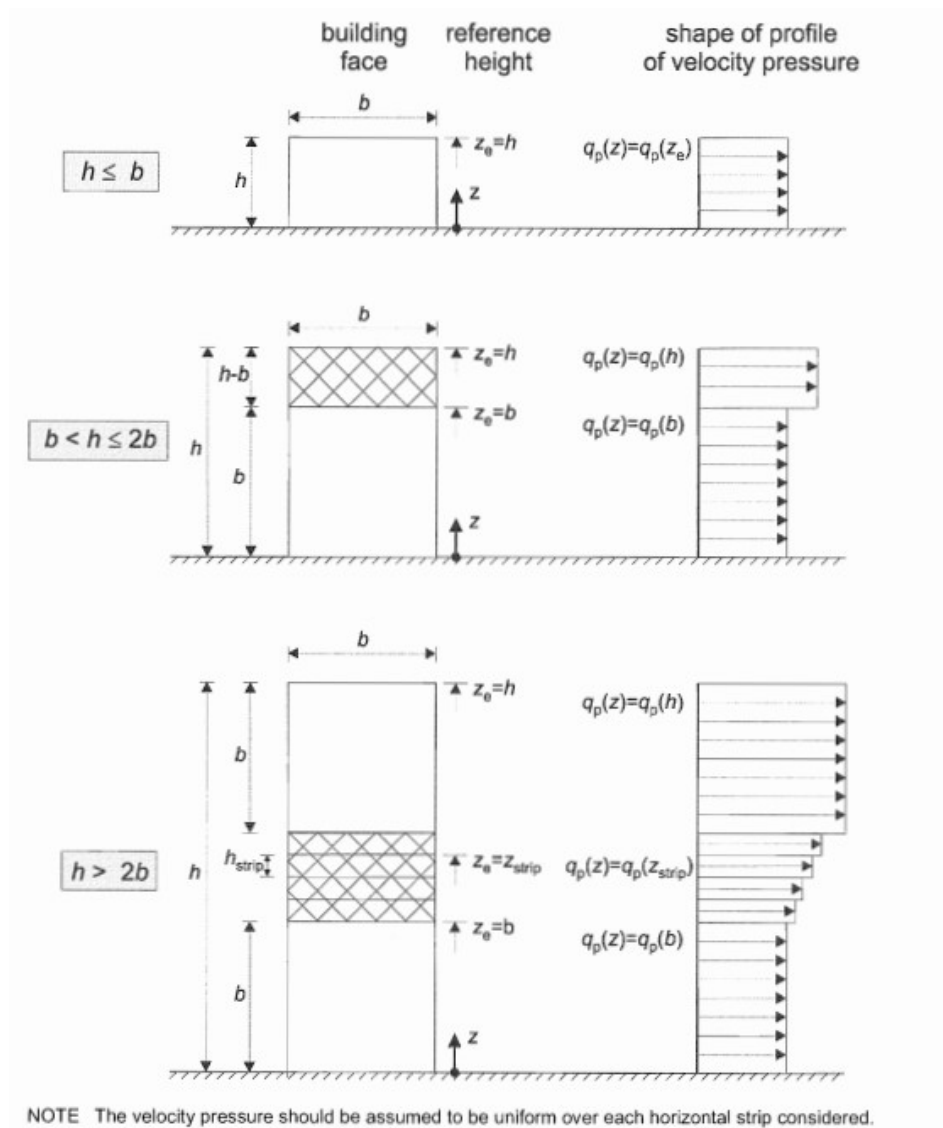


Fig A.1 Altura de referencia z_e que depende de h y b y su perfil de velocidad correspondiente. *Nota.* Adaptado de “EN 1991-1-4:2005+A1 Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: General actions – Wind actions”

(p. 35) por European Committee for Standardization, 2010.

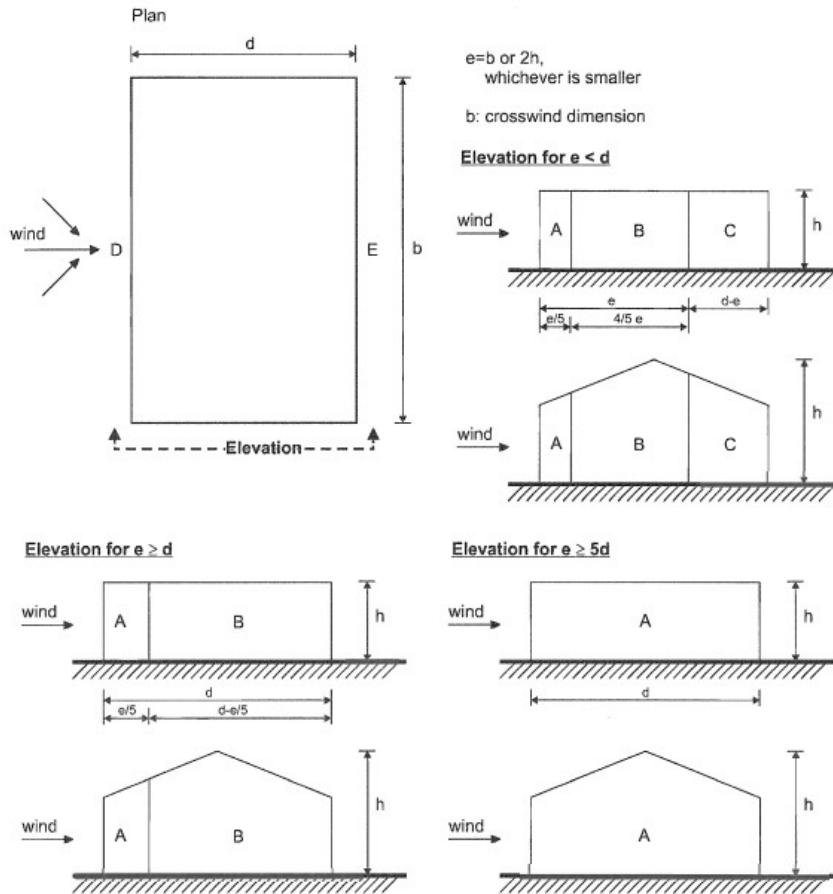


Fig A.2 Clasificación de zonas de muros verticales. Nota. Adaptado de “EN 1991-1-4:2005+A1 Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: General actions – Wind actions” (p. 36) por European Committee for Standardization, 2010.

Tabla A.3 Valores recomendados de coeficientes de presión externa para muros verticales de edificaciones con planta rectangular. Nota. Adaptado de “EN 1991-1-4:2005+A1 Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: General actions – Wind actions” (p. 37) por European Committee for Standardization, 2010.

Zone	A		B		C		D		E	
	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$
5	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0	-0,7	
1	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0	-0,5	
$\leq 0,25$	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,7	+1,0	-0,3	

Los coeficientes de presión definidos en la normativa EN-1991-1-4 son dependientes de las zonas definidas como A-B-C-D-E, cuya clasificación depende de las dimensiones de la edificación. Sin embargo, a diferencia de ASCE 7-22, estos no varían en función del área del elemento a considerar y se limitan a los elementos de recubrimientos con áreas aferentes de $1m^2$, como se definió previamente.

A.2.3 Coeficientes de presión interna

Se debe considerar que las presiones internas y externas actúan al mismo tiempo. La combinación más desfavorable de presiones internas y externas se considerará para cada combinación de aberturas posibles y otras trayectorias de fuga.

El coeficiente de presión interna, c_{pi} , depende del tamaño y la distribución de las aberturas en la envolvente de la edificación. Cuando en al menos dos lados de las edificaciones (Fachadas o techo) el área total de aberturas en cada lado es más del 30% del área de ese lado, las acciones en la estructura no deben ser calculadas con las reglas dadas en esta sección, sino que se deben utilizar las reglas de 7.3 (Techos de toldo) y 7.4 (Muros, parapetos, vallas y letreros autosoportados) de EN-1991-1-4.

Cuando una abertura externa, como una puerta o ventana, sea dominante cuando esté abierta, pero se considera que está cerrada en el estado límite último durante tormentas severas, se considerará la condición con la puerta o ventana abierta como una situación accidental de diseño de acuerdo con EN 1990 (European Committee for Standardization, 2005).

Una cara de la edificación se considerará como dominante cuando el área de las aberturas en esa cara es al menos dos veces el área de las aberturas y fugas en las caras restantes de la edificación considerada.

Para una edificación con una cara dominante, la presión interna se tomará como una fracción de la presión externa en las aberturas de la cara dominante. Se deben utilizar los valores dados por las expresiones (A.11) y (A.12).

Cuando el área de las aberturas en la cara dominante es dos veces el área de las aberturas en las caras restantes

$$c_{pi} = 0.75 * c_{pe} \quad (\text{A.11})$$

Cuando el área de las aberturas en la cara dominante es al menos tres veces el área de las aberturas en las caras restantes

$$c_{pi} = 0.90 * c_{pe} \quad (\text{A.12})$$

Donde c_{pe} es el valor del coeficiente de presión externa en las aberturas de la cara dominante. Cuando estas aberturas están ubicadas en zonas con diferentes valores de presiones externas, se puede utilizar un valor de c_{pe} promediado por área.

Para edificaciones sin una cara dominante, el coeficiente de presión interno c_{pi} se debe determinar de la Fig A.3, y es una función de la relación de la altura y la profundidad de la edificación, h/d , y la relación de aberturas μ para cada dirección q , la cual se debe determinar de la expresión (A.13).

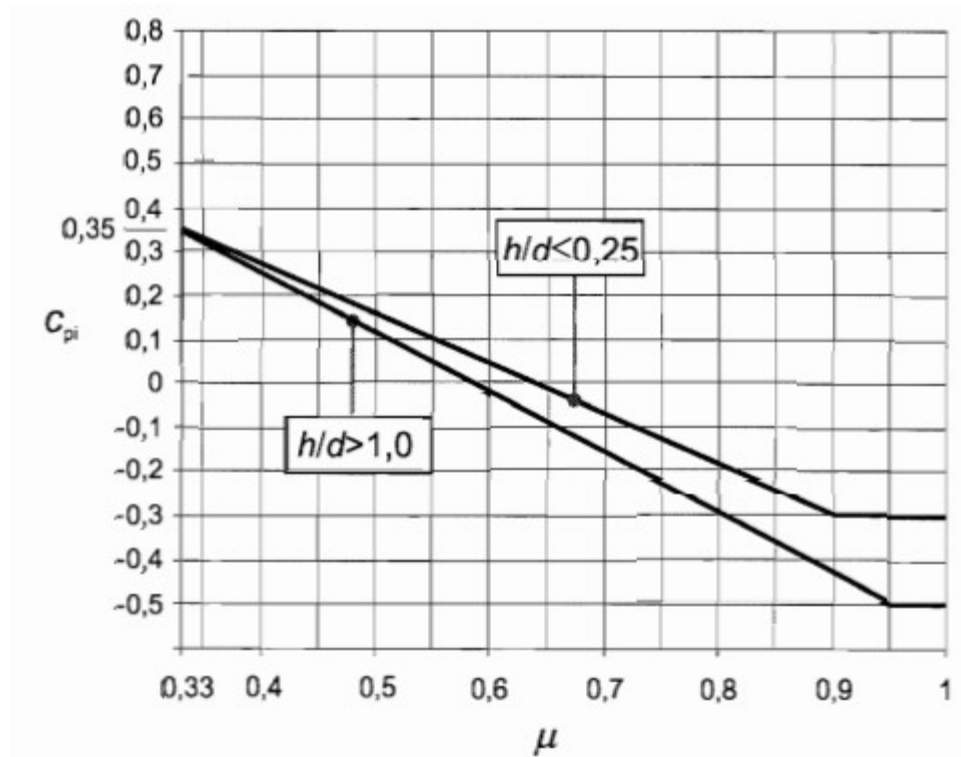


Fig A. 3

Fig 2.7 Coeficiente de presión interna C_{pi} para edificaciones sin una cara dominante. *Nota.* Adaptado de “EN 1991-1-4:2005+A1 Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: General actions – Wind actions” (p. 52) por European Committee for Standardization, 2010.

$$\mu = \frac{\sum \text{área de aberturas donde } c_{pe} \text{ es negativa o } -0,0}{\sum \text{área de todas las aberturas}} \quad (\text{A.13})$$

La altura de referencia z_i para las presiones internas debe ser igual a la altura de referencia z_e para las presiones externas (Ver sección 5.1(1)P de EN-1991-1-4) en las caras que contribuyen con sus aberturas a la creación de la presión interna. Si hay varias aberturas, se debe utilizar el mayor valor de z_e para determinar z_i .

A.3 NTC 2017 (Gaceta Oficial de la Ciudad de México)

La presión que ejerce el flujo del viento sobre una construcción determinada, p_z se obtiene tomando en cuenta su forma y está dada de manera general por las ecuaciones A.14 y A.15.

$$p_z = 0.47 * C_p * V_D^2 \text{ (en Pa)} \quad (\text{A.14})$$

$$p_z = 0.048 * C_p * V_D^2 \text{ (en } \frac{kg}{m^2})} \quad (\text{A.15})$$

A.3.1 Velocidad de diseño

Los efectos estáticos del viento sobre una estructura o componente de la misma se determinan con base en la velocidad de diseño.

Dicha velocidad de diseño se obtendrá de acuerdo con la ecuación A.16.

$$V_D = F_{TR} * F_\alpha * V_R \quad (\text{A.16})$$

La velocidad regional, V_R , se define en la sección A.3.2 y los coeficientes F_α y F_{TR} se definen en las secciones A.3.3 y A.3.4 respectivamente.

A.3.2 Velocidad regional V_R

La velocidad regional es la máxima velocidad del viento que se presenta a una altura de 10 m sobre el lugar de desplante de la estructura, para condiciones de terreno plano con obstáculos aislados (Terreno tipo R2, Fig A.4). Los valores de dicha velocidad se obtendrán de la Tabla A.4. Dichos valores incluyen el efecto ráfaga que corresponde a tomar el valor máximo de la velocidad media durante un intervalo de tres segundos.

Para las estructuras temporales que permanezcan por más de una estación del año se seleccionará la velocidad con periodo de retorno de 10 años.

A.3.3 Factor de variación con la altura, F_α

Este factor establece la variación de la velocidad del viento con la altura z . Se obtiene con las expresiones siguientes:

$$F_\alpha = 1.0; \text{ si } z \leq 10m \quad (\text{A.17})$$

$$F_\alpha = \left(\frac{z}{10}\right)^\alpha; \text{ si } 10m < z < \delta \quad (\text{A.18})$$

$$F_\alpha = \left(\frac{\delta}{10}\right)^\alpha; \text{ si } z \geq \delta \quad (\text{A.19})$$

Los coeficientes α y δ están en función de la rugosidad del terreno (Fig A.4) y se definen en la Tabla A.5.

Tabla A.4 Velocidades regionales V_R , según la importancia de la construcción y la zonificación eólica, m/s.

Nota. Adaptado de "Norma Técnica Complementaria para la Revisión de la Seguridad Estructural de las Edificaciones (NTC-RSEE)" (p. 89) por Administración Pública de la Ciudad de México, 2017.

Periodo de retorno, años	Importancia de la construcción		
	A	B	Temporal
	200	50	10
Zona I: Delegaciones de Azcapotzalco, y G. A. Madero	28	25	19
Zona II: Delegaciones de Miguel Hidalgo, Cuauhtémoc, Venustiano Carranza, Benito Juárez, Coyoacán, Iztacalco, e Iztapalapa	33	30	23
Zona III: Delegaciones de Cuajimalpa, Álvaro Obregón, Magdalena Contreras, Tlalpan, Milpa Alta, Tláhuac, y Xochimilco	39	35	27

Tabla A.5 Rugosidad del terreno α y δ . *Nota.* Adaptado de “Norma Técnica Complementaria para la Revisión de la Seguridad Estructural de las Edificaciones (NTC-RSEE)” (p. 90) por Administración Pública de la Ciudad de México, 2017.

Tipos de terreno (fig. 3.1.1)		α	δ , m
R1	Escasas o nulas obstrucciones al flujo de viento, como en campo abierto	0.099	245
R2	Terreno plano u ondulado con pocas obstrucciones	0.128	315
R3	Zona típica urbana y suburbana. El sitio está rodeado predominantemente por construcciones de mediana y baja altura o por áreas arboladas y no se cumplen las condiciones del Tipo R4	0.156	390
R4	Zona de gran densidad de edificios altos. Por lo menos la mitad de las edificaciones que se encuentran en un radio de 500 m alrededor de la estructura en estudio tiene altura superior a 20 m	0.170	455

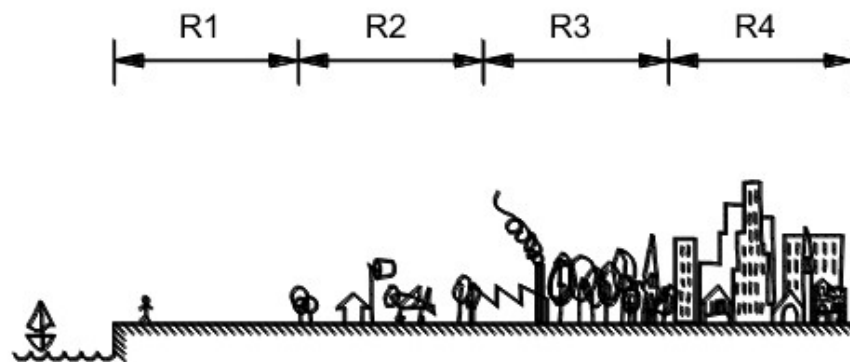


Fig A.4 Rugosidad del terreno α y δ . *Nota.* Adaptado de “Norma Técnica Complementaria para la Revisión de la Seguridad Estructural de las Edificaciones (NTC-RSEE)” (p. 89) por Administración Pública de la Ciudad de México, 2017.

A.3.4 Factor correctivo por topografía y rugosidad, F_{TR}

Este factor toma en cuenta el efecto topográfico local del sitio (Fig A.5) en donde se desplante la estructura y a su vez la variación de la rugosidad de los alrededores del sitio (Tabla A.6). En este último caso, si en una dirección de análisis de los efectos del viento existen diferentes rugosidades con longitud menor de 500m, se deberá considerar la que produzca los efectos más desfavorables.

Tabla A.6 Factor de topografía F_{TR} . Nota. Adaptado de “Norma Técnica Complementaria para la Revisión de la Seguridad Estructural de las Edificaciones (NTC-RSEE)” (p. 90) por Administración Pública de la Ciudad de México, 2017.

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

En terreno de tipo R1, según se define en la tabla 3.1.2, el factor de topografía y rugosidad, F_{TR} , se tomará en todos los casos igual a 1.0.

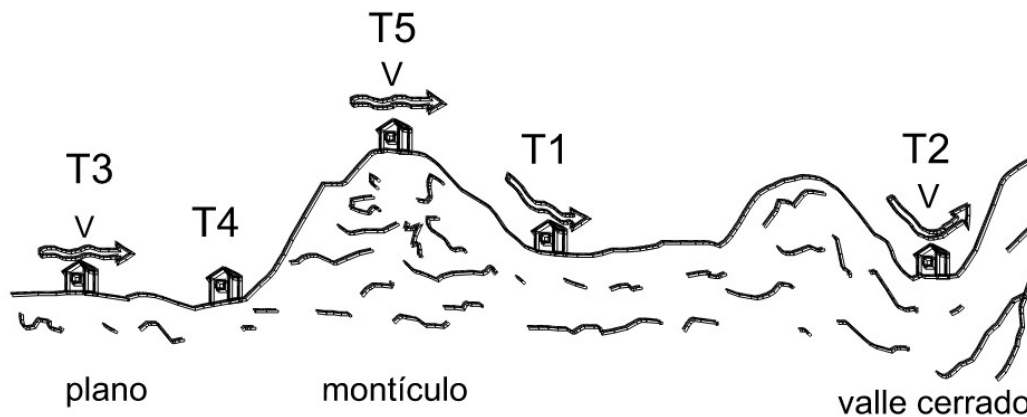


Fig A.5 Formas topográficas locales. Nota. Adaptado de “Norma Técnica Complementaria para la Revisión de la Seguridad Estructural de las Edificaciones (NTC-RSEE)” (p. 90) por Administración Pública de la Ciudad de México, 2017.

A.3.5 Diseño de elementos de recubrimiento

Se diseñarán con los criterios establecidos en este capítulo los elementos que no forman parte de la estructura principal y los que no contribuyen a la resistencia de la estructura ante la acción del viento, así como los que tienen por función recubrir la estructura. Cada elemento se diseñará para las presiones, tanto positivas (empujes) como negativas (succiones) que correspondan a la dirección más desfavorable del viento, calculadas con la ecuación A.14. Se usarán los coeficientes de presión de la Tabla A.7 para elementos ubicados en edificios de más de 20m de altura y los de la Tabla A.8 para los que se encuentran en edificios de altura menor de 20 m. Para el diseño de parapetos, se empleará un coeficiente de presión calculado como

$$C_p = -3.0 + \frac{A}{75} < -1.8 \quad (\text{A.20})$$

Donde A es el área tributaria del elemento a diseñar, en metros cuadrados.

Adicionalmente se considerarán los efectos de las presiones interiores, calculadas como se indica en la sección A.3.6, para construcciones en cuyas paredes puede haber aberturas que abarquen más de 30 por ciento de la superficie. Cuando este porcentaje no exceda de 30 se considerará para el diseño de los elementos de recubrimiento un coeficiente de presión de ± 0.25 .

Tabla A.7 Coeficientes de presión para elementos de recubrimiento en edificios con altura mayor o igual a 20m. *Nota.* Adaptado de “Norma Técnica Complementaria para la Revisión de la Seguridad Estructural de las Edificaciones (NTC-RSEE)” (p. 97) por Administración Pública de la Ciudad de México, 2017.

Zona	Efecto	Coefficiente de presión, C_p
1	succión	$-1.1 < -1.2 + A/100 < -0.75$
	empuje	$0.8 < 1.1 - A/130$
2	succión	$-2 < -2.2 + A/150 < -1.3$
	empuje	$0.8 < 1.2 - A/130$
3	succión	$-2 + A/13 < -0.85$
4	succión	$-2.5 + A/20 < -1.75$
5	succión	$-4 + A/8 < -2$

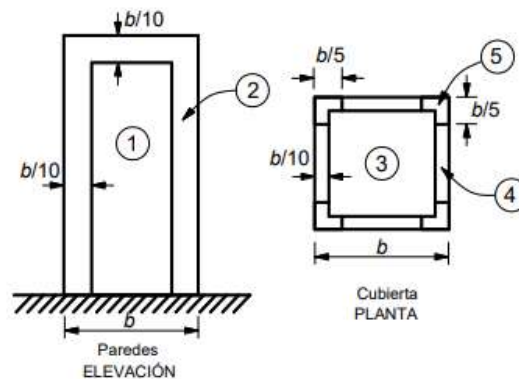


Fig A.6 Definición de zonas para elementos de recubrimiento en paredes y cubierta en edificios con altura mayor o igual a 20 m. *Nota.* Adaptado de “Norma Técnica Complementaria para la Revisión de la Seguridad Estructural de las Edificaciones (NTC-RSEE)” (p. 98) por Administración Pública de la Ciudad de México, 2017.

Tabla A.8 Coeficientes de presión para elementos de recubrimiento en edificios con altura menor a 20m.

Nota. Adaptado de “Norma Técnica Complementaria para la Revisión de la Seguridad Estructural de las Edificaciones (NTC-RSEE)” (p. 98) por Administración Pública de la Ciudad de México, 2017.

Zona	Efecto	Coefficiente de presión, C_p
1	succión	$-2 + A/50 < -1.1$
	empuje	$1.5 - A/100$
2	succión	$-1.4 + A/50 < -1.2$
3	succión	$-3.0 + A/10 < -2.0$
4	succión	$-1.4 + A/50 < -1.2$
	empuje	$1.3 - A/50 > 1.1$
5	succión	$-1.7 + A/35 < -1.4$
	empuje	$1.3 - A/50 > 1.1$

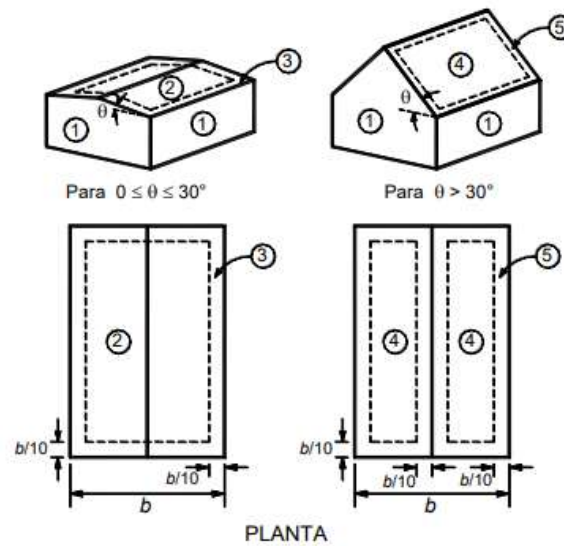


Figura 4.0.2 Elementos de recubrimiento en edificios con $H < 20$ m

Fig A.7 Definición de zonas para elementos de recubrimiento en paredes y cubierta en edificios con altura menor a 20 m. *Nota.* Adaptado de “Norma Técnica Complementaria para la Revisión de la Seguridad Estructural de las Edificaciones (NTC-RSEE)” (p. 98) por Administración Pública de la Ciudad de México, 2017.

A.3.6 Presiones interiores

Cuando las paredes de una construcción puedan tener aberturas que abarquen más de 30 por ciento de su superficie, deberá considerarse en el diseño de los elementos estructurales el efecto de las presiones que se generan por la penetración del viento en el interior de la construcción. Estas presiones se considerarán actuando uniformemente en las partes interiores de las paredes y techo y se determinarán con la ecuación A.14, empleando los coeficientes de empuje que se indican en la Tabla A.9, en función de la posición de las aberturas que puedan existir en las paredes de la construcción.

Tabla A.9 Coeficiente C_p para presiones interiores. *Nota.* Adaptado de “Norma Técnica Complementaria para la Revisión de la Seguridad Estructural de las Edificaciones (NTC-RSEE)” (p. 96) por Administración Pública de la Ciudad de México, 2017.

	C_p
Aberturas principalmente en la cara de barlovento	0.75
Aberturas principalmente en la cara de sotavento	-0.6
Aberturas principalmente en las caras paralelas a la dirección del viento	-0.5
Aberturas uniformes distribuidas en las cuatro caras	-0.3

En comparación a la metodología definida en ASCE 7-22, la metodología descrita en la NTC 2017 presenta diferencias en la determinación de los coeficientes de presión interna, que están limitados a un único caso donde se consideran cuando el área de aberturas de la envolvente de la edificación supera un valor determinado.

Respecto al cálculo de los coeficientes de presión externa para recubrimientos, posee similitudes con la metodología definida en ASCE 7-22 pues que los coeficientes son dependientes tanto de la altura de la edificación como de la ubicación del elemento de recubrimiento en la fachada.

Adicionalmente, la metodología empleada para determinar la presión de diseño considera no solo la velocidad básica regional, sino los diferentes factores que pueden influir en esta, como lo son la rugosidad del terreno, la topografía y/o la altura de la edificación.

A.4 MDOC 2020 (México)

El cálculo de la presión actuante sobre los elementos de recubrimiento y sus anclajes se define mediante el método estático, como se describe a continuación

A.4.1 Presión dinámica de base q_z

Cuando el viento actúa sobre una construcción, genera presiones sobre sus superficies, que varían según la intensidad de la velocidad y la dirección del viento. La presión que ejerce el flujo del viento sobre una superficie plana perpendicular a él, a una altura z , se denomina presión dinámica de base q_z , en Pa, y se determina con la siguiente ecuación

$$q_z = 0.047 * G * V_D^2 \quad (\text{A.21})$$

$$q_z = 0.0048 * G * V_D^2 \left(\text{en } \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}\right) \quad (\text{A.22})$$

En la tabla A.10 se presenta la relación entre los valores de la altitud, hm, en metros sobre el nivel del mar (msnm), y la presión barométrica, Ω , en mm de Hg (mercurio)

Tabla A.10 Relación entre la altitud y la presión barométrica. *Nota.* Adaptado de “Manual de Diseño de Obras Civiles Cap. C.1.4 Diseño por Viento. Sección C: Estructuras Tema 1: Criterios Generales de Análisis y Diseño.” (p. 30) por Comisión Federal de Electricidad, 2020.

Altitud, h_m (msnm)	Presión barométrica, Ω (mm de Hg)
0	760
500	720
1000	675
1500	635
2000	600
2500	565
3000	530
3500	495

A.4.2 Velocidad básica de diseño V_D

La velocidad básica de diseño, V_D , en km/h, es la velocidad con la cual se calculan los efectos del viento sobre la estructura o sobre un componente de la misma y se obtiene con la siguiente ecuación:

$$V_D = F_T F_{Tz} V_R \quad (A.23)$$

La velocidad regional de ráfaga, V_R , y los factores F_{Tz} y F_T , se definen y se determinan en las secciones A.4.4, A.4.5 y A.4.6 respectivamente.

A.4.3 Categorías de terrenos según su rugosidad

Tanto en el procedimiento de análisis estático como en el dinámico, intervienen factores que dependen de las condiciones topográficas y de exposición locales de donde se desplantará la construcción. Por tanto, con el fin de evaluar correctamente dichos factores, es necesario establecer clasificaciones de carácter práctico. En la Tabla A.11 se consignan cuatro categorías de terrenos atendiendo al grado de rugosidad que se presenta alrededor de la zona de desplante. En el inciso 2.1 de la Sección de Comentarios de MDOC 2020 se presentan figuras de terrenos que ejemplifican las categorías descritas en la Tabla A.11.

En la dirección del viento que se está analizando, el terreno inmediato a la estructura deberá presentar la misma rugosidad (Categorías), cuando menos en una distancia denominada “longitud mínima de desarrollo”, la cual se consigna en la Tabla A.11 para cada categoría de terreno. Cuando no exista esta longitud mínima, el factor de exposición local, F_{Tz} , adimensional, definido en la sección A.4.5 deberá modificarse para tomar en cuenta este hecho. En este caso, el diseñador podrá seleccionar, entre las categorías de los terrenos que se encuentren en una dirección de análisis dada,

la que provoque los efectos más desfavorables y determinar el factor de exposición para tal categoría, o seguir un procedimiento analítico más refinado para corregir el factor de exposición como el que se señala en el inciso 2.3 de MDOC 2020 de la Sección de Comentario.

Tabla A.11 Categoría del terreno según su rugosidad. *Nota.* Adaptado de “Manual de Diseño de Obras Civiles Cap. C.1.4 Diseño por Viento. Sección C: Estructuras Tema 1: Criterios Generales de Análisis y Diseño.” (p. 14) por Comisión Federal de Electricidad, 2020.

Cat.	Descripción	Ejemplos	Limitaciones
1	Terreno abierto, prácticamente plano, sin obstrucciones y superficies de agua.	Franjas costeras planas, bahías, zonas de pantanos o de lagos, campos aéreos, pastizales y tierras de cultivo sin setos o bardas, superficies nevadas planas.	Las obstrucciones existentes, tienen alturas menores que 1.5 m. La longitud mínima de este tipo de terreno en la dirección del viento debe ser de 2000 m o 20 veces la altura de la construcción por diseñar, la que sea mayor.
2	Terreno plano u ondulado con pocas obstrucciones.	Campos de cultivo o granjas con pocas obstrucciones tales como setos o bardas, árboles y construcciones dispersas.	Las obstrucciones existentes, tienen alturas de 1.5 a 5 m, la longitud mínima debe ser la mayor entre 1500 m o 20 veces la altura de la construcción por diseñar.
3	Terreno cubierto por numerosas obstrucciones estrechamente espaciadas.	Áreas urbanas, suburbanas y de bosques, o cualquier terreno con numerosas obstrucciones estrechamente espaciadas. El tamaño de las construcciones corresponde al de las casas y viviendas.	Las obstrucciones existentes presentan alturas de 3 a 10 m. La longitud mínima de este tipo de terreno en la dirección del viento debe ser de 500 m o 20 veces la altura de la construcción, la que sea mayor.
4	Terreno con numerosas obstrucciones largas, altas y estrechamente espaciadas.	Grandes centros urbanos y complejos industriales bien desarrollados.	Por lo menos el 50% de los edificios tiene una altura mayor que 20 m. Las obstrucciones miden de 10 a 30 m de altura. La longitud mínima de este tipo de terreno en la dirección del viento debe ser la mayor entre 400 m y 20 veces la altura de la construcción.

La selección de la categoría de terreno debe realizarse considerando la permanencia de las obstrucciones que constituyen la rugosidad de la superficie del terreno. Por ejemplo, debe considerarse la posibilidad de que la vegetación no permanecerá durante eventos de viento intenso en regiones donde se presentan ciclones tropicales.

A.4.4 Velocidad regional para un periodo de retorno fijo

La velocidad regional de ráfaga del viento, V_R , en km/h, es la velocidad máxima asociada a un periodo de retorno fijo, T , con una probabilidad de excedencia de $1/T$, en una zona o región determinada del país, donde el periodo de retorno, T , está dado en años.

La velocidad regional de ráfaga, V_n , se determina tomando en consideración tanto la importancia de la estructura como la localización geográfica de su sitio de desplante y está asociada a ráfagas de 3 segundos.

En las Figs A.8, A.9 y A.10 se muestran los mapas de isotacas regionales correspondientes a los periodos de retorno de 200, 50 y 10 años, recomendados para el diseño por viento de los Grupos A, B y C, respectivamente.

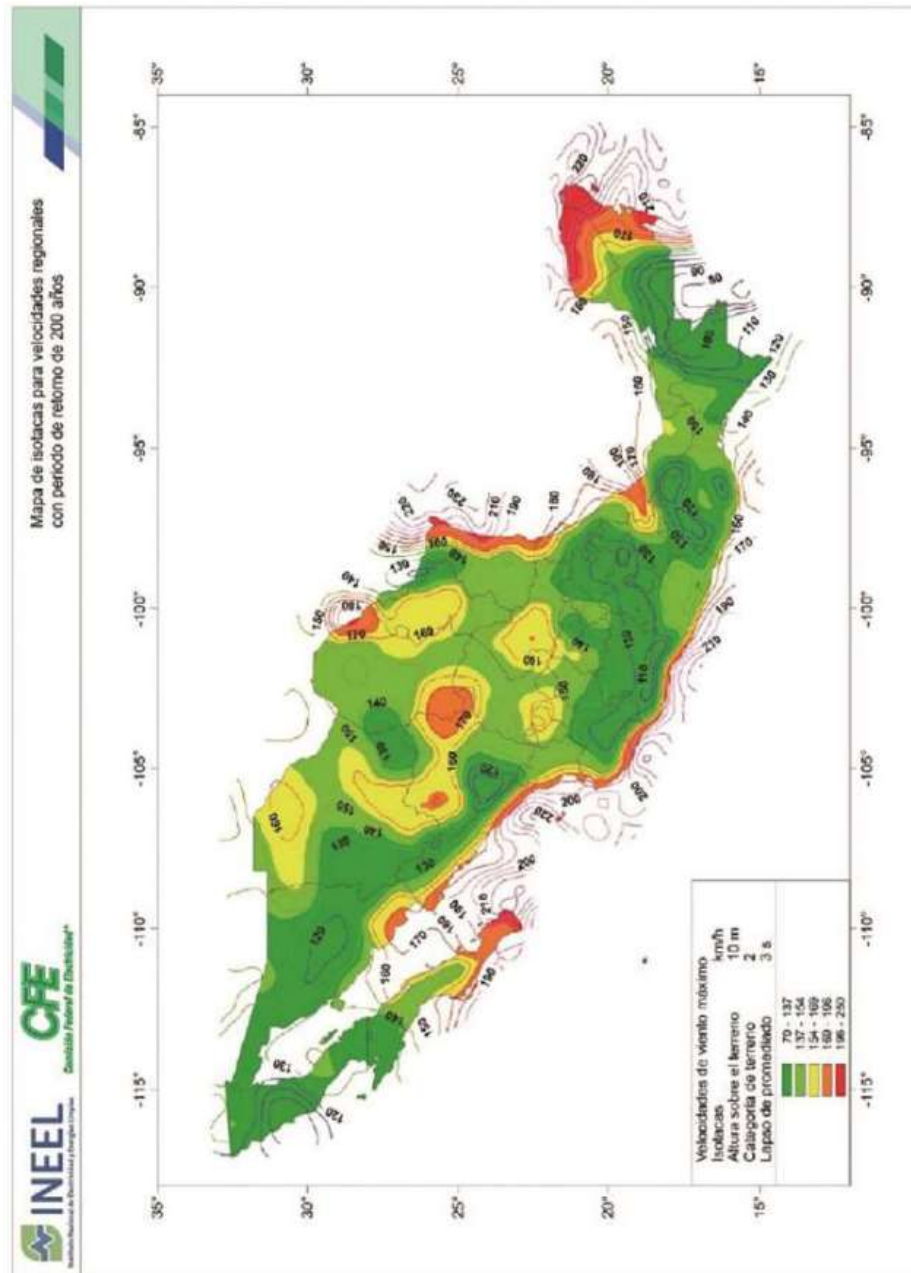


Fig A.8 Mapa de isotacas para velocidades regionales con periodo de retorno de 200 años. *Nota.* Adaptado de “Manual de Diseño de Obras Civiles Cap. C.1.4 Diseño por Viento. Sección C: Estructuras Tema 1: Criterios Generales de Análisis y Diseño.” (p. 18) por Comisión Federal de Electricidad, 2020.

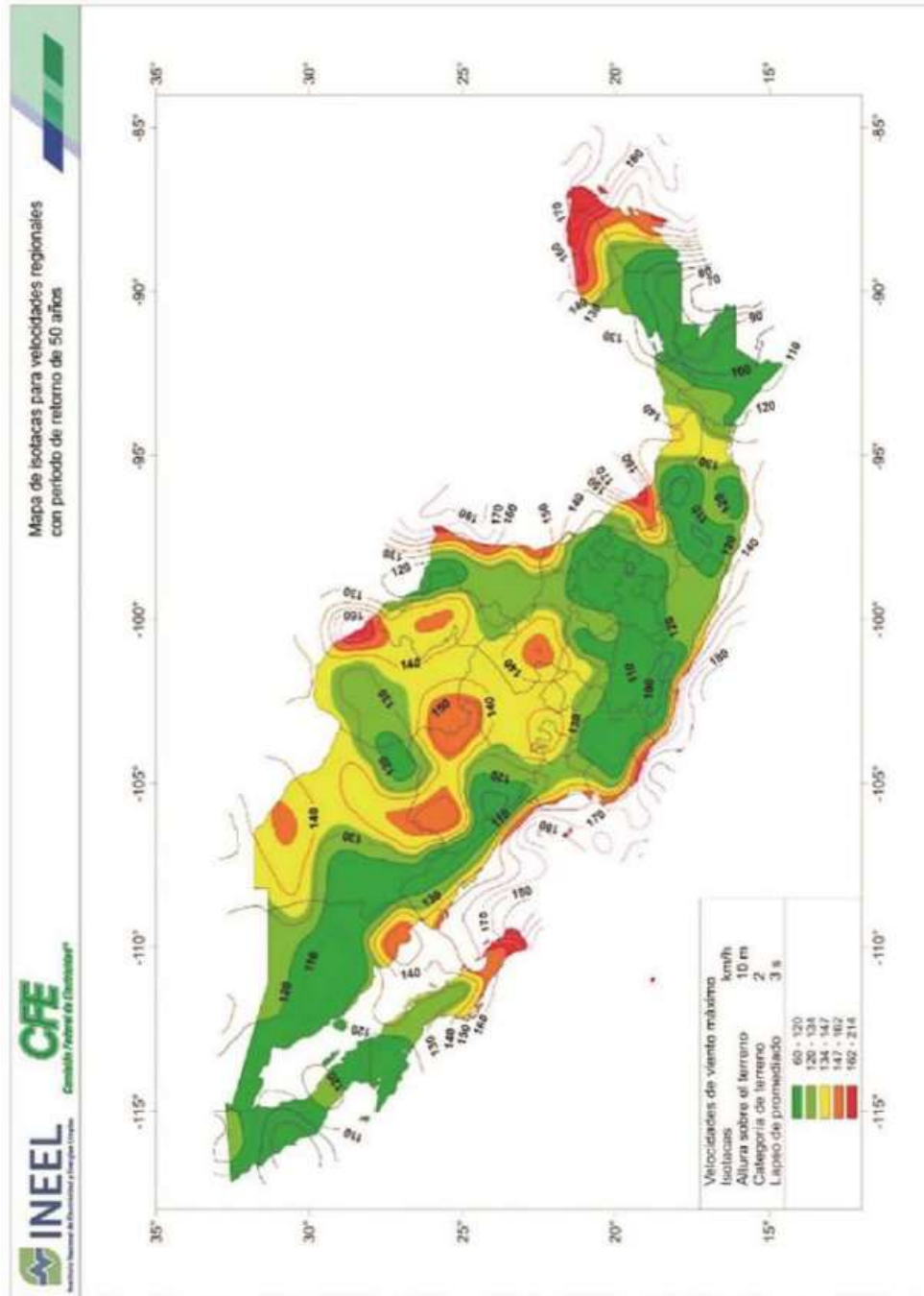


Fig A.9 Mapa de isotacas para velocidades regionales con periodo de retorno de 50 años. *Nota.* Adaptado de “Manual de Diseño de Obras Civiles Cap. C.1.4 Diseño por Viento. Sección C: Estructuras Tema 1: Criterios Generales de Análisis y Diseño.” (p. 19) por Comisión Federal de Electricidad, 2020.

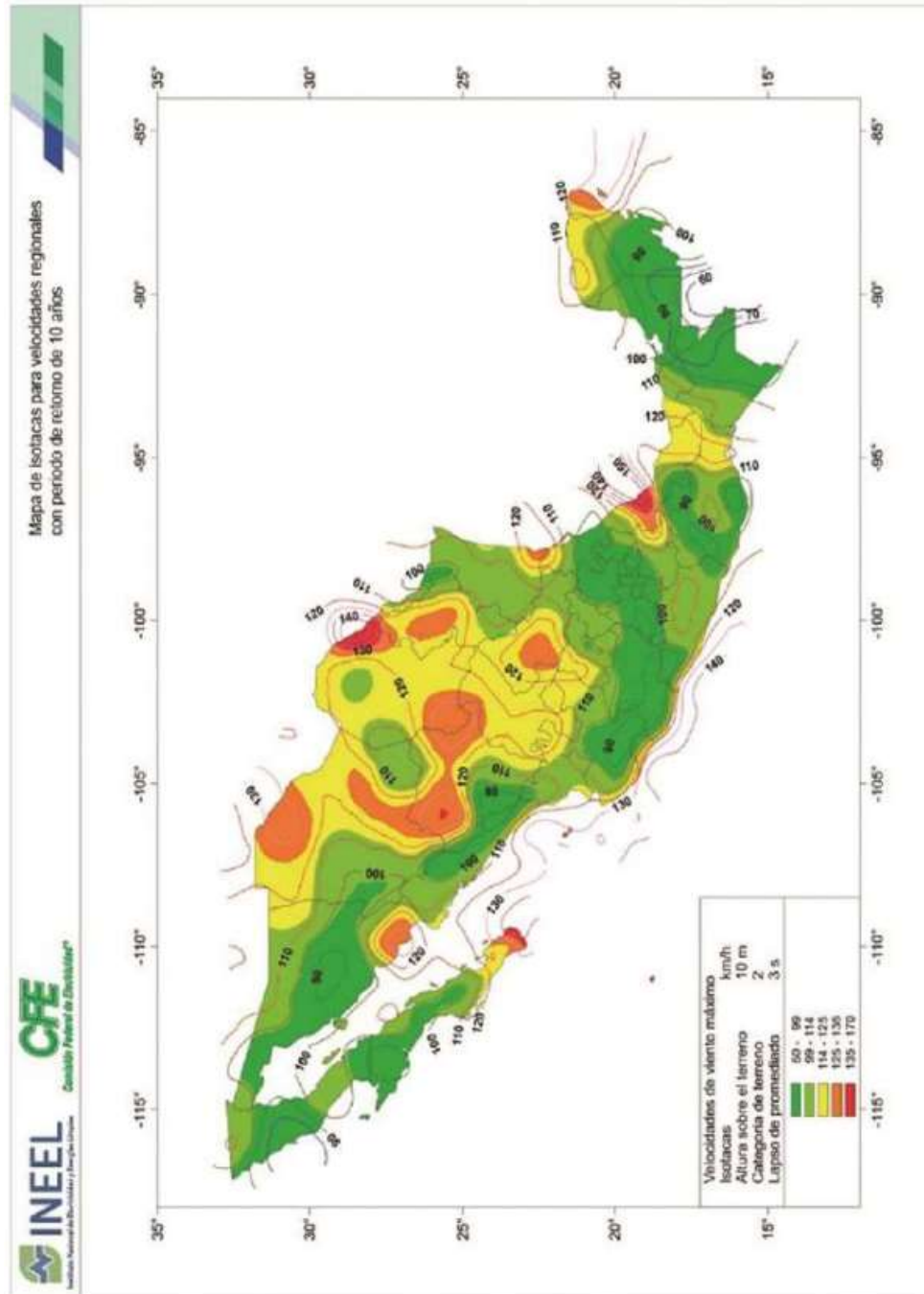


Fig A.10 Mapa de isotacas para velocidades regionales con periodo de retorno de 10 años. *Nota.* Adaptado de “Manual de Diseño de Obras Civiles Cap. C.1.4 Diseño por Viento. Sección C: Estructuras Tema 1: Criterios Generales de Análisis y Diseño.” (p. 20) por Comisión Federal de Electricidad, 2020.

En el Apéndice 4C de MDOC 2020 se presenta una tabla con las principales ciudades del país y sus correspondientes velocidades regionales para los diferentes periodos de retorno fijo.

A.4.5 Velocidad regional para un periodo de retorno fijo

El factor de exposición local, F_{rz} , adimensional, establece la variación de la velocidad del viento con la altura, en función de la categoría del terreno. Este factor se obtiene de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$F_{rz} = c; \text{ si } z \leq 10 \quad (\text{A.24})$$

$$F_{rz} = c\left(\frac{z}{10}\right)^\alpha; \text{ si } 10 < z < \delta \quad (\text{A.25})$$

$$F_{rz} = c\left(\frac{\delta}{10}\right)^\alpha; \text{ si } z \geq \delta \quad (\text{A.26})$$

Las variables α , δ y c están en función de la rugosidad del terreno, cuyos valores recomendados se presentan en la Tabla A.12

Tabla A.12 Valores de c , α y δ . *Nota.* Adaptado de “Manual de Diseño de Obras Civiles Cap. C.1.4 Diseño por Viento. Sección C: Estructuras Tema 1: Criterios Generales de Análisis y Diseño.” (p. 24) por Comisión Federal de Electricidad, 2020.

Categoría del terreno	c	α	δ (m)
1	1.142	0.061	280
2	1.000	0.095	350
3	0.832	0.140	410
4	0.668	0.192	470

Aun cuando el factor de exposición local, F_{rz} , se define para alturas superiores a la altura gradiente, cabe señalar que el diseño de estructuras está limitado a una altura de 200 m, tal como se establece en el inciso 1.1 de MDOC.

Como se menciona en la sección A.4.3, cuando no se satisface la longitud mínima de desarrollo, según lo establecido en la Tabla A.11, deberá seleccionarse la Categoría del terreno que genere las condiciones más desfavorables para la dirección del viento de interés. Alternativamente, la variación de la rugosidad alrededor de la construcción en un sitio dado podrá tomarse en cuenta corrigiendo el factor de exposición, F_{rz} , utilizando el procedimiento que se describe en el inciso 2.3 de la Sección de Comentarios de este mismo capítulo de MDOC 2020.

A.4.6 Factor de topografía, F_T

El factor de topografía local, F_T , adimensional, toma en cuenta el efecto topográfico local del sitio en donde se desplantará la estructura. Así, por ejemplo, si la construcción se localiza en las laderas o cimas de colinas o montañas, de altura importante con respecto al nivel general del terreno de los alrededores, es muy probable que se generen aceleraciones que incrementarán la velocidad del flujo del viento.

De acuerdo con las características topográficas del sitio, en la Tabla A.13 se presentan los valores o expresiones para determinar el valor del factor de topografía.

Tabla A.13 Factor de topografía local F_T . Nota. Adaptado de “Manual de Diseño de Obras Civiles Cap. C.1.4 Diseño por Viento. Sección C: Estructuras Tema 1: Criterios Generales de Análisis y Diseño.” (p. 25) por Comisión Federal de Electricidad, 2020.

Sitios	Ejemplos de topografía local	F_T
Protegidos	Valles cerrados	0.9
Normales	Terreno prácticamente plano: Ausencia de cambios topográficos importantes, con pendientes menores de 5%.	1.0
	Promontorios: Montes, cerros, lomas, cimas, colinas, montañas.	
Expuestos	Terraplenes: Peñascos, acantilados, precipicios, diques, presas.	Ver las ecuaciones 2.6 a 2.8

NOTA: Para los sitios expuestos, esta tabla se aplica con ayuda de las Fig 2.7.

Tabla 2.8 Factor de topografía local F_T (Tomado de MDOC 2020)

Para los efectos topográficos locales de promontorios y terraplenes, el factor de topografía se calcula de acuerdo con las siguientes condiciones:

$$\text{Si } \frac{H_t}{2L_u} < 0.05 \quad (\text{A.27})$$

dentro de la zona achurada de afectación local (Figs A.11 y A.12).

$$F_T = 1.00 \quad (\text{A.28})$$

$$\text{Si } 0.05 \leq \frac{H_t}{2L_u} \leq 0.45 \quad (\text{A.29})$$

dentro de la zona achurada de afectación local (Figs A.11 y A.12).

$$F_T = 1 + \left(\frac{H_t}{3.5(z_t + L_1)} \right) \left(1 - \frac{|X_t|}{L_2} \right) \quad (\text{A.30})$$

$$\text{Si } \frac{H_t}{2L_u} > 0.45 \quad (\text{A.31})$$

dentro de la zona de separación de flujo, $L_s = \frac{H_t}{4}$ (Fig A.13).

$$F_T = 1 + 0.71 \left(1 - \frac{|X_t|}{L_2} \right) \quad (\text{A.32})$$

dentro de la zona achurada de afectación local (Fig A.13) aplíquese la ecuación 2.7.

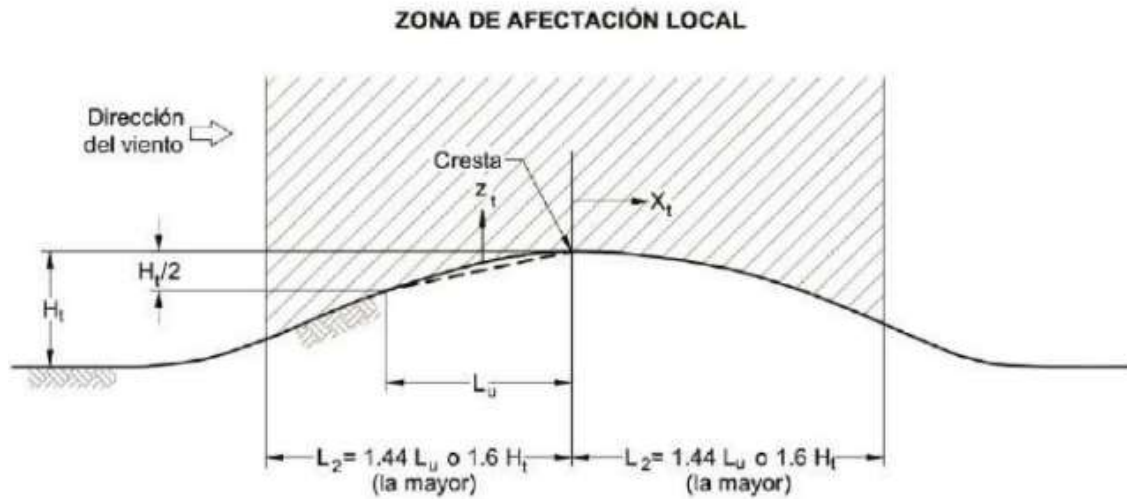


Fig A.11 Zona de afectación local en promontorios. *Nota.* Adaptado de “Manual de Diseño de Obras Civiles Cap. C.1.4 Diseño por Viento. Sección C: Estructuras Tema 1: Criterios Generales de Análisis y Diseño.” (p. 27) por Comisión Federal de Electricidad, 2020.

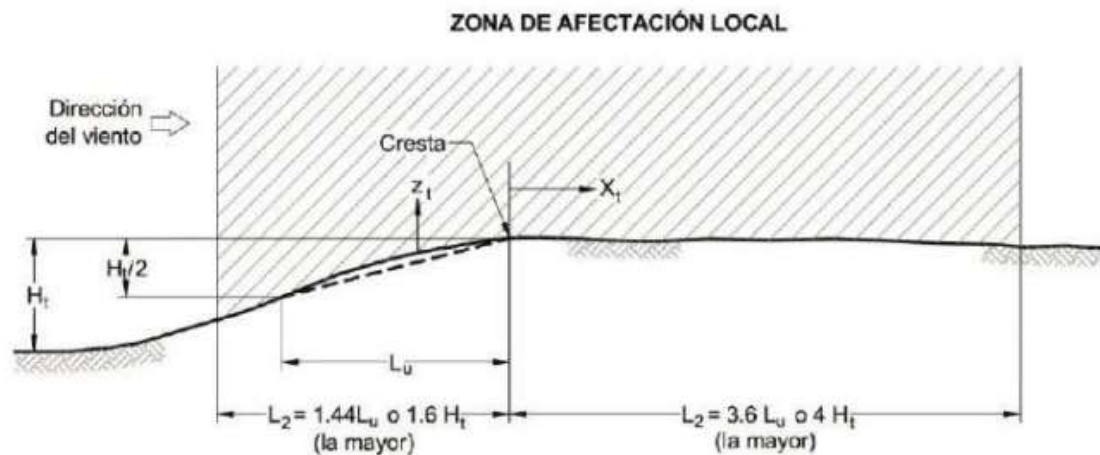


Fig A.12 Zona de afectación local en terraplenes. *Nota.* Adaptado de “Manual de Diseño de Obras Civiles Cap. C.1.4 Diseño por Viento. Sección C: Estructuras Tema 1: Criterios Generales de Análisis y Diseño.” (p. 27) por Comisión Federal de Electricidad, 2020.

La zona de sotavento de los terraplenes, a lo largo de la distancia L_s , la pendiente promedio no deberá exceder de 0.05.



Fig 2.7(c) Zona de separación del flujo para pendientes mayores que 0.45.

Fig A.13 Zona de separación del flujo para pendientes mayores que 0.45. *Nota.* Adaptado de “Manual de Diseño de Obras Civiles Cap. C.1.4 Diseño por Viento. Sección C: Estructuras Tema 1: Criterios Generales de Análisis y Diseño.” (p. 28) por Comisión Federal de Electricidad, 2020.

En los casos de sitios expuestos que no se apaguen a las condiciones anteriores, el factor de topografía podrá obtenerse utilizando alguno de los siguientes procedimientos:

Experimentos a escala en túneles de viento.

Mediciones realizadas directamente en el sitio.

Expertos en la materia deberán validar los resultados de cualquiera de estos procedimientos.

A.4.7 Presión actuante en estructuras, p_z

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

$$p_z = C_p q_z \quad (\text{A.33})$$

A esta presión se le denomina empuje medio o estático y es producido por los efectos de la velocidad de ráfaga.

El coeficiente de presión se define como la relación de la presión actuante sobre la construcción o sobre una de sus superficies, con la presión dinámica de base, para una altura dada.

Cuando se trate de una construcción cerrada, la presión de diseño, p_z , en Pa, se obtiene con la siguiente ecuación:

$$p_z = (p_e - p_i) \quad (\text{A.34})$$

Cuando se trate de una construcción abierta, la presión de diseño, p_z , en Pa, se obtiene con la siguiente ecuación:

$$p_z = p_n \quad (\text{A.35})$$

Los valores de los coeficientes de presión para diversas formas de estructuras se especifican a partir del inciso 3.5 de MDOC 2020.

A.4.8 Fuerza actuante en estructuras

La fuerza estática, F_{es} , en N, se calcula con la siguiente ecuación:

$$F_{es} = \sum(p_z A_{ref}) \quad (A.36)$$

. El área de referencia A_{ref} corresponde:

a) A una parte de alguna de las superficies de la construcción; la presión de diseño que corresponde a una velocidad y dirección del viento dada es afectada por el coeficiente de presión exterior o interior, C_{pe} o C_{pi} , el cual a su vez depende de la forma de la estructura.

b) A la superficie de la construcción o de un elemento estructural, proyectada sobre un plano normal al flujo del viento; la presión de diseño es afectada por el coeficiente de arrastre, C_s , según la forma de la construcción o del elemento estructural, o

c) A las superficies que se indiquen en los incisos correspondientes cuando se empleen coeficientes de fuerza, C_f , o coeficientes de presión neta, C_{on} , para evaluar la fuerza total de diseño.

La sumatoria incluye todas las posibles presiones actuantes sobre el área de referencia.

A.4.9 Presiones y fuerzas debidas a la acción del viento

A.4.9.1 Construcciones cerradas

Para los fines de este capítulo, una estructura cerrada es la que se compone de muros y techos, dispuestos de tal manera que forman una construcción prismática; dichos techos (con y sin aleros) y muros no necesariamente son impermeables, pueden tener aberturas, tales como ventanas o puertas, por donde el flujo del viento puede penetrar y generar presiones interiores. Asimismo, una estructura de planta rectangular en la que uno de sus lados está completamente abierto se considera como cerrada con una abertura dominante en ese lado. Cuando se tenga una construcción con dos muros o menos, estos se deben diseñar como elementos aislados.

La presión de diseño sobre una construcción se obtiene sumando los efectos de las presiones exteriores e interiores, que se presentan sobre sus superficies.

La convención de signos para presiones exteriores e interiores que se adopta es que estas serán positivas cuando ejerzan un empuje y negativas cuando ejerzan una succión en la superficie sobre la que actúan.

La Fig A.14 ilustra la convención de signos adoptada, la cual ya está considerada en los valores de los coeficientes de presión definidos en este capítulo. De esta manera, la ecuación A.34 se aplica conservando el signo negativo.

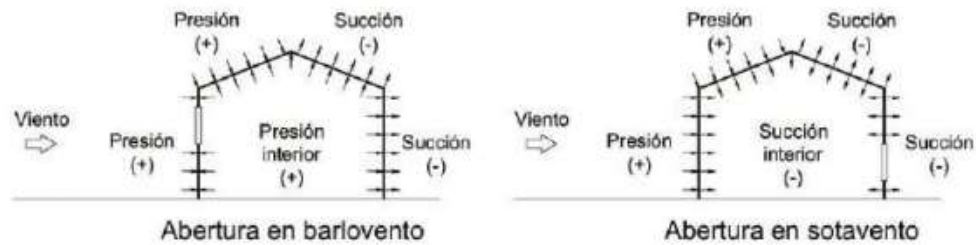


Fig A.14 Convención de signos para las presiones ejercidas por el viento en una edificación con aberturas en barlovento o sotavento. *Nota.* Adaptado de “Manual de Diseño de Obras Civiles Cap. C.1.4 Diseño por Viento. Sección C: Estructuras Tema 1: Criterios Generales de Análisis y Diseño.” (p. 32) por Comisión Federal de Electricidad, 2020.

A.4.9.1.1 Presiones exteriores

La presión exterior, p_e , en Pa, sobre una de las superficies de una construcción cerrada se determina con la siguiente ecuación:

$$p_e = C_{pe} K_A K_L K_{ra} q_z \quad (\text{A.37})$$

Los valores de los factores K_A , K_L y K_{ra} , así como la forma en que se aplican, se describen más adelante en esta misma sección.

En las Tablas A.14 y A.15 se proporcionan valores del coeficiente de presión exterior, C_{pe} , para muros de construcciones con planta rectangular cerrada. Cuando el valor de C_{pe} es positivo, se tratará de un empuje sobre el área en cuestión; cuando es negativo, se tratará de una succión.

Los parámetros referidos en esas tablas se ilustran en las Figs A.15 y A.16. Es importante observar que la denominación de los muros depende de la dirección en la que actúa el viento. Para muros de sotavento, laterales y techo, la presión dinámica de base, q_s , se calcula para la altura de referencia \bar{h} , (Fig A.15). Para el muro de barlovento, la presión varía con la altura según la sección A.4.1. Los valores del coeficiente de presión para estructuras que no sean de planta rectangular cerrada se dan en los incisos posteriores.

En el caso de que las construcciones presenten aleros en sus extremos, como se indica en la A.15, los coeficientes de presión que deben aplicarse serán como sigue: para la superficie inferior del alero, los del muro adyacente por debajo del alero y para la superficie superior del alero los que correspondan al techo.

Tabla A.14 Coeficiente de presión exterior C_{pe} para muros laterales (ML) de construcciones con planta rectangular cerrada. *Nota.* Adaptado de “Manual de Diseño de Obras Civiles Cap. C.1.4 Diseño por Viento. Sección C: Estructuras Tema 1: Criterios Generales de Análisis y Diseño.” (p. 35) por Comisión Federal de Electricidad, 2020.

Distancia horizontal a lo largo de un muro lateral, medida a partir de la arista común con el muro de barlovento	Coeficiente de presión exterior (C_{pe})
de 0 a $1 \bar{h}$	-0.65
de $1 \bar{h}$ a $2 \bar{h}$	-0.50
de $2 \bar{h}$ a $3 \bar{h}$	-0.30
> $3 \bar{h}$	-0.20

NOTAS:

1. Esta tabla se aplica con ayuda de la Fig 3.3.
2. La distancia horizontal se determina en función de la altura de la construcción, \bar{h} .

Tabla A.15 Coeficiente de presión exterior C_{pe} para muros en barlovento (MB) y sotavento (MS) de construcciones con planta rectangular cerrada. *Nota.* Adaptado de “Manual de Diseño de Obras Civiles Cap. C.1.4 Diseño por Viento. Sección C: Estructuras Tema 1: Criterios Generales de Análisis y Diseño.” (p. 35) por Comisión Federal de Electricidad, 2020.

Muro	Dirección del viento (θ), en grados	Inclinación del techo (γ), en grados	d/b	C_{pe}	
Barlovento	Normal ($\theta = 0^\circ$) o paralela ($\theta = 90^\circ$) a la cumbrera	Cualquiera	Cualquiera	0.80	
			≤ 1.0	-0.50	
			$= 2.0$	-0.30	
Sotavento	Normal ($\theta = 0^\circ$) o paralela ($\theta = 90^\circ$) a la cumbrera, para techos a una o dos aguas	$0^\circ \leq \gamma < 10^\circ$	≥ 4.0	-0.20	
			Cualquiera	-0.30	
			$10^\circ \leq \gamma \leq 15^\circ$	-0.30	
		Paralela ($\theta = 90^\circ$) a la cumbrera, para techos a cuatro aguas	20°	-0.40	
			$\geq 25^\circ$	≤ 0.1	-0.75
			≥ 0.3	-0.50	
Paralela ($\theta = 90^\circ$) a la cumbrera, para techos a una o dos aguas	Cualquiera	≤ 1.0	-0.50		
		$= 2.0$	-0.30		
		≥ 4.0	-0.20		

NOTAS:

1. Esta tabla se aplica con ayuda de la Fig 3.2.
2. Para valores intermedios de d/b y γ , los valores del coeficiente C_{pe} pueden interpolarse linealmente.
3. Si no se especifican valores de C_{pe} para alguno de los parámetros de las Tablas 3.2, 3.3 y 3.4, o si se adoptan otros, éstos deben definirse o justificarse con base en resultados analíticos, experimentales en túnel de viento o presentados en la literatura especializada.

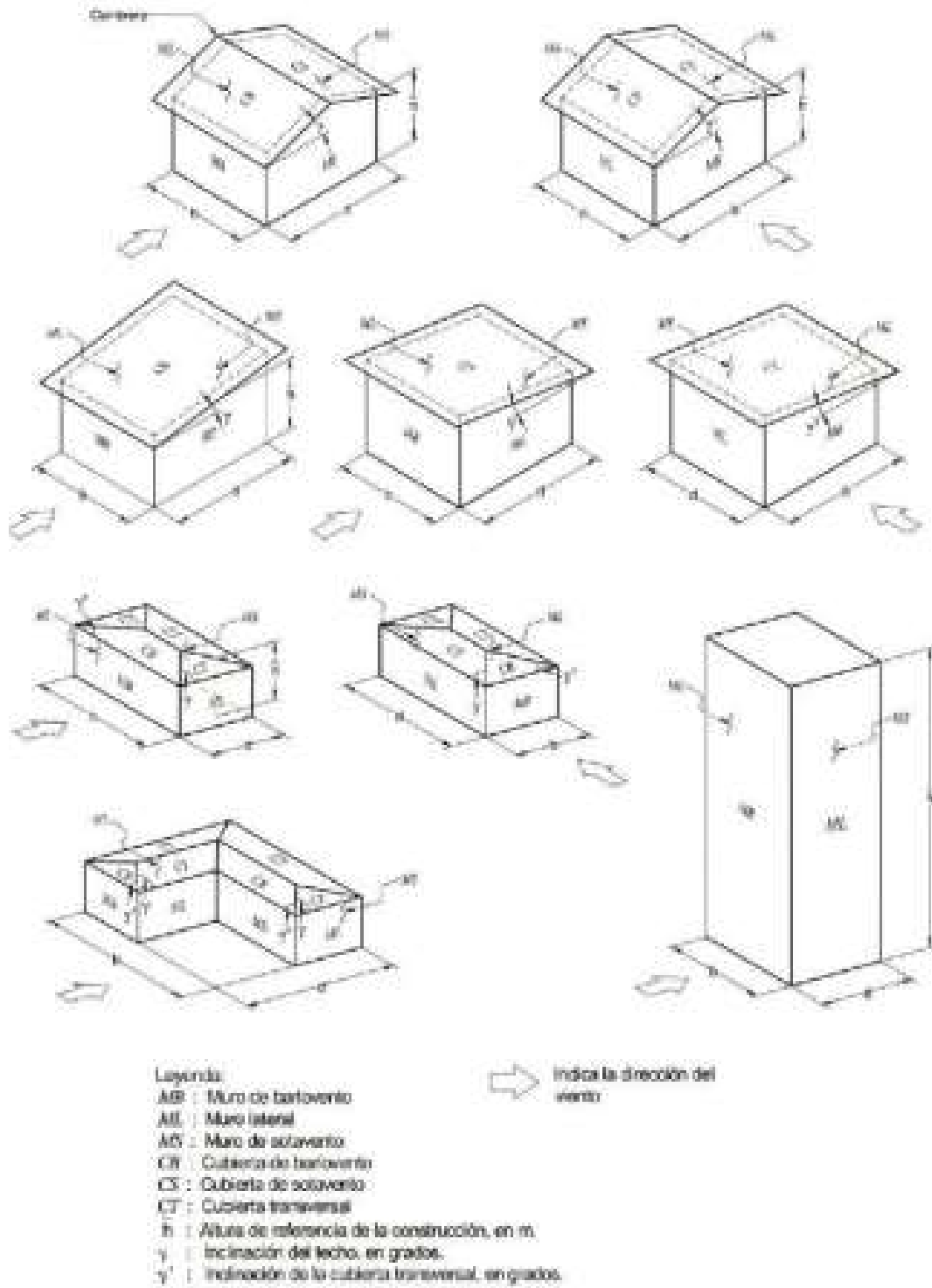


Fig A.15 Definición de parámetros de construcciones con planta cerrada. *Nota.* Adaptado de “Manual de Diseño de Obras Civiles Cap. C.1.4 Diseño por Viento. Sección C: Estructuras Tema 1: Criterios Generales de Análisis y Diseño.” (p. 39) por Comisión Federal de Electricidad, 2020.

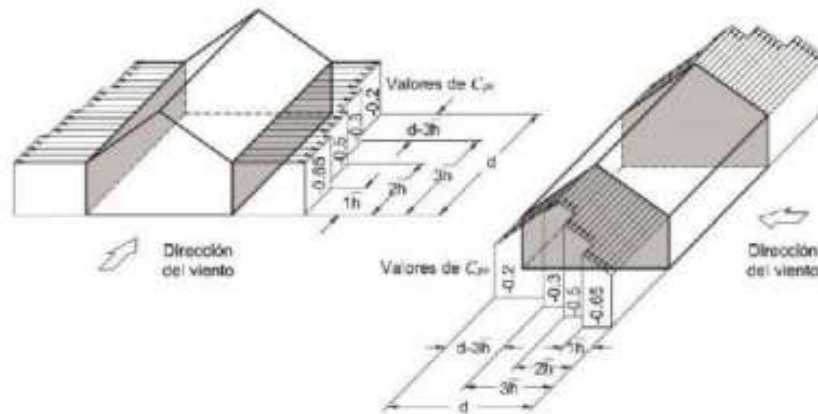


Fig A.16 Definición de zonas de muros laterales para aplicar los coeficientes de presión exterior. *Nota.* Adaptado de “Manual de Diseño de Obras Civiles Cap. C.1.4 Diseño por Viento. Sección C: Estructuras Tema 1: Criterios Generales de Análisis y Diseño.” (p. 40) por Comisión Federal de Electricidad, 2020.

A continuación, se especifican los valores de los factores K_d , K_L y K_{rs} , relacionados con la ecuación A.37.

A.4.9.1.2 Factor de reducción de presión por tamaño de área, K_d

Los valores del factor K_d se indican en la Tabla A.16 y sólo se aplican a las presiones exteriores; en ella puede observarse que este factor depende del área tributaria de diseño, A . Para los casos no contemplados, así como para los muros de silos, tanques cilíndricos y techos aislados, el valor de K_d será igual a la unidad.

Tabla A.16 Factor de reducción K_d para techos y muros laterales. *Nota.* Adaptado de “Manual de Diseño de Obras Civiles Cap. C.1.4 Diseño por Viento. Sección C: Estructuras Tema 1: Criterios Generales de Análisis y Diseño.” (p. 35) por Comisión Federal de Electricidad, 2020.

Área tributaria en m ² (A)	Factor de reducción (K_d)
≤10	1.00
25	0.90
≥100	0.80

NOTA: Para valores intermedios del área tributaria, A, los valores de K_d pueden interpolarse linealmente.

El área tributaria es aquella sobre la cual se considera que actúa la presión de diseño, por ejemplo, en el caso de un sujetador de recubrimiento, esta será el área tributaria que retendrá, en el caso de un larguero, esta será la que resulte del producto del claro entre vigas o columnas principales por la separación entre los largueros, y para la estructura principal, su área tributaria será la que le corresponda según la distribución de marcos o elementos de carga principales.

La presión exterior, p_e , se verá afectada por el factor K_A cuando se diseñen los siguientes elementos de una construcción dada:

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

Como se observa, este factor no interviene en el diseño de los elementos estructurales que soportan los muros de barlovento y sotavento, por lo que, en estos casos, será igual a 1.0.

A.4.9.1.3 Factor de presión local, K_L

El factor de presión local, K_L , se obtendrá de la Tabla A.17 para las áreas de afectación indicadas en las Figs A.17 a A.21 y se aplicará sólo sobre las presiones exteriores, las cuales a su vez se combinarán con las interiores. Para el diseño, se considerarán los valores de K_L que causen los efectos más adversos e incluso puede tomar el valor de 1.0 si la combinación de presiones exteriores e interiores resulta así más desfavorable.

La presión exterior, p_e , se verá afectada por el factor K_L cuando se diseñen los siguientes elementos de una construcción dada:

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

Cuando se diseñe la estructura principal de la construcción, se trate del muro de sotavento o de una cubierta tipo membrana, este factor se tomará igual a la unidad.

La Fig A.15 y las Figs A.17 a A.21 complementan la Tabla A.17 para aclarar todas las variables y las zonas en donde se aplica el factor de presión local. Asimismo, en la sección de Ayudas de Diseño se presentan figuras que corresponden a algunos casos de la Tabla A.17, así como ejemplos de aplicación práctica con el fin de mostrar la utilización de dicha tabla.

Cuando el área de un elemento de recubrimiento, o el área tributaria de un miembro de soporte, exceda las áreas de afectación o la distancia de proximidad al borde, indicadas en la Tabla A.17 el factor de presión local, K_L , será igual a 1.0 para el área restante de dicho elemento. Al aplicar el factor de presión local, el límite negativo del producto $K_L * C_{pe}$ será de -3.0.

Para techos con pendientes menores que 10° y con parapetos, los valores de K_L , para las áreas CBA1, CBA2 y CBC1 (cuando aplique) (Figs A.17 y A.19), para la superficie que quede expuesta del lado de sotavento del parapeto, pueden ser modificados multiplicando los valores de la Tabla A.17 por el factor de reducción por parapetos, K_s , dado en la Tabla A.18. Sin embargo, los valores

inferiores a 1.0 de esta Tabla A.18 sólo deben aplicarse a las zonas en las que el factor de presión local, K_L , es superior a 1.0.

Tabla A.17 Factor de presión local K_L para recubrimientos y sus soportes. *Nota.* Adaptado de “Manual de Diseño de Obras Civiles Cap. C.1.4 Diseño por Viento. Sección C: Estructuras Tema 1: Criterios Generales de Análisis y Diseño.” (p. 43) por Comisión Federal de Electricidad, 2020.

Presión externa	Caso	Referencia de las áreas	Relación de aspecto \bar{h}/D	Área de afectación (A_f)	Proximidad al borde	K_L	
Empuje (+)	1	<i>MBA1</i>	Cualquiera	$\leq 0.25 a_0^2$	Cualquiera	1.50	
	2	<i>CBC1</i>	Cualquiera	$\leq 0.25 a_0^2$	$< a_0$ a partir de los bordes de esquina	3.00	
	3	<i>CBA1</i>	Cualquiera	$\leq a_0^2$	$< a_0$	1.50	
	4	<i>CBA2</i>	Cualquiera	$\leq 0.25 a_0^2$	$< 0.50 a_0$	2.00	
	5	<i>CSA3</i>	Cualquiera	$\leq a_0^2$	$< a_0$	1.50	
	Succión (-)	6	<i>CSA4</i>	Cualquiera	$\leq 0.25 a_0^2$	$< 0.50 a_0$	2.00
		7	<i>MLA1</i>	≤ 1	$\leq a_0^2$	$< a_0$	1.50
		8	<i>MLA2</i>		$\leq 0.25 a_0^2$	$< 0.50 a_0$	2.00
		9	<i>MLA3</i>	> 1	$\leq 0.25 a_0^2$	$> a_0$	1.50
		10	<i>MLA4</i>		$\leq a_0^2$	$< a_0$	2.00
		11	<i>MLA5</i>		$\leq 0.25 a_0^2$	$< 0.50 a_0$	3.00
Todas las otras áreas, empuje o succión.	12	---	Cualquiera	---	---	1.00	

NOTAS:

1. Los casos de presiones negativas (succiones) son alternativos y no se aplican simultáneamente.
2. Para techos de edificios bajos que se encuentren adyacentes a edificios altos, y para construcciones altas que tengan muros con bordes inclinados o con salientes, expuestos a condiciones de alta turbulencia, un factor de presión local con un valor de 3.0 no resulta conservador. Estas situaciones están fuera del alcance de este capítulo por lo que deberá realizarse un estudio especializado o pruebas en túnel de viento.
3. Si un área de recubrimiento está sometida a más de un caso de los indicados en esta tabla, utilice el mayor valor obtenido para tales casos.
4. El área de afectación debe compararse con la tributaria para definir en qué área se aplican los valores de K_L que aquí se indican.
5. Cuando γ (ángulo de inclinación del techo) sea menor que diez grados, la zona de afectación del techo se definirá como si éste fuese horizontal (techo plano), por lo que el factor de presión local no se aplicará en la zona de la cumbrera.
6. La dimensión “ a_0 ”, en m, y las referencias de las áreas se definen en la Fig 3.4, casos (a), (b), (c), (d) y (e).
7. La altura de referencia, \bar{h} , para construcciones con techos planos es igual a la altura H y D es la menor dimensión horizontal de la construcción.
8. El área de afectación *CBC1* sólo aplica para techos con $\gamma < 10^\circ$.

A.4.9.1.4 Factor de presión para recubrimientos y anclajes, K_{ra}

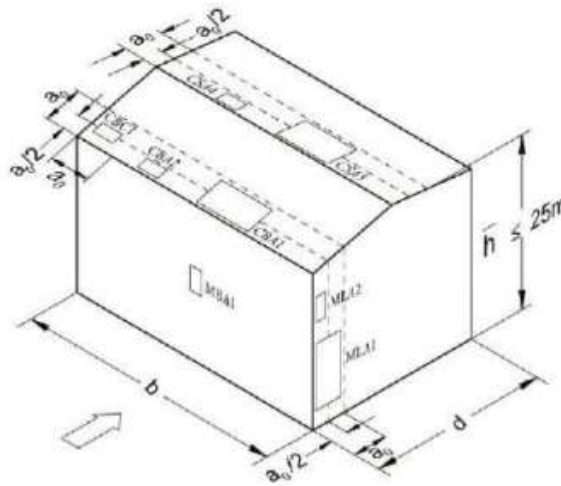
El factor de presión para recubrimientos y anclajes, K_{ra} , es igual a 1.50 y afectará tanto a las presiones exteriores como a las interiores. La velocidad regional, V_n , para el diseño de recubrimientos y sus anclajes, se obtendrá para el periodo de retorno fijo que corresponda, como se indica en el inciso 2.2.1 de MDOC 2020, aun cuando se elija el criterio de diseño óptimo.

Las presiones exteriores e interiores, p_e y p_i , serán afectadas por el factor K_{ra} cuando se diseñen los siguientes elementos:

Recubrimientos de techos y muros de barlovento, sotavento y laterales.

Sistemas de sujeción de los recubrimientos.

Cuando se diseñe la estructura principal y los elementos secundarios, este factor será igual a la unidad. Este factor únicamente afecta a las presiones de construcciones cerradas.



NOTAS (aplican a las Figs 3.4 (a) a 3.4 (e)):

1. La dimensión " a_0 " debe tomarse como la mínima de $0.2b$, $0.2d$ y h .
2. La relación de lados de las áreas de afectación de presión local no debe exceder de 1:4.

Fig A.17 Zonas para la determinación de los factores de presión local K_L , para recubrimientos y sus soportes. Construcciones sin aleros, Dirección del viento normal a la cumbre, $\theta=0^\circ$. Nota. Adaptado de "Manual de Diseño de Obras Civiles Cap. C.1.4 Diseño por Viento. Sección C: Estructuras Tema 1: Criterios Generales de Análisis y Diseño." (p. 44) por Comisión Federal de Electricidad, 2020.

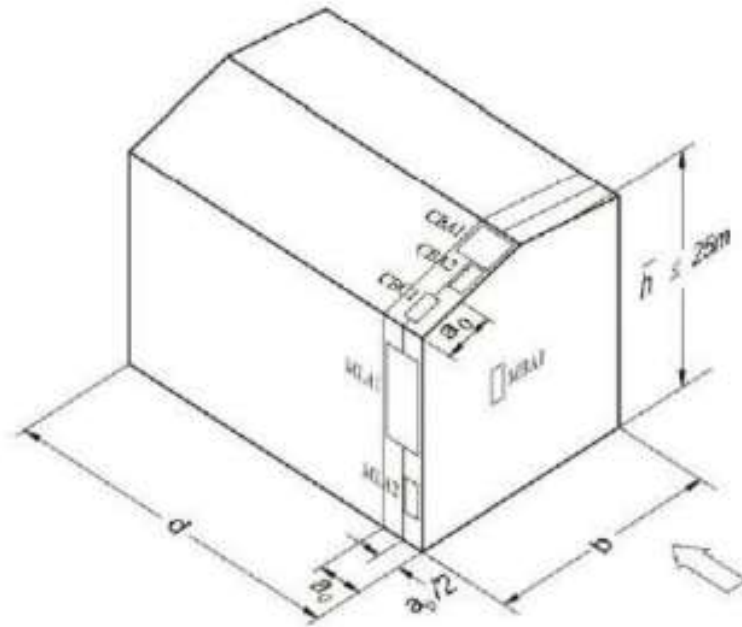


Fig A.18 Zonas para la determinación de los factores de presión local K_L , para recubrimientos y sus soportes. Construcciones sin aleros, Dirección del viento paralela a la cumbre, $\theta=90^\circ$. *Nota.* Adaptado de “Manual de Diseño de Obras Civiles Cap. C.1.4 Diseño por Viento. Sección C: Estructuras Tema 1: Criterios Generales de Análisis y Diseño.” (p. 44) por Comisión Federal de Electricidad, 2020.

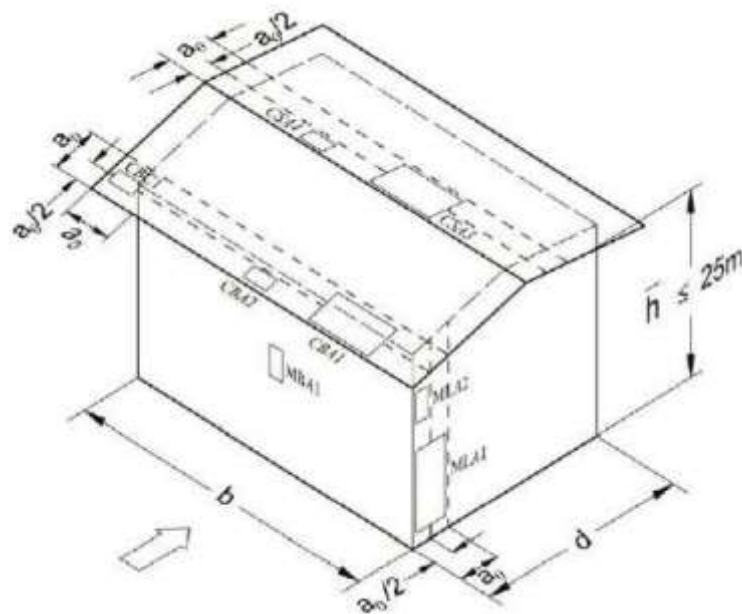


Fig A.19 Zonas para la determinación de los factores de presión local K_L , para recubrimientos y sus soportes. Construcciones sin aleros, Dirección del viento paralela a la cumbre, $\theta=90^\circ$. *Nota.* Adaptado de “Manual de Diseño de Obras Civiles Cap. C.1.4 Diseño por Viento. Sección C: Estructuras Tema 1: Criterios Generales de Análisis y Diseño.” (p. 45) por Comisión Federal de Electricidad, 2020.

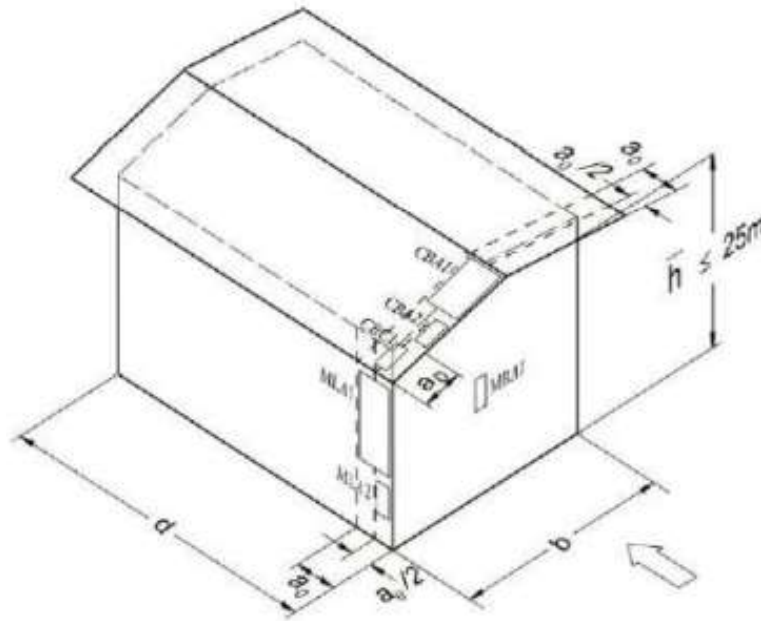


Fig A.20 Zonas para la determinación de los factores de presión local K_L , para recubrimientos y sus soportes. Construcciones con aleros, Dirección del viento paralela a la cumbrera, $\theta=90^\circ$. *Nota.* Adaptado de “Manual de Diseño de Obras Civiles Cap. C.1.4 Diseño por Viento. Sección C: Estructuras Tema 1: Criterios Generales de Análisis y Diseño.” (p. 45) por Comisión Federal de Electricidad, 2020.

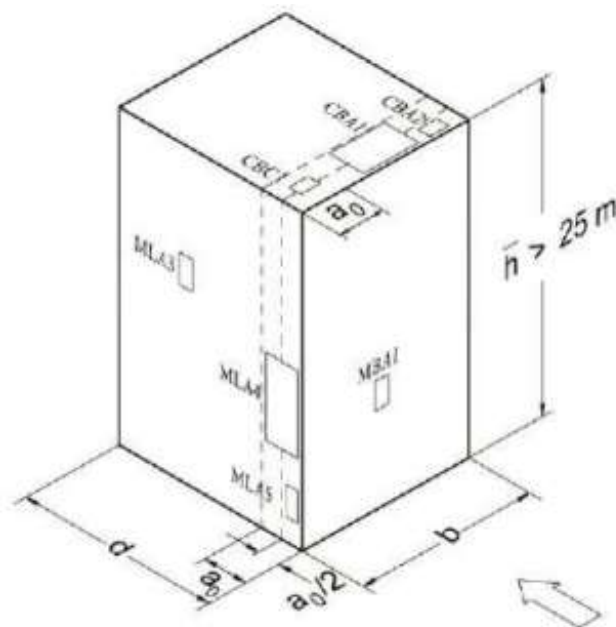


Fig A.21 Zonas para la determinación de los factores de presión local K_L , para recubrimientos y sus soportes. Construcciones con techos planos y alturas mayores que 25 m. *Nota.* Adaptado de “Manual de Diseño de Obras Civiles Cap. C.1.4 Diseño por Viento. Sección C: Estructuras Tema 1: Criterios Generales de Análisis y Diseño.” (p. 46) por Comisión Federal de Electricidad, 2020.

Tabla A.18 Factor de reducción de presión local K_r por parapetos. *Nota.* Adaptado de “Manual de Diseño de Obras Civiles Cap. C.1.4 Diseño por Viento. Sección C: Estructuras Tema 1: Criterios Generales de Análisis y Diseño.” (p. 46) por Comisión Federal de Electricidad, 2020.

\bar{h}	h_p	K_r
≤ 25 m	$\leq 0.07 \bar{h}$	1.00
	$0.10 \bar{h}$	0.80
	$\geq 0.20 \bar{h}$	0.50
> 25 m	$\leq 0.02 D$	1.00
	$0.03 D$	0.80
	$\geq 0.05 D$	0.50

NOTAS:

1. h_p es la altura del parapeto medida desde el nivel de la cubierta (Fig 3.5), mientras que D es la menor dimensión horizontal de la construcción, ambas dimensiones en m.
2. Para valores intermedios puede emplearse una interpolación lineal.
3. Estos valores se utilizan para modificar los valores del factor K_L , obtenidos de la Tabla 3.6.

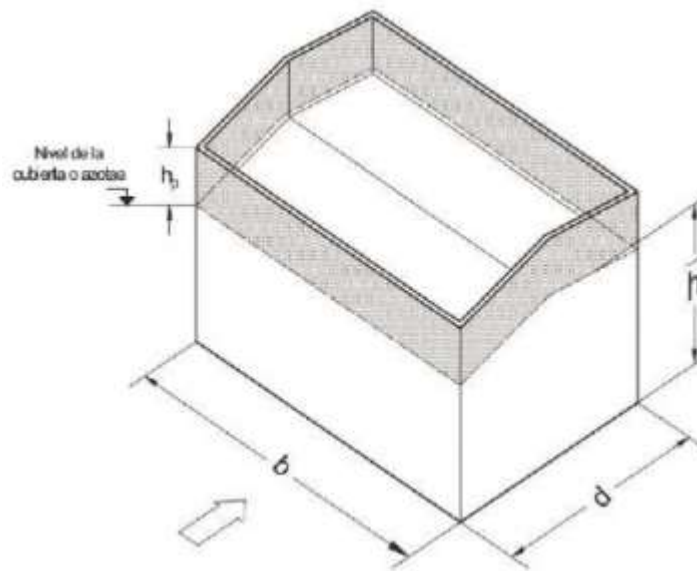


Fig A.22 Altura del parapeto medida desde el nivel de la cubierta. *Nota.* Adaptado de “Manual de Diseño de Obras Civiles Cap. C.1.4 Diseño por Viento. Sección C: Estructuras Tema 1: Criterios Generales de Análisis y Diseño.” (p. 47) por Comisión Federal de Electricidad, 2020.

A.4.9.2 Presiones interiores

La presión interior, p_i , en Pa, se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$p_i = C_{pi} K_{ra} q_z \quad (\text{A.38})$$

Es importante remarcar que esta presión interior se considerará constante sobre todas las superficies interiores de la construcción y que, para diseñar las estructuras y sus recubrimientos, deberá tomarse en cuenta que las presiones interiores actúan simultáneamente con las exteriores descritas en la sección A.4.9.1, debiéndose seleccionar la combinación de ellas que resulte más desfavorable. Asimismo, para su cálculo se considerará la altura de referencia, \bar{h} .

Los distintos valores del coeficiente de presión interior, C_{pi} , se dan en las Tablas A.19 y A.20. La Tabla A.19 se aplica cuando las superficies son impermeables o permiten pequeñas filtraciones de viento al interior de la construcción – no son impermeables -. La Tabla A.20 es aplicable cuando existen aberturas de tamaño considerable sobre las superficies que conforman la estructura. En esas tablas se emplean los conceptos de permeabilidad, impermeabilidad, aberturas y aberturas dominantes, las que se definen a continuación:

Permeabilidad: Si en una estructura existen huecos o hendiduras que permiten que el flujo de viento penetre a su interior, entonces se presentan presiones interiores que pueden alcanzar magnitudes importantes o actuar simultáneamente con las exteriores provocando condiciones desfavorables, por lo que deberán tomarse en cuenta. Para fines de este capítulo, la permeabilidad de una superficie se determina como el cociente entre el área de las hendiduras y huecos (pueden incluirse huecos pequeños tales como ventilas de ventanas), resultando de las tolerancias normales de la construcción, y el área total de esa superficie; se considera una superficie permeable

Impermeabilidad: Se considera como superficie impermeable aquella en la que el cociente del área abierta y el área total de la superficie es menor que 0.001.

Aberturas: Se consideran como tales las puertas y ventanas abiertas, ventilas para aire acondicionado y sistemas de ventilación, y aberturas en los recubrimientos, entre otras.

Aberturas dominantes: Se consideran de este tipo, cuando el cociente del área abierta y el área total de la superficie es mayor que 0.005. Una abertura dominante no necesariamente es grande, también puede presentarse como resultado de un escenario particular al producirse una abertura mientras otras están cerradas.

La Tabla A.19 se empleará cuando se considere el caso en el que las aberturas estén cerradas y la permeabilidad predomina. Por el contrario, la Tabla A.20 se empleará en el caso de que se considere la existencia de aberturas dominantes.

Tabla A.19 Coeficiente de presión interior C_{pi} para construcciones con planta rectangular cerrada para muros permeables sin aberturas mayores al 0.5% del área del muro y el techo impermeable. *Nota.* Adaptado de “Manual de Diseño de Obras Civiles Cap. C.1.4 Diseño por Viento. Sección C: Estructuras Tema 1: Criterios Generales de Análisis y Diseño.” (p. 49) por Comisión Federal de Electricidad, 2020.

Condiciones de permeabilidad posibles	Coeficiente de presión Interior (C_{pi})
1. Un muro permeable, los otros impermeables:	
a) Muro de barlovento permeable	C_{pe}
b) Muro de barlovento impermeable (Casos a y b de la Fig 3.6, respectivamente)	-0.30
2. Dos o tres muros igualmente permeables, el (los) otro(s) impermeable(s):	
a) Muro de barlovento permeable	-0.10 ó 0.20 según lo que produzca la combinación de carga más desfavorable.
b) Muro de barlovento impermeable (Casos c y d de la Fig 3.6, respectivamente)	-0.30
3. Todos los muros permeables (Caso e de la Fig 3.6)	-0.30 ó 0.00 según lo que produzca la combinación de carga más desfavorable.
4. Construcciones selladas eficientemente y que tengan ventanas que no puedan abrirse. (Caso f de la Fig 3.6)	-0.20 ó 0.00 según lo que produzca la combinación de carga más desfavorable

NOTA: Cuando se muestran dos valores, éstos se deben considerar como casos de carga separados.

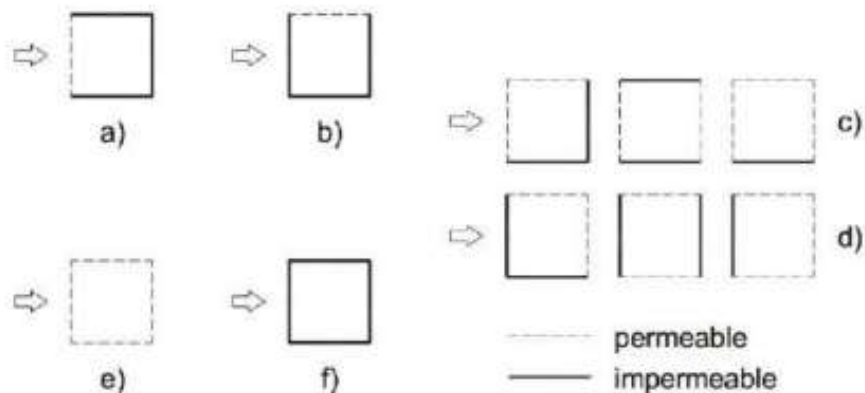


Fig A.23 Ejemplos que muestran diferentes casos de permeabilidad en muros de edificaciones. La flecha indica la dirección del viento. *Nota.* Adaptado de “Manual de Diseño de Obras Civiles Cap. C.1.4 Diseño por Viento. Sección C: Estructuras Tema 1: Criterios Generales de Análisis y Diseño.” (p. 49) por Comisión Federal de Electricidad, 2020.

Tabla A.20 Coeficiente de presión interior C_{pi} para construcciones con planta rectangular cerrada para muros permeables con aberturas mayores al 0.5% del área del muro o techo correspondiente. *Nota.* Adaptado de “Manual de Diseño de Obras Civiles Cap. C.1.4 Diseño por Viento. Sección C: Estructuras Tema 1: Criterios Generales de Análisis y Diseño.” (p. 50) por Comisión Federal de Electricidad, 2020.

Ubicación de las aberturas dominantes	Relación entre el área de aberturas dominantes en una superficie y la suma de las áreas de las aberturas del techo y de los otros muros (Incluyendo el área de posible permeabilidad)						
	≤ 0.5		1		2	3	≥ 6
	Caso 1	Caso 2	Caso 1	Caso 2			
a) En el muro de barlovento (MB); (Fig 3.7(a))	-0.30	0.00	-0.10	0.20	$0.70 \cdot C_{pe}$	$0.85 \cdot C_{pe}$	C_{pe}
b) En el muro de sotavento (MS); (Fig 3.7(b))	-0.30	0.00	-0.30	0.00	C_{pe}	C_{pe}	C_{pe}
c) En un muro lateral (ML); (Fig 3.7(c))	-0.30	0.00	-0.30	0.00	C_{pe}	C_{pe}	C_{pe}
d) En el techo	-0.30	0.00	-0.30	0.00	C_{pe}	C_{pe}	C_{pe}

NOTAS:

- El valor de C_{pe} que se seleccione debe corresponder al de la superficie con la mayor abertura dominante. Por ejemplo, para el caso en el que la abertura dominante se ubique en el muro en sotavento, cuando la relación entre el área total de las aberturas dominantes y el área total del techo y de los otros muros sea 2, el C_{pi} será igual a C_{pe} , en donde el valor del C_{pe} deberá tomarse de la Tabla 3.2 para muros en sotavento.
- Dado que en las Tablas 3.3 y 3.4 el C_{pe} varía según la zona de la superficie, para calcular el C_{pi} deberá localizarse, en la superficie en cuestión, el centroide de las aberturas y tomar el valor correspondiente a esa posición.

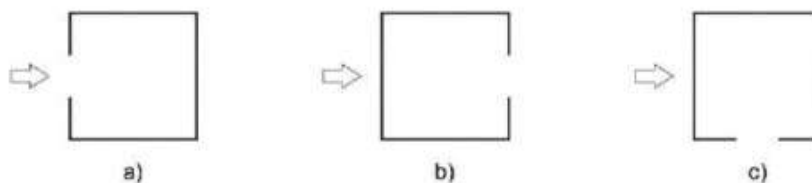


Fig A.24 Ejemplos que muestran diferentes casos de aberturas en muros de edificaciones. La flecha indica la dirección del viento. *Nota.* Adaptado de “Manual de Diseño de Obras Civiles Cap. C.1.4 Diseño por Viento. Sección C: Estructuras Tema 1: Criterios Generales de Análisis y Diseño.” (p. 50) por Comisión Federal de Electricidad, 2020.

REFERENCIAS

- Abeli, I. (2019). The structural and dark side of the EN 13830:2015 Curtain Walling- Product standard. Recuperado el 16 de abril de 2023 de <https://www.linkedin.com/pulse/structural-dark-side-en-138302015-curtain-walling-product-abelli/>
- Abu Bakar, R. (2021). Value Engineering in Façade Trade. Recuperado el 16 de abril de 2023 <https://www.linkedin.com/pulse/value-engineering-fa%C3%A7ade-trade-rusdi-abu-bakar/>
- Administración Pública de la ciudad de México (2017). *Norma Técnica Complementaria para la Revisión de la Seguridad Estructural de las Edificaciones (NTC-RSEE)*.
- American Concrete Institute. (2019). *Building Code Requirements for Structural Concrete ACI 318-19*. Farmington Hills, MI 48331.
- American Society of Civil Engineers. (2021). *Minimum Design Loads for Buildings and other Structures ASCE/SEI 7-22*. Reston, VA.
- Canadian Commission on Building and Fire Codes – National Research Council of Canada (2022). *National Building Code of Canada 2020*. Ottawa.
- Comisión Federal de Electricidad (2020). *Manual de Diseño de Obras Civiles Cap. C.1.4 Diseño por Viento. Sección C: Estructuras Tema 1: Criterios Generales de Análisis y Diseño*. C.P. 06598, México D.F.
- Cui, W., Caracoglia, L. (2015) Simulation and analysis of intervention costs due to wind-induced damage on tall buildings, *Engineering Structures*, Volume 87, Pages 183-197, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.01.001>.
- NOAA (2022). *Continental United States Hurricane Impacts/Landfalls 1851-2021*. Recuperado el 6 de abril de 2023 de https://www.aoml.noaa.gov/hrd/hurdat/All_U.S._Hurricanes.html
- NOAA (2022). *Continental United States Tropical Storms Impacts/Landfalls 1851-1970, 1983-2021*. Recuperado el 6 de abril de 2023 de <https://www.aoml.noaa.gov/hrd/hurdat/uststorms.html>
- Esteva, L. Regionalización sísmica de México para fines de ingeniería, Serie Azul de Instituto de Ingeniería, 1970, pp.-246
- International Code Council. (2020). *Florida Building Code*.
- European Committee for Standardization (2002). *EN 1990:2002+A1 Eurocode - Basis of structural design*.
- European Committee for Standardization (2010). *EN 1991-1-4:2005+A1 Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: General actions – Wind actions*.
- Federal Emergency Management Agency. (2021). *Hazus Hurricane Medel Technical Manual – Hazus 4.2 Service Pack 3*.
- Florida International University. (2019). *Florida Public Hurricane Loss Model 7.0. Technical Report*.
- Hall, A. (2002). Speaking at RIBA Advances in Technology Series, ‘Advances in Cladding’, cited in Wigginton M. and Harris J. *Intelligent Skins*, Butterworth Heinemann, Oxford
- Hilti (s.f). HAS-R 316 SS ANCHOR ROD. Recuperado el 9 de abril de 2023 de https://www.hilti.com/c/CLS_FASTENER_7135/CLS_ANCHOR_RODS_ELEMENTS_7135/r4234

- Hilti (s.f.). HIT-HY 200-R V3 ADHESIVE ANCHOR. Recuperado el 9 de abril de 2023 de https://www.hilti.com/c/CLS_FASTENER_7135/CLS_INJECTABLE_ADHESIVE_ANCHORS_7135/r11219549
- Hong, H.P., Sheng, C., Pozos-Estrada, A., Gomez, R. (2022). Modeling and estimation of hurricane wind hazard affecting Mexican coastal regions. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Volume 230, 105199, ISSN 0167-6105, <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2022.105199>.
- Lesniak, A., Górk M. (2020). Structural Analysis of Factors Influencing the Costs of Facade System Implementation.
- London Metal Exchange. (s.f.). LME Aluminum. Recuperado el 11 de octubre de 2022 de <https://www.lme.com/Metals/Non-ferrous/LME-Aluminium#Trading+day+summary>
- López López, A., Pérez Rocha, L.E., Muñoz Black, C.J., Cordero Macías, C. (2008). Wind Velocities Maps for Mexico Using Optimum Design Criterion. Reliability and Optimization of Structural Systems' 08: Proc. of the fourteenth IFIP WG7.5 Working Conference, Toluca, Mexico, August 6–9, 2008. Springer Science & Business Media.
- Ordaz M., Jara J.M., Singh S.K. (1989). Riesgo sísmico y espectros de diseño en el estado de Guerrero. Informe conjunto del II-UNAM y el Centro de Investigación Sísmica AC de la Fundación Javier Barros Sierra al Gobierno del estado de Guerrero, Instituto de Ingeniería, UNAM, proyectos 8782 y 9745, México.
- Pozos-Estrada, A., Liu, T.J., Gómez, R., Hong, H.P. (2015). Seismic design and importance factor: Benefit/cost for overall service time versus per unit service time.
- Roark RJ, Young WC. Formulas for stress & strain. 7th ed. New York: McGraw-Hill; 2002. p. 446-451.
- Rosenblueth, E., 1976. Optimum design for infrequent disturbances, *J. Structural Div, ASCE*, 102, 1807-1825.
- The Aluminum Association. (2015). *Aluminum Design Manual. Specification for aluminum structures*. Arlington, VA, USA.
- Wang, CH., Holmes, J.D. (2020). Exceedance rate, exceedance probability, and the duality of GEV and GPD for extreme hazard analysis. *Nat Hazards* 102, 1305–1321. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-03968-z>
- Wen, Y., Kang, Y. (2001). Minimum Building Life-Cycle Cost Design Criteria. I: Methodology. *Journal of Structural Engineering-asce - J STRUCT ENG-ASCE*. 127.
- Yeo, D., Lin, N., Simiu, E. (2014). Estimation of Hurricane Wind Speed Probabilities: Application to New York City and Other Coastal Locations. *Journal of Structural Engineering*. 140. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000892](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000892)
-



INSTITUTO
DE INGENIERÍA
UNAM®

