



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ciencias (Estructuras)

Análisis no lineal de estabilidad de cubiertas autoportantes ante cargas dinámicas por viento mediante el método de elementos finitos

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Maestro en Ciencias (Estructuras)

Presenta:

Ing. Alejandro Ibarrola Pacheco

Dirigido por:

Dr. Jaime Moisés Horta Rangel

Dr. Jaime Moisés Horta Rangel
Presidente

Dr. Luis Francisco Pérez Moreno
Secretario

Dr. Iván Fermín Arjona Catzim
Vocal

Dr. Humberto Yáñez Godoy
Suplente

Dr. Enrique Rico García
Suplente

Centro Universitario
Querétaro, Qro.

Fecha (será el mes y año de aprobación del Consejo Universitario)

La presente obra está bajo la licencia:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



SinDerivadas — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.

RESUMEN

El uso de las cubiertas autoportantes tipo arcotecho juega un papel fundamental en diversos sectores, debido a su bajo costo, facilidad constructiva y capacidad de cubrir grandes claros. Sin embargo, este tipo de sistema estructural resulta endeble ante cargas de viento. El problema de estabilidad se denomina en ingeniería cuando una estructura sometida a altas cargas de compresión excede la carga crítica la cual el material es capaz de soportar, provocando una deformación fuera de su plano de forma súbita, afectando la estabilidad de la estructura y en algunos casos se presentan colapsos parciales o totales. En esta investigación se evaluó la estabilidad cubiertas tipo arcotecho con diferentes claros ante cargas por viento según el manual de obras civiles de diseño por viento de la Comisión Federal de Electricidad, edición 2020, así como las cargas dinámicas por viento a partir de una función tiempo historia, bajo el entorno de Ansys Workbench Mechanical. El objetivo principal de esta investigación fue estimar la estabilidad considerando imperfecciones y no linealidades ante cargas de viento, para evaluar su respuesta estructural. La metodología empleada para la estimación de las cargas críticas por pandeo se realizó mediante un análisis de estabilidad lineal para obtener una carga crítica inicial, a partir de la cual se generaron imperfecciones geométricas. Posteriormente, se incorporaron dichas imperfecciones a nuevos modelos añadiendo las no linealidades geométricas y del material, se aplicaron cargas de viento estáticas y dinámicas, con el fin evaluar la estabilidad y el comportamiento de la estructura. Los resultados indican que, en los métodos estáticos convencionales, la carga crítica con imperfecciones y no linealidades es mayor que la obtenida en análisis lineales, debido al efecto de membrana que incrementa la rigidez del sistema. Sin embargo, incluso con este aumento de capacidad de carga, la falla estructural ocurre antes de alcanzar los límites de diseño y servicio en la mayoría de los casos analizados. Por lo que resulta más representativo realizar análisis de estabilidad ante cargas dinámicas por viento. Se concluye que es esencial realizar revisiones de estabilidad en estructuras tipo arcotecho, ya que pueden perder estabilidad antes de fallar por esfuerzos o deformaciones.

(Palabras clave: arcotecho, pandeo, análisis no lineal, función tiempo-historia de viento)

ABSTRACT

The use of self-supporting arched roofs plays a fundamental role in various sectors due to their low cost, ease of construction, and ability to cover large spans. However, this type of structural system is weak when subjected to wind loads. The stability problem is referred to in engineering as occurring when a structure subjected to high compressive loads exceeds the critical load that the material is capable of withstanding, causing sudden deformation outside its plane, affecting the stability of the structure and, in some cases, leading to partial or total collapse. This research evaluated the stability of arched roofs with different spans under wind loads according to *the Comisión Federal de Electricidad, Edición 2020*, as well as dynamic wind loads based on a time history function, using Ansys Workbench Mechanical. The main objective of this research was to estimate stability considering imperfections and nonlinearities under wind loads in order to evaluate their structural response. The methodology used to estimate critical buckling loads was based on a linear stability analysis to obtain an initial critical load, from which geometric imperfections were generated. Subsequently, these imperfections were incorporated into new models by adding geometric and material nonlinearities, and static and dynamic wind loads were applied in order to evaluate the stability and behavior of the structure. The results indicate that, in conventional static methods, the critical load with imperfections and nonlinearities is greater than that obtained in linear analyses, due to the membrane effect that increases the stiffness of the system. However, even with this increase in load capacity, structural failure occurs before reaching the design and service limits in most of the cases analyzed. Therefore, it is more representative to perform stability analyses under dynamic wind loads. It is concluded that it is essential to perform stability checks on arched roof structures, as they can lose stability before failing due to fatigue or deformation.

(Keywords: K super span, buckling, nonlinear analysis, wind time-history function)

DEDICATORIAS

A mis padres por su amor y apoyo incondicional.

“Tras el vivir y el soñar, está lo que más importa, el despertar”.

“La verdadera valentía está en vivir, incluso cuando el mundo te pide morir por él.”

AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) antes CONAHCYT por el apoyo económico para llevar a cabo esta investigación.

A la Universidad Autónoma de Querétaro y la Facultad de Ingeniería división posgrado, por recibirme con los brazos abiertos.

A mis compañeros de Luis, Rafael, Juan Manuel y Emiliano, por su amistad, los ratos vividos y el compañerismo a lo largo de la maestría.

A mis compañeros de cubículo los Golden's boys, los Misas, los Gallos y los Julios, por su amistad, apoyo desinteresado y buenos ratos durante mi estadía en la maestría.

A mi asesor, el Dr. Jaime Horta Rangel, por proponerme el tema de estabilidad, así como por su constante seguimiento, valiosas enseñanzas, observaciones y apoyo incondicional a lo largo de esta investigación.

Al Dr. Francisco Pérez Moreno y al Dr. Iván Fermin Arjona Catzim, por su amistad, enseñanzas, seguimiento en mi formación académica y su apoyo en todo momento.

Al Dr. Humberto Yáñez Godoy, por darme la oportunidad de realizar la estancia de investigación en la Université de Bordeaux.

A todos los profesores de cada asignatura que tuve a lo largo de la maestría, ya que pude aprender algo de cada uno de ustedes.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN.....	2
ABSTRACT	3
ÍNDICE DE FIGURAS.....	9
ÍNDICE DE TABLAS	24
1. INTRODUCCIÓN	26
1.1 JUSTIFICACIÓN	29
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	30
2. ANTECEDENTES	31
2.1 SISTEMA DE LAMINADO ARCOTECHO.....	31
2.2 CLASIFICACIÓN DE CUBIERTAS	33
2.3 DEFINICIÓN DE ESTABILIDAD	34
2.4 FALLAS POR ESTABILIDAD EN ARCOTECHOS.....	35
2.5 MODELADO DE ARCOTECHOS POR ELEMENTOS FINITOS.....	36
2.6 ESTABILIDAD.....	36
2.7 ANÁLISIS POR VIENTO ANTE FUNCIÓN SINTÉTICA (TIEMPO-HISTORIA).....	41
3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	45
3.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE ESTABILIDAD DINÁMICA	45
3.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE ESTABILIDAD NO LINEAL	50
3.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE ESTABILIDAD LINEAL.....	53
3.4 DISEÑO POR VIENTO SEGÚN REGLAMENTO.....	57
3.4.1 <i>Determinación de la velocidad de diseño, VD</i>	<i>58</i>
3.4.2 <i>Determinación de la presión básica de diseño, qz.....</i>	<i>58</i>
3.5 FUNCIONES SINTÉTICAS POR VIENTO	60
3.5.1 <i>Espectros de potencia.....</i>	<i>60</i>
3.5.2 <i>Espectro de potencia de Von Karmán.....</i>	<i>60</i>
3.5.3 <i>Espectro de potencia de Davenport.....</i>	<i>61</i>
3.5.4 <i>Función de autocorrelación</i>	<i>61</i>
3.5.5 <i>Matriz de Toeplitz.....</i>	<i>62</i>

3.5.6	<i>Ecuaciones de Yule-Walker</i>	62
3.5.7	<i>Modelo autorregresivo</i>	62
4.	HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	64
4.1	HIPÓTESIS	64
4.2	OBJETIVO GENERAL	64
4.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	64
1.	<i>Realizar modelos numéricos por elementos finitos, que permitan obtener las cargas críticas por estabilidad lineal.</i>	64
2.	<i>Desarrollar modelos numéricos con el método de elementos finitos, considerando imperfecciones y efectos no lineales, para calcular la carga crítica de estabilidad.</i>	64
3.	<i>Generar las cargas dinámicas por viento a través de funciones de viento tiempo historia.</i> 64	
4.	<i>Estimar la estabilidad ante cargas de viento dinámico y evaluar los efectos que se generan en términos de esfuerzos, deformaciones y resistencia.</i>	64
5.	METODOLOGÍA	65
5.1	DESARROLLO DE MODELOS NUMÉRICOS PARA ANÁLISIS DE ESTABILIDAD LINEAL.....	66
5.1.1	<i>Definición de topologías y de materiales</i>	66
5.1.2	<i>Condiciones de frontera</i>	67
5.1.3	<i>Modelado y definición de elementos finitos</i>	68
5.1.4	<i>Calidad de mallado</i>	69
5.1.5	<i>Casos de carga</i>	69
5.2	ELABORACIÓN DE MODELOS NUMÉRICO PARA ANÁLISIS DE ESTABILIDAD NO LINEAL CON IMPERFECCIONES 76	
5.2.1	<i>Imperfecciones</i>	76
5.2.2	<i>No linealidades del material</i>	76
5.2.3	<i>No linealidades geométricas</i>	77
5.2.4	<i>Aplicación de cargas por viento y análisis incremental</i>	77
5.3	GENERACIÓN DE FUNCIÓN VIENTO TIEMPO-HISTORIA	79
5.4	ESTIMACIÓN DE ESTABILIDAD NO LINEAL ANTE CARGAS DINÁMICAS POR VIENTO.....	83
5.4.1	<i>Comparativa de los resultados obtenidos</i>	84

6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	85
6.1	ANÁLISIS DE ESTABILIDAD LINEAL.....	86
6.2	ESTABILIDAD NO LINEAL ESTÁTICA	87
6.2.1	<i>Revisión de esfuerzos y deformaciones ante cargas estáticas por viento.....</i>	<i>95</i>
6.3	GENERACIÓN DE FUNCIONES SINTÉTICAS DE VIENTO (TIEMPO-HISTORIA).....	100
6.4	ESTABILIDAD NO LINEAL DINÁMICA	101
6.4.1	<i>Revisión de esfuerzos y deformaciones ante cargas dinámicas por viento.....</i>	<i>107</i>
6.4.2	<i>Análisis de la amplitud de las oscilaciones</i>	<i>109</i>
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	114
8.	REFERENCIAS.....	116
9.	ANEXOS.....	116
9.1	ESTABILIDAD NO LINEAL ESTÁTICA	123
9.1.1	<i>Curvas de equilibrio carga-deformación, viento perpendicular a la cubierta</i>	<i>123</i>
9.1.2	<i>Curvas de equilibrio carga-deformación, viento paralelo a la cubierta</i>	<i>126</i>
9.1.3	<i>Revisión de esfuerzos y deformaciones perpendicular a la cubierta</i>	<i>127</i>
9.1.4	<i>Revisión de esfuerzos y deformaciones paralela la cubierta.....</i>	<i>130</i>
9.2	GENERACIÓN DE FUNCIONES SINTÉTICAS DE VIENTO	132
9.3	ESTABILIDAD NO LINEAL DINÁMICA	134
9.3.1	<i>Curvas de deformaciones contra incrementos de carga en el tiempo</i>	<i>134</i>
9.3.2	<i>Revisión de esfuerzos y deformaciones ante cargas dinámicas por viento.....</i>	<i>140</i>
9.3.3	<i>Curvas de oscilaciones en el tiempo</i>	<i>147</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructuraciones típicas del sistema arcotecho en México.	26
Figura 2. Proceso constructivo de sistema arcotecho. Fuente: Google (2025)	31
Figura 3. Máquina roladora ABM 240 para sección arcotecho MIC 240. M.I.C. Industries Inc. www.micindustries.com	31
Figura 4. Esquema del proceso constructivo de arco techo, a) Generación de sección trapezoidal y primer corrugado, b) Conformado del segundo corrugado y preparación de apoyos, c) Apilado de sección tipo arcotecho para engargolarse por tramos, d) Habilitado de tramos de arcotecho y fijación de apoyos.	32
Figura 5. Secciones tipo sistema arcotecho. (K Super span).....	32
Figura 6. Arcotecho parabólico, semicircular e híbrido.....	33
Figura 7. Estabilidad e inestabilidad de un sistema.....	34
Figura 8. Estructuras estables e inestables.....	34
Figura 9. Fallas por pandeo local en arcotechos.....	35
Figura 10. Colapso de cubiertas en bodegas de central de abastos CDMX por granizo (izquierda) y colapso de cubierta en escuela por acumulación de granizo Texcaltitlán, Edomex (derecha). Fuente: Google (2025).....	35
Figura 11. Colapso de arcotechos por fuertes vientos en escuela en Chihuahua (derecha) y en Chiapas. (izquierda) Fuente: Google (2025).	35
Figura 12. Sistema estable e inestable.	50
Figura 13. Inestabilidad por pandeo no lineal considerando imperfecciones geométricas.....	53

Figura 14. Curva de equilibrio carga contra deformación. Nótese que la carga crítica por pandeo lineal es mayor a la estimada, considerando imperfecciones y no linealidades.	56
Figura 15. Mapa de regionalización eólica de la República Mexicana, periodo de retorno de 50 años. (CFE,2020).....	58
Figura 16. Diagrama de flujo.	65
Figura 17. Parámetros geométricos del modelo.....	66
Figura 18. Sección de análisis de arcotecho MIC 240.	67
Figura 19. Condiciones de frontera de acuerdo con fijación del sistema arcotecho.	67
Figura 20. Sección sin doble corrugado (izquierda), sección con doble corrugado. (derecha).....	68
Figura 21. Elemento SHELL 181. (Ansys Inc,2017).....	68
Figura 22. El viento es perpendicular a la cubierta. ($\Theta=0^\circ$).....	70
Figura 23. Cargas por viento según CFE,2020, modelos con claro 15m. Dirección $\Theta=0^\circ$	71
Figura 24. Cargas por viento según CFE,2020, modelos con claro 20m. Dirección $\Theta=0^\circ$	71
Figura 25. Cargas por viento según CFE,2020, modelos con claro 25m. Dirección $\Theta=0^\circ$	71
Figura 26. Cargas por viento según CFE,2020, modelos con claro 30m. Dirección $\Theta=0^\circ$	71
Figura 27. El viento es paralelo a la cubierta ($\Theta=90^\circ$).....	72

Figura 28. Cargas por viento según CFE,2020, modelos con claro 15m. Dirección $\Theta=90^\circ$	73
Figura 29. Cargas por viento según CFE,2020, modelos con claro 20m. Dirección $\Theta=90^\circ$	73
Figura 30. Cargas por viento según CFE,2020, modelos con claro 25m. Dirección $\Theta=90^\circ$	74
Figura 31. Cargas por viento según CFE,2020, modelos con claro 30m. Dirección $\Theta=90^\circ$	74
Figura 32. Metodología para análisis de estabilidad lineal.	75
Figura 33. Curva esfuerzo-deformación acero ASTM A1008 Gr33.	77
Figura 34. Metodología para análisis de estabilidad lineal no lineal estático.	78
Figura 35. Espectro de potencia de Davenport. Para una velocidad media (V_{med}) de 21.97 m/s y un índice de rugosidad (κ) de 0.05. Para 1000 puntos (N) y una frecuencia (f_s) de 10 Hz.	79
Figura 36. Pseudocódigo generación de modelo autorregresivo para funciones de viento.....	81
Figura 37. Metodología para generación de función viento.....	82
Figura 38. Metodología para análisis de estabilidad no lineal dinámico.....	83
Figura 39. Comparativa de resultados obtenidos.....	84
Figura 40. Resultados obtenidos por pandeo lineal y pandeo no lineal. En dirección del viento perpendicular ($\Theta=0^\circ$). Claro de 15 m.	88
Figura 41. Resultados obtenidos por pandeo lineal y pandeo no lineal. En dirección del viento perpendicular ($\Theta=0^\circ$). Claro de 20 m.	89

Figura 42. Resultados obtenidos por pandeo lineal y pandeo no lineal. En dirección del viento perpendicular ($\Theta=0^\circ$). Claro de 25 m.	89
Figura 43. Resultados obtenidos por pandeo lineal y pandeo no lineal. En dirección del viento perpendicular ($\Theta=0^\circ$). Claro de 30 m.	89
Figura 44. Resultados obtenidos por pandeo lineal y pandeo no lineal. En dirección del viento paralela ($\Theta=90^\circ$). Claro 15m.	90
Figura 45. Resultados obtenidos por pandeo lineal y pandeo no lineal. En dirección del viento paralela ($\Theta=90^\circ$). Claro 20m.	91
Figura 46. Resultados obtenidos por pandeo lineal y pandeo no lineal. En dirección del viento paralela ($\Theta=90^\circ$). Claro 25m.	91
Figura 47. Resultados obtenidos por pandeo lineal y pandeo no lineal. En dirección del viento paralela ($\Theta=90^\circ$). Claro 30m.	91
Figura 48. Comparativa de curva deformación contra incrementos de cargas. Para los cuatro casos de carga en un claro de 15 m. Dirección del viento perpendicular a la cubierta. ($\Theta=0^\circ$)	92
Figura 49. Comparativa de curva deformación contra incrementos de cargas. Para los dos casos de carga en un claro de 20 m. Dirección del viento perpendicular a la cubierta. ($\Theta=0^\circ$).....	92
Figura 50. Comparativa de curva deformación contra incrementos de cargas. Para los dos casos de carga en un claro de 25 m. Dirección del viento perpendicular a la cubierta. ($\Theta=0^\circ$) Nótese la diferencia entre casos 7 y 8 debido al efecto membrana.	93
Figura 51. Comparativa de curva deformación contra incrementos de cargas. Para los dos casos de carga en un claro de 30 m. Dirección del viento perpendicular a la cubierta. ($\Theta=0^\circ$).....	93

Figura 52. Curva deformación contra incrementos de cargas. Caso 11 en claro 15 m. Dirección del viento paralela a la cubierta. ($\Theta=90^\circ$)	93
Figura 53. Curva deformación contra incrementos de cargas. Caso 12 en claro 20 m. Dirección del viento paralela a la cubierta. ($\Theta=90^\circ$)	94
Figura 54. Curva deformación contra incrementos de cargas. Caso 13 en claro 25 m. Dirección del viento paralela a la cubierta. ($\Theta=90^\circ$)	94
Figura 55. Curva deformación contra incrementos de cargas. Caso 14 en claro 30 m. Dirección del viento paralela a la cubierta. ($\Theta=90^\circ$)	94
Figura 56. El esfuerzo de membrana frente al esfuerzo de flexión para el caso 3. El esfuerzo dominante es el esfuerzo de membrana. Por lo tanto, existe un incremento en la capacidad de carga de la cubierta en el caso de carga 3. Donde la carga critica por estabilidad no lineal es mayor a la obtenida en la estabilidad lineal.	97
Figura 57. El esfuerzo de membrana frente al esfuerzo de flexión para el caso 10. El esfuerzo dominante corresponde al esfuerzo de flexión. Consecuentemente, no hay efecto de membrana para el caso de carga 10. Donde la carga critica por estabilidad lineal es mayor a la no lineal.	97
Figura 58. Función sintética 1 (historial de velocidades) y comprobación del modelo AR respecto al espectro de potencia de Davenport.	101
Figura 59. Curva deformación contra incrementos de cargas. Caso 1 en claro 15 m. El sistema se vuelve inestable con una presión de 50.63 kg/m ²	102
Figura 60. Curva deformación contra incrementos de cargas. Caso 2 en claro 15 m. El sistema se vuelve inestable con una presión de 102.58 kg/m ²	102
Figura 61. Curva deformación contra incrementos de cargas. Caso 3 en claro 15 m. El sistema no pierde estabilidad, por lo tanto, no hay carga crítica.....	102
Figura 62. Curva deformación contra incrementos de cargas. Caso 4 en claro 15 m. El sistema se vuelve inestable con una presión de 81.10 kg/m ²	103

Figura 63. Curva deformación contra incrementos de cargas. Caso 5 en claro 15 m. El sistema se vuelve inestable con una presión de 57.62 kg/m ²	103
Figura 143. Caso 15, las oscilaciones presentaron fluctuaciones, produciendo una pérdida de estabilidad que indujo al colapso del arcotecho en el segundo 30....	109
Figura 144. Zona crítica de pandeo para el caso 15, donde se aprecian fallas por pandeo local.	109
Figura 145. Caso 16, las oscilaciones presentaron fluctuaciones, produciendo una pérdida de estabilidad que indujo al colapso del arcotecho en 15 segundos.....	110
Figura 146. Zona crítica de pandeo para el caso 16, donde se aprecian fallas por pandeo local.	110
Figura 147. Caso 17, las oscilaciones presentaron fluctuaciones, produciendo una pérdida de estabilidad que indujo al colapso del arcotecho en 100 segundos....	110
Figura 148. Zona crítica de pandeo para el caso 17, donde se aprecian fallas por pandeo local.	111
Figura 149. Caso 18, las oscilaciones presentaron fluctuaciones, produciendo una pérdida de estabilidad que indujo al colapso del arcotecho en 36 segundos.....	111
Figura 150. Zona crítica de pandeo para el caso 18, donde se aprecian fallas por pandeo local.	111
Figura 151. Caso 19, las oscilaciones presentaron fluctuaciones, produciendo una pérdida de estabilidad que indujo al colapso del arcotecho en 12 segundos.....	112
Figura 152. Zona crítica de pandeo para el caso 19, donde se aprecian fallas por pandeo local.	112
Figura 72. Curva carga deformación, caso 1.....	123
Figura 73. Curva carga deformación, caso 2.....	123

Figura 74. Curva carga deformación, caso 3.....	123
Figura 75. Curva carga deformación, caso 4.....	124
Figura 76. Curva carga deformación, caso 5.....	124
Figura 77. Curva carga deformación, caso 6.....	124
Figura 78. Curva carga deformación, caso 7.....	124
Figura 79. Curva carga deformación, caso 8.....	125
Figura 80. Curva carga deformación, caso 9.....	125
Figura 81. Curva carga deformación, caso 10.....	125
Figura 82. Curva carga deformación, caso 1 y 2,.....	126
Figura 83. Curva carga deformación, caso 3 y 4.....	126
Figura 84. Caso 1, deformación total máxima de 71,90 mm a la izquierda y el esfuerzo normal máxima de -135,57 MPa a la derecha.	127
Figura 85. Caso 2, deformación total máxima de 96,21 mm a la izquierda y el esfuerzo normal máxima de 109,07 MPa a la derecha.	127
Figura 86. Caso 3, deformación total máxima de 41,17 mm a la izquierda y el esfuerzo normal máxima de 88,9 MPa a la derecha.	127
Figura 87. Caso 4, deformación total máxima de 53,47 mm a la izquierda y el esfuerzo normal máxima de 78,29 MPa a la derecha.	128
Figura 88. Caso 5, deformación total máxima de 28,28 mm a la izquierda y el esfuerzo normal máxima de 26,14 MPa a la derecha.	128
Figura 89. Caso 6, deformación total máxima de 79,54 mm a la izquierda y el esfuerzo normal máxima de 71,83 MPa a la derecha.	128

Figura 90. Caso 7, deformación total máxima de 23,73 mm a la izquierda y el esfuerzo normal máxima de 16,61 MPa a la derecha.	129
Figura 91. Caso 8, deformación total máxima de 125,71 mm a la izquierda y el esfuerzo normal máxima de 225,11 MPa a la derecha.	129
Figura 92. Caso 9, deformación total máxima de 19,15 mm a la izquierda y el esfuerzo normal máxima de 13,26 MPa a la derecha.	129
Figura 93. Caso 10, deformación total máxima de 19,46 mm a la izquierda y el esfuerzo normal máxima de 16,32 MPa a la derecha.	130
Figura 94. Caso 1, deformación total máxima de 5.43 mm a la izquierda y el esfuerzo normal máxima de 15.80 MPa a la derecha.	130
Figura 95. Caso 2, deformación total máxima de 10.43 mm a la izquierda y el esfuerzo normal máxima de 12.80 MPa a la derecha.	130
Figura 96. Caso 3, deformación total máxima de 12.33 mm a la izquierda y el esfuerzo normal máxima de 8.92 MPa a la derecha.	131
Figura 97. Caso 4, deformación total máxima de 11.46 mm a la izquierda y el esfuerzo normal máxima de 7.96 MPa a la derecha.	131
Figura 98. Función sintética 1 (historial de velocidades) y comprobación del modelo AR respecto al espectro de potencia de Davenport.	132
Figura 99. Función sintética 2 (historial de velocidades) y comprobación del modelo AR respecto al espectro de potencia de Davenport.	132
Figura 100. Función sintética 3 (historial de velocidades) y comprobación del modelo AR respecto al espectro de potencia de Davenport.	132
Figura 101. Función sintética 4 (historial de velocidades) y comprobación del modelo AR respecto al espectro de potencia de Davenport.	133

Figura 102. Función sintética 5 (historial de velocidades) y comprobación del modelo AR respecto al espectro de potencia de Davenport.	133
Figura 103. Curva deformación contra incrementos de cargas. Caso 15 en claro 15 m. El sistema se vuelve inestable con una presión de 50.63 kg/m ²	134
Figura 104. Curva deformación contra incrementos de cargas. Caso 16 en claro 15 m. El sistema se vuelve inestable con una presión de 102.58 kg/m ²	134
Figura 105. Curva deformación contra incrementos de cargas. Caso 17 en claro 15 m. El sistema se mantiene estable.	134
Figura 106. Curva deformación contra incrementos de cargas. Caso 18 en claro 15 m. El sistema se vuelve inestable con una presión de 81.10 kg/m ²	135
Figura 107. Curva deformación contra incrementos de cargas. Caso 19 en claro 15 m. El sistema se vuelve inestable con una presión de 57.62 kg/m ²	135
Figura 108. Curva deformación contra incrementos de cargas. Caso 20 en claro 20 m. El sistema se vuelve inestable con una presión de 89.39 kg/m ²	135
Figura 109. Curva deformación contra incrementos de cargas. Caso 21 en claro 20 m. El sistema se vuelve inestable con una presión de 76.86 kg/m ²	136
Figura 110. Curva deformación contra incrementos de cargas. Caso 22 en claro 20 m. El sistema se vuelve inestable con una presión de 67.73 kg/m ²	136
Figura 111. Curva deformación contra incrementos de cargas. Caso 23 en claro 20 m. El sistema se vuelve inestable con una presión de 38.82 kg/m ²	136
Figura 112. Curva deformación contra incrementos de cargas. Caso 24 en claro 20 m. El sistema se vuelve inestable con una presión de 57.62 kg/m ²	137
Figura 113. Curva deformación contra incrementos de cargas. Caso 25 en claro 25 m. El sistema se vuelve inestable con una presión de 24.44 kg/m ²	137

Figura 114. Curva deformación contra incrementos de cargas. Caso 26 en claro 25 m. El sistema se vuelve inestable con una presión de 76.86 kg/m ²	137
Figura 115. Curva deformación contra incrementos de cargas. Caso 27 en claro 25 m. El sistema se vuelve inestable con una presión de 35.02 kg/m ²	138
Figura 116. Curva deformación contra incrementos de cargas. Caso 28 en claro 25 m. El sistema se vuelve inestable con una presión de 36.69 kg/m ²	138
Figura 117. Curva deformación contra incrementos de cargas. Caso 29 en claro 25 m. El sistema se vuelve inestable con una presión de 76.20 kg/m ²	138
Figura 118. Curva deformación contra incrementos de cargas. Caso 30 en claro 30 m. El sistema se vuelve inestable con una presión de 38.00 kg/m ²	139
Figura 119. Curva deformación contra incrementos de cargas. Caso 31 en claro 30 m. El sistema se vuelve inestable con una presión de 76.86 kg/m ²	139
Figura 120. Curva deformación contra incrementos de cargas. Caso 32 en claro 30 m. El sistema se vuelve inestable con una presión de 35.02 kg/m ²	139
Figura 121. Curva deformación contra incrementos de cargas. Caso 33 en claro 30 m. El sistema se vuelve inestable con una presión de 36.69 kg/m ²	140
Figura 122. Curva deformación contra incrementos de cargas. Caso 34 en claro 30 m. El sistema se vuelve inestable con una presión de 56.51 kg/m ²	140
Figura 123. Caso 1, deformación total máxima de 2.94 mm a la izquierda y el esfuerzo normal máxima de -11.24 MPa a la derecha.	140
Figura 124. Caso 2, deformación total máxima de 4.13 mm a la izquierda y el esfuerzo normal máxima de -11.07 MPa a la derecha.	141
Figura 125. Caso 3, deformación total máxima de 2.76 mm a la izquierda y el esfuerzo normal máxima de -5.88 MPa a la derecha.	141

Figura 126. Caso 4, deformación total máxima de 4.32 mm a la izquierda y el esfuerzo normal máxima de -11.46 MPa a la derecha.....	141
Figura 127. Caso 5, deformación total máxima de 3.07 mm a la izquierda y el esfuerzo normal máxima de -9.92 MPa a la derecha.....	142
Figura 128. Caso 6, deformación total máxima de 5.88 mm a la izquierda y el esfuerzo normal máxima de -11.22 MPa a la derecha.....	142
Figura 129. Caso 7, el arcoteco colapsó debido a la inestabilidad antes de estimar deformaciones y esfuerzos máximos.	142
Figura 130. Caso 8, deformación total máxima de 4.42 mm a la izquierda y el esfuerzo normal máxima de 9.18 MPa a la derecha.	143
Figura 131. Caso 9, deformación total máxima de 5.39 mm a la izquierda y el esfuerzo normal máxima de 10.84 MPa a la derecha.	143
Figura 132. Caso 10, deformación total máxima de 3.42 mm a la izquierda y el esfuerzo normal máxima de 11.58 MPa a la derecha.	143
Figura 133. Caso 11, deformación total máxima de 9.03 mm a la izquierda y el esfuerzo normal máxima de -15.25 MPa a la derecha.....	144
Figura 134. Caso 12, el arcoteco colapsó debido a la inestabilidad antes de estimar deformaciones y esfuerzos máximos.	144
Figura 135. Caso 13, deformación total máxima de 4.73 mm a la izquierda y el esfuerzo normal máxima de -9.50 MPa a la derecha.....	144
Figura 136. Caso 14, deformación total máxima de 3.16 mm a la izquierda y el esfuerzo normal máxima de -7.50 MPa a la derecha.....	145
Figura 137. Caso 15, deformación total máxima de 3.73 mm a la izquierda y el esfuerzo normal máxima de -8.43 MPa a la derecha.....	145

Figura 138. Caso 16, deformación total máxima de 6.59 mm a la izquierda y el esfuerzo normal máxima de -7.30 MPa a la derecha.	145
Figura 139. Caso 17, el arcotecho colapsó debido a la inestabilidad antes de estimar deformaciones y esfuerzos máximos.	146
Figura 140. Caso 18, deformación total máxima de 9.73 mm a la izquierda y el esfuerzo normal máxima de 8.88 MPa a la derecha.	146
Figura 141. Caso 19, deformación total máxima de 4.87 mm a la izquierda y el esfuerzo normal máxima de -6.20 MPa a la derecha.	146
Figura 142. Caso 20, deformación total máxima de 6.23 mm a la izquierda y el esfuerzo normal máxima de -7.03 MPa a la derecha.	147
Figura 143. Caso 15, las oscilaciones presentaron fluctuaciones, produciendo una pérdida de estabilidad que indujo al colapso del arcotecho en el segundo 30....	147
Figura 144. Zona crítica de pandeo para el caso 15, donde se aprecian fallas por pandeo local.	147
Figura 145. Caso 16, las oscilaciones presentaron fluctuaciones, produciendo una pérdida de estabilidad que indujo al colapso del arcotecho en 15 segundos.....	148
Figura 146. Zona crítica de pandeo para el caso 16, donde se aprecian fallas por pandeo local.	148
Figura 147. Caso 17, las oscilaciones presentaron fluctuaciones, produciendo una pérdida de estabilidad que indujo al colapso del arcotecho en 100 segundos....	148
Figura 148. Zona crítica de pandeo para el caso 17, donde se aprecian fallas por pandeo local.	149
Figura 149. Caso 18, las oscilaciones presentaron fluctuaciones, produciendo una pérdida de estabilidad que indujo al colapso del arcotecho en 36 segundos.....	149

Figura 150. Zona crítica de pandeo para el caso 18, donde se aprecian fallas por pandeo local.	149
Figura 151. Caso 19, las oscilaciones presentaron fluctuaciones, produciendo una pérdida de estabilidad que indujo al colapso del arcotecho en 12 segundos.	150
Figura 152. Zona crítica de pandeo para el caso 19, donde se aprecian fallas por pandeo local.	150
Figura 153. Caso 20, las oscilaciones presentaron fluctuaciones, produciendo una pérdida de estabilidad que indujo al colapso del arcotecho en el segundo 12. ...	150
Figura 154. Zona crítica de pandeo para el caso 20, donde se aprecian fallas por pandeo local.	150
Figura 155. Zona crítica de pandeo para el caso 21, donde se aprecian fallas por pandeo local.	151
Figura 156. Caso 22, las oscilaciones presentaron fluctuaciones, produciendo una pérdida de estabilidad que indujo al colapso del arcotecho en el segundo 22. ...	151
Figura 157. Zona crítica de pandeo para el caso 22, donde se aprecian fallas por pandeo local.	151
Figura 158. Caso 23, las oscilaciones presentaron fluctuaciones, produciendo una pérdida de estabilidad que indujo al colapso del arcotecho en el segundo 35. ...	152
Figura 159. Zona crítica de pandeo para el caso 23, donde se aprecian fallas por pandeo local.	152
Figura 160. Caso 24, las oscilaciones presentaron fluctuaciones, produciendo una pérdida de estabilidad que indujo al colapso del arcotecho en el segundo 12. ...	152
Figura 161. Zona crítica de pandeo para el caso 24, donde se aprecian fallas por pandeo local.	153

Figura 162. Caso 25, las oscilaciones presentaron fluctuaciones, produciendo una pérdida de estabilidad que indujo al colapso del arcotecho en el segundo 70. ...	153
Figura 163. Zona crítica de pandeo para el caso 25, donde se aprecian fallas por pandeo local.	153
Figura 164. Zona crítica de pandeo para el caso 26, donde se aprecian fallas por pandeo local.	154
Figura 165. Caso 27, las oscilaciones presentaron fluctuaciones, produciendo una pérdida de estabilidad que indujo al colapso del arcotecho en el segundo 12. ...	154
Figura 166. Zona crítica de pandeo para el caso 27, donde se aprecian fallas por pandeo local.	154
Figura 167. Caso 28, las oscilaciones presentaron fluctuaciones, produciendo una pérdida de estabilidad que indujo al colapso del arcotecho en el segundo 1.	155
Figura 168. Zona crítica de pandeo para el caso 28, donde se aprecian fallas por pandeo local.	155
Figura 169. Caso 29, las oscilaciones presentaron fluctuaciones, produciendo una pérdida de estabilidad que indujo al colapso del arcotecho en el segundo 24. ...	155
Figura 170. Zona crítica de pandeo para el caso 29, donde se aprecian fallas por pandeo local.	156
Figura 171. Caso 30, las oscilaciones presentaron fluctuaciones, produciendo una pérdida de estabilidad que indujo al colapso del arcotecho en el segundo 8.	156
Figura 172. Zona crítica de pandeo para el caso 30, donde se aprecian fallas por pandeo local.	156
Figura 173. Zona crítica de pandeo para el caso 31, donde se aprecian fallas por pandeo local.	157

Figura 174. Caso 32, las oscilaciones presentaron fluctuaciones, produciendo una pérdida de estabilidad que indujo al colapso del arcotecho en el segundo 12....	157
Figura 175. Zona crítica de pandeo para el caso 32, donde se aprecian fallas por pandeo local.....	157
Figura 176. Caso 33, las oscilaciones presentaron fluctuaciones, produciendo una pérdida de estabilidad que indujo al colapso del arcotecho en el segundo 1.....	158
Figura 177. Zona crítica de pandeo para el caso 33, donde se aprecian fallas por pandeo local.....	158
Figura 178. Caso 34, las oscilaciones presentaron fluctuaciones, produciendo una pérdida de estabilidad que indujo al colapso del arcotecho en el segundo 21....	158
Figura 179. Zona crítica de pandeo para el caso 34, donde se aprecian fallas por pandeo local.....	159

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de arcotechos por peralte o flecha.	33
Tabla 2. Clasificación de arcotechos por claro.	33
Tabla 3. Propiedades del material de lamina.	67
Tabla 4. Calidades de elementos finitos para cada caso de análisis.	69
Tabla 5. Distribución de cargas de presión del viento en dirección perpendicular a la cubierta. ($\Theta=0^\circ$).....	70
Tabla 6. Distribución de cargas de presión del viento en dirección paralela a la cubierta. ($\Theta=90^\circ$).....	72
Tabla 7. Propiedades del material acero ASTM A1008 Grado 33, rolado en frío..	76
Tabla 8. Matriz experimental para cada caso de análisis.....	85
Tabla 9. Resultados obtenidos de estabilidad lineal en dirección del viento es perpendicular a la cubierta. ($\Theta=0^\circ$)	86
Tabla 10. Resultados obtenidos de estabilidad lineal en dirección del viento paralelo a la cubierta. ($\Theta=90^\circ$).....	87
Tabla 11. Resultados obtenidos del análisis de estabilidad no lineal en dirección del viento perpendicular a la cubierta. ($\Theta=0^\circ$).....	88
Tabla 12. Resultados obtenidos del análisis de estabilidad no lineal en dirección del viento paralela a la cubierta. ($\Theta=90^\circ$).....	90
Tabla 13. Estados limites de servicio y esfuerzos permisibles. En dirección del viento perpendicular. ($\Theta=0^\circ$).....	95
Tabla 14. Estados limites de servicio y esfuerzos permisibles. En dirección del viento paralelo. ($\Theta=90^\circ$).....	98

Tabla 15. Parámetros de entrada para la simulación de cargas por viento dinámico.	100
Tabla 16. Resultados obtenidos del análisis de estabilidad no lineal ante carga dinámicas por viento.	104
Tabla 17. Cargas críticas de arcotechos.	105
Tabla 18. Estados limites de servicio y esfuerzos permisibles. Ante diferentes presiones dinámicas por viento.	108

1. INTRODUCCIÓN

El sistema de cubiertas autoportantes o mejor conocido como arcotechos, es ampliamente ocupado en diversos sectores que van desde el educativo, espacios de usos múltiples, centros comerciales y bodegas, esto debido a su versatilidad, tiempos de ejecución y costos, ya que no se emplean elementos de soporte intermedios para librar grandes claros.

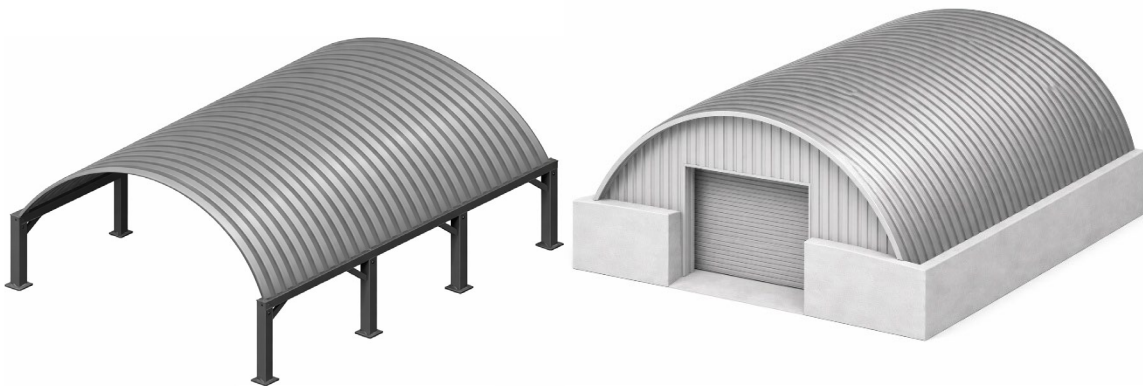


Figura 1. Estructuraciones típicas del sistema arcotecho en México.

Los arcotechos son estructuras donde el espesor de lámina es relativamente pequeño respecto a los claros que cubren, por lo tanto, son susceptibles a presentar fallas por estabilidad ante cargas accidentales principalmente ante cargas por viento. Debido a la ocurrencia de fenómenos climáticos como frentes fríos o temporada de huracanes lo largo de la república mexicana.

En México, no existe una norma o metodología establecida que especifique las comprobaciones por estabilidad para este tipo de estructuras. Una práctica común durante el proceso de diseño es ignorar las corrugaciones de la sección (Piekarczyk y Malowany, 2016; Piekarczyk et al., 2017) y basar los cálculos en los esfuerzos y deformaciones máximas admisibles, a menudo indicadas en las fichas técnicas proporcionadas por los fabricantes. Este enfoque omite las comprobaciones de estabilidad, lo que puede generar problemas sobre el comportamiento real de la estructura (Kollár & Holický, 2013).

En ingeniería, se denomina problema de estabilidad cuando una estructura es sometida a altas cargas de compresión excediendo la carga crítica que el material es capaz de soportar, provocando una deformación fuera de su plano de forma súbita, afectando el comportamiento de la estructura y en algunos casos se presentan colapso parciales o totales.

El método tradicional para evaluar la estabilidad, denominado análisis de estabilidad lineal o también conocido como problema de valores y vectores característicos, consiste en estimar la carga crítica de pandeo la cual una estructura es capaz de soportar, y una vez sobrepasada esta carga crítica el sistema pierde estabilidad.

En investigaciones realizadas por Cybulski et al. (2014), y Del Coz Díaz et al. (2010), donde se han modelado cubiertas tipo arcotecho, observando que los análisis de estabilidad lineal tienden a sobreestimar la carga crítica del sistema. Debido a que el método tradicional de estabilidad no considera factores como las imperfecciones, no linealidades geométricas y del material, dichos factores afectan en la precisión de la estimación de la carga crítica (Piekarczyk et al., 2015).

Diversas investigaciones lideradas por Piekarczyk et al (2015, 2016, 2017, 2019, 2021), han demostrado que el análisis de estabilidad no lineal en secciones de arcotechos, son susceptibles a presentar pandeo local dentro del rango elastoplástico. En estudios numéricos y experimentales elaborados por Piekarczyk et al. (2015), se concluyó que la estabilidad lineal no identifica correctamente el inicio de falla estructural, debido a la iteración entre grandes deformaciones y pérdida de rigidez local del sistema, principalmente zonas corrugadas de la lámina.

Posteriormente en investigaciones más avanzadas Piekarczyk et al. (2017), se propuso un modelo que cuantifica el inicio de las plastificaciones locales antes de alcanzar la carga crítica por pandeo, considerando no lineales geométricas y del material, así como imperfecciones en análisis de estabilidad no lineal. En investigaciones complementarias (Piekarczyk et al., 2019), se establecieron envolventes de capacidad de carga bajo cargas excéntricas, evidenciando el

decremento de la capacidad de carga ante pandeo local. Finalmente, en últimos trabajos (Piekarczyk & Więch, 2021), se desarrollaron metodologías numéricas capaces de predecir el inicio y evolución de inestabilidades locales dentro de la etapa de pre-pandeo, concluyendo que el análisis por estabilidad no lineal es imprescindible para una evaluación más realista de la estabilidad y determinaciones de carga crítica en los arcotechos.

Sin embargo, las investigaciones existentes han analizado la estabilidad ante cargas por nieve, omitiendo las cargas por viento estático donde pueden presentarse efectos de presión y succión a lo largo de la aplicación de la carga, además no existen investigaciones que evalúen cargas dinámicas por viento.

En este trabajo se modelaron diversas geometrías ante cargas estáticas por viento considerando análisis de estabilidad lineal y no lineal con imperfecciones geométricas, comparando las cargas críticas obtenidas mediante análisis no lineales ante carga de viento dinámico, alcanzado estados límite de servicio que las normativas mexicanas actuales no consideran.

A continuación, se explica la justificación de esta investigación, así como la descripción del problema desde la perspectiva de diseño estructural. En el segundo capítulo, se mencionan los antecedentes más relevantes sobre estudios previos de arcotechos, el problema de la estabilidad y uso de funciones tiempo historia de viento aplicado estructuras sensibles al viento. Posteriormente, en el tercer capítulo, se presenta el marco teórico empleado para el desarrollo de esta investigación.

Continuando con el cuarto capítulo, se planteó la hipótesis, así como el objetivo general y objetivos particulares para la elaboración de la presente investigación. Después en el quinto capítulo, se describen cada una de las etapas y actividades de la metodología empleada en esta investigación. En el capítulo sexto se hace una discusión sobre los resultados obtenidos y los hallazgos observados. Finalmente, el capítulo séptimo, se presentan las conclusiones y recomendaciones, así como trabajos futuros dentro de esta línea de investigación.

1.1 Justificación

El sistema arcotecho es ampliamente utilizado en aplicaciones industriales y de infraestructura, gracias a su eficiencia estructural, facilidad constructiva y bajo costo. Sin embargo, su comportamiento estructural es susceptible a presentar fallas por estabilidad, destacando la pérdida de estabilidad al pandeo local en las corrugaciones de la lámina. Diversas investigaciones han evaluado la estabilidad de estos sistemas ante cargas, demostrando que los mecanismos de falla difieren respecto a los métodos tradicionales de estabilidad lineal.

Es importante considerar la estabilidad con la finalidad de establecer la carga crítica a la que el sistema es capaz de soportar y evitar fallas que puedan llevar al colapso de la cubierta, debido a que actualmente no existen recomendaciones para revisión de estabilidad en este tipo de estructuras en normativas mexicanas como las Normas técnicas complementarias de la ciudad de México (NTC), o en Manuales de diseño para obras civiles de la Comisión Federal de Electricidad. (CFE)

El colapso de este tipo de cubiertas ha provocado consecuencias económicas y humanas en diversos sectores como el industrial o el educativo, siendo este último donde más frecuentemente se presentan casos de colapsos causados por fuertes vientos (Martínez, 2023 & González, 2024).

El desarrollo de una metodología que permita evaluar la estabilidad es necesario para consideraciones en el diseño estructural en arcotechos, previniendo riesgos de fallas o colapsos ante cargas por viento.

Contar con una metodología que analice la carga crítica en arcotechos ante cargas por viento permitirá que ingenieros estructuralistas y/o diseñadores tomen en cuenta el efecto de estabilidad en arcotechos, reduciendo pérdidas económicas que pudieran comprometer la seguridad estructural de sus ocupantes.

1.2 Descripción del problema

Las primeras investigaciones de estabilidad en arcotechos, bajo un enfoque elástico lineal, demostraron que la consideración de las corrugaciones, incrementan la carga crítica, así como la rigidez global del sistema. No obstante, los análisis de estabilidad lineal realizados bajo un enfoque idealizado demostraron que tienden a sobreestimar la capacidad de carga, debido a la omisión de las imperfecciones geométricas y no linealidades. Los resultados obtenidos se compararon con la normativa propuesta en el Euro código 3 (EN 1993-1-5), observando que las cargas críticas obtenidas difieren respecto a la normativa.

Investigaciones posteriores (Piekarczuk et al., 2015), se consideraron las imperfecciones y no linealidades geométricas a los modelos de elementos finitos y los resultados obtenidos fueron comparados bajo pruebas experimentales. Demostrando que la estabilidad lineal no describe el mecanismo real de la falla. Por lo tanto, no es buen indicador para calcular la carga crítica de los arcotechos.

A pesar de existir estudios que aborden la estabilidad en arcotechos, estas se han centrado en revisiones de tramos aislados de lámina, en configuraciones geométricas específicas o en cargas estáticas generalmente por nieve. Por lo tanto, no existen investigaciones que evalúen de forma unificada la estabilidad que considere imperfecciones, no linealidades ante cargas estáticas por viento no uniformes, así como ante cargas dinámicas por viento.

En esta investigación se evaluó la estabilidad considerando imperfecciones y no linealidades bajo cargas dinámicas por viento, con el fin de observar la respuesta dinámica de la estructura y los modos de falla asociados a la estabilidad de los arcotechos, aportando criterios y consideraciones que actualmente no existen en ninguna normativa mexicana.

2. ANTECEDENTES

2.1 Sistema de laminado arcotecho

El origen de este sistema constructivo radica en USA, donde la armada americana empleaba este sistema para la construcción de edificaciones temporales, actualmente la patente pertenece a la compañía M.I.C. Industries Inc., gracias a la versatilidad de este sistema se ha vuelto popular en aplicaciones de la vida civil.



Figura 2. Proceso constructivo de sistema arcotecho. Fuente: Google (2025)

El proceso constructivo de este sistema es producto del conformado de un rollo de lámina de acero galvanizado o pintor, el cual se introduce a una máquina roladora portable (tecnología ABM 240). Esta lámina genera la sección deseada con forma trapezoidal como primera etapa de conformado, posteriormente pasa por una segunda etapa de conformado, en donde se generan las corrugaciones a través de rodillos obteniendo la sección deseada y permitiendo generar la forma geometría del arco.

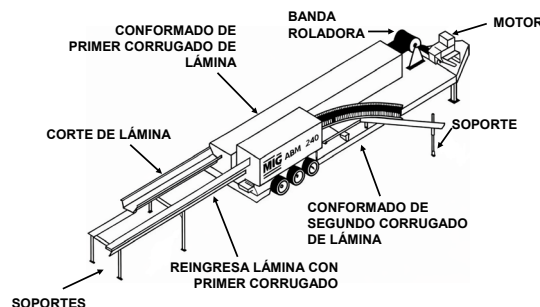


Figura 3. Máquina roladora ABM 240 para sección arcotecho MIC 240. M.I.C. Industries Inc.

www.micindustries.com.

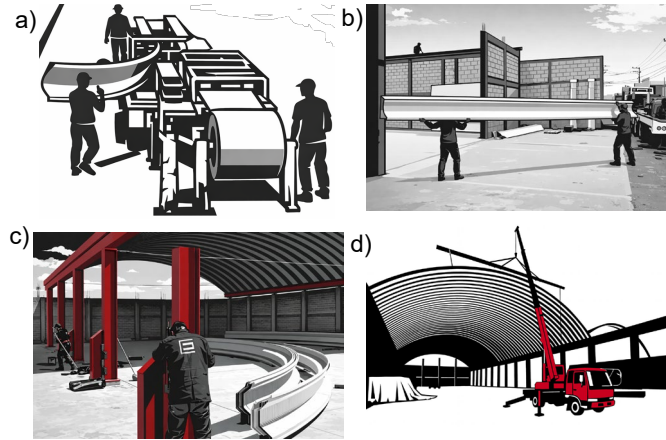


Figura 4. Esquema del proceso constructivo de arco techo, a) Generación de sección trapezoidal y primer corrugado, b) Conformado del segundo corrugado y preparación de apoyos, c) Apilado de sección tipo arcotecho para engargolarse por tramos, d) Habilitado de tramos de arcotecho y fijación de apoyos.

Dentro del sistema de arcotechos (*K super span*), se tienen dos secciones ampliamente utilizadas a nivel mundial las cuales son MIC 120 y MIC 240, siendo esta última muy popular en México y sobre la cual se hará la presente investigación.

Los espesores comerciales de lámina van de 0.61 mm a 1.52 mm. Las calidades del material abarcan desde acero rolado en frío, como el ASTM A1008 Gr. 33, hasta aceros rolados en caliente, como el ASTM A653 Gr. 40.

El acero rolado en frío es el más empleado en este tipo de cubiertas, el conformado de los arcos se elaboran a partir de rollos de 3 pies y los acabados del arco pueden ser los siguientes: zintro (galvanizado), zintro aluminio y pintor poliéster.

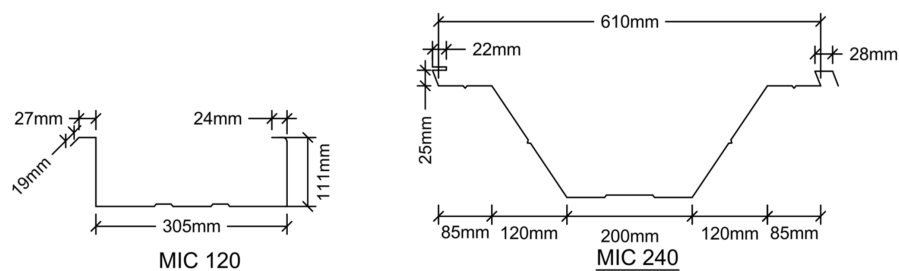


Figura 5. Secciones tipo sistema arcotecho. (K Super span)

2.2 Clasificación de cubiertas

Los arcotechos pueden adoptar formas parabólicas y semicirculares, siendo las parabólicas las más populares en escuelas, salas de usos múltiples, canchas deportivas, bodegas y tiendas de autoservicio. Sin embargo, en los últimos años se han desarrollado formas híbridas de este sistema.



Figura 6. Arcotecho parabólico, semicircular e híbrido.

En la práctica profesional, de acuerdo con las especificaciones del proyecto se definen el claro a librar, así como el peralte del arcotecho. No obstante, las fichas técnicas de los fabricantes (Aceros Crea arcotechos) de este sistema ofrecen relaciones flecha y porcentaje del claro del arco, para la estructuración de este sistema, las cuales generalmente arrojan flechas o peraltes muy grandes y poco viables para su ejecución.

Tabla 1. Clasificación de arcotechos por peralte o flecha.

Tipo de arco	Peralte	Uso común
Arco bajo	hasta 3.5 m.	Chanchas de escuelas, espacios de usos múltiples, bodegas.
Arco medio	3.5m-5m	Cubiertas industriales y centros comerciales.
Arco alto	>5 m.	Auditorios, Cubiertas deportivas: piscina semiolímpica.

Tabla 2. Clasificación de arcotechos por claro.

Claros	Uso común
10m-20m	Bodegas, negocios pequeños.
20m-30m	Sala de usos múltiples, cubiertas industriales.
30m-40m	Canchas deportivas y centros comerciales.

2.3 Definición de estabilidad

La estabilidad se define como la capacidad de un sistema para regresar a su estado de equilibrio después de una perturbación. Si el sistema vuelve al equilibrio se considera estable; si por el contrario se aleja del equilibrio, se considera inestable.

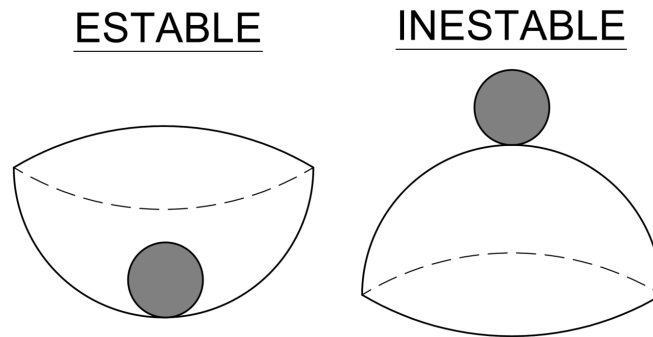


Figura 7. Estabilidad e inestabilidad de un sistema.

La estabilidad en sistemas estructurales, se refiere a la capacidad de la estructura para mantenerse en equilibrio ante cargas aplicadas al sistema, sin provocar el colapso debido a deformaciones excesivas.

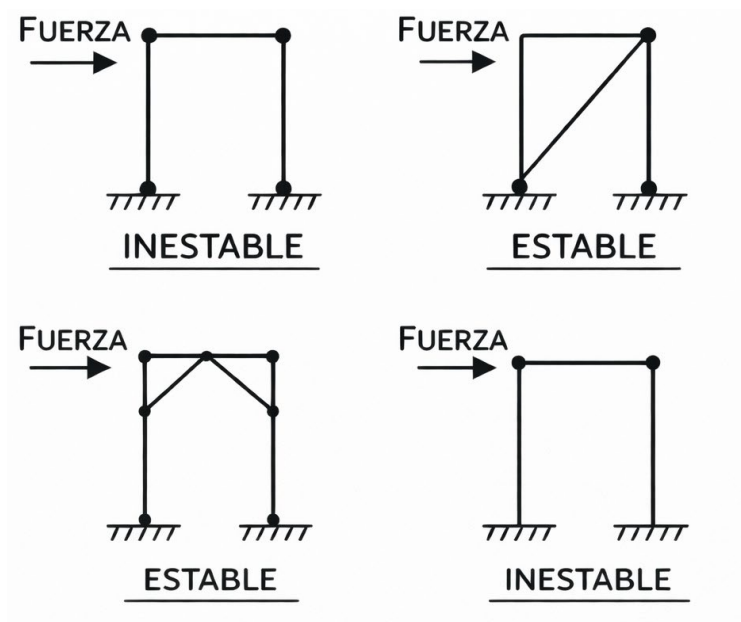


Figura 8. Estructuras estables e inestables.

2.4 Fallas por estabilidad en arcotechos

Debido a que los arcotechos son estructuras ligeras, autoportantes y de pared delgada, son susceptibles a sufrir fallas locales, que pueden inducir al colapso ante cargas externas como el granizo o el viento siendo el última la causa más recurrente en la falla en los arcotechos en México.



Figura 9. Fallas por pandeo local en arcotechos.



Figura 10. Colapso de cubiertas en bodegas de central de abastos CDMX por granizo (izquierda) y colapso de cubierta en escuela por acumulación de granizo Texcaltitlán, Edomex (derecha). Fuente: Google (2025).



Figura 11. Colapso de arcotechos por fuertes vientos en escuela en Chihuahua (derecha) y en Chiapas. (izquierda) Fuente: Google (2025).

2.5 Modelado de arcotechos por elementos finitos

Se ha utilizado el método de elementos finitos para analizar de manera más realista el comportamiento de las cubiertas autoportantes, ya que dicho comportamiento no puede describirse adecuadamente mediante métodos que omitan esta formulación numérica. Esto permite estudiar los esfuerzos y deformaciones provocados por cargas muertas debidas al peso propio y cargas vivas (Páez Redrován & Guerrero Cuasapaz, 2022), así como evaluar los efectos del viento estático (Narvydas & Puodžiūnienė, 2013).

Con la implementación de modelos de elementos finitos, las simulaciones CFD y pruebas experimentales en túnel de viento, se han desarrollado investigaciones sobre cubiertas arcotechos que abordan fenómenos que los estándares de diseño no capturan adecuadamente bajo cargas por viento. Se han obtenido presiones de viento mediante simulaciones CFD avanzadas con LES (Balbastro & Sonzogni, 2012), así como mediante modelos de turbulencia de menor coste computacional como RANS, donde se ha demostrado que la modelación numérica es necesaria para predecir detalles locales que las normativas no consideran (Del Coz Díaz et al., 2013).

En el caso de geometrías no contempladas por las normas de diseño, como cubiertas arqueadas con sección variable, es necesario determinar coeficientes de presión específicos para dicha configuración (Yao et al., 2024). Por otra parte, también se ha evaluado la influencia de estructuras vecinas en la acumulación de nieve en cubiertas arqueadas, encontrando factores de amplificación superiores a los recomendados por los estándares vigentes (Zhang et al., 2025).

2.6 Estabilidad

Los análisis de estabilidad juegan un papel fundamental en la ingeniería estructural, ya que permiten estimar la carga crítica por pandeo ante cargas externas Sarwar y Melhus (2025) hasta los efectos inducidos por cambios de temperatura (Qaderi et al., 2026).

En investigaciones realizadas por Sarwar y Melhus (2025) se desarrolló un procedimiento de estabilidad lineal considerando imperfecciones para plataformas marinas de celosía, donde el principal hallazgo fue evaluar la capacidad de carga de forma más eficiente considerando la rigidez geométrica y escalando las imperfecciones equivalentes con los valores λ obtenidos en el pandeo lineal, optimizando el costo computacional comparado con análisis no lineales.

Uno de los grandes retos en los análisis de estabilidad son los tiempos de procesamiento, en investigaciones recientes (Antczak et al., 2025) se buscó generar una metodología que predijera la carga crítica por pandeo para una armadura de acero con elementos iguales, evaluando la estabilidad como un elemento continuo en vez de analizar elementos por separado. Las simulaciones numéricas se validaron de forma cualitativa con pruebas experimentales observando concordancia con los resultados obtenidos en las simulaciones.

Estudios demuestran (Muslikh & Iman, 2026) que no siempre se puede explicar el colapso estructural debido a pandeo local sino a una pérdida de estabilidad global. Se evaluaron los principales modos de falla ante cargas sísmicas, esbeltez y pandeo para una armadura conformada de acero rolado en frío. Se demostró que el modo predominante de falla es por la acción sísmica generando inestabilidad global antes del pandeo estático lineal, sobre todo en elementos delgados.

La resistencia a la estabilidad o pandeo depende mucho de la geometría de la estructura de estudio, como se demostró en la investigación realizada por Mendoza y Marín-Lopez (2023), donde se pudo establecer cuanto tolera la estructura ante una reducción localizada del espesor de placas para una estructura cilíndrica tipo casco de submarino. En el caso analizado se presentó una disminución del 30% del espesor y solo bajó la capacidad total cerca de 6% y la carga de pandeo alrededor de 5%.

Es necesario considerar los efectos dinámicos por viento para evaluar la estabilidad estructural, el trabajo propuesto por (Lu et al., 2026) evaluó una cubierta tipo arco de un gimnasio en Guangzhou, analizando las vibraciones generadas por fuertes

vientos hasta la pérdida de capacidad de carga, identificando que las zonas críticas de falla, se encontraron en los apoyos del arco.

Una de las principales ventajas de los métodos dinámicos es identificar la disipación de energía de forma más realista y como evoluciona el pandeo hasta el colapso, como lo demostró (Uddin et al., 2025), en su trabajo para estructuras reticulares, demostrando que empleando secciones de acero tipo I, mejoran el desempeño no solo en carga lenta, sino también en condiciones dinámicas: la resistencia aumentó 34% y la absorción de energía 74% bajo impacto, mientras que en cuasi-estático las mejoras fueron de 26% y 109%.

Dado que estos sistemas de cubierta arcotecho son relativamente delgados en comparación con los grandes claros que cubren, son vulnerables a fallos de estabilidad bajo cargas accidentales, especialmente cargas de viento (Piekarczuk & Więch, 2021).

Se han realizado investigaciones para estimar como afecta el pandeo en cubiertas tipo arco que van desde cubiertas de tipo membranas textiles pretensadas (Macháček et al., 2021) hasta modelos numéricos avanzado que estiman la estabilidad de arcos de acero delgados que soportan cubiertas textiles (Hegyi, 2021).

Se ha revisado en la literatura los efectos de la estabilidad en el sistema de los arcotechos, bajo condiciones extremas de carga por nieve, con la finalidad de explicar las causas del colapso de este tipo de estructuras (del Coz Díaz, 2010; Kollár & Holický, 2013; Cybulski et al, 2014). Sin embargo, se desconocen investigaciones que evalúen la estabilidad ante cargas de viento ya sea estático o dinámico (del Coz Díaz, et al 2010; del Coz Díaz et al 2012).

Existen métodos para estimar la carga crítica en la que una estructura pierde estabilidad, como el pandeo lineal o el análisis de pandeo por valores propios, donde la carga crítica obtenida se conoce como el punto de bifurcación, en el cual la estructura se vuelve inestable. Sin embargo, investigaciones sobre sistemas de

techos autoportantes han demostrado que los métodos de pandeo lineal tienden a sobrestimar la capacidad de carga crítica de estos sistemas (Piekarczyk et al., 2015). Ya que estos valores equivalen al modo de inestabilidad más bajo correspondiente a la solución del valor característico, lo cual corresponde cuando la estructura se considera con geometría perfecta en el modelo analítico, por lo que un análisis de estabilidad lineal no puede ser considerado para estimar la carga de colapso de la estructura, ya que estos efectos no lineales son significativos para el análisis (del Coz Díaz, 2010; del Coz Díaz, 2012).

La investigación de Del Coz Díaz et al. (2010) ha demostrado que las imperfecciones geométricas tienen un impacto significativo en la capacidad de carga en los arcotechos, por lo que deben ser consideradas en los modelos estructurales. A través de un análisis no lineal, se predijo que la carga de colapso es considerablemente inferior a la obtenida en el análisis lineal, lo que resalta la importancia de considerar tanto las no linealidades materiales como geométricas. Cabe señalar que, en esta investigación, no considera completamente el modelado de las imperfecciones en la ondulación de las láminas, y aun bajo esta suposición, los resultados destacan la importancia de tener en cuenta las imperfecciones para la estimación de la carga crítica de pandeo.

En la investigación de Cybulski et al. (2014), se compararon métodos de análisis lineales y no lineales para estudiar el pandeo de paneles de acero doblemente corrugados, considerando las imperfecciones geométricas. Se concluyó que el análisis lineal, aunque aplicable a paneles rectos sin imperfecciones significativas, sobrestima la carga crítica hasta más de 50% y no captura el comportamiento posterior al pandeo. Los resultados experimentales y numéricos demostraron que el análisis no lineal es esencial para una evaluación precisa de la estabilidad y la carga crítica en paneles tanto curvados como planos, especialmente bajo condiciones de imperfecciones geométricas (Piekarczyk et al., 2015; Piekarczyk et al., 2017; Piekarczyk, 2019).

Los factores clave que afectan la precisión de las estimaciones de la carga crítica incluyen imperfecciones (Casafont et al., 2024), no linealidades geométricas y del material. Tener en cuenta estos elementos permiten realizar predicciones más precisas, como lo demuestran los estudios experimentales que comparan modelos teóricos con resultados prácticos (Piekarczyk, 2019; Piekarczyk, 2023).

En la investigación de Piekarczyk et al. (2017) muestra que las imperfecciones y no linealidades, son vulnerables a inestabilidades locales debido a imperfecciones generadas en el proceso de fabricación y ensamblaje. Se concluye que los análisis no lineales geométricos y materiales son cruciales para una estimación precisa de la carga crítica, ya que los análisis lineales no consideran las grandes deformaciones ni inestabilidades locales. El estudio también recomienda mejorar los modelos numéricos considerando las correcciones involucradas en el modelado de las láminas. Los resultados muestran que la combinación de métodos convencionales con correlación digital de imágenes (DIC) mejora la medición de las deformaciones en la estructura debido a las imperfecciones geométricas en el proceso de fabricación y ensamblaje.

Estudios contemporáneos (del Coz Díaz, 2010; Cybulski et al, 2014; Piekarczyk et al, 2017) sobre arcotechos, han considerado las corrugaciones en la sección y empleando imperfecciones geométricas y no linealidades, demostrado que el principal problema de este sistema de construcción es el pandeo local localizado en las corrugaciones de la lámina.

La investigación dirigida por Piekarczyk et al. (2021) logró resolver el problema de estabilidad para casos de carga específicos gracias a nuevas metodologías de análisis que utilizan elementos finitos. Sin embargo, estos resultados se limitaron a escenarios de carga particulares. Además de solo modelar tramos de la cubierta, en vez de la geometría de cubierta completa.

2.7 Análisis por viento ante función sintética (tiempo-historia)

En México, la estimación de cargas por viento se realiza principalmente según lo estipulado en las Normas Técnicas Complementarias (NTC) de 2023 para la Ciudad de México o para el resto de la república, el Manual de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), para diseño por viento edición 2020, ambos basados en métodos simplificados que emplean coeficientes de presión distribuidos de forma variable sobre la cubierta según la dirección del viento. Aunque las recomendaciones de la CFE incluyen tanto análisis estáticos como dinámicos, estos presentan limitaciones importantes: los coeficientes estáticos se obtienen solo para ciertos ángulos de incidencia, mientras que el análisis dinámico se simplifica mediante fuerzas estáticas equivalentes y coeficientes de presión neta derivados de estudios de Takeda et al. (2014, 2015), aplicándose únicamente a estructuras esbeltas y altas con una relación de esbeltez (altura/ancho) mayor a 5.

Por otro lado, el manual de la CFE por viento edición 2020, hace recomendaciones para cubiertas con geometrías especiales, en emplear pruebas experimentales por túnel de viento, o realizar análisis no lineales dinámicos, con historial de velocidades de ráfagas simuladas.

Para determinar las cargas de viento aplicadas a una estructura, pueden determinarse mediante mediciones en campo, túneles de viento o incluso modelando la estructura mediante empleando Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés). Sin embargo, esto puede ser costoso y los tiempos pueden variar dependiendo de la escala del experimento, ubicación y gasto computacional (Jiang & Li, 2019).

Rani, Pratap y Ahuja (2024) elaboraron un estudio en CFD sobre la distribución de las presiones por viento en cubiertas curvas, ante varios ángulos de incidencia, encontrando que en la zona barlovento se ubican las máximas presiones positivas, para las presiones negativas o succión se ubican las presiones máximas negativas

en la zona central de la cubierta. Lo cual coinciden en algunos casos de carga obtenidos de acuerdo con el manual de diseño por viento CFE (2020).

Yao et al. (2024) realizaron simulaciones CFD en techos arqueados ante diferentes configuraciones arquitectónicas, variando la relación de altura y claro (F/D) y longitud entre claro (L/D), encontrando que las distribuciones de las presiones a succión máxima se concentran en el centro de las cubiertas, en valores bajos en (F/D). Además, se observó que cuanto más uniforme es la distribución de las presiones en la cubierta, mejor es la resistencia del viento en las cubiertas.

En la investigación de Qi et al. (2026) analizaron por medio de simulaciones CFD el rendimiento de la ventilación y resistencia del viento en invernaderos de múltiples claros con diferentes configuraciones de tipo de cubierta. Concluyendo que la propuesta de cubierta de tipo "sawtooth", ofrece una mejor distribución de presiones de viento mejorando la ventilación y la exposición del viento en este tipo de estructuras.

Empleando funciones sintéticas o tiempo- historia por viento, permite generar análisis de bajo costo computacional con alta velocidad de cálculo y resultados validados frente a ensayos por túnel de viento, mediciones en campo y simulaciones CFD (Swaddiwudhipong & Khan, 2002; Zang et al., 2014; Iancovici et al., 2022).

Asimismo, existen recomendaciones de los mismos códigos o normas de diseño (CFE; 2020), donde en caso de presentar geometrías muy complejas o irregulares, pueden emplearse pruebas experimentales por túnel de viento, o realizar análisis no lineales dinámicos (CFD), con historial de velocidades de ráfagas simuladas.

El uso de CFD, tiene como objetivo principal la interacción fluido estructura, es decir la acción del viento con la estructura, por lo tanto, no se considera el método principal para generar las cargas de diseño (Zang et al., 2014).

Estudios recientes han considerado análisis dinámicos ante cargas accidentales como el viento o el sismo. Se han realizado revisiones empleando funciones tiempo-

historia por viento aplicadas a cubiertas reticulares, donde se evalúan las diferentes etapas de carga hasta que el sistema colapsa (Wei Lu, 2019).

Para elementos de pared delgada como son los silos, se ha aplicado esta metodología para revisión de la estabilidad, usando funciones tiempo-historia ante sismo, prediciendo donde se formarán las abolladuras que pudieran volver el sistema inestable ante cargas por sismo (Mehretehran, 2018).

El uso de funciones sintéticas (tiempo-historia) por viento ha ido ganando popularidad dentro del campo de la ingeniería estructural, gracias a la capacidad de representar fielmente las fluctuaciones del viento que afectan a las estructuras en un tiempo determinado. Modelos estacionarios aleatorios del tipo gaussiano, como el autorregresivo (AR), y el método de superposición de onda, por sus siglas en inglés (WAWS), se han utilizado para generar series de temporales de viento, simulando las fluctuaciones del viento.

Borri & Zahlten (1991), propusieron el uso de modelos autorregresivos (AR) para generar series de viento, partir de este proceso estocástico se generó una función sintética de viento en dominio del tiempo para evaluar la respuesta dinámica no lineal de una torre de transmisión. Destacando que el modelo AR requiere menos recursos de memoria en comparación con otros métodos como WAWS, donde se requieren cálculos repetitivos durante el análisis.

En investigaciones realizadas por Swaddiwhipong & Khan (2002), se generó una función sintética de viento para generar datos de entrada para análisis CFD, se usó el método WAWS para generar los efectos de turbulencia y se analizó la respuesta dinámica para predecir la vibración en edificaciones de gran altura.

Por otro lado, Chen et al. (2012), simularon las fluctuaciones de viento, mediante el modelo AR y empleando software comercial de elementos finitos (SAP2000), se realizó un análisis dinámico no lineal para una torre de acero de celosía. Los resultados obtenidos se contrastaron con análisis estáticos, demostrando que el

análisis dinámico induce desplazamientos adicionales, así como amplificaciones de vibraciones que no son visibles en análisis estáticos.

Este enfoque se ha aplicado a estructuras relativamente pequeñas, donde el viento es la condición crítica de carga, como por ejemplo el caso de heliostatos, Zang et al. (2014) realizaron un análisis modal y transitorio usando ANSYS, donde las fluctuaciones del viento fueron generadas por el modelo autorregresivo (AR), para posteriormente aplicarse las cargas de viento sobre el heliostato. Los resultados obtenidos en las simulaciones por computadora fueron validados mediante pruebas experimentales, validando la precisión del uso de funciones sintéticas para predecir la respuesta dinámica en estructuras sensibles al viento.

Cabe destacar que la principal ventaja de las funciones tiempo-historia por viento para el análisis dinámico en estructuras es su bajo costo computacional, (Borri & Zahlten, 1991), precisión en simulación de cargas por viento (Zang et al, 2014), así como la flexibilidad para servir como herramienta para otros fines como la investigación realizada por Jiang & Li (2019), donde se evaluó la confiabilidad dinámica para grúas tipo torre empleando el modelo AR, y mediante modelos probabilísticos se analizó la confiabilidad para evaluar los desplazamientos y resistencia de la estructura.

3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

3.1 Formulación del problema de estabilidad dinámica

A partir de la ecuación de movimiento:

$$\text{Div } S + b_o = \rho_o \ddot{u}$$

Donde:

S: Tensor de tensiones.

b_o : Carga externa.

ρ_o : densidad del material.

$\ddot{u}$: Aceleración (segunda derivada de los desplazamientos respecto al tiempo).

Se procede a realizar la discretización de la ecuación diferencial original en el dominio de las frecuencias para sistemas dinámicos.

Para analizar la estabilidad, se asume una solución en forma de onda:

$$u = \tilde{u} e^{i\omega t}$$

Donde:

u es el campo de desplazamiento.

$\tilde{u}$ es la amplitud espacial del desplazamiento o modo de vibración o modo de pandeo (análisis de estabilidad)

$e^{i\omega t}$ describe la dependencia temporal del movimiento, asumiendo un comportamiento armónico.

La primera derivada temporal (velocidad) es:

$$\dot{u} = \frac{\partial u}{\partial t} = \tilde{u} \cdot \frac{\partial}{\partial t}(e^{i\omega t}) = \tilde{u} \cdot i\omega e^{i\omega t}$$

La segunda derivada temporal (aceleración) es:

$$\ddot{u} = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial t}(\tilde{u} \cdot i\omega e^{i\omega t}) = \tilde{u} \cdot (i\omega) \cdot \frac{\partial}{\partial t}(e^{i\omega t}) = \tilde{u} \cdot (i\omega) \cdot (i\omega e^{i\omega t})$$

Dado que $i^2 = -1$, esto se simplifica a:

$$\ddot{u} = \tilde{u} \cdot (i^2 \omega^2) e^{i\omega t} = -\omega^2 \tilde{u} e^{i\omega t}$$

Sustituyendo $u = \tilde{u} e^{i\omega t}$, lo que confirma que la segunda derivada temporal introduce un término proporcional a: $\ddot{u} = -\omega^2 \tilde{u}$.

Por lo tanto, la aceleración se expresa como:

$$\ddot{u} = -\omega^2 u$$

Ahora si se sustituye la aceleración $\ddot{u}$ a la ecuación de movimiento se tiene lo siguiente:

$$\text{Div } S + b_o = \rho_o (-\omega^2 u e^{i\omega t})$$

Se pasa de un dominio continuo a uno discreto, por lo tanto, se emplea el método de elementos finitos para aproximar los campos $\tilde{u}$ y S usando funciones de forma $N_i(x)$. El desplazamiento $\tilde{u}$ se expresa como:

$$\tilde{u}(x) \approx \sum_i N_i(x) \tilde{u}_i$$

Donde:

$\tilde{u}(x)$ es el campo de desplazamiento en función de la posición $x \in B$.

$N_i(x)$ son funciones de forma.

$\tilde{u}_i$ son los valores nodales del desplazamiento.

Esta aproximación divide B en elementos finitos y representa $u(x)$, como una combinación lineal de $N_i(x)$, que son base local sobre cada elemento.

Discretizando la ecuación, se sustituye en $\text{Div } S + b_o = \rho_o(-\omega^2 u e^{i\omega t})$, y proyectando sobre las funciones de forma N_j (Método de Galerkin implícito), se integra sobre B :

$$\int_B N_j (\text{div } S + b_o) dV = \int_B N_j \rho_o (-\omega^2 u e^{i\omega t}) dV.$$

El lado izquierdo, empleando el teorema de la divergencia (p. 37), se tiene que:

$$\int_B N_j \text{div } S dV = - \int_B (\nabla N_j) \cdot S dV + \int_{\partial B} N_j (S n) \cdot S dV$$

Dado que el lado izquierdo originalmente incluye el termino completo $\text{Div } S + b_o$. Se aplica el teorema de la divergencia al termino $\text{Div } S$, por lo que se debe sumar el termino que estaba en la ecuación original:

$$\int_{\partial B} N_j b_o dV$$

Por lo tanto:

$$\int_B N_j \text{div } S dV = - \int_B (\nabla N_j) \cdot S dV + \int_{\partial B} N_j (S n) \cdot S dV + \int_{\partial B} N_j b_o dV$$

El lado derecho:

$$\int_B N_j \rho_o (-\omega^2 u e^{i\omega t}) dV = - \omega^2 \tilde{u} e^{i\omega t} \int_B \rho_o N_j u_i dV$$

Discretizando

$$\tilde{u}(x) \approx \sum_i N_i(x) \tilde{u}_i$$

el lado derecho se convierte en: $-\omega^2 e^{i\omega t} \int_B \rho_o N_j \sum_i N_i \tilde{u}_i dV$

Definiendo la matriz de masa (M), se define como:

$$M_{ij} = \int_B \rho_o N_i N_j dV$$

Entonces el termino discretizado es:

$$-\omega^2 e^{i\omega t} \sum_i M_{ji} u_i$$

Escrito en forma matricial se tiene que:

$$M(-\omega^2 u e^{i\omega t})$$

Empleando la matriz de rigidez K, se tiene que es igual a:

$$K = \int_B B^T D B dV$$

Donde:

B es la matriz de derivadas de función de forma.

D es la matriz de constantes elásticas.

Donde el término de la Div S, se discretiza a través de B, y la contribución elástica se representa como:

$$K u e^{i\omega t}$$

Combinando ambos términos tenemos que la ecuación discretizada es igual a:

$$M(-\omega^2 u e^{i\omega t}) + K u e^{i\omega t} = f e^{i\omega t}$$

Como se puede apreciar, se puede eliminar el término $e^{i\omega t}$, lo que queda como resultado.

$$-\omega^2 M u + K u = f$$

Pero como se define previamente

$$\ddot{u} = -\omega^2 u$$

Por lo tanto, se tiene lo siguiente:

$$M\ddot{u} + Ku = f$$

Ecuación matricial de segundo orden empleada en dinámica estructural

$$M(\ddot{u}) + K_T(u)u = f(t)$$

Donde:

$f(t)$ es el vector de fuerzas externas aplicadas.

$M(\ddot{u})$ son las fuerzas inerciales. (Energía Cinética)

$K_T(u)u$ son las fuerzas de rigidez. (Energía Potencial)

En la Figura 12, se muestra una comparativa de un sistema estable donde las deformaciones respecto al tiempo se van atenuando, manteniendo el equilibrio del sistema, en caso contrario para un sistema inestable se puede observar como las deformaciones tienden a aumentar en el tiempo, provocando una pérdida de equilibrio pudiendo inducir al colapso del sistema debido a las grandes deformaciones.

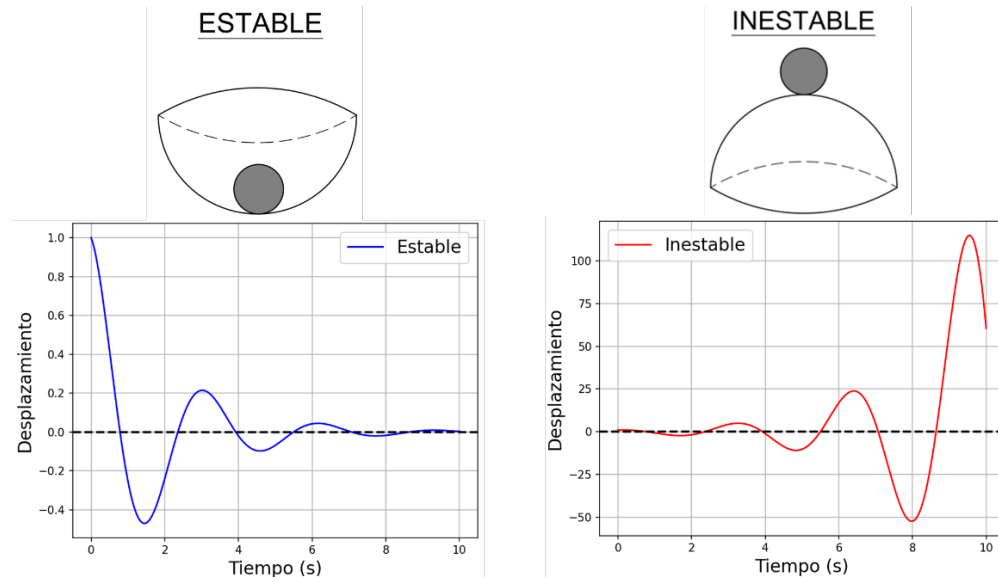


Figura 12. Sistema estable e inestable.

3.2 Formulación del problema de estabilidad no lineal

Bajo el principio de conservación de la energía en términos de la energía cinética y la energía potencial ante fuerzas externas en un sistema dinámico (ANSYS Inc., 2020), se tiene:

$$M(\ddot{u}) + K_T(u)u = f(t)$$

Se considera que estará en equilibrio estático por lo tanto $\ddot{u}=0$.

$$K_T(u)u = f(t)$$

Cuando los desplazamientos son grandes, la geometría de la estructura cambia significativamente durante la carga, lo que altera las ecuaciones de equilibrio. Para representar este comportamiento, se usa el principio del trabajo virtual en la configuración deformada (Del Coz Díaz et al., 2010).

$$\Psi(E_a) = \int_V B^T \sigma dV - F_{ext} = 0$$

Donde:

$\Psi(E_a)$: Función de equilibrio.

B^T : Matriz de deformaciones, la cual depende de los desplazamientos E_a .

σ : Tensor de tensiones configuración deformada.

V : Volumen de la estructura.

F_{ext} : Vector de cargas externas.

Como los desplazamientos afectan a la matriz $\bar{B}$, se induce una forma no lineal:

$$B = B_0 + B_L(E_a)$$

Donde:

B_0 : Matriz pequeñas deformaciones. (caso lineal)

$B_L(E_a)$: Dependencia no lineal en función de los desplazamientos.

Para resolver el problema no lineal, se usa una formulación incremental basada en la iteración de Newton-Raphson. La variación de la función de equilibrio se expresa como (Del Coz Díaz et al., 2010).

$$d\Psi = \int_V d\bar{B}^T \sigma dV + \int_V \bar{B}^T d\sigma dV = K_T dE_a$$

$$K_T = K_0 + K_\sigma + K_L$$

Donde:

K_T : Es la matriz tangente total dependiente de los desplazamientos de u.

$$K_0 = \int_V dB_0^T DB_0 dV, \quad \text{Matriz en pequeñas deformaciones.}$$

$$K_\sigma = \int_V dB_0^T DB_0 dV, \quad \text{Matriz de rigidez geometrica, la cual captura las fuerzas axiales.}$$

$$K_L = \int_V (B_0^T D B_L + B_L^T D B_0 + B_L^T D B_L) dV, \quad \text{Contribución de los grandes desplazamientos.}$$

Partiendo de la relación esfuerzo-deformación:

$$\varepsilon = B u$$

En problemas no lineales la matriz B depende de los desplazamientos u, lo que la deformación ε cambia no linealmente con los desplazamientos.

Dado que la siguiente relación es no lineal:

$$\sigma = f(\varepsilon, u)$$

La rigidez esta relacionada con los esfuerzos y deformaciones que sufre el sistema, por lo tanto, se debe actualizar la matriz de rigidez K_T .

$$K_T = \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} = \frac{\partial f(\varepsilon, u)}{\partial \varepsilon}$$

Como se puede observar la rigidez de la estructura cambia en función de los desplazamientos de u, por lo que se deberá actualizar en cada iteración para reflejar el comportamiento del material conforme al aumento de los desplazamientos.

Por lo tanto, la ecuación para pandeo no lineal igual a:

$$K_T(u)u = f(t)$$

Donde:

$K_T(u)$: Matriz de rigidez tangencial.

u: vector de desplazamientos.

f es el vector de fuerzas externas.

La carga crítica por pandeo no lineal se obtiene empleando la curva carga-deformación, se aplana (o antes de que la curva se aplane) esto nos indica que la rigidez tangencial se aproxima a cero y la estructura se vuelve inestable.

Una solución no convergente no siempre significa que se alcanzó la carga máxima absoluta del material, sino que se alcanzó el límite de estabilidad donde la estructura ya no puede mantener su configuración actual.

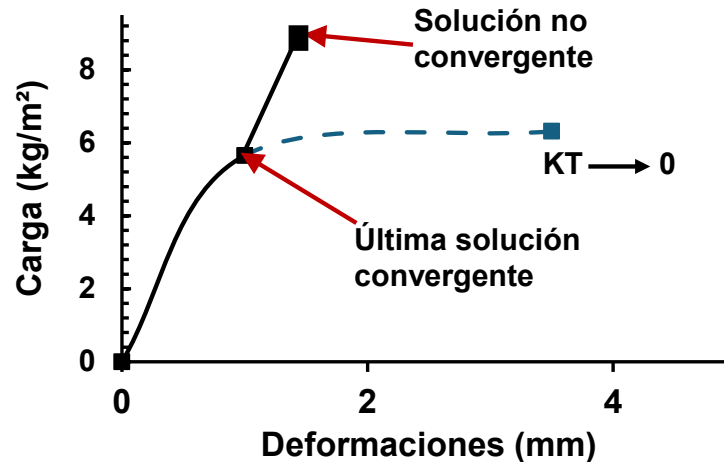


Figura 13. Inestabilidad por pandeo no lineal considerando imperfecciones geométricas.

En simulaciones numéricas, el punto donde el software deja de calcular por inestabilidad se denomina solución no convergente, pero la carga crítica real suele encontrarse en la última solución convergente previa a ese fallo.

3.3 Formulación del problema de estabilidad lineal

El problema de estabilidad lineal también conocido como pandeo problema de valores y vectores propios, ocurre cuando se le aplica una carga de compresión a un cuerpo el cual generalmente presenta geometría esbelta o delgada. Si la carga supera el límite determinado por las propiedades geométricas y condiciones de frontera (apoyos), el cuerpo presentará una deformación lateral repentina perdiendo su capacidad de carga de manera súbita (Timoshenko & Gere, 1961).

La estabilidad por pandeo se soluciona mediante un modelo de valores propios, donde la carga crítica de pandeo (P_{cr}), se determina resolviendo un eigenproblema similar al utilizado en dinámica estructural (Bathe, 1996).

Con base en la ecuación de segundo orden, se considera que estará en equilibrio estático por lo tanto $\ddot{u}=0$.

$$M\ddot{u} + Ku = f$$

$$Ku = f$$

Esta ecuación asume que las deformaciones son pequeñas y que los efectos geométricos (cambios en la geometría debido a la carga) son despreciables. Para el caso de la estabilidad o pandeo ante cargas a compresión P , inducen efectos geométricos que modifican la rigidez del sistema y estos efectos de segundo orden deben incluirse en la ecuación.

La matriz de rigidez geométrica deriva de la energía de deformación geométrica y típicamente tiene la siguiente forma para una carga axial a compresión P :

$$K_g = \int_L N \cdot B dL$$

Donde:

N es una matriz que depende de la carga P y su distribución a lo largo de la longitud L de la estructura.

B es una matriz que relaciona las derivadas de los desplazamientos con las curvaturas o rotaciones.

Cuando se incluyen los efectos geométricos se suma la siguiente expresión:

$$PK_g u$$

La cual representa la contribución de carga P a las fuerzas internas debido a la deformación:

$$Ku + PK_g u = f$$

Donde:

Ku son las fuerzas de rigidez.

PK_gu son las fuerzas de interacción de la carga P con la matriz geométrica.

La condición de pandeo en estado estático ocurre cuando el sistema tiende a deformarse lateralmente ($u \neq 0$), sin necesidad de un incremento de carga externa en un estado de equilibrio inestable, para este punto las fuerzas externas son cero ($f \neq 0$), por lo tanto, se tiene:

$$(K + PK_g)u = 0$$

Donde:

K : Matriz de rigidez elástica.

K_g : Matriz de rigidez geométrica, la cual depende de la carga P .

u : Vector de desplazamientos nodales.

Para que esta ecuación tenga una solución no trivial ($u \neq 0$), se tiene lo siguiente:

$$\det(K + PK_g) = 0$$

P se convierte en el valor propio y u son los vectores propios o modos de pandeo.

Para determinar la carga crítica de pandeo P_{cr} , sin asumir un valor fijo de P , se introduce λ como un factor de escala de carga, la cual representa la carga efectiva.

$$P_{cr} = \lambda P$$

En la literatura se considera con signo negativo a la reducción de rigidez por compresión, por lo tanto, la ecuación general para estimar la estabilidad lineal de un sistema elástico es expresa de la siguiente forma (Walentyński et al., 2014):

$$(K - \lambda K_g)u = 0$$

Para que esta ecuación tenga una solución no trivial ($u \neq 0$), se tiene lo siguiente:

$$\det(K - \lambda K_g) = 0$$

Donde los valores propios representan las cargas críticas P_{cr} . Por lo que la interpretación de dichas soluciones al problema de estabilidad ante una carga P , se desglosa a continuación:

Si $P < P_{cr}$, la estructura es estable.

Si $P > P_{cr}$, la estructura es inestable.

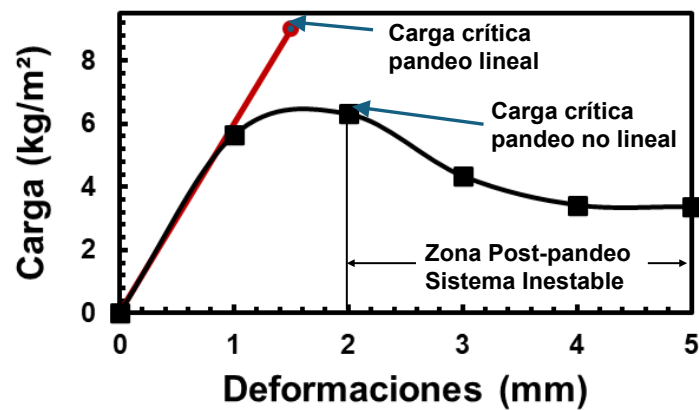


Figura 14. Curva de equilibrio carga contra deformación. Nótese que la carga crítica por pandeo lineal es mayor a la estimada, considerando imperfecciones y no linealidades.

3.4 Diseño por viento según reglamento

La obtención de presiones de diseño por viento se extrajo del Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad para diseño por viento versión 2020.

Clasificación de las estructuras según su importancia:

- Grupo A: Estructuras con una importancia alta, donde la falta de estas provoque una pérdida significativa de vidas y/o servicios indispensables para la atención de la población.
- Grupo B: Estructuras con una importancia media, donde la falta de estas tenga un impacto no de significancia vital en la población.
- Grupo C: Estructuras con una importancia baja, donde las mismas sean temporales o cuya pérdida no afecte a la población.

Clasificación de las estructuras según su respuesta al viento:

Tipo 1: Son estructuras que por su configuración y características son poco sensibles a los efectos dinámicos y a las ráfagas del viento. Donde tienen una relación de esbeltez es menor o igual a cinco y tienen un periodo fundamental de vibración del primer modo menor o igual que un segundo.

Tipo 2: Son estructuras sensibles a las ráfagas de viento y a sus efectos dinámicos. Donde tienen una relación de esbeltez mayor que cinco y/o un periodo de vibrar mayor de un segundo.

Tipo 3: Son un subgrupo del tipo 2, donde las oscilaciones que presenta son altas, donde se incluyen construcciones cilíndricas o prismáticos esbeltos.

Tipo 4: Son las estructuras que presentan problemas aerodinámicos inestables. Ejemplos de ellos son las líneas de transmisión, los elementos colgantes, entre otros.

3.4.1 Determinación de la velocidad de diseño, VD

La velocidad de diseño, VD, es la velocidad a partir de la cual se calculan los efectos del viento sobre la estructura o sobre un componente de este.

La velocidad de diseño, VD, en km/h, se obtendrá con la ecuación:

$$VD = Ft + Frz + Vr$$

En donde:

FT: es el factor que depende de la topografía local, adimensional.

Frz: el factor que toma en cuenta el efecto de las características de exposición local, adimensional

VR: es la velocidad regional de ráfaga que le corresponde al sitio en donde se construirá la estructura, en km/h.

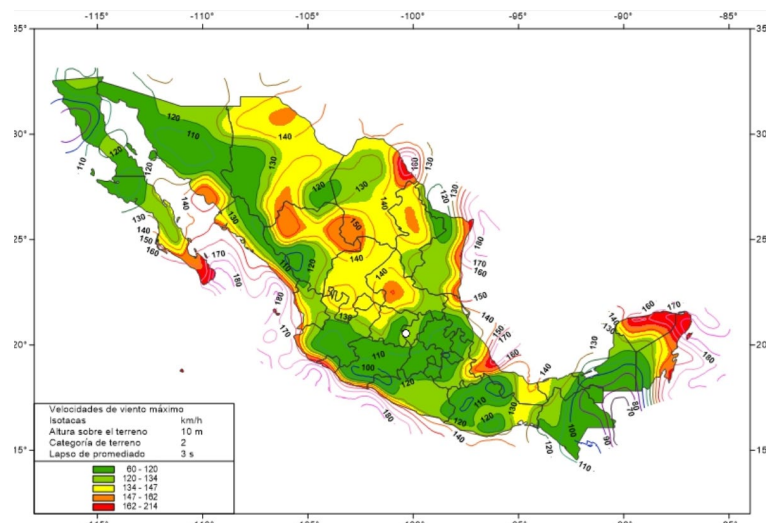


Figura 15. Mapa de regionalización eólica de la República Mexicana, periodo de retorno de 50 años. (CFE,2020)

3.4.2 Determinación de la presión básica de diseño, qz

Cuando el viento actúa sobre una construcción, genera presiones sobre sus superficies, que varían según la intensidad de la velocidad y la dirección del viento.

La presión que ejerce el flujo del viento sobre una superficie plana perpendicular a él, se denomina presión dinámica de base qz , en Pa, y se determina con la siguiente ecuación:

$$qz = 0.047GV_D^2$$

En donde:

VD: Es la velocidad básica de diseño, en km/h, definida en la Sección 1.6.1

qz : La presión dinámica de base a una altura z sobre el nivel del terreno, en Pa.

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

El valor de G se obtiene con la siguiente expresión:

$$G = \frac{0.392\Omega}{273 + r}$$

En donde:

Ω : es la presión barométrica, en mm de Hg.

r : el valor medio anual de las temperaturas mínimas diarias, en °C. Valores de este parámetro para diferentes ciudades de México pueden consultarse en el CDV-MDOC vigente.

3.5 Funciones sintéticas por viento

3.5.1 Espectros de potencia

Es una representación matemática para describir las fluctuaciones de la velocidad del viento en función de una señal en diferentes frecuencias, permitiendo analizar y simular como el viento varía en un tiempo determinado. Sus principales aplicaciones abarcan diversos campos desde la meteorología, dinámica de fluidos hasta la ingeniería de viento para evaluar la respuesta dinámica estructural.

3.5.2 Espectro de potencia de Von Karmán

Este modelo describe la energía turbulenta del viento distribuida en diferentes frecuencias, siendo ampliamente utilizado en ingeniería para representar la distribución de energía en la turbulencia atmosférica. Su formulación incluye la longitud de integral de escala y permite modelar campos de viento espacialmente correlacionados de forma realista (Simiu & Scanlan, 1996).

La formulación general para la densidad espectral de potencia para la componente longitudinal de la turbulencia es:

$$S_n(f) = \frac{4\sigma_u^2 L_u / U}{(1 + 70.8(f L_u / U)^2)^{5/6}}$$

Donde:

$S_n(f)$: Densidad espectral. (energía de viento)

σ_u : Desviación estándar de la velocidad del viento. (intensidad de turbulencia)

L_u : Longitud de integral de escala en la dirección del viento.

U : Velocidad media del viento.

f : Frecuencia en Hz.

3.5.3 Espectro de potencia de Davenport

A diferencia del modelo anterior, esta versión modela las fluctuaciones de velocidad del viento cerca de la superficie, por lo que está más orientado a efectos de turbulencia de baja frecuencia.

Así mismo su formulación se complementa considerando coeficiente de arrastre o rugosidad, velocidad media del viento y longitud de turbulencia. Este espectro resulta más adecuado para obtener simulaciones por carga del viento aplicadas a estructuras de mediana o baja altura.

$$S_n(f) = \frac{4\kappa V_{med}^2 x^2}{f(1+x^2)^{4/3}}$$

Donde:

$S_n(f)$: Densidad espectral. (energía de viento)

κ : Coeficiente de arrastre de la superficie.

V_{med} : velocidad media del viento.

x : Escala adimensional de frecuencia ($1200 * f / V_{med}$)

3.5.4 Función de autocorrelación

Este tratamiento convierte el espectro de potencia en datos temporales los cuales puedan ser procesados por un ordenador. Se calcula la función de autocorrelación a partir del espectro de potencia de Davenport, empleando la transformada de Fourier Inversa usando integración numérica.

$$R_{(\tau)} = \int_0^\infty S_n(f) \cos(2\pi f \tau) df$$

Donde:

$R_{(\tau)}$: Autocorrelación.

$\cos(2\pi f \tau)$: Parte de la transformada para pasar del dominio de la frecuencia al tiempo.

3.5.5 Matriz de Toeplitz

Es la matriz cuadrada donde los valores de autocorrelación se repiten en las diagonales. Esta matriz organiza los datos de forma sistemática para que matemáticamente sea sencilla de resolver para el ordenador.

$$R_m = \begin{pmatrix} R_0 & R_1 & \dots \\ R_1 & R_0 & \dots \\ \dots & \dots & \dots \end{pmatrix}$$

Donde:

$R_0, R_1, \dots$: Valores de autocorrelación.

3.5.6 Ecuaciones de Yule-Walker

Este proceso matemático se empleó para obtener los coeficientes del modelo (efecto ráfaga de viento), a partir de un sistema de ecuaciones lineales que relaciona la matriz de Toeplitz con el vector de autocorrelación.

$$R = R_m \phi$$

Donde:

R: Vector de autocorrelaciones.

ϕ : Coeficientes de ráfaga de viento.

3.5.7 Modelo autorregresivo

El modelo autorregresivo es una técnica utilizada para generar series temporales artificiales del viento que conservan las propiedades estadísticas del flujo atmosférico. Es ampliamente utilizado en simulaciones de viento turbulento debido a su eficiencia computacional y capacidad de reproducción espectral.

En el contexto del viento turbulento, estos modelos permiten generar datos sintéticos que reflejan las características estocásticas del viento real. Este modelo se basa en la idea de que la velocidad del viento en un instante dado depende de

sus valores anteriores, más una contribución de un término aleatorio que captura la naturaleza estocástica de la turbulencia.

El modelo Ar(p) de orden p se define por la ecuación:

$$v_i(t) = \sum_{k=1}^p \Phi_{ij}(k)v_j(t - \kappa\Delta t) + N_i(t)$$

Donde:

$v_i(t)$: Velocidad del viento en el punto i en el tiempo t.

p: Orden del modelo AR, que define cuantos valores pasados influyen en el presente.

$\Phi_{ij}(k)$: Coeficientes autorregresivos que describen la relación de dependencia entre valores pasados y presentes.

$N_i(t)$: Término de ruido aleatorio con una covarianza cruzada del ruido dada por $R_N(0)$ en $t=0$.

Δt : Intervalo de tiempo de muestreo.

$R_N(0)$: Parámetro clave en la implementación de modelos autorregresivos multi-correlacionados, ya que define cómo el ruido aleatorio afecta diferentes puntos de la estructura. se define como:

$$R_N(0) = E[N(t)N^T(t)]$$

Donde:

$E[.]$: Valor esperado (esperanza matemática)

$N(t)$: Vector ruido aleatorio.

4. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

4.1 Hipótesis

El análisis de estabilidad no lineal de una estructura de arco techo sujeta a acciones dinámicas por viento permite determinar la carga crítica, la cual será menor en un 15% respecto a estudios tradicionales estáticos, debido a que se consideran variables como la masa, rigidez, aceleración y carga variable en el tiempo.

4.2 Objetivo general

Generar modelos numéricos que evalué la estabilidad en cubiertas autoportantes, sometidas a cargas dinámicas de viento, considerando las no linealidades.

4.3 Objetivos específicos

1. Realizar modelos numéricos por elementos finitos, que permitan obtener las cargas críticas por estabilidad lineal.
2. Desarrollar modelos numéricos con el método de elementos finitos, considerando imperfecciones y efectos no lineales, para calcular la carga crítica de estabilidad.
3. Generar las cargas dinámicas por viento a través de funciones de viento tiempo historia.
4. Estimar la estabilidad ante cargas de viento dinámico y evaluar los efectos que se generan en términos de esfuerzos, deformaciones y resistencia.

5. METODOLOGÍA

Se desarrollaron los objetivos planteados mediante un esquema de trabajo estructurado el cual estuvo conformado por diferentes etapas y secuencias iterativas, dicho proceso se muestra en el siguiente diagrama de flujo. Como se muestran en la Figura 16.

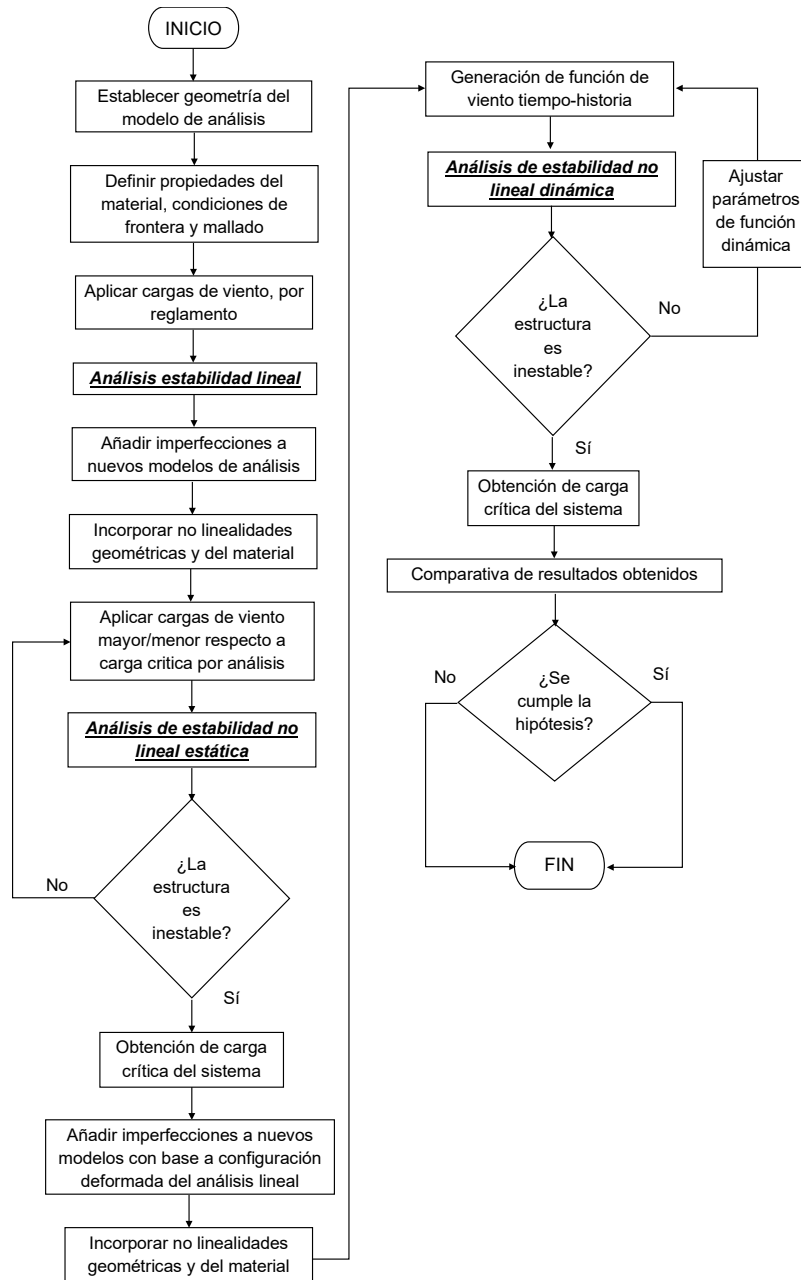


Figura 16. Diagrama de flujo análisis de estabilidad en arcotechos.

A continuación, se describen cada una de las actividades realizadas para cada una de las etapas que conforman el proceso para la obtención de las cargas críticas por pandeo para cubiertas tipo arcotecho ante cargas estáticas y dinámicas por viento.

5.1 Desarrollo de modelos numéricos para análisis de estabilidad lineal.

5.1.1 Definición de topologías y de materiales

Se estudió la estabilidad para distintos claros, manteniendo constantes la altura del arco, el largo y el calibre de la sección de lámina, como se muestra en la Figura 17. Se analizó únicamente el sistema de cubierta y no se consideraron los elementos de soporte.

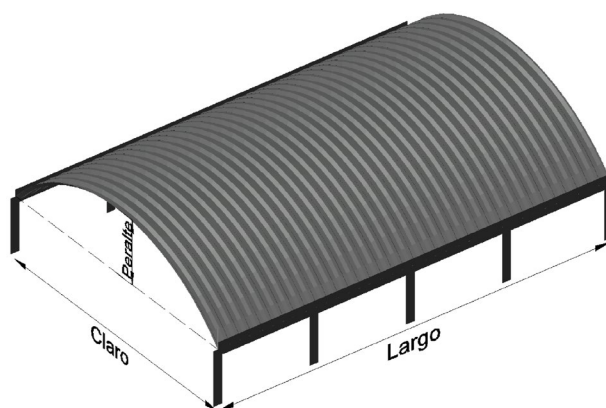


Figura 17. Parámetros geométricos del modelo.

Se empleó una sección arcotecho (K super span), MIC-240, usando un calibre 16, el cual es el espesor máximo que se ofrece para este sistema constructivo. Debido a un enfoque conservador de seguridad estructural para la reducción de riesgos de colapso ante cargas extraordinarias y vida útil de la cubierta, criterio muy empleando en la auto construcción de este tipo de infraestructura.

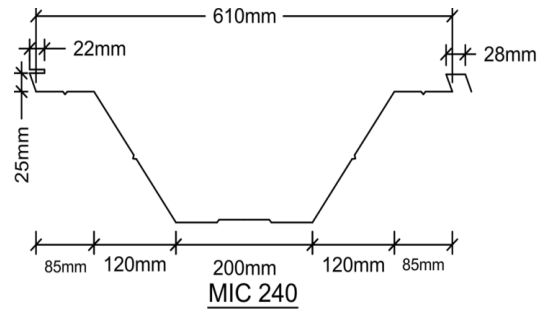


Figura 18. Sección de análisis de arcotecho MIC 240.

El material de la lámina corresponde al acero rolado en frío de calidad ASTM A1008 Grado 33, de acuerdo con las fichas técnicas del fabricante de los rollos de lamina pinto. Las propiedades del material, el espesor y la sección para cada caso de estudio se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Propiedades del material de lamina.

Claro (m)	Largo (m)	Peralte (m)	Calibre (mm)	Sección	Material
15,20,25,30	21.96	3.5	1.52	KS-02	ASTM A1008 Gr33

5.1.2 Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera se consideraron simplemente apoyadas en los extremos, debido a cómo se fija el sistema de cubierta arqueada a los elementos de soporte como se muestra en la Figura 19.

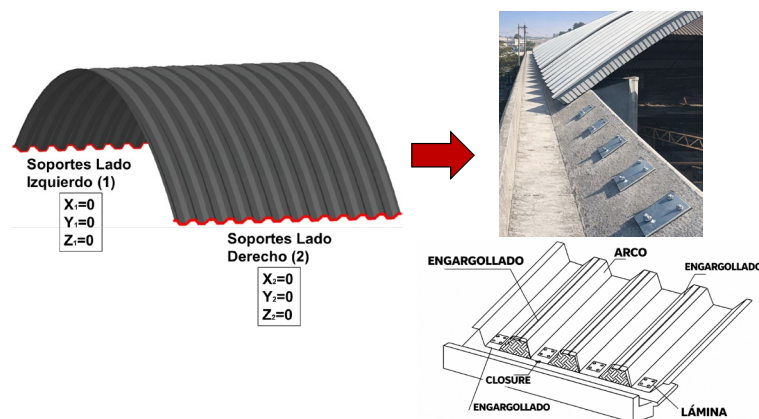


Figura 19. Condiciones de frontera de acuerdo con fijación del sistema arcotecho.

5.1.3 Modelado y definición de elementos finitos

Los modelos de elementos finitos para todos los casos de análisis consideraron superficies lisas sin corrugaciones producidas por el segundo proceso de laminación, debido al alto costo computacional y la complejidad de reproducir fielmente las corrugaciones.

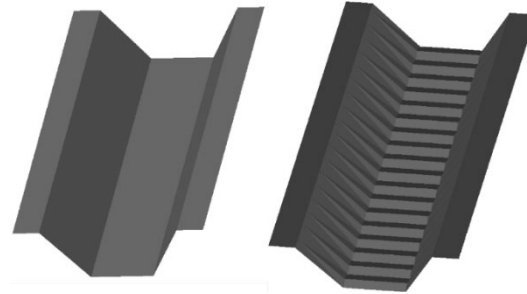


Figura 20. Sección sin doble corrugado (izquierda), sección con doble corrugado. (derecha)

Se utilizaron elementos SHELL 181, empleados comúnmente para modelar estructuras delgadas (del Coz Díaz et al., 2012) e ideales para análisis lineales y no lineales, ya que pueden manejar grandes deformaciones y rotaciones (ANSYS Inc., 2024). El elemento tipo SHELL 181 tiene cuatro nodos con seis grados de libertad por nodo: tres en las traslaciones en las direcciones x , y , z y tres en las rotaciones sobre los ejes x , y , z .

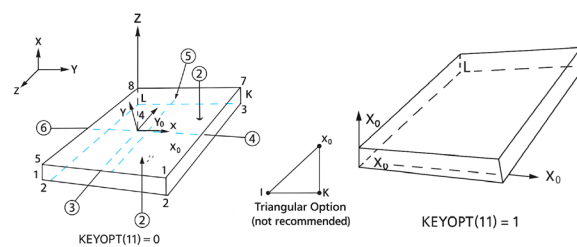


Figura 21. Elemento SHELL 181. (Ansys Inc,2017)

5.1.4 Calidad de mallado

Para los elementos finitos, se realizó el mallado utilizando elementos cuadriláteros QUAD4, que son adecuados para representar superficies delgadas. Se muestran a continuación los parámetros de mallado de elementos finitos para cada caso de análisis.

Tabla 4. Calidades de elementos finitos para cada caso de análisis.

Parámetros de malla de elementos finitos				
Claro (m)	No. De nodos	No. De elementos	Calidad del elemento	Relación de aspecto
15	113013	112320	0.97	1.19
20	147653	146880	0.97	1.21
25	173633	172800	0.97	1.19
30	323697	322560	0.99	1.09

5.1.5 Casos de carga

5.1.5.1 Carga de peso propio

El peso propio de la estructura fue considerado en el software aplicando la densidad del material $\rho=7850 \text{ kg/m}^3$, que corresponde al acero tipo ASTM A1008 grado 33 para una sección tipo MIC 240 con espesor de 1.52 mm.

5.1.5.2 Cargas de viento

Con base a lo descrito en el manual para diseño obras civiles por viento Comisión Federal de Electricidad de México, Edición 2020, para cada uno de los casos de carga se generaron como se muestra en la Figura 22 y Figura 27. Las cargas aplicadas para cada uno de los casos analizados se muestran en la Tabla 5 y Tabla 6. Los esquemas de las cargas de presión del viento sobre la estructura, según CFE (2020), se presentan en las Figura 23, Figura 24, Figura 25, Figura 26, Figura 28, Figura 29, Figura 30 y Figura 31.

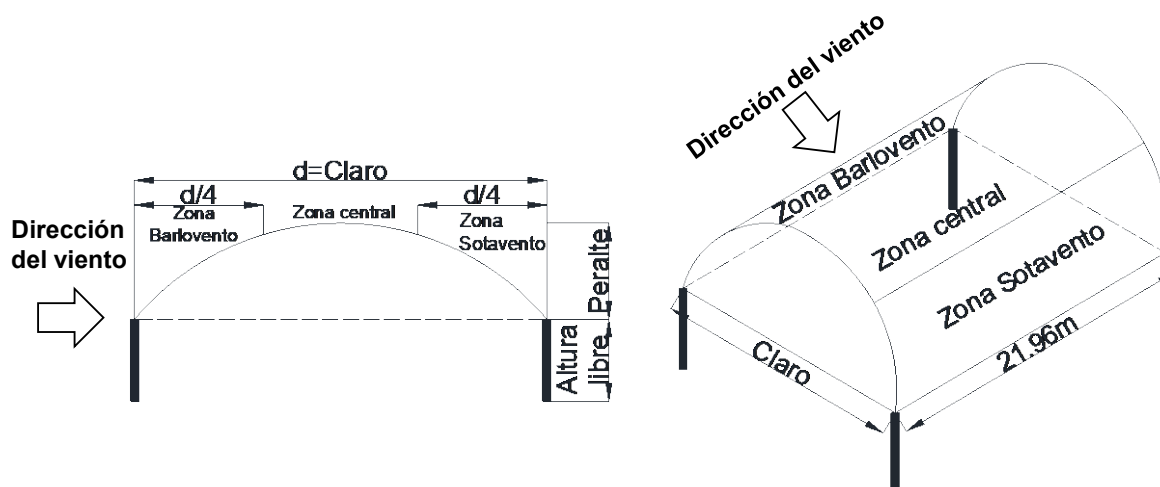


Figura 22. El viento es perpendicular a la cubierta. ($\theta=0^\circ$)

Tabla 5. Distribución de cargas de presión del viento en dirección perpendicular a la cubierta. ($\theta=0^\circ$)

Caso	Casos de carga			
	Claro (m)	Barlovento (kg/m ²)	Central (kg/m ²)	Sotavento (kg/m ²)
1	15	9.77	-33.02	-10.83
2	15	27.74	-33.02	27.74
3	15	-17.96	-60.75	-38.56
4	15	0	-60.8	0
5	20	0.53	-42.26	-20.07
6	20	18.49	-42.26	18.49
7	25	0.53	-42.26	-20.07
8	25	18.49	-42.26	18.49
9	30	0.53	-42.26	-20.07
10	30	18.49	-42.26	18.49

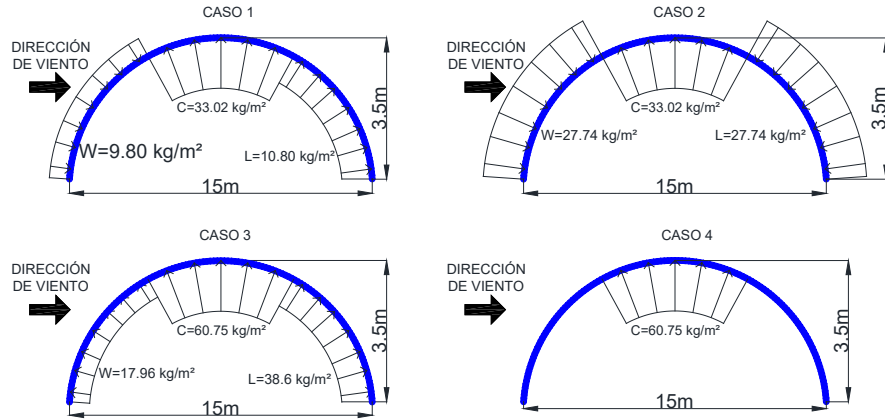


Figura 23. Cargas por viento según CFE,2020, modelos con claro 15m. Dirección $\Theta=0^\circ$.

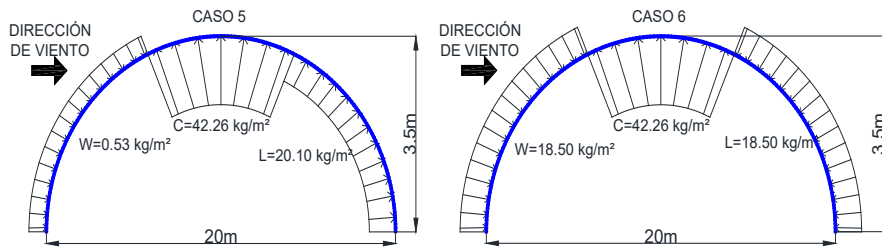


Figura 24. Cargas por viento según CFE,2020, modelos con claro 20m. Dirección $\Theta=0^\circ$.

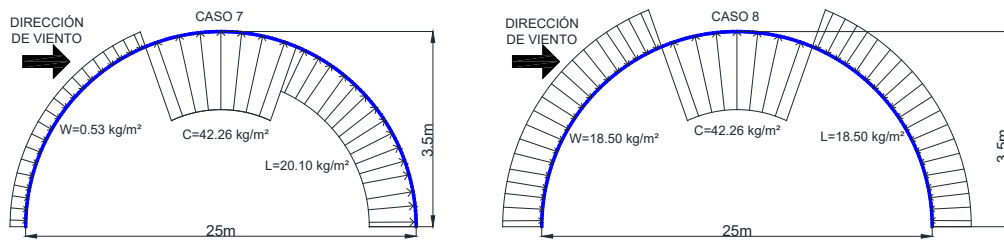


Figura 25. Cargas por viento según CFE,2020, modelos con claro 25m. Dirección $\Theta=0^\circ$.

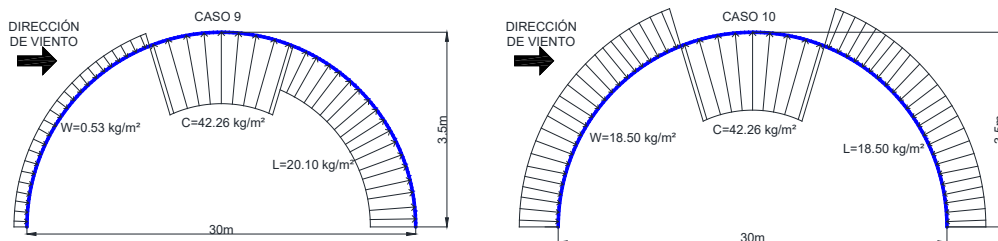


Figura 26. Cargas por viento según CFE,2020, modelos con claro 30m. Dirección $\Theta=0^\circ$.

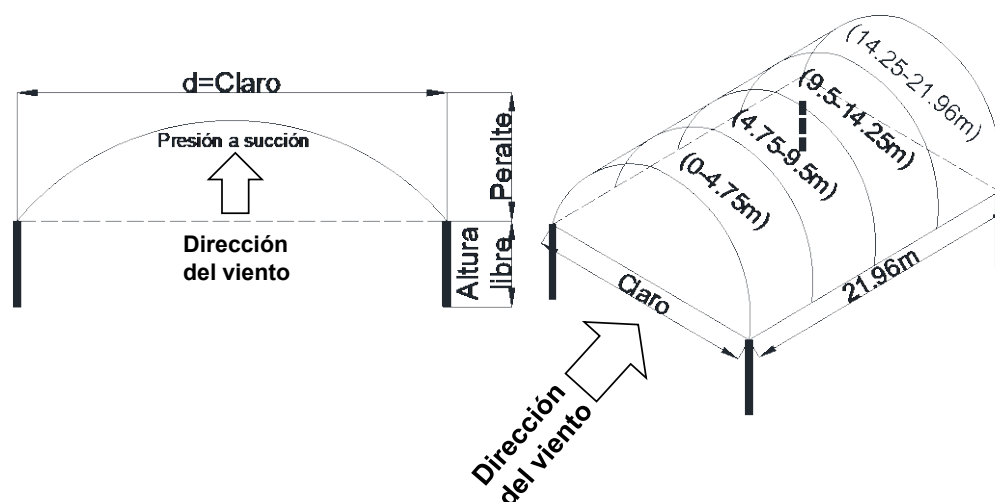


Figura 27. El viento es paralelo a la cubierta ($\theta=90^\circ$)

Tabla 6. Distribución de cargas de presión del viento en dirección paralela a la cubierta.
($\theta=90^\circ$)

Claro (m)	Tramos	Casos de carga
		Presión a succión (kg/m ²)
15 m	(0-4.75m)	-87.13
	(4.75m-9.5m)	-56.63
	(9.5m-14.25m)	-41.37
	(14.25m-21.96m)	-33.74
20 m	(0-4.75m)	-118.34
	(4.75m-9.5m)	-88.75
	(9.5m-14.25m)	-73.96
	(14.25m-21.96m)	-66.56
25 m	(0-4.75m)	-114.51
	(4.75m-9.5m)	-86.63
	(9.5m-14.25m)	-72.68
	(14.25m-21.96m)	-65.71
30 m	(0-4.75m)	-118.34
	(4.75m-9.5m)	-88.75
	(9.5m-14.25m)	-73.96
	(14.25m-21.96m)	-66.56

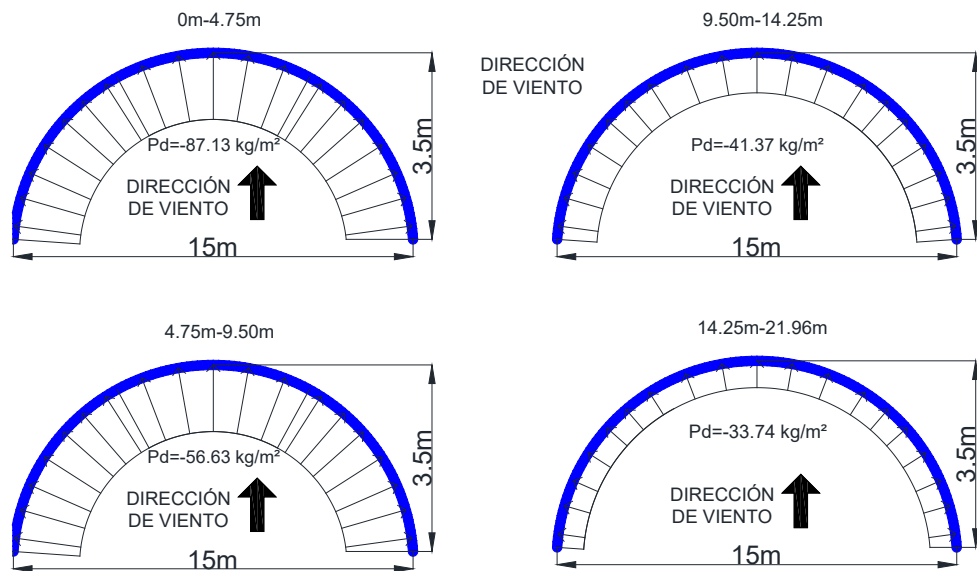


Figura 28. Cargas por viento según CFE,2020, modelos con claro 15m. Dirección $\Theta=90^\circ$.

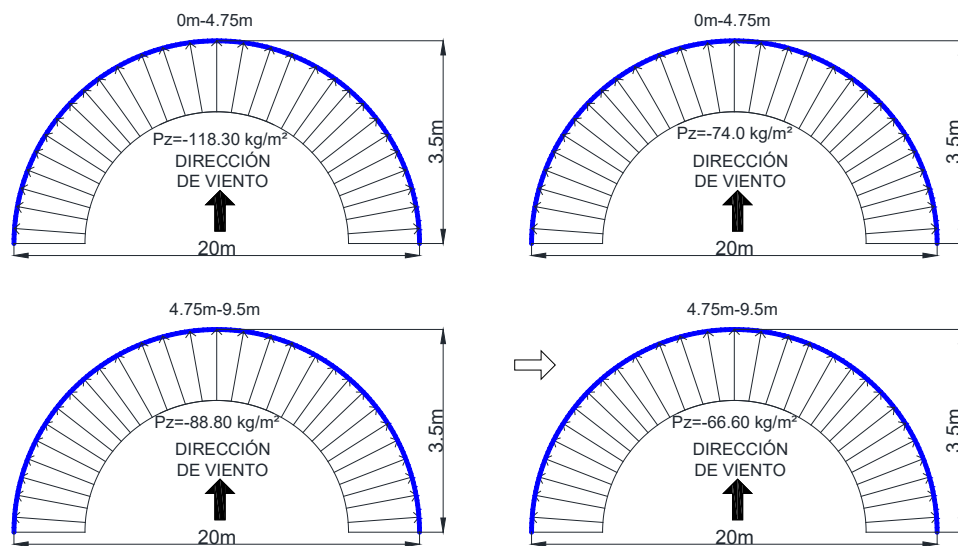


Figura 29. Cargas por viento según CFE,2020, modelos con claro 20m. Dirección $\Theta=90^\circ$.

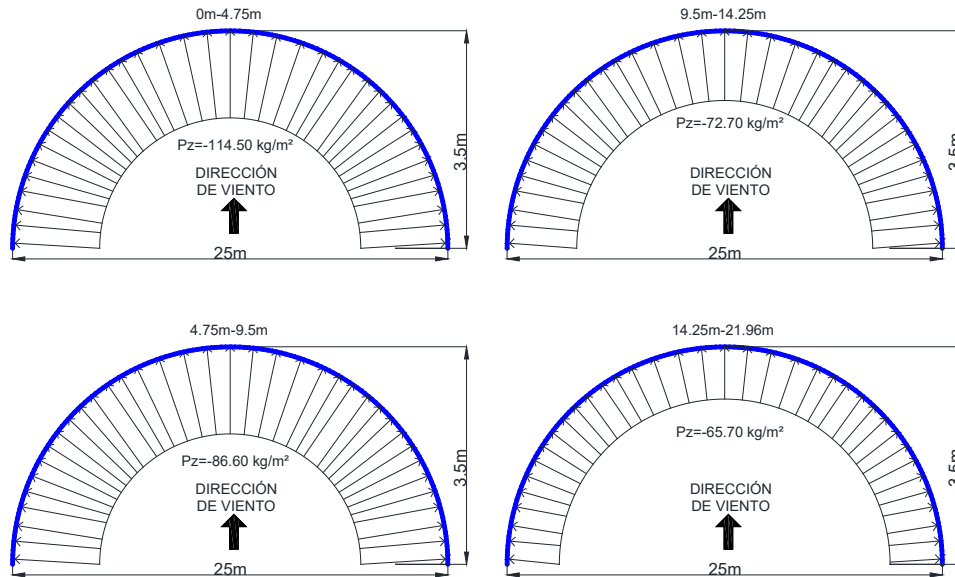


Figura 30. Cargas por viento según CFE,2020, modelos con claro 25m. Dirección $\Theta=90^\circ$.

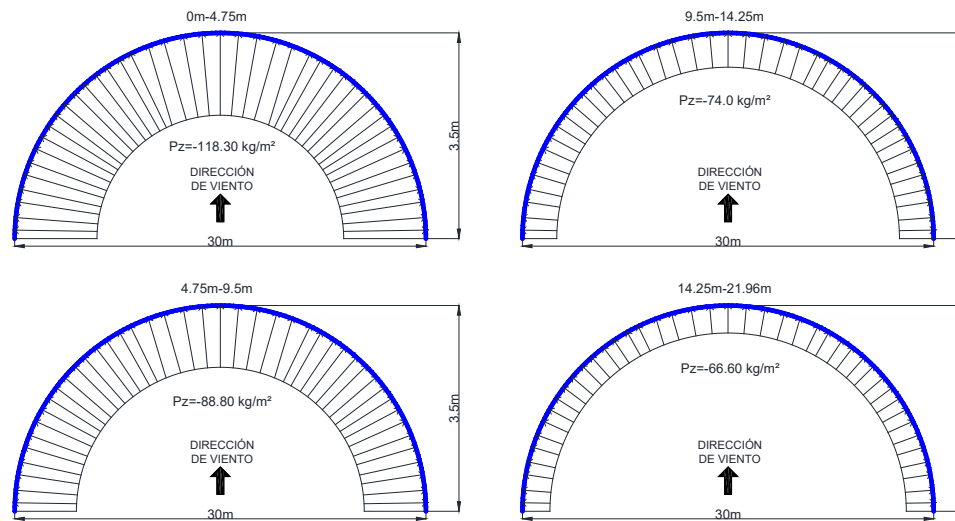


Figura 31. Cargas por viento según CFE,2020, modelos con claro 30m. Dirección $\Theta=90^\circ$.

Empleando el programa ANSYS Workbench 19.2 Mechanical, se ingresaron los datos de entrada como lo son: la geometría, propiedades del material, las condiciones de frontera, mallado, y cargas por viento, para posteriormente analizar la estabilidad para cada claro y caso de carga correspondiente, como se muestra en la Figura 32, para cada caso de carga.

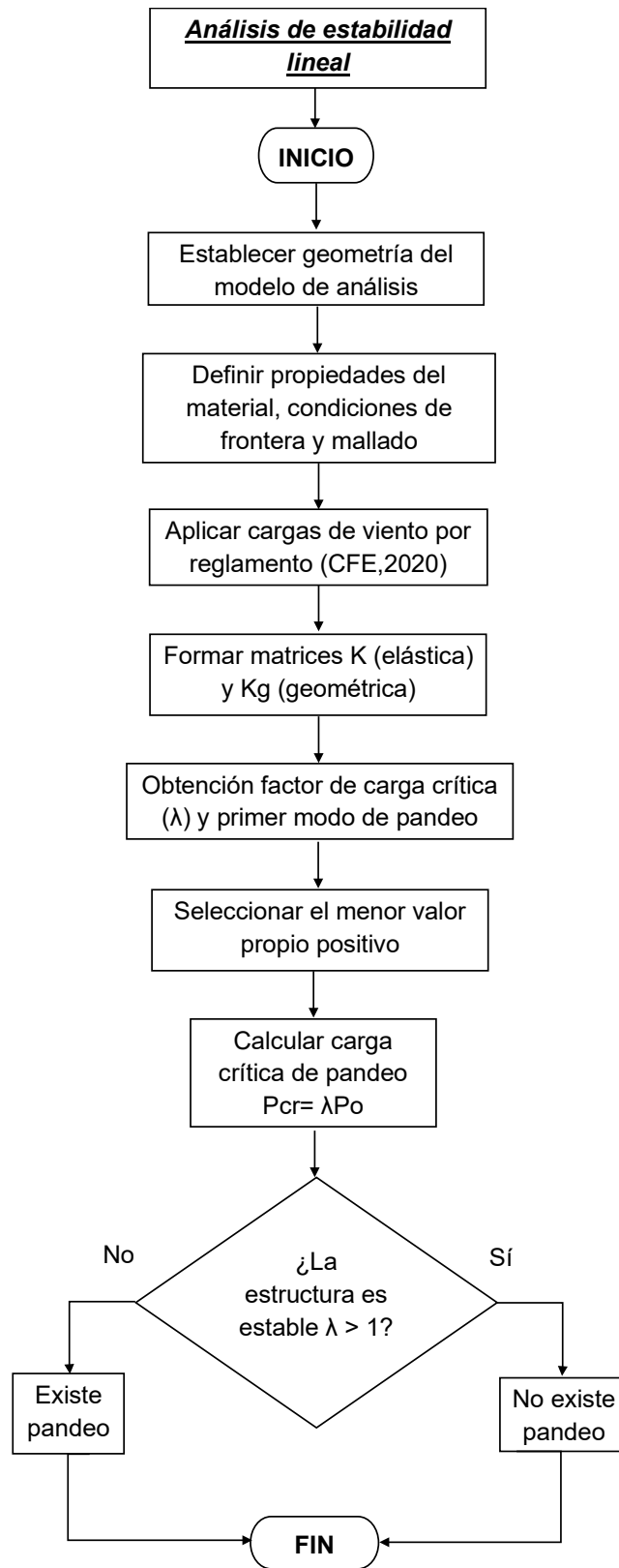


Figura 32. Metodología para análisis de estabilidad lineal.

5.2 Elaboración de modelos numérico para análisis de estabilidad no lineal con imperfecciones

5.2.1 Imperfecciones

Se realizaron modelos para cada caso de carga y claro a partir de la configuración deformada generada del análisis de estabilidad lineal, con la finalidad de la consideración de imperfecciones iniciales en las secciones de la lámina.

5.2.2 No linealidades del material

Se generó la curva multilineal cinemática con base al modelo matemático modificado de Ramberg-Osgood propuesto en la publicación de Gardner and Yun (2018), el cual tiene como objetivo generar curvas elastoplásticas para aceros rolados en frío, validado con más de 700 datos experimentales de acero rolado en frío de diferentes partes del mundo.

El acero empleado para el conformado de la sección de la cubierta consiste en acero galvanizado rolado en frío del tipo ASTM A1008 Grado 33, cuyas características mecánicas y parámetros del material para la generación de la curva esfuerzo deformación, se muestran en la Tabla 7 y la curva empleada en los análisis no lineales estáticos y dinámicos se muestran en la Figura 33.

Tabla 7. Propiedades del material acero ASTM A1008 Grado 33, rolado en frío.

E (GPa)	f_y (MPa)	f_u (MPa)	n	m	eu (%)
200	227.5	330	8	4	20

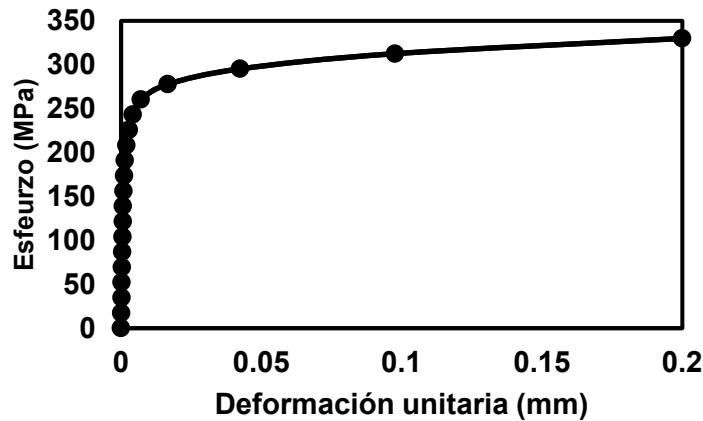


Figura 33. Curva esfuerzo-deformación acero ASTM A1008 Gr33.

5.2.3 No linealidades geométricas

Se consideraron las grandes deformaciones o no linealidades geométricas, en el análisis empleando el programa ANSYS Workbench Mechanical, activándolo de la siguiente manera:

ANSYS Workbench Mechanical → Analysis Settings → Large Deflection = On.

5.2.4 Aplicación de cargas por viento y análisis incremental

Se realizó el proceso iterativo aplicando una carga crítica mayor a la obtenida en el análisis de estabilidad lineal, al modelo con imperfecciones, no linealidades geométricas y del material. El programa aplica la carga a través de sub pasos hasta llegar al 100% del total de la carga aplicada, empleando el método de Newton-Raphson, hasta encontrar la pérdida por estabilidad para cada caso de estudio. En caso de que las deformaciones del sistema tiendan al infinito y por consecuencia el programa no encuentre el punto crítico por pérdida de estabilidad se deberá comenzar otra iteración empleando una carga crítica menor a la obtenida en el análisis de estabilidad lineal, así como reducir los parámetros de sub pasos hasta encontrar la pérdida de estabilidad del sistema.

En la Figura 34, se resume la metodología para la estimación de la estabilidad no lineal con imperfecciones, para cada caso de estudio.

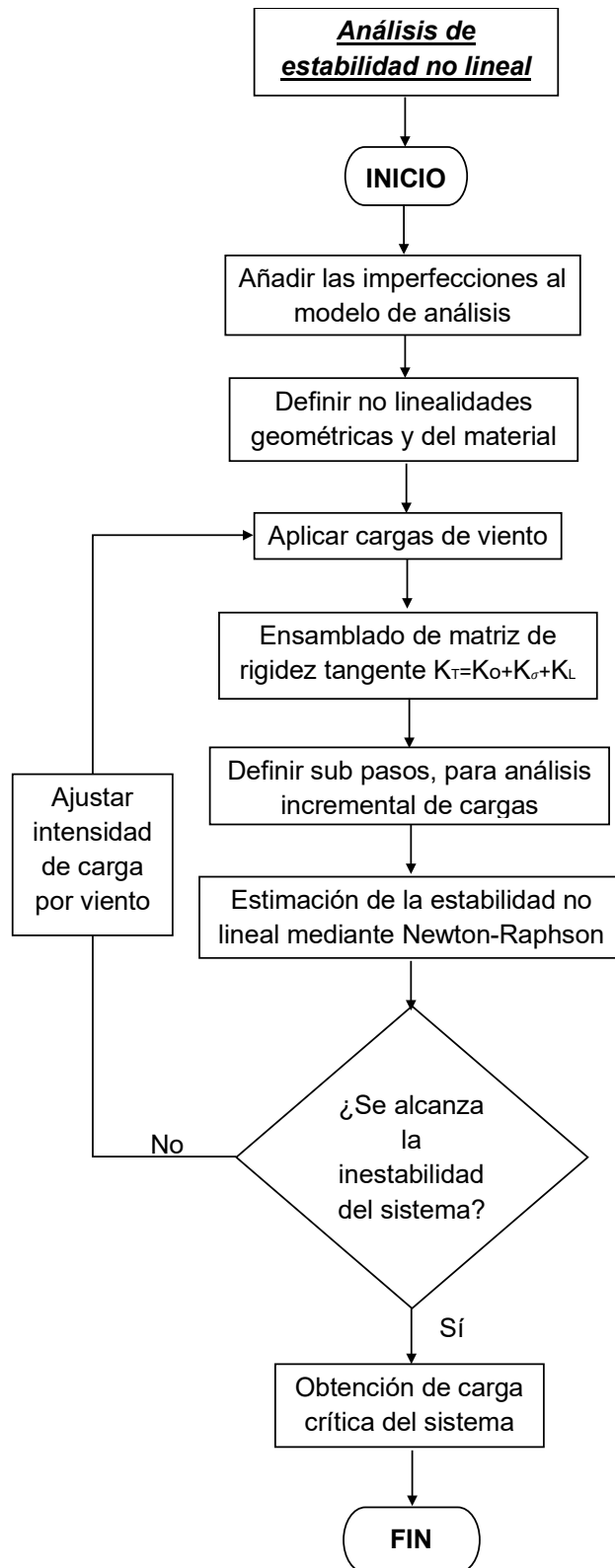


Figura 34. Metodología para análisis de estabilidad lineal no lineal estático.

5.3 Generación de función viento tiempo-historia

Para poder evaluar la respuesta dinámica de la estructura ante cargas de viento dinámico, es necesario contar con datos de mediciones previas o realizar estudios de túnel de viento y/o simulaciones de CFD. Sin embargo, dado al alto costo computacional y poca información disponible para estimar la carga de viento, esta investigación propone el uso de un modelo AR de filtrado lineal para obtener el historial temporal de muestras de viento fluctuantes, estos modelos permiten generar datos sintéticos que reflejan las características estocásticas del viento real.

5.3.1.1 Espectro de potencia de Davenport

Se obtuvo el espectro de potencia de Davenport, a través del lenguaje de programación Python, ingresando los parámetros iniciales de acuerdo con la establecido en el Manual de Obras civiles de la Comisión Federal de Electricidad de México, Edición 2020. Se seleccionó el espectro de Davenport, debido a que es ampliamente usado en aplicaciones de ingeniería estructural (Zang et al., 2014 & Jiang & Li, 2019). En la Figura 35, se muestra un espectro de potencia, empleado en esta investigación.

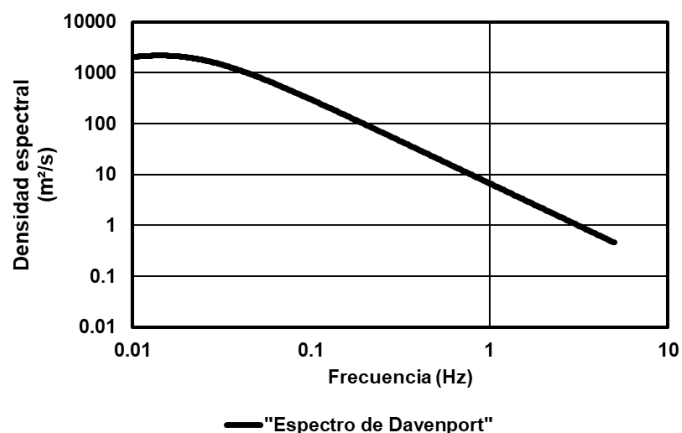


Figura 35. Espectro de potencia de Davenport. Para una velocidad media (V_{med}) de 21.97 m/s y un índice de rugosidad (κ) de 0.05. Para 1000 puntos (N) y una frecuencia (f_s) de 10 Hz.

5.3.1.2 *Modelo autorregresivo*

Empleando el lenguaje de programación Python, se fijó un paso de tiempo de 0.1 s, de acuerdo con investigaciones realizadas por (Jiang & Li, 2019) para transformar el espectro de potencia en el dominio de las frecuencias al dominio del tiempo.

Para este caso de estudio, se trabajó con una altura fija, por lo que el problema fue univariable, por lo tanto, no se generó una matriz de correlación espacial entre diferentes alturas o puntos.

Posteriormente se calcularon las correlaciones en el tiempo, y se obtuvieron los coeficientes del modelo AR mediante las ecuaciones de Yule-Walker, finalmente se generó la serie temporal de velocidad para poder generar la carga de viento usando la formulación de Bernoulli.

Cabe mencionar que se mantuvo el signo de la velocidad al momento de realizar la conversión a presiones con la finalidad de considerar efectos de succión sobre las cubiertas.

En la Figura 36 y Figura 37, se muestra el proceso y el diagrama de flujo para generar las presiones dinámicas por viento a través de un historial de velocidades de viento.

Línea	Estructura del Algoritmo
1	INICIAR /* Simulación de Viento mediante Modelo Autorregresivo AR(p) */
2	Definir Parámetros: Vmed (Velocidad media), κ (coeficiente de rugosidad), fs (frecuencia de muestreo), N (Resolución o número de puntos), orden p (Orden para aumentar rugosidad), p . (densidad del aire)
3	INICIAR /* Definición de Espectro de Davenport */
4	IF Frecuencia $f \leq 10^{-4}$ THEN Espectro $S(f) = 0$.
5	ELSE Calcular escala adimensional y densidad espectral $S(f) = 0$.
6	Calcular Autocorrelación $R(\tau)$ mediante integración numérica del espectro.
7	Generar vector de rezagos desde 0 hasta p.
8	INICIAR /* Solución de Ecuaciones de Yule-Walker */
9	Construir Matriz de Toeplitz con los valores de autocorrelación.
10	Resolver sistema lineal para obtener coeficientes ϕ del modelo AR.
11	Calcular varianza del error blanco (σ_ϵ^2) , desviación estándar. (σ_ϵ)
12	Do: Generar ruido blanco gaussiano con media 0 y varianza. (σ_ϵ^2)
13	INICIAR /* Filtrado Lineal */
14	While: Generar serie completa + Periodo de ajuste
15	Aplicar filtro regresivo: $u_i = \epsilon_i + \sum(\phi_j \cdot u_{i-j})$
16	Eliminar periodo de estabilización de la serie resultante.
17	Calcular Velocidad Total: $U_{total} = V_{ref} + u$.
18	INICIAR /* Transformación a Presiones */
19	Recorrer la serie de velocidades para convertirlas paso a paso en presiones.
20	Calcular Presión en Pascales: $P = \frac{1}{2}\rho v v $
21	Convertir Presión a MegaPascales.(MPa): $P_{MPa} = P/10^6$
23	Insertar datos (Tiempo, Velocidad, Presiones) en estructura de salida.
24	Validación: Comparar Espectro de Potencia (PSD) simulado vs. teórico.
25	IF Validación es correcta THEN Proceder a exportación.
26	Generar archivo de salida 'resultados_viento.csv'.
27	END Se obtiene la serie temporal y presiones dinámicas para diseño estructural.

Figura 36. Pseudocódigo generación de modelo autorregresivo para funciones de viento.

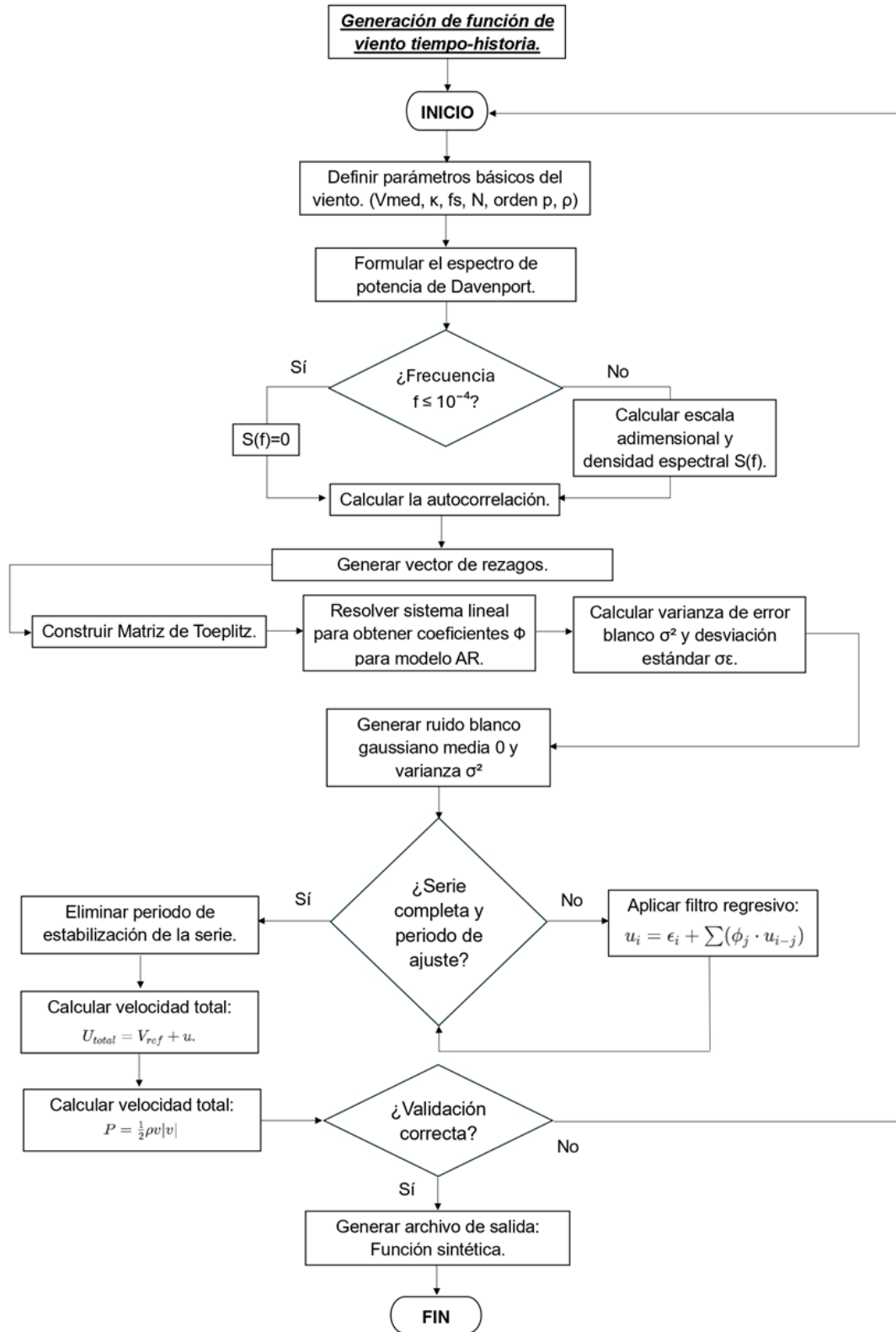


Figura 37. Metodología para generación de función viento.

5.4 Estimación de estabilidad no lineal ante cargas dinámicas por viento

Para la elaboración de los modelos se consideró, como imperfección inicial, la configuración deformada obtenida en el primer análisis de pandeo lineal. Para cada caso de carga se seleccionó aquél que presentaba el menor factor λ . Posteriormente, se incorporaron las no linealidades geométricas y del material.

En la Figura 38, se muestra la metodología para el análisis de estabilidad no lineal ante carga dinámica por viento.

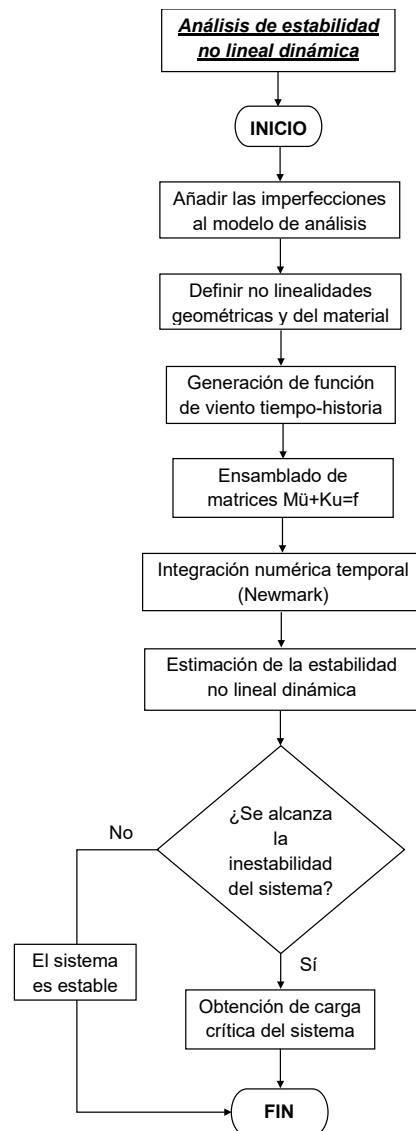


Figura 38. Metodología para análisis de estabilidad no lineal dinámico.

5.4.1 Comparativa de los resultados obtenidos

Una vez obtenidas las cargas críticas para cada caso de estudio, se compararon los valores obtenidos entre los métodos de estabilidad lineal, no lineal estático y no lineal dinámico, con el objetivo de comprobar que la carga crítica por pandeo empleando no lineales e imperfecciones ante cargas dinámicas de viento es menor en un 20% a estudios tradicionales estáticos. Como se ilustra en la Figura 39.

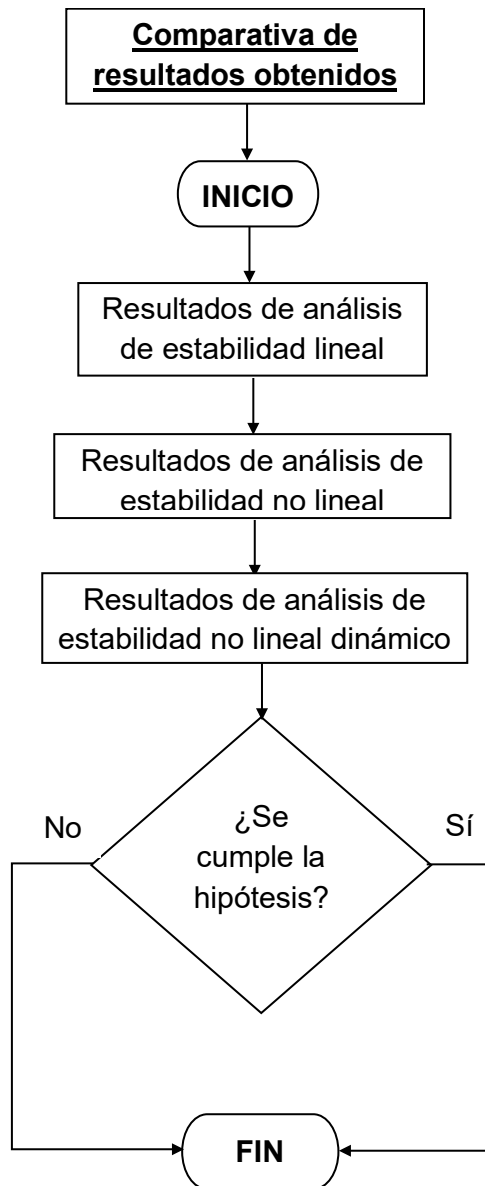


Figura 39. Comparativa de resultados obtenidos.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 8 se muestran los casos de estudio de esta investigación.

Tabla 8. Matriz experimental para cada caso de análisis.

Caso	Claro (m)	Dirección de análisis del viento	Tipo de análisis
1	15	0°	Estático
2	15	0°	Estático
3	15	0°	Estático
4	15	0°	Estático
5	20	0°	Estático
6	20	0°	Estático
7	25	0°	Estático
8	25	0°	Estático
9	30	0°	Estático
10	30	0°	Estático
11	15	90°	Estático
12	20	90°	Estático
13	25	90°	Estático
14	30	90°	Estático
15	15	Función sintética	Dinámico
16	15	Función sintética	Dinámico
17	15	Función sintética	Dinámico
18	15	Función sintética	Dinámico
19	15	Función sintética	Dinámico
20	20	Función sintética	Dinámico
21	20	Función sintética	Dinámico
22	20	Función sintética	Dinámico
23	20	Función sintética	Dinámico
24	20	Función sintética	Dinámico
25	25	Función sintética	Dinámico
26	25	Función sintética	Dinámico
27	25	Función sintética	Dinámico
28	25	Función sintética	Dinámico
29	25	Función sintética	Dinámico
30	30	Función sintética	Dinámico
31	30	Función sintética	Dinámico
32	30	Función sintética	Dinámico
33	30	Función sintética	Dinámico
34	30	Función sintética	Dinámico

6.1 Análisis de estabilidad lineal

Empleando el análisis de pandeo lineal se obtuvieron las cargas críticas para cada caso de carga. Se puede observar en la Tabla 9, que el factor de carga crítica λ tiende a disminuir en cuanto el claro va aumentando. Dichos factores de carga se deberán multiplicar por la carga máxima aplicada con la finalidad de obtener la carga crítica por pandeo.

Tabla 9. Resultados obtenidos de estabilidad lineal en dirección del viento es perpendicular a la cubierta. ($\Theta=0^\circ$)

Caso	Claro (m)	λ	Carga aplicada (kg/m ²)	Carga crítica (kg/m ²)
1	15	4.68	33.02	154.52
2	15	4.74	33.02	156.50
3	15	4.50	60.75	273.39
4	15	4.60	60.75	279.46
5	20	3.76	42.26	158.84
6	20	2.57	42.26	108.49
7	25	2.00	42.26	84.53
8	25	2.02	42.26	85.19
9	30	1.41	42.26	59.41
10	30	1.41	42.26	59.46

La carga crítica por pandeo lineal para el claro de 15m en el caso de carga 4, es de 279.46 kg/m², para el caso 5 se tiene un claro de 20m, la carga crítica de 158.84 kg/m², en el escenario de 25 m de claro, para el caso de carga 8, se tiene una carga crítica de 85.19 kg/m², finalmente para el claro de 30 m, en el caso de carga 10, la carga crítica es de 59.46 kg/m².

Para el análisis de estabilidad considerando la dirección del viento es paralelo a la cubierta ($\Theta=90^\circ$), se tienen dos coeficientes de presión exterior por cada caso de carga. En algunas situaciones donde la relación de áreas abiertas entre muros laterales y frontales es menor o igual a 1, existen dos casos de análisis adicionales correspondientes a coeficientes de presiones interiores. Dado que todos los casos de carga son a succión, con base a lo recomendado en CFE (2020) se seleccionó el caso de carga más desfavorable para cada claro. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10. Resultados obtenidos de estabilidad lineal en dirección del viento paralelo a la cubierta. ($\Theta=90^\circ$)

Caso	Claro (m)	λ	Carga aplicada (kg/m²)	Carga crítica (kg/m²)
11	15	5.66	87.13	493.16
12	20	2.84	118.30	335.97
13	25	2.05	114.21	234.13
14	30	1.40	85.05	119.07

Como se puede observar, los valores de las cargas críticas van disminuyendo en función del aumento del claro, esto es debido a que la carga es uniforme en todos los casos de carga, contrario al viento en dirección perpendicular donde se tuvieron efectos de succión y presión aplicados en cada caso de carga.

6.2 Estabilidad no lineal estática

A partir de la configuración deformada del primer análisis por pandeo lineal para cada caso de carga se tomó la configuración deformada, para considerarse como imperfección inicial, posteriormente se añadieron las no linealidades geométricas y del material. Para poder encontrar la carga crítica por pandeo no lineal se empleó el método de Newton Raphson.

En la Tabla 11 se muestran los resultados obtenidos del análisis no lineal de estabilidad en dirección del viento perpendicular a la cubierta.

Tabla 11. Resultados obtenidos del análisis de estabilidad no lineal en dirección del viento perpendicular a la cubierta. ($\Theta=0^\circ$)

Caso	Claro (m)	Carga crítica (kg/m²)
1	15	356.76
2	15	299.24
3	15	415.83
4	15	375.01
5	20	93.28
6	20	146.65
7	25	50.72
8	25	319.46
9	30	27.26
10	30	24.80

Haciendo una comparativa entre pandeo lineal contra pandeo no lineal, para cada claro, lo esperado es que se tuviera un decremento de la carga crítica al momento de considerar imperfecciones y no linealidades, sin embargo, se obtuvo un incremento de la capacidad de carga del sistema, como se ilustra en la Figura 40, Figura 41, Figura 42 y Figura 43.

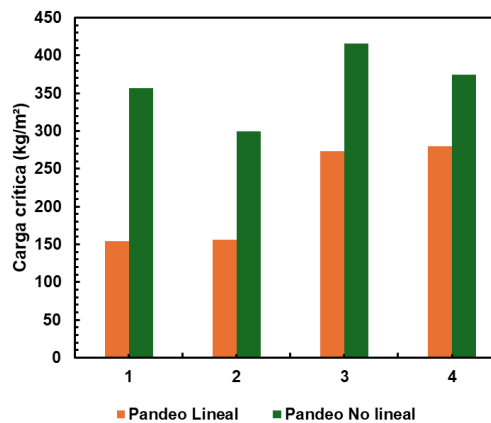


Figura 40. Resultados obtenidos por pandeo lineal y pandeo no lineal. En dirección del viento perpendicular ($\Theta=0^\circ$). Claro de 15 m.

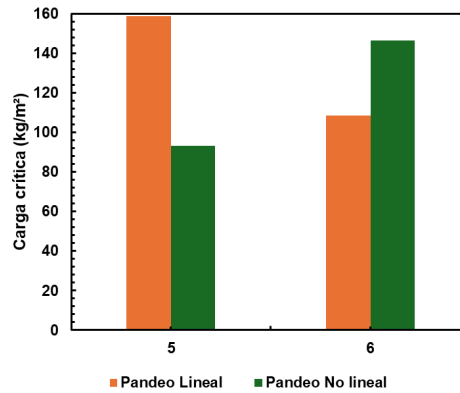


Figura 41. Resultados obtenidos por pandeo lineal y pandeo no lineal. En dirección del viento perpendicular ($\Theta=0^\circ$). Claro de 20 m.

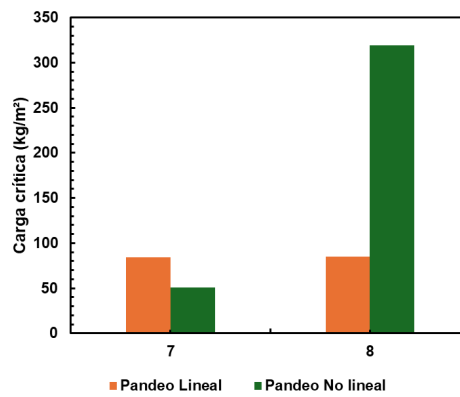


Figura 42. Resultados obtenidos por pandeo lineal y pandeo no lineal. En dirección del viento perpendicular ($\Theta=0^\circ$). Claro de 25 m.

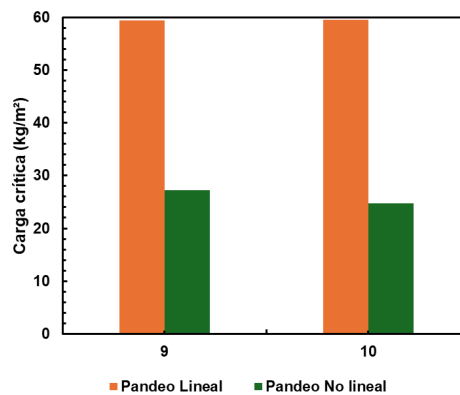


Figura 43. Resultados obtenidos por pandeo lineal y pandeo no lineal. En dirección del viento perpendicular ($\Theta=0^\circ$). Claro de 30 m.

Solamente hay tres casos de carga donde la carga crítica por pandeo no lineal es menor al pandeo lineal, en el caso 7 (claro de 25m), y para ambos casos de carga 9 y 10. (claro de 30 m)

En el análisis de estabilidad no lineal, al considerar la aplicación de cargas paralelas a la cubierta, se observó que las cargas críticas no lineales son menores a las predichas en el análisis lineal, como se muestra en la Tabla 12.

Tabla 12. Resultados obtenidos del análisis de estabilidad no lineal en dirección del viento paralela a la cubierta. ($\Theta=90^\circ$)

Caso	Claro (m)	Carga crítica (kg/m ²)
11	15	156.84
12	20	142.00
13	25	103.06
14	30	71.02

En la Figura 44, Figura 45, Figura 46, Figura 47, se aprecian las diferencias entre valores por estabilidad lineal y no lineal. Corroborando que el método de estabilidad lineal sobreestima la capacidad de carga del sistema (Walentyński & Cybulski, 2014).

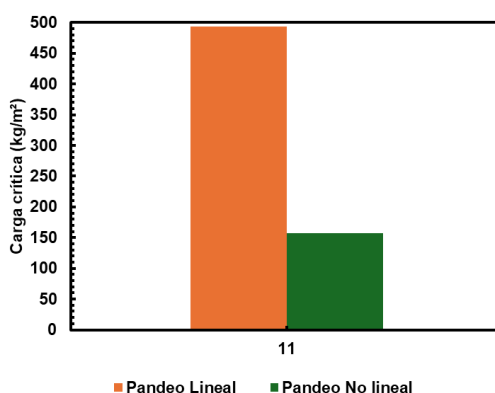


Figura 44. Resultados obtenidos por pandeo lineal y pandeo no lineal. En dirección del viento paralela ($\Theta=90^\circ$). Claro 15m.

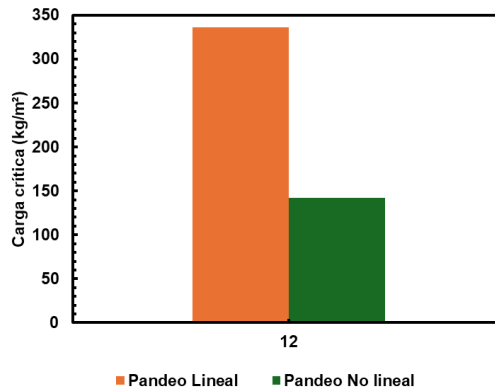


Figura 45. Resultados obtenidos por pandeo lineal y pandeo no lineal. En dirección del viento paralela ($\Theta=90^\circ$). Claro 20m.

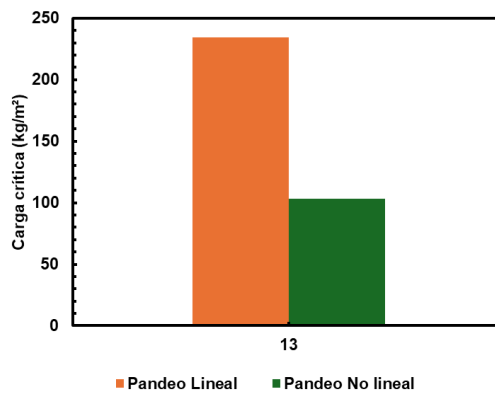


Figura 46. Resultados obtenidos por pandeo lineal y pandeo no lineal. En dirección del viento paralela ($\Theta=90^\circ$). Claro 25m.

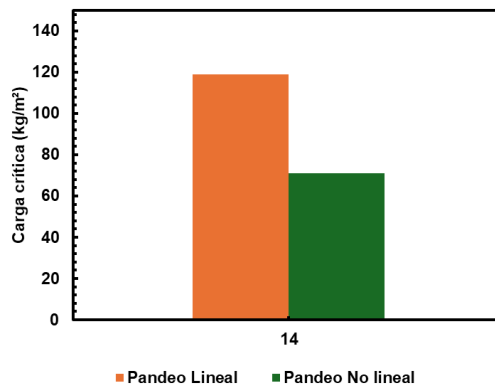


Figura 47. Resultados obtenidos por pandeo lineal y pandeo no lineal. En dirección del viento paralela ($\Theta=90^\circ$). Claro 30m.

Mediante la curva de deformaciones ante carga incremental aplicada a cada sistema, se obtuvo la carga crítica antes que los sistemas se volvieran inestables. Se puede observar en las siguientes gráficas como la curva tiende a aplanarse a medida que la estructura pierde estabilidad, obteniendo así la carga crítica para cada caso de carga por claro.

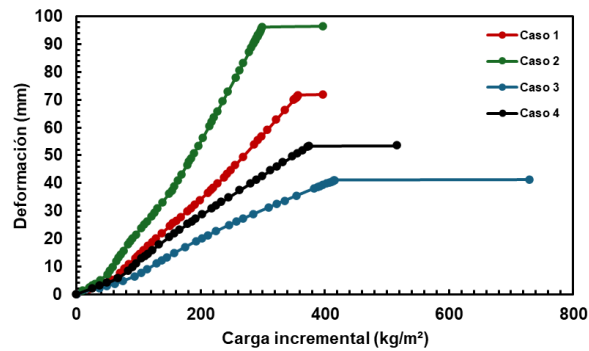


Figura 48. Comparativa de curva deformación contra incrementos de cargas. Para los cuatro casos de carga en un claro de 15 m. Dirección del viento perpendicular a la cubierta. ($\Theta=0^\circ$)

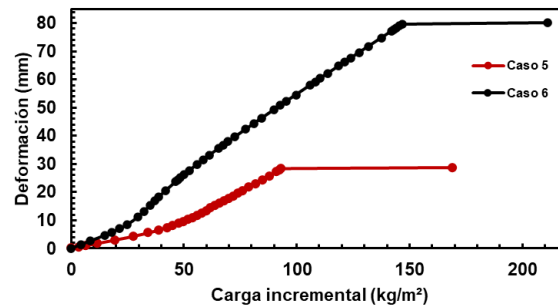


Figura 49. Comparativa de curva deformación contra incrementos de cargas. Para los dos casos de carga en un claro de 20 m. Dirección del viento perpendicular a la cubierta. ($\Theta=0^\circ$)

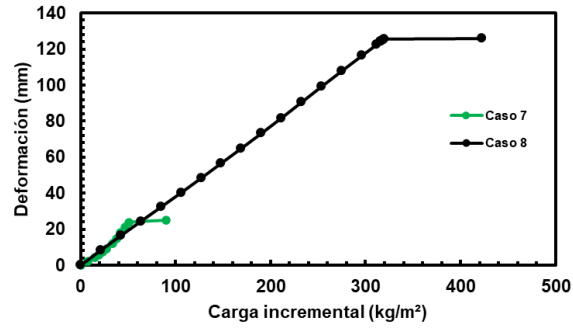


Figura 50. Comparativa de curva deformación contra incrementos de cargas. Para los dos casos de carga en un claro de 25 m. Dirección del viento perpendicular a la cubierta. ($\Theta=0^\circ$)
Nótese la diferencia entre casos 7 y 8 debido al efecto membrana.

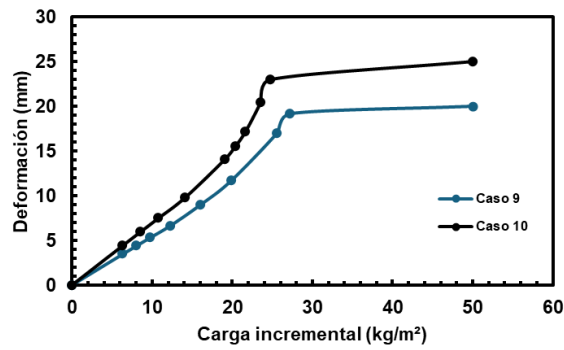


Figura 51. Comparativa de curva deformación contra incrementos de cargas. Para los dos casos de carga en un claro de 30 m. Dirección del viento perpendicular a la cubierta. ($\Theta=0^\circ$)

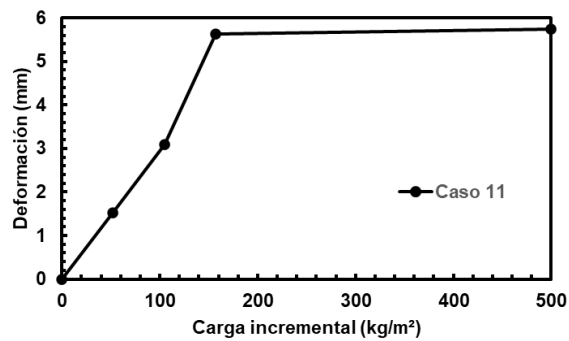
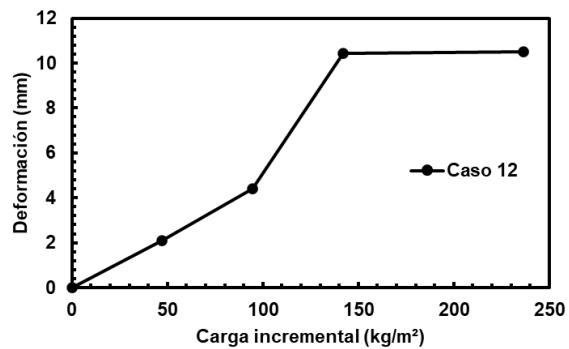
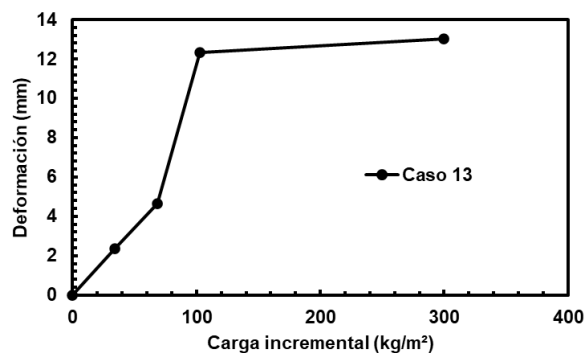


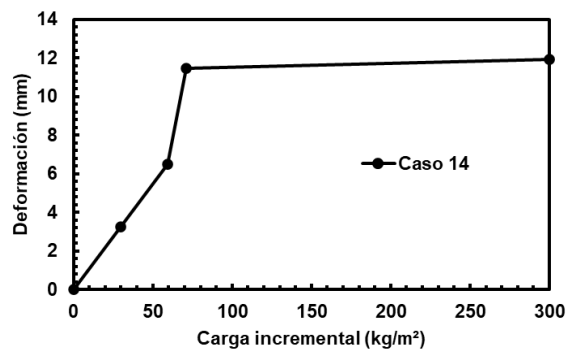
Figura 52. Curva deformación contra incrementos de cargas. Caso 11 en claro 15 m.
Dirección del viento paralela a la cubierta. ($\Theta=90^\circ$)



**Figura 53. Curva deformación contra incrementos de cargas. Caso 12 en claro 20 m.
Dirección del viento paralela a la cubierta. ($\Theta=90^\circ$)**



**Figura 54. Curva deformación contra incrementos de cargas. Caso 13 en claro 25 m.
Dirección del viento paralela a la cubierta. ($\Theta=90^\circ$)**



**Figura 55. Curva deformación contra incrementos de cargas. Caso 14 en claro 30 m.
Dirección del viento paralela a la cubierta. ($\Theta=90^\circ$)**

6.2.1 Revisión de esfuerzos y deformaciones ante cargas estáticas por viento.

A partir del análisis no lineal de estabilidad, se evaluaron los esfuerzos normales y deformaciones totales de la cubierta antes que el sistema fuera inestable, con la finalidad de observar si los esfuerzos y deformaciones alcanzaron sus límites máximos permisibles.

Para las revisiones de esfuerzos se consideró el criterio de diseño por esfuerzos permisibles (ASD), donde el esfuerzo máximo no debe sobrepasar el 60% del esfuerzo de fluencia, este criterio ha sido empleando históricamente en diversas normas como: AISC, ASD, AISI.

Para el caso de las deformaciones máximas permisibles se revisó que la deformación máxima no sobrepasará el claro total entre 240, este criterio límite de servicio ha sido empleando en la normativa mexicana: Normas Técnicas Complementarias. Edición 2023, (NTC), por sus siglas en español.

Tabla 13. Estados límites de servicio y esfuerzos permisibles. En dirección del viento perpendicular. ($\Theta=0^\circ$)

Caso de carga	Claro (m)	Esfuerzo normal máximo (kg/cm ²)	Esfuerzo normal mínimo (kg/cm ²)	¿Cumple el esfuerzo máximo permisible? 0.6fy=1392 kg/cm ²	Deformación total (mm)	Deformación máxima permisible es igual a: Claro/240 (mm)	¿Cumple la deformación máxima permisible?
1	15	1224.37	-1382.53	Pasa	71.69	62.50	Falla
2	15	1112.20	-1352.14	Pasa	96.21	62.50	Falla
3	15	906.63	-953.71	Pasa	41.03	62.50	Pasa
4	15	798.30	-908.85	Pasa	53.33	62.50	Pasa
5	20	265.99	-387.90	Pasa	28.28	83.33	Pasa
6	20	732.76	-963.01	Pasa	79.54	83.33	Pasa
7	25	169.40	-206.75	Pasa	23.77	104.17	Pasa
8	25	2288.14	-2731.62	Falla	125.71	104.17	Falla
9	30	135.20	-162.46	Pasa	19.15	125.00	Pasa
10	30	166.45	-212.48	Pasa	22.99	125.00	Pasa

Como se puede observar en la tabla, para el claro de 15 m, las deformaciones en los casos de carga 1 y 2, con deformaciones del orden de 71.69 mm y 96.21 mm respectivamente son mayores a la deformación máxima permisible de 62.5 mm, por lo tanto, no cumplen la condición de servicio, para el claro de 25 m de correspondiente al caso de carga 8, se puede observar que el esfuerzo normal 2288.14 kg/cm^2 , es superior al esfuerzo limite permisible el cual es de 1320 kg/cm^2 , en cuanto a la deformación máxima de 125.71 mm es superior a la deformación máxima permisible de 104.17 mm.

Para el resto de los casos de carga para diferentes claros, las cubiertas se vuelven inestables antes de alcanzar los estados límites de esfuerzo y deformación, debido a la geometría de la estructura, se presentó una ganancia de rigidez, por lo tanto, la capacidad de carga crítica por pandeo no lineal fue mayor respecto al pandeo lineal.

Factores como la forma de arco de las cubiertas y las cargas de viento, las cuales presentaron efectos de succión y presión actuando simultáneamente en cada caso de carga, generaron un efecto membrana en la cubierta.

Para llegar a esta conclusión se obtuvieron los esfuerzos de membrana y flexión, eligiendo los casos de cargas más críticos del análisis, el caso crítico donde la carga de pandeo no lineal es mayor a la lineal (caso 3) por otro lado se obtuvieron los esfuerzos de membrana y flexión para el caso mínimo donde la carga crítica por pandeo lineal es mayor a la no lineal. (caso 10) En las figuras se muestra la comparativa entre esfuerzos de membrana y flexión.

Esto coincide con investigaciones realizadas por Rani, Pratap y Ahuja (2024) y Yao et al. (2024), donde se encontró que las presiones máximas positivas se encuentran en la zona de barlovento y los efectos de succión máximas están al centro de la cubierta. Además de que las cubiertas con una distribución de presiones más uniformes presentaron un comportamiento de estabilidad más acorde a lo descrito en el estado del arte (Piekarczuk et al., 2015).

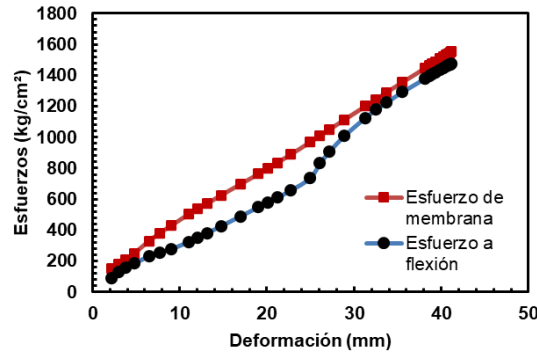


Figura 56. El esfuerzo de membrana frente al esfuerzo de flexión para el caso 3. El esfuerzo dominante es el esfuerzo de membrana. Por lo tanto, existe un incremento en la capacidad de carga de la cubierta en el caso de carga 3. Donde la carga crítica por estabilidad no lineal es mayor a la obtenida en la estabilidad lineal.

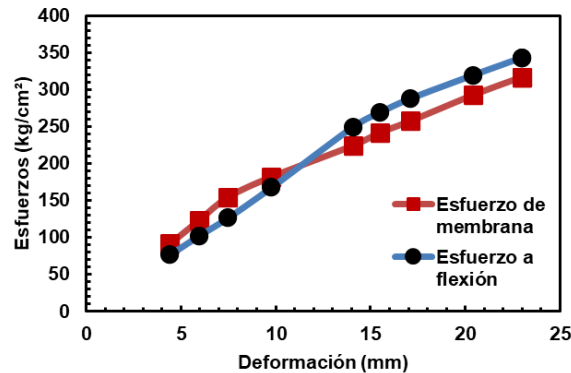


Figura 57. El esfuerzo de membrana frente al esfuerzo de flexión para el caso 10. El esfuerzo dominante corresponde al esfuerzo de flexión. Consecuentemente, no hay efecto de membrana para el caso de carga 10. Donde la carga crítica por estabilidad lineal es mayor a la no lineal.

Se pudo observar que no siempre la carga crítica por pandeo no lineal es menor a la obtenida por pandeo lineal ante cargas por viento donde se tienen cargas de presión y succión actuando en un solo caso de carga, se obtuvieron incrementos de carga de hasta un 275.02% respecto al pandeo lineal, esto se debe a un aumento de rigidez del sistema generada por una fuerza de compresión axial dominante que aporta resistencia al sistema, este efecto se le denomina efecto membrana, el cual se desarrolla en función de la geometría de la cubierta.

Análogamente se revisaron los esfuerzos normales máximos y mínimos, así como las deformaciones para cada caso de carga. Para la dirección del viento paralela a la cubierta.

Tabla 14. Estados limites de servicio y esfuerzos permisibles. En dirección del viento paralelo. ($\Theta=90^\circ$)

Caso de carga	Claro (m)	Esfuerzo normal máximo (kg/cm ²)	Esfuerzo normal mínimo (kg/cm ²)	¿Cumple el esfuerzo máximo permisible? 0.6fy=1392 kg/cm ²	Deformación total (mm)	Deformación máxima permisible es igual a: Claro/240 (mm)	¿Cumple la condición de deformación máxima permisible?
11	15	160.60	-73.15	Pasa	5.63	62.50	Pasa
12	20	130.55	-70.73	Pasa	10.43	83.33	Pasa
13	25	100.17	-66.10	Pasa	12.33	104.17	Pasa
14	30	81.15	-51.90	Pasa	11.46	125.00	Pasa

Con base a los resultados expuestos anteriormente, se observó que los estados de esfuerzos y deformaciones no se ven sobrepasados cuando el sistema pierde estabilidad, para cada uno de los casos de carga.

Para el caso de carga 1, se observó que el sistema pierde estabilidad cuando los estados de esfuerzos normales solo alcanzaron 10.93% de su capacidad máxima, y se presentó tan solo una deformación de 5.63 mm, lo cual comprueba con investigaciones previas que la pérdida de estabilidad es de manera local y no global.

De forma análoga para el caso 2 al momento que el sistema perdió rigidez se alcanzó esfuerzos máximos de 8.88% del esfuerzo máximo y una deformación de 10.43 mm. Para el caso 3 los esfuerzos máximos normales alcanzaron 6.81% de su capacidad máxima permisible antes que el sistema perdiera estabilidad con una deformación máxima de 12.33 mm. Finalmente en el caso 4, cuando el sistema perdió estabilidad, el esfuerzo máximo normal alcanzado fue de 5.52% del máximo permisible, una deformación de 11.46mm.

Con base a los resultados obtenidos, se observó que los esfuerzos tienen a disminuir en cuanto el claro va incrementado, debido a que la cubierta se vuelve más esbelta (relación de espesor entre claro). Asimismo, las deformaciones van aumentando debido a que el sistema se vuelve más flexible.

Por lo tanto, bajo un enfoque estático no lineal, ante cargas uniformes a presión o succión, la estabilidad ocurre en etapas tempranas, antes que se alcancen niveles de estados límite de diseño y de servicio. En consecuencia, no existe un efecto membrana.

Caso contrario de cuanto se tienen cargas variables a succión y presión, actuando al mismo tiempo en la cubierta, se pueden presentar efectos de membrana lo cual hace que exista un aumento de rigidez y por ende un aumento de capacidad de carga, en algunos casos de carga particulares.

De acuerdo con los resultados obtenidos en los análisis de viento en dirección paralela a la cubierta, donde se tienen cargas uniformes a succión, las cargas críticas por pandeo no lineal obtenidas fueron menores a las de pandeo lineal. Sin embargo, cabe mencionar que aún ante un incremento de capacidad de carga en algunos casos de carga específicos, la estabilidad sigue siendo el modo de falla predominante.

A diferencia de investigaciones previas (Cybulski et al., 2014, Piekarczyk et al., 2015; Piekarczyk et al., 2017; Piekarczyk, 2019, Piekarczyk, 2021, Piekarczyk, 2023). donde se reportaba un decremento de la carga crítica por pandeo no lineal ante cargas principalmente de nieve, considerando imperfecciones a partir del primer modo de pandeo, esto no representaban en su totalidad el comportamiento de la estructura debido a que solo se ensayaban y modelaban secciones en dirección vertical como sería el caso de una columna o perfil recto, por otro lado en otras investigaciones, solo se modelaban y ensayaban tramos parciales de la cubierta, omitiendo la continuidad en bordes en la estructura, los cuales cambian la rigidez del sistema.

6.3 Generación de funciones sintéticas de viento (tiempo-historia)

Empleando el modelo de espectro de potencia de Davenport, se simularon los efectos de turbulencia atmosférica, a partir de la distribución de la energía del viento en el dominio de las frecuencias.

Mediante el modelo autorregresivo se paso del dominio de las frecuencias al dominio del tiempo, empleando un enfoque estocástico mediante el filtrado lineal, se generó ruido blanco gaussiano, obteniendo series temporales de turbulencia o historiales de velocidades, las cuales se convirtieron a presiones mediante la formulación de Bernoulli.

Tabla 15. Parámetros de entrada para la simulación de cargas por viento dinámico.

Parámetro	Valor	Descripción
Vel	21.97 m/s	Velocidad media del viento.
κ	0.05	Coeficiente de rugosidad del terreno.
fs	10 Hz	Frecuencia de muestreo (10 datos por segundo).
N	1000	Número total de puntos (duración de 100 segundos).
p	5	Orden del modelo autorregresivo.
ρ	1.225 kg/m ³	Densidad del aire.

Para analizar la estabilidad no lineal dinámica, en esta investigación se obtuvieron 5 funciones sintéticas para cada caso claro que van desde los 15m hasta los 30m.

En la Figura 58, se muestra el historial de velocidades (m/s) para una duración de 10 s. En la parte inferior se muestra la comprobación del modelo AR, frente al espectro de Davenport, validando que la serie temporal mantiene las propiedades estadísticas y la distribución de energía en el dominio de las frecuencias al dominio del tiempo.

En el apartado de ANEXOS ,se muestran las funciones sintéticas empleadas en esta investigación.

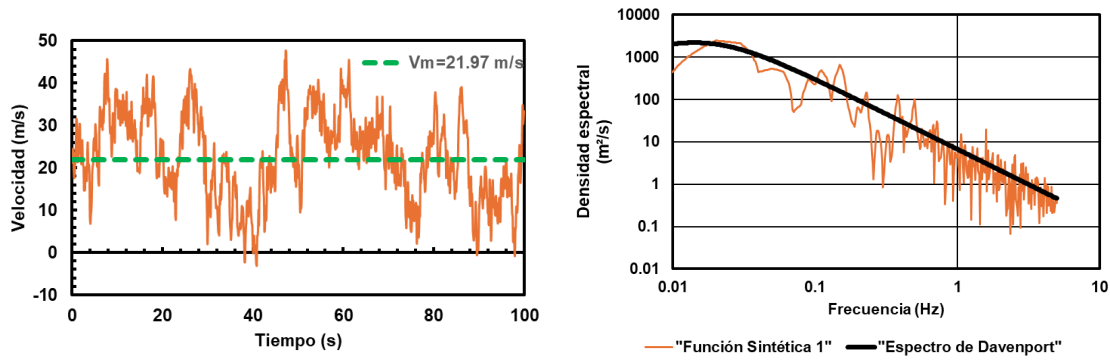


Figura 58. Función sintética 1 (historial de velocidades) y comprobación del modelo AR respecto al espectro de potencia de Davenport.

6.4 Estabilidad no lineal dinámica

Para la elaboración de los modelos se consideró como imperfección inicial la deformación del análisis de estabilidad lineal, posteriormente se añadieron las no linealidades geométricas y del material. Para realizar los incrementos de carga en el análisis se ajustaron los parámetros empleando el método de Newton Raphson. Y se activó la integración temporal ó paso a paso, para la resolución de sistemas dinámicos.

En este apartado se muestran los resultados obtenidos evaluando la estabilidad no lineal dinámica para un claro de 15 m. Debido a que se presentaron casos de carga diversos como, por ejemplo: se alcanzó la perdida de estabilidad, pero el sistema no colapsó, hasta la perdida de estabilidad y el colapsó del sistema. En el apartado de ANEXOS, se muestran la evaluación de estabilidad para cada claro de 20m,25m y 30m.

Asimismo, se muestran las relaciones entre las deformaciones y las cargas aplicadas en función del tiempo. Encontrando que a diferencia de los análisis de estabilidad no lineales estáticos tanto para 0° y 90° , debido a las fluctuaciones del viento y las oscilaciones que causaron inestabilidades en las cubiertas. Como se muestra en las siguientes figuras:

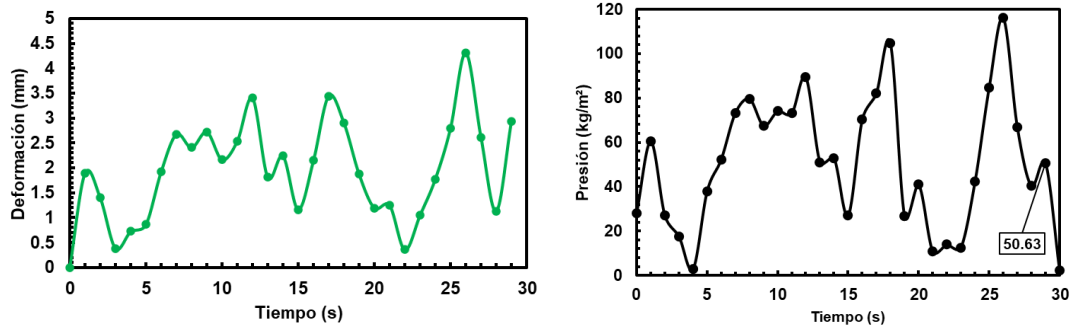


Figura 59. Curva deformación contra incrementos de cargas. Caso 1 en claro 15 m. El sistema se vuelve inestable con una presión de 50.63 kg/m².

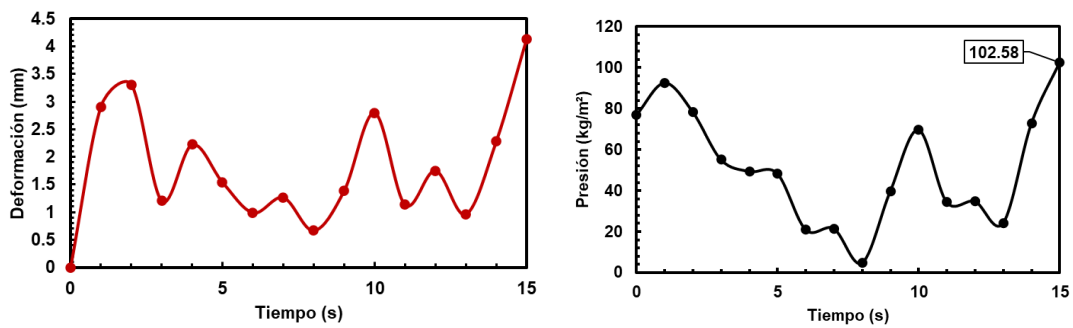


Figura 60. Curva deformación contra incrementos de cargas. Caso 2 en claro 15 m. El sistema se vuelve inestable con una presión de 102.58 kg/m².

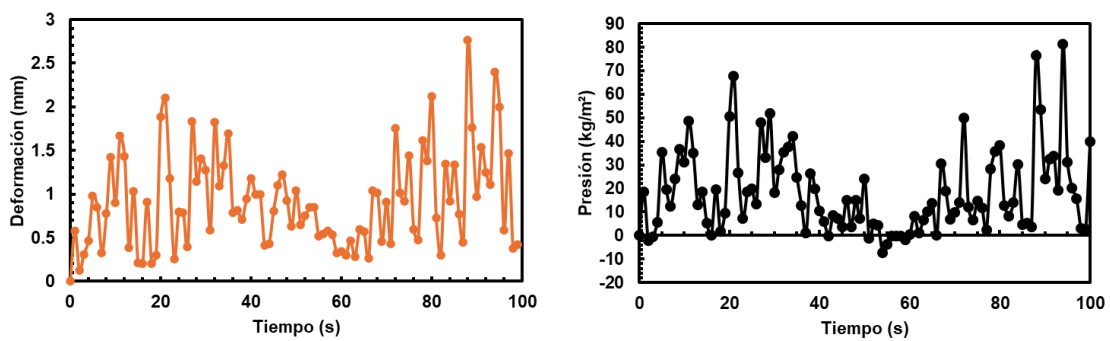


Figura 61. Curva deformación contra incrementos de cargas. Caso 3 en claro 15 m. El sistema no pierde estabilidad, por lo tanto, no hay carga crítica.

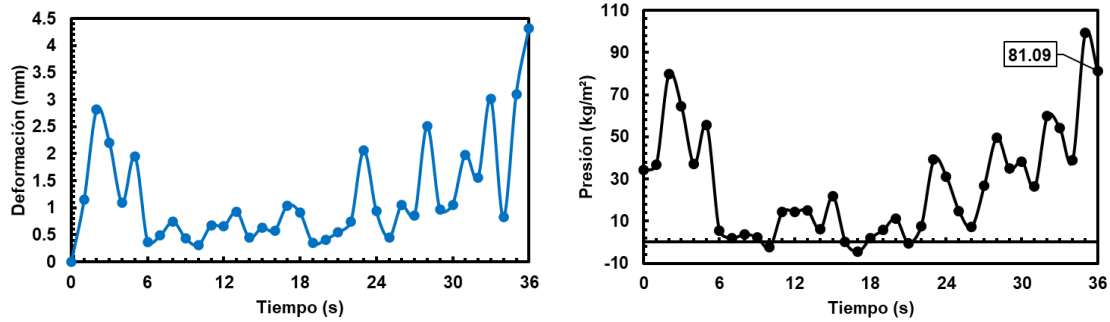


Figura 62. Curva deformación contra incrementos de cargas. Caso 4 en claro 15 m. El sistema se vuelve inestable con una presión de 81.10 kg/m².

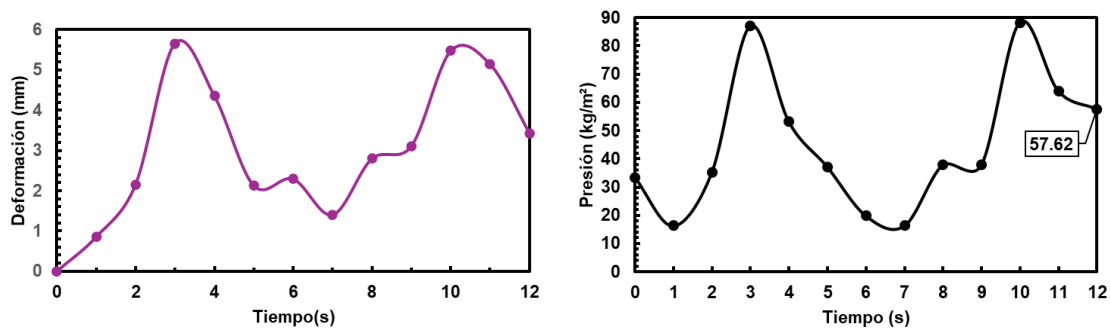


Figura 63. Curva deformación contra incrementos de cargas. Caso 5 en claro 15 m. El sistema se vuelve inestable con una presión de 57.62 kg/m².

Como se puede apreciar para cada uno de los casos de carga, existen variaciones de deformaciones a lo largo del tiempo. Debido a la liberación y disipación de energía. A medida que el sistema oscila o se mueve, la energía potencial se convierte en energía cinética y viceversa. Este intercambio entre energías influye en las deformaciones del sistema provocando la inestabilidad en las cubiertas.

A diferencia de los análisis estáticos no lineales, los resultados de los análisis transitorios indican que las cargas últimas no son necesariamente mayores en magnitud que las cargas críticas de pandeo.

En la Tabla 16, se muestran las cargas críticas por pandeo y las cargas ultimas antes que el sistema colapse, para cada claro y caso de carga dinámica.

Para los casos de carga 21,26,31, indicados en la Tabla 16, se alcanzaron cargas críticas por pandeo de manera inmediata, debido al historial de velocidades donde las fluctuaciones del viento fueron altas en los primeros instantes de la función sintética 2, provocando un colapso instantáneo en los arcotechos.

Tabla 16. Resultados obtenidos del análisis de estabilidad no lineal ante carga dinámicas por viento.

Caso de carga	Claro (m)	Carga crítica (kg/m²)
15	15	50.63
16	15	102.58
17	15	-
18	15	81.10
19	15	57.62
20	20	89.39
21	20	76.86
22	20	67.73
23	20	38.82
24	20	57.62
25	25	73.31
26	25	76.86
27	25	35.02
28	25	36.69
29	25	76.20
30	30	38.00
31	30	76.86
32	30	35.02
33	30	36.69
34	30	56.51

Además, se pudo apreciar que las cargas críticas presentan variabilidad dependiendo del historial de cargas de viento. Por ejemplo, para el claro de 15 m, se tienen casos donde la carga crítica varía de 50.63 kg/m² a 102.58 kg/m², pero en el caso 17 el sistema se mantiene estable, por lo tanto, no existe una carga crítica que induzca al colapso.

Esto se debe a las oscilaciones y la inercia pueden retrasar el colapso, obteniendo cargas críticas más altas en comparación a análisis estáticos no lineales. Por lo tanto, es necesario considerar los efectos dinámicos en estudios de estabilidad, debido a que las fluctuaciones del viento generadas por fuertes vientos inducen a una pérdida de capacidad de carga la cual genera una pérdida de estabilidad, como pudo observarse en la investigación de Lu et al, (2026), donde se identificaron las zonas críticas, permitiendo reforzar dichas zonas para evitar una pérdida de estabilidad.

Finalmente se obtuvieron las cargas críticas promedio para cada claro de arcotecho, y se obtuvo un factor de seguridad con base a la capacidad de carga crítica mínima y velocidad media (21.97 m/s) transformada a presión, la cual es de 30.15 kg/m².

Tabla 17. Cargas críticas de arcotechos.

Claro	Carga crítica	Factor
(m)	promedio (kg/m²)	de seguridad
15	72.98	2.42
20	66.08	2.19
25	59.62	1.98
30	48.62	1.61

Nótese que la capacidad de carga disminuye a medida que el claro incrementa. Además, se puede apreciar que para claros mayores a 25m, el sistema el factor de seguridad se aproxima a la unidad.

6.4.1 Comparación de cargas críticas

Con base a los resultados obtenidos en la Tabla 18, se compararon las cargas críticas obtenidas en el análisis de pandeo lineal tomando el valor mínimo para cada claro y comparado con la carga critica promedio mostrado en la Tabla 17.

Se cumple con lo descrito en investigaciones de Walentyński, R., & Cybulski, R. (2014) y Piekarczyk (2015), las cuales indican que las cargas críticas por pandeo lineal tienden a sobreestimar la capacidad de carga de las cubiertas.

Tabla 18. Comparativa de cargas críticas de pandeo.

Caso	Análisis lineal carga crítica (kg/m ²)	Análisis no lineal dinámico carga crítica (kg/m ²)
15	154.52	72.98
20	108.49	66.08
25	84.53	59.62
30	59.41	48.62

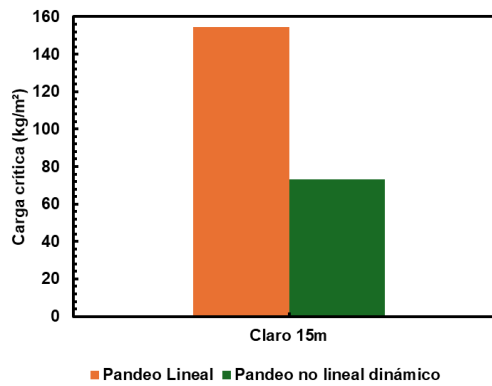


Figura 64. Resultados obtenidos por pandeo lineal y pandeo no lineal dinámico. Claro 15m.

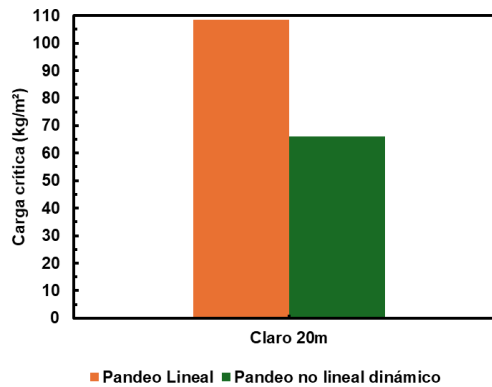


Figura 65. Resultados obtenidos por pandeo lineal y pandeo no lineal dinámico. Claro 20m.

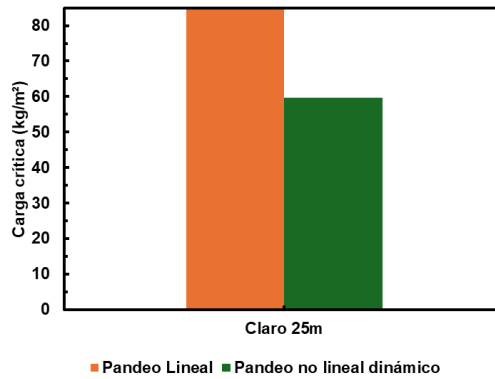


Figura 66. Resultados obtenidos por pandeo lineal y pandeo no lineal dinámico. Claro 25m.

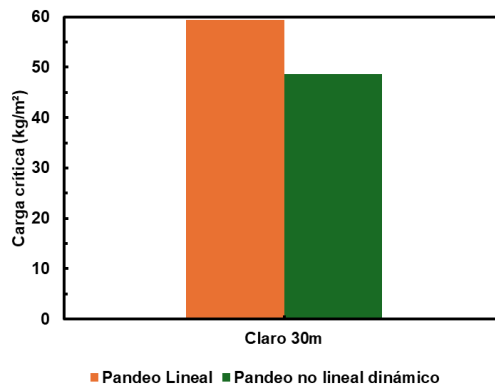


Figura 67. Resultados obtenidos por pandeo lineal y pandeo no lineal dinámico. Claro 30m.

6.4.2 Revisión de esfuerzos y deformaciones ante cargas dinámicas por viento.

En la Tabla 18, se revisaron los estados límite de esfuerzos y servicio, empleando el mismo criterio que en el apartado 6.2.1.

Tabla 19. Estados limites de servicio y esfuerzos permisibles. Ante diferentes presiones dinámicas por viento.

Caso de carga	Claro (m)	Esfuerzo normal máximo (kg/cm ²)	Esfuerzo normal mínimo (kg/cm ²)	¿Cumple el esfuerzo máximo permisible? 0.6fy=1392 kg/cm ²	Deformación total (mm)	Deformación máxima permisible es igual a: Claro/240 (mm)	¿Cumple la condición de deformación máxima permisible?
15	15	104.11	-114.62	Pasa	2.93	62.50	Pasa
16	15	101.56	-112.88	Pasa	4.13	62.50	Pasa
17	15	38.24	-59.96	Pasa	2.76	62.50	Pasa
18	15	98.61	-116.86	Pasa	4.32	62.50	Pasa
19	15	85.45	-101.16	Pasa	3.07	62.50	Pasa
20	20	121.55	-114.45	Pasa	5.88	83.33	Pasa
21	20	Diverge	Diverge	-	Diverge	83.33	-
22	20	93.71	-85.04	Pasa	4.42	83.33	Pasa
23	20	110.54	-102.24	Pasa	5.39	83.33	Pasa
24	20	118.08	-114.26	Pasa	3.42	83.33	Pasa
25	25	135.06	-155.47	Pasa	9.03	104.17	Pasa
26	25	Diverge	Diverge	-	Diverge	104.17	-
27	25	77.69	-96.87	Pasa	4.73	104.17	Pasa
28	25	56	-76.48	Pasa	3.16	104.17	Pasa
29	25	56	-85.96	Pasa	3.73	104.17	Pasa
30	30	70.16	-74.44	Pasa	6.59	125.00	Pasa
31	30	Diverge	Diverge	-	Diverge	125.00	-
32	30	90.55	-84.33	Pasa	9.73	125.00	Pasa
33	30	56.49	-63.22	Pasa	4.87	125.00	Pasa
34	30	66.49	-71.76	Pasa	6.23	125.00	Pasa

Como se observó en los resultados obtenidos en la Tabla 18, que la inestabilidad es el principal mecanismo de falla para todos los casos de carga antes de llegar a los estados límite esfuerzos máximos y de servicio.

Para los casos 21,26,31, se alcanzó la inestabilidad de forma súbita, divergiendo antes de poder estimar esfuerzos máximos, mínimos y deformaciones.

En el apartado ANEXOS, se muestran los diagramas de esfuerzos y deformaciones máximos.

6.4.3 Análisis de la amplitud de las oscilaciones

Se analizaron las aceleraciones en el dominio del tiempo bajo diferentes casos de cargas dinámicas de viento en zonas críticas de pandeo, donde se presentaron efectos de pandeo, con la finalidad de evaluar si las oscilaciones se amplificaron y provocaron inestabilidades en los arcotechos.

En la Figura 64, Figura 66, Figura 68, Figura 70 y Figura 72. Se muestran las oscilaciones y picos de aceleración, empleando los casos de cargas mostrados en los incisos 6.4 y 6.4.1. Mostrando en este apartado los resultados obtenidos para el claro de 15 m.

Asimismo, en la Figura 65, Figura 67, Figura 69 y Figura 71, se muestran las zonas críticas de pandeo correspondientes a las gráficas de aceleración contra tiempo.

En el apartado de ANEXOS, se muestran cada uno de los gráficos para cada claro y caso de carga.

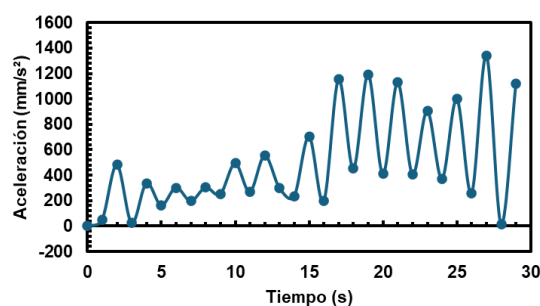


Figura 68. Caso 15, las oscilaciones presentaron fluctuaciones, produciendo una pérdida de estabilidad que indujo al colapso del arcotecho en el segundo 30.

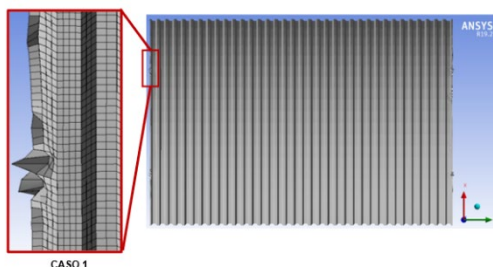


Figura 69. Zona crítica de pandeo para el caso 15, donde se aprecian fallas por pandeo local.

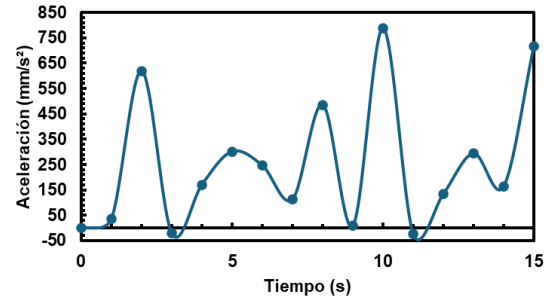


Figura 70. Caso 16, las oscilaciones presentaron fluctuaciones, produciendo una pérdida de estabilidad que indujo al colapso del arcotecho en 15 segundos.

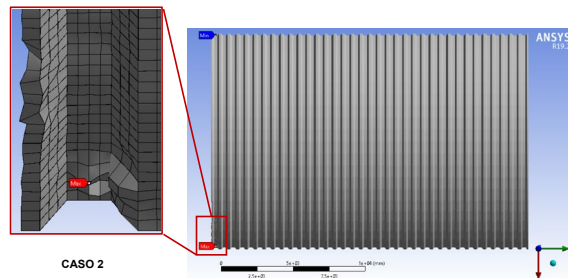


Figura 71. Zona crítica de pandeo para el caso 16, donde se aprecian fallas por pandeo local.

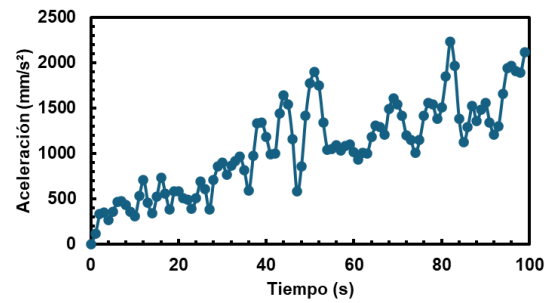


Figura 72. Caso 17, las oscilaciones presentaron fluctuaciones, produciendo una pérdida de estabilidad que indujo al colapso del arcotecho en 100 segundos.

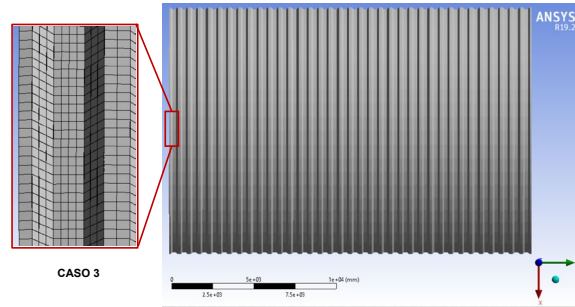


Figura 73. Zona crítica de pandeo para el caso 17, donde se aprecian fallas por pandeo local.

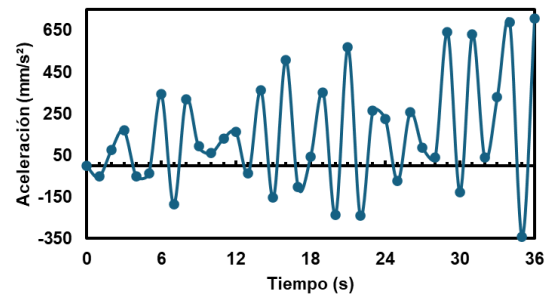


Figura 74. Caso 18, las oscilaciones presentaron fluctuaciones, produciendo una pérdida de estabilidad que indujo al colapso del arcotecho en 36 segundos.

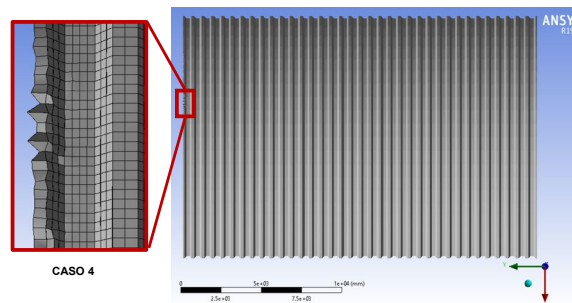


Figura 75. Zona crítica de pandeo para el caso 18, donde se aprecian fallas por pandeo local.

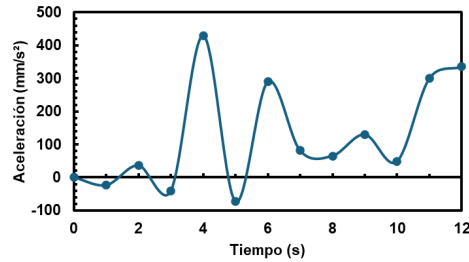


Figura 76. Caso 19, las oscilaciones presentaron fluctuaciones, produciendo una pérdida de estabilidad que indujo al colapso del arcotecho en 12 segundos.

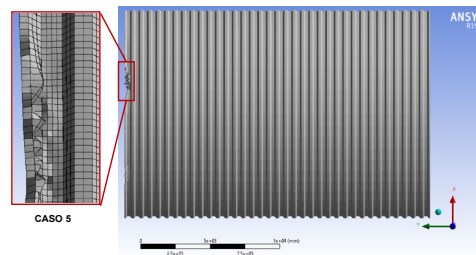


Figura 77. Zona crítica de pandeo para el caso 19, donde se aprecian fallas por pandeo local.

Como se puede observar, el incremento de las oscilaciones induce fallas locales por pandeo, asociadas a inestabilidad o resonancia de los arcotechos ante cargas dinámicas de viento.

A diferencia de los análisis estáticos convencionales, la evaluación de la estabilidad bajo cargas dinámicas es posible identificar las zonas críticas de pandeo y observar la evolución de la disipación de la energía hasta que el sistema se vuelve inestable y colapsa (Uddin et al., 2025).

En trabajos de Rani, Pratap y Ahuja (2024), se demostró que las distribuciones presión y succión corresponden en gran medida a los casos de carga del viento a 90°, empleando los coeficientes de CFE (2020). Igualmente se observó que a una distribución de presiones más uniforme (viento a 0°), el sistema tiene a presentar una mayor resistencia al viento (Yao et al. ,2024).

Sin embargo, a partir de los resultados obtenidos mediante los análisis no lineales estáticos (6.2). Se observó que la evaluación de las cargas críticas por pandeo en arcotechos no resulta representativa.

Debido a que los programas comerciales no consideran las no linealidades e imperfecciones ante cargas estáticas y dinámicas. Esto puede ser una limitante para poder estimar el pandeo en estructuras cotidianas y especiales.

Uno de los grandes retos en los análisis de estabilidad, es el gasto computacional. Es necesario desarrollar metodologías numéricas que estimen la estabilidad de forma práctica y confiable. Cotejando simulaciones numéricas y pruebas experimentales a escala (Antczak et al., 2025).

Simplificando los tiempos de análisis para evaluar las cargas críticas en arcotechos considerando las no linealidades e imperfecciones, considerando factores equivalentes respecto a los valores propios o λ obtenidos del pandeo lineal (Sarwar y Melhus, 2025).

Bajo este enfoque el pandeo lineal deja de ser impreciso como mencionaban trabajos de Del Coz Díaz et al. (2010,2012), Walentyński (2014) y Piekarczyk et al. (2015,2017,2019,2021). Reduciendo así el gasto computacional.

El uso de arcotechos en México, es una opción muy socorrida, por lo que podría considerarse en sistemas de protección que reduzcan las presiones de viento en estructuras curvas (Qi et al.,2026). Mitigando la exposición del viento que puedan inducir a un colapso repentino.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Esta investigación se aplicó una metodología que permite evaluar la carga crítica por pandeo, ante cargas dinámicas por viento, considerando imperfecciones y no linealidades geométricas y del material para cubiertas autoportantes. Debido a que este sistema es ampliamente utilizado en diversos sectores que van desde el industrial, comercial y el educacional siendo este el más popular debido a la rapidez y proceso constructivo relativamente sencillo.

De acuerdo con los resultados en los apartados 6.2 y 6.4, se observó que las cargas críticas para cada arcotecho mediante los análisis de estabilidad no lineal ante cargas de viento dinámicas resultaron menores a las obtenidas en los análisis de estabilidad no lineales estáticos.

Para los arcotechos con claro de 15 m, se obtuvieron diferencias de cargas críticas por estabilidad no lineal dinámica de 52.77%, respecto a los análisis estático no lineales. Además, para el caso de 20m de claro, se observaron diferencias de 39.09%. Igualmente, para los claros de 25m y 30 m, se obtuvieron diferencias de 29.47% y 18.17%, respectivamente. Por lo tanto, la hipótesis se cumplió.

Se recomienda revisar la estabilidad no lineal dinámica a través del uso de funciones sintéticas de viento, ya que los coeficientes descritos presentan simplificaciones que no pueden generalizarse y extrapolarse para cada caso particular de carga en cubiertas tipo arcotecho. Como se observó en algunos casos, la carga tiende a incrementarse debido al efecto membrana cuando se presentan presiones de viento no uniformes; sin embargo, estas condiciones no representan adecuadamente los efectos reales de la fluctuación del viento.

Cabe mencionar que deben realizarse varias muestras de historiales de viento para la generación de funciones sintéticas y obtener las presiones para cada una de ellas para el análisis de estabilidad, debido a la naturaleza estocástica de las funciones, pudiendo encontrar un rango de carga crítica por pandeo.

La estabilidad debe ser considerada en los diseños estructurales para sistemas de pared delgada debido a que el sistema puede perder equilibrio y ser inestable antes de llegar a los estados límites permisibles de servicio y esfuerzos máximos. Por otro lado, se observó que entre más aumente el claro las cargas críticas por pandeo tanto lineal como no lineal tienden a disminuir. Por lo tanto, se recomienda limitar el uso de este sistema hasta máximo 25 m. Para evitar posibles colapsos por estabilidad ante cargas de viento.

Actualmente no existe en ningún estándar internacional, recomendaciones o metodologías para evaluar la estabilidad de este tipo de sistemas. Por lo que para trabajos a futuros será necesario desarrollar pruebas experimentales a escala, así como modelos que integren el segundo corrugado empleando Correlación Digital De Imágenes (DIC), el cual permita encontrar una correlación a través de factores de imperfección los cuales puedan ser considerados en modelos no lineales sin la necesidad de requerir alto gasto computacional, con la finalidad de obtener la carga crítica por pandeo evitando subestimar o sobreestimar dichas cargas para sistemas tipo arcotecho y de pared delgada.

8. REFERENCIAS

ANSYS Inc. (2020). Buckling: Local buckling vs buckling, methods for solving. Solid Mechanics III – Methods of Solving Problems (Structural Instabilities). ANSYS Training Materials.

ANSYS, Inc. (2024). SHELL181. Ansys Help (Release 2024 R2). https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v242/en/ans_elem/Hlp_E_SHELL181.html?q=shell181

Antczak, S., Rallu, A., & Boutin, C. (2025). Buckling analysis of periodic elastic trusses by homogenization. *Mechanics Research Communications*, 150, 104561. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2025.116672>

ASTM International. (2020). ASTM A1008/A1008M-20: Standard specification for steel, sheet, cold-rolled, carbon, structural, high-strength low-alloy, high-strength low-alloy with improved formability, and ultra-high strength. ASTM International.

Ataei, H., & Niazy, A.-S. M. (2015). Buckling analysis of arched structures using finite element analysis. *Forensic Engineering*, 2015, 824–834. <https://doi.org/10.1061/9780784479711.080>

Balbastro, G. C., & Sonzogni, V. E. (2012). Uso de CFD para estudio de presiones del viento en cubiertas curvas aisladas. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 28(1), 49–54. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2011.11.003>

Bathe, K. J. (1996). *Finite element procedures*. Prentice Hall.

Borri, C., & Zuhlten, W. (1991). Fully simulated nonlinear analysis of large structures subjected to turbulent artificial wind. *Mechanics of Structures and Machines*, 19(2), 213–250. <https://doi.org/10.1080/08905459108905143>

Casafont, M., Marimon, F., Bové, O., Ferrer, M., & Centelles, X. (2024). Local buckling of cold-formed steel trapezoidal sheets: Data for finite element model validation. *Data Brief*, 53, 110075. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2024.110075>

Chen, J., & Li, L. (2012). Investigation on dynamic response of steel tower structure under time-history wind load. *Applied Mechanics and Materials*, 166–169, 699–707. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.166-169.699>

Comisión Federal de Electricidad (CFE). (2020). Manual de diseño por viento. Comisión Federal de Electricidad.

Cybulski, R., Walentyński, R., & Cybulska, M. (2014). Local buckling of cold-formed elements used in arched buildings with geometrical imperfections. *Journal of Constructional Steel Research*, 96, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.01.004>

del Coz Díaz, J. J., Álvarez Rabanal, F. P., García Nieto, P. J., Roces-García, J., & Alonso-Estébanez, A. (2012). Nonlinear buckling and failure analysis of a self-weighted metallic roof with and without skylights by FEM. *Engineering Failure Analysis*, 26, 65–80. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2012.07.019>

del Coz Díaz, J. J., García Nieto, P. J., Vilán Vilán, J. A., & Suárez Sierra, J. L. (2010). Non-linear buckling analysis of a self-weighted metallic roof by FEM. *Mathematical and Computer Modelling*, 51, 216–228. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2009.08.032>

del Coz Díaz, J. J., García Nieto, P. J., Vilán Vilán, J. A., Alvarez Rabanal, F. P., Navarro-Manso, A., & Alonso-Martínez, M. (2013). Nonlinear analysis of the pressure field in industrial buildings with curved metallic roofs due to the wind effect by FEM. *Applied Mathematics and Computation*, 221, 202–213. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2013.06.067>

Eurocode 3. (2007). Design of steel structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings (EN 1993-1-1).

González, J. (2024, julio 15). En Chiapas colapsa parte de un domo escolar; no hay lesionados. *Milenio*. <https://www.milenio.com/estados/en-chiapas-colapsa-parte-de-un-domo-escolar-no-hay-lesionados>

Gurtin, M. E. (1981). An introduction to continuum mechanics (Mathematics in Science and Engineering, Vol. 158). Academic Press.

Hegyi, D. (2021). Numerical stability analysis of arch-supported membrane roofs. *Structures*, 29, 785–795. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.11.025>

Iancovici, M., Ionică, G., Pavel, F., Moța, F., & Nica, G. B. (2022). Nonlinear dynamic response analysis of buildings for wind loads: A new frontier in the structural wind engineering. *Journal of Building Engineering*, 47, 103708. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103708>

Jiang, H., & Li, Y. (2019). Dynamic reliability analysis of tower crane with wind loading. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 677, 052031. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/677/5/052031>

Kollár, L., & Holický, M. (2013). Collapse of halls made from cold-formed steel sheets. *Engineering Failure Analysis*, 30, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2012.12.009>

La Opción. (2022, febrero 17). Cae domo de primaria 15 de Mayo por ráfagas de viento. <https://laopcion.com.mx/local/cae-domo-de-primaria-15-de-mayo-por-rafagas-de-viento-20220217-374605.html>

La Voz de Michoacán. (2020, marzo 21). Así fue el colapso del techo en la Central de Abasto tras una fuerte granizada. <https://www.lavozdemichoacan.com.mx/mexico/cdmx/video-asi-fue-el-colapso-del-techo-en-la-central-de-abasto-tras-una-fuerte-granizada/>

Lámina Galvanizada. (s. f.). Láminas de acero para arcotecho. <https://www.laminagalvanizada.mx/blog/laminas-de-acero-para-arcotecho/>

Lu, W., Wang, J., Guo, H., Li, H., & Sun, J. (2020). Wind-induced dynamic collapse analysis of single-layer cylindrical reticulated shells considering roof slabs and support columns. *International Journal of Heat and Technology*, 38(1), 180–186. <https://doi.org/10.18280/ijht.380120>

Lu, Z., Guo, C., & Chen, Z. (2026). Dynamic instability criteria of large-span ground-supported truss arches. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1177/14613484261420374>

Macháček, J., Jermoljev, D., & Svoboda, O. (2021). Stability of steel arches strengthened by textile membranes. *Thin-Walled Structures*, 164, 107840. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.107840>

Martínez, A. (2023). Techo de escuela colapsa tras intensa granizada en Texcaltitlán, Edomex. *Milenio*.

Mehretehnan, A. M., & Maleki, S. (2018). 3D buckling assessment of cylindrical steel silos of uniform thickness under seismic action. *Thin-Walled Structures*, 131, 654–667. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.07.040>

Mendoza, J. I., & Marín-Lopez, J. R. (2023). Ultimate local strength of a submarine structure considering the influence of localized reduction of thickness. *Ocean Engineering*, 271, 113778. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.113778>

M.I.C. Industries Inc. (s. f.). Sitio web oficial. www.micindustries.com

Muslikh, M., & Iman, M. (2026). Cold-formed steel truss roof structure failure considering seismic load and buckling analysis. *Journal of the Civil Engineering Forum*, 12(1), 1–10. <https://doi.org/10.22146/jcef.13069>

Narvydas, E., & Puodžiūnienė, N. (2013). A preliminary approach to the load and stress analysis of the arc-shaped corrugated steel structure. *Mechanika*, 19(1), 12–18. <https://doi.org/10.5755/j01.mech.19.1.3629>

Páez Redrován, C. D., & Guerrero Cuasapaz, D. P. (2022). Cubiertas autoportantes circulares aplicando el método de elementos finitos. *Gaceta Técnica*, 23(1), 72–91. <https://doi.org/10.51372/gacetatecnica231.6>

Piekarczyk, A. (2019). Experimental and numerical studies of double corrugated steel arch panels. *Thin-Walled Structures*, 140, 60–73. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.03.032>

Piekarczyk, A. (2023). Evaluation of limit curves double corrugated profiles of arched roofs. *Journal of Constructional Steel Research*, 207, 107958. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2023.107958>

Piekarczyk, A., & Malowany, K. (2016). Comparative analysis of numerical models of arch-shaped steel sheet sections. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 16(4), 645–658. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2016.04.006>

Piekarczyk, A., & Więch, P. (2021). Numerical prediction of local instability in double corrugated profiles. *Materials*, 14(20), 6002. <https://doi.org/10.3390/ma14206002>

Piekarczyk, A., Malowany, K., Więch, P., Kujawińska, M., & Sulik, P. (2015). Stability and bearing capacity of arch-shaped corrugated shell elements: Experimental and numerical study. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences – Technical Sciences*, 63(1), 113–123. <https://doi.org/10.1515/bpasts-2015-0013>

Piekarczyk, A., Więch, P., & Malowany, K. (2017). Numerical investigation into plastic hinge formation in arched corrugated thin-walled profiles. *Thin-Walled Structures*, 119, 13–21. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.05.029>

Piekarczyk, A., Więch, P., Kuczyński, K., & Walentyński, R. (2021). Experimental and computational approaches to the evaluation of double corrugated arch structures: A review of the latest advancements. *Archives of Civil Engineering*, 67(2), 7–35. <https://doi.org/10.24425/ace.2021.137152>

Qaderi, S., Fantuzzi, N., & Reddy, J. N. (2026). Lagrange multiplier and penalty methods for the thermal buckling analysis of higher-order composite laminates. *Applied Mathematical Modelling*, 154, 116672. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2025.116672>

Qi, Z., Sun, H., Jia, Y., Wei, M., Zhang, G., Xu, J., Sun, X., & Wang, S. (2026). Wind effect and optimization of multi-span greenhouses with different roof. *Results in Engineering*, 21, 110029. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2026.110029>

Qin, Z., Xia, D., Dai, L., Zheng, Q., & Lin, L. (2022). Investigations on wind characteristics for typhoon and monsoon wind speeds based on both stationary and non-stationary models. *Atmosphere*, 13(2), Article 178. <https://doi.org/10.3390/atmos13020178>

Rani, N., Pratap, A., & Ahuja, A. K. (2024). Evaluation of wind pressure distribution on single and multi-span cylindrical canopy roofs using wind tunnel testing. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 28(8), 3344-3358. <https://doi.org/10.1007/s12205-024-1013-8>

Sarwar, M., & Melhus, B. (2025). Automated linear buckling analysis of space frame structures. *Results in Engineering*, 28, 107926. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107926>

Secretaría de Obras y Servicios de la Ciudad de México. (2023). NTC 2023 (acuerdo en Gaceta).

Simiu, E., & Scanlan, R. H. (1996). *Wind effects on structures: Fundamentals and applications to design* (3rd ed.). John Wiley & Sons.

Swaddiwudhipong, S., & Khan, M. S. (2002). Dynamic response of wind-excited building using CFD. *Journal of Sound and Vibration*, 253(4), 735–754. <https://doi.org/10.1006/jsvi.2000.3508>

Takeda, F., Yoshino, T., & Uematsu, Y. (2014). Design wind force coefficients for hyperbolic paraboloid free roofs. *Journal of Physical Science and Application*, 4(1), 1–19.

Takeda, F., Yoshino, T., & Uematsu, Y. (2015). Design wind force coefficients for free-standing canopy roofs of membrane structures. *Technical Transaction Civil Engineering*, 167–189.

Timoshenko, S. P., & Gere, J. M. (1961). *Theory of elastic stability* (2nd ed.). McGraw-Hill.

Uddin, M. A., Andrew, J. J., Barsoum, I., Kumar, S., & Schiffer, A. (2025). Quasi-static and dynamic compression behavior of stacked pyramidal lattice structures with I-beam struts. *Scientific Reports*, 15(1), 2837. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-84507-9>

Walentyński, R., Cybulski, R., & Kozieł, K. (2014). Local buckling and post-buckling investigation of cold-formed self-supported elements. *Recent Advances in Computational Mechanics*, 23–37. <https://doi.org/10.1201/b16513-6>

Yao, J., Peng, M., Huang, J., Zhang, Q., & Zhou, Y. (2024). Numerical simulation study on wind pressure coefficient of variable cross-section arched roof. *Results in Engineering*, 21, 101844. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101844>

Zang, C. C., Christian, J. M., Yuan, J. K., Sment, J., Moya, A. C., Ho, C. K., & Wang, Z. F. (2014). Numerical simulation of wind loads and wind induced dynamic response of heliostats. *Energy Procedia*, 49, 1582–1591. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.03.167>

Zhang, G., Zhang, Q., Mo, H., Guo, D., Zhi, X., & Fan, F. (2025). Numerical investigations of snow load interference effects on multiple arched roofs under wind–snow coupled actions. *Applied Sciences*, 15(23), 12414. <https://doi.org/10.3390/app152312414>

9. ANEXOS

9.1 Estabilidad no lineal estática

9.1.1 Curvas de equilibrio carga-deformación, viento perpendicular a la cubierta

Las curvas de equilibrio se generaron considerando los puntos máximos de deformación.

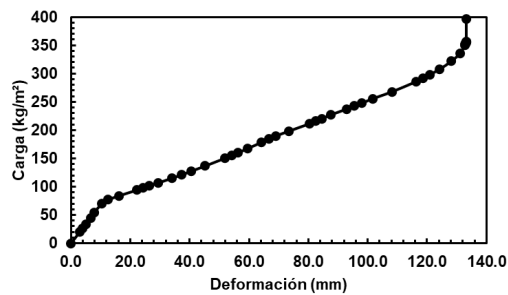


Figura 78. Curva carga deformación, caso 1.

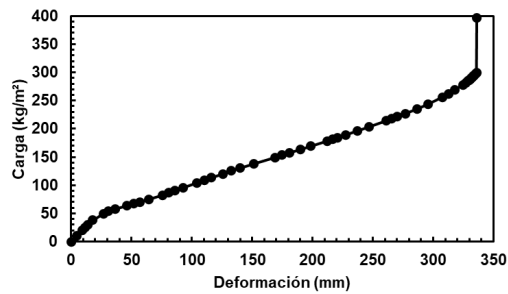


Figura 79. Curva carga deformación, caso 2.

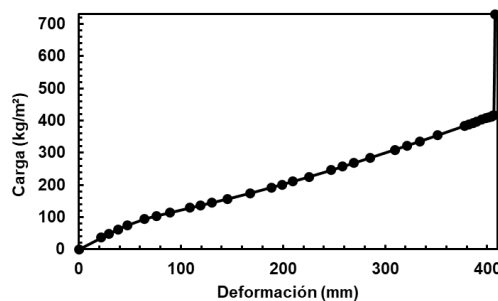


Figura 80. Curva carga deformación, caso 3.

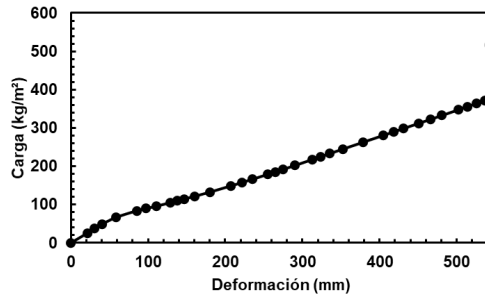


Figura 81. Curva carga deformación, caso 4.

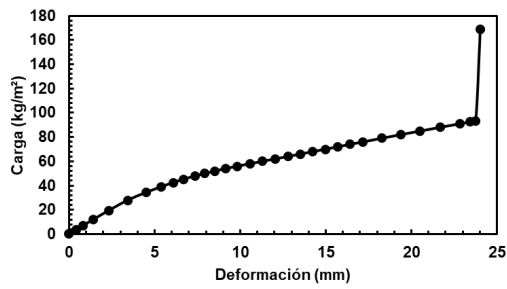


Figura 82. Curva carga deformación, caso 5.

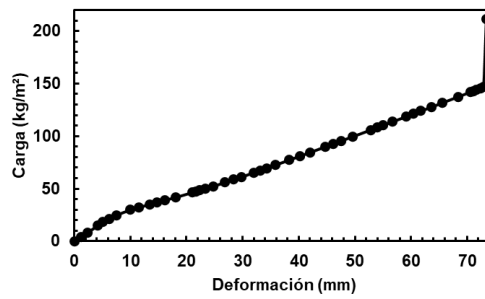


Figura 83. Curva carga deformación, caso 6.

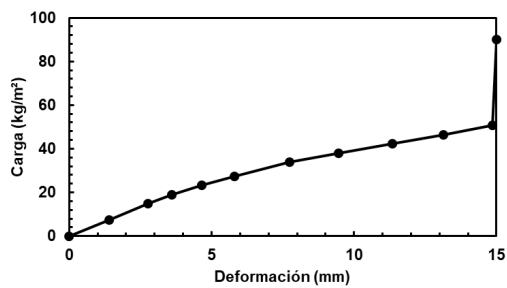


Figura 84. Curva carga deformación, caso 7.

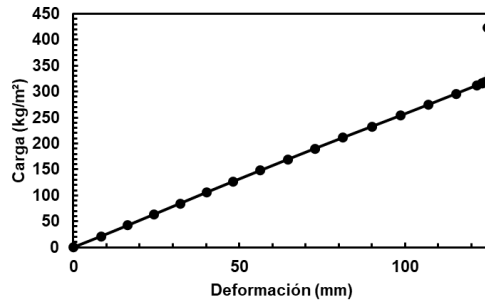


Figura 85. Curva carga deformación, caso 8.

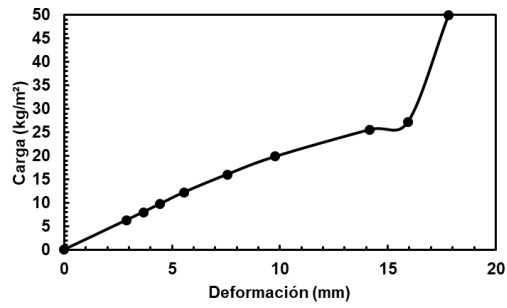


Figura 86. Curva carga deformación, caso 9.

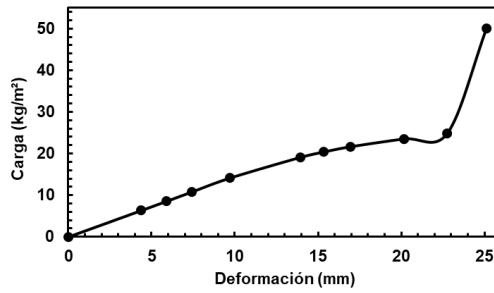


Figura 87. Curva carga deformación, caso 10.

9.1.2 Curvas de equilibrio carga-deformación, viento paralelo a la cubierta

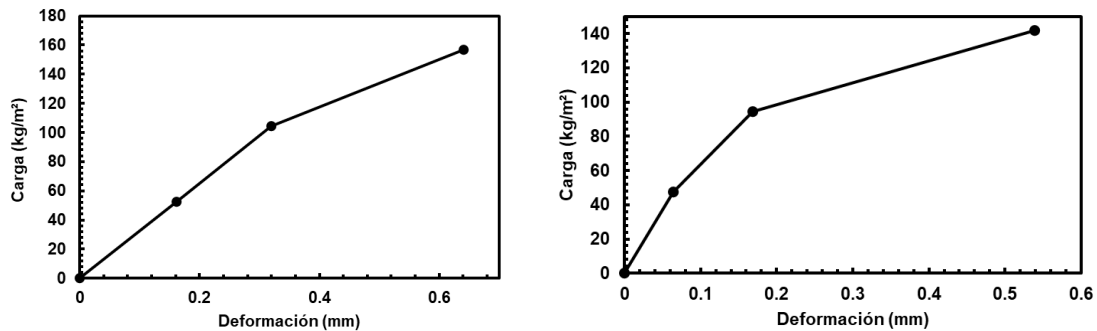


Figura 88. Curva carga deformación, caso 1 y 2,

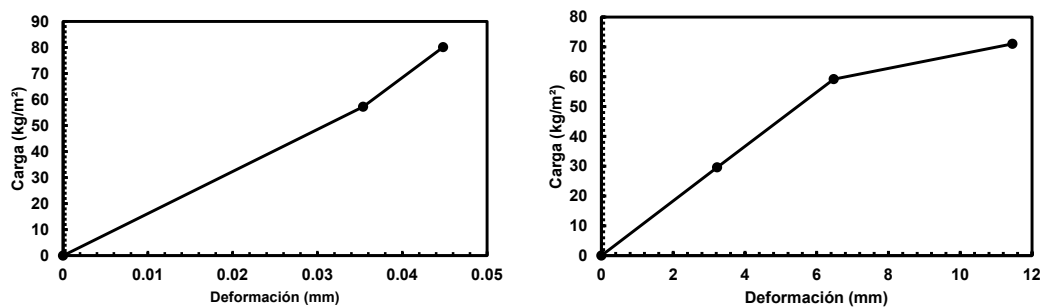


Figura 89. Curva carga deformación, caso 3 y 4.

9.1.3 Revisión de esfuerzos y deformaciones perpendicular a la cubierta

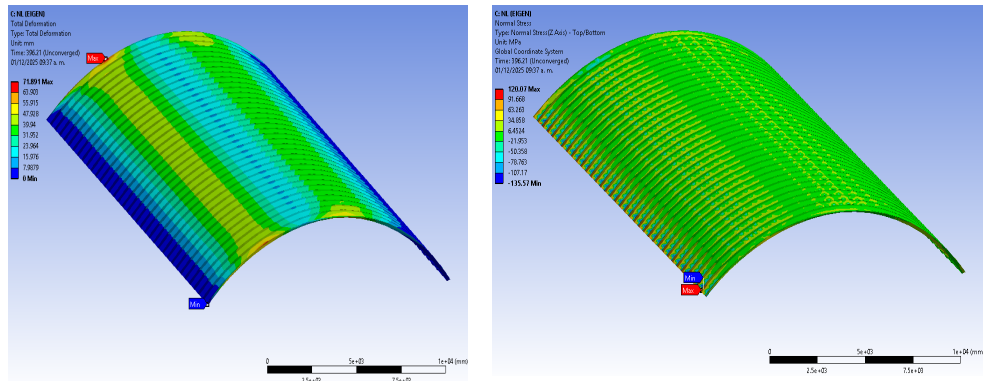


Figura 90. Caso 1, deformación total máxima de 71,90 mm a la izquierda y el esfuerzo normal máxima de -135,57 MPa a la derecha.

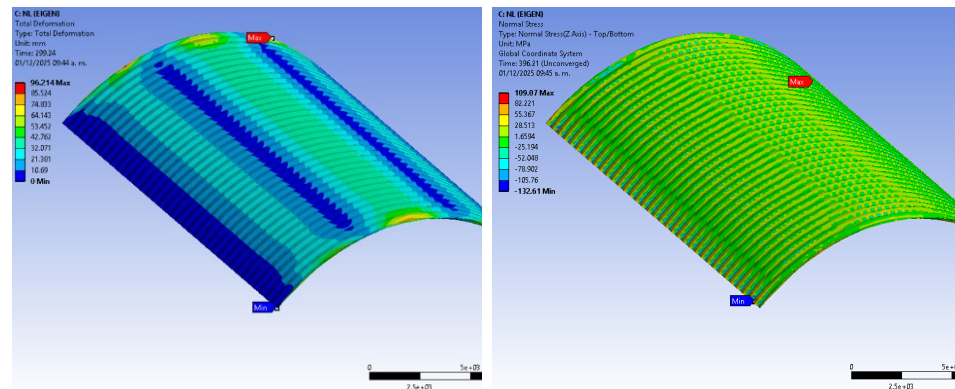


Figura 91. Caso 2, deformación total máxima de 96,21 mm a la izquierda y el esfuerzo normal máxima de 109,07 MPa a la derecha.

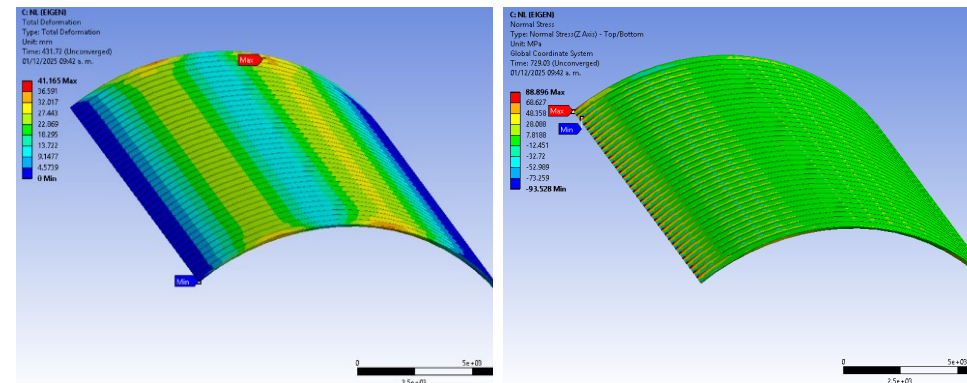


Figura 92. Caso 3, deformación total máxima de 41,17 mm a la izquierda y el esfuerzo normal máxima de 88,9 MPa a la derecha.

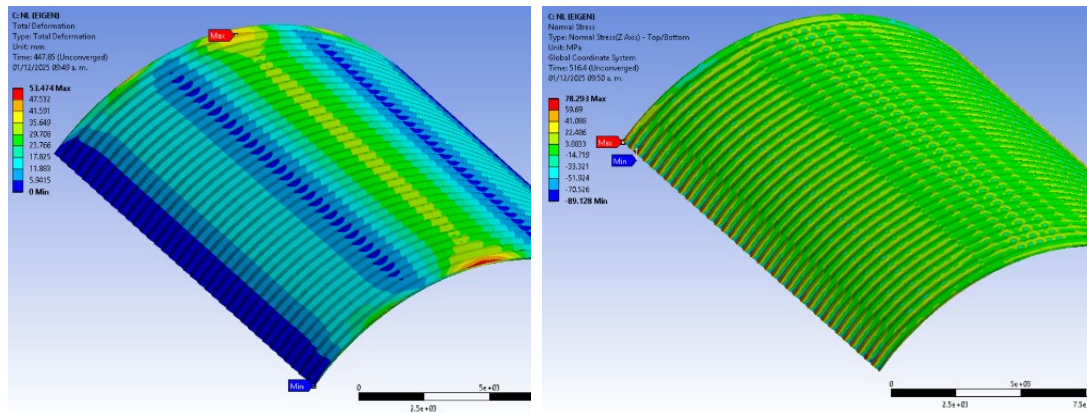


Figura 93. Caso 4, deformación total máxima de 53,47 mm a la izquierda y el esfuerzo normal máxima de 78,29 MPa a la derecha.

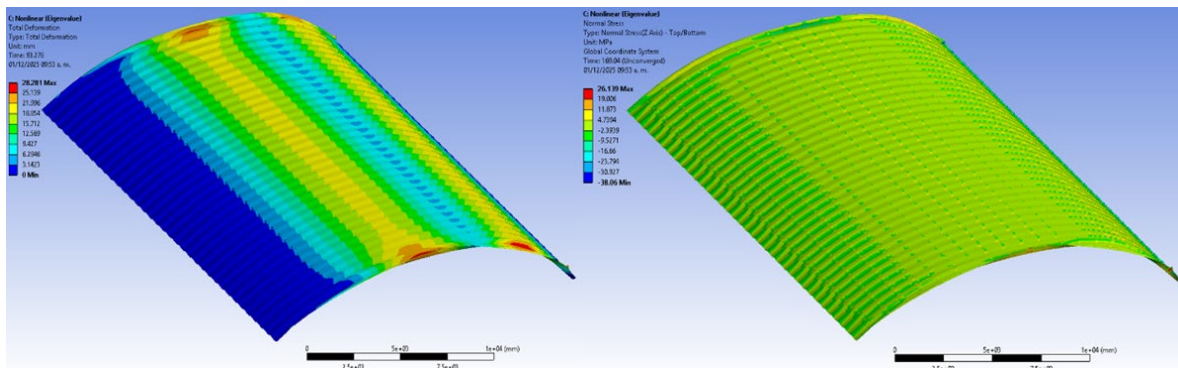


Figura 94. Caso 5, deformación total máxima de 28,28 mm a la izquierda y el esfuerzo normal máxima de 26,14 MPa a la derecha.

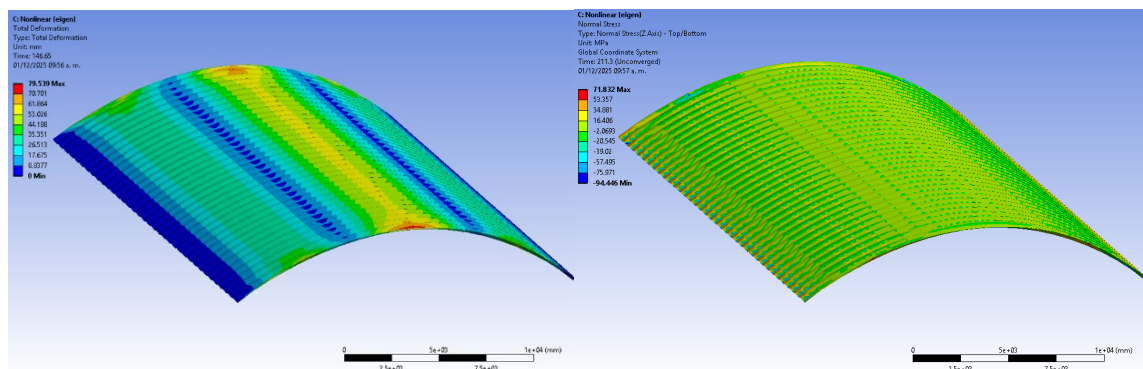


Figura 95. Caso 6, deformación total máxima de 79,54 mm a la izquierda y el esfuerzo normal máxima de 71,83 MPa a la derecha.

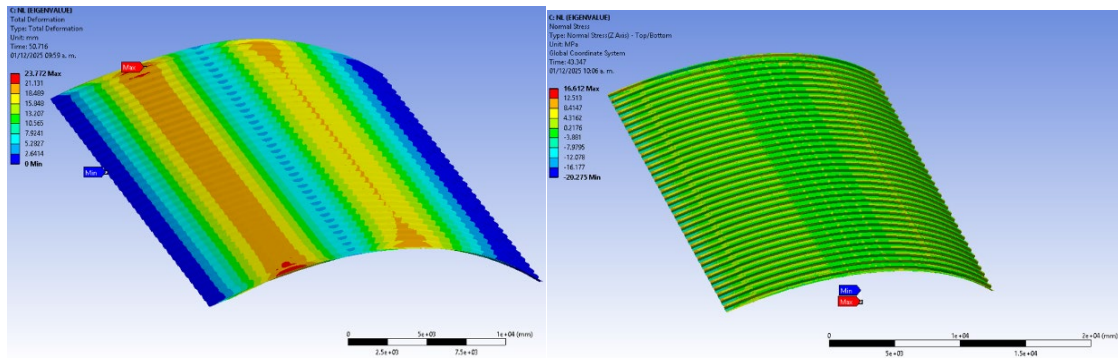


Figura 96. Caso 7, deformación total máxima de 23,73 mm a la izquierda y el esfuerzo normal máxima de 16,61 MPa a la derecha.

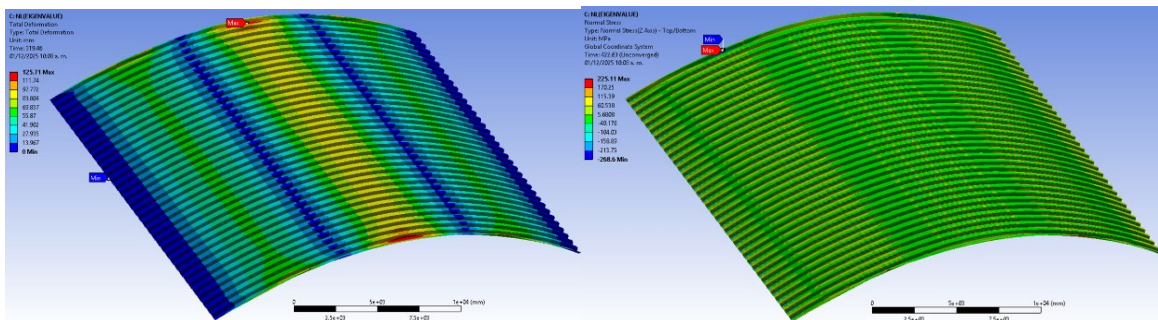


Figura 97. Caso 8, deformación total máxima de 125,71 mm a la izquierda y el esfuerzo normal máxima de 225,11 MPa a la derecha.

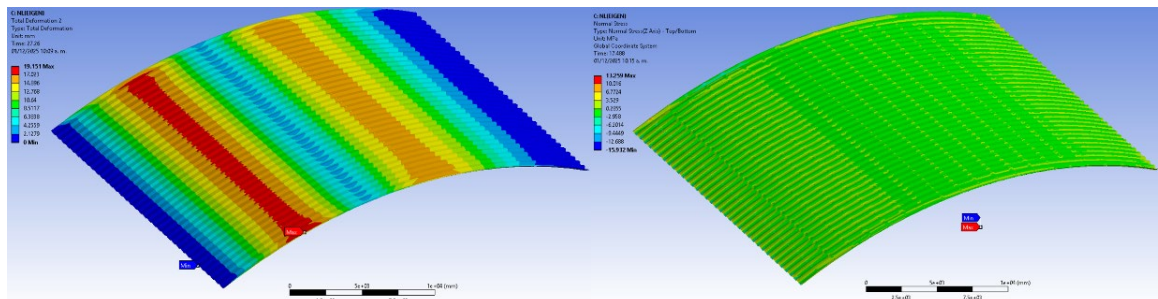


Figura 98. Caso 9, deformación total máxima de 19,15 mm a la izquierda y el esfuerzo normal máxima de 13,26 MPa a la derecha.

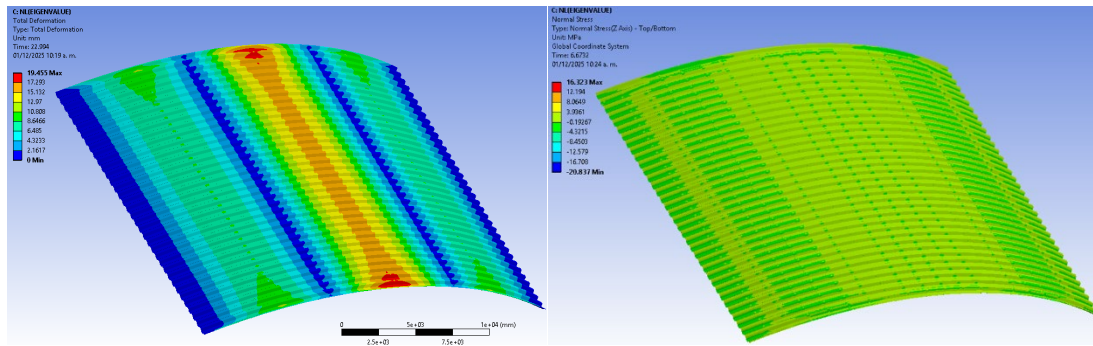


Figura 99. Caso 10, deformación total máxima de 19,46 mm a la izquierda y el esfuerzo normal máxima de 16,32 MPa a la derecha.

9.1.4 Revisión de esfuerzos y deformaciones paralela la cubierta

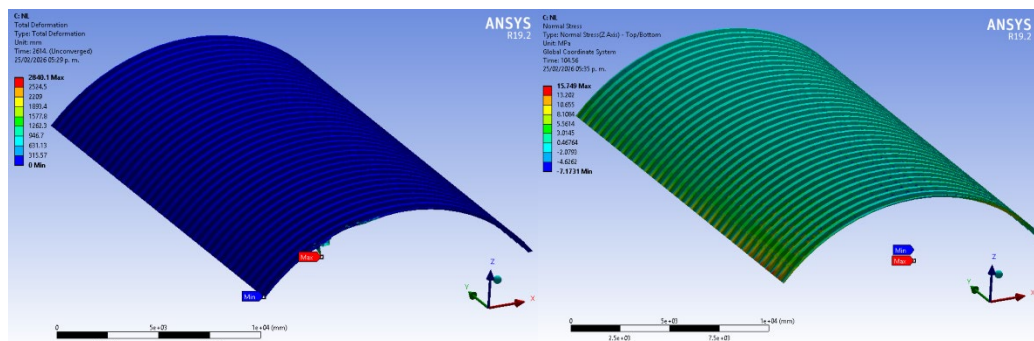


Figura 100. Caso 1, deformación total máxima de 5.43 mm a la izquierda y el esfuerzo normal máxima de 15.80 MPa a la derecha.

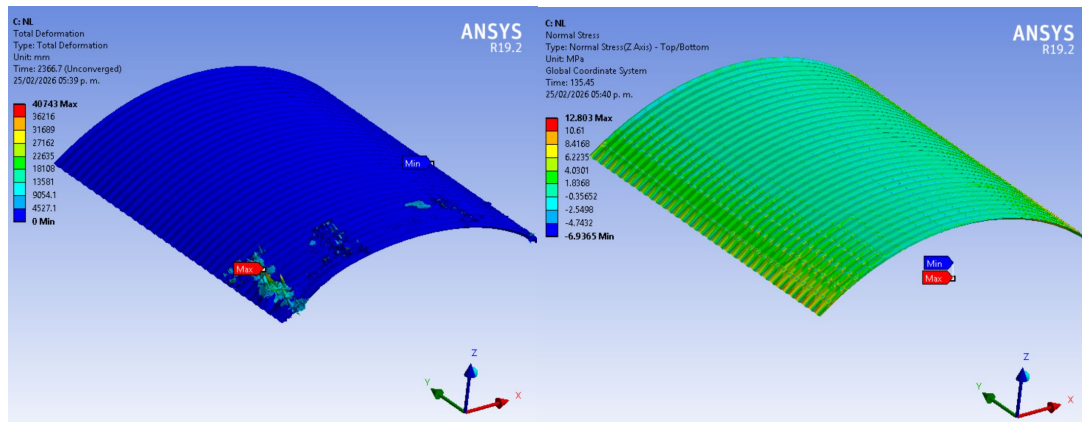


Figura 101. Caso 2, deformación total máxima de 10.43 mm a la izquierda y el esfuerzo normal máxima de 12.80 MPa a la derecha.

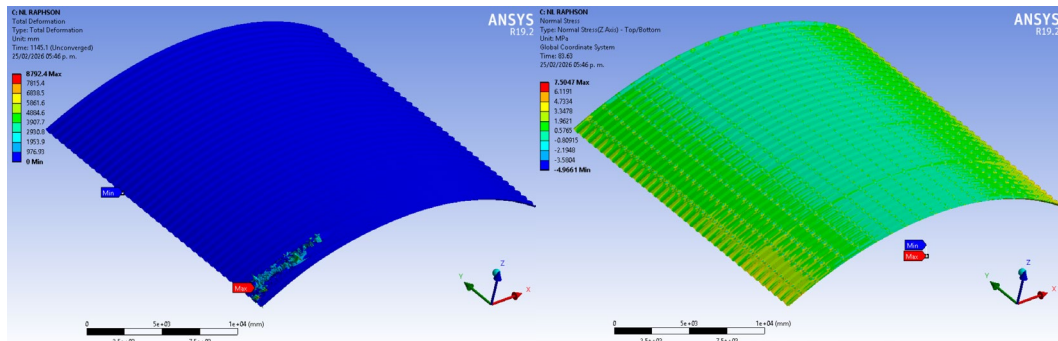


Figura 102. Caso 3, deformación total máxima de 12.33 mm a la izquierda y el esfuerzo normal máxima de 8.92 MPa a la derecha.

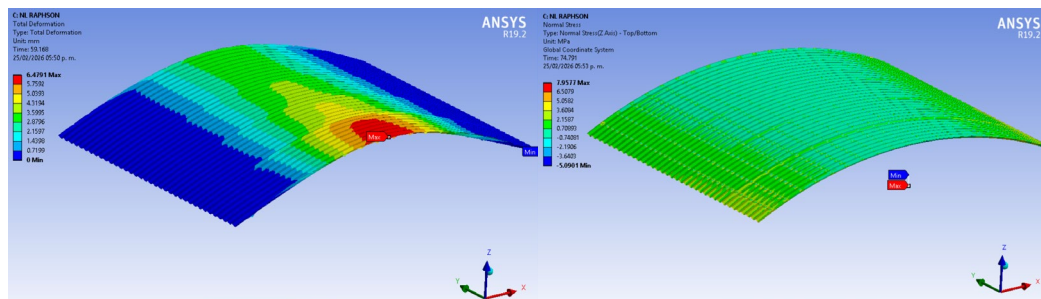


Figura 103. Caso 4, deformación total máxima de 11.46 mm a la izquierda y el esfuerzo normal máxima de 7.96 MPa a la derecha.

9.2 Generación de funciones sintéticas de viento

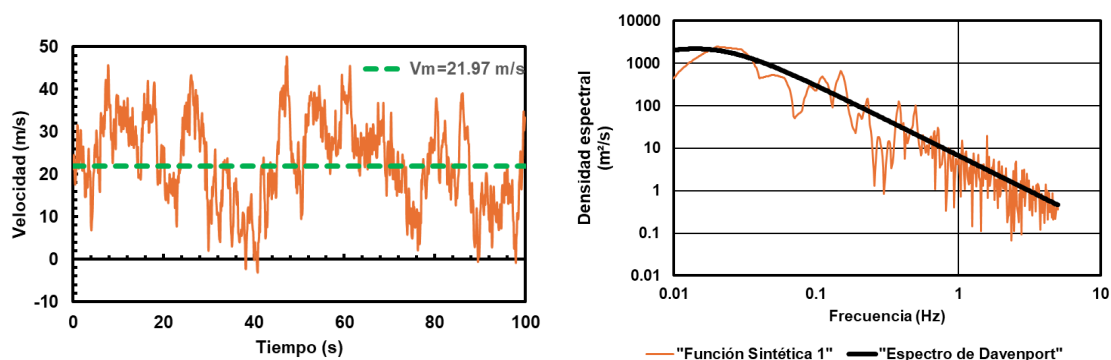


Figura 104. Función sintética 1 (historial de velocidades) y comprobación del modelo AR respecto al espectro de potencia de Davenport.

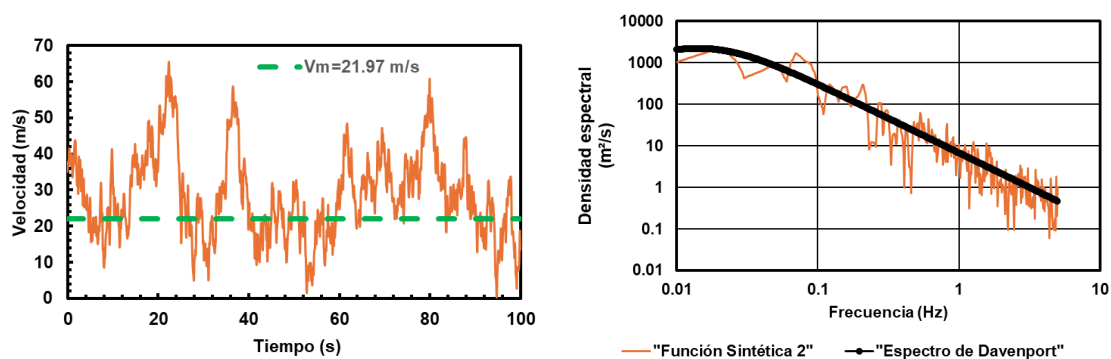


Figura 105. Función sintética 2 (historial de velocidades) y comprobación del modelo AR respecto al espectro de potencia de Davenport.

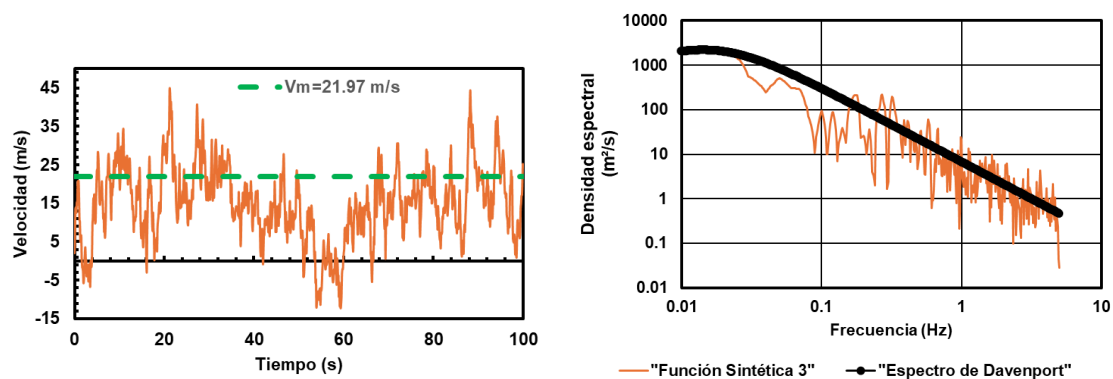


Figura 106. Función sintética 3 (historial de velocidades) y comprobación del modelo AR respecto al espectro de potencia de Davenport.

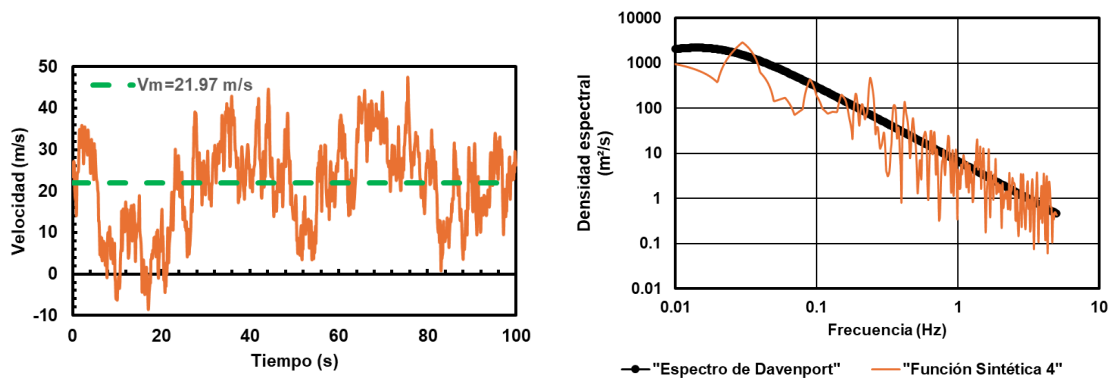


Figura 107. Función sintética 4 (historial de velocidades) y comprobación del modelo AR respecto al espectro de potencia de Davenport.

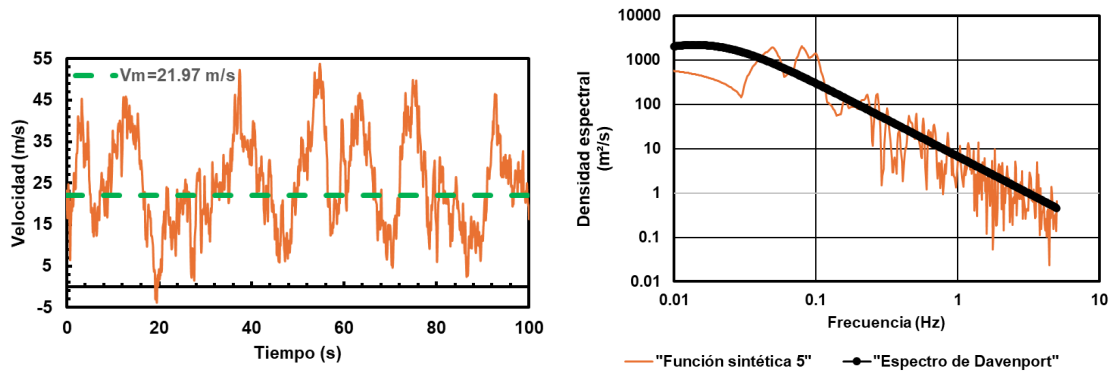


Figura 108. Función sintética 5 (historial de velocidades) y comprobación del modelo AR respecto al espectro de potencia de Davenport.

9.3 Estabilidad no lineal dinámica

9.3.1 Curvas de deformaciones contra incrementos de carga en el tiempo

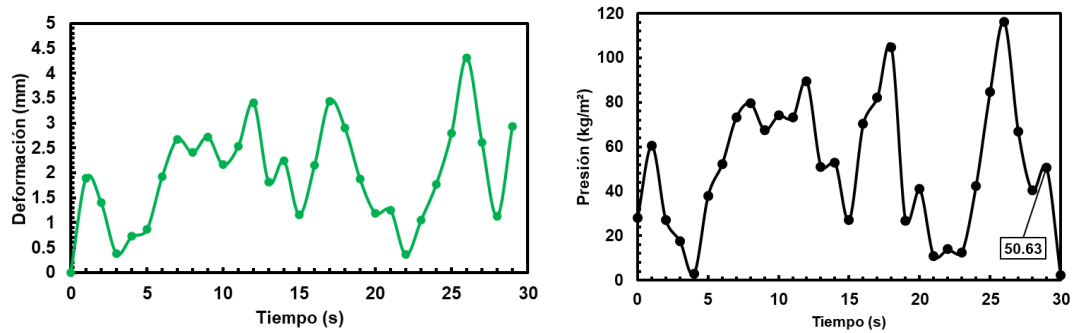


Figura 109. Curva deformación contra incrementos de cargas. Caso 15 en claro 15 m. El sistema se vuelve inestable con una presión de 50.63 kg/m².

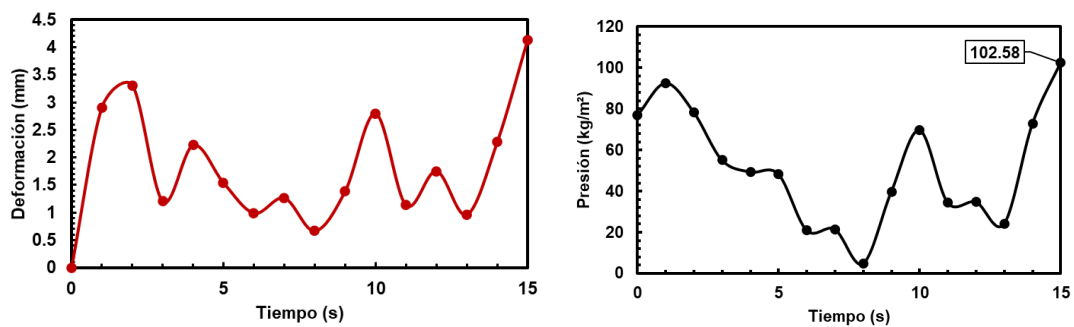


Figura 110. Curva deformación contra incrementos de cargas. Caso 16 en claro 15 m. El sistema se vuelve inestable con una presión de 102.58 kg/m².

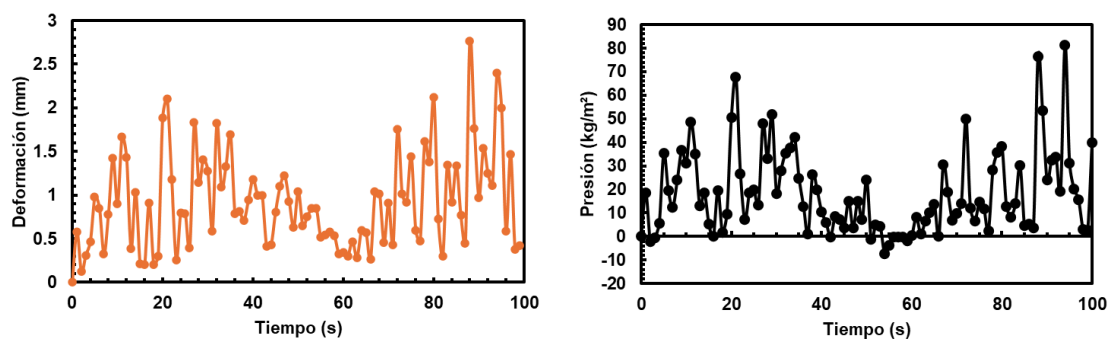


Figura 111. Curva deformación contra incrementos de cargas. Caso 17 en claro 15 m. El sistema se mantiene estable.

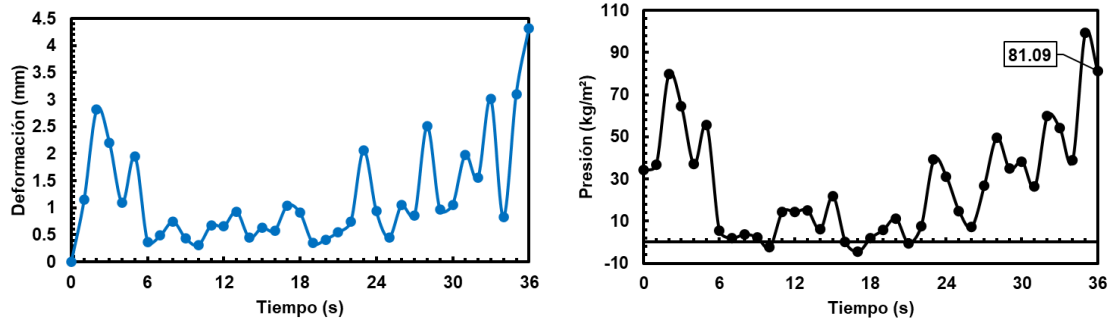


Figura 112. Curva deformación contra incrementos de cargas. Caso 18 en claro 15 m. El sistema se vuelve inestable con una presión de 81.10 kg/m².

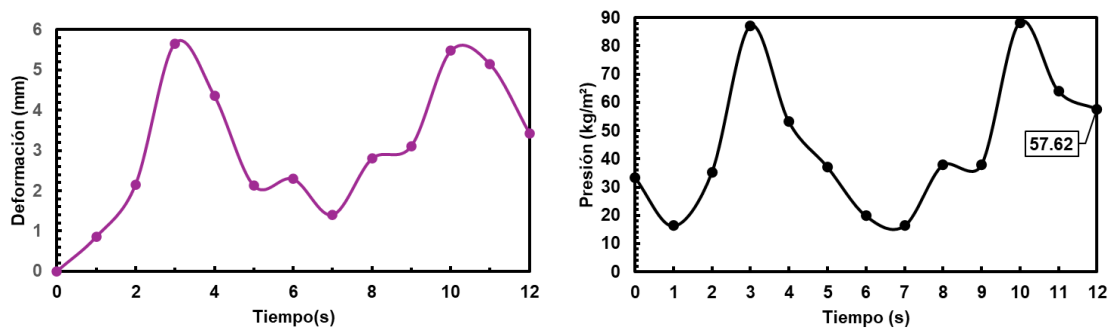


Figura 113. Curva deformación contra incrementos de cargas. Caso 19 en claro 15 m. El sistema se vuelve inestable con una presión de 57.62 kg/m².

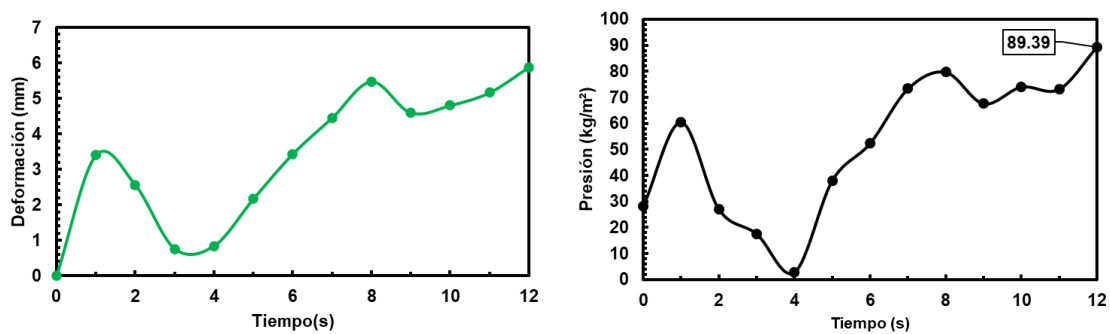


Figura 114. Curva deformación contra incrementos de cargas. Caso 20 en claro 20 m. El sistema se vuelve inestable con una presión de 89.39 kg/m².

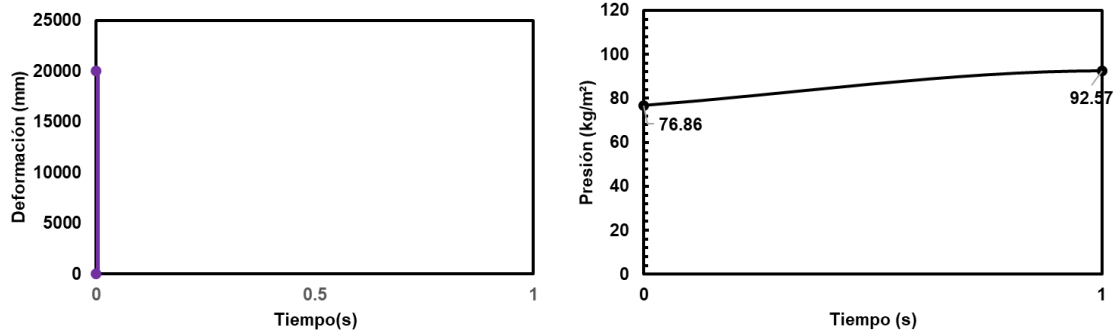


Figura 115. Curva deformación contra incrementos de cargas. Caso 21 en claro 20 m. El sistema se vuelve inestable con una presión de 76.86 kg/m².

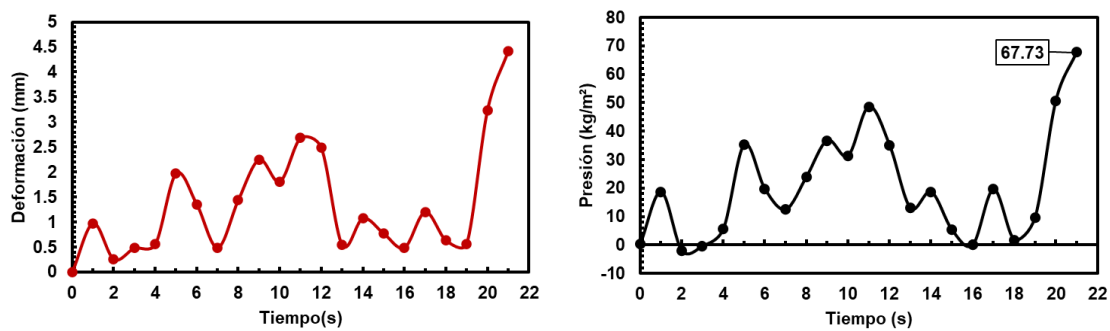


Figura 116. Curva deformación contra incrementos de cargas. Caso 22 en claro 20 m. El sistema se vuelve inestable con una presión de 67.73 kg/m².

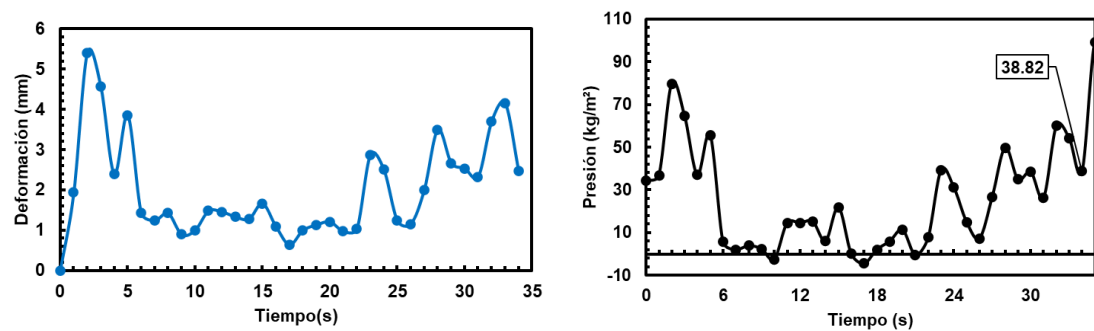


Figura 117. Curva deformación contra incrementos de cargas. Caso 23 en claro 20 m. El sistema se vuelve inestable con una presión de 38.82 kg/m².

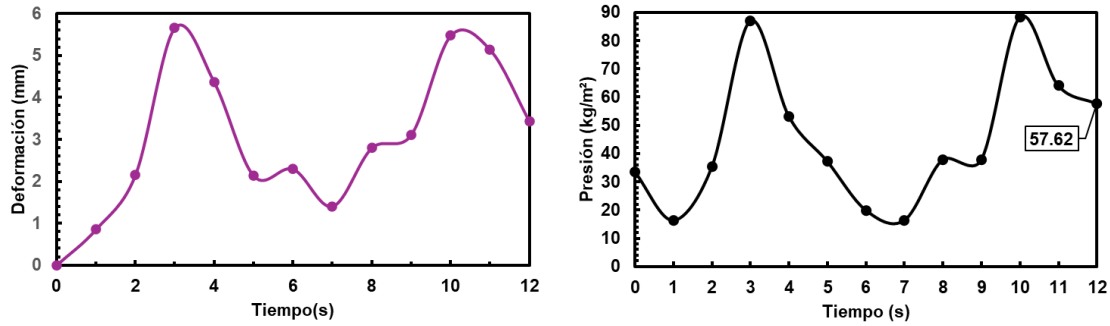


Figura 118. Curva deformación contra incrementos de cargas. Caso 24 en claro 20 m. El sistema se vuelve inestable con una presión de 57.62 kg/m².

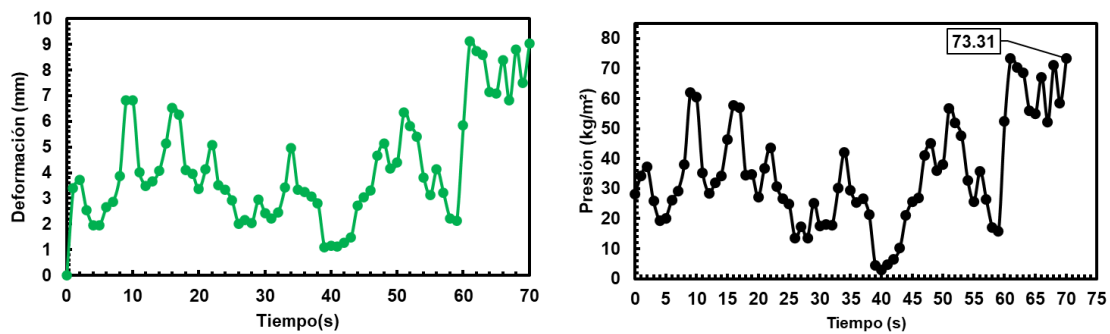


Figura 119. Curva deformación contra incrementos de cargas. Caso 25 en claro 25 m. El sistema se vuelve inestable con una presión de 24.44 kg/m².

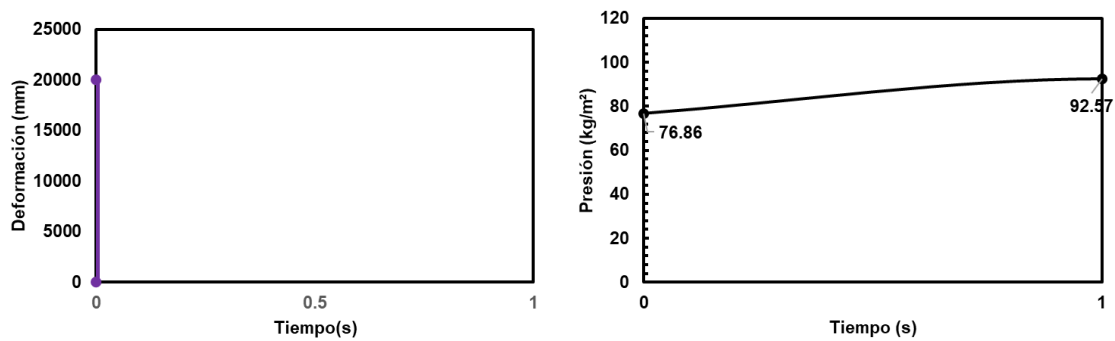


Figura 120. Curva deformación contra incrementos de cargas. Caso 26 en claro 25 m. El sistema se vuelve inestable con una presión de 76.86 kg/m².

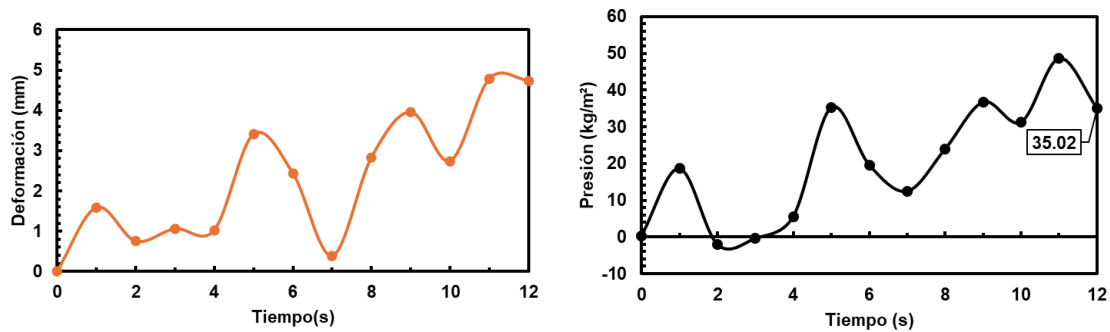


Figura 121. Curva deformación contra incrementos de cargas. Caso 27 en claro 25 m. El sistema se vuelve inestable con una presión de 35.02 kg/m².

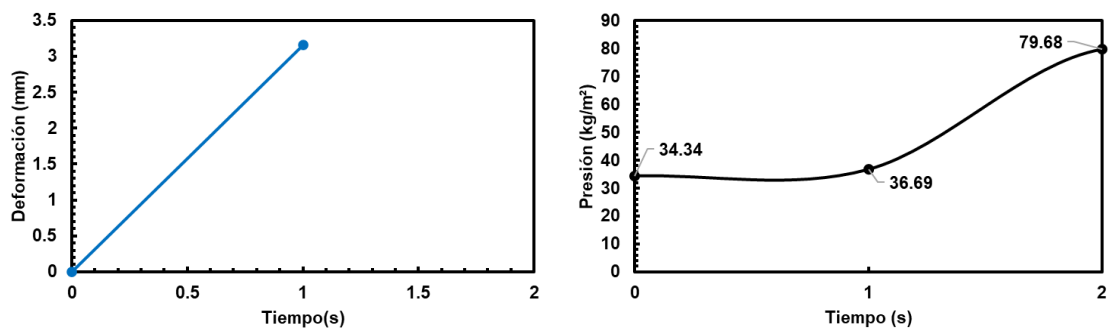


Figura 122. Curva deformación contra incrementos de cargas. Caso 28 en claro 25 m. El sistema se vuelve inestable con una presión de 36.69 kg/m².

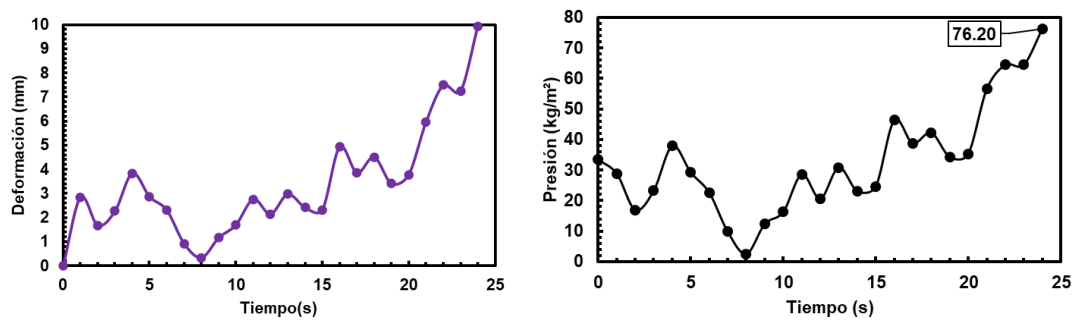


Figura 123. Curva deformación contra incrementos de cargas. Caso 29 en claro 25 m. El sistema se vuelve inestable con una presión de 76.20 kg/m².

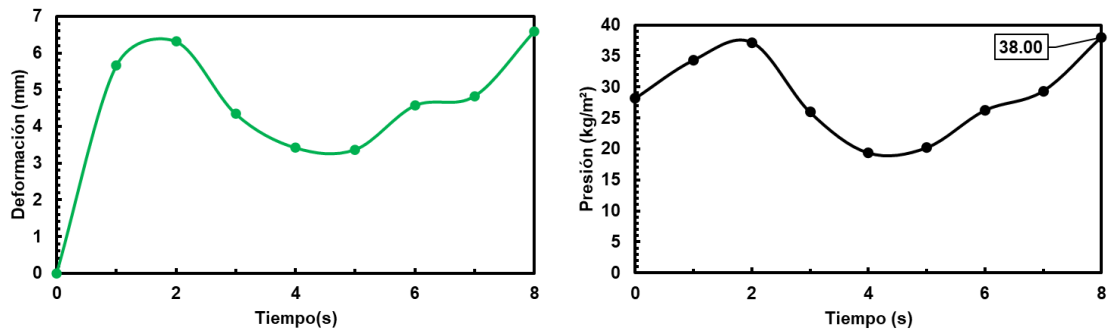


Figura 124. Curva deformación contra incrementos de cargas. Caso 30 en claro 30 m. El sistema se vuelve inestable con una presión de 38.00 kg/m².

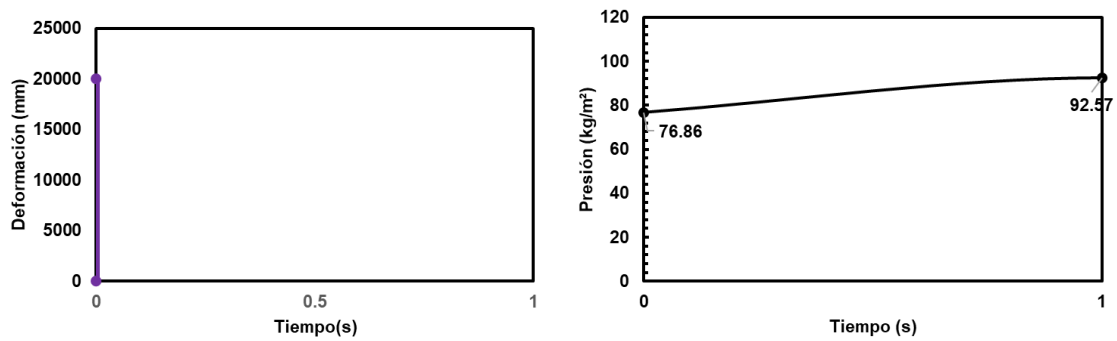


Figura 125. Curva deformación contra incrementos de cargas. Caso 31 en claro 30 m. El sistema se vuelve inestable con una presión de 76.86 kg/m².

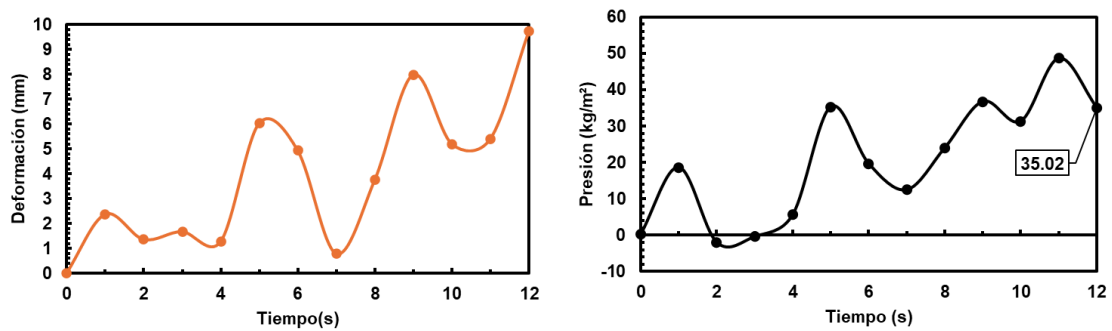


Figura 126. Curva deformación contra incrementos de cargas. Caso 32 en claro 30 m. El sistema se vuelve inestable con una presión de 35.02 kg/m².

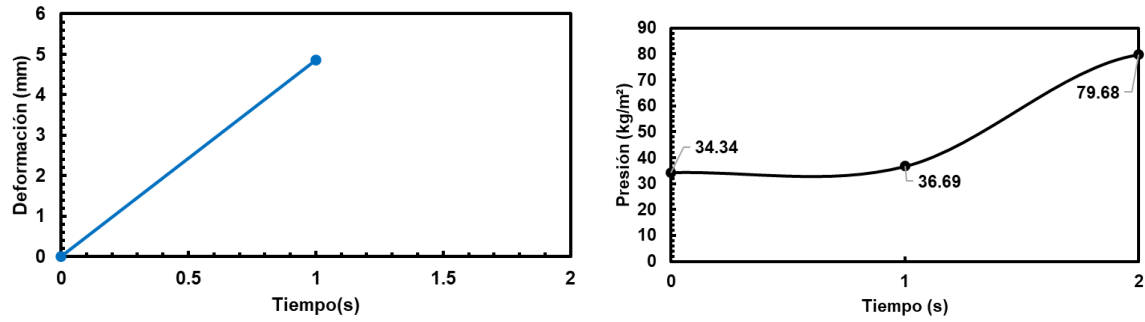


Figura 127. Curva deformación contra incrementos de cargas. Caso 33 en claro 30 m. El sistema se vuelve inestable con una presión de 36.69 kg/m².

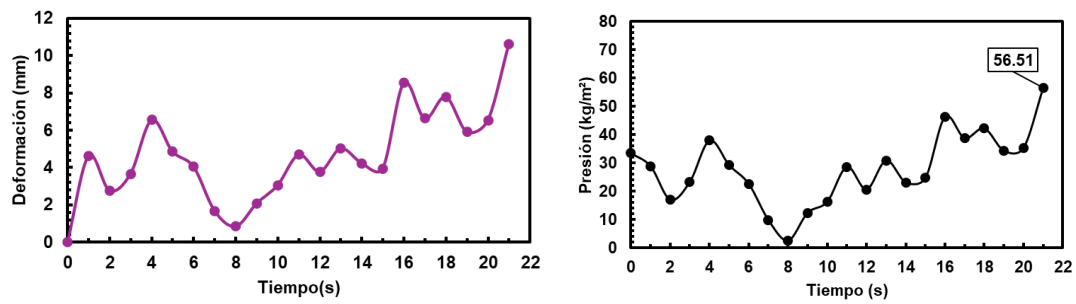


Figura 128. Curva deformación contra incrementos de cargas. Caso 34 en claro 30 m. El sistema se vuelve inestable con una presión de 56.51 kg/m².

9.3.2 Revisión de esfuerzos y deformaciones ante cargas dinámicas por viento.

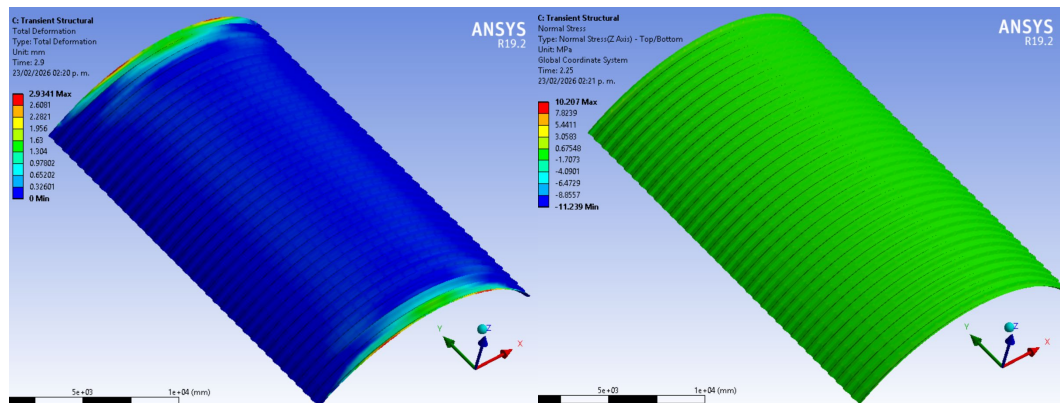


Figura 129. Caso 1, deformación total máxima de 2.94 mm a la izquierda y el esfuerzo normal máxima de -11.24 MPa a la derecha.

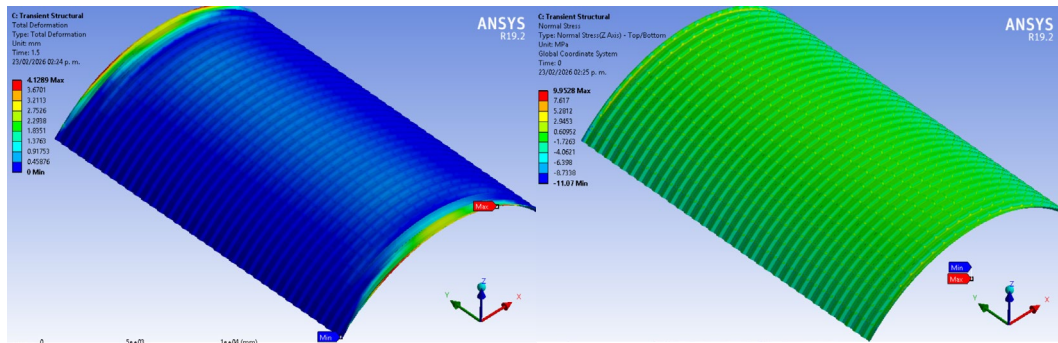


Figura 130. Caso 2, deformación total máxima de 4.13 mm a la izquierda y el esfuerzo normal máxima de -11.07 MPa a la derecha.

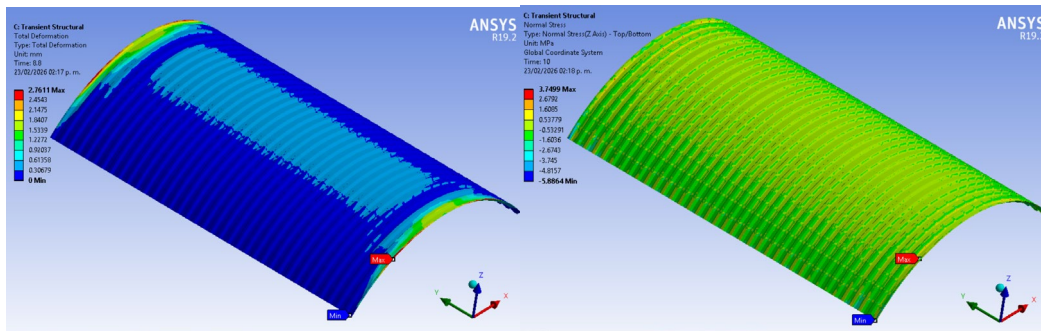


Figura 131. Caso 3, deformación total máxima de 2.76 mm a la izquierda y el esfuerzo normal máxima de -5.88 MPa a la derecha.

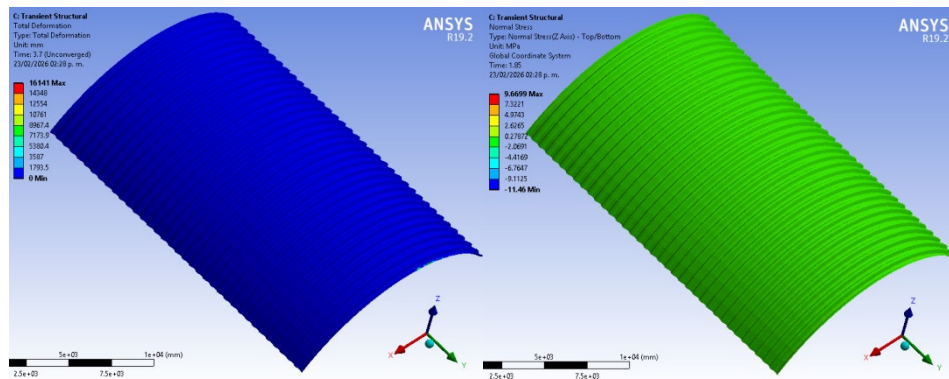


Figura 132. Caso 4, deformación total máxima de 4.32 mm a la izquierda y el esfuerzo normal máxima de -11.46 MPa a la derecha.

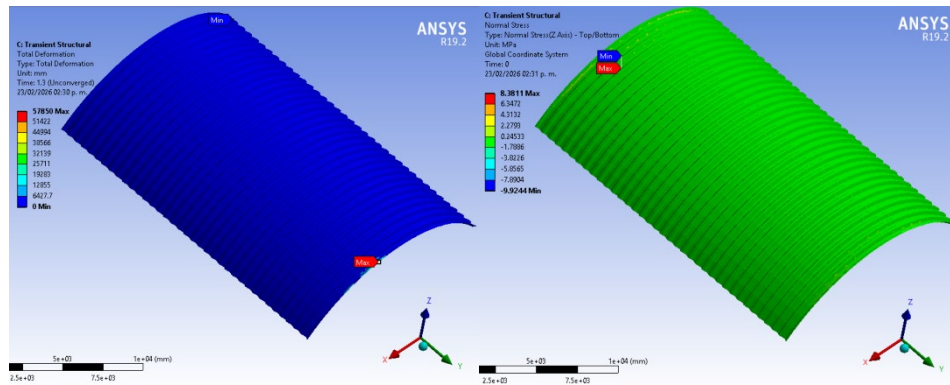


Figura 133. Caso 5, deformación total máxima de 3.07 mm a la izquierda y el esfuerzo normal máxima de -9.92 MPa a la derecha.

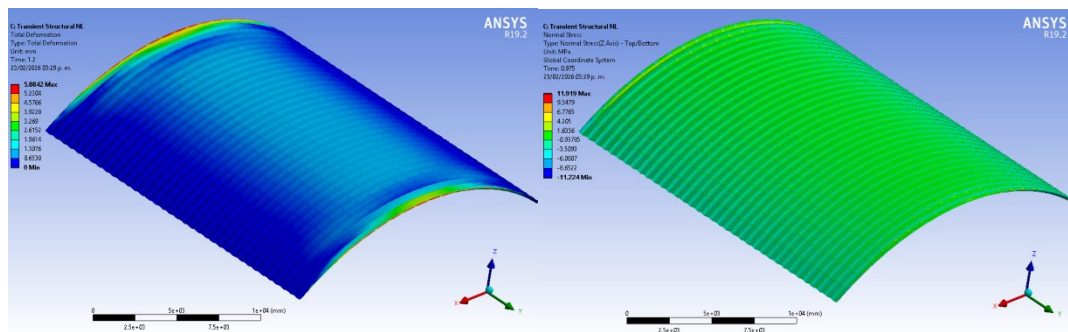


Figura 134. Caso 6, deformación total máxima de 5.88 mm a la izquierda y el esfuerzo normal máxima de -11.22 MPa a la derecha.

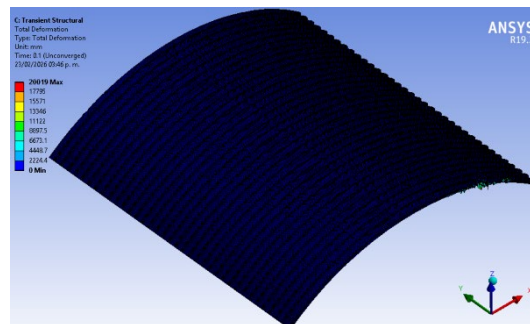


Figura 135. Caso 7, el arcotecho colapsó debido a la inestabilidad antes de estimar deformaciones y esfuerzos máximos.

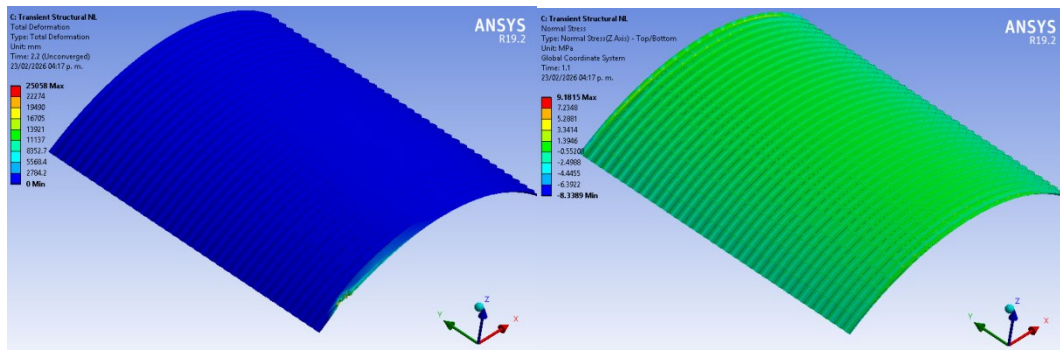


Figura 136. Caso 8, deformación total máxima de 4.42 mm a la izquierda y el esfuerzo normal máxima de 9.18 MPa a la derecha.

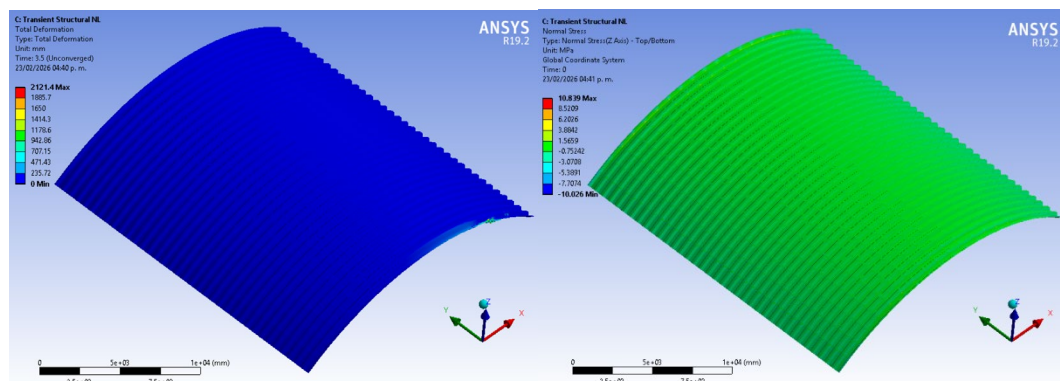


Figura 137. Caso 9, deformación total máxima de 5.39 mm a la izquierda y el esfuerzo normal máxima de 10.84 MPa a la derecha.

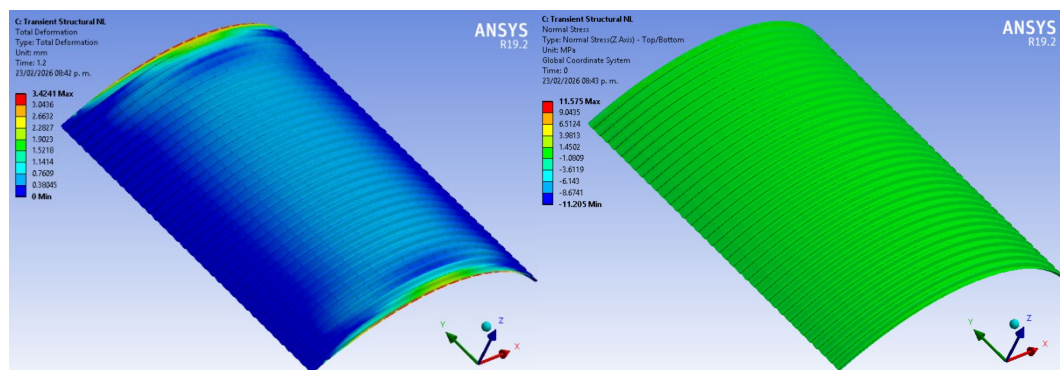


Figura 138. Caso 10, deformación total máxima de 3.42 mm a la izquierda y el esfuerzo normal máxima de 11.58 MPa a la derecha.

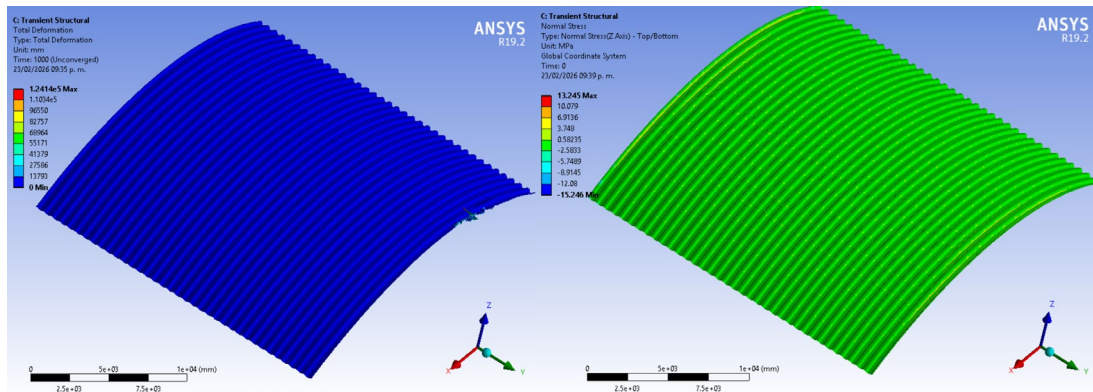


Figura 139. Caso 11, deformación total máxima de 9.03 mm a la izquierda y el esfuerzo normal máxima de -15.25 MPa a la derecha.

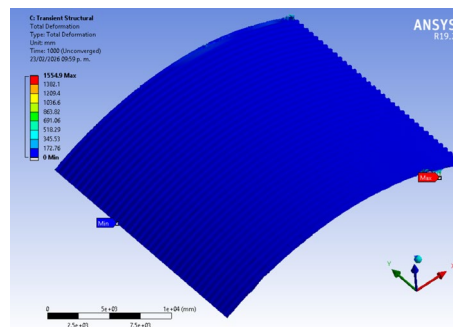


Figura 140. Caso 12, el arcotecho colapsó debido a la inestabilidad antes de estimar deformaciones y esfuerzos máximos.

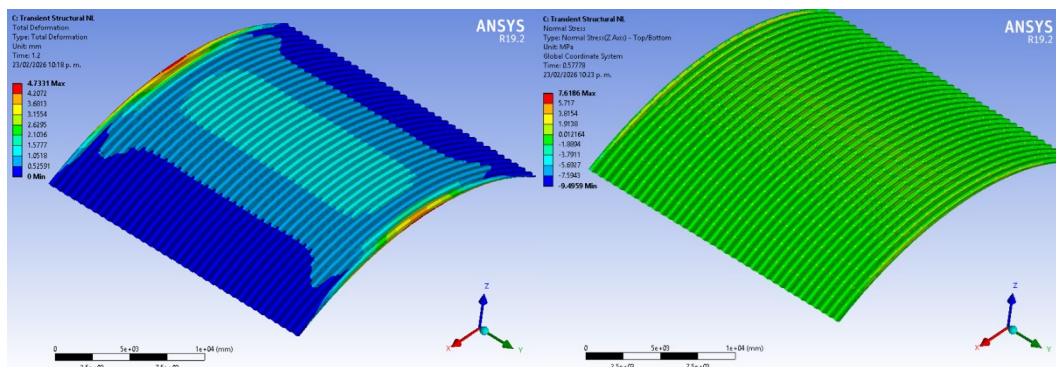


Figura 141. Caso 13, deformación total máxima de 4.73 mm a la izquierda y el esfuerzo normal máxima de -9.50 MPa a la derecha.

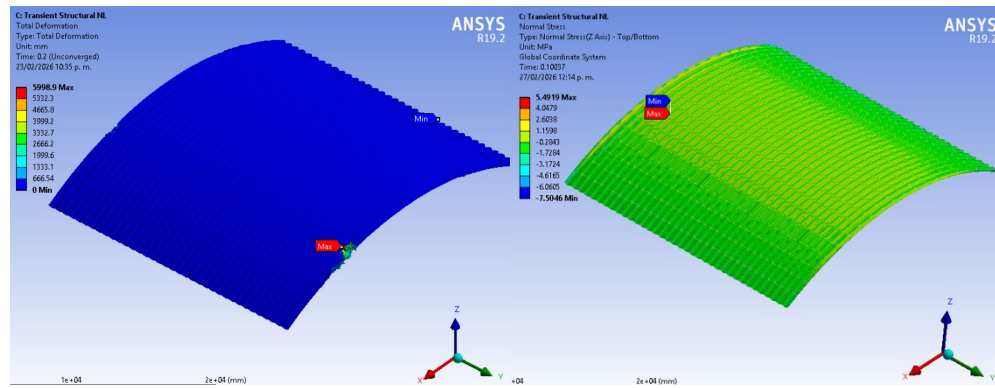


Figura 142. Caso 14, deformación total máxima de 3.16 mm a la izquierda y el esfuerzo normal máxima de -7.50 MPa a la derecha.

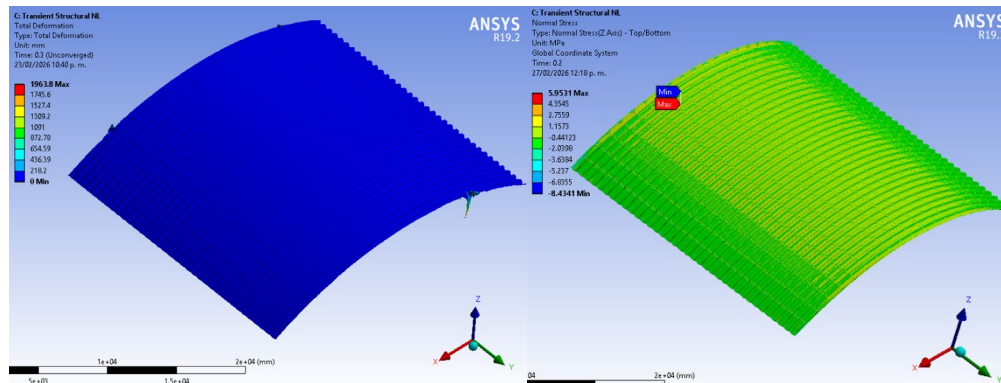


Figura 143. Caso 15, deformación total máxima de 3.73 mm a la izquierda y el esfuerzo normal máxima de -8.43 MPa a la derecha.

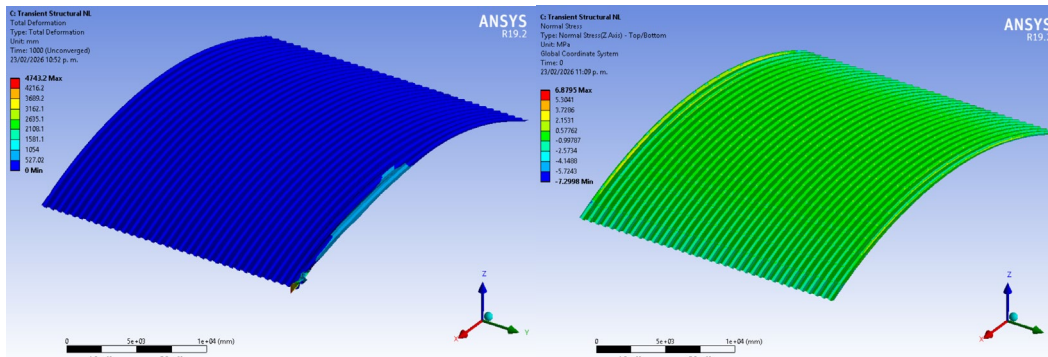


Figura 144. Caso 16, deformación total máxima de 6.59 mm a la izquierda y el esfuerzo normal máxima de -7.30 MPa a la derecha.

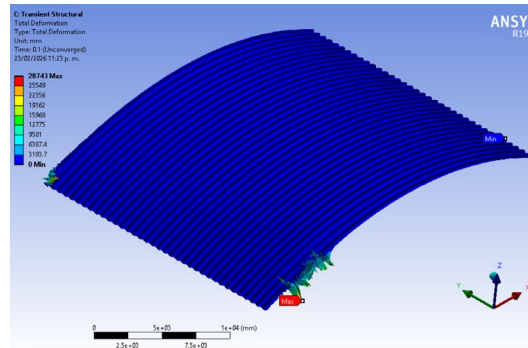


Figura 145. Caso 17, el arcotecho colapsó debido a la inestabilidad antes de estimar deformaciones y esfuerzos máximos.

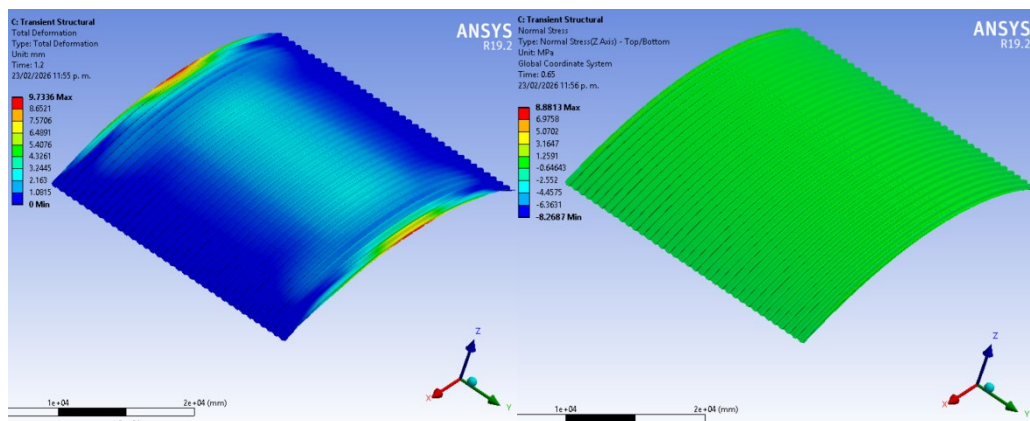


Figura 146. Caso 18, deformación total máxima de 9.73 mm a la izquierda y el esfuerzo normal máxima de 8.88 MPa a la derecha.

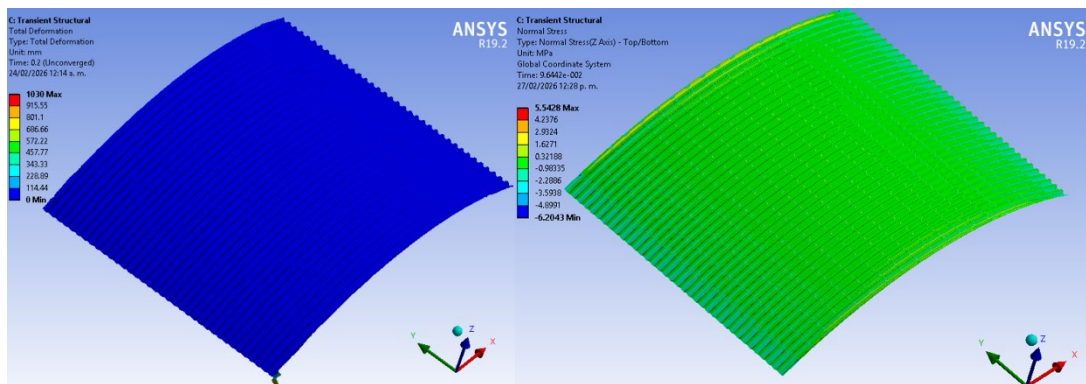


Figura 147. Caso 19, deformación total máxima de 4.87 mm a la izquierda y el esfuerzo normal máxima de -6.20 MPa a la derecha.

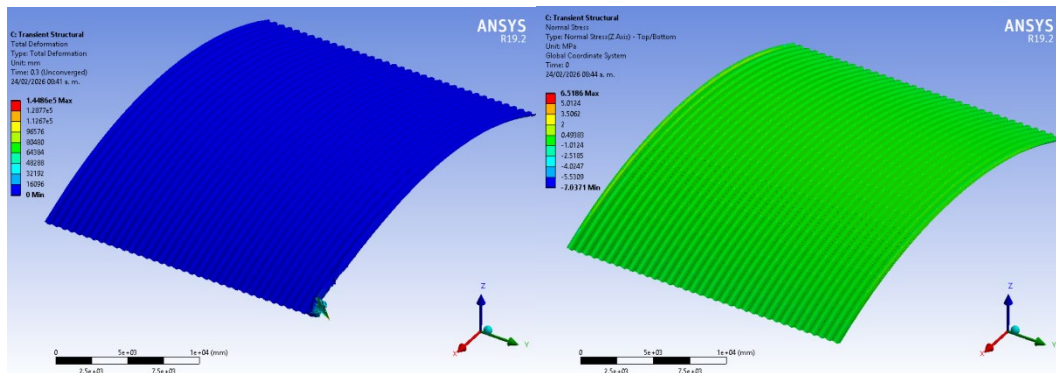


Figura 148. Caso 20, deformación total máxima de 6.23 mm a la izquierda y el esfuerzo normal máxima de -7.03 MPa a la derecha.

9.3.3 Curvas de oscilaciones en el tiempo

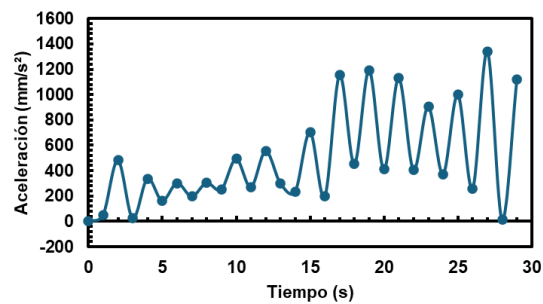


Figura 149. Caso 15, las oscilaciones presentaron fluctuaciones, produciendo una pérdida de estabilidad que indujo al colapso del arcoteco en el segundo 30.

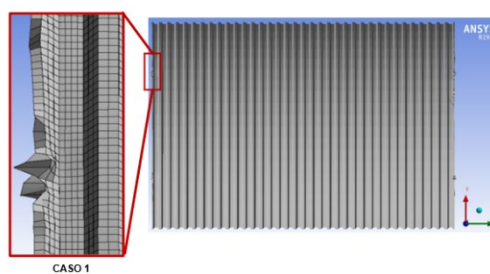


Figura 150. Zona crítica de pandeo para el caso 15, donde se aprecian fallas por pandeo local.

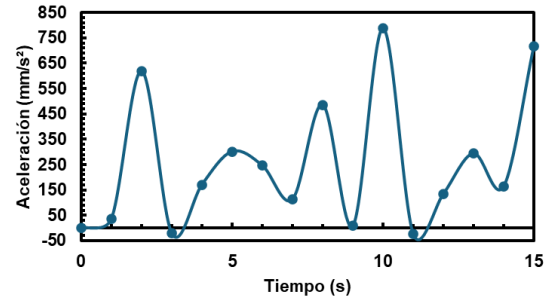


Figura 151. Caso 16, las oscilaciones presentaron fluctuaciones, produciendo una pérdida de estabilidad que indujo al colapso del arcotecho en 15 segundos.

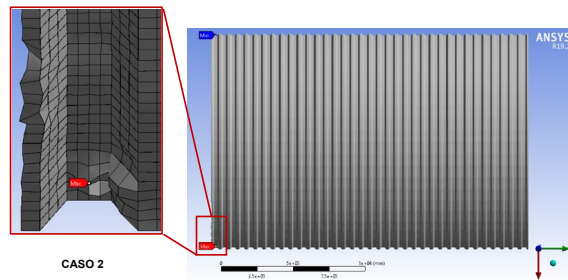


Figura 152. Zona crítica de pandeo para el caso 16, donde se aprecian fallas por pandeo local.

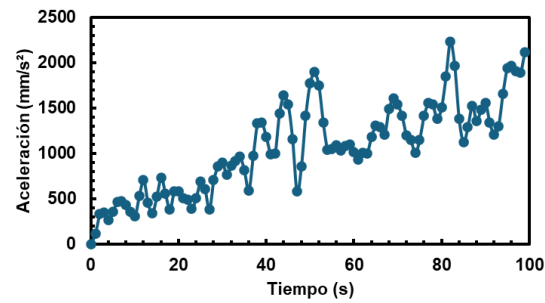


Figura 153. Caso 17, las oscilaciones presentaron fluctuaciones, produciendo una pérdida de estabilidad que indujo al colapso del arcotecho en 100 segundos.

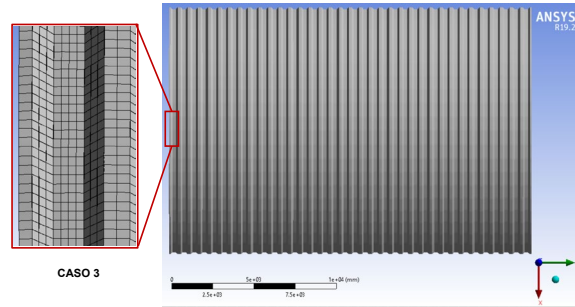


Figura 154. Zona crítica de pandeo para el caso 17, donde se aprecian fallas por pandeo local.

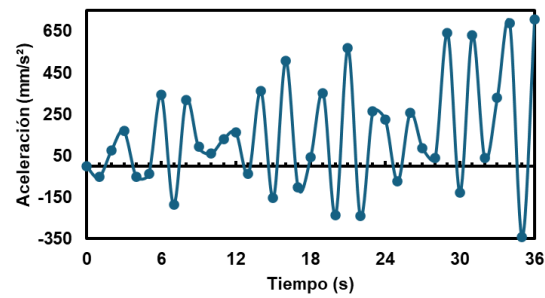


Figura 155. Caso 18, las oscilaciones presentaron fluctuaciones, produciendo una pérdida de estabilidad que indujo al colapso del arcoteco en 36 segundos.

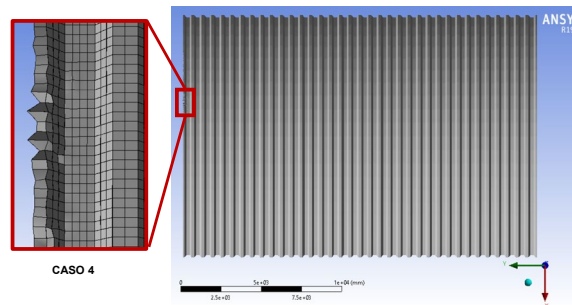


Figura 156. Zona crítica de pandeo para el caso 18, donde se aprecian fallas por pandeo local.

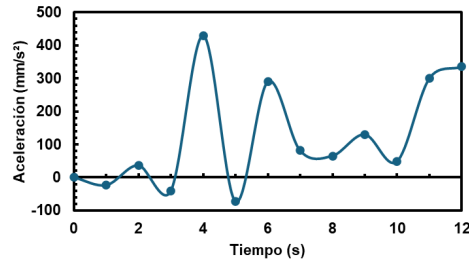


Figura 157. Caso 19, las oscilaciones presentaron fluctuaciones, produciendo una pérdida de estabilidad que indujo al colapso del arcotecho en 12 segundos.

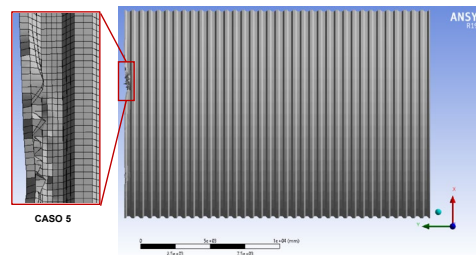


Figura 158. Zona crítica de pandeo para el caso 19, donde se aprecian fallas por pandeo local.

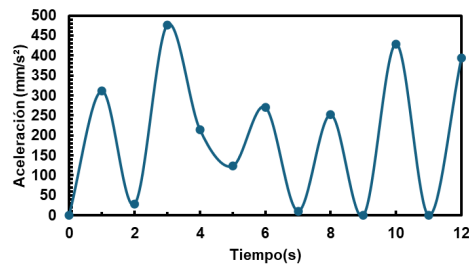


Figura 159. Caso 20, las oscilaciones presentaron fluctuaciones, produciendo una pérdida de estabilidad que indujo al colapso del arcotecho en el segundo 12.

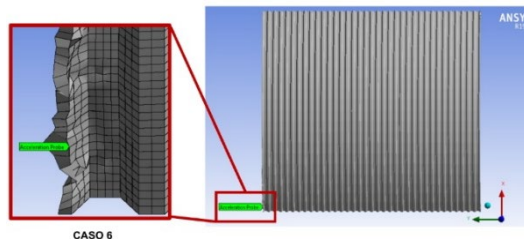


Figura 160. Zona crítica de pandeo para el caso 20, donde se aprecian fallas por pandeo local.

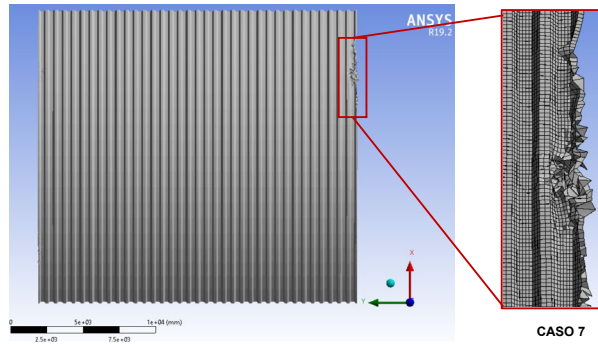


Figura 161. Zona crítica de pandeo para el caso 21, donde se aprecian fallas por pandeo local.

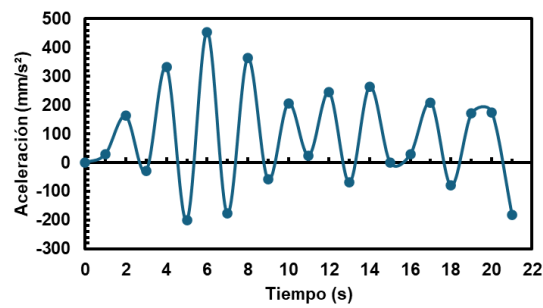


Figura 162. Caso 22, las oscilaciones presentaron fluctuaciones, produciendo una pérdida de estabilidad que indujo al colapso del arcotecho en el segundo 22.

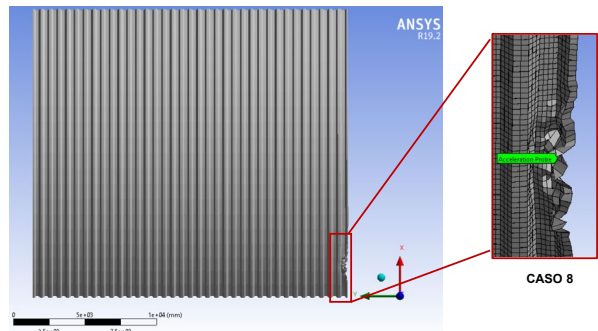


Figura 163. Zona crítica de pandeo para el caso 22, donde se aprecian fallas por pandeo local.

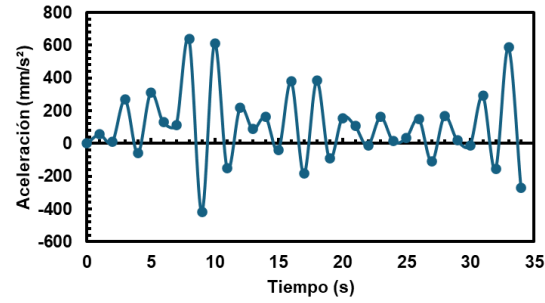


Figura 164. Caso 23, las oscilaciones presentaron fluctuaciones, produciendo una pérdida de estabilidad que indujo al colapso del arcoteco en el segundo 35.

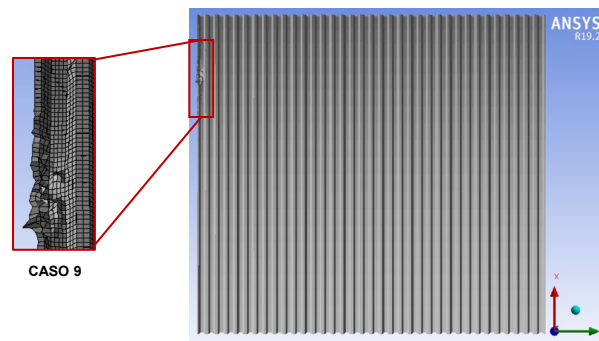


Figura 165. Zona crítica de pandeo para el caso 23, donde se aprecian fallas por pandeo local.

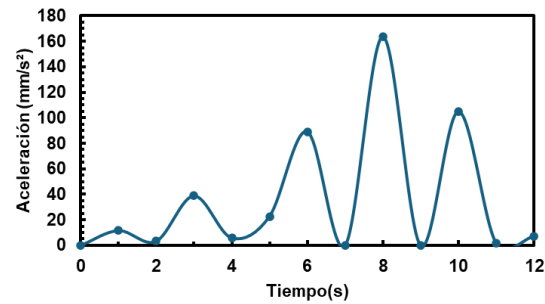


Figura 166. Caso 24, las oscilaciones presentaron fluctuaciones, produciendo una pérdida de estabilidad que indujo al colapso del arcoteco en el segundo 12.

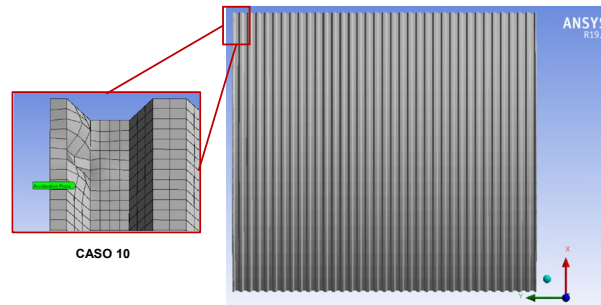


Figura 167. Zona crítica de pandeo para el caso 24, donde se aprecian fallas por pandeo local.

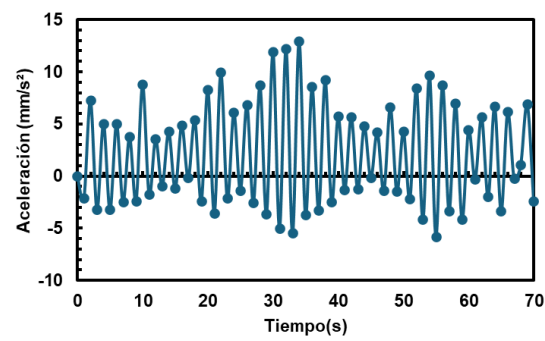


Figura 168. Caso 25, las oscilaciones presentaron fluctuaciones, produciendo una pérdida de estabilidad que indujo al colapso del arcotecho en el segundo 70.

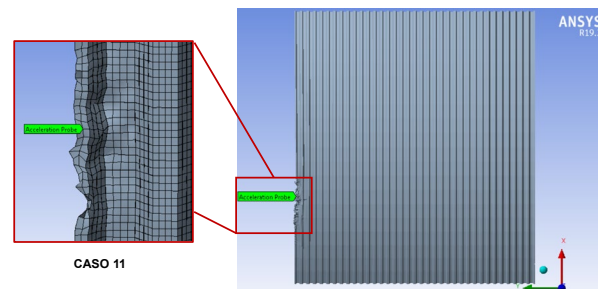


Figura 169. Zona crítica de pandeo para el caso 25, donde se aprecian fallas por pandeo local.

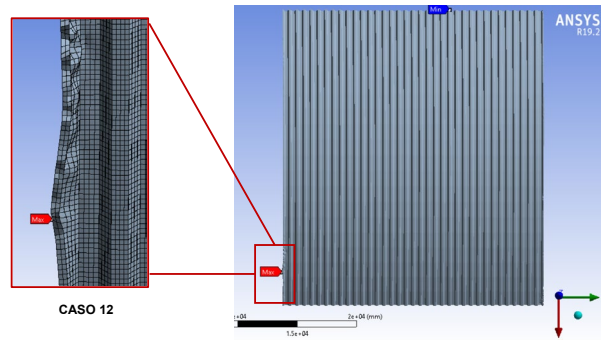


Figura 170. Zona crítica de pandeo para el caso 26, donde se aprecian fallas por pandeo local.

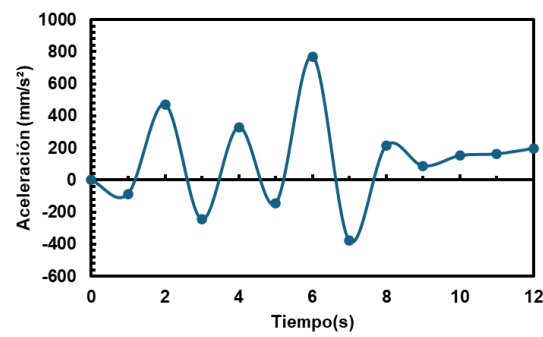


Figura 171. Caso 27, las oscilaciones presentaron fluctuaciones, produciendo una pérdida de estabilidad que indujo al colapso del arcotecho en el segundo 12.

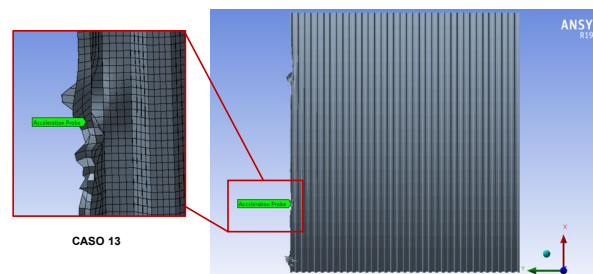


Figura 172. Zona crítica de pandeo para el caso 27, donde se aprecian fallas por pandeo local.

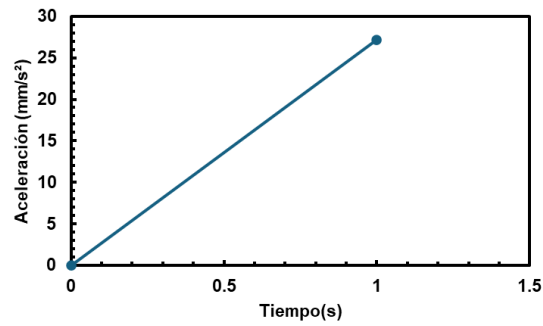


Figura 173. Caso 28, las oscilaciones presentaron fluctuaciones, produciendo una pérdida de estabilidad que indujo al colapso del arcotecho en el segundo 1.

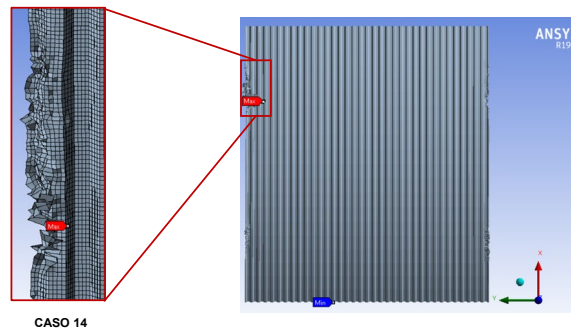


Figura 174. Zona crítica de pandeo para el caso 28, donde se aprecian fallas por pandeo local.

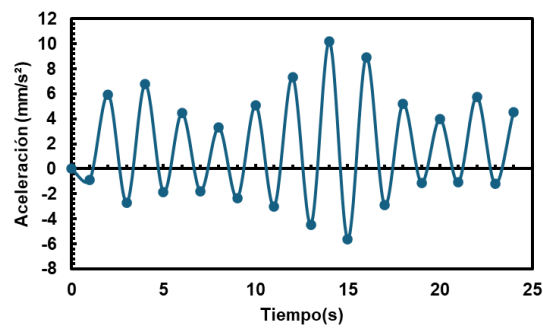


Figura 175. Caso 29, las oscilaciones presentaron fluctuaciones, produciendo una pérdida de estabilidad que indujo al colapso del arcotecho en el segundo 24.

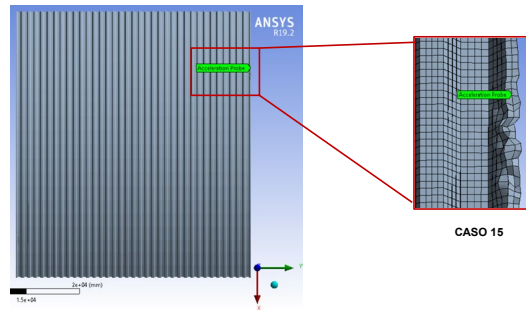


Figura 176. Zona crítica de pandeo para el caso 29, donde se aprecian fallas por pandeo local.

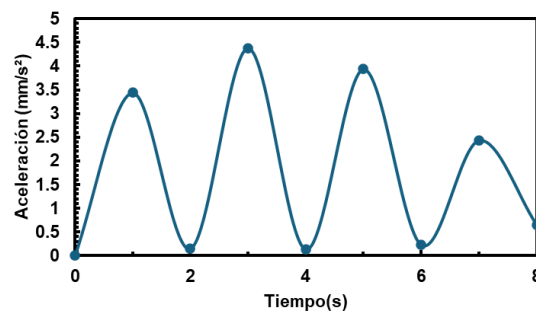


Figura 177. Caso 30, las oscilaciones presentaron fluctuaciones, produciendo una pérdida de estabilidad que indujo al colapso del arcotecho en el segundo 8.

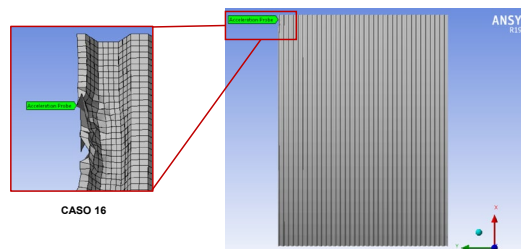


Figura 178. Zona crítica de pandeo para el caso 30, donde se aprecian fallas por pandeo local.

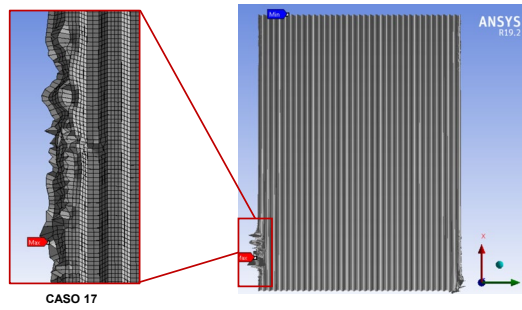


Figura 179. Zona crítica de pandeo para el caso 31, donde se aprecian fallas por pandeo local.

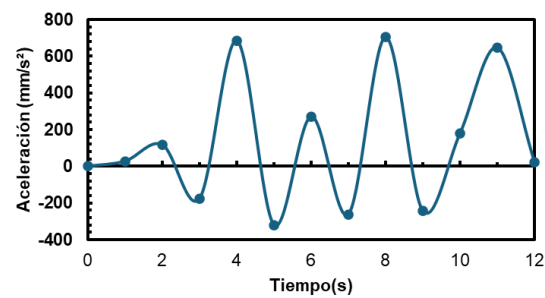


Figura 180. Caso 32, las oscilaciones presentaron fluctuaciones, produciendo una pérdida de estabilidad que indujo al colapso del arcotecho en el segundo 12.

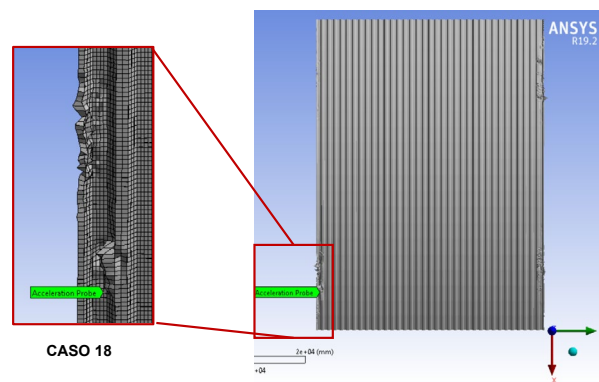


Figura 181. Zona crítica de pandeo para el caso 32, donde se aprecian fallas por pandeo local.

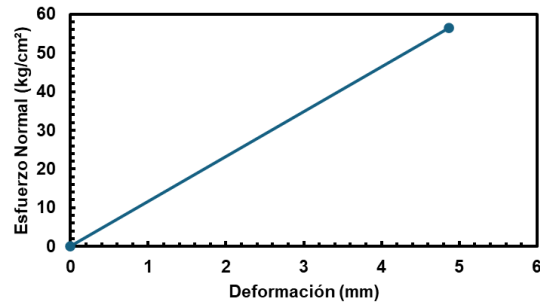


Figura 182. Caso 33, las oscilaciones presentaron fluctuaciones, produciendo una pérdida de estabilidad que indujo al colapso del arcotecho en el segundo 1.

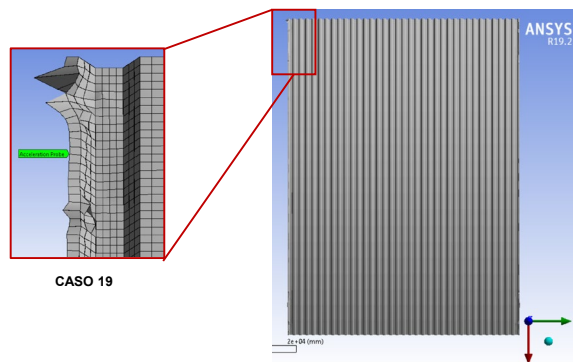


Figura 183. Zona crítica de pandeo para el caso 33, donde se aprecian fallas por pandeo local.

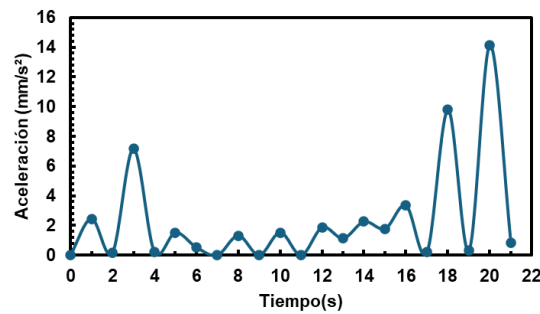


Figura 184. Caso 34, las oscilaciones presentaron fluctuaciones, produciendo una pérdida de estabilidad que indujo al colapso del arcotecho en el segundo 21.

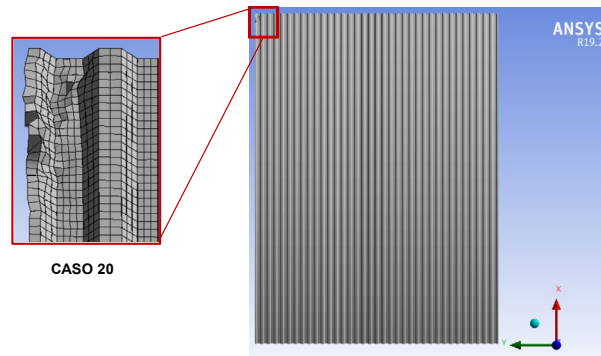


Figura 185. Zona crítica de pandeo para el caso 34, donde se aprecian fallas por pandeo local.

Nota: Para los casos de carga 21, 26, 31. La inestabilidad y el colapso se presentaron antes de que los esfuerzos y deformaciones fueran estimadas por el programa de análisis, debido a que dichos modelos divergieron por pérdida de equilibrio o mecanismo de los arcotechos. Por lo que sólo se mostraron los efectos críticos por pandeo en la lámina.