

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Civil



TESIS

Variación del comportamiento estructural de una cobertura en arco
diseñada con cargas de viento de la norma E.020 en comparación con
la norma ASCE 7-22

Para Optar el Título Profesional de:

INGENIERO CIVIL

Presentado por:

Bach. Ing. Miguel Angel Gil Jáuregui

Asesor:

Dr. Ing. Miguel Angel Mosqueira Moreno

Cajamarca – Perú

2026

CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

- FACULTAD DE INGENIERÍA -

1. **Investigador:** MIGUEL ANGEL GIL JÁUREGUI

DNI: 41158788

Escuela Profesional: INGENIERÍA CIVIL

2. **Asesor:** Dr. Ing. MIGUEL ANGEL MOSQUEIRA MORENO

Facultad: DE INGENIERÍA

3. **Grado académico o título profesional**

☐ Bachiller

☒ Título profesional

☐ Segunda especialidad

☐ Maestro

☐ Doctor

4. **Tipo de Investigación:**

☒ Tesis

☐ Trabajo de investigación

☐ Trabajo de suficiencia profesional

☐ Trabajo académico

5. **Título de Trabajo de Investigación:**

VARIACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE UNA COBERTURA EN ARCO DISEÑADA
CON CARGAS DE VIENTO DE LA NORMA E.020 EN COMPARACIÓN CON LA NORMA ASCE 7-22

6. **Fecha de evaluación:** 19/01/2026

7. **Software antiplagio:**

☒ TURNITIN

☐ URKUND (OURIGINAL) (*)

8. **Porcentaje de Informe de Similitud:** 25%

9. **Código Documento: Oid:** 3117:547363514

10. **Resultado de la Evaluación de Similitud:**

☒ APROBADO ☐ PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: 19/01/2026



FIRMA DEL ASESOR

Dr. Ing. MIGUEL ANGEL MOSQUEIRA MORENO

DNI: 26733060



Firmado digitalmente por:
BAZAN DIAZ Laura Sofia
FAU 20148258801 soft
Motivo: En señal de
conformidad
Fecha: 19/01/2026 12:25:02-0500

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN FI



Universidad Nacional de Cajamarca

"Norte de la Universidad Peruana"

Fundada por Ley 14015 del 13 de Febrero de 1962

FACULTAD DE INGENIERÍA

Teléf. N° 365976 Anexo N° 1129-1130



ACTA DE SUSTENTACIÓN PÚBLICA DE TESIS.

TITULO : VARIACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE UNA COBERTURA EN ARCO DISEÑADA CON CARGAS DE VIENTO DE LA NORMA E.020 EN COMPARACIÓN CON LA NORMA ASCE 7-22.

ASESOR : Dr. Ing. Miguel Angel Mosqueira Moreno.

En la ciudad de Cajamarca, dando cumplimiento a lo dispuesto por el Oficio Múltiple N° 0083-2026-PUB-SA-FI-UNC, de fecha 20 de enero de 2026, de la Secretaría Académica de la Facultad de Ingeniería, a los **veintitrés días del mes de enero de 2026**, siendo las once horas con treinta minutos (11:30 a.m.) en la Sala de Audiovisuales (Edificio 1A - Segundo Piso), de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad Nacional de Cajamarca, se reunieron los Señores Miembros del Jurado Evaluador:

Presidente : Dr. Ing. Mauro Augusto Centurión Vargas.
Vocal : Dr. Ing. Agustín Emerson Medina Chávez.
Secretario : Ing. Marco Wilder Hoyos Saucedo.

Para proceder a escuchar y evaluar la sustentación pública de la tesis titulada **VARIACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE UNA COBERTURA EN ARCO DISEÑADA CON CARGAS DE VIENTO DE LA NORMA E.020 EN COMPARACIÓN CON LA NORMA ASCE 7-22**, presentado por el Bachiller en Ingeniería Civil **MIGUEL ANGEL GIL JÁUREGUI**, asesorado por el Dr. Ing. Miguel Angel Mosqueira Moreno, para la obtención del Título Profesional

Los Señores Miembros del Jurado replicaron al sustentante debatieron entre sí en forma libre y reservada y lo evaluaron de la siguiente manera:

EVALUACIÓN PRIVADA : 6 PTS.
EVALUACIÓN PÚBLICA : 11 PTS.
EVALUACIÓN FINAL : 17 PTS DIECISIETE (En letras)

En consecuencia, se lo declara APROBADO con el calificativo de 17 (DIECISIETE) acto seguido, el presidente del jurado hizo saber el resultado de la sustentación, levantándose la presente a las 13:00 horas del mismo día, con lo cual se dio por terminado el acto, para constancia se firmó por quintuplicado.

Dr. Ing. Mauro Augusto Centurión Vargas.
Presidente

Dr. Ing. Agustín Emerson Medina Chávez.
Vocal

Ing. Marco Wilder Hoyos Saucedo.
Secretario

Dr. Ing. Miguel Angel Mosqueira Moreno.
Asesor

Agradecimiento

A mis padres, José Santos Gil Rodríguez y Feliciano Esperanza Jáuregui Atalaya, por la fe depositada en mí, por su constante apoyo, compromiso que compartieron con mi hermano Daniel Santos, en mi formación profesional,

A mi esposa Mary Carmen, motivación constante.

A mi Asesor Dr. Miguel Mosqueira Moreno, por la colaboración desinteresada, para la consecución del presente trabajo de investigación

Dedicatoria

A mis padres, José Santos y Felician
Esperanza, a mi esposa e hija, Mary Carmen
y Samara Alejandra.

CONTENIDO

Agradecimiento	ii
Dedicatoria	iii
CONTENIDO	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABLAS	xii
RESUMEN	xiv
ABSTRACT	xv
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Planteamiento del problema	1
1.1.1 Contextualización	1
1.1.2 Descripción del problema	1
1.1.3 Formulación del problema	2
1.2 Justificación	2
1.3 Delimitación	2
1.4 Limitaciones	3
1.5 Objetivos	3
1.5.1 General	3
1.5.2 Específicos	3
1.6 Contenido	3
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	4
2.1 Antecedentes teóricos de la investigación	4
2.1.1 Internacional	4
2.1.2 Nacional	5
2.1.3 Local	5
2.2 Bases teóricas	6

2.2.1	Coberturas en arco	6
2.2.1.1	Consideraciones generales.....	6
2.2.2	Diseño del arco	8
2.2.3	Presiones por cargas de viento norma ASCE 7-22.....	11
2.2.3.1	Parámetros básicos de carga de viento	11
2.2.3.2	Procedimiento general de análisis por cargas de viento	23
2.2.4	Cargas de viento método direccional norma ASCE 7-22.....	30
2.2.4.1	Cargas mínimas de diseño	30
2.2.4.2	Presión de velocidad.....	30
2.2.4.3	Presión del viento	31
2.2.4.4	Casos de carga de viento	31
2.2.5	Análisis por túnel de viento	33
2.2.6	Cargas de viento norma E.020.....	33
2.2.6.1	Clasificación de las edificaciones.....	33
2.2.6.2	Velocidad de diseño	33
2.2.6.3	Presión dinámica del viento.....	34
2.2.6.4	Casos de carga de viento	36
2.3	Definición de términos básicos	37
CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS.....		38
3.1	Consideraciones generales.....	38
3.1.1	Ubicación geográfica de la investigación.....	38
3.1.2	Tiempo de la realización de la investigación.....	38
3.2	Marco metodológico.....	39
3.2.1	Métodos de investigación	39
3.2.2	Población, muestra, unidad de análisis y unidad de observación.....	39
3.2.2.1	Población	39
3.2.2.2	Muestra	39

3.2.2.3	Unidad de análisis.....	40
3.2.2.4	Unidad de observación	40
3.2.3	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	41
3.2.3.1	Técnicas.....	41
3.2.3.2	Instrumentos	41
3.2.4	Técnicas e instrumentos del procesamiento y análisis de datos	41
3.2.5	Equipos, materiales e insumos	41
3.3	Planteamiento de la hipótesis y variables.....	42
3.3.1.1	Hipótesis.....	42
3.3.1.2	Variables.....	42
3.3.2	Operacionalización de los componentes de la hipótesis.....	42
3.3.3	Matriz de consistencia metodológica	43
3.4	Procedimiento.....	44
3.4.1	Unidad de observación	44
3.4.1.1	Características de la cobertura en arco	44
3.4.1.2	Clasificación de edificación	45
3.4.1.3	Determinación de la velocidad básica de diseño	45
3.4.2	Cargas de viento de la norma E.020	45
3.4.2.1	Velocidad de diseño	45
3.4.2.2	Presión dinámica del viento.....	45
3.4.2.3	Carga exterior de viento	45
3.4.3	Cargas de viento de la norma ASCE 7-22.....	46
3.4.3.1	Carga mínima de viento.....	46
3.4.3.2	Método direccional.....	47
3.4.4	Combinaciones de diseño	49
3.4.5	Túnel de viento – Norma ASCE 49-21	49
3.4.5.1	Perfil de viento	49

3.4.5.2	Perfil de intensidad de turbulencia	49
3.4.5.3	Dirección del viento.....	50
3.5	Presentación de resultados.....	52
3.5.1	Periodos y frecuencias modales.....	52
3.5.2	Modos de vibración	53
3.5.3	Perfiles de viento	54
3.5.4	Cargas y coeficientes de presión	54
3.5.4.1	Norma E.020.....	54
3.5.4.2	Norma ASCE 7-22	55
3.5.5	Desplazamientos máximos	55
3.5.6	Fuerzas basales	56
3.5.7	Cargas y coeficientes de presión del modelo CFD.....	57
3.5.7.1	Simulación de viento en X+	57
3.5.7.2	Simulación de viento en X+Y-	59
3.5.7.3	Simulación de viento en Y-	61
3.5.8	Simulación en túnel de viento	63
3.5.8.1	Viento en X+	63
3.5.8.2	Viento en X+Y-	64
3.5.8.3	Viento en Y-	65
CAPÍTULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS		67
4.1	Análisis modal.....	67
4.1.1	Modos de vibración	67
4.2	Cargas de viento	67
4.2.1	Perfil del viento	67
4.2.2	Cargas y coeficientes de presión	68
4.2.2.1	Norma E.020.....	68
4.2.2.2	Norma ASCE 7-22	68

4.2.3	Desplazamientos máximos	68
4.3	Fuerzas basales	69
4.3.1	Momentos basales	69
4.4	Carga mínima de viento.....	69
4.5	Túnel de viento	69
4.5.1	Viento en X+	69
4.5.2	Viento en X+Y-	70
4.5.3	Viento en Y-	70
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		71
5.1	Conclusiones.....	71
5.2	Recomendaciones	72
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		73
CAPÍTULO VI. ANEXOS		75
6.1	Mapa eólico del Perú	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Tipo de base de pórticos en arco	6
Figura 2 Pórticos atirantados	7
Figura 3 Polígonos funiculares	8
Figura 4 Analogía de la cadena de Hooke	9
Figura 5 Rebajamiento del arco	10
Figura 6 Casos de carga de viento – Norma ASCE 7-22	15
Figura 7 Casos de carga de viento – Norma ASCE 7-22	15
Figura 8 Factor topográfico – Norma ASCE 7-22	16
Figura 9 Diagrama para determinar C_{pe} para techos en arco	23
Figura 10. Procedimiento general de análisis por carga de viento	25
Figura 11 Casos de carga de viento – Norma ASCE 7-22	32
Figura 12 Caso de carga de viento – Norma E.020	36
Figura 13 Mapa de localización	38
Figura 14 Modelo matemático de la cobertura en arco	44
Figura 15 Cargas de viento - Norma E.020	46
Figura 16 Carga mínima de viento	46
Figura 17 Presiones de viento categoría de exposición C	48
Figura 18 Perfil de viento y de intensidad de turbulencia	50
Figura 19 Direcciones de análisis del viento	50
Figura 20 Túnel de viento en la dirección X+	51
Figura 21 Túnel de viento en la dirección X+Y-	51
Figura 22 Túnel de viento en la dirección Y-	51

Figura 23 Periodo fundamental de la estructura.....	52
Figura 24 Modos de vibración.....	53
Figura 25 Modos de vibración – Modo 02	53
Figura 26 Modos de vibración – Modo 03	53
Figura 27 Perfil de viento ASCE 7-22 cat. C, Norma E.020 y ASCE 49-21	54
Figura 28 Variación porcentual del desplazamiento	56
Figura 29 Variación porcentual de las fuerzas basales.....	56
Figura 30 Presión de viento de la simulación en X+	57
Figura 31 Coeficientes de presión de la simulación en X+	58
Figura 32 Cargas y coef. de presión de la simulación de viento para el análisis estático ...	58
Figura 33 Presión de viento de la simulación en X+Y-.....	59
Figura 34 Coeficientes de presión de la simulación en X+Y-.....	60
Figura 35 Cargas y coef. de presión simulación en X+Y- para el análisis estático.	60
Figura 36 Presión de viento de la simulación en Y-.....	61
Figura 37 Coeficientes de presión de la simulación en Y-.....	62
Figura 38 Cargas y coef. de presión simulación en Y- para el análisis estático.....	62
Figura 39 Campo de presiones	63
Figura 40 Campo de velocidades	63
Figura 41 Líneas de corriente	63
Figura 42 Campo de presiones	64
Figura 43 Líneas de corriente	64
Figura 44 Campo de velocidades	65
Figura 45 Campo de presiones	65

Figura 46 Campo de velocidades	66
Figura 47 Líneas de corriente	66
Figura 48 Mapa eólico del Perú.....	75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Categoría de riesgo de edificios y otras estructuras – norma ASCE 7-22.....	12
Tabla 2 Factor de direccionalidad del viento K_d	13
Tabla 3 Multiplicadores topográficos.....	17
Tabla 4 Factor de elevación del terreno K_e	18
Tabla 5 Constantes de exposición del terreno	18
Tabla 6 Factores de efecto de tamaño y de coherencia	21
Tabla 7 Coeficiente de presión externa para techos en arco C_{pe}	24
Tabla 8 Coeficiente de presión interna $G C_{pi}$	24
Tabla 9 Pasos para determinar las cargas de viento - método direccional	28
Tabla 10 Categoría de las edificaciones – Norma E.030.....	34
Tabla 11 Factores de forma (C_e)	35
Tabla 12 Factores de forma para determinar (C_i).....	35
Tabla 13 Tipos de losas multiuso	39
Tabla 14 Losas multiusos tipo I desarrolladas por el gobierno regional de Cajamarca	40
Tabla 15 Operacionalización de variables.....	42
Tabla 16 Matriz de consistencia metodológica	43
Tabla 17 Características de la unidad de observación	44
Tabla 18 Clasificación estructural de la cobertura en arco.....	45
Tabla 19 Coeficiente de presión externa para techos en arco C_{pe}	48
Tabla 20 Combinaciones de diseño	49
Tabla 21 Periodos, frecuencias y masas participantes.....	52
Tabla 22 Análisis de cargas y C_{pe} de la simulación en túnel de viento – Norma E.020	54

Tabla 23 Análisis de cargas y C_{pe} de la simulación en túnel de viento – ASCE 7-22	55
Tabla 24 Desplazamientos máximas por cargas de viento	55
Tabla 25 Derivas máximas por combinaciones de diseño	55
Tabla 26 Fuerzas basales por combinaciones de diseño	56
Tabla 27 Coeficientes de presión y presión de viento de la simulación en X^+	57
Tabla 28 Coeficientes de presión y presión de viento de la simulación en $X+Y^-$	59
Tabla 29 Coeficientes de presión y presión de viento de la simulación en Y^-	61

RESUMEN

Para el diseño de coberturas en arco, las normas E.020 y ASCE 7-22, presentan diferencias, para determinar la carga estática equivalente que aproximar la acción dinámica del viento, y en la zonificación para su aplicación, con variaciones por exceso o defecto, que afecta el comportamiento estructural; considerando, coberturas en arco de acero estructural, para losas multiusos, y teniendo como muestra la cobertura de una losa multiuso tipo I, se tiene como objetivo, determinar la variación del comportamiento estructural de una cobertura en arco diseñada con cargas de viento de la norma E.020 en comparación con la norma ASCE 7-22, y por inducción científica, establecer las variaciones que se presentan en el diseño de las coberturas en arco; con base a modelos estructurales y de dinámica de fluidos computación (túnel de viento virtual) de acuerdo a la norma ASCE 49-21, Concluyendo que, la variación de la presión dinámica del viento de la norma E.020 de 28.13, respecto del método direccional de la norma ASCE 7-22 de 18.59, es de 33.91%, modificando la respuesta dinámica de la cobertura en arco, en un 28.24% en desplazamientos laterales, 88.10% en los cortantes basales y 8.39% de la fuerza vertical, cuando el caso de carga de viento actúa en las combinaciones de diseño, además, se demostró en el túnel de viento (Modelo CFD de acuerdo de la norma ASCE 49-21) que, la norma ASCE 7-22, hace una mejor zonificación de la carga de viento, en las direcciones principales.

Palabras Clave: Comportamiento estructural, túnel de viento, CFD, coberturas, arcos, Procedimiento direccional.

ABSTRACT

For the design of arched roofs, the E.020 and ASCE 7-22 standards present differences in determining the equivalent static load that approximates the dynamic action of the wind, and in the zoning for their application, with variations by excess or deficiency, which affects the structural behavior; considering structural steel arched roofs for multipurpose slabs, and using as a sample the roof of a type I multipurpose slab, the objective is to determine the variation in the structural behavior of an arched roof designed with wind loads from the E.020 standard compared to the ASCE 7-22 standard, and by scientific induction, to establish the variations that occur in the design of arched roofs; Based on structural and computational fluid dynamics models (virtual wind tunnel) according to ASCE 49-21, it was concluded that the variation of the dynamic wind pressure of the E.020 standard of 28.13, with respect to the directional method of the ASCE 7-22 standard of 18.59, is 33.91%, modifying the dynamic response of the arched roof by 28.24% in lateral displacements, 88.10% in base shears and 8.39% of the vertical force, when the wind load case acts in the design combinations. Furthermore, it was demonstrated in the wind tunnel (CFD model according to ASCE 49-21) that the ASCE 7-22 standard provides a better zoning of the wind load in the principal directions.

Keywords:. Structural behavior, wind tunnel, Dinámica Computacional de Fluidos, roofs, arches, directional procedure.

CAPÍTULO I.

INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

1.1.1 Contextualización

De acuerdo a los criterios generales de diseño para infraestructura educativa, se debe considerar coberturas en los espacios abiertos y losas multiusos, para proteger a los estudiantes de los efectos nocivos por la exposición prolongada radiación solar. (Ministerio de Educación, 2025, pág. 26). Que se presenta con mayor frecuencia en patios de recreación y losas multiusos, siendo la solución más frecuente para cubrir estas áreas, la utilización de coberturas en arco, susceptibles a cargas de viento.

Para el diseño por cargas de viento, La norma E.020 (2020), clasifica las estructuras con base a su esbeltez, condiciones de cerramiento y problemas aerodinámicos especiales. Las coberturas en arco clasifican como edificaciones tipo 3 y las presiones de diseño debidas al viento, se determinan por procedimientos reconocidos por la ingeniería, además, la norma establece qué, las estructuras tipo 3 deben satisfacer como mínimo, lo indicado para edificaciones tipo 1 (pág. 20), presentándose una primera diferencia con la norma ASCE 7-22, donde clasifica las estructuras por la categoría de riesgo, basadas en el uso de las edificaciones.

Además, la norma E.020, artículos 12.3 y 12.4, para coberturas en arco, establece para el análisis de cargas dinámicas de viento, una aproximación muy simple para determinar la carga estática equivalente, en comparación con la norma ASCE 7-22, que considera parámetros y coeficientes más detallados para coberturas en arco para determinar las cargas de viento, siendo la principal diferencia normativa.

1.1.2 Descripción del problema

Para coberturas en arco, los criterios que establece la norma peruana en comparación de la norma ASCE 7-22, puede sobreestimar o subestimar las acciones dinámicas del viento en el diseño estructural, considerando que el código ASCE 7-22, para coberturas en arco, considera tres zonas para la aplicación de las cargas, a diferencia de las dos zonas consideradas en la norma E.020

Poma & Mendoza (2023), determinaron un incremento de las cargas de viento del 40% de la norma peruana, respecto de análisis virtual de túnel de viento, y una subestimación por el código ASCE7-16, para edificaciones altos en la ciudad de Lima. (pág. 62), estableciendo que existe variaciones importantes, en la determinación de las presiones por cargas de viento.

Además, considerando que, las idealizaciones de cargas de viento afectan al comportamiento de la estructura, se hace necesario, describir y cuantificar las variaciones en el comportamiento estructural, con las diferencias de carga de viento, determinadas por la norma ASCE 7-22 y E.020.

1.1.3 Formulación del problema

¿En cuánto varía el comportamiento estructural de una cobertura en arco para losas multiusos tipo I, diseñada con cargas de viento de la norma E.020 en comparación con la norma ASCE 7-22?

1.2 Justificación

En la ingeniería, no existe solución única, pero si alternativas óptimas, basadas en la viabilidad técnica y económica, por lo que, si la norma no establece con precisión y de forma detallada el cálculo de las solicitaciones por cargas de viento, cabe la posibilidad, que se esté afectando técnica o económicamente la construcción de este tipo de edificaciones, por lo que, el presente proyecto de tesis, se justifica, al establecer las variaciones existentes de la norma E.020, respecto de una normatividad más detallada y actualizada como el ASCE 7-22 y establecer una línea de investigación orientada a la actualización de la norma peruana.

1.3 Delimitación

Cabe precisar, que la presente investigación, está orientada al estudio de coberturas en arco, sin cerramiento lateral, de aplicación frecuente para coberturas en losas multiusos de locales educativos de primaria y secundaria, por lo que la unidad de observación, se determinara con base a los criterios de diseño para locales educativos de primaria y secundaria, ubicada en la ciudad de Cajamarca.

1.4 Limitaciones

Para determinar la acción dinámica del viento, no se cuenta con laboratorio con túnel de viento, por lo que se considera un modelo CFD, para determinar los coeficientes de presión y cargas de presión del viento.

1.5 Objetivos

1.5.1 General

Determinar la variación del comportamiento estructural de una cobertura en arco diseñada con cargas de viento de la norma E.020 en comparación con la norma ASCE 7-22

1.5.2 Específicos

1. Determinar el comportamiento estructural de una cobertura en arco diseñada con cargas de viento de la norma E.020.
2. Determinar el comportamiento estructural de una cobertura en arco diseñada con cargas de viento de la norma ASCE 7-22

1.6 Contenido

La tesis se desarrolló en cuatro cinco capítulos. Capítulo I. se indica el contexto y el problema (pregunta de investigación e hipótesis), justificación, alcances y objetivos de la investigación. Capítulo II. Se presenta el estado del arte y las bases teóricas de la investigación. Capítulo III. Se define el marco metodológico, procedimientos y tratamiento de los resultados. Capítulo IV. el análisis y discusión de los resultados, y en el Capítulo V. se presenta las conclusiones y recomendaciones del trabajo de investigación.

CAPÍTULO II.

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes teóricos de la investigación

2.1.1 Internacional

López (2023), en la investigación, Modelo de elementos finitos para el cálculo de arcos. Validación en estructuras agroindustriales de acero, realizada en España, con el objetivo de estudiar los arcos mediante el método de elementos finitos, concluye que: Desde el punto de vista geométrico, la diferencia entre una parábola de segundo grado y arco de circunferencia, son imperceptibles, al igual que su comportamiento estructural, aun cuando el arco parabólico muestra un mejor comportamiento, porcentualmente no es significativa la variación. (pág. 258)

Becerra (2022), en la investigación, Análisis por sismo y viento de un edificio con normativa ASCE, realizada en México, con la finalidad de presentar la aplicación de la normativa más actual y de mayor relevancia, concluyo que: Las normas ASCE 7-22, representan las normas más actualizadas, en continua actualización, incluyendo procedimientos más detallados, e incluyendo un mayor número de factores que modifica la acción del viento en las estructuras. (pág. 130)

Piña (2021), en la investigación, Obtención de coeficientes de presión y velocidades de viento en un conjunto de edificios mediante simulación CFD, realizada en México, con el objetivo de analizar y estudiar el efecto del viento en estructuras civiles, resalta la importancia del análisis de cargas, y en el caso de las cargas de viento, recomienda ensayos de túnel de viento, considerando el entorno de la edificación, que no se considera en muchas normatividades. (pág. 91)

Ortiz (2018), en la investigación, Estudio de los efectos del viento en edificio irregular de gran altura con pruebas experimentales en túnel de viento, realizada en México, con el objetivo de analizar los efectos del viento en un edificio irregular alto, concluyo que: Las irregularidades de las edificaciones, están relacionadas con el incremento de presiones y la excentricidad torsional bajo la acción de del viento. (págs. 62, 63)

Pacheco y Tohala (2015), en la investigación, Comparación de métodos para el cálculo de la carga de viento usada en la construcción de edificios en el Ecuador, realizada en Ecuador, con la finalidad de comparar los métodos para el análisis por cargas de viento en Perú, Colombia, Estados Unidos y Ecuador, concluyeron que los resultados más conservadores corresponden a las normas ecuatorianas y peruanas. (pág. 207)

2.1.2 Nacional

Poma & Mendoza (2023), en la investigación, Influencia de las fuerzas de viento basado en un análisis virtual CFD de túnel de viento y su análisis comparativo según la normativa E.020 y ASCE/SEI 7-16 en la respuesta estructural de edificios altos en la ciudad de Lima, realizada en Perú, con la finalidad de realizar un análisis comparativo de las cargas de viento de la norma ASCE 7-16 y E.020, Concluyeron que: Respecto de las cargas determinadas por ensayo virtual de túnel de viento, la norma E.020 sobre estima las cargas hasta en un 40%, y la norma ASCE 7-16 subestima por la aplicación de más factores, que reducen la acción del viento y no se tuvo en cuenta en el ensayo de túnel de viento; además señalan que, la norma peruana no considera el cálculo de momentos de torsión, incluidas en la norma ASCE 7-16 (pág. 62)

Abad & León (2020), en la investigación, Evaluación estructural de un domo de acero de grandes luces con cobertura flexible en Paita, Piura; realizada en Perú, presenta la evaluación de un domo de grandes luces, con cargas de viento definidas por diferentes normas, concluyendo que, al utilizar los factores de forma de la norma E.020 se obtiene diferencias por exceso respecto de los factores que define el ASCE/SEI 7-16. Indicando que el comportamiento de las estructuras sometidas a cargas de viento de la norma ASCE representa una idealización más real.

2.1.3 Local

No se cuenta con antecedentes locales respecto del tema de investigación.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Coberturas en arco

2.2.1.1 Consideraciones generales

El tipo de estructura más utilizado, para proteger losas multiusos, se basa en pórticos de un solo nivel, formado crujías. Morales (2015) señala que: *«Las cubiertas más empleadas en las construcciones de naves con pórticos son: a dos aguas, curva y poligonal (...) Todas ellas están formadas por superficies más o menos regulares, inclinadas sobre la horizontal un ángulo tal que asegure la evacuación del agua»* (pág. 6)

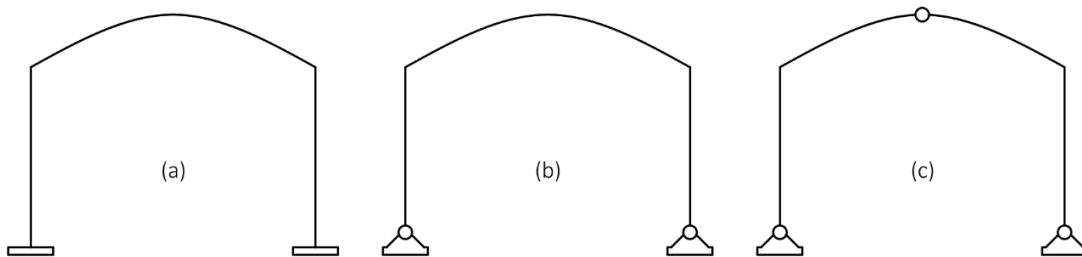
Tomado en consideración estos tipos de cubiertas, y la unidad de análisis, desarrollamos los conceptos relacionados con el diseño de coberturas en arco. Las cubiertas en arco, de aplicación más frecuente para proyectos arquitectónicos, que en construcciones industriales. (Morales Rodríguez, 2015, pág. 6)

Una de las características más importantes de este sistema, son los arcos, como indica Hibbeler (2020):

Al igual que los cables, los arcos pueden utilizarse para reducir los momentos flectores en estructuras de gran luz. En esencia, un arco actúa como un cable invertido, por lo que recibe su carga principalmente en compresión, aunque, debido a su rigidez, también debe resistir cierta flexión y esfuerzo cortante según su forma y carga. (pág. 220)

Figura 1

Tipo de base de pórticos en arco



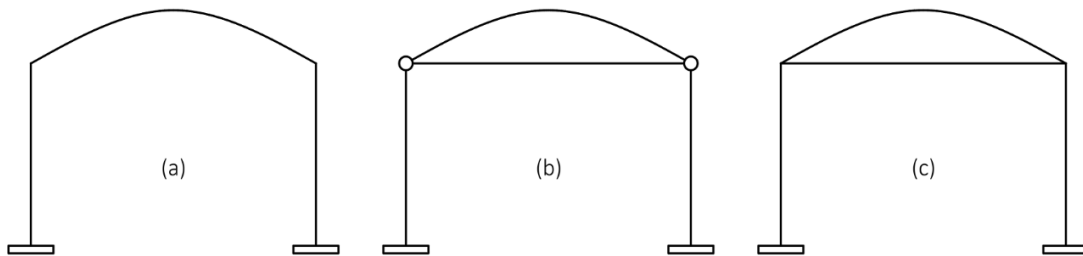
Nota. (a) Biempotrados, (b) biarticulados y (c) triarticulados; Adaptado de: Morales Rodríguez, 2015, Diseño Optimo De Pórticos Poligonales De Acero.

El modo como transmite las fuerzas que soporta a los elementos de cimentación, las características de los apoyos en la base de las columnas de los pórticos, define el comportamiento estructural de los pórticos, Morales (2015) indica tres tipos:

1. **Empotrada.** La solución empotrada en los arranques reduce los momentos máximos en la estructura metálica y de este modo consigue una mayor rigidez transversal del pórtico frente a las fuerzas horizontales.
2. **Biarticulada.** El pórtico biarticulado no presenta momento flector en la base, sin embargo, el momento máximo aparece en el nudo de esquina y los desplazamientos tanto verticales como horizontales son mayores al de los pórticos biempotrados, por lo cual necesita un mayor dimensionamiento de perfiles metálicos.
3. **Triarticulados.** En este tipo de pórtico los momentos máximos para cualquier carga son mayores que en los pórticos biarticulados, así como sus movimientos. Su principal ventaja es que muestran una influencia nula sobre las tensiones, las variaciones de temperaturas y los asentos diferenciales de los apoyos además de no requerir un predimensionamiento por tratarse de elementos isostáticos. (págs. 7, 8)

Figura 2

Pórticos atirantados



Nota. Adaptado de: Torroja Miret, 2010, Razón y ser de tipos estructurales.

1. El pórtico sin tirante de la figura (a), que sufriría fuertes flexiones, se convierte en un tranquilo arco atirantado sobre soportes (b), gracias a las articulaciones; y en un pórtico atirantado, sin ellas (c).

Cabe precisar que las articulaciones, pueden ser ubicadas en otras ubicaciones, como se muestra en la Figura 2; Torroja (2010) señala:

El pórtico, como el arco, puede ser empotrado o articulado, con una, dos o tres articulaciones, y puede llevar uno o varios tirantes para cortar las flexiones y acercar

el funicular a la directriz; si bien, en este caso, ya no puede hablarse de un pórtico simple, sino que se trata de una estructura más compleja. (págs. 102, 103)

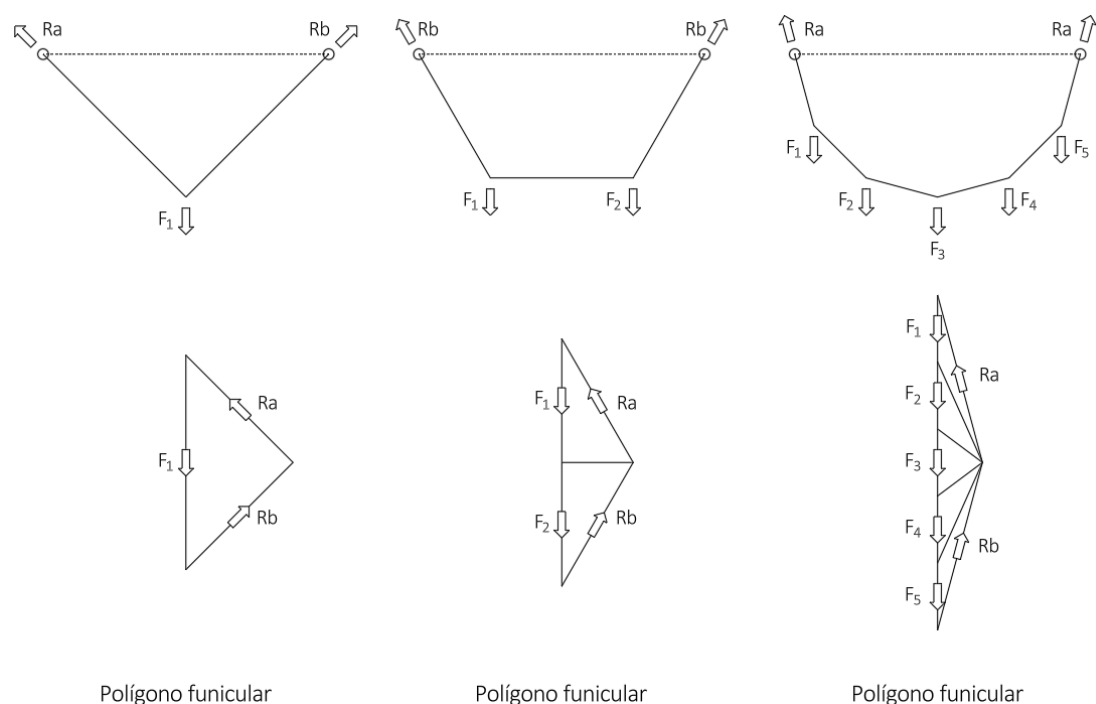
2.2.2 Diseño del arco

Como se ha indicado, por Hibbeler (2020) el comportamiento del arco es similar al de un cable invertido (pág. 221) al respecto, «*La idea es entender el funcionamiento de los arcos por analogía con los cables colgantes: en efecto el problema de equilibrio es idéntico. Se trata de una de las ideas más geniales de la historia del cálculo de estructuras*» (Huerta Fernández, El cálculo de estructuras en la obra de Gaudí, 2003, pág. 122)

Una de las características de los cables, al ser sometidos a cargas puntuales, es el cambio de forma, hacia la forma funicular, y el incremento de puntos de carga aproxima el polígono a una curva, si la carga es uniformemente distribuida, la curva resultante es una parábola. (Morales Rodríguez, 2015, pág. 13)

Figura 3

Polígonos funiculares



Nota. Adaptado de: Torroja Miret, 2010, Razón y ser de tipos estructurales.

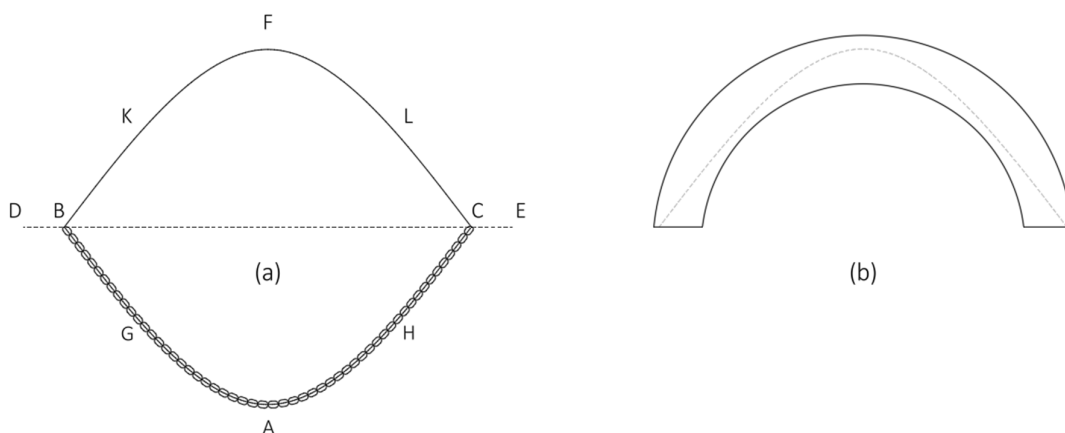
La afirmación de Robert Hooke, «estableciendo una analogía del equilibrio de cables con los arcos es el primer análisis de equilibrio y la imagen del cable colgante es un “gráfico”

de la transmisión de las fuerzas a lo largo del cable.» (Hooke, 1675, como se cita en Huerta, 2024, pág. 2)

Además, (Gregory, 1697, como se cita en Huerta, 2024, pág. 2) señala que: «sólo la catenaria es la forma de un verdadero y legítimo arco» añade de forma crucial «Y si arcos de otras formas se sostienen, es porque hay una catenaria dentro de su espesor.» (pág. 2)

Figura 4

Analogía de la cadena de Hooke



Nota. Adaptado de Gregory, 1697, como se cita en Huerta, 2024, El análisis gráfico de equilibrio de arcos, bóvedas y edificios. Un esquema de su desarrollo histórico

Con base a lo expresado por Hooke, para el arco en forma parabólica, «El análisis de los cables implica que solo resistirá fuerzas de compresión. En estas condiciones, el arco se denomina arco funicular porque no se producen fuerzas de flexión ni esfuerzo cortante en su interior.» (Hibbeler, 2020, pág. 220)

Para carga uniformemente repartida a lo largo de la cuerda, la directriz teórica es la parábola de segundo grado. (...) Cuando la sobrecarga móvil es fuerte respecto al peso propio, la forma de la directriz pierde importancia; y lo que se puede hacer es tantear los funiculares y leyes de tensiones máximas para elegir una directriz apropiada. (Torroja Miret, 2010, pág. 100)

Otra característica importante de los arcos, es la componente horizontal que se presenta en los apoyos, Torroja (2010), indica que:

Si la directriz siguiese exactamente el funicular de las cargas, la resultante, sobre el arranque del arco, seguiría la tangente a la directriz; por tanto, en el arranque

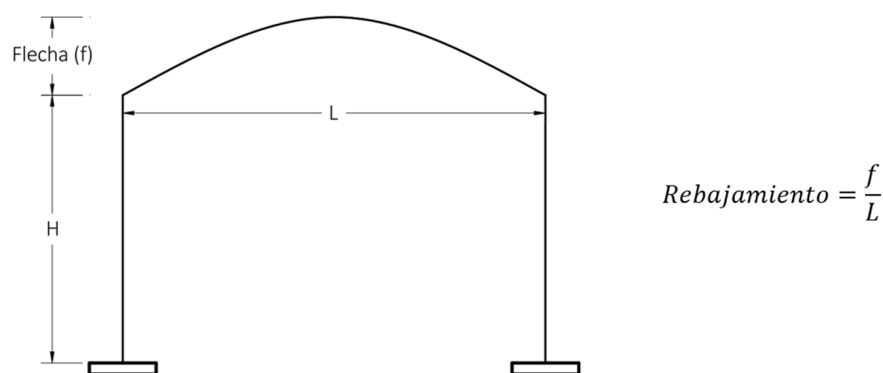
resulta tanto más tendida y, al mismo tiempo, tanto mayor cuanto más rebajado es el arco. (pág. 97),

Por lo que, la componente horizontal en los apoyos, es inversamente proporcional al rebajamiento, rebajamientos bajos, incrementa la flexión transversal por cargas de viento y disminuye el empuje den los apoyos, y para rebajamientos altos es mayor la compresión en el arco y mayor el empuje generado en los apoyos.

Con base a lo expresado, el diseño geométrico del arco, radica en la determinación del rebajamiento, el cual se define como la relación entre la flecha del arco y la distancia entre los apoyos.

Figura 5

Rebajamiento del arco



Nota. Adaptado de: Torroja Miret, 2010, Razón y ser de tipos estructurales.

Tomando en consideración, el comportamiento de arco, Torroja (2010), recomienda trabajar con rebajamientos de 1/5 a 1/7. Precizando que, rebajamientos menores o iguales a 1/10, aumentan los efectos tensionales retracción, deflexión excesiva y rebajamientos mayores a 1/4, el empuje en el apoyo disminuye y pierde interés el peraltado frente a los inconvenientes que lleva consigo, de pandeo lateral, etc. (pág. 101)

Regalado (2007) señala que los rebajamientos de 1/8 son los más satisfactorios visualmente, y los más eficaces los rebajamientos de 1/5, y señala que, los rebajamientos de 1/6, son los más razonables, aun cuando la armadura tenga que absorber momentos flectores (págs. 20, 21)

2.2.3 Presiones por cargas de viento norma ASCE 7-22

Consideraciones generales

De acuerdo al ASCE 7-22, para el diseño por cargas de viento, las estructuras se dividen en dos grupos, (MWFRS) el sistema principal que soporta las cargas generadas por el viento y (C&C) componentes y revestimientos del mismo

Las cargas de viento, para el MWFRS, se determinan, de acuerdo sección 26.1.2.1 utilizando los procedimientos siguientes:

1. Procedimiento Direccional, para edificios de todas las alturas, según lo especificado en el Capítulo 27.
2. Procedimiento de Envolvente, para edificios de baja altura, según lo especificado en el Capítulo 28.
3. Procedimiento Direccional, para accesorios de edificios (estructuras y equipos de azotea) y otras estructuras (como muros y letreros autoportantes sólidos, chimeneas, tanques, letreros abiertos, marcos abiertos de un solo plano y torres con cerchas), según lo especificado en el Capítulo 29.
4. Procedimiento de Túnel de Viento, para todos los edificios y demás estructuras. según lo especificado en el Capítulo 31. (pág. 261)

Cabe precisar que, considerando los objetivos de la investigación, el desarrollo de la tesis de investigación, se limita al MWFRS, y por la unidad de análisis con la aplicación de los capítulos 27 y 31, ergo, los conceptos desarrollados corresponden al método direccional, y túnel de viento, para coberturas en arco.

2.2.3.1 Parámetros básicos de carga de viento

2.2.3.1.1 Categoría de riesgo

La norma ASCE 7-22, no clasifica las estructuras con los mismos criterios que la norma E.020 (para las cargas de viento, ver 2.2.5), sino con una categoría de riesgo basada en el uso de la edificación o estructura, relacionado con el tipo de daño o falla por la aplicación de cargas de viento, sismo, etc. (tabla 1.5-1 de la norma ASCE 7-22), como se detalla en la Tabla 1.

Tabla 1

Categoría de riesgo de edificios y otras estructuras – norma ASCE 7-22

Uso u ocupación de edificios y estructuras	Categoría de riesgo
Edificios y otras estructuras que representan un riesgo bajo para la vida humana en caso de falla	I
Todos los edificios y otras estructuras excepto los enumerados en las categorías de riesgo I, III y IV	II
Edificios y otras estructuras, cuya falla podría representar un riesgo sustancial para la vida humana	III
Edificios y otras estructuras no incluidas en la categoría de riesgo IV, con el potencial de causar un impacto económico sustancial y/o una interrupción masiva de la vida civil cotidiana en caso de falla	
Edificios y otras estructuras no incluidas en la Categoría de Riesgo IV (incluidas, entre otras, las instalaciones que fabrican, procesan, manipulan, almacenan, utilizan o eliminan sustancias como combustibles peligrosos, productos químicos peligrosos, residuos peligrosos o explosivos) que contienen sustancias tóxicas o explosivas donde la cantidad de material excede una cantidad umbral establecida por la Autoridad Jurisdiccional y es suficiente para representar una amenaza para el público si se libera.	
Edificios y otras estructuras designadas como Instalaciones Esenciales	IV
Edificios y otras estructuras, cuya falla podría representar un peligro sustancial para la comunidad	
Edificios y otras estructuras (incluidas, entre otras, las instalaciones que fabrican, procesan, manipulan, almacenan, utilizan o eliminan sustancias como combustibles peligrosos, productos químicos peligrosos o residuos peligrosos) que contienen cantidades suficientes de sustancias altamente tóxicas donde la cantidad de material excede una cantidad umbral establecida por la Autoridad Jurisdiccional y es suficiente para representar una amenaza para el público si se libera	
Edificios y otras estructuras requeridas para mantener la funcionalidad de otras estructuras de la Categoría de riesgo IV	

Nota. Adaptado de la tabla 1.5-1, ASCE 7-22, pag. 5

2.2.3.1.2 Velocidad Básica del Viento (V)

De acuerdo a la norma ASCE 7 (2022), La velocidad básica de viento está definida por la velocidad máxima de ráfaga durante 3 s. a 10 metros sobre el nivel de terreno, en la categoría de exposición C (pág. 265)

Cabe precisar que, para los valores de la velocidad básica de viento mostrados en las figuras 26.5-1A, 26.5-1B, 26.5-1C y 26.5-1D, a probabilidad de excedencia de 15% en 50 años, para los valores mostrados (ASCE 7-22, 2022, págs. 266-273)

2.2.3.1.3 Factor de direccionalidad del viento (K_d)

Este factor explica dos efectos:

1. La probabilidad reducida de vientos máximos provenientes de cualquier dirección dada.
2. La probabilidad reducida de que el coeficiente de presión máxima se presente para cualquier dirección del viento dada. (American Society of Civil Engineers, 2022, pág. 265)

Por lo que, puede definirse como un factor adimensional, para reducir, considerando que la probabilidad de ocurrir un viento crítico, en la dirección más desfavorable de la edificación.

Tabla 2

Factor de direccionalidad del viento (K_d)

Tipo de estructura	Factor de direccionalidad (K_d)
Edificios	
Sistema principal que soporta las cargas generadas por el viento	0.85
componentes y revestimientos	0.85
Techos en arco	0.85
Cúpulas circulares	1.00*
Chimeneas, tanques y estructuras similares	
Cuadrada	0.90
Hexagonales	0.95
Octogonales	1.00*
Redondas	1.00*
Paredes sólidas independientes, equipos en el techo y letreros sólidos independientes y adheridos.	0.85
Letreros abiertos y marcos abiertos de un solo plano	0.85
Torres de celosía	
Triangulares, cuadradas o rectangulares	0.85
Todas las demás secciones transversales	0.85

*Se permitirá un factor de direccionalidad $K_d = 0.95$ para estructuras circulares u octogonales con sistemas estructurales no axisimétricos.

Nota. Adaptado de la tabla 26.6-1, ASCE 7-22, pag. 274

2.2.3.1.4 Factor de Exposición de Terreno

De acuerdo a la norma ASCE 7 (2022):

Para cada dirección del viento considerada, la exposición a barlovento, se basará en la rugosidad de la superficie del suelo, que se determina a partir de la topografía natural, la vegetación y las instalaciones construidas.

Para cada dirección del viento seleccionada en la que se determinarán las cargas de viento, la exposición del edificio o estructura se determinará para los dos sectores a barlovento que se extienden 45 grados a cada lado de la dirección de viento seleccionada. (pág. 274)

Con base a lo indicado, es necesario conocer la rugosidad de la superficie, que de acuerdo a la sección 26.7.2 se tiene:

1. **Rugosidad Superficial B.** Áreas urbanas y suburbanas, áreas boscosas u otros terrenos con numerosas obstrucciones poco espaciadas, del tamaño de viviendas unifamiliares o mayores.
2. **Rugosidad Superficial C.** Terreno abierto con obstrucciones dispersas, con alturas generalmente inferiores a 9.1 m. (30 pies). Esta categoría incluye terrenos llanos, abiertos y pastizales.
3. **Rugosidad Superficial D.** Áreas planas y sin obstrucciones, y superficies de agua. Esta categoría incluye marismas lisas, salares y hielo intacto. (pág. 274)

Las categorías de exposición, con base a la rugosidad superficial, la norma ASCE 7-22, considera:

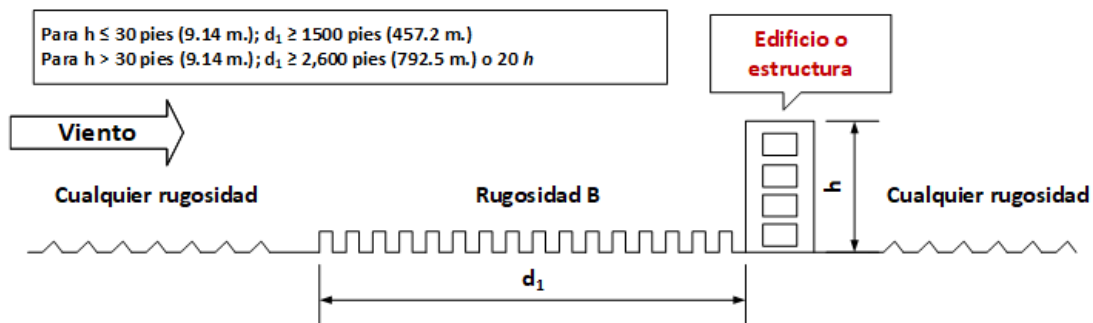
1. **Exposición B.** Para edificios u otras estructuras con altura media de techo menor o igual a 9.10 m. (30 pies), se aplicará cuando la rugosidad B, prevalezca en la dirección del viento durante una distancia mayor a 457 m. (1500 pies); Para edificios u otras estructuras con altura media de techo mayor a 9.10 m. (30 pies), se aplicará cuando la rugosidad B, prevalezca en la dirección del viento durante una distancia mayor a 792 m. (2600 pies) o 20 veces la altura del edificio o estructura, lo que sea mayor.
2. **Exposición C.** La exposición C se aplicará en todos los casos en que no se apliquen las exposiciones B o D.
3. **Exposición D.** La Exposición D se aplicará cuando la rugosidad superficial del terreno, definida como Rugosidad Superficial D, prevalezca en dirección del viento a una distancia superior a 1524 m (5000 pies) o 20 veces la altura del edificio o estructura, lo que sea mayor. La Exposición D también se aplicará cuando la rugosidad superficial del terreno inmediatamente a barlovento del sitio sea B o C, y el edificio o estructura se encuentre a una distancia de 183 m (600 pies) o 20 veces la altura del edificio o estructura, lo que sea mayor, de una condición de Exposición D, según se define en la oración anterior.

Para un edificio o estructura ubicado en la zona de transición entre categorías de exposición, se utilizará la categoría que genere las mayores fuerzas de viento.

4. **Excepciones.** Se permite una exposición intermedia entre las categorías anteriores en una zona de transición, siempre que se determine mediante un método de análisis racional definido en la literatura reconocida. (págs. 274, 275)

Figura 6

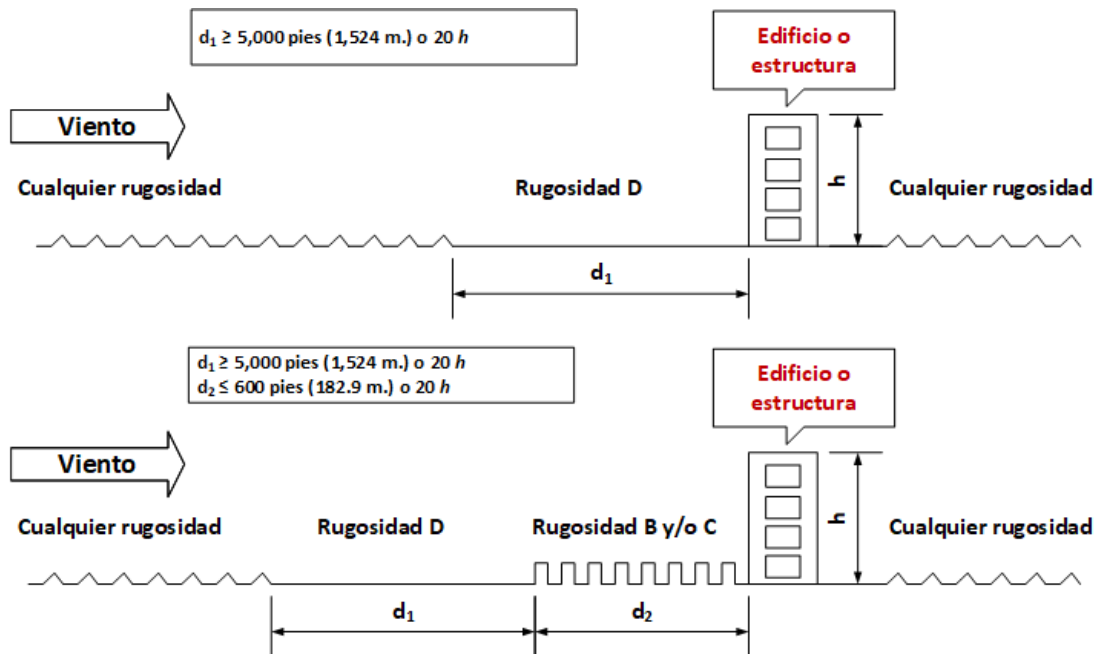
Casos de carga de viento – Norma ASCE 7-22



Nota. Tomado de la figura C26.7-1, Norma ASCE 7-22, pág. 871

Figura 7

Casos de carga de viento – Norma ASCE 7-22



Nota. Tomado de la figura C26.7-2, Norma ASCE 7-22, pág. 872

2.2.3.1.5 Factor topográfico (K_{zt})

La sección 26.8 de la norma indica que, la aceleración del viento en colinas, crestas o laderas, cambios abruptos en la topografía, en cualquier categoría de exposición, deben ser consideradas cuando:

1. El edificio o estructura se encuentra en la mitad superior de la colina, cresta o ladera.
2. $H/L_h \geq 0.2$
3. $H \geq 4.5 \text{ m}$. Para categorías de exposición C y D, o $H \geq 18 \text{ m}$. Para categoría de exposición B (pág. 275)

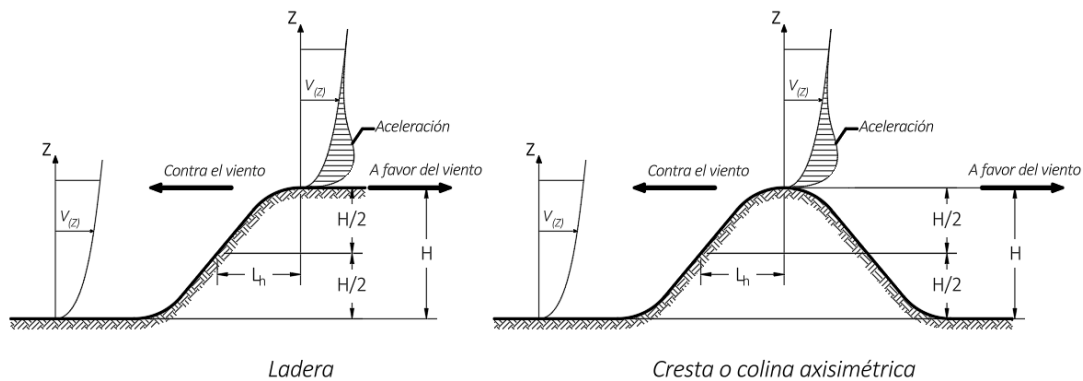
El factor topográfico, está determinado por, la expresión:

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

Donde: K_1 , K_2 y K_3 se presentan en la figura 26.8-1 de la norma ASCE 7-22, K_1 , K_2 y K_3 no deben ser menores que 0.

Figura 8

Factor topográfico – Norma ASCE 7-22



Donde:

H : Altura de la colina o escarpe con respecto al terreno a barlovento, pies (m);

K_1 : Factor que considera la forma del accidente topográfico y el efecto máximo de aceleración;

K_2 : Factor que considera la reducción de la aceleración con la distancia a barlovento o a sotavento de la cresta;

K_3 : Factor que considera la reducción de la aceleración con la altura sobre el terreno local;

L_h : Distancia a barlovento de la cresta hasta donde la diferencia en la elevación del terreno es la mitad de la altura de la colina o escarpe, pies (m);

X : Distancia (a barlovento o a sotavento) desde la cresta hasta el emplazamiento del edificio u otra estructura, pies (m);

z : Altura sobre la superficie del suelo en el emplazamiento del edificio u otra estructura, pies (m);

Nota: Adaptado de la figura C26.8-1, Norma ASCE 7-22, pág. 276

Tabla 3

Multiplicadores topográficos

$\frac{H}{L_h}$	Multiplicador K_1			$\frac{X}{L_h}$	Multiplicador K_2			$\frac{z}{L_h}$	Multiplicador K_3		
	2D Cresta	2D Ladera	3D Colina Axisimétrica		2D Ladera	Los demás casos			2D Cresta	2D Ladera	3D Colina Axisimétrica
0.20	0.29	0.17	0.21	0.00	1.00	1.00		0.00	1.00	1.00	1.00
0.25	0.36	0.21	0.26	0.50	0.88	0.67		0.10	0.74	0.78	0.67
0.30	0.43	0.26	0.32	1.00	0.75	0.33		0.20	0.55	0.61	0.45
0.35	0.51	0.30	0.37	1.50	0.63	0.00		0.30	0.41	0.47	0.30
0.40	0.58	0.34	0.42	2.00	0.50	0.00		0.40	0.30	0.37	0.20
0.45	0.65	0.38	0.47	2.50	0.38	0.00		0.50	0.22	0.29	0.14
0.50	0.72	0.43	0.53	3.00	0.25	0.00		0.60	0.17	0.22	0.09
				3.50	0.13	0.00		0.70	0.12	0.17	0.06
				4.00	0.00	0.00		0.80	0.09	0.14	0.04
								0.90	0.07	0.11	0.03
								1.00	0.05	0.08	0.02
								1.50	0.01	0.02	0.00
								2.00	0.00	0.00	0.00

1. Para valores de $\frac{H}{L_h}$, $\frac{X}{L_h}$ y $\frac{z}{L_h}$ diferentes a los mostrados se permite interpolar linealmente.
2. Para valores de $\frac{H}{L_h} > 0.5$, suponer que $\frac{H}{L_h} = 0.5$, para evaluar K_1 y sustituya $2H$ por L_h para evaluar K_2 y K_3 en las ecuaciones de la figura 26.8-1 de la norma ASCE 7-22
3. Los multiplicadores se basan en el supuesto de que el viento se aproxima a la colina o ladera a lo largo de la dirección de pendiente máxima.
4. Se deben utilizar multiplicadores para cualquier exposición

Nota. Tomado de la figura C26.8-1, Norma ASCE 7-22, pág. 276

2.2.3.1.6 Factor de elevación del terreno (K_e)

De acuerdo a la sección 26.9 de la norma, se interpreta como un factor de reducción, para ajustar la densidad del aire, cabe precisar que la norma, permite tomar un valor de $K_e = 1$ para todas las elevaciones. (pág. 275), ver Tabla 4.

2.2.3.1.7 Coeficiente de exposición a la presión de velocidad (K_z ó K_h)

El coeficiente de exposición, indicado en la tabla 26.10-1 de la norma ASCE 7-22, es un factor que toma en consideración la variación de la velocidad desde en la dirección vertical, considerando la categoría de exposición.

El coeficiente (K_z ó K_h) puede determinarse aplicando las siguientes ecuaciones:

Para $z < 4.6$ m.

$$K_z = 2.41 \left(4.6/z_g \right)^{2/\alpha}$$

Para $4.6 \text{ m.} \leq z \leq z_g$

$$K_z = 2.41 \left(z/z_g \right)^{2/\alpha}$$

Para $z_g \leq z \leq 1,000$ m.

$$K_z = 2.41$$

Donde: z_g y α se obtiene de la Tabla 5 (Tabla 26.11-1)

Tabla 4

Factor de elevación del terreno (K_e)

Elevación del terreno sobre el nivel del mar		Factor de elevación del terreno (K_e)
Pies	m.	
< 0	< 0	Ver nota 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	Ver nota 2

1. Se permite la aproximación conservadora de $K_e = 1.00$ en todos los casos
2. El factor K_e se determinará por interpolación de la tabla 26.9-1 de la norma ASCE 7-22 o la siguiente fórmula para todas las elevaciones:

$$K_e = e^{-0.000362z_e} \text{ (} z_e = \text{elevación del suelo sobre el nivel del mar en pies.)}$$

$$K_e = e^{-0.000119z_e} \text{ (} z_e = \text{elevación del suelo sobre el nivel del mar en m.)}$$
3. Se permite tomar K_e como 1.00 en todos los casos

Nota. Adaptado de la tabla 26.9-1, ASCE 7-22, pág. 275

Tabla 5

Constantes de exposición del terreno

Categoría de exposición	α	z_g	$\hat{\alpha}$	$\hat{b}$	$\bar{\alpha}$	$\bar{b}$	c	l	$\bar{\epsilon}$	Z_{min}
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

Nota. Unidades en metros, tomado de la tabla 26.11-1, ASCE 7-22, pág. 278

2.2.3.1.8 Factor de efecto de ráfaga (G)

El factor de ráfaga, se define como: «la relación entre la velocidad máxima de ráfaga de viento y la velocidad media horizontal.» (Suomi & Vihma, 2018, pág. 5) se determina conforme la sección 26.11 de la norma ASCE 7-22.

Becerra (2022) señala que: la diferencia de estructuras rígidas y flexibles, es la frecuencia natural de 1 Hz. (o el Periodo fundamental de 1 s.) (pág. 106); Para estructuras rígidas, de acuerdo al ASCE 7-22 se puede considerar el valor de 0.85, o determinar aplicando la expresión siguiente:

$$G_f = 0.925 \left(\frac{1 + 1.7g_Q I_z Q}{1 + 1.7g_v I_z} \right)$$
$$I_z = c \left(\frac{10}{\bar{z}} \right)^{1/6}$$

Donde: I_z es la intensidad de turbulencia a la altura $\bar{z}$; $\bar{z}$ es la altura equivalente definida como $0.6h$ pero no menor que z_{min} ; g_Q y g_v son factores de pico de entorno, y sus valores deben ser iguales a 3.4; c y z_{min} se obtiene de la tabla se obtiene de la Tabla 5 (Tabla 26.11-1)

$$Q = \sqrt{\frac{1}{1 + 0.63 \left(\frac{B + h}{L_z} \right)^{0.63}}}$$

Donde: B es la medida horizontal perpendicular a la dirección del viento de la edificación; h es la altura de la edificación y L_z se define como la longitud integral de turbulencia a la altura $\bar{z}$, y se determina con la expresión siguiente:

$$L_z = l \left(\frac{\bar{z}}{10} \right)^{\bar{\epsilon}}$$

l y $\bar{\epsilon}$ se obtiene de la tabla se obtiene de la Tabla 5 (Tabla 26.11-1)

Para estructuras flexibles, se aplica el procedimiento indicado en la sección 26.11-5, usando la ecuación siguiente:

$$G_f = 0.925 \left(\frac{1 + 1.7I_{\bar{z}} \sqrt{g_Q^2 Q^2 + g_R^2 R^2}}{1 + 1.7g_v I_{\bar{z}}} \right)$$

Donde: g_Q y g_v son factores de pico de entorno, y sus valores deben ser iguales a 3.4, y g_R (Factor pico de resonancia) se determina con la siguiente expresión:

$$g_R = \sqrt{2 \ln(3,600n_1)} + \frac{0.577}{\sqrt{2 \ln(3,600n_1)}}$$

Q y $I_{\bar{z}}$ se determina con las expresiones aplicables a estructuras rígidas; y el factor de respuesta de resonancia es:

$$R = \sqrt{\frac{1}{\beta} R_n R_h R_B (0.53 + 0.47 R_L)}$$

Donde n_1 es la frecuencia natural fundamental y β es la fracción de amortiguamiento crítico.

Con respecto a la fracción de amortiguamiento crítico, Becerra (2022) indica:

De acuerdo al estándar, para aplicaciones de análisis por viento en Estados Unidos, β toma valores de 1% y 2% para estructuras de acero y concreto respectivamente, en niveles de servicio. Para diseño por resistencia β valores de 2.5% y 3% son comúnmente usados. (pág. 108)

En la norma ASCE 7 (2022) se hace la precisión siguiente:

Los niveles de amortiguamiento utilizados en aplicaciones de carga de viento son menores que las razones de amortiguamiento del 5% comunes en aplicaciones sísmicas porque los edificios sometidos a cargas de viento responden esencialmente de forma elástica, mientras, que los edificios sometidos a terremotos a nivel de diseño responden de forma inelástica a niveles de amortiguamiento más altos. (pág. 285)

Además, R_n (densidad espectral de potencia de la turbulencia a una altura equivalente $\bar{z}$, evaluada para la frecuencia natural reducida de la estructura N_1

$$R_n = \frac{7.47N_1}{(1 + 10.3N_1)^{5/3}}$$

$$N_1 = \frac{n_1 L \bar{z}}{\bar{V}_z}$$

Donde Los factores de efecto de tamaño (R_h, R_B, R_L) relacionados con la altura, ancho y longitud; y (n_h, n_B, n_L) son de coherencia (correlación) evaluados a la frecuencia natural reducida

Tabla 6

Factores de efecto de tamaño y de coherencia

Factores de efecto de tamaño	Factores de coherencia (correlación)
$R_h = \frac{1}{n_h} - \frac{1}{2n_h^2} (1 - e^{-2n_h})$	$n_h = 4.6n_1 \frac{h}{\bar{V}_z}$
$R_B = \frac{1}{n_B} - \frac{1}{2n_B^2} (1 - e^{-2n_B})$	$n_B = 4.6n_1 \frac{B}{\bar{V}_z}$
$R_L = \frac{1}{n_L} - \frac{1}{2n_L^2} (1 - e^{-2n_L})$	$n_L = 4.6n_1 \frac{L}{\bar{V}_z}$

Donde la velocidad media horaria del viento (m/s.) a la altura equivalente de la estructura $\bar{z}$ es:

$$\bar{V} = \bar{b} \left(\frac{\bar{z}}{10} \right)^{\bar{\alpha}} V$$

Donde $\bar{b}$ y $\bar{\alpha}$ son constantes enumeradas en la Tabla 5 (Tabla 26.11-1 de la norma ASCE 7-22)

2.2.3.1.9 Clasificación de los recintos

La clasificación de los recintos, está asociada a la determinación de los coeficientes de presión interna GC_{pi} , en la sección 26.12, se clasifica en: edificios cerrados; edificios parcialmente cerrados; edificios parcialmente abiertos; edificios abiertos. (pág. 279), de acuerdo a las normas ASCE 7 (2022), se tiene las siguientes características:

1. **Edificio cerrado.** Un edificio que tiene un área total de aberturas en cada pared que recibe presión externa positiva menor o igual a 0.37 m^2 (4 pies²) o al 1% del área de esa pared, lo que sea menor. Esta condición se expresa para cada pared mediante la siguiente ecuación:

$$A_o < 0.01 A_g \text{ ó } 4 \text{ pies}^2 (0.37 \text{ m}^2) \quad (\text{Lo que sea menor})$$

2. **Edificio abierto.** Edificio que tiene cada pared al menos el 80% abierto, se expresa con la siguiente ecuación:

$$A_o \geq 0.80 A_g$$

Donde, A_o es el área total de las aberturas en una pared que recibe la presión externa positiva y A_g es el área bruta de la pared donde se identifica A_o

3. **Edificio parcialmente cerrado.** Edificio que cumple con las dos condiciones siguientes:

- El área total de las aberturas en un muro sometido a presión externa positiva supera la suma de las áreas de las aberturas en el resto de la envolvente del edificio (muros y techo) en más del 10 %.
- El área total de las aberturas en un muro sometido a presión externa positiva supera los 0.37 m^2 (4 pies^2) o el 1 % del área de dicho muro, lo que sea menor, y el porcentaje de aberturas en el resto de la envolvente del edificio no supera el 20 %.

$$A_o > 1.10 A_{oi}$$

$$A_o > 4 \text{ pies}^2 (0.37 \text{ m}^2) \text{ ó } > 0.01 A_g, \text{ lo que sea menor, y } A_{oi}/A_{gi} \leq 0.20$$

Donde, A_{oi} es la suma de las áreas de las aberturas en la envolvente del edificio (paredes y techo), sin incluir A_o y A_{gi} es la suma de las áreas de superficie brutas de la envolvente del edificio (paredes y techo), sin incluir A_g

4. **Edificio parcialmente abierto.** Edificio que no cumple con los requisitos para edificios abiertos, parcialmente cerrados o cerrados. (págs. 261, 262)

2.2.3.1.10 Coeficiente de presión externa C_{pe}

El coeficiente de presión, de acuerdo a Piña (2021), se define como:

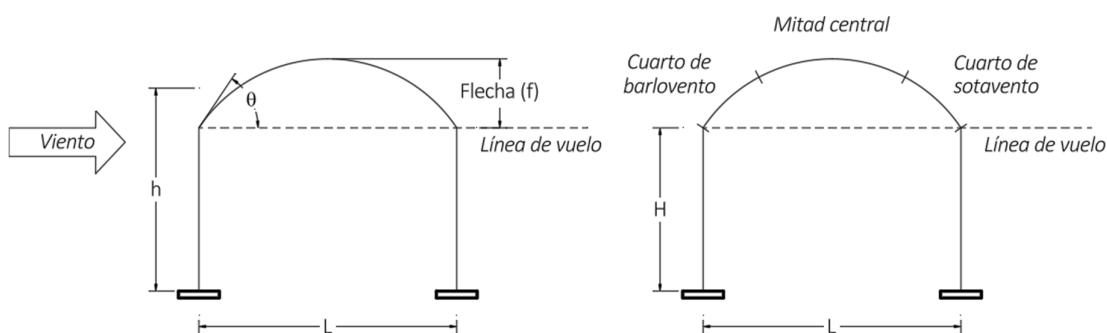
La relación de la presión actuante sobre la construcción o sobre una de sus superficies, con la presión dinámica base, para una altura dada. Este coeficiente determina el efecto de la variación de la presión, según la geometría o forma de

construcción, así como la intensidad de la velocidad y la turbulencia del flujo del viento. (pág. 28)

El coeficiente de presión externa, para el método direccional, se obtiene de las figuras 27.3-1 a 27.3-8; cabe precisar que, para el viento en la dirección paralela, haremos uso de la figura 27.3-1 de la norma ASCE 7-22

Figura 9

Diagrama para determinar C_{pe} para techos en arco



Nota. Adaptado de la figura 30.3-8, ASCE 7-22, pág. 322

Donde:

- L : Dimensión horizontal del edificio, en pies (m), medida perpendicularmente a la cumbrera;
- r : Relación flecha – luz = f/L ;
- h : Altura del tejado, según se define en el Capítulo 26 de la norma ASCE 7-22 para un ángulo de tejado θ ;
- θ : Ángulo del plano del tejado con respecto a la horizontal, en grados, medido en el alero;

2.2.3.1.11 Coeficiente de presión interna (GC_{pi})

El coeficiente de presión interna, se determina con base a la clasificación del cerramiento, de acuerdo a la tabla 26.13-1 de la norma ASCE 7-22.

2.2.3.2 Procedimiento general de análisis por cargas de viento

La norma ASCE 7-22, establece un esquema para el diseño de cargas de viento, para los MWFRS y C&C, considerando los tres métodos que se desarrolla en la referida norma, Método direccional, de la envolvente y túnel de viento.

Tabla 7

Coeficiente de presión externa para techos en arco (C_{pe})

Condiciones	Coeficiente de presión externa C_{pe}			
	Relación altura – luz (r)	Cuarto de barlovento	Mitad central	Cuarto de sotavento
Techo sobre estructura elevada	$0 < r < 0.2$	-0.9	$-0.7 - r$	-0.5
	$0.2 \leq r < 0.3$	$1.5 r - 0.3$	$-0.7 - r$	-0.5
		$6 r - 2.1$		
	$0.3 \leq r \leq 0.6$	$2.75 r - 0.7$	$-0.7 - r$	-0.5
Techo que arranca sobre el nivel del suelo	$0 < r \leq 0.6$	$1.4 r$	$-0.7 - r$	-0.5

1. Los valores indicados sirven para determinar las cargas promedio en los sistemas principales de resistencia a la fuerza del viento.
2. Los signos más y menos indican las presiones que actúan hacia y desde las superficies, respectivamente.
3. Para vientos con dirección paralela al eje de las cubiertas arqueadas, utilice los coeficientes de presión de la Figura 27.3-1, con el viento con dirección paralela a la cumbrera.
4. Cuando se indican dos valores de C_{pe} , la cubierta está sujeta a presiones positivas o negativas, y la estructura de la cubierta debe diseñarse para ambas condiciones

Notas. Adaptado de la figura 27.3-1, ASCE 7-22, pág. 286

Tabla 8

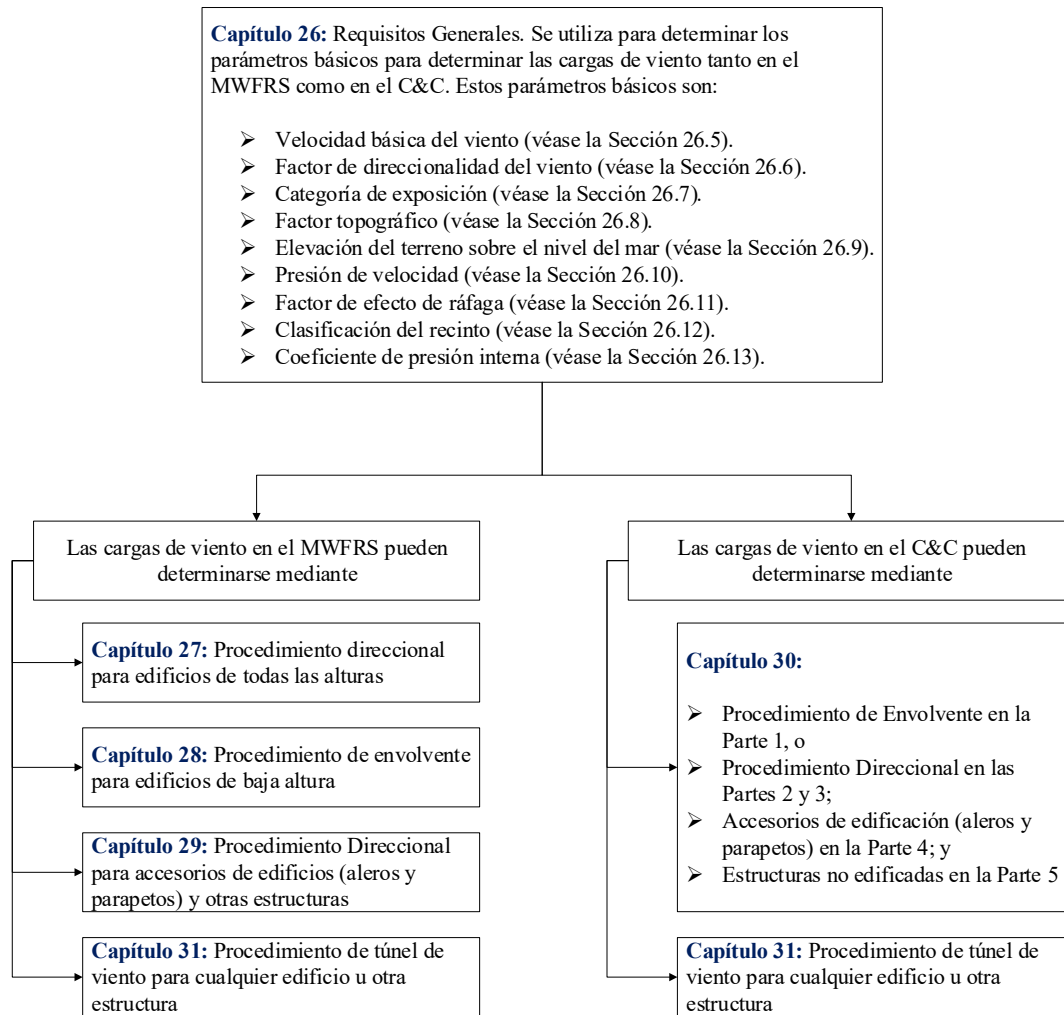
Coeficiente de presión interna (GC_{pi})

Clasificación de recintos	Criterios de clasificación de recintos	Presión interna	Coeficiente de presión interna (GC_{pi})
Edificios cerrados	$A_o < 0.01 A_g$ ó $4 \text{ pies}^2 (0.37 \text{ m}^2)$	Moderado	$+ 0.18$
	$A_{oi}/A_{gi} \leq 0.20$		$- 0.18$
Edificios parcialmente cerrados	$A_o > 1.10 A_{oi}$	Alto	$+ 0.55$
	$A_o > 4 \text{ pies}^2 (0.37 \text{ m}^2)$ ó $> 0.01 A_g$, lo que sea menor, y $A_{oi}/A_{gi} \leq 0.20$		$- 0.55$
Edificios parcialmente abiertos	Un edificio que no cumple con las clasificaciones de cerrado, parcialmente cerrado o abierto	Moderado	$+ 0.18$
			$- 0.18$
Edificios abiertos	Cada pared está abierta al menos en un 80%	Insignificante	0.00

1. Los signos más y menos indican las presiones que actúan hacia y desde las superficies internas, respectivamente.
2. Los valores de GC_{pi} se utilizarán con q_z o q_h , según se especifique.
3. Se considerarán dos casos para determinar los requisitos de carga crítica para la condición apropiada.
 - a. Un valor positivo de GC_{pi} aplicado a todas las superficies internas.
 - b. Un valor negativo de GC_{pi} aplicado a todas las superficies interna.

Nota. Adaptado de la tabla 26.13-1, ASCE 7-22, pág. 280

Figura 10. Procedimiento general de análisis por carga de viento



Notas. Adaptado de figura 26.1-1, ASCE 7-22, pag. 262

2.2.3.2.1 Procedimiento direccional

En este procedimiento, las cargas de viento para direcciones específicas, se determinan con bases a modelos prototipos ensayados en túnel de viento para determinar los coeficientes de presión externa para la dirección del viento correspondiente. (ASCE 7-22, 2022, pág. 263)

Este procedimiento direccional, es aplicable para la determinación de cargas de viento del MWFRS, de acuerdo a la norma ASCE 7-22, en edificaciones cerradas, parcialmente cerrados, parcialmente abiertos y abiertos de todas las alturas, en las que sea necesario separar las cargas de viento aplicadas en barlovento, sotavento y cerramientos laterales para evaluar las fuerzas internas en los elementos del MWFRS. (pág. 281)

Para la aplicación del procedimiento direccional, es importante cumplir con las condiciones que establece la norma ASCE 7-22.

- Edificios de forma regular, conforme la sección 26.2
- El edificio no tiene características de respuesta que lo hagan sujeto a cargas transversales del viento, desprendimiento de vórtices o inestabilidad causada por galope o vibración
- La edificación no tiene una ubicación en el sitio para la cual los efectos de canalización o sacudidas, a raíz de obstrucciones en contra del viento, justifiquen una consideración especial. (pág. 281)

De acuerdo a la sección 26.2, de la norma ASCE 7-22, se tiene los tipos de edificaciones siguientes:

1. Edificio elevado. Edificio sostenido por elementos estructurales, por donde el viento puede pasar por debajo.
2. Edificio de baja altura. Edificio cerrado, parcialmente cerrado o parcialmente abierto que cumple con las siguientes condiciones:
 - Altura media del tejado h menor o igual a 18 m. (60 pies)
 - Altura media del tejado h no excede la dimensión horizontal mínima
3. Edificio torsionalmente regular bajo cargas de viento. Edificio con la MWFRS respecto a cada eje principal proporcionada de modo que el desplazamiento máximo en cada piso, según el Caso 2 (caso de carga de viento torsional) de la Figura 11(Figura 27.3-8), no exceda el desplazamiento máximo en la misma ubicación según el Caso 1 de la Figura 11(Figura 27.3-8 (caso básico de carga de viento)).
4. Edificio u otra estructura flexible. Edificios esbeltos y otras estructuras con una frecuencia natural fundamental inferior a 1 Hz.
5. Edificio u otra estructura de forma regular. Edificio u otra estructura que no presenta irregularidades geométricas inusuales en su forma espacial.

6. Edificio u otra estructura rígida. Edificio u otra estructura cuya frecuencia fundamental es mayor o igual a 1 Hz. (págs. 261-263)

El procedimiento direccional, «...consideran el efecto de amplificación de carga causado por ráfagas de viento, en resonancia con las vibraciones longitudinales del viento en edificios flexibles» (ASCE 7-22, 2022, pág. 281)

Tomando en consideración, la definición de edificios o estructuras regulares, Stafford & Reinhold (2023), hacen la precisión siguiente:

Irregularidades geométricas inusuales en su forma espacial, es vaga, especialmente a la luz de los diseños arquitectónicos modernos. Lo que hay que recordar es que las disposiciones sobre carga de viento del Capítulo 27 del MWFRS prescriben cargas longitudinales del viento perpendiculares a las caras principales del edificio.

El desarrollo de estas disposiciones se basa en datos acumulados de pruebas en túneles de viento con vientos perpendiculares a las caras de edificios de planta rectangular con dimensiones de planta relativamente uniformes en toda su altura. Para formas de sección transversal con esquinas biseladas o escalonadas, la carga longitudinal del viento se puede estimar de forma conservadora utilizando el área proyectada del edificio para la dirección que se esté considerando o circunscribiendo el plano del edificio con un rectángulo y utilizando las dimensiones de ese rectángulo para calcular las cargas longitudinales del viento para las direcciones principales perpendiculares a las caras del rectángulo. (pág. 36)

Las edificaciones que no cumplan con las condiciones de la sección 27.1.2 de la norma ASCE 7-22, se aplicará, de acuerdo a American Society of Civil Engineers (2022) lo siguiente:

- Se diseñarán utilizando literatura reconocida, documentando dichos efectos de carga de viento.
- Procedimiento de túnel de viento (pág. 281)

Además, en la sección 27.1.4, se establece que: «No deberá haber reducciones en la presión de velocidad causadas por el aparente blindaje proporcionado por edificios y otras estructuras o características del terreno.» (pág. 281)

Tabla 9

Pasos para determinar las cargas de viento - método direccional

Pasos para determinar las cargas de viento MWFRS para edificios cerrados, parcialmente cerrados, parcialmente abiertos y abiertos de todas las alturas
1. Paso 1: Determinar la categoría de riesgo del edificio; Table 1.5-1. 2. Paso 2: Determinar la velocidad básica del viento, V, para la categoría de riesgo aplicable; Figura 26.5-1. 3. Paso 3: Determinar los parámetros de carga de viento: • Factor de direccionalidad del viento (Sección 26.6 and Table 26.6-1) • Categoría de exposición (Sección 26.7) • Factor topográfico (Sección 26.8 and table in Figura 26.8-1) • Factor de elevación del terreno (Sección 26.9) • Factor de efecto de ráfaga (Sección 26.11) • Clasificación de los recintos (Sección 26.12) • Coeficiente de presión interna, (GC_{pi}); (Sección 26.13 and Table 26.13-1) 4. Paso 4: Determinar el coeficiente de exposición a la presión de velocidad (Table 26.10-1) 5. Paso 5: Determine la presión de velocidad q_z o q_h 6. Paso 6: Determine el coeficiente de presión externa 7. Paso 7: Calcule la presión del viento, en cada superficie del edificio. 8. Paso 8: Evalúe los casos de carga de viento de diseño según la Sección 27.3.5 y la Figura 27.3-8.

2.2.3.2.2 Procedimiento de envolvente

En este procedimiento, los modelos prototipos ensayados en túnel de viento, son rotados sucesivamente 360° para obtener envolventes de acciones estructurales (cortantes, momentos flectores, etc.) en todas las direcciones de viento posible. para obtener los coeficientes de presión pseudo externa. (ASCE 7-22, 2022, pág. 263)

Este procedimiento, de acuerdo a la Figura 13, es aplicable a edificaciones de baja altura, como se define en la sección 26.2 de la norma ASCE 7-22. Las edificaciones de baja altura, sin embargo, para la aplicación de este procedimiento, es importante cumplir con las condiciones que establece la American Society of Civil Engineers.

- Edificios de forma regular, conforme la sección 26.2
- El edificio no tiene características de respuesta que lo hagan sujeto a cargas transversales del viento, desprendimiento de vórtices o inestabilidad causada por galope o vibración

- La edificación no tiene una ubicación en el sitio para la cual los efectos de canalización o sacudidas, a raíz de obstrucciones en contra del viento, justifiquen una consideración especial.
- El edificio no tiene un techo arqueado, de barril o con una forma inusual (pág. 281)

Las edificaciones que no cumplan con las condiciones de la sección 28.1.2, se aplicará, de acuerdo a American Society of Civil Engineers (2022) lo siguiente:

- Utilizando procedimientos adecuados del capítulo 27 (Procedimiento direccional)
- Se diseñarán utilizando literatura reconocida, documentando dichos efectos de carga de viento.
- Procedimiento de túnel de viento (pág. 281)

Además, cabe precisar que, al igual que para el procedimiento direccional, no hay reducción de presiones causadas por blindaje.

2.2.3.2.3 Procedimiento de túnel de viento

De acuerdo al estándar ASCE 7-22, cuando los procedimientos indicados en los capítulos 27, 28, 29 y 30 se consideren inciertos, o se requiriera presiones de viento precisas, se debe considerar el procedimiento de túnel de viento, en el caso de procedimientos numéricos, los resultados deben ser verificados, y validados mediante con túnel de viento físico, conforme a la norma ASCE 49 (pág. 351)

Cabe precisar que el estándar establece limitaciones en las cargas principales totales para el MWFRS, las cuales no pueden ser menores del 80%, en el caso de estructuras flexibles, la carga principal total es el momento de vuelco, y en caso de estructuras rígidas el cortante basal. El cual puede ser reducido al 50% para el MWFRS y al 65% para C&C si se cumple las condiciones siguientes:

- No hubo edificios u objetos influyentes específicos dentro del modelo detallado de proximidad.

- Las cargas y presiones de pruebas suplementarias para todas las direcciones de viento significativas en las que edificios u objetos influyentes específicos se reemplazan por una rugosidad representativa de la condición de rugosidad adyacente, pero no más rugosa que la Exposición B, se incluyen en los resultados de las pruebas (págs. 351, 352)

2.2.4 Cargas de viento método direccional norma ASCE 7-22

2.2.4.1 Cargas mínimas de diseño

El estándar establece una carga mínima por cargas de viento, aplicable al MWFRS de las edificaciones cerradas y parcialmente cerradas, de 0.77 kN/m^2 multiplicado por el área de la pared del edificio y de 0.38 kN/m^2 multiplicada por A_f (área del techo proyectada sobre un plano vertical, normal a la dirección del viento); y de 0.77 kN/m^2 multiplicado por A_f . (pág. 281)

2.2.4.2 Presión de velocidad

Conocida como presión dinámica del viento, se define como: «*La presión que ejerce el flujo del viento sobre una superficie plana perpendicular a él*» (Piña Gutiérrez, 2021, pág. 23); Stafford & Reinhold (2023), indican que las presiones de velocidad dependen de:

- La velocidad básica del viento de diseño para la categoría de riesgo asociada con el edificio o la estructura.
- Rugosidad del terreno circundante, incluida la topografía.
- Altura sobre el suelo requerida por el procedimiento analítico.
- Elevación del sitio con respecto al nivel del mar. (pág. 20)

Y de acuerdo al estándar, se determina con la expresión siguiente:

$$q_z = 0.613 K_z K_{zt} K_e V^2 \text{ en N/m}^2 \quad V \text{ (en m/s.)}$$

Donde:

K_z : Coeficiente de exposición a la presión de velocidad

K_{zt} : Factor topográfico

K_e : Facto de elevación
 V : Velocidad básica del viento
 q_z : Presión de velocidad a la altura z

2.2.4.3 Presión del viento

Las presiones o cargas de viento, para el método direccional, se determinan aplicando la ecuación 27.3-1 de la norma ASCE 7-22:

$$p = qK_dGC_p - q_iK_dGC_{pi}$$

Donde:

q : Presión de velocidad
 K_d : Facto de direccionalidad del viento
 G : Coeficiente de ráfaga
 C_p : Coeficiente de presión externa
 (GC_{pi}) : Coeficiente de presión interna

2.2.4.4 Casos de carga de viento

Para el método direccional, los casos de carga se definen en la Figura 11 (Figura 27.3-8 del estándar), de acuerdo a la norma ASCE 7-22, se presenta 4 casos de carga de viento para el diseño de los sistemas resistentes a cargas viento (MWFRS)

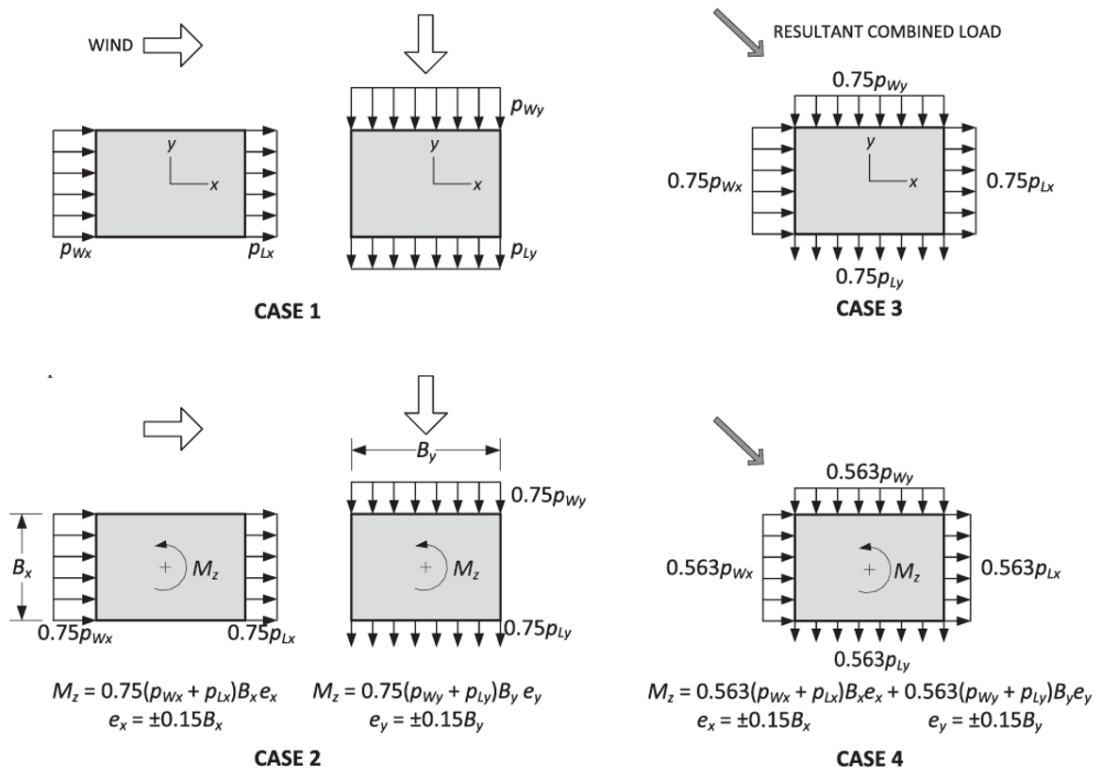
- Caso 01. Presión de diseño total sobre el área proyectada del muro perpendicular a cada eje principal de la estructura, considerada por separado a lo largo de cada eje principal. Presión de diseño total sobre los muros laterales y las áreas del techo para el viento a lo largo de cada eje principal, como se especifica en las Figuras 27.3-1 a 27.3-7. Todas las presiones actúan simultáneamente para cada dirección principal del viento.
- Caso 02. Tres cuartas partes de la presión de viento de diseño sobre el área proyectada del muro perpendicular a cada eje principal de la estructura y los muros laterales, junto con un momento torsional, considerado por separado a lo largo de cada dirección principal. Las presiones del techo son el 75 % del Caso 1. Todas las presiones y la torsión actúan simultáneamente para cada dirección principal del viento.

- Caso 03. Las presiones de pared son el 75 % del Caso 1. Para las presiones de cubierta, véase la Nota 2. Todas las presiones actúan simultáneamente.
- Caso 04. Las presiones de cubierta y el momento torsional son el 75 % del Caso 2 (las presiones de cubierta son el 56,3 % del Caso 1). Para presiones de cubierta, véase la Nota 2. Todas las presiones y la torsión actúan simultáneamente. (pág. 291)

Los edificios que cumplen los requisitos de la sección D.1 del apéndice D del ASCE 7-22, solo necesitan diseñarse para el caso 1 y caso 3

Figura 11

Casos de carga de viento – Norma ASCE 7-22



1. La figura muestra vistas en planta de los edificios.
2. Para mayor claridad, no se muestran las presiones sobre la cubierta. Para los Casos 3 y 4, la presión resultante sobre cualquier área de la cubierta definida por las dos direcciones principales del viento de los Casos 1 y 2 será el 100 % del valor mayor de las presiones sobre la cubierta definidas para los Casos 1 y 2, respectivamente.
3. Para mayor claridad, no se muestran las presiones sobre las paredes laterales de los Casos 1 y 2 y no es necesario considerarlas en pisos con diafragmas rígidos continuos con las paredes laterales.
4. M_z se aplicará en diafragmas rígidos. En pisos con diafragmas semirrígidos o flexibles, o sin diafragmas, se permitirá aplicar M_z utilizando un bloque de presión distribuido equivalente en todos los muros que reciben la presión normal del viento, aplicado en la proporción especificada para cada muro en la Figura 27.3-1, o utilizando otros métodos racionales.

Nota: Adaptado de la figura 27.3-8, Norma ASCE 7-22, pág. 291

2.2.5 Análisis por túnel de viento

Los procedimientos por túnel de viento lo establecen la norma ASCE 49-21, de acuerdo al American Society of Civil Engineers, con la aplicación del capítulo 02, y los comentarios de la norma referida. Cabe precisar que la norma ASCE 49-21, recomienda un perfil de viento exponencial.

2.2.6 Cargas de viento norma E.020

2.2.6.1 Clasificación de las edificaciones

La norma E.020 (2020) para solicitudes por cargas de viento, clasifica las edificaciones de acuerdo sus características de esbeltes o aerodinámicas en:

- Tipo 1. Edificaciones poco sensibles a las ráfagas y a los efectos dinámicos del viento, tales como edificios de poca altura o esbeltez y edificaciones cerradas con cobertura capaz de soportar las cargas sin variar su geometría
- Tipo 2. Edificaciones cuya esbeltez las hace sensibles a las ráfagas, tales como tanques elevados y anuncios y en general estructuras con una dimensión corta en la dirección del viento
- Tipo 3. Edificaciones que representan problemas aerodinámicos especiales tales como domos, arcos, antenas, chimeneas esbeltas y cubiertas colgantes. (pág. 20)

Cabe precisar que, la norma E.030 (2020), establece criterios similares a los indicados en la Tabla 1, clasificando las edificaciones en cuatro categorías, como se muestra en la Tabla 10.

2.2.6.2 Velocidad de diseño

La norma peruana E.020 (2020), en su artículo 12.3, establece un valor mínimo de 75 Km/h, para una altura de 10 metros, además, la distribución de velocidades en la vertical, se obtiene con la expresión siguiente:

$$V_h = V \left(\frac{h}{10} \right)^{0.22}$$

Donde «h» es la altura sobre el nivel del terreno (m.)

Cabe precisar, que en el Anexo 2 de la norma E.020, se presenta el mapa eólico del Perú, para periodos de retorno de 50 años a una altura de 10 m.

Tabla 10

Categoría de las edificaciones – Norma E.030

Categoría		Descripción
A	Edificaciones esenciales	A1: Establecimientos del sector salud (públicos y privados) del segundo y tercer nivel, según lo normado por el Ministerio de Salud. A2: Edificaciones esenciales para el manejo de las emergencias, el funcionamiento del gobierno y en general aquellas edificaciones que puedan servir de refugio después de un desastre. Se incluyen las siguientes edificaciones: • Establecimientos de salud no comprendidos en la categoría A1. • Puertos, aeropuertos, estaciones ferroviarias de pasajeros, sistemas masivos de transporte, locales municipales, centrales de comunicaciones. • Estaciones de bomberos, cuarteles de las fuerzas armadas y policía. • Instalaciones de generación y transformación de electricidad, reservorios y plantas de tratamiento de agua. • Instituciones educativas, institutos superiores tecnológicos y universidades. • Edificaciones cuyo colapso puede representar un riesgo adicional, tales como grandes hornos, fábricas y depósitos de • materiales inflamables o tóxicos. • Edificios que almacenen archivos e información esencial del Estado.
B	Edificaciones importantes	Edificaciones donde se reúnen gran cantidad de personas tales como cines, teatros, estadios, coliseos, centros comerciales, terminales de buses de pasajeros, establecimientos penitenciarios, o que guardan patrimonios valiosos como museos y bibliotecas. También se consideran depósitos de granos y otros almacenes importantes para el abastecimiento.
C	Edificaciones comunes	Edificaciones comunes tales como: viviendas, oficinas, hoteles, restaurantes, depósitos e instalaciones industriales cuya falla no acarree peligros adicionales de incendios o fugas de contaminantes.
D	Edificaciones temporales	Construcciones provisionales para depósitos, casetas y otras similares.

Notas. Adaptado de la tabla n.º 5, Norma E.030, pág. 18

2.2.6.3 Presión dinámica del viento

La presión dinámica, de acuerdo a la norma peruana, se determina con expresión siguiente:

$$q = 0.005 \times V_h^2$$

Donde: V_h es la velocidad de diseño a una la altura h sobre el nivel del terreno en km/h. y q es la presión dinámica del viento en Kg/m²

2.2.6.3.1 Carga exterior de viento

En el artículo 12.4, para determinar la presión o succión que genera el viento en las estructuras, la norma, asume como carga estática, aplicada de forma perpendicular a la superficie donde actúa el viento (Norma E.020, pág. 20)

$$P_h = 0.005 C V_h^2$$

Donde: los factores de forma C se obtienen de la Tabla 11

2.2.6.3.2 Carga interior de viento

En la norma peruana, las presiones internas generadas por el viento, deben sumarse a la carga exterior, determinada conforme al artículo 12.4 de la norma E.020, con base a los factores de forma de la Tabla 12

Tabla 11

Factores de forma (C_e)

Construcción	Barlovento	Sotavento
Superficies verticales de edificios	+ 0.80	– 0.60
Anuncios, muros aislados, elementos con una dimensión corta en el sentido del viento	+ 1.50	
Tanques de agua, chimeneas y otros de sección circular o elíptica	+ 0.70	
Tanques de agua, chimeneas, y otros de sección cuadrada o rectangular	+ 2.00	
Arcos y cubiertas cilíndricas con un ángulo de inclinación que no exceda 45°	± 0.80	– 0.50
Superficies inclinadas a 15° o menos	+ 0.30; – 0.70	– 0.60
Superficies inclinadas entre 15° y 60°	+ 0.70; – 0.30	– 0.60
Superficies inclinadas entre 60° y la vertical	+ 0.80	– 0.60
Superficies verticales o inclinadas (planas o curvas) paralelas a la dirección del viento	+ 0.70	– 0.70

Nota. Tomado de la tabla 4, Norma E.020, pag. 21

Tabla 12

Factores de forma para determinar (C_i)

Aberturas		
Uniforme en lados a barlovento y sotavento	Principales en lado a barlovento	Principales en lado a sotavento o en los costados
± 0.3	+ 0.8	– 0.6

Nota. Tomado de la tabla 5, Norma E.020, pag. 21

2.2.6.3 Cargas de viento

Tomando en consideración lo indicado para la carga exterior e interior de viento, la carga de viento se determina con la siguiente expresión:

$$P_h = 0.005 (C_e + C_i) V_h^2$$

Donde C_e y C_i son los factores de forma para determinar la carga exterior e interior obtenidas de la Tabla 11 y Tabla 12

2.2.6.4 Casos de carga de viento

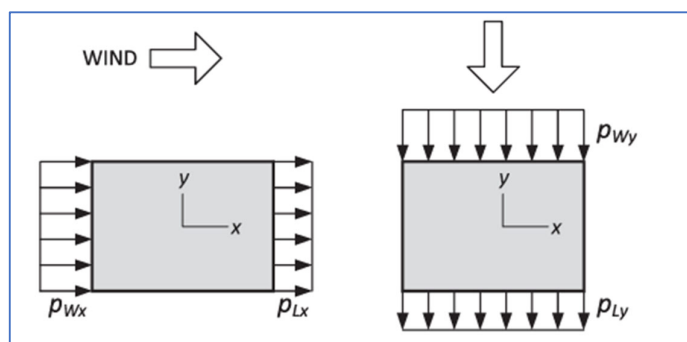
Al igual que los códigos internacionales como el ASCE 7-22, la norma peruana indica el criterio de cargas siguiente:

La estructura, los elementos de cierre y los componentes exteriores de todas las edificaciones expuestas a la acción del viento, serán diseñados para resistir las cargas (presiones y succiones) exteriores e interiores debidos al viento, suponiendo que éste actúa en dos direcciones horizontales perpendiculares entre sí. En la estructura la ocurrencia de presiones y succiones exteriores serán consideradas simultáneamente (Norma E.020, pág. 20)

Lo expresado por la norma, es similar al caso 1 de carga que establece la norma ASCE 7-22.

Figura 12

Caso de carga de viento – Norma E.020



Nota. Adaptado de la figura 27.3-8, Norma ASCE 7-22, pág. 291

2.3 Definición de términos básicos

a. Túnel de viento

El túnel del viento es una herramienta mediante la cual se estudian los efectos del movimiento del aire en el entorno de objetos sólidos. Dentro del túnel estos objetos se mantienen fijos y se impulsa el aire a través de ellos. Existen dos tipos de túneles, abiertos o cerrados, según sea la circulación del aire en su interior. (EADIC, 2014)

b. CFD (Computational Fluid Dynamics)

Dinámica de fluidos computacional, es el campo de estudio dedicado a solucionar con modelos computacionales, las ecuaciones de flujo de fluidos, para obtener detalles acerca del campo de flujo, líneas de corriente, velocidades y coeficientes de presión. (Piña Gutiérrez, 2021, pág. 18)

c. Velocidad básica del viento

La velocidad básica de viento está definida por la velocidad máxima de ráfaga durante 3 s. a 10 metros sobre el nivel de terreno, en la categoría de exposición C (pág. 265).

d. Perfil de viento

Se define como la variación de la velocidad respecto de la altura, que se considera logarítmica para el análisis de túnel de viento. (ASCE 49-21, 2021, pág. 23)

e. Perfil de intensidad turbulencia

Se define como la relación entre la desviación estándar del componente fluctuante de la velocidad del viento y la velocidad media del viento a una altura determinada. (ASCE 49-21, 2021, pág. 24)

f. Main Wind Force Resisting System (MWFRS)

Sistema principal de resistencia a la fuerza del viento. (ASCE 7-22, pág. 261)

g. Components and Cladding (C&C)

Componentes y revestimientos del MWFRS. (ASCE 7-22, pág. 261)

h. MINEDU

Ministerio de Educación - Perú

CAPÍTULO III.

MATERIALES Y MÉTODOS

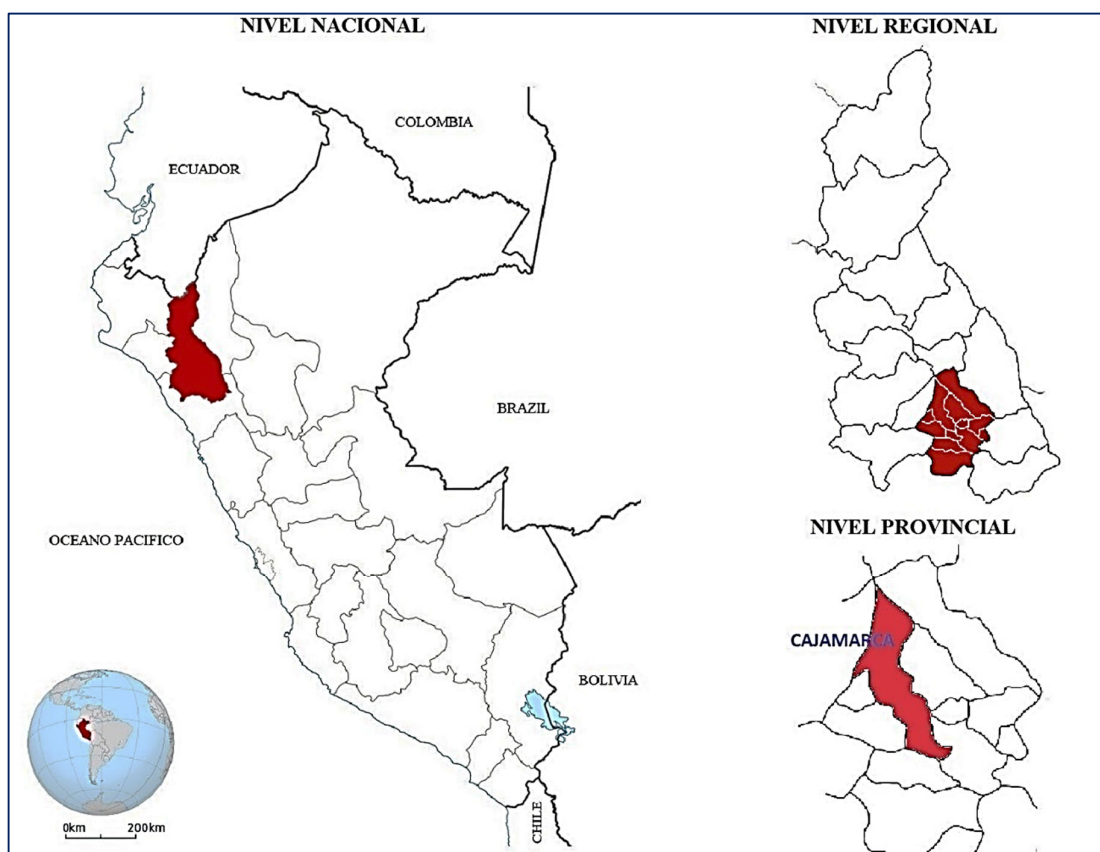
3.1 Consideraciones generales

3.1.1 Ubicación geográfica de la investigación

El trabajo de investigación realizado en el Distrito Cajamarca, Provincia de Cajamarca, Región de Cajamarca. Para edificaciones que se proyectan en el área de expansión urbana de la ciudad. Zona 17 M, Ubicado entre las coordenadas 9203000 – 9204200 N y 774400 – 778000 E.

Figura 13

Mapa de localización



3.1.2 Tiempo de la realización de la investigación

El trabajo se realizó durante el periodo 2024-2025, con base a la normatividad vigente y a criterios normativos.

3.2 Marco metodológico

3.2.1 Métodos de investigación

Método de investigación es lógico inductivo incompleto, por inducción científica, apoyados por métodos empíricos como la observación científica, considerando que, a partir de los resultados de la unidad de observación, se hará una inferencia inductiva para todas las estructuras de la población del proyecto de investigación.

3.2.2 Población, muestra, unidad de análisis y unidad de observación

3.2.2.1 Población

La población se considera a las coberturas en arco de acero estructural, para losas multiusos.

Tabla 13

Tipos de losas multiuso

Tipo	Dimensiones		Área
	Ancho (m.)	Largo (m.)	
I	19	32	608 m ²
II	22	44	968 m ²

Nota. Adaptado de: MINEDU, 2019, Criterios de Diseño para Locales Educativos de Primaria y Secundaria.

3.2.2.2 Muestra

Se considero una muestra no probabilística por conveniencia, eligiéndose las coberturas en arco, para losas multiusos tipo I de acuerdo al MINEDU.

3.2.2.2.1 Criterios de inclusión

- **Ubicación.** Coberturas en arco ubicadas en la región Cajamarca.
- **Tipo de losa.** Losa multiuso tipo I de 19 x 32 metros, de acuerdo a la norma técnica «Criterios de diseño para locales educativos de primaria y secundaria».
- **Tipo de cerramiento lateral.** Sin cerramiento lateral, estructuras abiertas.

- **Tipo de módulo.** Pórticos de un solo nivel

3.2.2.3 Unidad de análisis

Comportamiento estructural de las coberturas en arco

3.2.2.4 Unidad de observación

Cobertura en arco para losa multiusos tipo I de 19 x 32 metros, incluida a zona de seguridad.

Tabla 14

Losas multiusos tipo I desarrolladas por el gobierno regional de Cajamarca

Institución Educativa	Localidad	Proyecto	Dimensiones sin zona de seguridad (m.)	Dimensiones con zona de seguridad (m.)	Cobertura	
					Luz libre	Flecha
Institución Educativa N.º 821076	Chonta Baja	“Mejoramiento Del Servicio Educativo En Las Instituciones Educativas De	15 x 28	19 x 32	18.36	3.97
Institución Educativa N.º 82263	Pampa de San Luis	Nivel Primario En Las Localidades De Chonta Baja, Pampa De San Luis, El	15 x 28	19 x 32	16.00	2.50
Institución Educativa N.º 821308	El Porvenir	Porvenir Y Las Vizcachas, En La Provincia De San Pablo, Región Cajamarca” -	15 x 28	19 x 32	18.36	3.97
Institución Educativa N.º 821067	Las Vizcachas	septiembre 2022	15 x 28	19 x 32	18.36	3.97
Institución Educativa San Isidro	Distrito de Yonan	“Mejoramiento Y Ampliación Del Servicio Educativo Escolarizado De Nivel Secundario De La I.E. San	15 x 28	19 x 32	19.88	4.00
Institución Educativa Guzmango Capac	Distrito de Chilete	Isidro En El Distrito De Yonan. I.E. Gran Guzmango Capac En El Distrito De Chilete. Provincia De	15 x 28	19 x 32	19.88	4.00

Nota. Elaborado con base a la información digital proporcionada por el Gobierno Regional de Cajamarca, muestra como los proyectos desarrollados, considera las dimensiones establecidas por el MINEDU, para el dimensionamiento de las losas multiusos.

3.2.3 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.2.3.1 Técnicas

Revisión bibliográfica se aplica a la consulta de documentos referentes a las variables en estudio (libros y artículos científicos) con la finalidad obtener conceptos y datos relevantes, para determinar el problema de investigación, formulación del estado del arte y el marco teórico.

Observación cuantitativa (Observación sistemática), se utilizó software especializado para recolección de datos (indicadores de las variables), para cuantificar la el comportamiento estructural de las coberturas en arco.

3.2.3.2 Instrumentos

Para la revisión bibliográfica consideramos fichas bibliográficas, fichas temáticas, catálogo de referencias.

Para la observación cuantitativa se utilizó la guía de observación, con levantamiento de datos para el análisis estructural, elaboración de modelos matemáticos en programas de cálculo para la recopilación de la información de los indicadores de la variable dependiente, en tablas y gráficas.

3.2.4 Técnicas e instrumentos del procesamiento y análisis de datos

Análisis comparativo de datos cuantitativos, utilizando técnicas descriptivas y estadísticas, con la aplicación de software Excel.

3.2.5 Equipos, materiales e insumos

- Norma técnica «Criterios de diseño para locales educativos de primaria y secundaria».
- Planos de diseño de locales educacionales desarrollados por el Gobierno Regional de Cajamarca.

3.3 Planteamiento de la hipótesis y variables

3.3.1.1 Hipótesis

«El comportamiento estructural de una cobertura en arco para losas multiusos tipo I, diseñada con cargas de viento de la norma E.020 varía en más del 10% en comparación con la norma ASCE 7-22»

3.3.1.2 Variables

3.3.1.2.1 Variable dependiente

Comportamiento estructural de la cobertura en arco. Que se define como, la respuesta de estructura de la cobertura en arco, a cargas externas, en términos de desplazamientos, deformaciones y fuerzas basales.

3.3.1.2.2 Variable independiente

Cargas de viento. Que se define como las presiones dinámicas generadas por el flujo del aire sobre la cobertura en arco.

3.3.2 Operacionalización de los componentes de la hipótesis

Tabla 15

Operacionalización de variables

Hipótesis	Definición conceptual de las variables	Definición operacional de las variables			
		Variables	Dimensiones	Indicadores	Instrumento
El comportamiento estructural de una cobertura en arco para losas multiusos tipo I, diseñada con cargas de viento de la norma E.020 varía en más del 10% en comparación con la norma ASCE 7-22.	Dependiente Comportamiento estructural de la cobertura en arco. Que se define como, la respuesta de estructura de la cobertura en arco, a cargas externas, en términos de desplazamientos, deformaciones y fuerzas basales.	El comportamiento estructural esta dado por: - Los desplazamientos y deformaciones. - Las fuerzas basales	- Periodos y frecuencias. - Formas modales. - Fuerzas basales.	- Desplazamientos - Momentos torsores. - Fuerzas cortantes.	- Guía de observación. - Tabulaciones, graficas.
	Independiente Cargas de viento. Que se define como las presiones dinámicas generadas por el flujo del aire sobre la cobertura en arco.	Se tiene tres procedimientos para la determinación de las cargas de viento - Norma ASCE 7-22 - Norma E.020 - Túnel de viento	Presión del viento	- Presión de velocidad - Coefficientes de presión	- Guía de observación. - Tabulaciones, graficas.

3.3.3 Matriz de consistencia metodológica

Tabla 16

Matriz de consistencia metodológica

Variación del comportamiento estructural de una cobertura en arco diseñada con cargas de viento de la norma E.020 en comparación con la norma ASCE 7-22								
Problema General	Objetivos	Hipótesis	Variables	Dimensiones	Indicadores	Instrumento	Metodología y diseño de la investigación	Población, muestra, unidad de análisis y observación
¿En cuánto varía el comportamiento estructural de una cobertura en arco para losas multiusos tipo I, diseñada con cargas de viento de la norma E.020 en comparación con la norma ASCE 7-22?	General 1. Determinar la variación del comportamiento estructural de una cobertura en arco diseñada con cargas de viento de la norma E.020 en comparación con la norma ASCE 7-22.	El comportamiento estructural de una cobertura en arco para losas multiusos tipo I, diseñada con cargas de viento de la norma E.020 varía en más del 10% en comparación con la norma ASCE 7-22.	Dependientes 1. Comportamiento estructural de coberturas en arco.	1. Periodos y frecuencias 2. Fuerzas basales.	1. Derivas. 2. Momentos basales. 3. Cortantes basales.	• Guía de observación. • Tabulaciones, graficas.	• Metodología Lógico inductivo incompleto, por inducción científica, apoyados por métodos empíricos como la observación científica.	• La población. Coberturas en arco de acero estructural, para losas multiusos.
	Específicos 1. Determinar el comportamiento estructural de una cobertura en arco diseñada con cargas de viento de la norma E.020. 2. Determinar el comportamiento estructural de una cobertura en arco diseñada con cargas de viento de la norma ASCE 7-22. 3. Determinar los coeficientes de presión y presiones de viento para coberturas en arco aplicando la norma ASCE 49-21.		Independiente 1. Cargas de viento	1. Presión del viento	1. Presión de velocidad 2. Coeficiente s de presión	• Guía de observación. • Tabulaciones, graficas.	• Diseño de la investigación Transeccional correlacional, desarrollado en 4 Fases 1. Identificación del objeto de estudio. 2. Recopilación de datos. 3. Análisis de la información. 4. Síntesis y conclusiones.	• Muestra Coberturas en arco de los proyectos desarrollados por el Gobierno Regional de Cajamarca. • La unidad de análisis Comportamiento estructural de las coberturas en arco • La unidad de observación. Cobertura en arco para losa multiusos tipo I.

3.4 Procedimiento

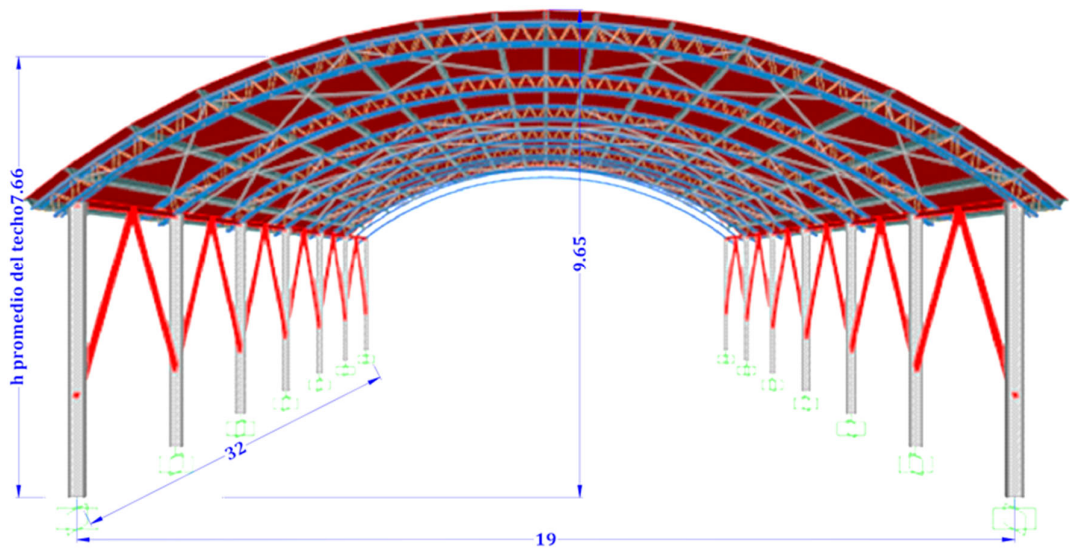
3.4.1 Unidad de observación

3.4.1.1 Características de la cobertura en arco

Tabla 17
Características de la unidad de observación

Ítem	Descripción
Localización:	Cajamarca
Terreno:	Áreas de expansión urbana plana con obstrucciones dispersas, con edificaciones circundantes de alturas generalmente inferiores a 9.1 m. (30 pies).
Elevación:	2750 m.s.n.m.
Dimensiones:	19 m de ancho x 32 m de longitud x 9.65 m de altura Altura media del techo: 7.66
Diseño del arco:	Rebajamiento de 3.20
MWFRS:	Cobertura en arco con cercha conformada bridas de ángulos de 2x2x3/16 y diagonales y enlaces de varillas de 5/8· Perfiles W6x12, W12x35 resistentes a cargas laterales
Cobertura:	Sin cobertura lateral, y con TR4 de 0.45 mm en la cobertura en arco

Figura 14
Modelo matemático de la cobertura en arco



Nota. Adaptado de acuerdo a la unidad de observación.

3.4.1.2 Clasificación de edificación

La cobertura, forma parte de la infraestructura educativa, que de acuerdo a la norma E.030, clasifica como esencial (A2), en la norma ASCE la infraestructura educativa se le asigna una categoría de riesgo IV

Tabla 18

Clasificación estructural de la cobertura en arco

Reglamento nacional de edificaciones		ASCE 7-22
Norma E.030	Norma E.020	
A2	Tipo 3	Categoría de riesgo IV

Nota. De acuerdo a la clasificación de la norma E.020, las edificaciones tipo 3 debe cumplir con los valores mínimos indicados para edificaciones tipo 1

3.4.1.3 Determinación de la velocidad básica de diseño

En el anexo 02 de la norma E.020, de acuerdo a la ubicación de la edificación, del mapa eólico se tienen una velocidad básica de viento de 40 km/h, sin embargo, la norma establece una velocidad mínima de 75 km/h, cabe precisar que la norma ASCE - 22 no establece valores mínimos para la velocidad básica del viento, pero si una carga mínima de viento (sección 27.1.5)

Para establecer una línea base de comparación, la velocidad básica de diseño, considerada es de 75 km/h.

3.4.2 Cargas de viento de la norma E.020

3.4.2.1 Velocidad de diseño

Como se tiene una altura máxima de $9.65 < 10$ m. se considera $V_h = 75$ km/h

3.4.2.2 Presión dinámica del viento

$$q = 0.005 \times V_h^2 = 0.005 \times 75^2 = 28.13 \text{ [kg/m}^2\text{]}$$

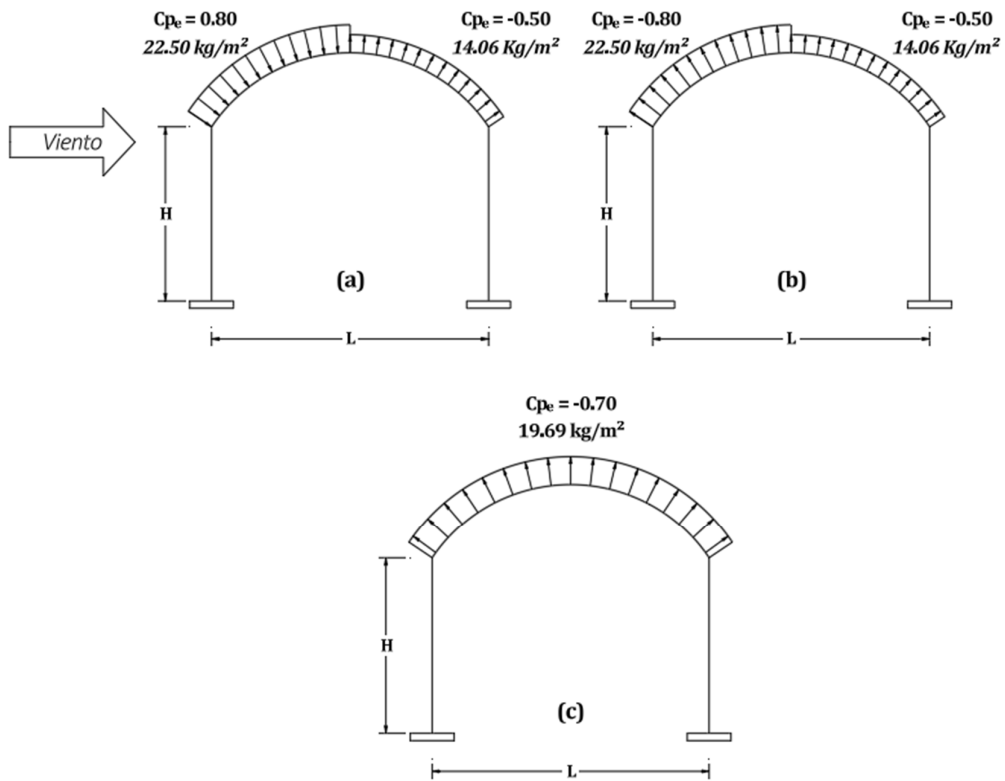
3.4.2.3 Carga exterior de viento

$$P_h = C_e \cdot q \text{ [kg/m}^2\text{]}$$

Donde: los factores de forma C_e y C_i se obtienen de la Tabla 11 y Tabla 12, pág. 35.

Figura 15

Cargas de viento - Norma E.020



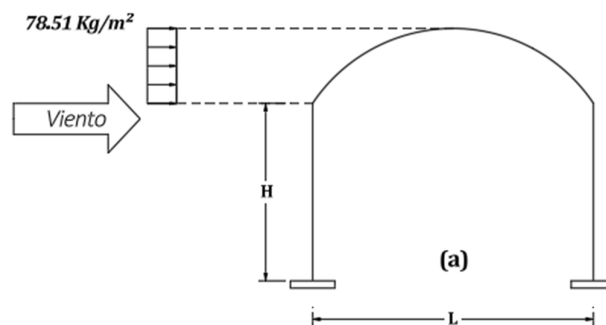
Nota. (a) y (b) Para el viento perpendicular al eje de la cobertura se indica dos coeficientes (presión y succión en barlovento), y (c) es la presión para el viento paralelo al eje de la cobertura.

3.4.3 Cargas de viento de la norma ASCE 7-22

3.4.3.1 Carga mínima de viento

Figura 16

Carga mínima de viento



Nota. De acuerdo al estándar se consideran una presión de 0.77 kN/m^2 aplicada en la proyección vertical de la cobertura.

3.4.3.2 Método direccional

3.4.3.2.1 Categoría de exposición

De acuerdo a las condiciones de terreno indicada en la Tabla 17, consideramos una categoría de exposición C

3.4.3.2.2 Coeficiente de exposición a la presión de velocidad K_z

Para una categoría de exposición C y una altura media de la cobertura $z = 7.76$ se tiene:

$$K_z = 2.41 \left(\frac{z}{z_g} \right)^{2/\alpha} = 2.41 \left(7.76/750 \right)^{2/9.8} = 0.95$$

De acuerdo a la norma ASCE, optamos por asumir el valor de $K_z = 0.95$

3.4.3.2.3 Factor topográfico K_{zt}

Para áreas planas, $K_{zt} = 1$

3.4.3.2.4 Factor de elevación K_e

$K_e = e^{-0.000119z_e}$ ($z_e = 2,750$ sobre el nivel del mar en m.), de forma conservadora y acorde con el código, se asume para el análisis el valor de $K_e = 1$

3.4.3.2.5 Presión de velocidad

Para una velocidad básica del viento de 75 km/h.

$$q_h = 0.0048 K_z K_{zt} K_e V^2 = 25.72 \text{ [kg/m}^2\text{]}$$

3.4.3.2.6 Factor de direccionalidad del viento (K_d)

De acuerdo a la Tabla 2, el factor $K_d = 0.85$

3.4.3.2.7 Factor de efecto de ráfaga (G)

Para estructuras rígidas, de acuerdo al estándar, $G = 0.85$

Por lo tanto, las cargas de viento se determinaron con los coeficientes de presión de la Tabla 19 y la expresión siguiente:

$$p = q_z K_d G C_p = 18.59 C_p \text{ [kg/m}^2\text{]}$$

3.4.3.2.8 Coeficiente de presión externa C_{pe}

Tabla 19

Coeficiente de presión externa para techos en arco (C_{pe})

Condiciones	Coeficiente de presión externa C_{pe}			
	Relación altura – luz (r)	Cuarto de barlovento	Mitad central	Cuarto de sotavento
Techo sobre estructura elevada	$0 < r = 0.18 < 0.2$	-0.9	-0.88	-0.5

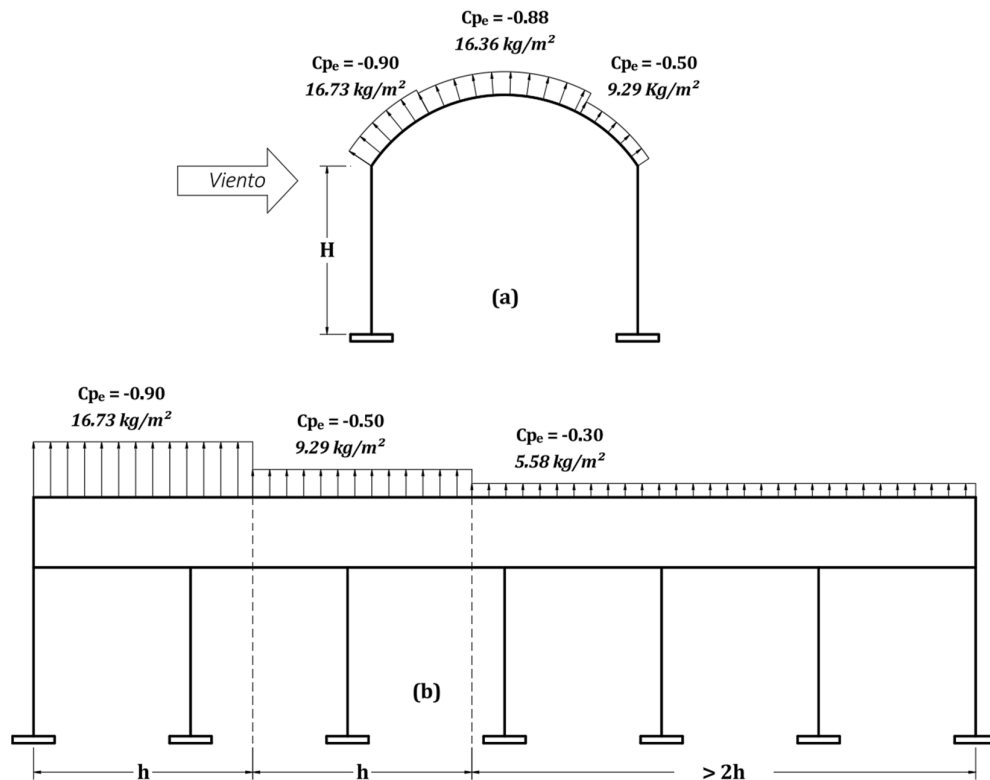
3.4.3.2.9 Presión del viento

Aplicando la expresión siguiente:

$$p = 18.59 C_{pe} \text{ [kg/m}^2\text{]}$$

Figura 17

Presiones de viento categoría de exposición C



Nota. (a) viento perpendicular al eje de la cobertura, y (b) paralelo al eje de la cobertura.

3.4.4 Combinaciones de diseño

Consideramos las combinaciones en las que participa las cargas de viento, cabe precisar que, de acuerdo al objetivo del presente trabajo, y por consideraciones normativas, el viento no actúa de forma simultánea con el sismo.

Tabla 20

Combinaciones de diseño

Norma E.090	ASCE 7-22
$U_3 = 1.2D + 1.6(Lr \text{ ó } S) + 0.8W$	$U_3 = 1.2D + 1.6(Lr \text{ ó } S) + 0.5W$
$U_4 = 1.2D + 1.3W + 0.5(Lr \text{ ó } S)$	$U_4 = 1.2D + 1.0W + 0.5(Lr \text{ ó } S)$
$U_6 = 0.9D \pm 1.3W$	$U_6 = 0.9D + 1.0W$

3.4.5 Túnel de viento – Norma ASCE 49-21

3.4.5.1 Perfil de viento

Asumiendo el modelo logarítmico, de acuerdo a la norma ASCE 49-21, para una categoría de exposición C, tenemos:

$$V_z = \frac{u_* \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{k}$$

Donde:

$$U_* = \frac{Vk}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_0}\right)}$$

Para $z_0 = 0.02$ y $k = 0.4$ y una altura de referencia de 10 metros, se tiene:

$$U_* = \frac{Vk}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_0}\right)} = 0.064V \quad V_z = \frac{u_* \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{k} = 0.16 \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) V$$

El perfil de viento se define por:

$$V_{tunnel} = 0.16 \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) V$$

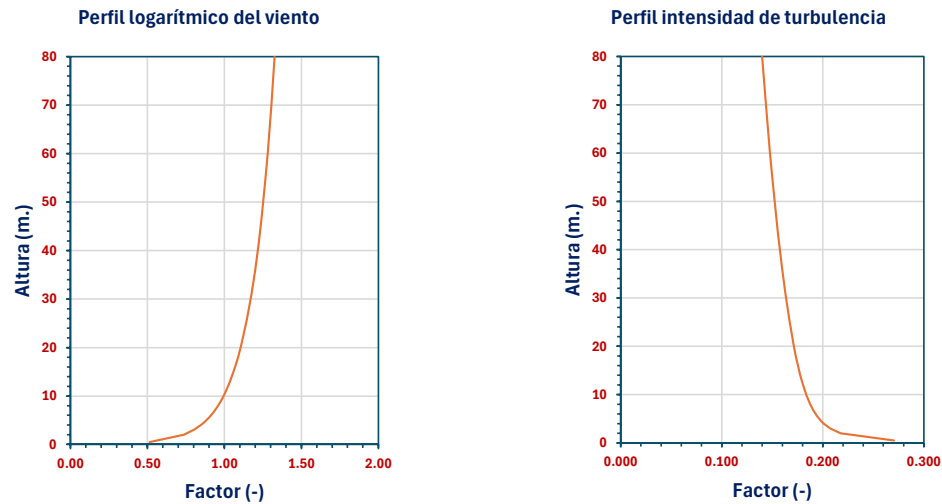
3.4.5.2 Perfil de intensidad de turbulencia

Aplicando la expresión:

$$I_u = \frac{2.63U_* \eta \left[0.538 + 0.090 \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)\right]^{\eta/16}}{V_z}$$

Para $\eta = 1 - \frac{z}{z_g}$, donde $z_g = 2150$, se presenta en la Figura 18 el perfil de intensidad de turbulencia, para la simulación de viento.

Figura 18
Perfil de viento y de intensidad de turbulencia

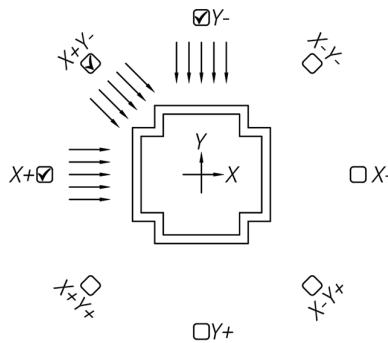


Nota. Definido de acuerdo a las recomendaciones de la norma ASCE 49-21

3.4.5.3 Dirección del viento

Además de las direcciones octogonales que requiere la norma, a 0° y 90° grados, consideramos a 45°, por ser una edificación simétrica, no se considera las demás direcciones.

Figura 19
Direcciones de análisis del viento



Nota. Adaptado de: Robot Structural Analysis Professional 2026; interface gráfica, simulación de viento.

3.4.5.3.1 Túnel de viento

Las dimensiones del túnel de viento, se ajustó de forma predeterminada por el software RWIN 3, para optimizar los tiempos de simulación.

Figura 20

Túnel de viento en la dirección $X+$

Dimensiones del túnel de viento: $Dx = 2\ 52.68\text{ m}$, $Dy = 12\ 6.3\ 4\text{ m}$, $Dz = 56.87\text{ m}$

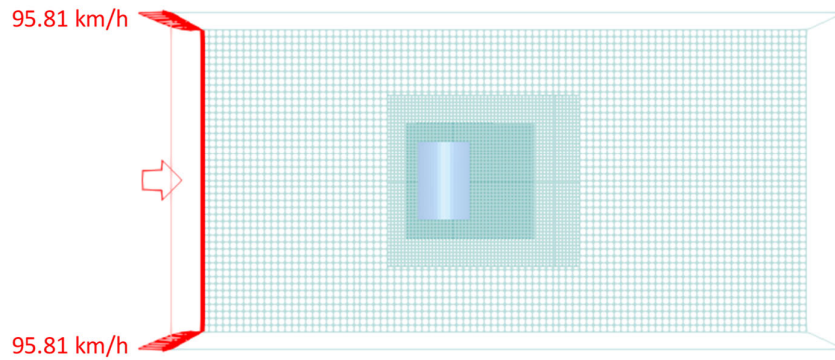


Figura 21

Túnel de viento en la dirección $X+Y-$

Dimensiones del túnel de viento: $Dx = 2\ 87.82\ 4\text{ m}$, $Dy = 143.912\text{ m}$, $Dz = 62.961\text{ m}$

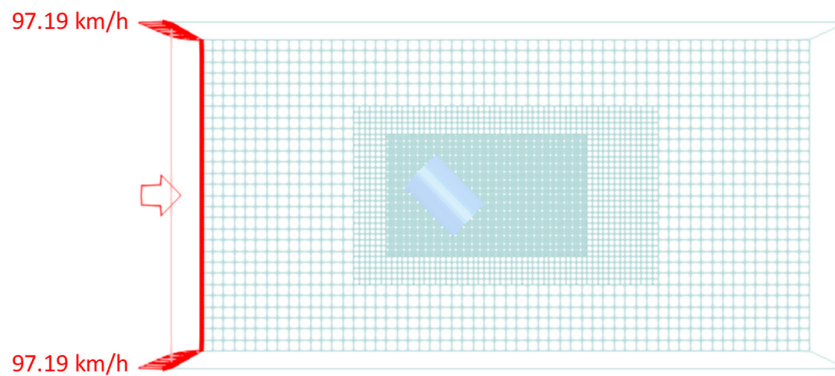
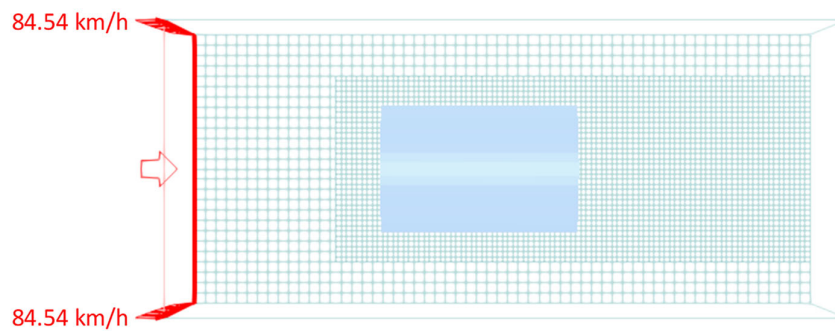


Figura 22

Túnel de viento en la dirección $Y-$

Dimensiones del túnel de viento: $Dx = 104.367\text{ m}$, $Dy = 45.59\text{ m}$, $Dz = 22.144\text{ m}$



3.5 Presentación de resultados

3.5.1 Periodos y frecuencias modales

Tabla 21

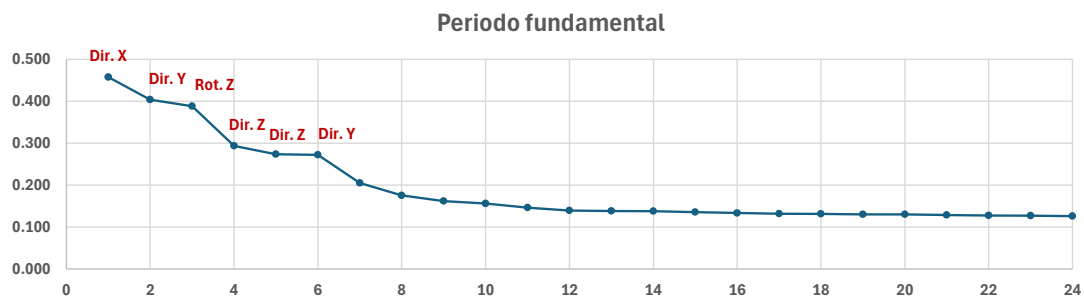
Periodos, frecuencias y masas participantes

Modo	Periodo	Frecuencia	Masa traslacional X		Masa traslacional Y		Masa rotacional Z	
			Masa	Acum.	Masa	Acum.	Masa	Acum.
1	0.457	2.186	0.8901	0.8901	0.0000	0.0000	0.0010	0.0010
2	0.404	2.475	0.0000	0.8901	0.9742	0.9742	0.0000	0.0011
3	0.388	2.576	0.0007	0.8907	0.0000	0.9742	0.8727	0.8738
4	0.294	3.402	0.0000	0.8907	0.0176	0.9918	0.0000	0.8738
5	0.274	3.651	0.0000	0.8908	0.0032	0.9951	0.0000	0.8738
6	0.272	3.672	0.0000	0.8908	0.0000	0.9951	0.0476	0.9214
7	0.205	4.881	0.0000	0.8908	0.0006	0.9957	0.0000	0.9214
8	0.175	5.705	0.0014	0.8922	0.0000	0.9957	0.0049	0.9263
9	0.162	6.183	0.0000	0.8922	0.0004	0.9961	0.0000	0.9263
10	0.156	6.412	0.0051	0.8973	0.0000	0.9961	0.0068	0.9331
11	0.146	6.846	0.0214	0.9187	0.0000	0.9961	0.0069	0.9399
12	0.139	7.169	0.0028	0.9215	0.0000	0.9961	0.0001	0.9400

Nota. La masa participante en el análisis modal es mayor al 90%, conforme indica la norma E.030.

Figura 23

Periodo fundamental de la estructura



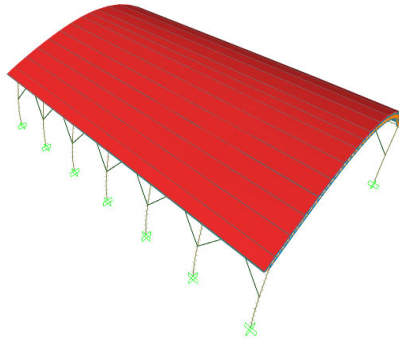
Nota. En los 03 primeros modos se alcanza un porcentaje de masa participante de aproximadamente el 90%, con una reducción del periodo de vibración del 15.09% en el cuarto modo y del 55.14% en el séptimo modo.

3.5.2 Modos de vibración

Figura 24

Modos de vibración

Modo 1, periodo 0.457, masa participante 0.8901

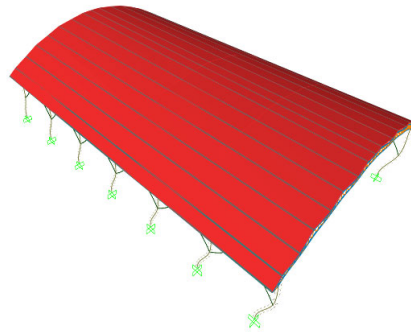


Traslacional en X

Figura 25

Modos de vibración – Modo 02

Modo 2, periodo 0.404, masa participante 0.9742

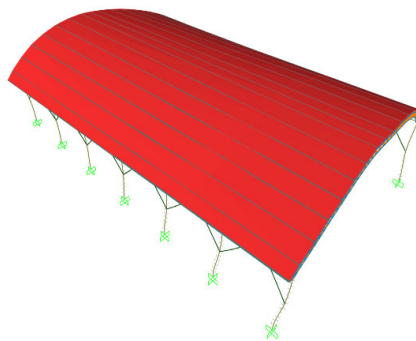


Traslacional en Y

Figura 26

Modos de vibración – Modo 03

Modo 3, periodo 0.388, masa participante 0.8738

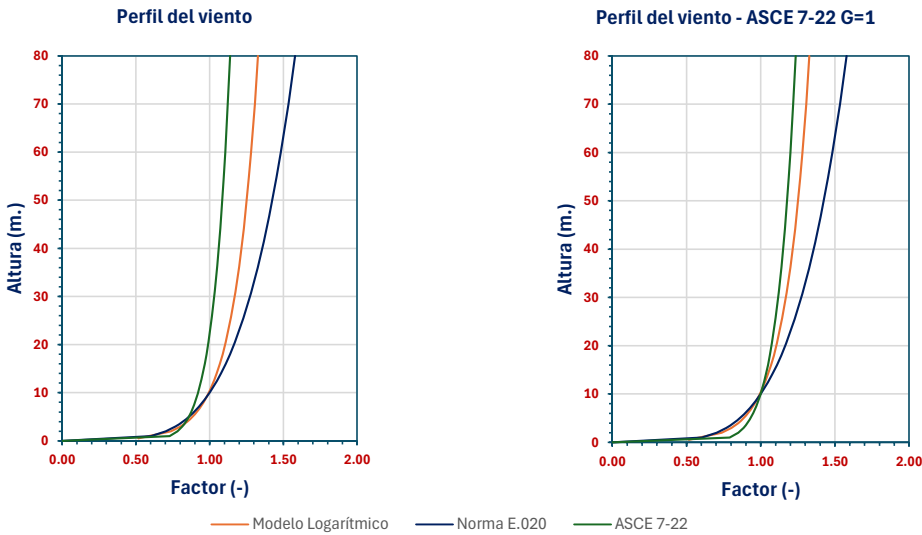


Rotacional Z

3.5.3 Perfiles de viento

Figura 27

Perfil de viento ASCE 7-22 cat. C, Norma E.020 y ASCE 49-21



Elevación	Variación ASCE 7-22	Variación ASCE 7-22 (G =1)	Variación E.020
10.	7.35 %	-0.49 %	-0.57 %
20	10.54 %	2.96 %	-5.38 %
30.	11.93 %	4.47 %	-8.83 %
40	12.74 %	5.35 %	-11.55 %
50	13.27 %	5.93 %	-13.82 %
60	13.66 %	6.35 %	-15.78 %

3.5.4 Cargas y coeficientes de presión

3.5.4.1 Norma E.020

De la simulación CFD del viento, comparada con la norma E.020 se observa las variaciones porcentuales en la Tabla 22.

Tabla 22

Análisis de cargas y C_{pe} de la simulación en túnel de viento – Norma E.020

Descripción	Norma E.020		Túnel de viento		Variación	
	Barlovento	Sotavento	Barlovento	Sotavento	Barlovento	Sotavento
Viento en X	Viento perpendicular al eje de la cobertura					
Coef. de presión	± 0.8	- 0.50	0.43 y - 0.49	- 0.63	-46.3, - 38.8%	26.0 %
Cargas de viento [kg]	± 22.50	- 14.06	11.9 y - 13.6	- 17.33	-47.1, - 39.0%	23.3 %
Viento en Y	Viento paralelo al eje de la cobertura					
Coef. de presión	- 0.70		- 0.16		-77.14 %	
Cargas de viento [kg]	- 19.69		- 4.33		-78.00 %	

3.5.4.2 Norma ASCE 7-22

De la simulación CFD del viento, considerando el perfil de viento de la norma ASCE 7-22, se obtiene las variaciones indicadas en la Tabla 23.

Tabla 23

Análisis de cargas y C_{pe} de la simulación en túnel de viento – ASCE 7-22

Descripción	M. Direccional ASCE 7-22			Túnel de viento			Variación		
	$\frac{1}{4}$ Bvento	Mitad central	$\frac{1}{4}$ Svento	$\frac{1}{4}$ Bvento	Mitad central	$\frac{1}{4}$ Svento	$\frac{1}{4}$ Bvento	Mitad central	$\frac{1}{4}$ Svento
Viento en X									
Coef. de presión	- 0.9	- 0.88	- 0.50	0.26	- 0.68	- 0.48	71.11%	-22.72%	-4.0%
Cargas de viento [kg]	-16.73	-16.36	-9.29	7.20	-18.75	-13.33	-143.0%	14.60%	43.48%
Viento en Y									
	0 - h	h - 2h	2h - L	0 - h	h - 2h	2h - L	0 - h	h - 2h	2h - L
Coef. de presión	- 0.90	- 0.50	- 0.30	- 0.46	- 0.50	- 0.39	-48.88%	0%	30%
Cargas de viento [kg]	- 16.73	- 9.29	- 5.58	- 12.55	- 13.69	- 10.85	-24.98%	47.36%	94.44%

3.5.5 Desplazamientos máximos

Se presenta los desplazamientos máximos en las dos direcciones de análisis, para los casos de viento considerado.

Tabla 24

Desplazamientos máximas por cargas de viento [m]

Norma E.020		ASCE 7-22				Var. ASCE 7-22 Cat.
Dirección		ASCE Cat. C		Túnel de viento		C – Túnel de viento
	δ	δ	Var.	δ	Var.	Var.
X	-0.01703	-0.0057	-66.53%	0.009245	-45.71%	62.19%
Y	-0.00070	-0.00055	-21.43%	0.001145	63.57%	108.18%

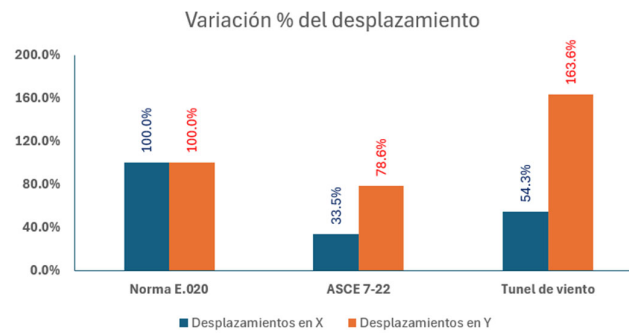
Tabla 25

Derivas máximas por combinaciones de diseño [m]

Dirección	Norma E.020	ASCE 7-22		ASCE 7-22		E.020	
	δ	ASCE Cat. C		Túnel de viento		Túnel de viento	
		δ	Var.	δ	δ	δ	δ
X	-0.03284	-0.022439	-31.67%	0.02259	-31.21	0.022996	-29.97%
Y	-0.00489	-0.003676	-24.82%	-0.00355	27.40	-0.00443	-9.40%

Figura 28

Variación porcentual del desplazamiento



3.5.6 Fuerzas basales

Se presenta las fuerzas basales por cargas de viento, actuando simultáneamente y como parte de las combinaciones donde se incluye cargas de viento.

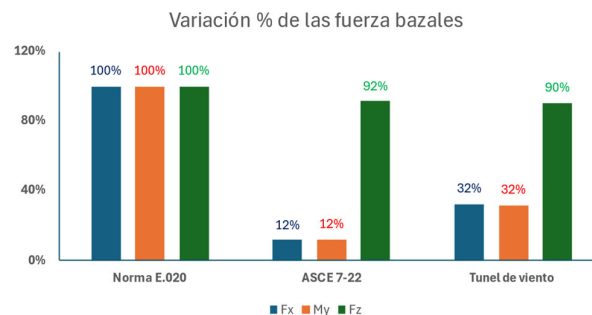
Tabla 26

Fuerzas basales por combinaciones de diseño [Ton-m]

Ítem	Norma E.020	ASCE 7-22		Túnel de viento			
	<i>F</i>	ASCE Cat. C		Comb. ASCE		Comb. E.020	
		<i>F</i>	Var.	<i>F</i>	Var.	<i>F</i>	Var.
Fx	5.789	0.673	-88.4%	1.856	-67.9%	2.413	-58.3%
Fy	0.000	0.000	--	0.000	--	0.000	--
Fz	63.48	58.153	-8.4%	57.396	-9.6%	55.102	-13.2%
Mx	088.031	24.748	> 1000%	5.458	> 1000%	7.086	> 1000%
My	37.809	4.605	-87.8%	11.892	-68.5%	15.861	-58.1%
Mz	0.000	0.000	--	0.000	--	0.000	--

Figura 29

Variación porcentual de las fuerzas basales



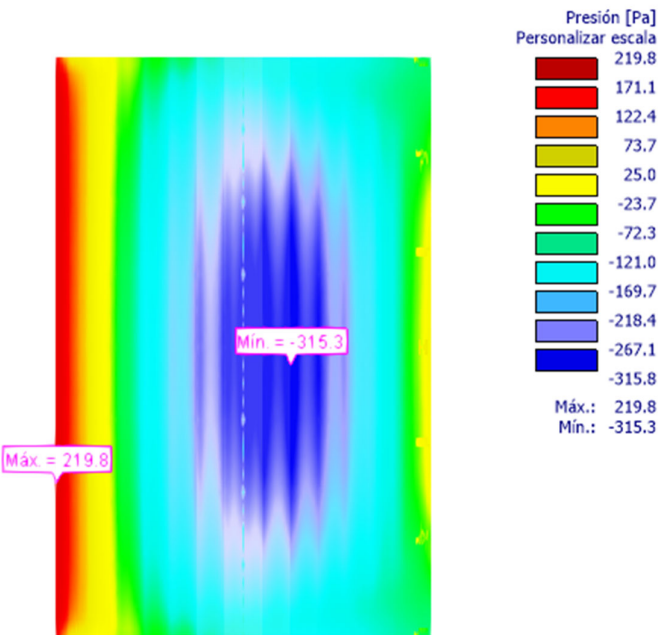
3.5.7 Cargas y coeficientes de presión del modelo CFD

3.5.7.1 Simulación de viento en X+

3.5.7.1.1 Presión superficial

Figura 30

Presión de viento de la simulación en X+



Nota. Resultados de la simulación de viento en la dirección X+

Con base a la Figura 30 y Figura 31, se determinó las presión superficial y coeficiente de presión, de acuerdo a los sectores que considera cada norma, los resultados se muestran en la Tabla 27.

Cabe precisar que, para el análisis por cargas de viento de la simulación se considera las zonas consideradas en la norma ASCE 7-22

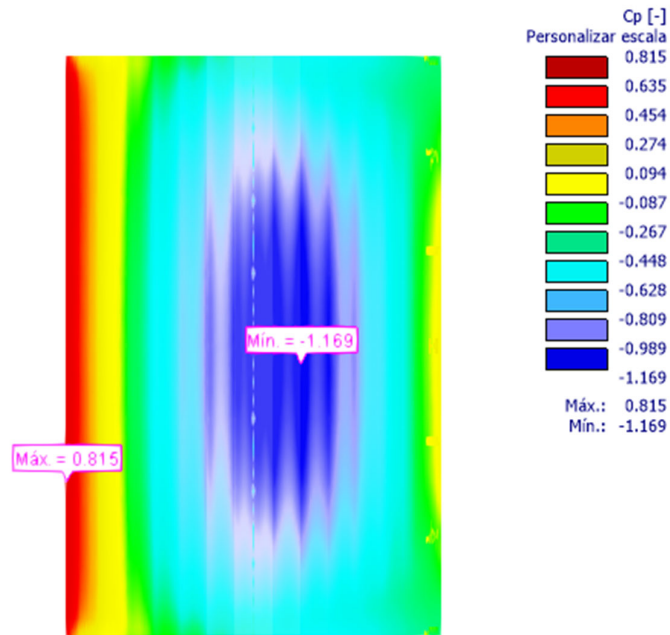
Tabla 27

Coeficientes de presión y presión de viento de la simulación en X+

Descripción	Túnel de viento				
	Barlovento	Sotavento	1/4 Barlovento	Mitad central	1/4 Sotavento
Viento en X+	Viento perpendicular al eje de la cobertura				
Coef. de presión	± 0.8	$- 0.50$	$+ 0.43$ y $- 0.15$	$- 0.69$	$- 0.48$
Cargas de viento [kg]	± 22.50	$- 14.06$	11.88 y $- 4.17$	$- 18.75$	$- 13.33$

Figura 31

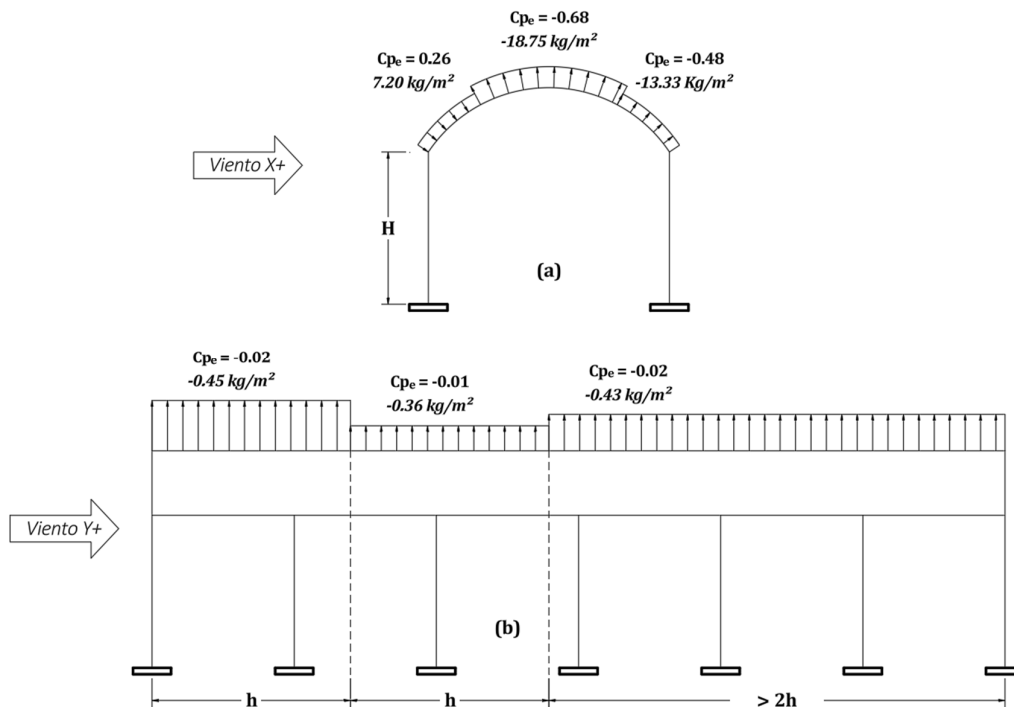
Coeficientes de presión de la simulación en X+



3.5.7.1.2 Cargas y coeficiente de presión

Figura 32

Cargas y coef. de presión de la simulación de viento para el análisis estático



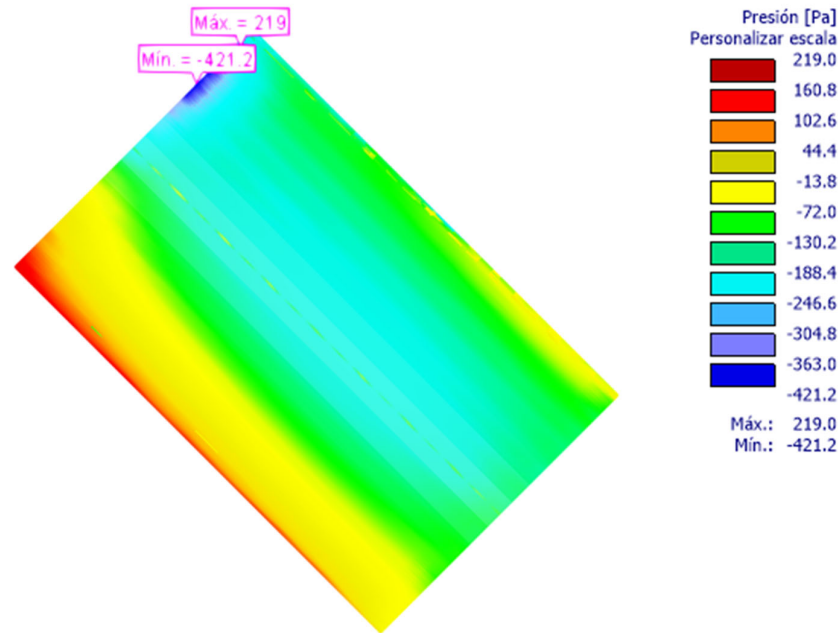
Nota. Las cargas indicadas son las consideradas en el modelo para el análisis por cargas de simulación de viento.

3.5.7.2 Simulación de viento en X+Y-

3.5.7.2.1 Presión superficial

Figura 33

Presión de viento de la simulación en X+Y-



Nota. Resultados de la simulación de viento en la dirección X+Y-

Con base a la Figura 33 y Figura 34, se determinó las presión superficial y coeficiente de presión, de acuerdo a los sectores que considera cada norma, los resultados se muestran en la Tabla 28. Cabe precisar que, para el análisis por cargas de viento en la dirección X+Y- consideramos los sectores de la norma ASCE 7-22, por mostrar una mejor distribución de las presiones de viento.

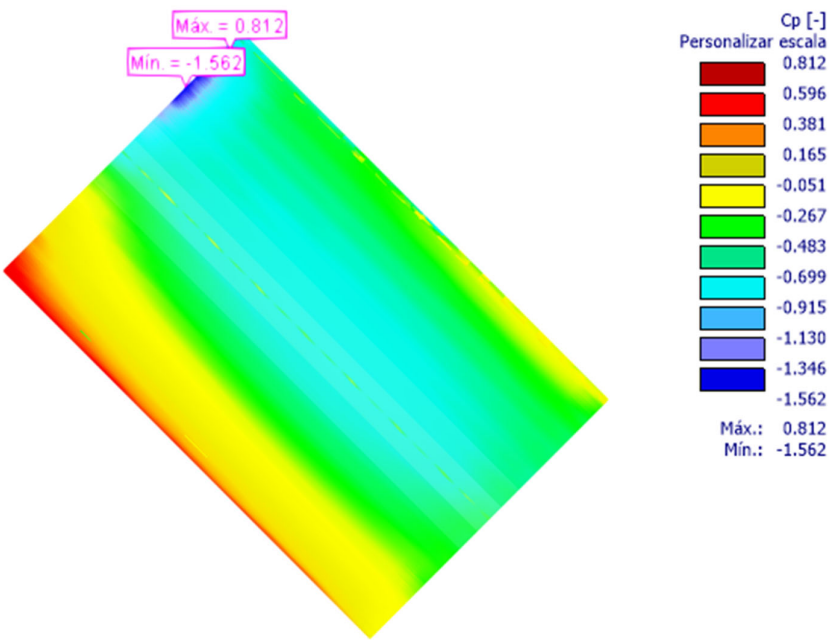
Tabla 28

Coeficientes de presión y presión de viento de la simulación en X+Y-

Descripción	Túnel de viento					
	1/4 Barlo.	1/2 central	1/4 Sota.	0 - h	h - 2h	2h - L
Viento en X+Y-	Viento perpendicular al eje de la cobertura					
Coef. de presión	+ 0.27 y - 0.10	- 0.60	- 0.70	- 0.46	- 0.50	- 0.39
Cargas de viento [kg]	7.46 y - 2.63	- 16.57	- 19.12	- 12.55	- 13.69	- 10.85

Figura 34

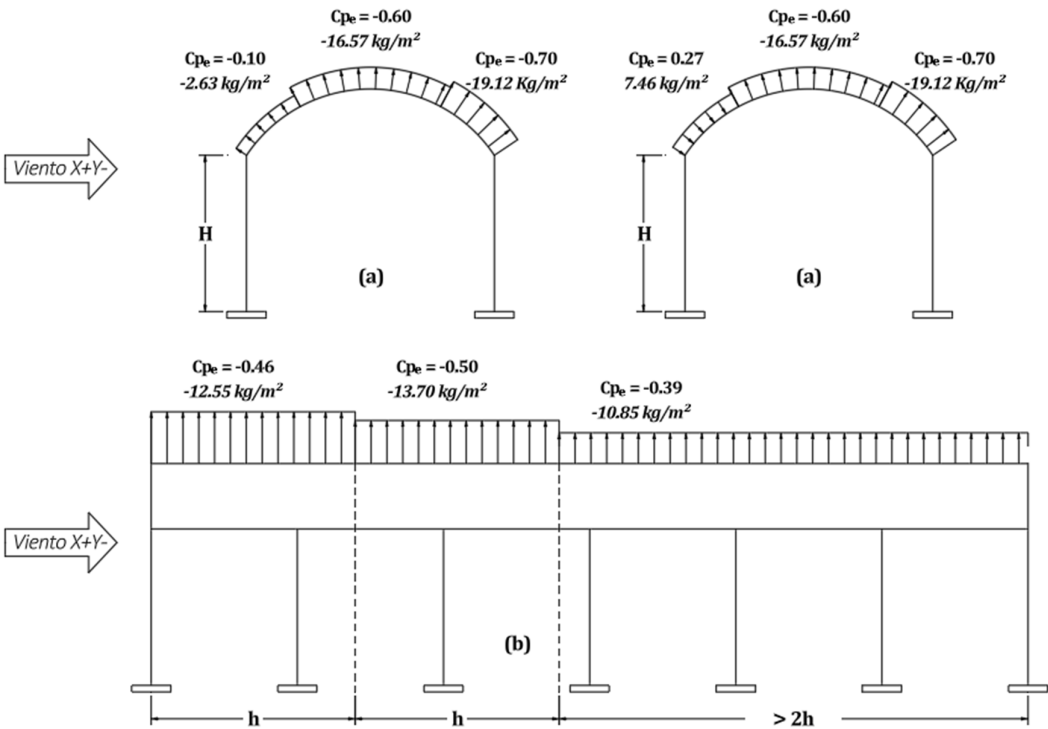
Coeficientes de presión de la simulación en X+Y-



3.5.7.2.2 Cargas y coeficiente de presión

Figura 35

Cargas y coef. de presión simulación en X+Y- para el análisis estático.

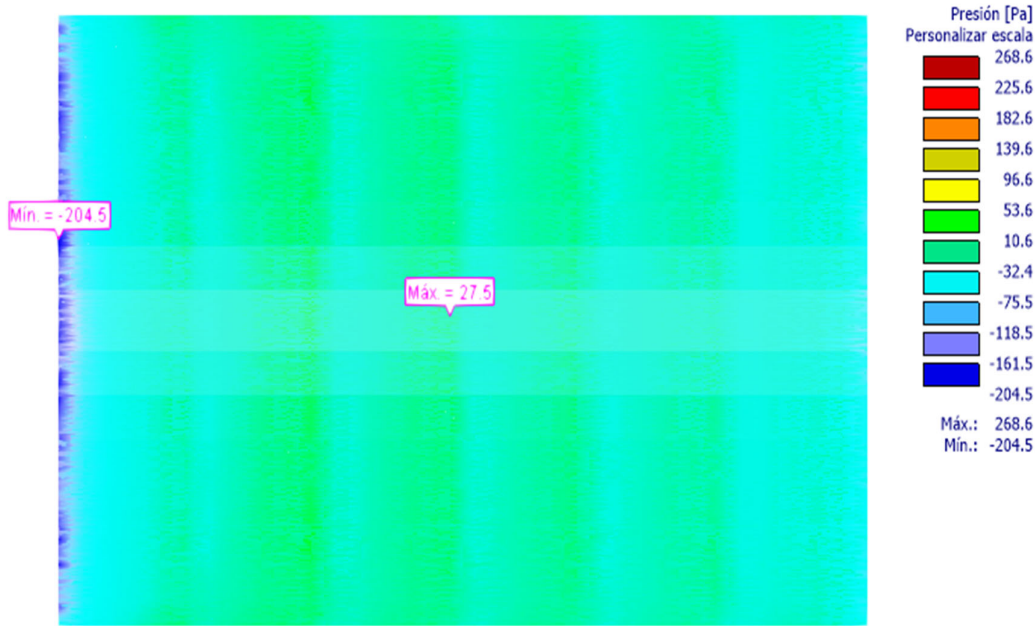


3.5.7.3 Simulación de viento en Y-

3.5.7.3.1 Presión superficial

Figura 36

Presión de viento de la simulación en Y-



Nota. Resultados de la simulación de viento en la dirección Y-

Con base a la Figura 36 y Figura 37, se determinó las presión superficial y coeficiente de presión, de acuerdo a los sectores que considera cada norma, los resultados se muestran en la Tabla 28.

Tabla 29

Coeficientes de presión y presión de viento de la simulación en Y-

Descripción	E.020 Paralelo al eje	Túnel de viento		
		0 - h	h - 2h	2h - L
Viento en Y-	Viento perpendicular al eje de la cobertura			
Coef. de presión	- 0.16	- 0.02	- 0.01	- 0.02
Cargas de viento [kg]	- 4.34	- 0.45	- 0.36	- 0.45

Cabe precisar qué condiciones más críticas muestra el viento en la dirección X+Y-, ergo, utilizamos la simulación en X+Y- para establecer los coeficientes en la dirección Y-.

Figura 37

Coeficientes de presión de la simulación en Y-

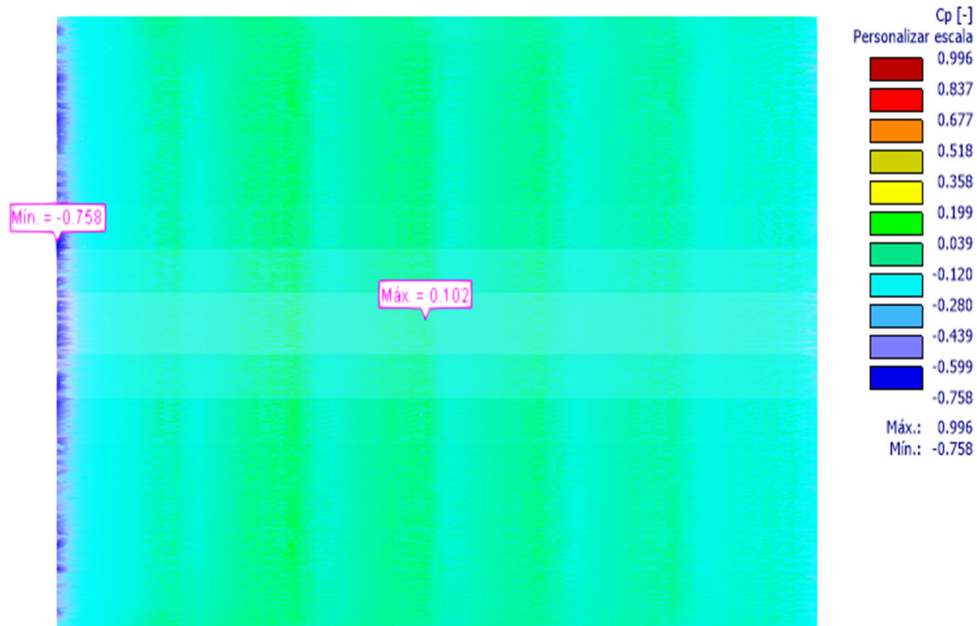
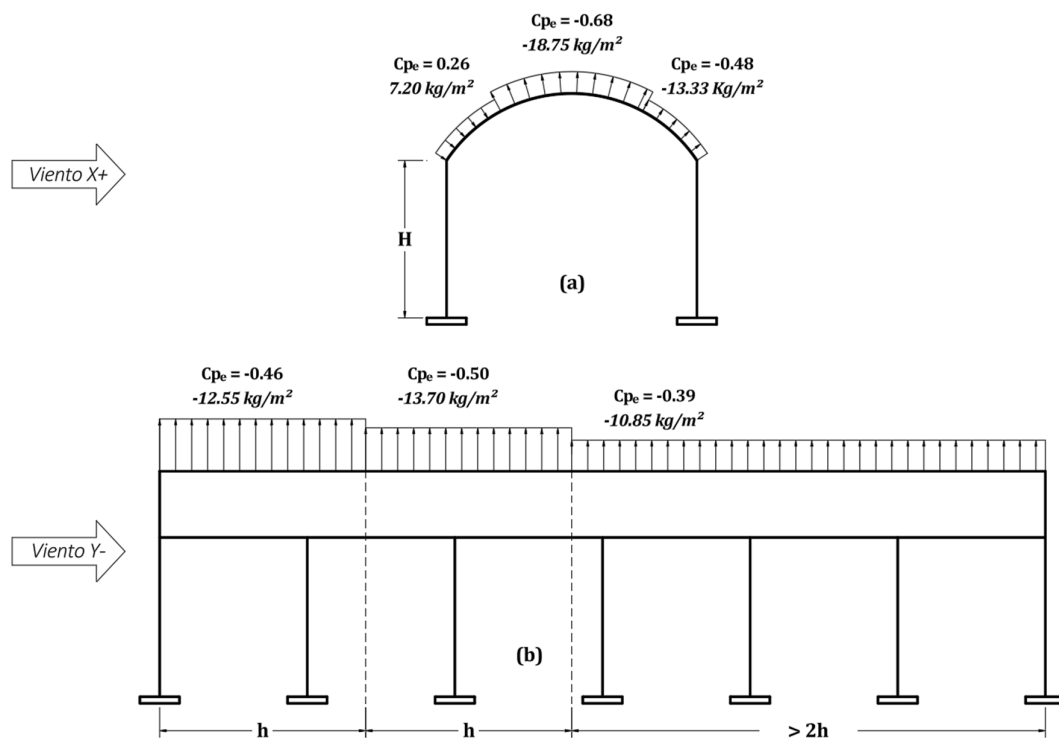


Figura 38

Cargas y coef. de presión simulación en Y- para el análisis estático



Nota. Las cargas de viento de la simulación de viento en Y-, son menores a los generados por el viento en X+Y-

3.5.8 Simulación en túnel de viento

3.5.8.1 Viento en X+

Figura 39

Campo de presiones

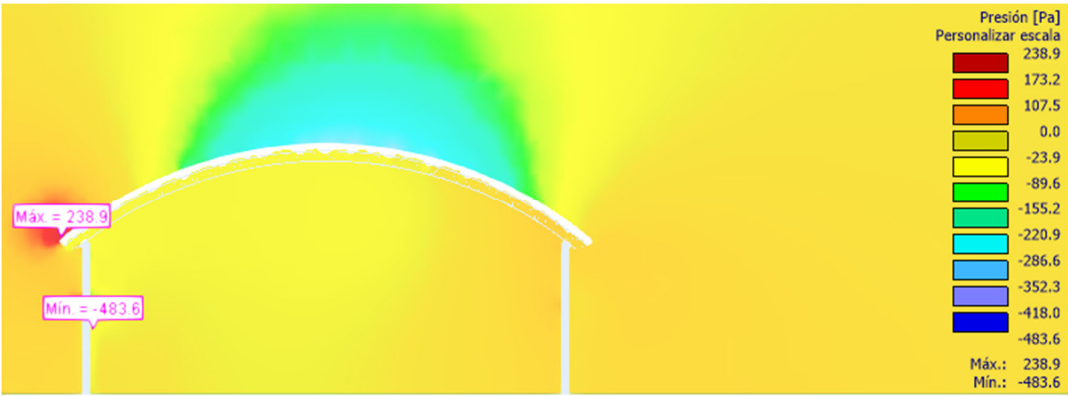


Figura 40

Campo de velocidades

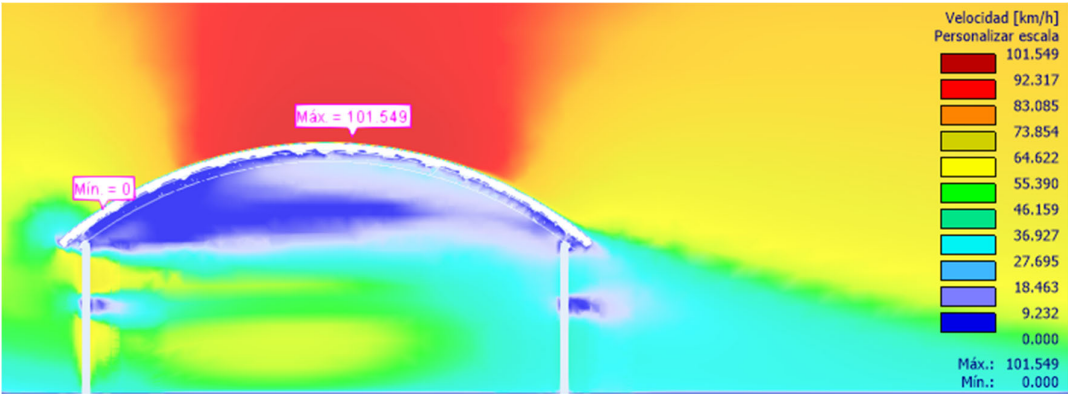
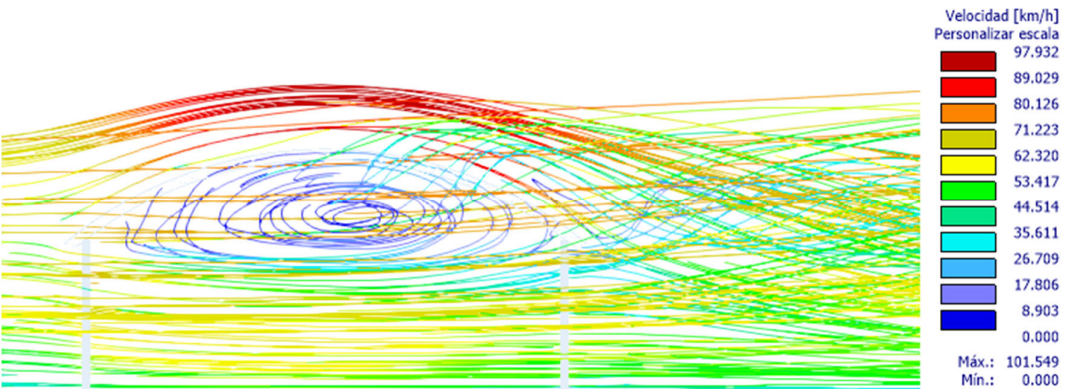


Figura 41

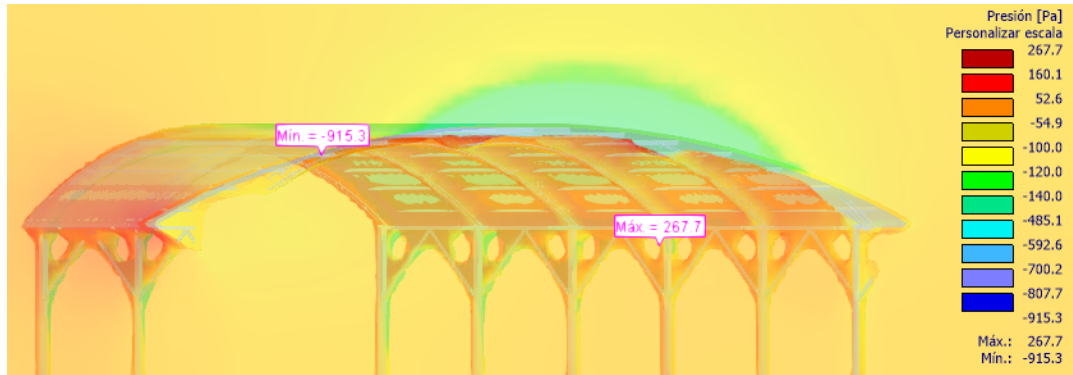
Líneas de corriente



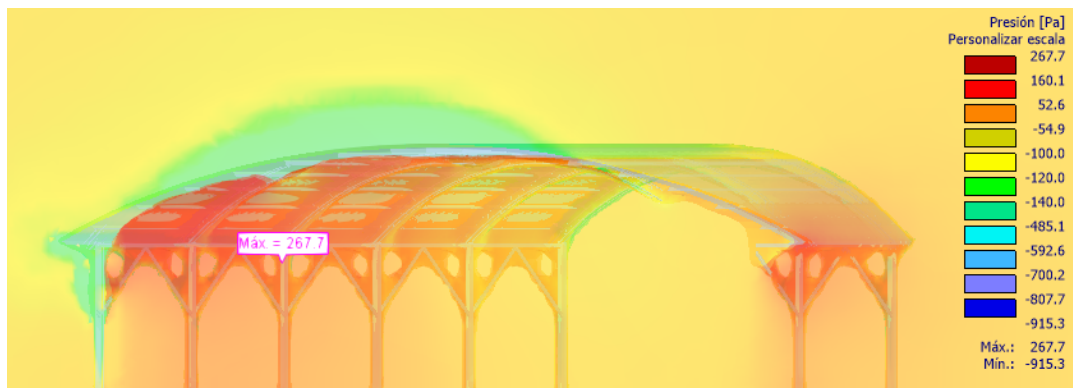
3.5.8.2 Viento en X+Y-

Figura 42

Campo de presiones



(a)



(b)

Nota. Los planos de corte (a) en la dirección X y (b) en la dirección Y

Figura 43

Líneas de corriente

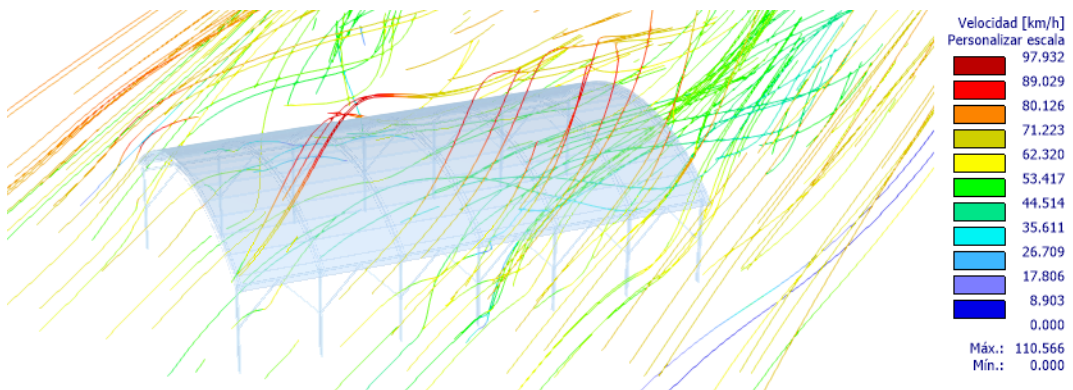
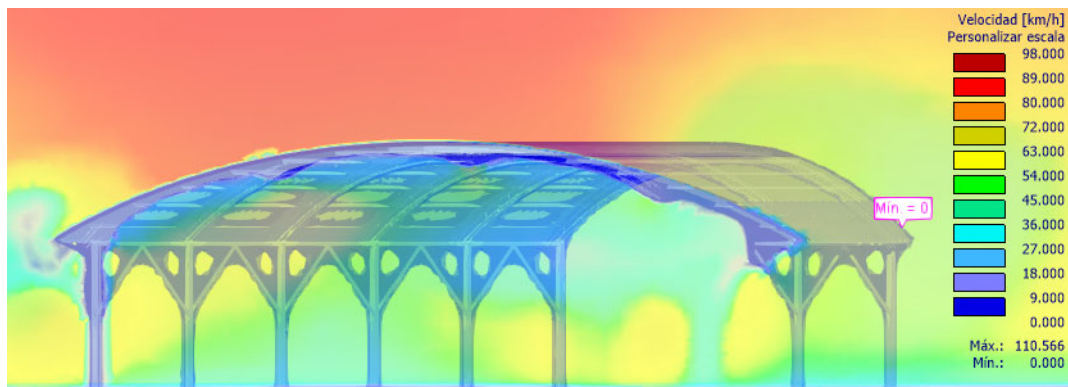
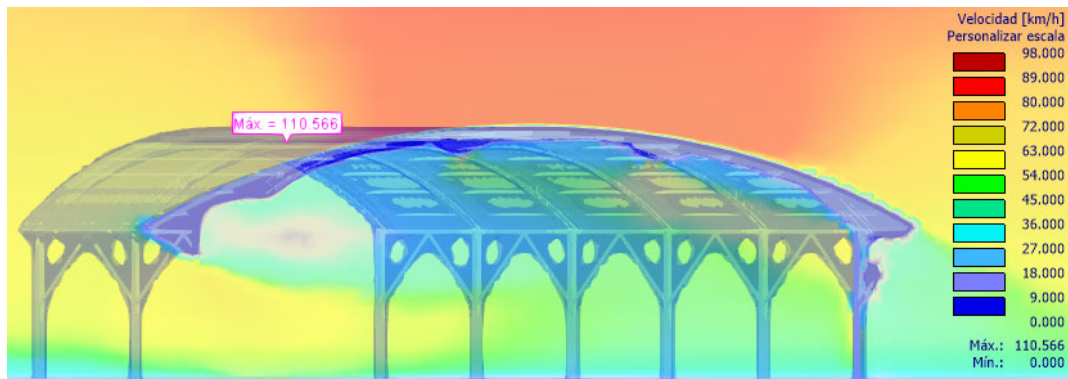


Figura 44

Campo de velocidades



Nota. Los planos de corte (a) en la dirección X y (b) en la dirección Y

3.5.8.3 Viento en Y-

Figura 45

Campo de presiones

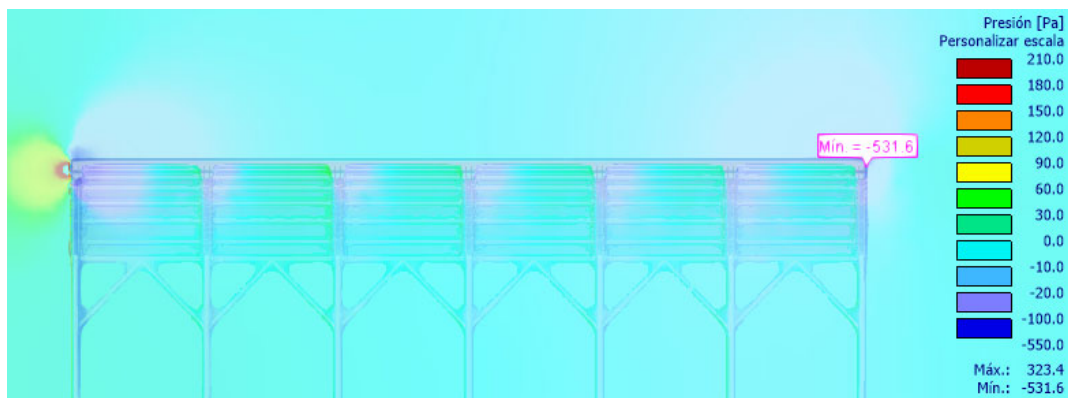


Figura 46

Campo de velocidades

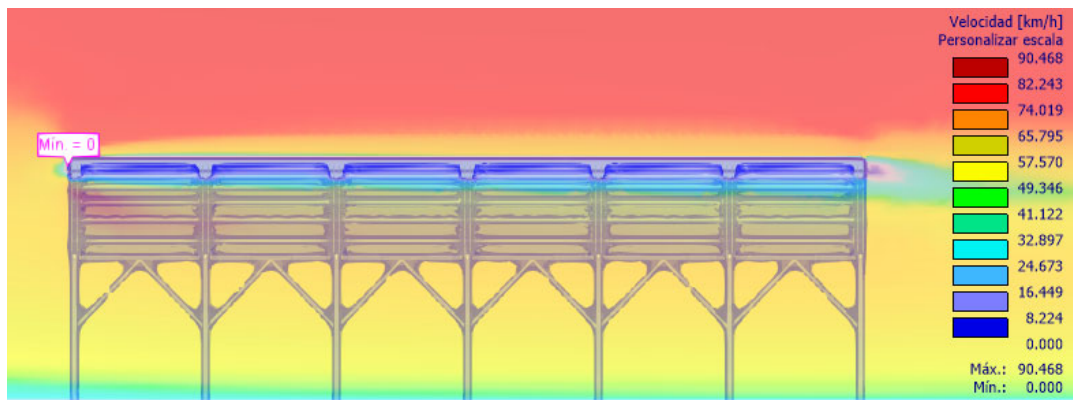
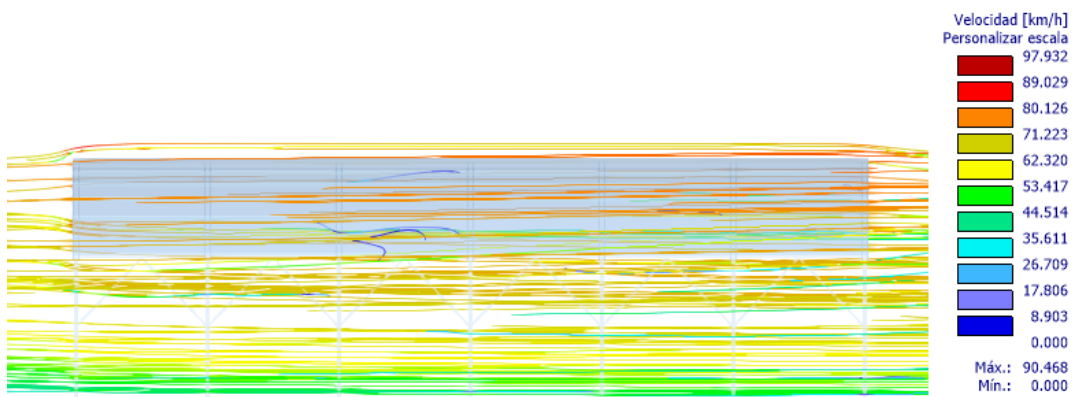


Figura 47

Líneas de corriente



Nota. La velocidad del viento no se ve afectada por la cobertura, y se tiene velocidades sobre el techo de aproximadamente 75 km/h

CAPÍTULO IV.

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 Análisis modal

De acuerdo a los criterios de la norma ASCE 7-22, de acuerdo a la sección 26.11, es importante determinar el periodo fundamental de la estructura, asociado al coeficiente de ráfaga, diferenciado las estructuras entre rígidas y flexibles.

Del análisis modal, Tabla 21, se tiene que el periodo fundamental es de 0.457 s. Menor a 1s, por lo que se considera que la estructura es rígida, y se puede considerar un coeficiente de ráfaga de 0.85, además, considerado la masa participante, resulta representativo analizar los modos de vibración de los tres primeros modos de vibración

4.1.1 Modos de vibración

Los modos de vibración de la estructura, Figura 24, muestran un comportamiento adecuado, siendo los dos primeros modos traslacionales, y el tercero rotacional, cabe precisar que se recomienda que no se presente torsión en los dos primeros modos de vibración.

4.2 Cargas de viento

4.2.1 Perfil del viento

De acuerdo a la norma ASCE 49-21, el perfil de viento considera un modelo logarítmico, para la definición de los perfiles de viento necesarios para la simulación, consideramos la categoría de exposición C, congruente con la norma. Obteniéndose un perfil de viento similar al de la norma E.020, que asume un modelo exponencial.

Como se observa, en la Figura 27, las variaciones respecto del perfil de viento definido por la norma ASCE 49-21, para los primeros 20 metros es de 5.38% respecto de la norma E.020, y de 10.54% respecto del ASCE 7-22, esto se debe a la reducción que se hace por el coeficiente de ráfaga, factor que no considera la norma peruana.

Si consideramos un coeficiente de ráfaga $G = 1$, obtenemos variaciones menores, en los 20 primeros metros una variación de 2.96% y de 6.35% a los 60 metros.

4.2.2 Cargas y coeficientes de presión

4.2.2.1 Norma E.020

Las variaciones porcentuales, de la Tabla 22, muestran correlación entre la variación del coeficiente de presión y las cargas de viento, cuando comparamos la simulación dinámica del viento con la norma E.020, con una variación máxima de 26.0% y una mínima de 47.10%, y de -78% aproximadamente para la dirección Y-, esto se debe a la similitud del perfil de viento en los 20 primeros metros del perfil.

4.2.2.2 Norma ASCE 7-22

Las variaciones porcentuales, de la Tabla 23, no muestran correlación entre la variación del coeficiente de presión y las cargas de viento, cuando comparamos la simulación dinámica del viento con la norma ASCE 7-22, con una variación para los coeficientes de presión máxima de 71.11% y una mínima de 22.72% para la dirección X+, y de 30.0% y -48.88% para la dirección Y-; para las cargas de viento, variación máxima de 43.48% y una mínima de 143.0% para la dirección X+, y de 94.44% y -24.98% para la dirección Y-. esto se debe a las diferencias del perfil de viento en los 20 primeros metros del perfil, que supera el 10%

4.2.3 Desplazamientos máximos

Para el caso de carga de viento, se observa en la Figura 28, que la variación respecto de la norma ASCE 7-22 de la norma peruana, es de -66.53% en X y -21.43% en Y, sin embargo comparado con el túnel de viento, la reducción en X es de 45.71% y se muestra un incremento en Y, por la consideración de la multidireccionalidad del viento, incremento en el desplazamiento de 63.57%, a diferencia de lo que sucede con la norma ASCE 7-22 que muestra un incremento de 62.19% en X y 108.18% en Y para alcanzar el desplazamiento de que genera las cargas de la simulación dinámica.

Para las combinaciones donde participa la carga de viento, la variación de la norma E.020 comparada con la norma ASCE es del -24.82 al -31.67, y la variación respecto de las combinaciones de diseño del ASCE 7-22 con la simulación de viento es de -27.40 al 31.21%, mostrando comportamiento parecido, las combinaciones de diseño de código ASCE 7-22.

4.3 Fuerzas basales

4.3.1 Momentos basales

En la Figura 29, para las fuerzas basales se observa que, el momento basal M_x de acuerdo a la norma E.020, es casi cero, los casos de viento no generan momento volcante, a diferencia de los casos de viento de la norma ASCE7-22 o de la simulación dinámica.

Además, para el momento basal M_y se reduce en 87.8% comparado con la norma ASCE 7-22, y 68.5% comparado con las combinaciones de diseño del ASCE con los casos de carga de la simulación y del 58.10% con las combinaciones de la norma peruana con los casos de carga de la simulación. Similar comportamiento se observa en los cortantes basales, con variaciones de 88.4%, 67.9% y 58.3%, sin presentarse cortante basal en la dirección Y.

Para la fuerza vertical, se observa una reducción es de 8.4%, comparado con la norma ASCE 7-22, y 9.60% comparado con las combinaciones de diseño del ASCE con los casos de carga de la simulación y del 13.2% con las combinaciones de la norma peruana con los casos de carga de la simulación.

4.4 Carga mínima de viento

De acuerdo al código ASCE 7-22, se establece una carga mínima de 78.51 kg/m² aplicado a la proyección vertical de la cobertura, cabe precisar que, de acuerdo a lo indicado por Stafford, T (2010) la velocidad del viento para tiene que ser superior a 254 km/h para considera carga mínima de viento, expresado de otra manera, la edificación debería ubicarse en zonas propensas a huracanes (pág. 51), por lo que no se considera.

4.5 Túnel de viento

Con la finalidad de determinar la distribución de cargas de viento, tomamos como referencia la simulación realizada, en comparación con las normas analizadas.

4.5.1 Viento en X+

Del campo de presiones y de velocidades (Figura 39 y Figura 40), observamos que, la presiones y velocidades sobre la cobertura, muestras tres sectores bien definidos, al igual que la norma ASCE 7-22, pudiéndose diferenciar en el cuarto de barlovento, presiones y

succiones. mostrándose una mejor aproximación al modelo de simulación, que la norma E.020.

De las líneas de corriente, Figura 41, se observa, que el viento genera vórtices de bajo de la cobertura, de baja velocidad, reduciendo la succión que se presenta en la mitad central y el cuarto de sotavento. Por consideraciones prácticas, se considera la succión promedio que se presenta en estas zonas, considerando el coeficiente de presión interna igual a cero.

4.5.2 Viento en X+Y-

El campo de presiones y de velocidades (Figura 42 y Figura 44), para la dirección X+Y-, sobre la cobertura, muestra un comportamiento similar a la simulación del viento en la dirección X+, diferenciándose tres sectores, se observa además campos de baja presión por debajo de la cobertura, por los vórtices de baja velocidad que se muestran en la Figura 43.

Además, si consideramos la integración de las presiones perpendiculares al eje de la cobertura, observamos que se presenta valores considerables (Tabla 28) para la componente del viento en la dirección paralela al eje de la cobertura, mayores, a los generados por el viento en la dirección Y-

4.5.3 Viento en Y-

Los gráficos presentados de la simulación dinámica de viento Y- (Figura 45 y Figura 46), confirma la zonificación indicada en el código ASCE 7-22, mostrada en el apartado 3.4.3, para el viento en Y-, mostrando las bajas presiones que se genera en la cobertura, además se observa que no se genera ningún tipo de turbulencia (Figura 47), con valores menores a los generado por el viento en la dirección X+Y- (Tabla 29).

CAPÍTULO V.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- De la simulación del viento (CFD), observamos que las fuerzas de presión interna, son mínimas, con velocidades de viento en el vórtice interior de 8.9 km-h, por lo que las presiones internas son mínimas, considerándose como parte de las acciones externas, y tomando un coeficiente de presión interna igual a 0, como se indica en la norma ASCE 7-22
- La distribución de presiones y coeficientes de presión externa sobre la cobertura, muestra tres zonas bien diferenciadas, 1/4 de barlovento, 1/2 central y 1/4 de sotavento, en el 1/4 de barlovento se muestra dos sectores, en el primero se genera presiones y en el segundo succiones, comportamiento que asume la norma E.020, indicando para barlovento presiones y succiones.
- Las variaciones porcentuales de los coeficientes y cargas viento, del modelo CFD, comparada con la norma, muestra correlación, con variaciones de 26.0% y - 47.10% en la dirección X+ y de 78.0% en la dirección Y-, por la similitud de los perfiles de viento hasta los 20 primeros metros, a diferencia de las variaciones que muestra la norma ASCE 7-22, por las diferencias en el perfil de viento que se presenta por el coeficiente de ráfaga.
- La variación de la presión dinámica del viento de la norma E.020 de 28.13, respecto del método direccional de la norma ASCE 7-22 de 18.59 es de 33.91 % que modifica la respuesta dinámica de la estructura en un 28.24% en desplazamientos laterales, 88.10% en los cortantes basales y 8.39% de la fuerza vertical, actuando en las combinaciones de diseño considerada.
- Para las condiciones de carga de viento, no se observa efectos torsionales en ninguna de las normas, por lo que, la consideración del viento X+Y- para determinar los coeficientes y cargas de presión en la dirección Y, no cubre la multidireccionalidad del viento.

- Las variaciones en el comportamiento se generan por la asimetría de presiones que se presentan en la cobertura, en la dirección perpendicular al eje de la cobertura. Que considera la norma E.020 y no se toma en cuenta en la norma ASCE 7-22.

5.2 Recomendaciones

- Se recomienda la verificación de las cargas y coeficientes de presión del modelo de simulación dinámica en un túnel de viento, con la instrumentalización de un túnel de viento, de modelos a escala, para la validación de los coeficientes de presión, incluyendo la tipología indicada en la norma E.020, de ser necesario actualizarla, con la finalidad de establecer valores que promueva una actualización de la norma peruana de viento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abad Ucañán, H. J., & León Escudero, G. A. (2020). *Evaluación estructural de un domo de acero de grandes luces con cobertura flexible en Paita, Piura*. [Tesis de pregrado], Universidad Ricardo Palma - Facultad de Ingeniería, Lima.
- American Society of Civil Engineers. (2021). *Wind tunnel testing for buildings and other structures*. Reston, Virginia, Estados Unidos: ASCE.
- American Society of Civil Engineers. (2022). *Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures*. Reston, Virginia, Estados Unidos: ASCE.
- Becerra Rodríguez, G. I. (2022). *Análisis por sismo y viento de un edificio con normativa ASCE*. [Tesis magistral], Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla.
- EADIC. (Marzo de 2014). Obtenido de eadic.com: <https://eadic.com/blog/entrada/tunel-de-viento-en-ingenieria-civil/>
- Hibbeler, R. C. (2020). *Structural Analysis* (10ª ed.). Harlow, United Kingdom: Pearson.
- Huerta Fernández, S. (Enero de 2003). El cálculo de estructuras en la obra de Gaudí. *Ingeniería Civil*, 121-133.
- Huerta Fernández, S. (2024). El análisis gráfico de equilibrio de arcos, bóvedas y edificios. Un esquema de su desarrollo histórico. *Revista de Historia de la Construcción*, 1-42. doi:10.4995/rdhc.2024.23120.
- López Perales, J. A. (2023). *Modelo de elementos finitos para el cálculo de arcos. Validación en estructuras agroindustriales de acero*. Universidad de Castilla - La Mancha, Cuenca.
- Ministerio de Educación. (2019). *Criterios de diseño para locales educativos de primaria y secundaria*. Lima, Perú.
- Ministerio de Educación. (2025). *Criterios generales de diseño para infraestructura educativa*. Lima, Perú: Normas Legales.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2020). *Norma E.020 - Cargas*. Lima, Perú: SENCICO.

- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2025). *Norma E.030 - Diseño sismorresistente*. Lima, Perú.
- Morales Rodríguez, P. A. (2015). *Diseño óptimo de pórticos poligonales de acero. Estudio de la unión del quiebro por el Método de los Elementos Finitos*. [Tesis doctoral], Universidad de Castilla - La Mancha, Ciudad Real.
- Ortiz Blancarte, S. R. (2018). *Estudio de los efectos del viento en edificio irregular de gran altura con pruebas experimentales en túnel de viento*. [Tesis de pregrado], Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Pacheco Erazo, A. O., & Tohala Parrales, H. (2015). *Comparación de métodos para el cálculo de la carga de viento usada en la construcción de edificios en el Ecuador*. [Tesis de pregrado], Universidad San Francisco De Quito, Quito.
- Piña Gutiérrez, J. A. (2021). *Obtención de coeficientes de presión y velocidades de viento en un conjunto de edificios mediante simulación CFD*. [Tesis de pregrado], Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Poma Munguia, Y. M., & Mendoza Espino, H. J. (2023). *Influencia de las fuerzas de viento basado en un análisis virtual CFD de túnel de viento y su análisis comparativo según la normativa E.020 y ASCE/SEI 7-16 en la respuesta estructural de edificios altos en la ciudad de Lima*. [Tesis de pregrado], Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Facultad de Ingeniería, Lima.
- Regalado Tesoro, F. (2007). *Breve introducción a las estructuras y sus mecanismos resistentes*. Madrid, España: Alicante CYPE Ingenieros.
- Stafford, T. E., & Reinhold, T. (2023). *Wind Loads: Guide to the wind load provisions of ASCE 7-22*. Reston, Virginia, Estados Unidos: ASCE PRESS.
- Suomi, I., & Vihma, T. (23 de Abril de 2018). Wind gust measurement techniques - from traditional anemometry to new possibilities. *Sensor (Basel, Switzerland)*. doi:10.3390/s18041300
- Torroja Miret, E. (2010). *Razón y ser de los tipos estructurales* (3ª ed.). (Ediciones Doce Calles, S.L., Ed.) Madrid, España.

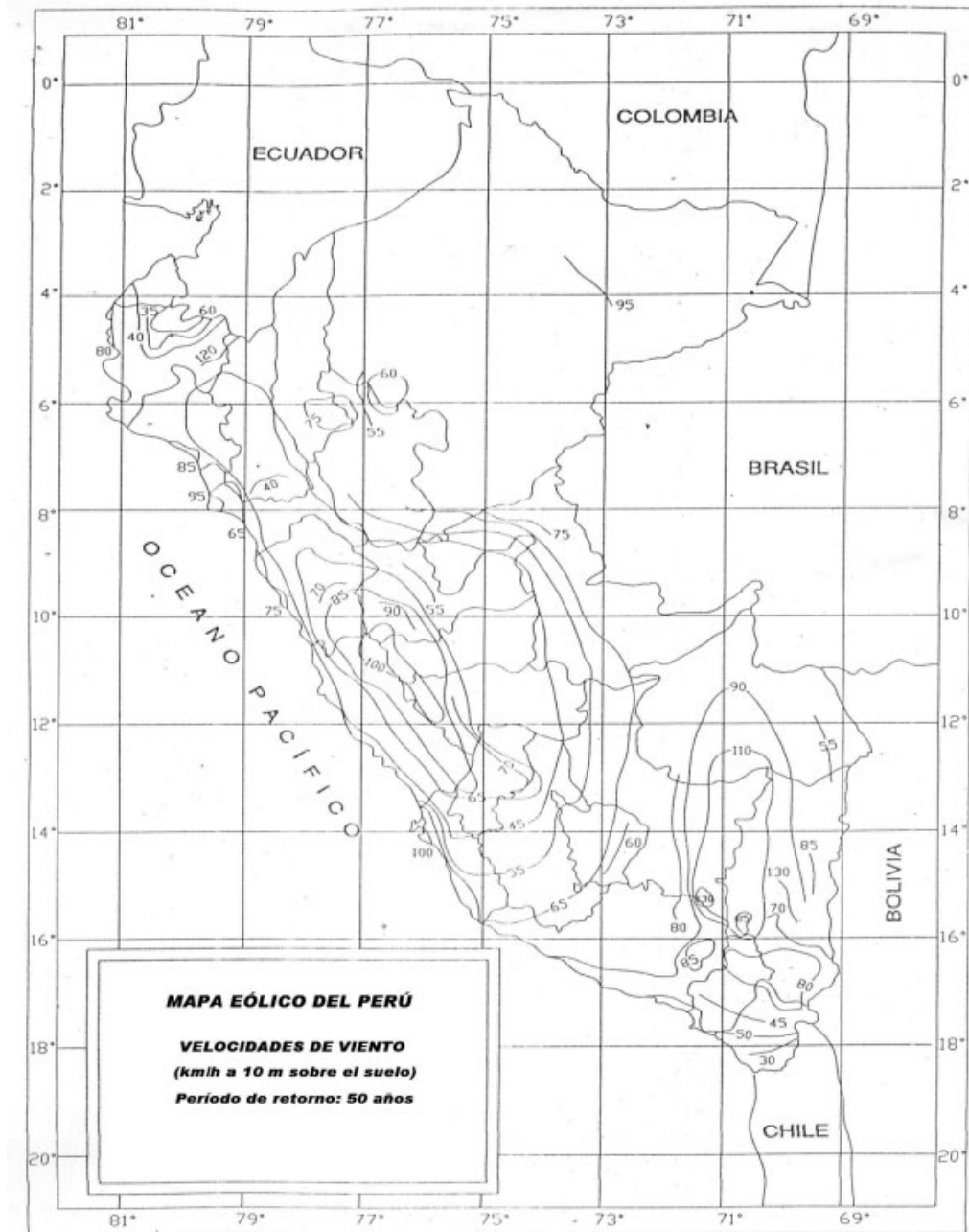
CAPÍTULO VI.

ANEXOS

6.1 Mapa eólico del Perú

Figura 48

Mapa eólico del Perú



Nota. Tomado de: Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2020, Norma E.020 Cargas.