



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

**CÁLCULO DE LA CARGA ÚLTIMA DE UNA
ESTRUCTURA PLANA DE BARRAS ESBELTAS
FRENTE A COLAPSO PLÁSTICO O POR
PÉRDIDA DE ESTABILIDAD**

Autor:

Rodríguez Carbajo, Álvaro

Tutor:

Cacho Pérez, Mariano
Construcciones Arquitectónicas, IT
y MMC y Teoría de Estructuras

Valladolid, Julio de 2025

Resumen

A lo largo de este trabajo de fin de grado se procede a exponer el concepto de carga última y cómo obtener su factor de carga mediante simulaciones realizadas con el software de cálculo de estructuras SAP200.

Se trata de un método que combina el análisis de fallo de una estructura plana de barras esbeltas frente a colapso plástico o por pérdida de estabilidad, dos casos que se estudian en la asignatura Estructuras y construcciones Industriales del grado de Ingeniería Mecánica tanto de forma teórica como mediante simulaciones.

El fin de este trabajo no es otro que profundizar en el concepto de carga última y cómo se comporta una estructura hasta que se produce el fallo.

Palabras Clave

Pandeo, colapso, carga última, análisis, SAP2000

Abstract

Throughout this final degree thesis, the concept of ultimate load and how to obtain its load factor by means of simulations performed with the SAP200 structure calculation software are presented.

This is a method that combines the failure analysis of a slender bar flat structure against plastic collapse or loss of stability, two cases that are studied in the course Structures and Industrial Constructions of the Mechanical Engineering degree both theoretically and by means of simulations.

The purpose of this work is none other than to deepen in the concept of ultimate load and how a structure behaves until failure occurs.

Key Words

Buckling, collapse, ultimate load, analysis, SAP2000

INDICE DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	17
1.1	MOTIVACIÓN	17
1.2	OBJETIVO.....	17
1.3	ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO	18
2	ESTADO DEL ARTE	21
3	CONCEPTOS Y METODOLOGÍA	25
3.1	ANÁLISIS POR CURVAS DESPLAZAMIENTO-CARGA	25
3.2	OTROS MÉTODOS PARA OBTENER LA CARGA ÚLTIMA.....	26
3.3	COMPARACIÓN DE MÉTODOS.....	27
3.4	ESCENARIOS DE FALLO A ESTUDIAR.....	28
3.4.1	FALLO POR COLAPSO PLÁSTICO EN ESTRUCTURAS	28
3.4.2	FALLO POR PÉRDIDA DE ESTABILIDAD EN ESTRUCTURAS.....	30
4	HERRAMIENTA DE CÁLCULO EMPLEADA: SAP2000	39
4.1	PROCEDIMIENTO SEGUIDO PARA LA SIMULACIÓN	39
4.1.1	Modelado de la Estructura.....	39
4.1.2	Asignación de Cargas Estáticas.....	45
4.1.3	Aplicación de las cargas.....	49
4.1.4	Hipótesis del Modelo.....	50
4.1.5	Análisis del colapso plástico	53
4.1.6	Análisis de Pandeo	59
4.1.7	Intersección de curvas	61
4.1.8	Determinación de Cargas según CTE	62
5	RESULTADOS	79
5.1	CASO I: PÓRTICO RECTO	80
5.1.1	Caso I: IPE300	81
5.1.2	Caso I: IPE300+200.....	84
5.1.3	Caso I IPE300+400.....	86
5.2	CASO II: PÓRTICO A DOS AGUAS	89
5.2.1	Caso II: IPE300	91
5.2.2	Caso II IPE300+200.....	93
5.2.3	Caso II IPE300+400	96
5.3	CASO III: PÓRTICO A DOS AGUAS CON CARGAS SEGÚN CTE	99
5.3.1	Caso III: IPE300	101
5.3.2	Caso III: IPE300+200.....	103
5.3.3	Caso III: IPE300+400	106
5.3.4	Caso III: IPE 300+400 BIAPOYADO.....	109
5.3.5	Caso III: IPE 300+400 ACERO S355	111
5.4	CASO IV: UNIÓN TRIPLE DE PÓRTICOS A DOS AGUAS CON CARGAS SEGÚN CTE	114

5.4.1	Caso IV: IPE300 + 400 S275.....	115
5.4.2	Caso IV: IPE300 + 400 S355.....	118
6	CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	123
7	PRESUPUESTO	127
7.1	INTRODUCCIÓN.....	127
7.2	COSTES DIRECTOS	127
7.2.1	Costes directos - mano de obra.....	127
7.2.2	Costes directos – material amortizable.....	128
7.2.3	Costes directos – material no amortizable	129
7.2.4	Costes directos totales.....	129
7.3	COSTES INDIRECTOS.....	129
7.4	COSTES TOTALES	130
8	BIBLIOGRAFÍA	133
ANEXO A	137
ANEXO B	139
ANEXO C	141
ANEXO D	143

INDICE DE FIGURAS

Figura 4.1. Información de la rejilla	40
Figura 4.2. Definición del material	40
Figura 4.3. Menú de secciones	41
Figura 4.4. Menú de definición de la sección.....	41
Figura 4.5. Tabla de propiedades	42
Figura 4.6. Menú de propiedades de la barra a definir	43
Figura 4.7. Asignación de condiciones de contorno	43
Figura 4.8. Apoyo Fijo.....	44
Figura 4.9. Apoyo Móvil.....	44
Figura 4.10. Empotramiento.....	44
Figura 4.11. Nudo Rígido	44
Figura 4.12. Especificaciones barra AB	45
Figura 4.13. Propiedades de localización de la barra AB	45
Figura 4.14. Menú de patrones de carga	46
Figura 4.15. Menú de casos de carga	46
Figura 4.16. Menú de combinaciones de carga para una carga Estática Lineal	47
Figura 4.17. Menú de combinaciones de carga para los diferentes tipos de carga	47
Figura 4.18. Menú de combinaciones de carga para una carga Estática no Lineal	48
Figura 4.19. Menú de definición de combinaciones de carga	48
Figura 4.20. Definición de la combinación de cargas.....	49
Figura 4.21. Asignación de desplazamientos.....	49
Figura 4.22. Asignación de cargas	50
Figura 4.23. Modelo con cargas unitarias	50
Figura 4.24. Propiedades del material	51
Figura 4.25. Parámetros de rigidez de la barra.....	52
Figura 4.26. Opciones del análisis	52
Figura 4.27. Opciones de mallado	53
Figura 4.28. Definición de la rótula plástica.....	54
Figura 4.29. Asignación de las rótulas plásticas	55
Figura 4.30. Configuración del análisis con desplazamiento controlado	56
Figura 4.31. Salvado de resultados	57
Figura 4.32. Configuración de la función de desplazamiento	57
Figura 4.33. Gráfica Desplazamiento en el punto C-Factor de carga	58
Figura 4.34. Resultado del análisis de Cálculo Plástico	59

Figura 4.35. Definición caso de carga de Pandeo	60
Figura 4.36. Menú de visualización de la deformada.....	61
Figura 4.37. Tabla de resultados del análisis.....	61
Figura 4.38. Gráfica de Intersección de curvas	62
Figura 4.39. Determinación del punto de intersección	62
Figura 4.40. Valor básico de la velocidad del viento.....	66
Figura 4.41. Tabla representativa de la Velocidad Básica del Viento (V _b) y Presión Dinámica (q _b) para Zonas de Viento Españolas (Anejo D, DB-SE-AE).....	70
Figura 5.1. Representación distribución de cargas Caso I	80
Figura 5.2. Representación 3D modelo Caso I.....	81
Figura 5.3. Representación modelo Caso I: IPE300	81
Figura 5.4. Gráfica de los resultados del análisis por colapso plástico	82
Figura 5.5. Gráfica de los resultados del análisis por pérdida de estabilidad	83
Figura 5.6. Gráfica del punto de intersección correspondiente al factor de carga última	83
Figura 5.7. Representación modelo Caso I: IPE300	84
Figura 5.8. Gráfica de los resultados del análisis por colapso plástico	85
Figura 5.9. Gráfica de los resultados del análisis por pérdida de estabilidad	85
Figura 5.10. Gráfica del punto de intersección correspondiente al factor de carga última	86
Figura 5.11. Representación modelo Caso I: IPE300+400.....	87
Figura 5.12. Gráfica de los resultados del análisis por colapso plástico	87
Figura 5.13. Gráfica de los resultados del análisis por pérdida de estabilidad	88
Figura 5.14. Gráfica del punto de intersección correspondiente al factor de carga última	89
Figura 5.15. Representación distribución de cargas Caso II	90
Figura 5.16. Representación 3D modelo Caso II	90
Figura 5.17. Representación modelo Caso II: IPE300	91
Figura 5.18. Gráfica de los resultados del análisis por colapso plástico	91
Figura 5.19. Gráfica de los resultados del análisis por pérdida de estabilidad	92
Figura 5.20. Gráfica del punto de intersección correspondiente al factor de carga última	93
Figura 5.21. Representación modelo Caso II: IPE300+200.....	93
Figura 5.22. Gráfica de los resultados del análisis por colapso plástico	94
Figura 5.23. Gráfica del punto de intersección correspondiente al factor de carga última	95
Figura 5.24. Gráfica del punto de intersección correspondiente al factor de carga última	95
Figura 5.25. Representación modelo Caso II: IPE300+400.....	96
Figura 5.26. Gráfica de los resultados del análisis por colapso plástico	97
Figura 5.27. Gráfica de los resultados del análisis por pérdida de estabilidad	98
Figura 5.28. Gráfica del punto de intersección correspondiente al factor de carga última	98
Figura 5.29. Representación distribución de cargas Caso III.....	100

Figura 5.30. Representación 3D modelo Caso III	100
Figura 5.31. Representación modelo Caso III: IPE300	101
Figura 5.32. Gráfica de los resultados del análisis por colapso plástico	101
Figura 5.33. Gráfica de los resultados del análisis por pérdida de estabilidad	102
Figura 5.34. Gráfica del punto de intersección correspondiente al factor de carga última	103
Figura 5.35. Representación modelo Caso III: IPE300+200	103
Figura 5.36. Gráfica de los resultados del análisis por colapso plástico	104
Figura 5.37. Gráfica de los resultados del análisis por pérdida de estabilidad	105
Figura 5.38. Gráfica del punto de intersección correspondiente al factor de carga última	105
Figura 5.39. Representación modelo Caso III: IPE300+400	106
Figura 5.40. Gráfica de los resultados del análisis por colapso plástico	107
Figura 5.41. Gráfica de los resultados del análisis por pérdida de estabilidad	107
Figura 5.42. Gráfica del punto de intersección correspondiente al factor de carga última	108
Figura 5.43. Representación modelo Caso III: IPE300+400 biapoyado	109
Figura 5.44. Gráfica de los resultados del análisis por colapso plástico	110
Figura 5.45. Gráfica de los resultados del análisis por pérdida de estabilidad	110
Figura 5.46. Gráfica del punto de intersección correspondiente al factor de carga última	111
Figura 5.47. Representación modelo Caso II: IPE300+400 acero S355	112
Figura 5.48. Gráfica de los resultados del análisis por colapso plástico	112
Figura 5.49. Gráfica de los resultados del análisis por pérdida de estabilidad	113
Figura 5.50. Gráfica del punto de intersección correspondiente al factor de carga última	114
Figura 5.51 Representación modelo Caso IV	115
Figura 5.52. Representación distribución de cargas Caso IV	115
Figura 5.53. Representación modelo Caso IV: IPE300+400 S275	115
Figura 5.54. Gráfica de los resultados del análisis por colapso plástico	116
Figura 5.55. Gráfica de los resultados del análisis por pérdida de estabilidad	117
Figura 5.56. Gráfica del punto de intersección correspondiente al factor de carga última	117
Figura 5.57. Representación modelo Caso IV: IPE300+400 S355	118
Figura 5.58. Gráfica de los resultados del análisis por colapso plástico	119
Figura 5.59. Gráfica de los resultados del análisis por pérdida de estabilidad	119
Figura 5.60. Gráfica del punto de intersección correspondiente al factor de carga última	120
Anexo A 1. Formación de las rótulas plásticas. Caso III: IPE300+400 Paso 1	137
Anexo A 2. Formación de las rótulas plásticas. Caso III: IPE300+400 Paso 2	137
Anexo A 3. Formación de las rótulas plásticas. Caso III: IPE300+400 Paso 3	138
Anexo A 4. Diagrama de momentos flectores Caso III: IPE300+400	138
Anexo B 1. Formación de las rótulas plásticas. Caso III: IPE300+400 BIAPOYADO Paso 1	139
Anexo B 2. Formación de las rótulas plásticas. Caso III: IPE300+400 BIAPOYADO Paso 2	139

Anexo B 3. Diagrama de momentos flectores Caso III: IPE300+400 BIAPOYADO	140
Anexo C 1. Formación de las rótulas plásticas. Caso IV: ACERO S275 Paso 1	141
Anexo C 2. Formación de las rótulas plásticas. Caso IV: ACERO S275 Paso 2	141
Anexo C 3. Formación de las rótulas plásticas. Caso IV: ACERO S275 Paso 3	141
Anexo C 4. Formación de las rótulas plásticas. Caso IV: ACERO S275 Paso 4	142
Anexo C 5. Diagrama de momentos flectores Caso IV: ACERO S275	142
Anexo D 1. Formación de las rótulas plásticas. Caso IV: ACERO S355 Paso 1	143
Anexo D 2. Formación de las rótulas plásticas. Caso IV: ACERO S355 Paso 2	143
Anexo D 3. Formación de las rótulas plásticas. Caso IV: ACERO S355 Paso 3	143
Anexo D 4. Formación de las rótulas plásticas. Caso IV: ACERO S355 Paso 4	144
Anexo D 5. Diagrama de momentos flectores Caso IV: ACERO S355	144

INDICE DE TABLAS

Tabla 5.1. Resultados análisis por colapso plástico	82
Tabla 5.2. Resultados análisis por pérdida de estabilidad.....	82
Tabla 5.3. Valores del punto de intersección	83
Tabla 5.4. Resultados análisis por colapso plástico	84
Tabla 5.5. Resultados análisis por pérdida de estabilidad.....	85
Tabla 5.6. Valores del punto de intersección	86
Tabla 5.7. Resultados análisis por colapso plástico	87
Tabla 5.8. Resultados análisis por pérdida de estabilidad.....	88
Tabla 5.9. Valores del punto de intersección	88
Tabla 5.10. Resultados análisis por colapso plástico.....	91
Tabla 5.11. Resultados análisis por pérdida de estabilidad	92
Tabla 5.12. Valores del punto de intersección	92
Tabla 5.13. Resultados análisis por colapso plástico.....	94
Tabla 5.14. Resultados análisis por pérdida de estabilidad	94
Tabla 5.15. Valores del punto de intersección	95
Tabla 5.16. Resultados análisis por colapso plástico.....	96
Tabla 5.17. Resultados análisis por pérdida de estabilidad	97
Tabla 5.18. Valores del punto de intersección	98
Tabla 5.19. Resultados análisis por colapso plástico.....	101
Tabla 5.20. Resultados análisis por pérdida de estabilidad	102
Tabla 5.21. Valores del punto de intersección	102
Tabla 5.22. Resultados análisis por colapso plástico.....	104
Tabla 5.23. Resultados análisis por pérdida de estabilidad	104
Tabla 5.24. Valores del punto de intersección	105
Tabla 5.25. Resultados análisis por colapso plástico.....	106
Tabla 5.26. Resultados análisis por pérdida de estabilidad	107
Tabla 5.27. Valores del punto de intersección	108
Tabla 5.28. Resultados de factor de carga última Caso III.....	108
Tabla 5.29. Resultados análisis por colapso plástico.....	109
Tabla 5.30. Resultados análisis por pérdida de estabilidad	110
Tabla 5.31. Valores del punto de intersección	111
Tabla 5.32. Resultados análisis por colapso plástico.....	112
Tabla 5.33. Resultados análisis por pérdida de estabilidad	113
Tabla 5.34. Valores del punto de intersección	113
Tabla 5.35. Resultados análisis por colapso plástico.....	116

Tabla 5.36. Resultados análisis por pérdida de estabilidad	116
Tabla 5.37. Valores del punto de intersección.....	117
Tabla 5.38. Resultados análisis por colapso plástico.....	118
Tabla 5.39. Resultados análisis por pérdida de estabilidad	119
Tabla 5.40. Valores del punto de intersección.....	120
Tabla 7.1. Cálculo anual de los días y horas efectivas de trabajo	128
Tabla 7.2. Coste total del personal	128
Tabla 7.3. Distribución temporal del trabajo	128
Tabla 7.4. Costes directos material amortizable.....	129
Tabla 7.5. Costes directos - material no amortizable.....	129
Tabla 7.6. Costes directos totales	129
Tabla 7.7. Costes indirectos totales.....	129
Tabla 7.8. Costes totales del proyecto	130

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 3.1. Determinación del momento plástico	28
Ecuación 3.2. Determinación de la carga crítica de pandeo	30
Ecuación 4.1. Cálculo de la presión estática.....	64
Ecuación 4.2. Cálculo de la presión dinámica básica del viento	66
Ecuación 4.3. Cálculo del coeficiente de exposición	67
Ecuación 4.4. Cálculo de presión neta total	71
Ecuación 4.5. Cálculo de la carga de nieve en una cubierta.....	71
Ecuación 4.6. Cálculo del factor de exposición para altitudes mayores o iguales a 500m	75
Ecuación 4.7. Cálculo de la carga de nieve	75
Ecuación 7.1. Cálculo de costes totales	127

CAPÍTULO 1: *INTRODUCCIÓN*

1 INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN

El análisis de la capacidad de carga de estructuras planas de barras esbeltas es un aspecto fundamental en la ingeniería estructural, ya que permite determinar el comportamiento de una estructura ante cargas extremas y prevenir fallos catastróficos. En particular, dos mecanismos principales pueden llevar al colapso de estas estructuras: el colapso plástico y la pérdida de estabilidad.

El colapso plástico ocurre cuando una estructura alcanza su capacidad de deformación plástica, generando mecanismos de colapso debido a la formación de rótulas plásticas en puntos críticos. Por otro lado, la pérdida de estabilidad, también conocida como pandeo, se produce cuando una barra o sistema estructural experimenta inestabilidad elástica, llevando a un colapso sin necesidad de alcanzar el límite de fluencia del material.

El presente trabajo de fin de grado tiene como objetivo principal el cálculo de la carga última de una estructura plana de barras esbeltas, evaluando su comportamiento ante colapso plástico o por pérdida de estabilidad. Para ello, se emplearán métodos numéricos, considerando las ecuaciones fundamentales de equilibrio, compatibilidad y constitutivas del material. En particular, se analizarán casos de pórticos rectos en 2D utilizando el software de análisis estructural SAP2000.

La metodología que seguir incluye el estudio de modelos teóricos de colapso, el análisis de estructuras mediante el método de los estados límite y la implementación de simulaciones computacionales con SAP2000. Se evaluarán distintos casos de carga y configuraciones estructurales, permitiendo la comparación de los resultados obtenidos con datos experimentales y referencias bibliográficas. Cabe destacar que el análisis se basará en los datos obtenidos de las simulaciones sin entrar en desarrollos analíticos complejos.

Este estudio proporcionará una mejor comprensión de los mecanismos de fallo en estructuras de barras esbeltas y contribuirá al diseño de sistemas estructurales más eficientes y seguras. Finalmente, se discutirán las implicaciones de los resultados obtenidos y posibles extensiones del análisis en futuras investigaciones.

1.2 OBJETIVO

Se trata de realizar un análisis en estructuras simples planas (2D) en el que se pueda ver reflejado el concepto de carga última. Este estudio se va a realizar mediante un software de simulación para estructuras llamado SAP2000.

El objetivo principal del trabajo busca someter diversos pórticos con diferentes geometrías de estructura, condiciones de contorno, perfiles, distribuciones de carga, y materiales a un análisis de estabilidad en el cual se va a estudiar su fallo por colapso plástico y por pérdida de estabilidad de manera simultánea para estudiar así su factor de carga última y cómo reacciona este frente a la modificación de las

variables antes mencionadas. De esta forma se busca encontrar una configuración fiable para un caso dado que simule una situación realista de una estructura que consiste en tres pórticos situados en serie con apoyos empotrados.

Se trata de un concepto teórico interesante que complementa en su estudio dos de los posibles casos de inestabilidad en la estructura que se estudian actualmente en la asignatura Estructuras y Construcciones Industriales del grado de Ingeniería Mecánica en la Universidad de Valladolid. Estos casos son pérdida de estabilidad por pandeo o por formación de un mecanismo de colapso.

De esta forma, como objetivo secundario existe también la intención de que este análisis facilita la comprensión de estos conceptos y pudiera llegar a ser considerado para la posible implementación de un análisis similar en alguna de las sesiones de prácticas de la asignatura, dado que puede ayudar al alumno a comprender mejor estos fenómenos de inestabilidad.

1.3 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

El documento va a comenzar con el capítulo dos, el cual trata los antecedentes y/o estado del arte, en este se busca introducir la información de interés que existe actualmente sobre el tema del trabajo.

Tras ello se van a exponer en el capítulo tres se va a introducir la metodología seguida para el análisis del trabajo y los escenarios de fallo que se van a estudiar, siendo estos el fallo por colapso plástico en estructuras y el fallo por pérdida de estabilidad y, a continuación, en el capítulo cuatro se va a tratar el cómo se van a estudiar estos dos escenarios con la herramienta SAP2000.

Una vez se ha determinado el qué se va a estudiar y el cómo se va a hacer, se van a exponer los resultados obtenidos del estudio en el capítulo cinco, seguido las conclusiones que se han obtenido del estudio y las posibles líneas futuras que se pueden abordar en continuación del trabajo realizado.

Por último, se expone el estudio económico del trabajo realizado llegando a un valor final del mismo.

En el Anexo se encuentra información adicional de interés acerca del trabajo.

CAPÍTULO 2: *ESTADO DEL ARTE*

2 ESTADO DEL ARTE

En los análisis no lineales de estructuras orientados a determinar la carga última, la definición precisa de las rótulas plásticas ha sido identificada como un factor clave. Estas rótulas permiten modelar concentraciones localizadas de deformación inelástica y capturar los mecanismos reales de disipación de energía en condiciones cercanas al colapso. Una caracterización inadecuada puede conducir a estimaciones erróneas tanto de la capacidad última como de los modos de fallo.

En el estudio de Shatarat (2012), se modelaron puentes en SAP2000 empleando rótulas automáticas y rótulas definidas manualmente. El análisis reveló que las propiedades predeterminadas del programa, al no considerar adecuadamente la ductilidad estructural ni los mecanismos de redistribución interna, tienden a generar desplazamientos máximos y factores de pandeo que no reflejan el comportamiento real de la estructura. Esta discrepancia fue más evidente en estructuras existentes sin refuerzo sísmico o diseñadas según normativas antiguas. En consecuencia, se recomendó definir manualmente las rótulas plásticas utilizando parámetros extraídos de documentos técnicos como el *Seismic Retrofit Manual* de la FHWA, lo que permitió capturar de forma más fidedigna la evolución del daño y la degradación de rigidez [1].

De forma análoga, Inel y Özmen (2006) investigaron el impacto de las rótulas plásticas en edificios de hormigón armado. Su estudio concluyó que las rótulas automáticas tienden a sobreestimar la capacidad resistente y subestimar las deformaciones acumuladas, lo cual conlleva una evaluación poco conservadora del riesgo de colapso. Se observó también que las curvas momento–rotación por defecto ignoran la influencia de la longitud de empalme, el confinamiento del hormigón y la relación entre armaduras longitudinales y transversales. Por ello, los autores recomendaron ajustar manualmente los parámetros de plasticidad conforme a guías como FEMA 356 o ATC-40, mejorando así la confiabilidad de los modelos ante eventos sísmicos o condiciones extremas [2].

Ambos trabajos coinciden en que los repuntes no físicos observados en factores críticos de pandeo (por ejemplo, aumentos súbitos en la capacidad sin justificación estructural) pueden ser corregidos mediante una definición rigurosa y manual de las rótulas plásticas. Este enfoque mejora la coherencia de la matriz de rigidez del sistema, minimiza discontinuidades numéricas y refleja con mayor realismo los fenómenos no lineales localizados, como la formación de rótulas múltiples o la redistribución de esfuerzos tras la plastificación parcial de secciones [1,2].

Actualmente, la carga última se define como la carga máxima que una estructura o componente puede soportar antes de entrar en una etapa de fallo o colapso,

rebasando el límite del comportamiento elástico y entrando en la zona de deformaciones permanentes [3]. Este parámetro es crucial en el diseño por capacidad y en la evaluación de seguridad estructural, ya que marca el umbral entre desempeño funcional y colapso total.

Existen varios métodos para evaluar la carga última de una estructura, cada uno con diferentes niveles de precisión y requerimientos computacionales. Entre los métodos más utilizados se encuentran:

- **Modelos basados en elementos finitos no lineales:** Estos permiten representar con detalle la respuesta estructural incluyendo la formación de rótulas plásticas y la degradación progresiva de la rigidez, así como efectos geométricos no lineales como el pandeo. Este método es especialmente útil para analizar estructuras de acero sometidas a cargas extremas, pues puede capturar interacciones complejas entre la deformación y la resistencia del material [4].
- **Método incremental en dos pasos:** Este enfoque combina una primera fase de análisis estático no lineal para determinar la rigidez residual plástica, seguida de una simulación dinámica que evalúa la respuesta ante cargas variables o impactos, tales como oleaje o ráfagas de viento en estructuras marítimas. Este método facilita la consideración de efectos dinámicos y de amortiguamiento, y proporciona una estimación más realista de la carga última en condiciones variables [5].
- **Teorías clásicas de resistencia y estabilidad estructural:** Basadas en criterios analíticos o semi-analíticos, estas teorías emplean principios como el teorema del colapso límite o los criterios de fluencia para obtener estimaciones rápidas de la carga última en estructuras con geometrías y condiciones ideales. Aunque menos precisas para casos complejos, son útiles para verificaciones preliminares y validación de resultados numéricos.

Cada uno de estos métodos presenta ventajas y limitaciones que dependen del tipo de estructura y la naturaleza de la carga. En este trabajo se adopta un análisis no lineal incremental con evaluación de rigidez residual para obtener una estimación fiable de la carga última.

CAPÍTULO 3: *CONCEPTOS Y METODOLOGÍA*

3 CONCEPTOS Y METODOLOGÍA

La carga última de una estructura se define como la carga máxima que puede soportar antes de experimentar un fallo irreversible. [6] Dependiendo del tipo de estructura y los mecanismos de fallo involucrados, existen diversas maneras de calcular la carga última. En este trabajo, se utilizará el método de intersección de curvas desplazamiento-factor de carga, que evalúa los dos mecanismos principales de fallo: colapso plástico y pérdida de estabilidad (pandeo). La evaluación precisa de esta carga es crucial para el diseño seguro de cualquier estructura, y se puede obtener mediante diversas metodologías de análisis.

3.1 ANÁLISIS POR CURVAS DESPLAZAMIENTO-CARGA

El método principal utilizado en este trabajo para obtener la carga última es el análisis mediante curvas desplazamiento-factor de carga de colapso, que se obtiene mediante simulaciones numéricas. Este enfoque permite observar cómo varía el factor de carga de colapso en función del desplazamiento en dos situaciones clave: el colapso plástico y el pandeo. La intersección de las dos curvas de desplazamiento-carga (una correspondiente al análisis por mecanismo de colapso y otra al análisis por pandeo) define el factor de carga última de la estructura. En algunos puntos del documento se hará referencia a esta curva como carga-desplazamiento.

Curva de colapso plástico: En este análisis, la carga de colapso se calcula en los puntos donde se forman rótulas plásticas en las zonas críticas de la estructura. A medida que aumenta el desplazamiento, la rigidez de la estructura se reduce y, eventualmente, se estabiliza, representando el colapso plástico de la estructura.

Curva de pandeo: Este análisis tiene en cuenta la inestabilidad de la estructura. A medida que aumenta el desplazamiento, la carga crítica de pandeo disminuye debido a la pérdida de estabilidad estructural.

El factor de carga última se obtiene al encontrar el punto de intersección de ambas curvas, representando el valor máximo de carga que la estructura puede soportar antes de llegar al fallo.

Determinar gráficamente la carga de colapso mediante la intersección de las curvas desplazamiento-factor de carga correspondientes al fallo por pandeo y al mecanismo de colapso puede ser útil en ciertos escenarios, aunque su validez depende del comportamiento estructural y del tipo de análisis que estemos llevando a cabo.

Este método resulta útil en ciertos escenarios:

Cuando existe interacción entre pandeo y plastificación:

Si la estructura experimenta fluencia antes de alcanzar su carga crítica de pandeo, la interacción entre estos dos fenómenos puede manifestarse en una curva carga-desplazamiento donde se cruzan ambos modos de fallo.

Este enfoque es pertinente en estructuras esbeltas que no son completamente elásticas, donde la plastificación influye en su estabilidad.

Si la estructura presenta un comportamiento no lineal:

En estructuras donde la no linealidad geométrica y la no linealidad del material son factores importantes, la carga última puede estar condicionada por la interacción de ambos fenómenos.

Cuando empleamos un modelo de simulación que considera ambos modos de fallo:

Si el software que utilizamos nos permite representar ambos mecanismos de manera simultánea, el punto de intersección puede indicarnos la transición entre la estabilidad y la plastificación.

Los escenarios en los que no resulta útil este método son:

Si el pandeo es puramente elástico y ocurre antes de cualquier plastificación:

En este caso, la estructura fallará por inestabilidad antes de que se desarrolle un mecanismo plástico, por lo que la intersección entre las curvas carecería de significado físico.

Si el mecanismo de colapso es puramente plástico y ocurre después de la carga crítica de pandeo:

Si nuestra la es muy resistente al pandeo, la carga crítica perderá relevancia y el colapso estará principalmente determinado por la plastificación.

3.2 OTROS MÉTODOS PARA OBTENER LA CARGA ÚLTIMA

Aunque el análisis por curvas desplazamiento-carga es el método principal utilizado en este trabajo, existen otros enfoques, junto a los comentados en el estado del arte, que también pueden ser aplicados para obtener la carga última de una estructura como pueden ser:

Método de los Estados Límite: Este método es ampliamente utilizado en el diseño estructural, especialmente para estructuras de acero y concreto armado. El estado límite último se define como el nivel de carga en el que la estructura pierde su capacidad de soportar cargas adicionales sin sufrir daños irreversibles. Este método se basa en el análisis de la resistencia y rigidez de la estructura bajo cargas extremas [7].

Análisis de Equilibrio Límite (Método de Plasticidad): Este método se basa en la teoría de la plasticidad, la cual establece que una estructura colapsa cuando se alcanzan ciertos puntos de deformación plástica en las zonas críticas. El análisis de equilibrio límite se utiliza para calcular la carga última al determinar los esfuerzos máximos que pueden desarrollarse sin que ocurra el colapso. A menudo, se emplean las rótulas plásticas para predecir el mecanismo de fallo de la estructura [8].

Teoría del Pandeo (Método de Euler): La teoría de Euler proporciona una fórmula para calcular la carga crítica de pandeo de una barra esbelta bajo compresión. Esta carga crítica es la carga máxima a la que una barra puede resistir antes de experimentar inestabilidad por flexión. Aunque este método se aplica generalmente a elementos individuales y no a sistemas completos como pórticos, es útil cuando se analiza el comportamiento de miembros esbeltos que están sujetos a compresión axial [9].

Método de la Carga de Pandeo No Lineal: Este enfoque tiene en cuenta la no linealidad del comportamiento estructural cuando la estructura está cerca de su punto de pandeo. A diferencia del análisis de pandeo elástico, en este método se considera que las deformaciones plásticas comienzan a formarse antes de que se alcance la carga de pandeo, lo que resulta en una carga crítica más baja [10].

Método de Simulación Computacional: Herramientas de análisis estructural como SAP2000 permiten realizar simulaciones numéricas detalladas de los mecanismos de colapso plástico y pandeo. A través de modelos estructurales, se pueden obtener las curvas desplazamiento-carga para cada uno de estos mecanismos y encontrar la carga última de la estructura mediante un análisis preciso de las condiciones de carga [11].

3.3 COMPARACIÓN DE MÉTODOS

El análisis por curvas desplazamiento-carga tiene la ventaja de combinar la consideración de los dos principales modos de fallo (colapso plástico y pandeo) de manera directa, proporcionando una visión completa del comportamiento estructural ante cargas extremas. Sin embargo, los métodos tradicionales, como el análisis de equilibrio límite y la teoría del pandeo, siguen siendo herramientas valiosas para evaluar la carga última en situaciones específicas o cuando se tiene un conocimiento limitado de la estructura completa.

En este trabajo, se utilizará el análisis por curvas desplazamiento-carga, debido a su capacidad para capturar los efectos de ambos modos de fallo y obtener una estimación precisa de la carga última de los pórticos rectos en 2D mediante simulaciones en SAP2000.

3.4 ESCENARIOS DE FALLO A ESTUDIAR

Entendemos por inestabilidad mecánica el fenómeno de pérdida de rigidez que ocurre de manera súbita en determinadas configuraciones resistentes de geometría y cargas, cuando estas últimas alcanzan un cierto valor crítico. Según lo anterior, es claro que el sistema deja de comportarse linealmente cuando hay inestabilidad, ya que una pérdida de rigidez que ocurre “de manera súbita” es incompatible con la proporcionalidad entre cargas y desplazamientos. No obstante, el sistema se comporta usualmente de forma lineal hasta el momento de aparecer la inestabilidad (al menos en los modelos teóricos ideales), y es correcto realizar un análisis lineal de pequeños desplazamientos si la inestabilidad aún no ha aparecido. Adicionalmente, la aplicación del modelo lineal de pequeños desplazamientos en una situación de inestabilidad suele producir predicciones extrañas que, si bien no son realistas, sirven para identificar que dicho modelo ha dejado de ser válido. De hecho, el modo habitual de proceder para identificar el valor crítico de la carga será plantear el análisis lineal de pequeños desplazamientos, y observar si para un valor concreto de la carga el modelo predice desplazamientos arbitrariamente grandes, u otro síntoma de que el modelo no es aplicable.

3.4.1 FALLO POR COLAPSO PLÁSTICO EN ESTRUCTURAS

El colapso plástico ocurre cuando una estructura alcanza su capacidad máxima de deformación plástica, generando un mecanismo de colapso debido a la formación de rótulas plásticas. En este estado, la estructura pierde su capacidad de carga y se vuelve inestable [8].

Dicho colapso plástico se basa en la teoría de la plasticidad estructural, que establece que un material puede experimentar deformaciones inelásticas significativas antes de alcanzar la rotura. En estructuras hiperestáticas, esta capacidad de redistribuir esfuerzos permite que el colapso ocurra en múltiples puntos, generando un mecanismo de colapso completo.

Las rótulas plásticas son secciones donde el momento flector alcanza la capacidad plástica del material. La estructura colapsa cuando se forman suficientes rótulas para convertirla en un mecanismo inestable. Según el teorema del colapso plástico, una estructura con n grados de hiperestaticidad necesita al menos $n+1$ rótulas plásticas para desarrollar un mecanismo de colapso completo [11].

Los pasos fundamentales en el análisis del colapso plástico son:

- Determinación de la capacidad plástica de los elementos mediante la ecuación:

$$M_p = f_y Z$$

Ecuación 3.1. Determinación del momento plástico

donde f_y es el límite elástico del material y Z el módulo plástico de la sección.

- Identificación de las secciones críticas donde es más probable la formación de rótulas.
- Desarrollo del mecanismo de colapso considerando la compatibilidad de desplazamientos.

Existen, además de los mecanismos de colapso completos, los mecanismos incompletos y supercompletos.

Un mecanismo de colapso incompleto ocurre cuando se forman menos rótulas plásticas de las necesarias para convertir la estructura en un mecanismo, impidiendo una redistribución total de esfuerzos. Esto puede generar concentraciones de esfuerzos en zonas aún elásticas, comprometiendo la ductilidad global. Además, indica un uso inefficiente de la capacidad resistente, lo que puede llevar a fallos prematuros si no se identifica adecuadamente en el diseño.

Un mecanismo de colapso supercompleto ocurre cuando se forman más rótulas plásticas de las necesarias para que la estructura se convierta en un mecanismo. En este caso, la estructura desarrolla una sobre determinación geométrica, lo que puede llevar a una mayor redistribución de esfuerzos y posiblemente a un colapso localizado antes de que se alcance la carga última global.

Estos mecanismos pueden darse en estructuras con conexiones parcialmente restringidas o con condiciones de soporte que permitan desplazamientos adicionales. La detección de mecanismos supercompletos es crucial en el diseño estructural, ya que pueden reducir la capacidad de carga efectiva de la estructura [11].

Existen distintos enfoques para analizar el colapso plástico en estructuras:

- **Método de las Rótulas Plásticas:** Se centra en identificar la secuencia de formación de rótulas y el mecanismo de colapso resultante.
- **Método de los Teoremas del Colapso:** Se basa en los teoremas de la plasticidad estructural:
- **Teorema del límite inferior:** Si una distribución de momentos es equilibrada y no supera la capacidad plástica, la estructura es segura.
- **Teorema del límite superior:** Si una distribución de momentos genera un mecanismo de colapso, la carga aplicada es una sobreestimación de la carga última.
- **Métodos Numéricos:** Simulaciones en software como SAP2000 pueden ser útiles para analizar la evolución del colapso plástico.

En los pórticos rectos en 2D, el análisis del colapso plástico se va a realizar identificando las secciones donde es más probable la formación de rótulas (NPR), generalmente en extremos de vigas y bases de columnas. Mediante SAP2000, se pueden obtener las curvas desplazamiento-carga y evaluar la progresión del colapso plástico, lo que permite determinar la carga última con cierta precisión.

3.4.2 FALLO POR PÉRDIDA DE ESTABILIDAD EN ESTRUCTURAS

La pérdida de estabilidad, comúnmente conocida como pandeo, es un fenómeno que se presenta cuando una estructura experimenta una deformación incontrolada debido a una carga crítica que provoca inestabilidad sin necesidad de que el material alcance su límite de fluencia. Este tipo de fallo se encuentra principalmente en estructuras esbeltas, como columnas y otras barras sujetas a compresión axial. La teoría del pandeo proporciona una base teórica para analizar cuándo y cómo ocurrirá esta pérdida de estabilidad en una estructura [9].

La pérdida de estabilidad no involucra la rotura del material, sino que se refiere a un cambio en el comportamiento estructural cuando la estructura se deforma de manera no lineal y alcanza un punto crítico. Este fenómeno es típicamente estudiado mediante la teoría de Euler para barras esbeltas y la teoría de Timoshenko para aquellas con efectos de corte y rotación de sección significativos. En ambos casos, el pandeo es más probable cuando las barras son delgadas y no tienen suficiente rigidez para resistir las cargas de compresión sin deformarse significativamente [10].

De acuerdo con la teoría de Euler, la carga crítica de pandeo es la carga a la cual una barra recta, bajo compresión axial, pierde su estabilidad. Esta carga crítica está determinada por varios factores, entre los que destacan el módulo de elasticidad del material (E), el momento de inercia (I) de la sección transversal de la barra, la longitud efectiva (L) y el coeficiente de longitud efectiva (K), que depende de las condiciones de apoyo de la barra. La ecuación básica para la carga crítica de pandeo es:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2}$$

Ecuación 3.2. Determinación de la carga crítica de pandeo

Donde:

P_{cr} es la carga crítica de pandeo.

E es el módulo de elasticidad del material.

I es el momento de inercia de la sección.

K es el coeficiente de longitud efectiva.

L es la longitud de la barra.

Esta ecuación se utiliza para barras con condiciones de soporte simples y proporciona una estimación de la carga a la cual la barra comenzará a pandeo. Sin embargo, para estructuras más complejas, se deben considerar otros factores, como el pandeo lateral-torsional y el pandeo inelástico, que no están cubiertos completamente por la teoría de Euler [12].

Algunos de los principales tipos de pandeo son:

Pandeo elástico: Este tipo de pandeo ocurre cuando la estructura experimenta un fallo de estabilidad antes de alcanzar el límite de fluencia del material. El comportamiento es completamente elástico, y la estructura regresa a su forma original si se elimina la carga. Es más común en estructuras con materiales altamente elásticos y de baja deformación plástica, como el acero y el concreto armado en condiciones controladas.

Pandeo inelástico: En este tipo de pandeo, el material comienza a experimentar deformaciones plásticas locales antes de que la estructura alcance el punto de inestabilidad. Este tipo de pandeo se observa con mayor frecuencia en materiales que no son tan elásticos, como el concreto en ciertas condiciones, o cuando las cargas exceden ciertos umbrales.

Pandeo lateral-torsional: Este fenómeno ocurre cuando un miembro estructural bajo flexión, como una viga, no solo se deforma lateralmente, sino que también gira alrededor de su eje longitudinal. Esto se debe a la interacción entre las fuerzas de flexión y los efectos de torsión, lo que provoca una pérdida de estabilidad tanto lateral como torsional [13].

Tradicionalmente, el estudio de la estabilidad se ha centrado en fenómenos como el pandeo de Euler, que predice la carga crítica a la cual una columna esbelta pierde su estabilidad y experimenta grandes deformaciones laterales. Sin embargo, la ingeniería moderna y la necesidad de optimizar diseños han llevado a explorar comportamientos más complejos, como el **pandeo por "snap-through"** [12], un tipo de inestabilidad no lineal que puede tener consecuencias críticas y repentinas en estructuras aparentemente robustas.

Este fenómeno es particularmente relevante en estructuras donde la geometría juega un papel dominante en la respuesta a la carga, como es el caso de los pórticos a dos aguas o arcos de poca flecha. A diferencia del pandeo clásico, el "snap-through" implica un cambio brusco y dinámico de la configuración de equilibrio, llevando a la estructura de una forma estable a otra, a menudo con grandes desplazamientos y una pérdida de capacidad portante en el proceso.

El pandeo por "snap-through" es un tipo de inestabilidad estructural no lineal caracterizado por un cambio repentino y rápido en la configuración de equilibrio de una estructura bajo carga. Este fenómeno ocurre cuando, al aumentar progresivamente la carga aplicada, la estructura alcanza un punto de inflexión (denominado punto límite o punto de bifurcación) a partir del cual ya no puede mantener su trayectoria de equilibrio actual. En lugar de ello, "salta" o "invierte" bruscamente hacia una nueva configuración de equilibrio, que puede estar asociada a desplazamientos significativamente mayores y, a menudo, a una reducción aparente de la carga que puede soportar en ese instante.

Visualmente, se puede interpretar como la tapa de un recipiente de plástico que, al presionarla en el centro, se invierte súbitamente con un "chasquido" para adoptar una forma cóncava en lugar de convexa. Este es un análogo sencillo del "snap-

"through": una transición entre dos estados de equilibrio estables separados por una barrera energética. En estructuras de ingeniería, esta transición puede ser catastrófica si los desplazamientos resultantes exceden la capacidad de la estructura o sus conexiones.

La comprensión del "snap-through" es fundamental porque, a diferencia del pandeo clásico de Euler, no se limita a la pérdida de rigidez en un punto, sino que describe una trayectoria de carga-desplazamiento más compleja que incluye la caída de carga (cuando la estructura requiere menos carga para mantener su deformación después del "snap") y la posibilidad de múltiples estados de equilibrio.

Mecanismos y Comportamiento No Lineal

El comportamiento del "snap-through" se rige por principios de la mecánica no lineal y la energía. Para comprenderlo a fondo, es necesario analizar las curvas de carga-desplazamiento y los conceptos energéticos asociados:

Curvas Carga-Desplazamiento

En un análisis estructural lineal, la relación entre la carga aplicada y el desplazamiento resultante es directamente proporcional (Ley de Hooke). Sin embargo, en el caso del "snap-through", esta relación es marcadamente no lineal.

La curva carga-desplazamiento para una estructura susceptible al "snap-through" típicamente exhibe las siguientes características:

- **Comportamiento Pre-Pico:** Inicialmente, la estructura se deforma de manera gradual y predecible a medida que la carga aumenta. La rigidez de la estructura es positiva.
- **Punto Límite (Punto de Carga Máxima):** Se alcanza un punto en el que la pendiente de la curva de carga-desplazamiento se vuelve cero (la rigidez tangente es cero). Este es el punto de carga máxima que la estructura puede soportar en esa trayectoria. Si la carga sigue aumentando, o incluso se mantiene, la estructura no puede sostener esa configuración.
- **Caída de Carga (Snap-Through):** Despues del punto límite, la estructura "salta" o "invierte" rápidamente. Durante este proceso, se observa una **caída significativa de la carga** requerida para mantener el equilibrio, mientras que el desplazamiento aumenta drásticamente. Esto significa que la estructura puede, de hecho, soportar menos carga en su nueva configuración inmediata, o al menos no puede mantener la carga máxima anterior. La rigidez tangente se vuelve negativa en esta región.
- **Comportamiento Post-Snap:** Tras el "snap-through", la estructura puede alcanzar un nuevo punto de equilibrio, a menudo con una rigidez positiva nuevamente, donde puede soportar cargas adicionales, aunque en una configuración muy deformada.

Es importante destacar que los métodos de análisis controlados por fuerza (donde se incrementa la carga) fracasan en el punto límite porque la matriz de rigidez tangente se vuelve singular. Para rastrear la trayectoria completa, incluyendo la caída de carga y el comportamiento post-snap, son indispensables los métodos de análisis no lineal con control de desplazamiento (como el método de la longitud de arco, *Arc-Length method*). Estos métodos controlan el incremento de la longitud de arco a lo largo de la curva de equilibrio en lugar de solo la carga o el desplazamiento, permitiendo así la identificación de puntos límite y el seguimiento de trayectorias con rigidez negativa.

Conceptos Energéticos

Desde una perspectiva energética, el "snap-through" se entiende como la transición de la estructura de un estado de equilibrio estable a otro. Un sistema estructural busca minimizar su energía potencial total. En el caso de estructuras con comportamiento "snap-through", existen múltiples configuraciones de equilibrio.

- **Estados de Equilibrio Estable:** Corresponden a mínimos locales de la energía potencial.
- **Estado de Equilibrio Inestable:** El punto límite de la curva carga-desplazamiento corresponde a un máximo local de la energía potencial. Para que el "snap-through" ocurra, el sistema debe "superar una barrera energética" o "montaña" de energía potencial para pasar del primer mínimo estable a un segundo mínimo estable (o al menos un estado de equilibrio post-snap). Una vez superada esta barrera, la estructura se precipita hacia la nueva configuración de menor energía potencial (dentro de su entorno).

Este concepto es crucial porque explica por qué el "snap" es repentino: una vez que la estructura ha acumulado suficiente energía para superar el punto de inestabilidad, la transición es rápida y dinámica, liberando energía acumulada.

El "Snap-Through" en Pórticos a Dos Aguas (2D)

Los **pórticos a dos aguas** en dos dimensiones, especialmente aquellos con poca pendiente o "flecha" (arcos o cerchas poco profundas), son particularmente susceptibles al fenómeno del "snap-through". Aunque comúnmente se asocian con estructuras como arcos, los principios son directamente aplicables a la cuerda superior de un pórtico a dos aguas, que puede modelarse como una viga-columna o incluso un arco plano si la curvatura es significativa o la esbeltez elevada.

Cuando un pórtico a dos aguas se somete a cargas verticales (por ejemplo, peso propio, nieve o viento hacia abajo) en su vértice o a lo largo de su cumbre, las fuerzas axiales compresivas se desarrollan en sus elementos inclinados. Si estos elementos son relativamente esbeltos y la geometría del pórtico es "plana" (es decir, el ángulo de la cubierta es pequeño o la altura del vértice es baja en comparación con la luz), la estructura puede comportarse de manera análoga a un **arco plano**.

Los estudios en **arcos planos 2D** han demostrado que su comportamiento bajo carga concentrada en el vértice o distribuida puede conducir al "snap-through". Los factores clave que influyen en esta inestabilidad incluyen:

- **Relación de Esbeltez:** Cuanto más esbeltos sean los elementos del pórtico (largo en relación con su sección transversal), mayor será su propensión al pandeo, incluido el "snap-through".
- **Relación de Flecha (o ángulo de pendiente):** Los pórticos con una pendiente muy baja (pequeña altura del vértice para una luz dada) son más vulnerables. Una geometría más "plana" implica que las fuerzas compresivas internas tienen un mayor componente horizontal que puede inducir la inestabilidad.
- **Condiciones de Apoyo:** La rigidez de las conexiones y los apoyos influye en cómo se desarrollan las fuerzas internas y las deformaciones, afectando la ruta de equilibrio.

Bajo una carga vertical creciente, los elementos inclinados del pórtico a dos aguas experimentarán compresión. Si la carga supera un valor crítico, la parte superior del pórtico podría deformarse hacia abajo de forma progresiva hasta alcanzar un punto en el que ya no pueda mantener su configuración. En ese instante, y de forma repentina, el vértice del pórtico podría "saltar" bruscamente hacia abajo, incluso invirtiendo su curvatura si la geometría lo permite, y el pórtico adoptaría una forma "aplanada" o "invertida". Este proceso se acompaña de la mencionada caída de la carga que puede soportar en ese instante.

La diferencia crucial con el pandeo clásico es que el "snap-through" no es simplemente la flexión lateral de un elemento, sino una reconfiguración global de la estructura, donde la geometría inicial y la interacción de fuerzas axiales y momentos son fundamentales. Los análisis no lineales incrementales son esenciales para predecir cuándo y cómo ocurrirá este "salto".

Importancia en el Análisis de Estabilidad por Pandeo del Pórtico

Para el análisis de estabilidad de un pórtico a dos aguas, la consideración del pandeo por "snap-through" es de suma importancia por varias razones:

- **Seguridad y Fallo Repentino:** El "snap-through" representa un modo de fallo repentino y potencialmente catastrófico. A diferencia de otros modos de fallo que pueden mostrar signos progresivos de deterioro, el "snap-through" puede ocurrir con poca o ninguna advertencia, llevando a una deformación excesiva e inaceptable o incluso al colapso de la estructura. La carga máxima que puede soportar la estructura antes del "snap-through" es la carga crítica de diseño, y es esencial identificarla.
- **Limitaciones del Análisis Lineal:** Los métodos de análisis de pandeo lineal (como el análisis de autovalores) son insuficientes para predecir el "snap-through". Estos métodos solo pueden identificar la carga crítica para el

pandeo inicial o la bifurcación, pero no pueden rastrear el camino post-crítico, la caída de carga ni los grandes desplazamientos asociados con el "snap-through".

- **Necesidad de Análisis No Lineal:** Para capturar con precisión este fenómeno, es imperativo realizar un análisis no lineal geométrico. Esto implica el uso de software de elementos finitos avanzado que pueda manejar grandes deformaciones y el seguimiento de la trayectoria de equilibrio completa (incluyendo los puntos límite y las regiones de rigidez negativa), a menudo empleando métodos como el Arc-Length. Sin un análisis no lineal, un diseño podría parecer seguro bajo cargas de servicio basadas en un análisis lineal, pero ser altamente susceptible al "snap-through" en condiciones de carga ligeramente mayores o en caso de imperfecciones.
- **Optimización y Robustez:** Al comprender el "snap-through", los ingenieros pueden diseñar pórticos a dos aguas más robustos y eficientes. Esto puede implicar modificar la geometría (aumentando la pendiente), aumentando la rigidez de los elementos o utilizando materiales con mayor capacidad. La prevención del "snap-through" asegura que la estructura se comporte de manera predecible y segura bajo todas las condiciones de carga esperadas.
- **Fenómeno Dinámico:** Aunque se analiza estáticamente, el "snap-through" es un proceso dinámico. La liberación repentina de energía puede generar fuerzas de inercia significativas que deben ser consideradas, especialmente si la estructura está cerca del límite. La comprensión de esta dinámica es vital para evaluar el comportamiento global y la respuesta a largo plazo.

En resumen, la omisión del análisis de "snap-through" en pórticos a dos aguas de ciertas geometrías podría llevar a un diseño inseguro e impredecible. Es un recordatorio de que la estabilidad estructural va más allá del simple pandeo de Euler y requiere un enfoque riguroso de la no linealidad geométrica para garantizar la integridad de las estructuras.

Como conclusión se puede decir que el pandeo por *snap-through* es una forma compleja de inestabilidad estructural que implica un cambio súbito en la configuración de una estructura, como los pórticos a dos aguas, debido a relaciones no lineales entre carga y desplazamiento. A diferencia del pandeo clásico, este fenómeno requiere análisis no lineales avanzados, como el método de longitud de arco, para identificar puntos críticos y garantizar un diseño seguro y robusto.

Entre los distintos métodos de análisis de pandeo se tienen:

Método de los Ejes Principales: Este método se basa en la determinación de los ejes principales de deformación, especialmente útil en el análisis de pandeo lateral-torsional, donde el comportamiento de la estructura es más complejo.

Análisis Computacional (SAP2000): Los métodos computacionales, como el uso del software SAP2000, son muy útiles para modelar y analizar el pandeo de estructuras

complejas. Este tipo de análisis permite determinar las curvas desplazamiento-carga, identificar las cargas críticas de pandeo, y estudiar los efectos no lineales que ocurren en la estructura cuando se acerca a la carga crítica. A través de simulaciones numéricas, es posible modelar comportamientos complejos que no pueden ser fácilmente abordados con las fórmulas tradicionales [14].

Métodos de Estabilidad No Lineales: En situaciones donde el material no sigue un comportamiento perfectamente elástico, los métodos de estabilidad no lineales pueden ser utilizados para simular el pandeo inelástico. Estos métodos incorporan el modelo constitutivo del material, permitiendo que la deformación plástica influya en la carga crítica de pandeo y en la evolución del colapso [15].

En los pórticos rectos en 2D, el análisis de pandeo se lleva a cabo mediante la identificación de los puntos críticos donde la estructura puede perder su estabilidad. Los pórticos suelen ser más susceptibles al pandeo en las columnas, especialmente en aquellas con relaciones de esbeltez elevadas. El análisis de curvas desplazamiento-carga realizado mediante SAP2000 es fundamental para evaluar el comportamiento del pandeo en estos sistemas estructurales, ya que permite observar cómo el sistema alcanza su carga crítica y cómo la deformación progresiva hasta el colapso [16].

CAPÍTULO 4: *HERRAMIENTA DE CÁLCULO EMPLEADA: SAP2000*

4 HERRAMIENTA DE CÁLCULO EMPLEADA: SAP2000

Para la realización de las simulaciones que más adelante se van a exponer se ha utilizado el mismo software que se utiliza en la realización de las prácticas de la asignatura Estructuras y construcciones Industriales que se cursa durante el cuarto curso del grado de ingeniería mecánica el cual es SAP 2000.

Se trata de un software de análisis estructural basado en el método de los elementos finitos, ampliamente utilizado en ingeniería civil por su capacidad para modelar y simular una amplia gama de sistemas estructurales, desde modelos simples hasta estructuras complejas. Su entorno gráfico intuitivo y sus funciones avanzadas permiten integrar distintos tipos de análisis en una única plataforma de trabajo.

En el presente trabajo, SAP2000 se utiliza para analizar estructuras planas de barras esbeltas con el objetivo de determinar su carga última frente al colapso plástico o por inestabilidad. El procedimiento seguido se compone de dos fases principales:

Análisis de colapso plástico: se realiza un análisis estático lineal incremental, aplicando una carga creciente a la estructura. Durante este proceso se registran los puntos clave en los que se forman rótulas plásticas, lo que permite construir la curva carga-desplazamiento y detectar el punto en el que la estructura pierde rigidez y entra en mecanismo.

Análisis de estabilidad (pandeo): utilizando los desplazamientos obtenidos en cada uno de los pasos del análisis anterior, se lleva a cabo un análisis de buckling mediante la opción "*stiffness at end of nonlinear case*". Esto permite calcular la carga crítica de pandeo correspondiente a la configuración deformada en cada paso, teniendo en cuenta la rigidez reducida de la estructura debido a la aparición progresiva de plastificación.

El cruce de las curvas obtenidas de ambos análisis (colapso plástico y pandeo) permite estimar con mayor precisión la carga última real, considerando tanto la pérdida de resistencia por plastificación como la pérdida de estabilidad. Este enfoque integrado proporciona una visión más realista del comportamiento estructural ante cargas extremas.

4.1 PROCEDIMIENTO SEGUIDO PARA LA SIMULACIÓN

4.1.1 Modelado de la Estructura

En primer lugar, se comenzará determinando la geometría del pórtico, la cual, en una gran cantidad de los ejemplos, será tomada como la correspondiente a un pórtico plano con dimensiones específicas definidas para cada uno de los casos estudiados.

Para el establecimiento de las dimensiones del pórtico, se generará una rejilla configurada con las propiedades particulares del problema, en función de los

puntos que se consideren relevantes para la definición de la estructura. A continuación, se presenta un ejemplo de la configuración de una rejilla correspondiente a un pórtico de dimensiones 40x12m en la *Figura 4.1*

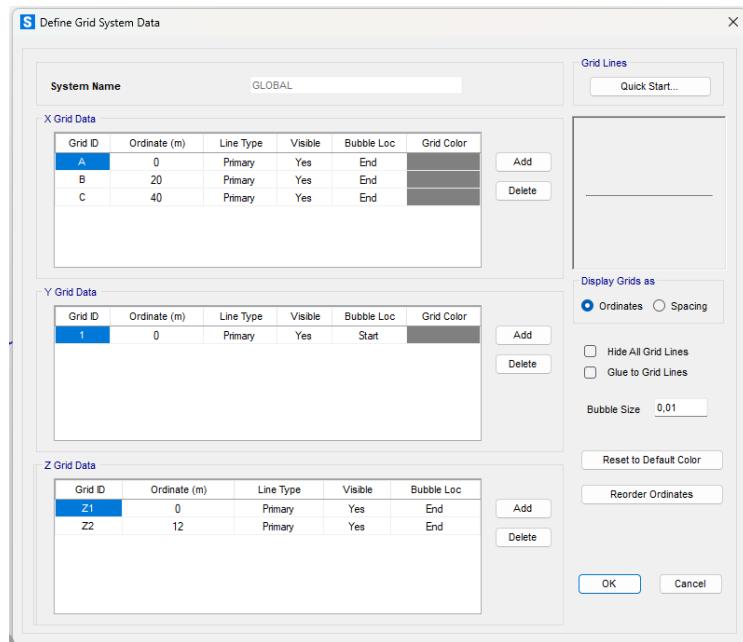


Figura 4.1. Información de la rejilla

La selección del material se realiza a través del menú *Define → Materials*, desde el cual es posible añadir nuevos materiales, modificar o copiar uno ya existente, consultar sus propiedades, o bien eliminarlo si fuera necesario. Uno de los materiales más habituales en estructuras metálicas es el acero de construcción, el cual se encuentra normalizado en España mediante normativa europea.

En SAP2000, pueden identificarse hasta cuatro tipos de acero estructural diferenciados principalmente por sus tensiones límite, tal como se ilustra en la *Figura 4.2*.

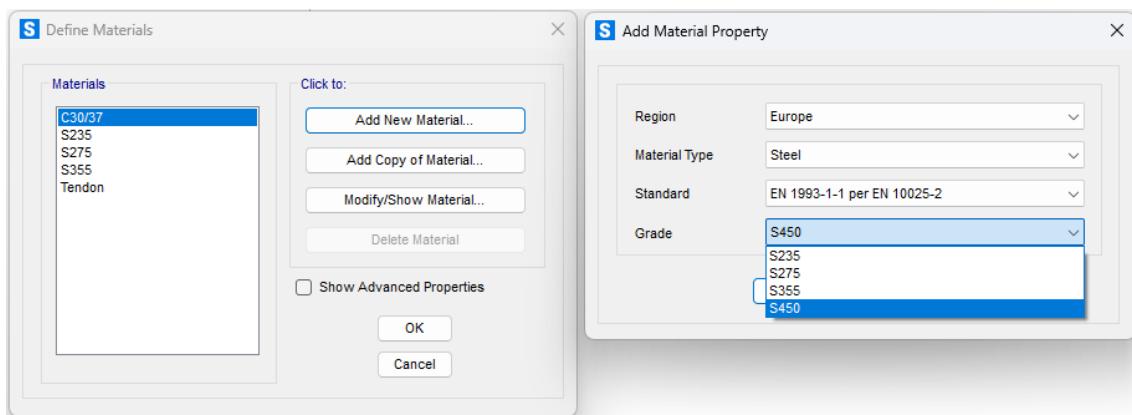


Figura 4.2. Definición del material

La gestión de las secciones se realiza desde *Define → Section Properties → Frame Sections*. Desde este apartado pueden crearse, modificarse, copiarse o eliminarse

distintas secciones según las necesidades del modelo. Una funcionalidad relevante es la posibilidad de importar perfiles comerciales desde archivos externos. En este contexto, cobra especial interés el fichero *Euro.pro*, incluido por defecto con SAP2000, que contiene una amplia variedad de secciones normalizadas. Como ejemplo, en la *Figura 4.3* se muestra una sección importada desde dicho archivo, donde puede apreciarse la diversidad de perfiles disponibles..

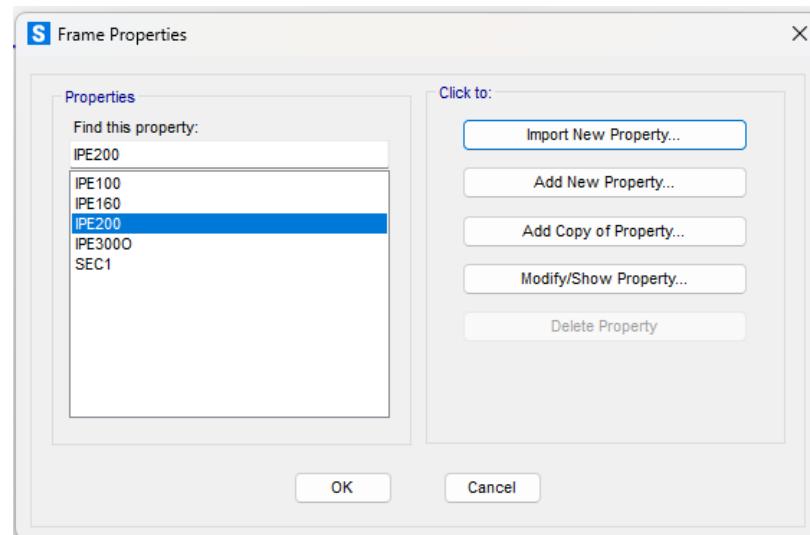


Figura 4.3. Menú de secciones

Una vez creada la sección, es posible editarla para ajustar ciertos parámetros relevantes y asignarle el material correspondiente como se puede ver en la *Figura 5.4*.

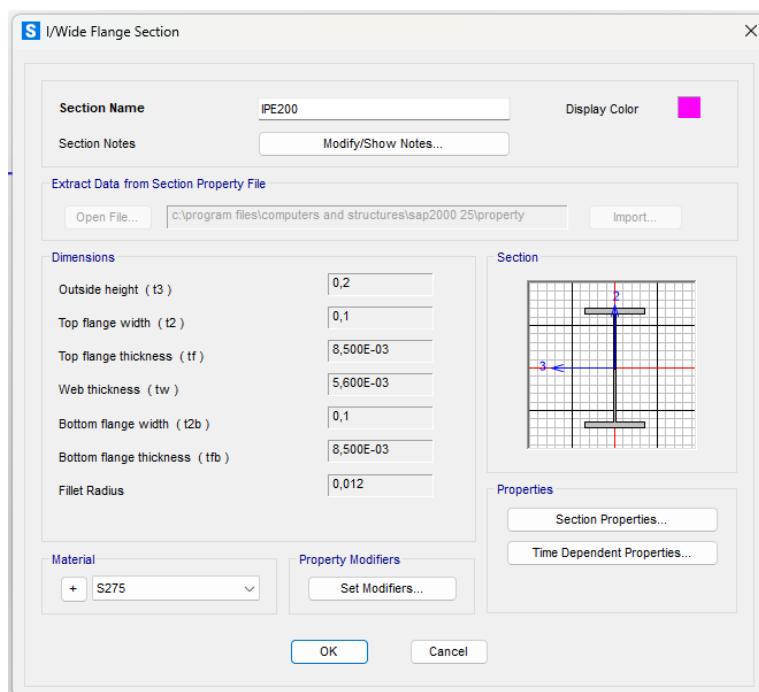


Figura 4.4. Menú de definición de la sección

Otra opción para definir una sección en SAP2000 es utilizar una sección de tipo genérico. A diferencia de las secciones convencionales, donde el programa calcula automáticamente las propiedades a partir de los parámetros geométricos, en este caso es necesario introducir directamente las propiedades mecánicas relevantes. No es necesario completar todos los campos, sino únicamente aquellos que afectan al análisis estructural, como el área de la sección transversal, los momentos de inercia principales y las áreas efectivas a cortante en las direcciones correspondientes.

Es importante tener en cuenta que los ejes locales definidos por SAP2000, numerados como 1, 2, 3, difieren del sistema de coordenadas global X, Y, Z. En la *Figura 4.5* se muestran las propiedades modificables para este tipo de sección.

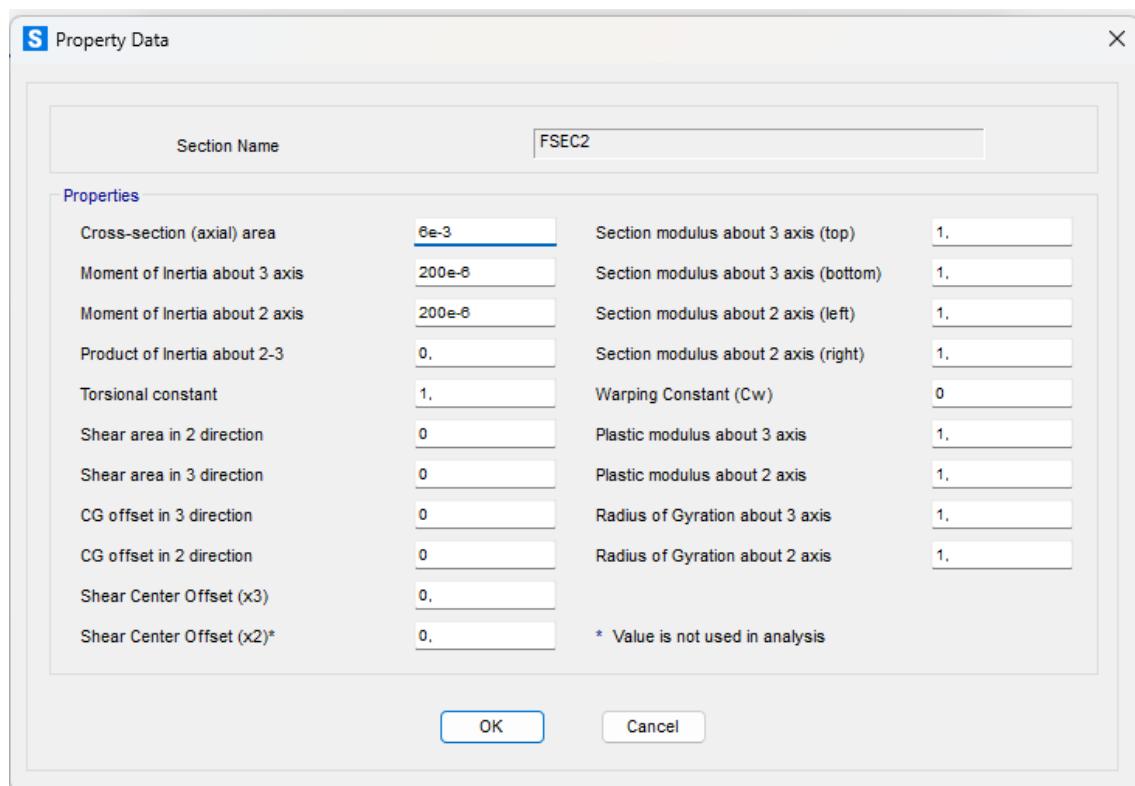


Figura 4.5. Tabla de propiedades

Una vez definidas la cuadrícula, el material y la sección correspondientes al caso de estudio, se procede a la creación del modelo estructural. Para ello, se selecciona el tipo de elemento a representar, que en este trabajo corresponde a barras rectas. A continuación, se asigna la sección previamente definida a cada elemento, pudiendo modificarla según las necesidades específicas de la estructura. Finalmente, se establecen las condiciones de apoyo en los extremos de cada barra, determinando si estos se modelan como rótulas o uniones rígidas, lo cual influye directamente en el comportamiento estructural. Un ejemplo de esta configuración se presenta en la *Figura 4.6*.

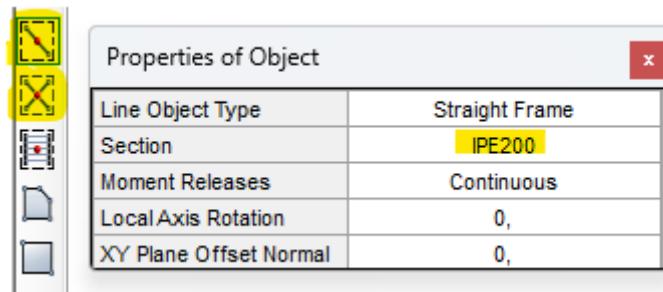


Figura 4.6. Menú de propiedades de la barra a definir

A continuación, se procederá a la definición de las condiciones de contorno del caso de estudio. En SAP2000, estas condiciones se asignan como propiedades a nivel de nodo. Para establecerlas, es necesario seleccionar el nodo correspondiente y definir qué grados de libertad —entre las tres traslaciones y las tres rotaciones locales— se desean restringir.

El programa también ofrece configuraciones predeterminadas para facilitar este proceso, las cuales permiten aplicar automáticamente un conjunto estándar de restricciones, simplificando así la asignación. Un ejemplo de estas opciones prediseñadas puede observarse en la Figura 4.7.

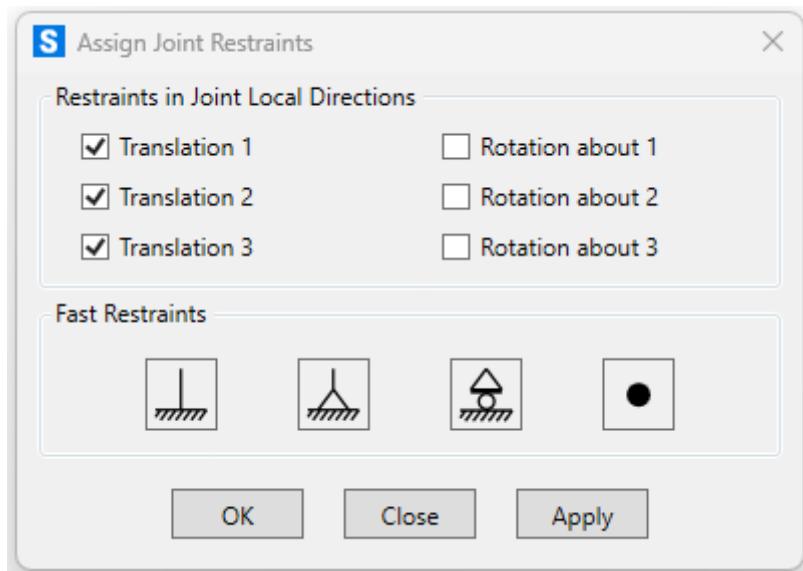


Figura 4.7. Asignación de condiciones de contorno

Una vez asignadas las condiciones de contorno, los distintos tipos de apoyo pueden identificarse mediante la simbología propia de SAP2000. A continuación, se presenta la correspondencia entre cada tipo de restricción y su

representación gráfica dentro del entorno del programa, mostrada en las *Figuras 4.8, 4.9, 4.10 y 4.11*.

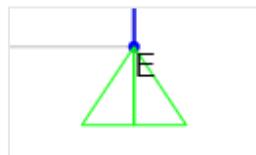


Figura 4.8. Apoyo Fijo

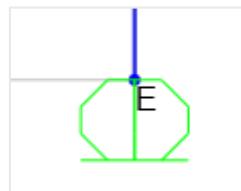


Figura 4.9. Apoyo Móvil

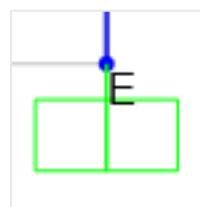


Figura 4.10. Empotramiento

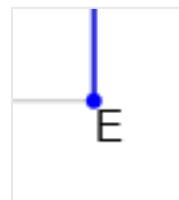


Figura 4.11. Nudo Rígido

Todas las propiedades necesarias para el modelado de la estructura varían en función de cada caso de análisis, con el objetivo de evaluar cómo la modificación de estas características afecta al resultado final, especialmente en el valor de la carga última.

En la *Figura 4.12* se presentan las propiedades correspondientes a la barra AB,

donde puede observarse que se trata de un perfil IPE200 importado, fabricado en acero S275.

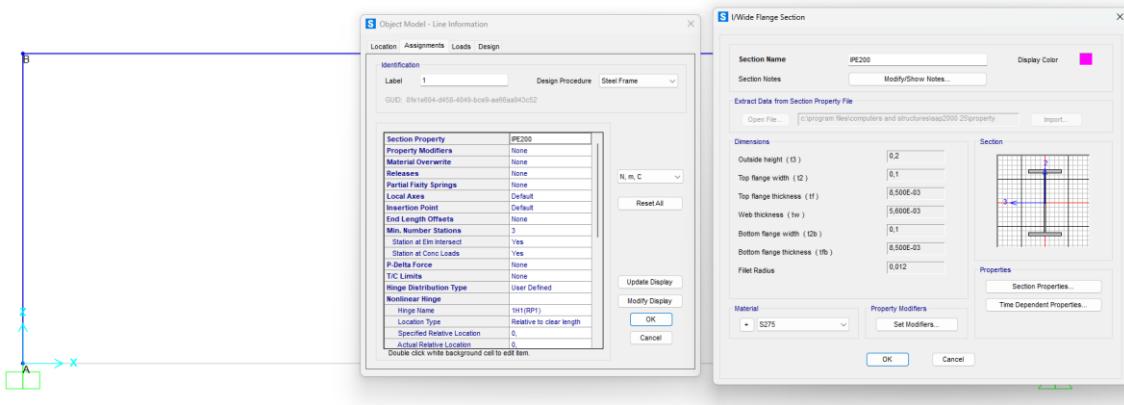


Figura 4.12. Especificaciones barra AB

En la Figura 4.13 se muestra la longitud de la barra AB, que corresponde a 12 metros, junto con la ubicación de los puntos A y B.

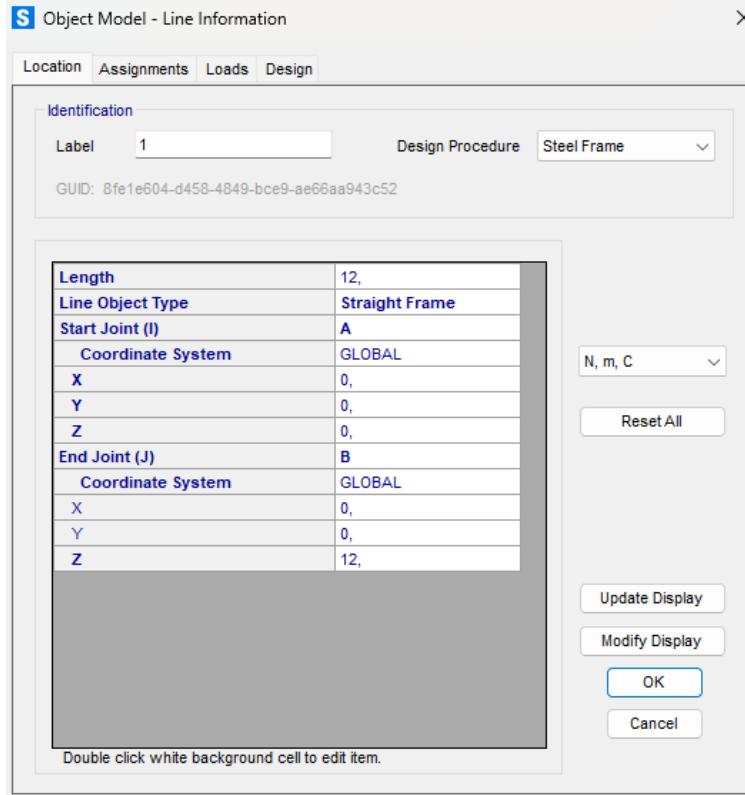


Figura 4.13. Propiedades de localización de la barra AB

4.1.2 Asignación de Cargas Estáticas

Para continuar, es necesario aplicar las cargas a la estructura mediante SAP2000. En este software, las cargas se gestionan a través de tres conceptos fundamentales: los patrones de carga (*Load Patterns*), los casos de carga (*Load Cases*) y las

combinaciones de carga (*Load Combinations*). A continuación, se presenta una breve descripción de cada uno. Los patrones de carga (ver *Figura 4.14*) agrupan aquellas cargas que representan un mismo fenómeno físico. Por ejemplo, las fuerzas horizontales distribuidas en pilares y dinteles de un pórtico a dos aguas, que simulan la acción del viento (tanto empuje como succión), se incluyen dentro de un único patrón de carga. De manera similar, una serie de cargas puntuales verticales sobre un puente, representando el tráfico, conforman otro patrón distinto.

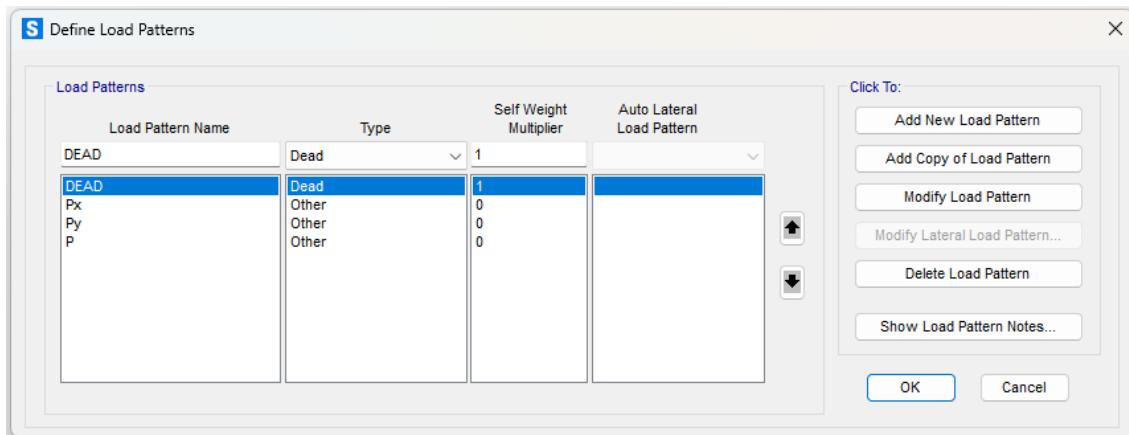


Figura 4.14. Menú de patrones de carga

Los casos de carga (ver *Figura 4.15*) se definen a partir de los patrones de carga y especifican el tipo de análisis que se realizará con dichas cargas. De este modo, un mismo patrón de carga, como el correspondiente al viento, puede utilizarse para evaluar el comportamiento estático lineal o no lineal de la estructura, determinar el factor de carga de pandeo o analizar la formación secuencial de rótulas plásticas. Esto implica la creación de diferentes casos de carga asociados a un mismo patrón. Además, cada caso de carga puede incluir varios patrones, cada uno con su factor de ponderación correspondiente.

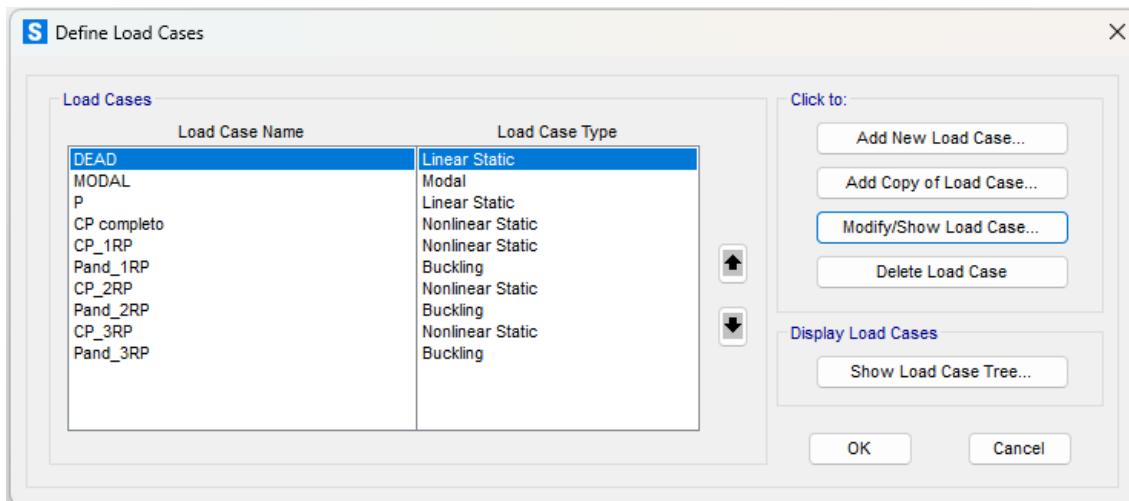


Figura 4.15. Menú de casos de carga

Finalmente, los resultados de distintos casos de carga se integran mediante las combinaciones de carga (ver *Figuras 4.16, 4.17 y 4.18*). Estas combinaciones se construyen aplicando factores de ponderación específicos y empleando operaciones como sumas o la obtención de valores envolventes, ya sean máximos o mínimos.

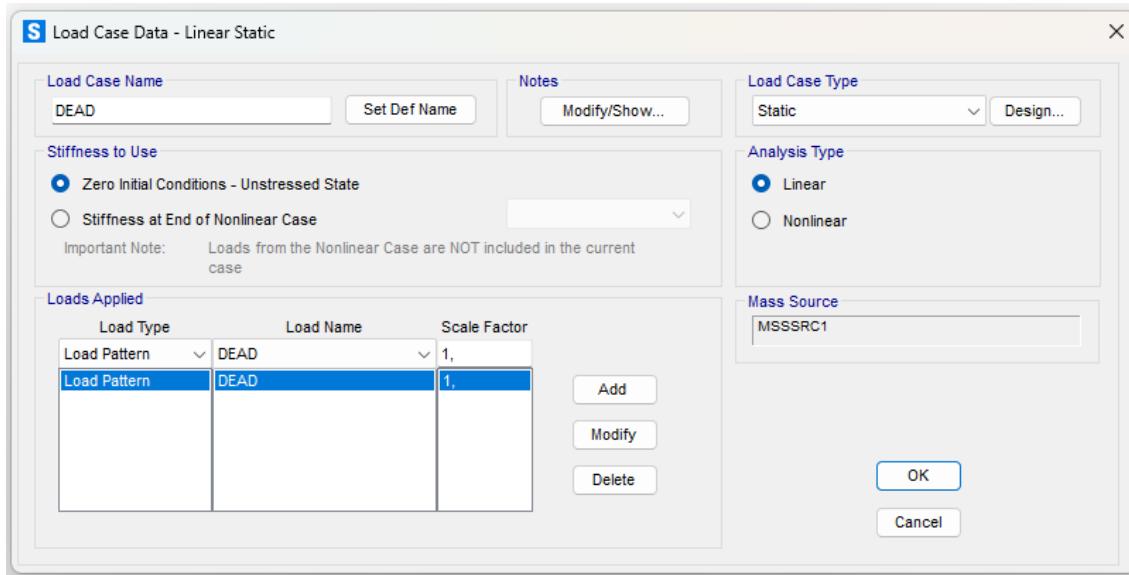


Figura 4.16. Menú de combinaciones de carga para una carga Estática Lineal

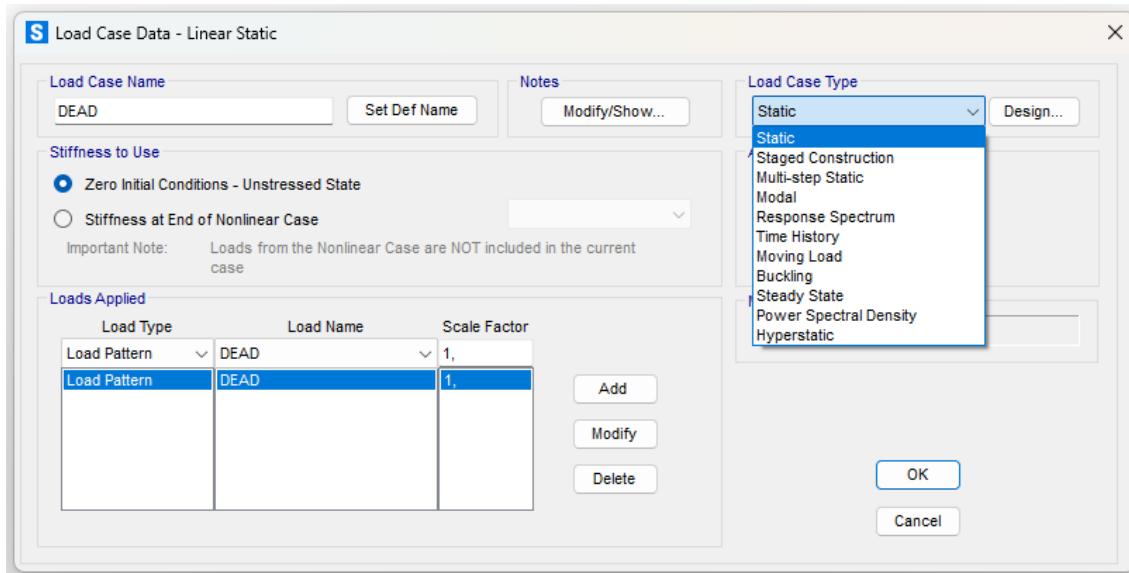


Figura 4.17. Menú de combinaciones de carga para los diferentes tipos de carga

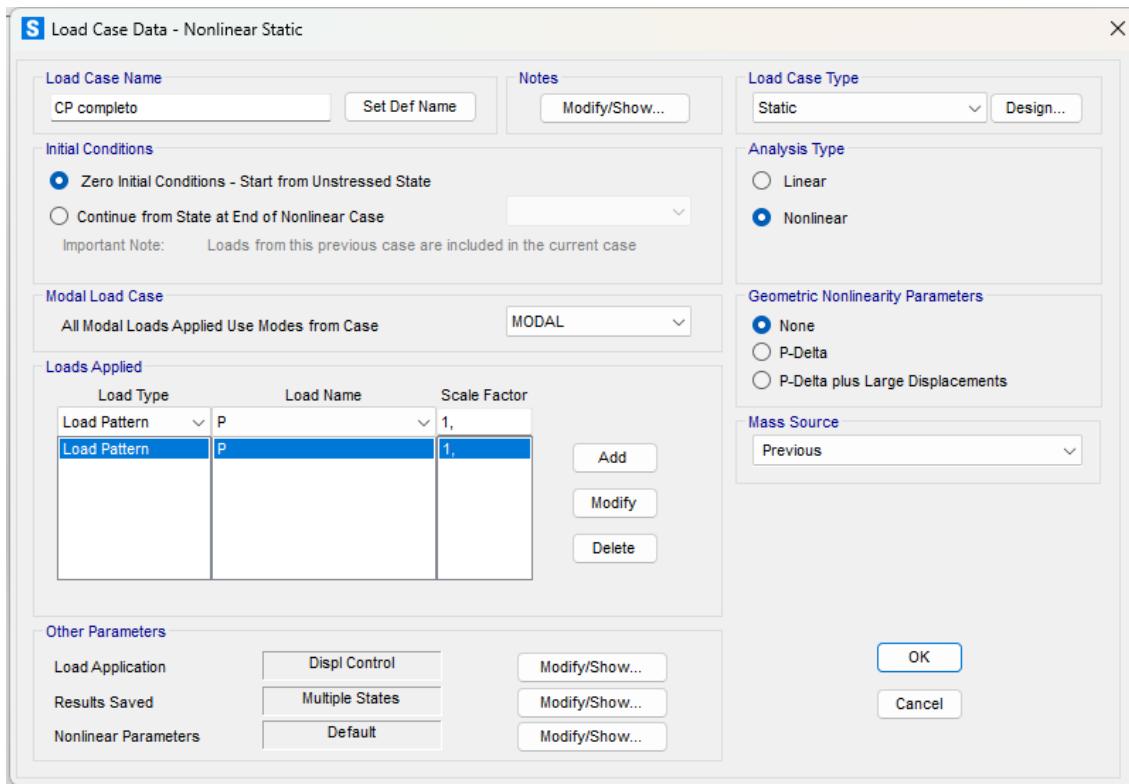


Figura 4.18. Menú de combinaciones de carga para una carga Estática no Lineal

Por lo tanto, antes de asignar cualquier carga, es imprescindible definir previamente los *Load Patterns* en los que se incluirán, así como los *Load Cases* correspondientes. La creación de las combinaciones de carga dependerá de la naturaleza del problema analizado. Para gestionar patrones, casos y combinaciones, se utiliza la opción correspondiente en el programa, como se muestra en la Figura 4.19.

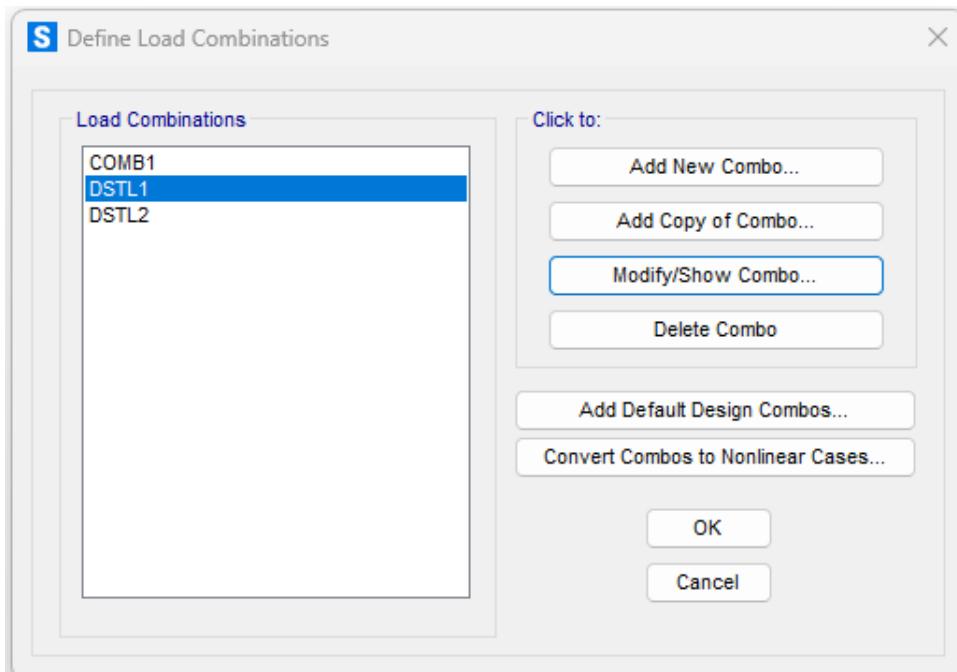


Figura 4.19. Menú de definición de combinaciones de carga

Para las combinaciones de carga, es necesario especificar el método de combinación y los casos de carga que se incluirán, tal como se ilustra en la *Figura 4.20*.

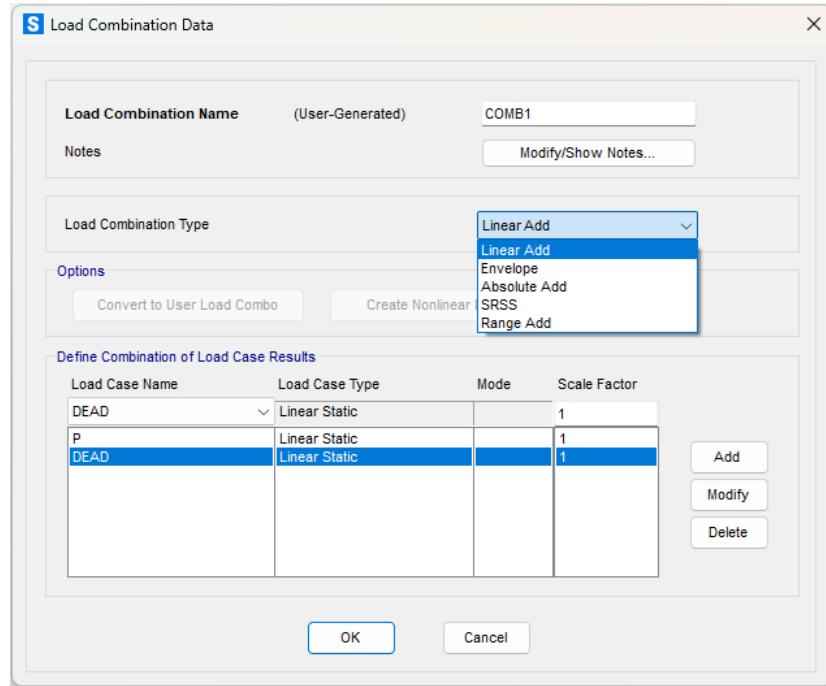


Figura 4.20. Definición de la combinación de cargas

4.1.3 Aplicación de las cargas

En SAP2000, las cargas se asignan seleccionando los elementos afectados y definiendo el tipo de carga a aplicar, siempre dentro del patrón de carga correspondiente. Es importante elegir el sistema de referencia para la carga o desplazamiento, que puede ser global o local al nodo; generalmente, se utiliza el sistema global para evitar confusiones.

Finalmente, se especifican las cargas y momentos (ver *Figura 4.21*) o desplazamientos y giros (ver *Figura 4.22*) que actúan sobre el elemento seleccionado.

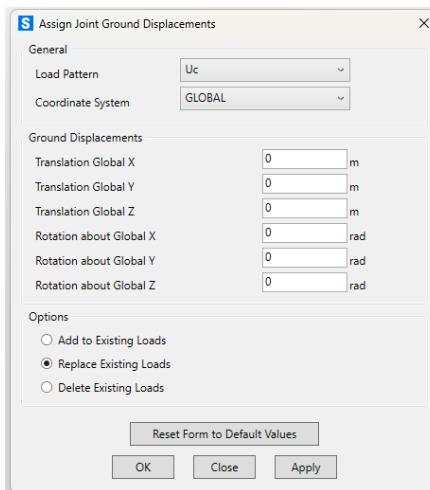


Figura 4.21. Asignación de desplazamientos

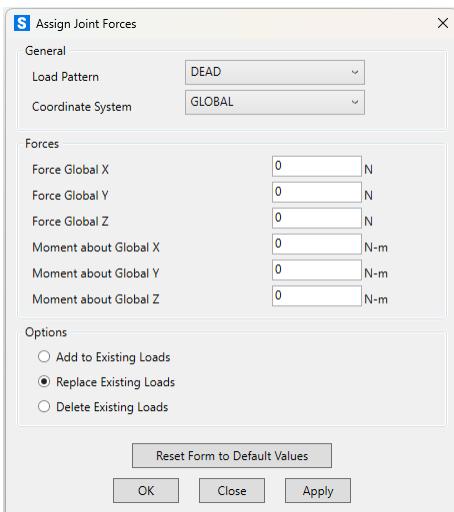


Figura 4.22. Asignación de cargas

A continuación, en la *Figura 4.23* se presenta un ejemplo que permite visualizar cómo se representan las cargas una vez asignadas. Estas se muestran mediante flechas que indican la dirección y sentido de aplicación, acompañadas de un valor definido previamente, considerando el sistema de referencia seleccionado.

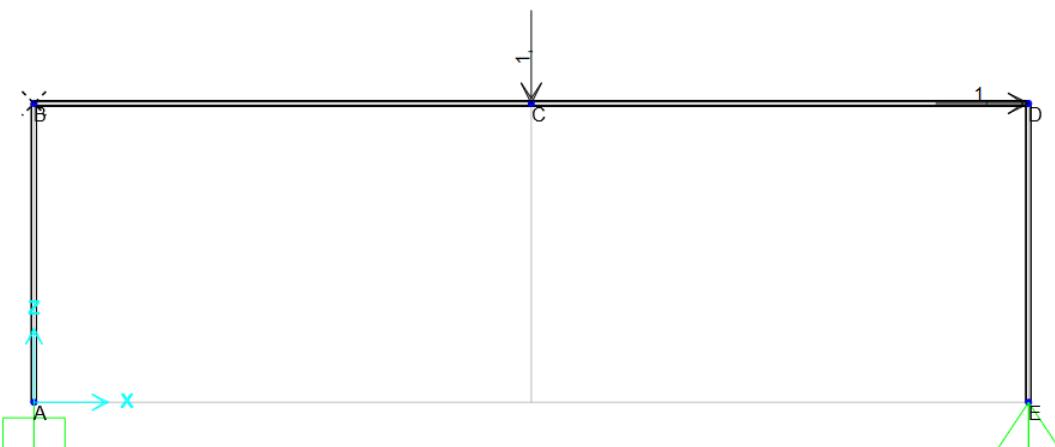


Figura 4.23. Modelo con cargas unitarias

4.1.4 Hipótesis del Modelo

Con este análisis, se pretende averiguar el valor del factor de colapso, la secuencia de formación de las rótulas plásticas y el desplazamiento máximo de puntos relevantes, tales como las ubicaciones de aplicación de las cargas.

Para preparar el análisis, primero se modifican las tensiones admisibles del material seleccionado para las barras, asignando un valor uniforme para todas ellas. En el ejemplo de la *Figura 4.24*, un acero S275 tiene un valor de 275 MPa en todos los campos.

SAP2000 necesita estos valores para realizar distintos análisis y comprobaciones. Al

poner el mismo valor en todos los campos, se asegura que el software use correctamente las propiedades del material en cada cálculo.

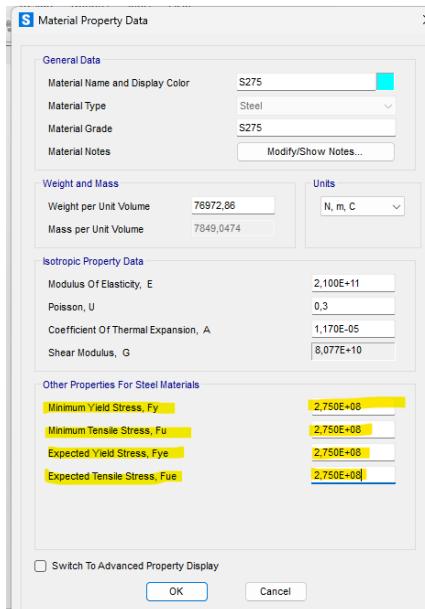


Figura 4.24. Propiedades del material

Otra modificación previa al análisis consiste en ajustar los valores correspondientes al Shear Area una vez que se ha definido la sección con la que se trabajará. Los perfiles comerciales suelen tener estos valores diferentes de cero, pero para despreciar la deformación por cortante, se anulan asignándoles un valor cero. Estos valores, que actúan como multiplicadores de las propiedades nominales del perfil, se pueden modificar para adaptar el cálculo a las hipótesis específicas del problema, como se muestra en la Figura 4.25. Además, en línea con los principios del cálculo plástico, donde se desprecia la deformación axial —equivalente a considerar un área infinita—, es necesario asignar un valor muy alto en el multiplicador del área axial, ya que no es posible introducir

un valor infinito. Por ello, se recomienda establecer un valor de al menos 1000 en la casilla correspondiente al *Cross-section (axial) Area*.

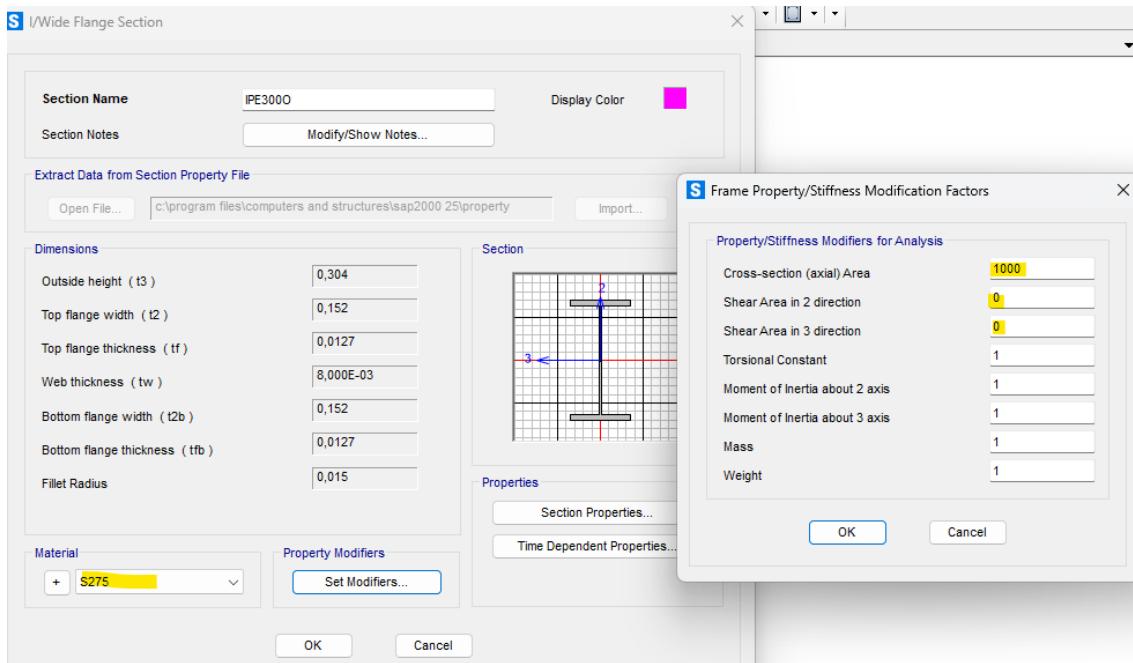


Figura 4.25. Parámetros de rigidez de la barra

Para asegurar que el análisis realizado por SAP2000 se ajuste al planteamiento, es necesario especificar que se trata de un problema plano. Para ello, se seleccionan los grados de libertad que se tendrán en cuenta durante el análisis, limitándolos a los desplazamientos en X y Z, y al giro en Y. Esto garantiza que el modelo represente correctamente el comportamiento bidimensional, como se muestra en la Figura 4.26.

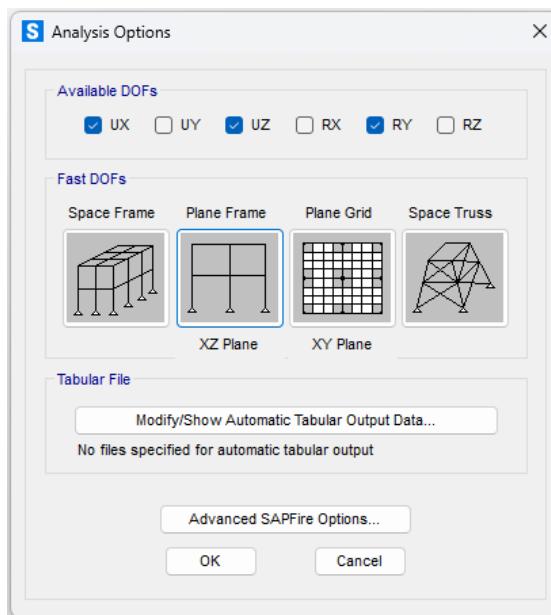


Figura 4.26. Opciones del análisis

Por último, es importante ajustar el mallado automático para mejorar la precisión del modelo. En SAP2000 existen varias opciones para controlar cómo se subdividen las barras. Estas opciones permiten que el programa divida automáticamente cada barra en segmentos según diferentes criterios:

- **Mallado en nudos intermedios:** la barra se divide en los puntos que ya existen sobre ella.
- **Mallado en intersecciones:** se subdivide la barra en las intersecciones con otras barras o elementos estructurales.
- **Número mínimo de segmentos:** se establece un número mínimo de segmentos para cada barra, aunque el número final puede ser mayor según otros criterios.
- **Longitud máxima de segmento:** se limita la longitud máxima de cada segmento para que no supere un valor determinado.

Estas opciones pueden combinarse para adaptar el mallado a las necesidades específicas del análisis, como se muestra en la *Figura 4.27*.

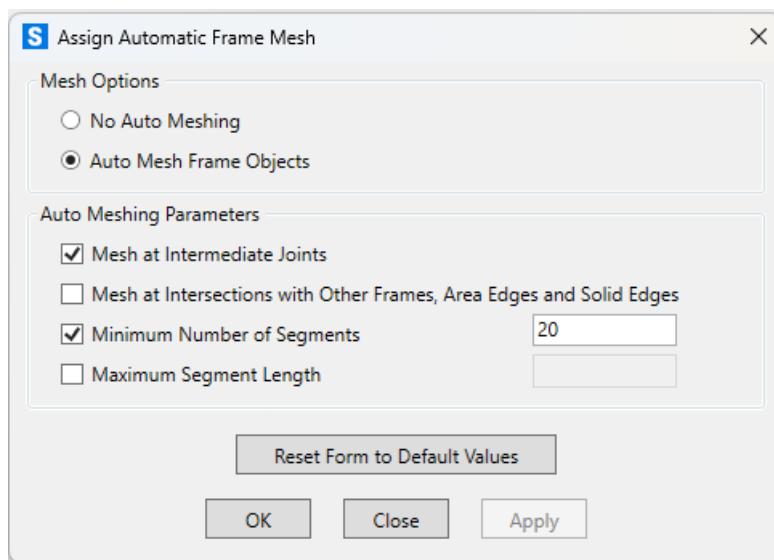


Figura 4.27. Opciones de mallado

En las simulaciones realizadas, se ha optado por combinar la opción de mallado en nudos intermedios con un número mínimo de veinte segmentos. Esta configuración asegura que el error en los resultados sea mínimo, ya que, al superar esa cantidad, la variación en los resultados es prácticamente despreciable, garantizando así mayor precisión y exactitud.

4.1.5 Análisis del colapso plástico

Una vez aplicadas las condiciones que reflejan las hipótesis del enfoque teórico de la asignatura Estructuras y Construcciones Industriales y tras modelar la estructura para el análisis de carga última, se continúa con la preparación enfocada al análisis del colapso plástico.

Modelo de Rótula Plástica

Para crear el modelo de rótula plástica, se accede a la configuración de propiedades de rótulas dentro del software. Se añade una nueva propiedad, seleccionando acero y asignando un nombre al modelo. Con la opción “Deformation Controlled (Ductile)” activada, se escoge el esfuerzo que controla la plastificación, en este caso el momento flector M3. Esto abre una ventana adicional para ajustar el modelo con mayor detalle.

Se configuran los parámetros relacionados con el control de desplazamientos y la capacidad de carga más allá del punto E. En el gráfico “Momento - Rotación”, el tramo inicial vertical representa el comportamiento elástico sin rotación plástica. A partir del punto B, la sección está completamente plastificada. Para adecuar el modelo a lo estudiado en la asignatura, se indica que, sin aumento en el momento flector después de ese punto, la sección puede rotar libremente, es decir, la curva entre los puntos B y E es horizontal. Por eso, los valores “Moment/SF” en los puntos C, D y E se ajustan a 1

Este comportamiento es válido hasta cierto grado de rotación, aproximadamente 8 en el punto E. Para rotaciones mayores, el programa permite ajustar cómo continuar el comportamiento de la rótula plástica, asegurando que el modelo se adapte correctamente al análisis. Todo esto se puede ver en la *Figura 4.28*.

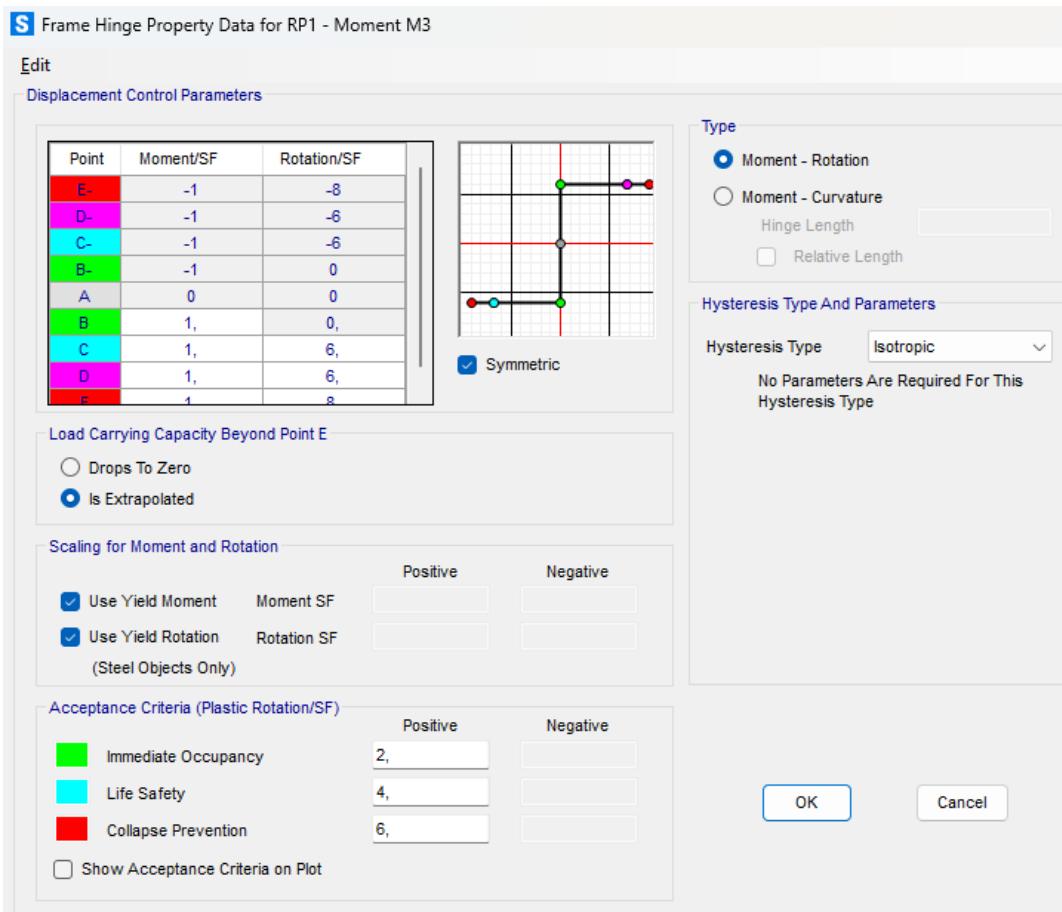


Figura 4.28. Definición de la rótula plástica

Ubicación de las posibles rótulas plásticas

La asignación de los puntos donde pueden generarse rótulas plásticas se realiza sobre las barras, no sobre puntos específicos. Se define una lista de posiciones en coordenadas relativas locales (de 0 a 1) donde es posible la formación de rótulas. Para ello, se selecciona el modelo de rótula creado previamente y se indican las posiciones correspondientes en "Relative Distance" (0 o 1). Estas posibles rótulas quedan asignadas a la barra, como se muestra en la *Figura 4.29*.

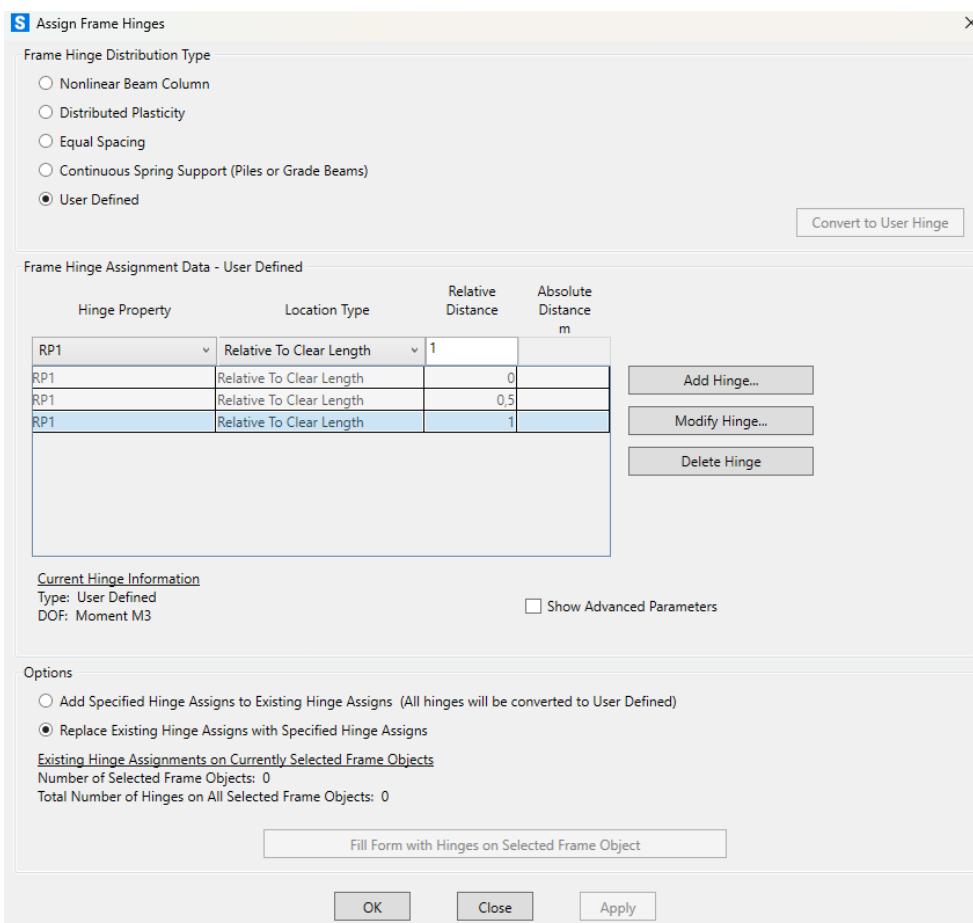


Figura 4.29. Asignación de las rótulas plásticas

Configuración del caso de carga no lineal

Para que el programa considere las posibles rótulas plásticas y realice las comprobaciones correspondientes, el análisis estático debe configurarse como no lineal. Para ello, se crea un caso de carga de tipo "Static" y subtipo "Nonlinear". Este caso incluye los patrones de carga que contienen las fuerzas P.

El análisis no lineal puede realizarse de dos formas: aplicando la carga completa de los patrones simultáneamente ("Full Load") o incrementando las cargas de forma progresiva hasta que un grado de libertad alcance un valor definido ("Displacement Control"). Para el cálculo plástico, esta última opción es la más adecuada, ya que

permite que el programa aplique cargas proporcionales hasta que la estructura alcance el estado límite deseado y se formen las rótulas plásticas necesarias.

Para controlar la carga mediante un único grado de libertad, se activa la opción "Use Monitored Displacement". Se indica el valor deseado para el desplazamiento monitoreado, y se selecciona el grado de libertad a controlar, generalmente el desplazamiento vertical en el nodo bajo la carga vertical. El programa incrementará la carga hasta que este desplazamiento alcance el valor especificado. Este procedimiento se exemplifica en la *Figura 4.30*.

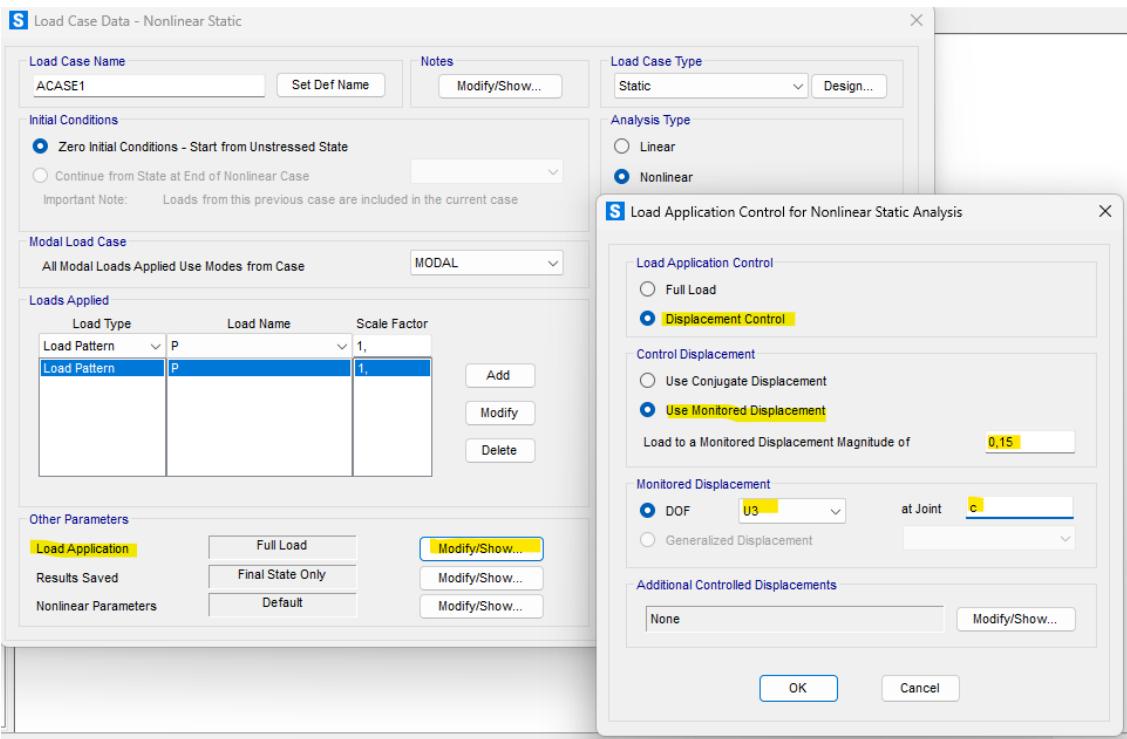


Figura 4.30. Configuración del análisis con desplazamiento controlado

Durante el proceso de cálculo incremental que realiza SAP2000, se evalúan múltiples estados intermedios hasta alcanzar la condición final del análisis. Al concluir, se espera que el grado de libertad monitorizado haya alcanzado el valor previamente definido. Para facilitar el seguimiento de la evolución estructural a lo largo del análisis, es posible almacenar ciertos estados intermedios seleccionados.

Mediante la activación de la opción correspondiente en la configuración, se habilita el guardado de múltiples estados, especificando un rango mínimo y máximo de instantes a registrar. Cabe señalar que únicamente los momentos en los que se forman rótulas plásticas serán almacenados como estados intermedios.

Adicionalmente, se recomienda desactivar la opción "Save Positive Displacements Increments Only", particularmente en análisis no lineales donde puedan presentarse desplazamientos reversibles, asegurando así un registro completo del comportamiento estructural.

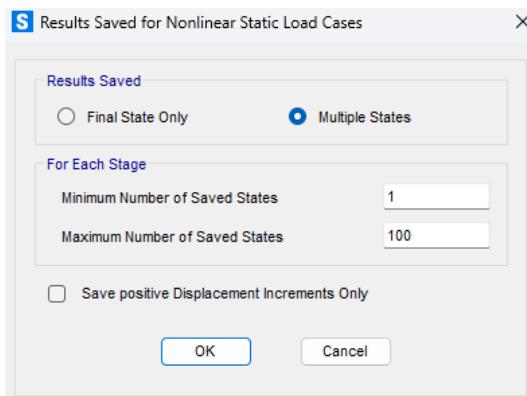


Figura 4.31. Salvado de resultados

Curva Factor de Carga – Desplazamiento

La determinación de los momentos en que se forman las rótulas plásticas se realiza a partir de las curvas carga-desplazamiento, que muestran la relación entre el factor de carga aplicado a la estructura y el desplazamiento de un grado de libertad.

Estas curvas se visualizan en SAP2000 mediante la función de gráficos, donde se selecciona el caso de carga no lineal y se definen las variables para los ejes X e Y. Para ello, se asigna un desplazamiento o giro al eje X y el factor de carga aplicado a la estructura al eje Y.

Para definir las funciones a graficar, primero se añade la función correspondiente al factor de carga dentro de las funciones de carga. Luego, se selecciona la función de desplazamientos de un nodo específico, indicando la componente de desplazamiento deseada.

De este modo, se obtiene una gráfica clara que permite identificar con precisión los instantes en que aparecen las rótulas plásticas durante la carga, como se muestra en la *Figura 4.32*.

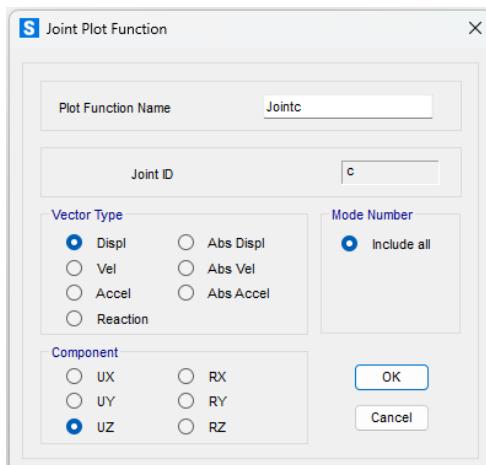


Figura 4.32. Configuración de la función de desplazamiento

Cada función debe asignarse a un eje. Para el eje Y, se selecciona la función de carga creada previamente y se añade a la lista de funciones verticales, ya que es el valor que se quiere representar en ese eje.

Para el eje X, se elige la función correspondiente al desplazamiento definido en uno de los puntos bajo carga desde el menú desplegable "Horizontal Plot Function".

Con ambas funciones configuradas, se genera el gráfico que muestra la relación carga-desplazamiento, como se observa en la *Figura 4.33*.

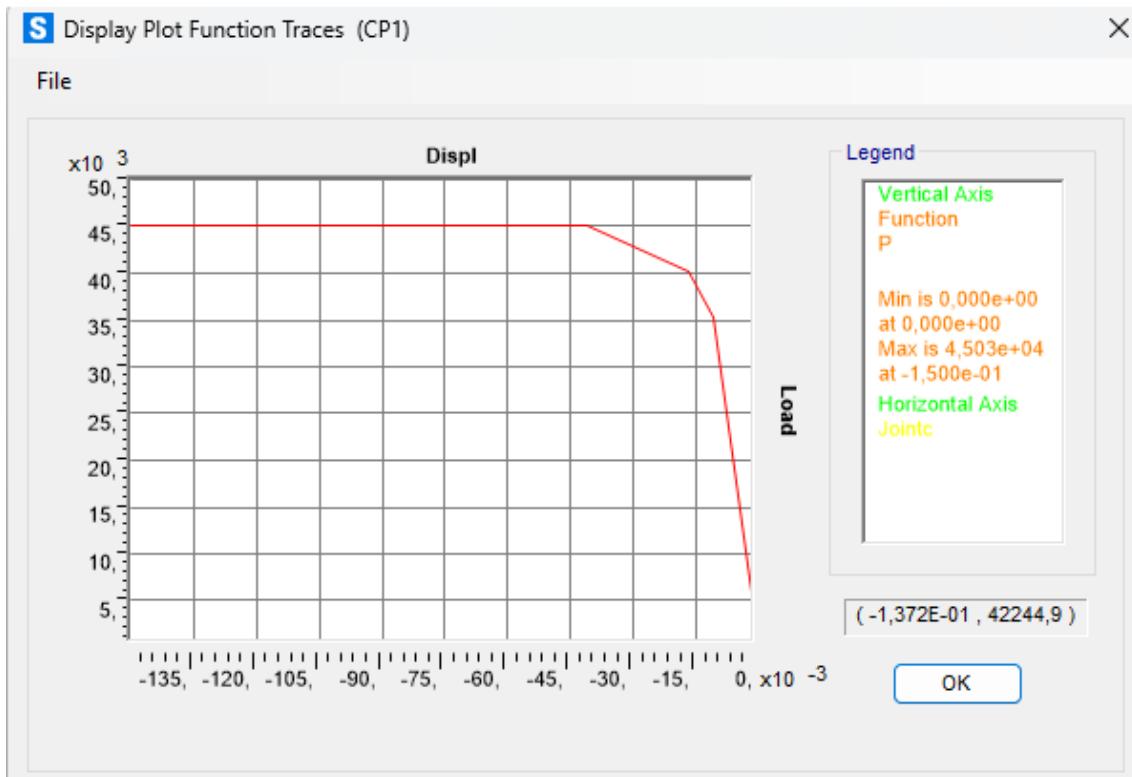


Figura 4.33. Gráfica Desplazamiento en el punto C-Factor de carga

La interpretación de esta curva resulta bastante sencilla. En el eje vertical se muestra el factor de carga aplicado a la estructura, mientras que en el eje horizontal se representa el desplazamiento o giro seleccionado previamente. Cada vértice de la curva corresponde a uno de los instantes en que se forman rótulas plásticas.

La pendiente de cada tramo recto refleja, de alguna manera, la rigidez del pórtico en ese punto y dirección. Como se puede observar, dicha rigidez disminuye conforme se generan nuevas rótulas plásticas. Finalmente, el último tramo se presenta horizontal, indicando una rigidez nula, lo que implica que todas las rótulas plásticas necesarias para formar un mecanismo —el mecanismo de colapso— ya se han desarrollado.

Desde esta ventana también se puede acceder a los valores numéricos de los puntos que componen la gráfica. Al hacer clic en File → Print Tables, se abrirá una ventana que mostrará dichos valores (*Figura 4.34*). En esta tabla se ven representados los puntos de interés del análisis, en este caso, son los puntos en los que se forma una

rótula plástica, a excepción del último el cual se corresponde con el límite de desplazamiento establecido al configurar el caso de carga.

```
CASE CP completo
FUNCTION Desplazamiento en C: Joint C Displacement UZ
FUNCTION P: Function P

      STEP      FUNCTION      FUNCTION
              Desplazamie          P
      0,           0,           0,
      1,      -0,16785   56365,141
      2,      -0,17521   58341,649
      3,      -0,23015   64797,401
      4,      -0,46577   68200,025
      5,           -1,   68200,091
```

Figura 4.34. Resultado del análisis de Cálculo Plástico

Con la obtención de estos puntos, el análisis de colapso plástico de la estructura puede considerarse finalizado, permitiendo así la determinación de la primera curva necesaria para obtener finalmente el valor del factor de carga última.

4.1.6 Análisis de Pandeo

Para realizar un análisis de pandeo, se crea un nuevo caso de carga de tipo "Buckling" y se asignan los patrones de carga que se incluirán en el cálculo. El resultado principal es el factor de carga crítico (λ_{crit}), que indica por cuánto deben multiplicarse todas las cargas para que ocurra el pandeo global de la estructura. Por eso, es fundamental incluir todos los patrones relevantes para el análisis.

En este caso, el análisis de pandeo se realizará utilizando la rigidez al final de un caso no lineal (Figura 4.35), seleccionando la opción "Stiffness at End of Nonlinear Case" y eligiendo el caso de carga correspondiente. Este procedimiento se repite para cada tramo en el que se forman rótulas plásticas, definiendo cargas que monitorizan el desplazamiento hasta el punto en que aparece cada rótula, según el análisis plástico. Así, se obtienen los factores críticos de pandeo en esos puntos, permitiendo construir la curva Factor Crítico de Pandeo – Desplazamiento.

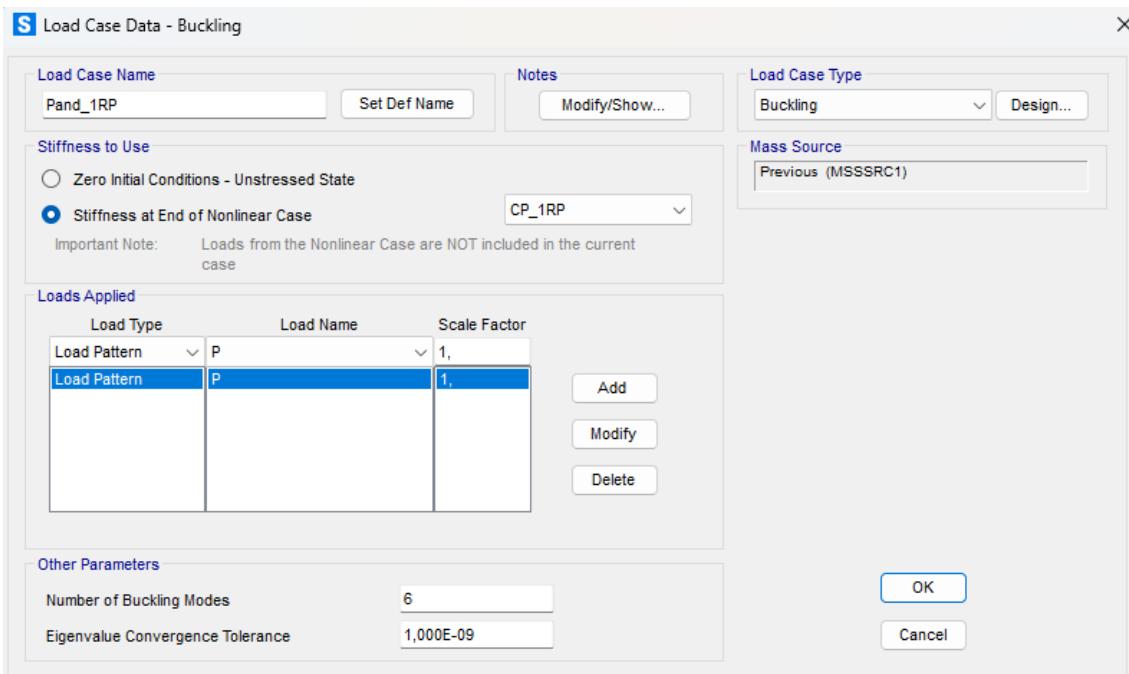


Figura 4.35. Definición caso de carga de Pandeo

Se pueden ajustar dos opciones para este análisis: el número de modos de pandeo a calcular y la precisión numérica. Normalmente, se considera el primer modo, que tiene el factor de carga más bajo, pero a veces es útil conocer modos adicionales. Por defecto, SAP2000 calcula hasta seis modos.

También se puede cambiar la tolerancia de convergencia, aunque esto solo es necesario si los resultados no son correctos.

Los desplazamientos son los resultados más importantes para ver, porque están relacionados con el factor crítico de carga y el modo de pandeo. Al seleccionar la opción para mostrar la forma deformada y elegir el caso de pandeo, se puede

escoger qué modo de pandeo visualizar (*Figura 4.36*). Allí también se muestra el factor de carga asociado y se puede cambiar entre modos usando las flechas.

Cuando se tienen los puntos de la curva Factor crítico de pandeo – Desplazamiento, se termina el análisis y se pueden comparar estas curvas para encontrar el factor de carga última en su punto de cruce.

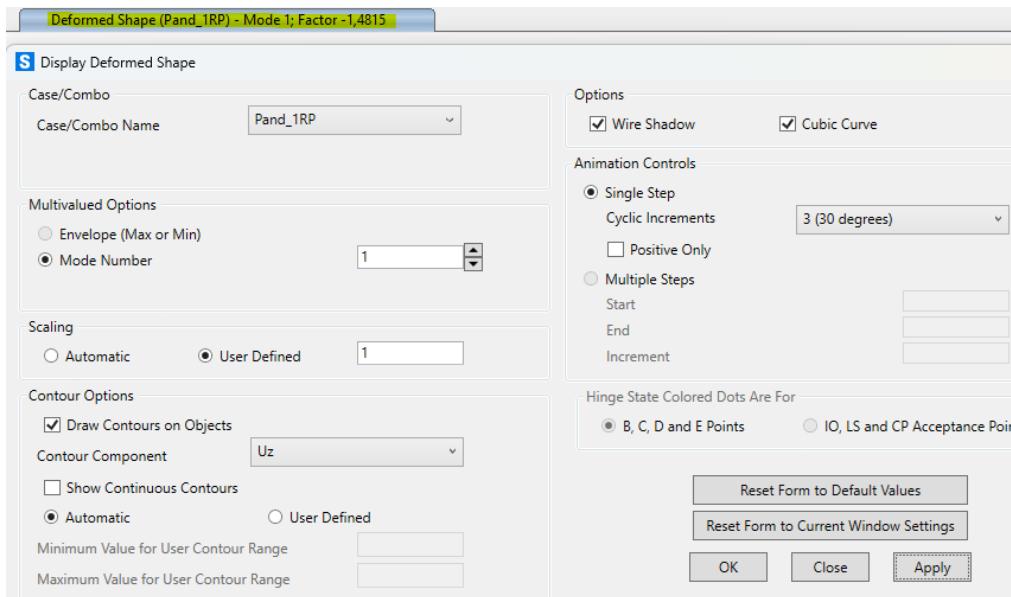


Figura 4.36. Menú de visualización de la deformada

4.1.7 Intersección de curvas

Para finalizar, al representar ambas curvas se puede observar si estas se cruzan o no, en caso de cruzarse se calcula este punto de intersección y de esta manera se obtiene el valor de la carga última de colapso y se puede apreciar en que instante se produce como en el ejemplo representado en la *Figura 4.38*.

Para este caso se tienen los puntos representados en la *Figura 4.37* que dan lugar a gráfica representada.

	Dv (c)	FC colapso	FC crítica
0	0	0	
1	0,12573	5,84791	141,48758
2	0,33215	9,12778	112,73924
3	0,54718	11,09983	26,58682
4	0,99803	11,5271	0,0106
5	1,5	11,52722	0,0106

Figura 4.37. Tabla de resultados del análisis

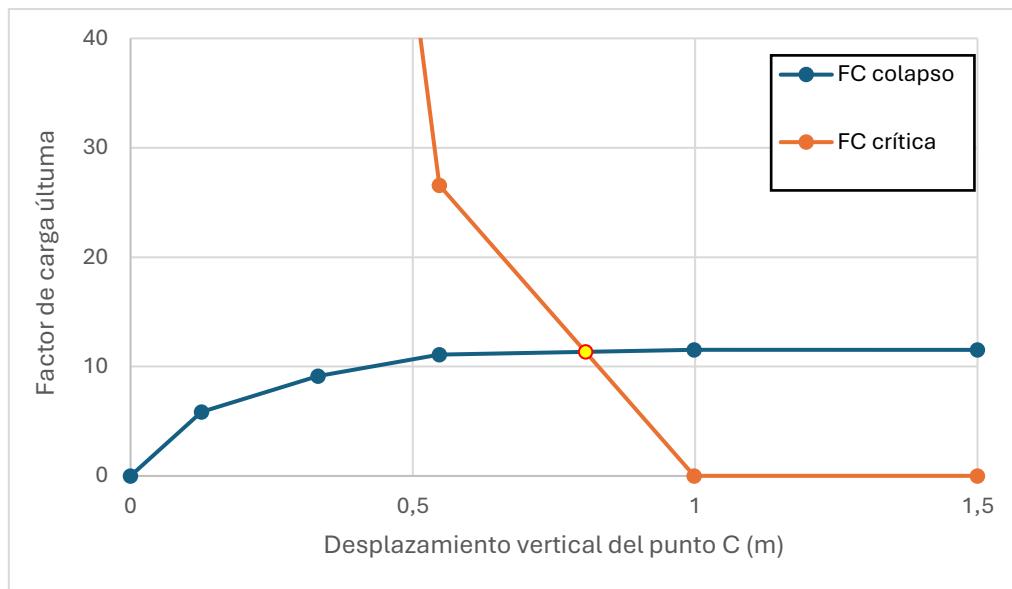


Figura 4.38. Gráfica de Intersección de curvas

Finalmente, se ha calculado el valor del punto de intersección dando como resultado el siguiente en la Figura 4.39:

	U crítico	P crítica (N)
Factor de carga última	0,8058	11,3449

Figura 4.39. Determinación del punto de intersección

De esta forma queda determinado el factor de carga última como 11,35 para el modelo dado con la disposición de cargas determinada.

4.1.8 Determinación de Cargas según CTE

De cara a realizar un estudio con un fundamento más cercano a un caso real es conveniente determinar cargas de viento, nieve y, en caso de que se considere necesario, sobrecarga de uso para una nave industrial ubicada en el polígono de San Cristóbal en Valladolid según el Código Técnico de la Edificación

El Código Técnico de la Edificación (CTE) es el marco normativo fundamental en España para asegurar que los edificios cumplan con requisitos básicos de seguridad, habitabilidad y sostenibilidad [17]. Regula el diseño y la construcción de edificaciones, protegiendo la salud y el bienestar de los usuarios. Cubre aspectos como la integridad estructural, la seguridad frente a incendios, la eficiencia energética y la accesibilidad.

El CTE clasifica los edificios según su uso y aplica diferentes exigencias en función de su categoría. Así, por ejemplo, los requerimientos para una escuela difieren de los de una oficina [17].

Fue aprobado mediante el Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo [17], y ha sido actualizado en distintas ocasiones para adaptarse a los avances técnicos y regulatorios, destacando el RD 732/2019 y el RD 450/2022 [18].

El CTE se organiza en dos partes: la Parte I, que incluye los principios generales y requisitos básicos, y la Parte II, que contiene los Documentos Básicos (DB) donde se desarrollan los criterios técnicos para cumplir dichos requisitos. Su cumplimiento es obligatorio para cualquier edificio sujeto a licencia urbanística, garantizando estándares mínimos de calidad y seguridad.

Dentro de los DB, el Documento Básico de Seguridad Estructural (DB-SE) es clave para asegurar la estabilidad estructural, como establece el artículo 10 del CTE [21]. Este se complementa con otros documentos como el DB-SE-AE (Acciones en la Edificación), el DB-HE (Ahorro de Energía), el DB-SI (Seguridad en caso de Incendio) y el DB-SUA (Seguridad de Utilización y Accesibilidad) [18].

Desde 2021, el Código Estructural, aprobado por el Real Decreto 470/2021, ha reemplazado a la EHE-08 y la EAE-11 como normativa principal para el diseño de estructuras de hormigón y acero. Aunque el CTE sigue proporcionando el marco general, los cálculos específicos deben regirse por este nuevo código.

Principios Generales de las Cargas Estructurales en el CTE DB-SE-AE

El Documento Básico DB-SE-AE (Acciones en la Edificación) es el documento fundamental dentro del CTE que especifica cómo determinar las diversas acciones o cargas que los edificios deben estar diseñados para resistir. Su ámbito de aplicación abarca la determinación de las acciones sobre los edificios para verificar el cumplimiento de los requisitos de seguridad establecidos en el DB-SE [19].

El DB-SE-AE aborda de manera integral los diferentes tipos de cargas que un edificio puede experimentar durante su vida útil, incluyendo las acciones permanentes (por ejemplo, el peso propio de la estructura y los acabados), las acciones variables (como las cargas de uso, viento, nieve, acciones térmicas) y las acciones accidentales (como terremotos, incendios, impactos) [20]. El documento proporciona valores característicos para estas cargas, que representan magnitudes determinadas estadísticamente y se utilizan como base para los cálculos estructurales, con una probabilidad definida de no ser excedidos durante la vida útil prevista del edificio, típicamente 50 años [20, 15].

El objetivo fundamental del requisito básico de “Seguridad Estructural” (SE), según el Artículo 10 de la Parte I del CTE, es asegurar que el edificio mantenga un comportamiento estructural adecuado frente a todas las acciones previsibles durante su construcción y uso [4]. Para ello, el DB-SE establece dos exigencias básicas: SE 1 (Resistencia y estabilidad) y SE 2 (Aptitud al servicio) [21]. La SE 1 asegura que la estructura resista las cargas sin colapsar ni fallar, manteniendo su resistencia y estabilidad, mientras que la SE 2 garantiza que las deformaciones y

vibraciones se mantengan dentro de límites aceptables para el uso previsto del edificio [21].

Los valores característicos de las acciones, definidos en el DB-SE-AE, representan cargas con una probabilidad específica de no ser superadas durante la vida útil, y son la base para los cálculos estructurales [20]. Para las acciones permanentes, se considera el peso propio de los elementos estructurales y no estructurales calculado según dimensiones y densidades. El Anejo C del DB-SE-AE ofrece pesos de materiales comunes. Para las acciones variables, los valores característicos se determinan estadísticamente a partir de datos históricos y se aplican en función de la ubicación geográfica y otras condiciones, como se indica en las secciones y anexos del documento [20-25].

El análisis estructural debe contemplar múltiples combinaciones de acciones permanentes y variables que puedan actuar simultáneamente durante la vida útil. Estas combinaciones, que buscan representar los escenarios más críticos, utilizan valores característicos multiplicados por coeficientes parciales de seguridad y coeficientes de combinación (ψ), que reducen la probabilidad de que varias cargas variables ocurran simultáneamente a su valor máximo. Para los estados límite últimos, los valores de cálculo se obtienen multiplicando los valores característicos por coeficientes mayores a 1 para incorporar incertidumbres [20]. Para los estados límite de servicio, se utilizan valores característicos o coeficientes de combinación que reflejan la frecuencia y duración de las cargas.

Finalmente, el DB-SE-AE señala que, para equipos pesados o acumulaciones de materiales en edificios industriales, los valores estándar pueden no ser suficientes y se deben usar datos específicos de proveedores o propietarios, ya que las cargas en estos casos pueden ser muy diferentes de las de edificios residenciales o de oficinas [19]. La correcta determinación de estas cargas requiere colaboración con el cliente y proveedores para asegurar un diseño estructural seguro y adecuado.

Determinación de las Cargas de Viento para una Nave Industrial en Valladolid

La acción del viento sobre un edificio se trata generalmente como una presión estática (presión estática, q_e) que actúa perpendicular a la superficie de cada elemento expuesto. Esta presión puede ser positiva (actuando hacia la superficie) o negativa (succión, actuando, alejándose de la superficie). El valor de esta presión estática (q_e) en cualquier punto de la superficie del edificio se determina mediante la siguiente fórmula, tal como se especifica en la Sección 3.3.2 del DB-SE-AE [19]:

$$q_e = q_b \cdot c_e \cdot c_p$$

Ecuación 4.1. Cálculo de la presión estática

Donde:

- q_b presenta la presión dinámica básica del viento (presión dinámica del viento). Como enfoque simplificado, se puede adoptar un valor de 0.5 kN/m² para cualquier ubicación dentro del territorio español. Sin embargo, para cálculos más precisos y específicos de la ubicación, especialmente para naves industriales donde las cargas de viento pueden ser significativas, es esencial obtener el valor de q_b del Anejo D del DB-SE-AE en función de la ubicación geográfica del edificio.
- c_e es coeficiente de exposición (coeficiente de exposición). Este coeficiente tiene en cuenta el efecto de la rugosidad del terreno alrededor del edificio y la variación de la velocidad del viento con la altura sobre el nivel del suelo. El valor de c_e se determina en función de la categoría del terreno (grado de aspereza del entorno) y la altura (z) del punto considerado sobre el suelo.
- c_p es el coeficiente de presión (coeficiente de presión). Este coeficiente adimensional depende de la forma del edificio, la dirección del viento en relación con el edificio y la ubicación específica del elemento de superficie considerado (por ejemplo, pared de barlovento, pared de sotavento, cubierta). En el Anejo D.3 del DB-SE-AE se proporcionan diferentes valores de c_p para diversas geometrías de edificios y direcciones de viento.

Presión Dinámica Básica del Viento para Valladolid

Para determinar la velocidad básica del viento (v_b) y la presión dinámica resultante (q_b) para una nave industrial ubicada en el Polígono de San Cristóbal en Valladolid, es necesario consultar el mapa de zonas de viento proporcionado en la Figura D.1 del Anejo D del DB-SE-AE.³⁶ Este mapa divide el territorio español en diferentes zonas de viento (A, B y C) en función de la velocidad básica del viento con un período de retorno de 50 años.

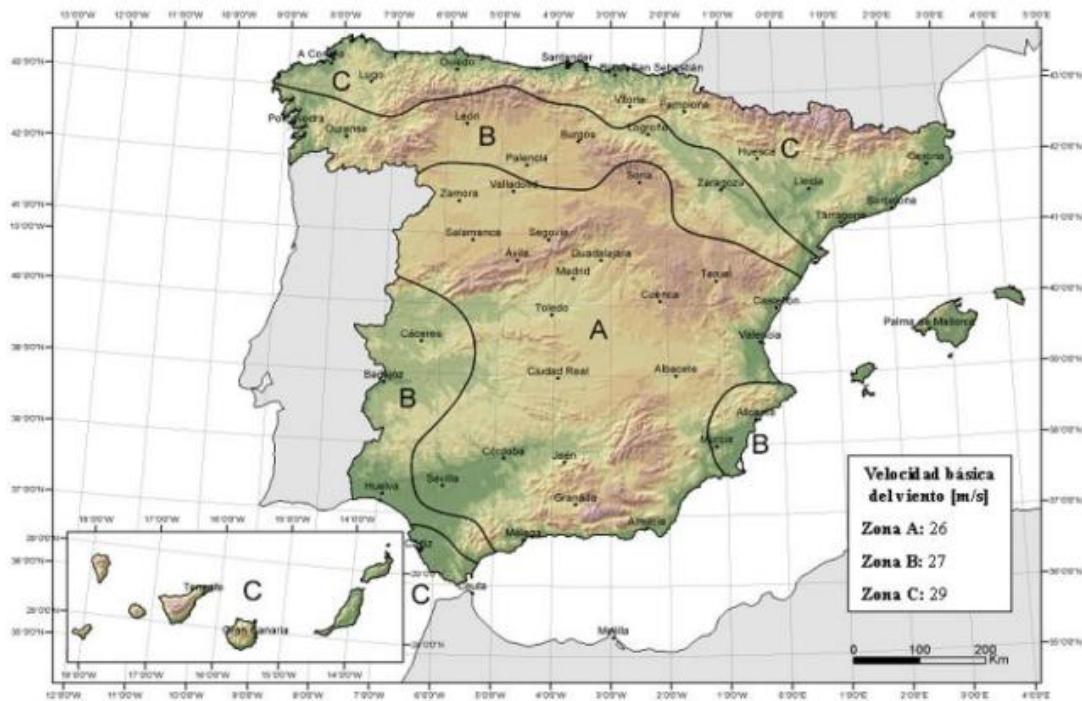


Figura 4.40. Valor básico de la velocidad del viento

Según la ubicación geográfica de Valladolid, es muy probable que el Polígono de San Cristóbal se encuentre dentro de la Zona de Viento A. Según el Anejo D, la Zona de Viento A corresponde a una velocidad básica del viento (v_b) de 26 m/s. [23]

Una vez que se conoce la velocidad básica del viento (v_b), la presión dinámica básica del viento (q_b), también denominada presión dinámica, se puede calcular mediante la fórmula:

$$qb = 0,5 \cdot \delta \cdot Vb^2$$

Ecuación 4.2. Cálculo de la presión dinámica básica del viento

Aquí, δ representa la densidad del aire, que generalmente se puede tomar como 1.25 kg/m³.[22] Sustituyendo el valor de v_b para la Zona A (26 m/s) en la fórmula se obtiene:

$$qb = 0,5 \cdot 1,25 \frac{kg}{m^3} \cdot \left(\frac{26m}{s} \right)^2 = 525 N/m^2 = 0.525 kN/m^2$$

El Anejo D del DB-SE-AE también proporciona convenientemente valores ya calculados de q_b para cada zona de viento en función de la velocidad básica del viento correspondiente. Para la Zona de Viento A, la presión dinámica (q_b) se indica como 0.42 kN/m², para la Zona B como 0.45 kN/m² y para la Zona C como 0.52 kN/m². [22] Por lo tanto, para Valladolid (se va a determinar cómo Zona A), la presión dinámica básica del viento (q_b) que se utilizará en los cálculos de carga de viento es de 0.42 kN/m².

El valor simplificado de 0.5 kN/m² para q_b [19] proporcionado en la Sección 3.3.2 del DB-SE-AE está destinado a casos en los que se desconoce la ubicación geográfica específica del edificio. Para un diseño estructural preciso, especialmente para naves industriales que pueden ser sensibles a las cargas de viento debido a su tamaño y forma, es crucial consultar el Anejo D y determinar la presión dinámica específica de la ubicación en función de la zona de viento para Valladolid (Zona A, con $q_b = 0.42$ kN/m²). Utilizar el valor genérico de 0.5 kN/m² podría llevar a una sobreestimación de las cargas de viento para Valladolid, lo que podría resultar en un diseño antieconómico. Por el contrario, en áreas con zonas de viento más altas, utilizar el valor simplificado podría llevar a una subestimación, comprometiendo la seguridad estructural del edificio. Por lo tanto, identificar la zona de viento correcta para Valladolid (Zona A) y utilizar la presión dinámica correspondiente (0.42 kN/m²) del Anejo D es un enfoque necesario y más preciso para el diseño estructural de la nave industrial en el Polígono de San Cristóbal.

Coeficiente de Exposición basado en el Entorno del Polígono Industrial

El coeficiente de exposición (ce) tiene en cuenta la influencia del terreno circundante en la velocidad del viento en el emplazamiento del edificio y su variación con la altura. Según el Anejo D.2 del DB-SE-AE, la determinación de ce depende de la categoría del terreno (grado de aspereza del entorno) y de la altura (z) sobre el nivel del suelo del punto considerado. [23]

El Anejo D.2 define cinco categorías de terreno (I a V) en función de la rugosidad del terreno a barlovento del edificio. La Categoría IV se describe como "Zona urbana en general, industrial o forestal". Dado que la nave industrial está ubicada en el Polígono de San Cristóbal, que es un parque industrial en Valladolid, es muy probable que la categoría de terreno apropiada para esta ubicación sea la IV.³⁷

El coeficiente de exposición (ce) se calcula mediante las siguientes fórmulas, que incorporan parámetros (k , L , Z) específicos para cada categoría de terreno y la altura (z) sobre el nivel del suelo:

$$c_e = F \cdot (F + 7k)$$

Ecuación 4.3. Cálculo del coeficiente de exposición

Donde $F = k \cdot \ln(\max(z, Z)/L)$. [24]

Los valores de k (coeficiente relacionado con la turbulencia), L (escala de longitud de la turbulencia) y Z (altura mínima) para cada categoría de terreno se proporcionan en la Tabla D.2 del Anejo D.2. Para la Categoría de Terreno IV, los valores son $k = 0.20$, $L = 0.20$ m y $Z = 10$ m. [23]

La altura (z) en estas fórmulas se refiere a la altura sobre el nivel del suelo a la que se está evaluando la presión del viento. Para diferentes partes de la nave industrial (por ejemplo, paredes de diferentes alturas, cubierta), se deberán considerar

diferentes valores de z se usan para determinar el coeficiente de exposición (c_e) correspondiente. Las fórmulas son válidas para alturas (z) de hasta 200 m.

La correcta elección de la categoría de terreno es un aspecto fundamental, ya que afecta directamente al coeficiente de exposición y, por tanto, a las cargas de viento de diseño. Aunque el CTE establece definiciones para cada categoría, su aplicación puede ser interpretativa y debe basarse en las condiciones reales del entorno.

En el caso del Polígono de San Cristóbal, la categoría IV (zona industrial) resulta en principio la más adecuada. No obstante, es necesario valorar la ubicación exacta dentro del polígono, considerando la altura, densidad y distribución de edificaciones cercanas. Una clasificación incorrecta puede derivar en estimaciones inadecuadas de las acciones de viento.

Por ejemplo, si la nave se sitúa en una zona abierta o en el perímetro del polígono, podría ser más apropiada una categoría III. En cambio, una localización rodeada de construcciones altas podría justificar una mayor rugosidad efectiva. Por ello, es recomendable realizar una revisión detallada del entorno, complementada si es posible con datos locales o asesoramiento técnico

Coeficientes de Presión para Diferentes Superficies de la Nave Industrial

El coeficiente de presión (c_p) tiene en cuenta cómo se distribuye la presión del viento sobre las diferentes superficies del edificio en función de su forma y la dirección del viento. El Anejo D.3 del DB-SE-AE proporciona tablas y diagramas que dan valores del coeficiente de presión exterior (c_{pe}) para diversas geometrías de edificios, incluidas las naves industriales [23].

El valor de c_{pe} depende de varios factores, incluyendo la forma y dimensiones del edificio (longitud ' d ', ancho ' b ' y altura ' h '), la pendiente de la cubierta (si la hay) y la zona específica de la superficie considerada (por ejemplo, pared de barlovento, pared de sotavento, pared lateral, zonas de cubierta A, B, C, etc.) [19]. Estas zonas se definen típicamente en función de las dimensiones del edificio. Por ejemplo, para las paredes, los coeficientes de presión varían dependiendo de la relación de las dimensiones del edificio y la ubicación en la pared. Para las cubiertas, los coeficientes dependen de la inclinación de la cubierta y la dirección del viento.

Para las naves industriales típicas con planta rectangular y cubiertas a dos aguas, la Figura D.3.1 y las Tablas D.4, D.5 y D.6 del Anejo D.3 proporcionan coeficientes de presión exterior (c_{pe}) para diferentes direcciones de viento (0° y 90° con respecto al eje longitudinal del edificio) y diferentes zonas en las paredes y la cubierta, en función de las relaciones de aspecto del edificio (h/d o h/b) y la ubicación relativa en la superficie [23]. Las dimensiones ' d ' y ' b ' representan las dimensiones del edificio en la dirección del viento y perpendicular a él, respectivamente, y ' h ' es la altura hasta

el alero. Para las cubiertas a dos aguas, el ángulo de la pendiente de la cubierta también juega un papel crucial en la determinación de los valores de c_{pe} .

Además del coeficiente de presión exterior (c_{pe}), también se debe considerar el coeficiente de presión interior (c_{pi}), especialmente si la nave industrial tiene aberturas significativas, como puertas y entradas de ventilación [19]. El valor de c_{pi} depende del tamaño y la distribución de las aberturas en la envolvente del edificio. La Sección 3.3.4 del DB-SE-AE proporciona reglas para determinar c_{pi} . Si el área de las aberturas en una cara del edificio es significativamente mayor que en otras caras, c_{pi} puede ser positivo (presión interior) o negativo (succión interior), lo que afecta la carga de viento neta en las superficies del edificio. Para edificios sin una abertura dominante, generalmente se puede asumir un valor de $c_{pi} = \pm 0.2$. Para edificios con aberturas dominantes, c_{pi} puede variar de -0.3 a +0.75 dependiendo de la relación de las áreas de apertura.

Para las naves industriales con marquesinas u otras estructuras de cubierta donde el viento puede actuar tanto en las superficies superiores como inferiores, las cargas de viento deben determinarse considerando la diferencia de presión entre estas superficies, teniendo en cuenta los coeficientes de presión apropiados para cada superficie [31].

Los coeficientes de presión (cp) no son uniformes en todas las superficies del edificio y varían significativamente dependiendo de la dirección del viento y la ubicación específica en las paredes y la cubierta [19]. Por ejemplo, la pared de barlovento experimentará una presión positiva, mientras que la pared de sotavento y la cubierta típicamente experimentarán succión (presión negativa). Diferentes zonas de la cubierta, como la pendiente de barlovento, la pendiente de sotavento y las áreas cerca de los bordes, tendrán diferentes coeficientes de presión. La identificación precisa de los coeficientes de presión relevantes para cada parte de la envolvente de la nave industrial es esencial para calcular correctamente las cargas de viento que actúan sobre esos elementos y garantizar su adecuación estructural. Tratar la carga de viento como una presión única y uniforme que actúa sobre todo el edificio sería una simplificación excesiva y podría llevar a un diseño inadecuado de ciertos componentes estructurales. Por ejemplo, si las fuerzas de succión en la cubierta se subestiman, el revestimiento de la cubierta y la estructura de soporte podrían no estar suficientemente anclados. Del mismo modo, subestimar la presión en la pared de barlovento podría llevar a una resistencia insuficiente en los paneles de la pared y sus conexiones. Consultar las tablas y diagramas detallados en el Anejo D.3 del DB-SE-AE, y considerar cuidadosamente la geometría del edificio y las posibles presiones internas, es crucial para determinar con precisión la distribución de las cargas de viento en la nave industrial.

Zona de Viento	V _b (m/s)	q _b (kN/m ²)
A	26	0.42
B	27	0.45
C	29	0.52

Figura 4.41. Tabla representativa de la Velocidad Básica del Viento (V_b) y Presión Dinámica (q_b) para Zonas de Viento Españolas (Anejo D, DB-SE-AE)

Para determinar la carga de viento según el Código Técnico de la Edificación (CTE) para una nave industrial ubicada en el Polígono de San Cristóbal de Valladolid, se utiliza la fórmula:

$$q_e = q_b \cdot c_e \cdot c_p$$

Donde:

q_b: Presión dinámica básica del viento.

c_e: Coeficiente de exposición, que depende de la altura y del entorno.

c_p: Coeficiente eólico o de presión, relacionado con la forma y orientación de la superficie respecto al viento.

$$q_b = 0,42 \text{ kN/m}^2$$

El Polígono de San Cristóbal es una zona industrial, lo que corresponde a un grado de aspereza IV. Para una altura típica de nave industrial de 9 metros, el coeficiente de exposición es:

$$c_e \approx 1,7$$

El valor de c_p depende de la geometría y orientación de la nave. Para una estimación conservadora, se puede considerar:

$$c_p = 0,8 \text{ para presión (viento de frente).}$$

$$c_p = -0,5 \text{ para succión (viento en la cubierta).}$$

Cálculo de la presión estática del viento (q_e)

Para presión frontal:

$$q_e = 0,42 \cdot 1,7 \cdot 0,8 \approx 0,571 \text{ kN/m}^2$$

Para succión en cubierta:

$$q_e = 0,42 \cdot 1,7 \cdot (-0,5) \approx -0,357 \text{ kN/m}^2$$

Estos valores son aproximados y deben ajustarse según las características específicas de la nave y su entorno. Para un diseño preciso, se recomienda consultar el Anejo D del DB-SE-AE del CTE y, si es necesario, realizar un estudio detallado con un profesional especializado

cp (fachada lateral): Depende de la geometría de la nave. Según el Anejo D del CTE:

Para pared lateral a barlovento: $c_p \approx 0,8$

Para pared lateral a sotavento: $c_p \approx -0,5$

Para presión neta total en una nave cerrada, se considera diferencia:

$$c_{p\ neto} = c_{p\ barlovento} - c_{p\ sotavento} = 0,8 - (-0,5) = 1,3$$

Ecuación 4.4. Cálculo de presión neta total

$$qe = 0,42 \cdot 1,7 \cdot 1,3 \approx 0,928 \text{ kN/m}^2$$

Presión neta de viento lateral sobre la nave: $\sim 0,93 \text{ kN/m}^2$

Cálculo de las Cargas de Nieve para una Nave Industrial en Valladolid

La carga de nieve en una cubierta (q_n) se determina mediante la fórmula:

$$q_n = \mu \cdot sk \cdot C_{ex}$$

Ecuación 4.5. Cálculo de la carga de nieve en una cubierta

En algunos contextos, el factor de exposición podría denotarse como F_{ex} en lugar de C_{ex} . [19]

Donde:

- μ es el coeficiente de forma (coeficiente de forma) de la cubierta. Este coeficiente tiene en cuenta la geometría de la cubierta, principalmente su pendiente y forma, que influyen en cómo se acumula la nieve sobre ella. Los valores de μ se proporcionan en la Sección 3.5.3 y la Figura 3.6 del DB-SE-AE para diversas configuraciones de cubierta.
- s_k es la carga característica de nieve sobre el terreno (valor característico de la carga de nieve sobre un terreno horizontal). Este valor representa la carga máxima de nieve esperada sobre una superficie horizontal en la ubicación del edificio y depende de la altitud y la zona climática de nieve. Se determina utilizando el Anejo E del DB-SE-AE.

- C_{ex} (o F_{ex}) es el factor de exposición (factor de exposición). Este factor tiene en cuenta la exposición del edificio al viento, lo que puede afectar la acumulación de nieve en la cubierta. Considera si el edificio está ubicado en un sitio protegido, normal o expuesto.

Carga Característica de Nieve sobre el Terreno para Valladolid

Para determinar la carga característica de nieve sobre el terreno (s_k) para una nave industrial en el Polígono de San Cristóbal en Valladolid, es necesario consultar el Anejo E del DB-SE-AE.[21] El Anejo E.2 proporciona un mapa de España dividido en diferentes zonas de nieve en función de la carga característica de nieve sobre el terreno con un período de retorno de 50 años. La Tabla E.2 indica entonces los valores de s_k (en kN/m²) para cada zona de nieve en función de la altitud del emplazamiento.

La altitud del Polígono de San Cristóbal en Valladolid es de aproximadamente 700-800 metros sobre el nivel del mar. La propia ciudad de Valladolid tiene una altitud de alrededor de 734 metros, y el cercano Cerro de San Cristóbal alcanza los 843 metros.⁴⁷ Por lo tanto, es probable que el parque industrial esté situado dentro de este rango de altitud.

Al consultar el mapa de zonas de nieve en la Figura E.2 del Anejo E, se debe identificar la zona de nieve para Valladolid. Una vez determinada la zona de nieve (parece ser la Zona 1 según la ubicación geográfica general), se debe utilizar la Tabla E.2 para encontrar el valor de s_k correspondiente para la altitud de 700-800 metros. Para la Zona 1 y altitudes inferiores a 1000 metros, la carga característica de nieve sobre el terreno (s_k) suele ser de 0.4 kN/m².[19] Algunas fuentes también podrían referirse a la Tabla 3.8 de la Sección 3.5.2, que también proporciona valores de s_k para diferentes provincias y altitudes.

La Sección 3.5.1 del DB-SE-AE establece que para cubiertas planas de edificios de varias plantas situados en zonas con una altitud inferior a 1000 m, se puede considerar una carga de nieve simplificada de 1.0 kN/m².[19] Sin embargo, para naves industriales, especialmente aquellas con cubiertas ligeras o estructuras sensibles a cargas verticales, generalmente se recomienda realizar un cálculo más preciso utilizando la carga característica de nieve sobre el terreno (s_k) y los coeficientes de forma y exposición apropiados.

La carga característica de nieve sobre el terreno (s_k) depende en gran medida tanto de la altitud como de la zona de nieve específica de la ubicación. [19] Incluso dentro de la misma provincia, las variaciones en la altitud pueden llevar a diferentes valores de s_k , como se observa en la Tabla E.2 del Anejo E. Por lo tanto, utilizar la altitud más precisa para el Polígono de San Cristóbal es crucial para determinar el valor de s_k correcto y garantizar la seguridad estructural de la nave industrial contra las cargas de nieve. Si bien la ciudad de Valladolid tiene una altitud reportada de 734 m, el

Polígono Industrial San Cristóbal podría tener una elevación ligeramente diferente. La consulta de mapas topográficos detallados o datos de sistemas de información geográfica (SIG) locales para la ubicación específica del parque industrial podría proporcionar una altitud más precisa. Esta altitud precisa debe utilizarse junto con el mapa de zonas de nieve y la Tabla E.2 del Anejo E para obtener la carga característica de nieve sobre el terreno (s_k) más precisa para los cálculos de diseño. Utilizar un valor generalizado para toda la provincia podría no tener en cuenta las variaciones locales y podría llevar a una subestimación o sobreestimación de la carga de nieve.

Coeficientes de Forma para Cubiertas Industriales

El coeficiente de forma (μ) tiene en cuenta la distribución de la nieve en la cubierta en función de su geometría. La Sección 3.5.3 y la Figura 3.6 del DB-SE-AE proporcionan valores de μ para diversos tipos y pendientes de cubierta [19].

Para cubiertas planas o cubiertas con una pendiente (α) $\leq 30^\circ$, el coeficiente de forma μ suele tomarse como 0.8. Muchas naves industriales tienen cubiertas relativamente planas o de baja pendiente, lo que hace que este valor sea relevante.

Para cubiertas inclinadas con una pendiente superior a 30° , el valor de μ depende del ángulo de inclinación (α). Para cubiertas de una sola pendiente, μ varía de 0.8 para 30° a 0.0 para 60° . Para cubiertas a dos aguas, se dan diferentes valores para las pendientes de barlovento y sotavento en función de la inclinación de la cubierta. Por ejemplo, para una inclinación de cubierta de 30° , $\mu = 0.8$ para ambas pendientes, mientras que, para inclinaciones más pronunciadas, la pendiente de barlovento podría tener un valor de μ más bajo que la pendiente de sotavento debido al deslizamiento de la nieve.

La Sección 3.5.4 del DB-SE-AE también aborda la acumulación de nieve en los valles de las cubiertas a múltiples aguas y cerca de las proyecciones de la cubierta, lo que puede llevar a cargas de nieve locales más altas. Se proporcionan coeficientes de forma específicos para estas situaciones, y deben considerarse si la nave industrial tiene tales configuraciones de cubierta [19].

El coeficiente de forma (μ) refleja directamente cómo se acumulará la nieve en las diferentes geometrías de cubierta que se encuentran comúnmente en las naves industriales.[19] Dado que muchas naves industriales presentan cubiertas de gran luz y baja pendiente, es probable que el coeficiente de forma para cubiertas planas ($\mu = 0.8$) sea aplicable. Sin embargo, si el diseño del edificio incluye cubiertas inclinadas, particularmente con pendientes superiores a 30° , se deben utilizar los coeficientes de forma correspondientes de la Figura 3.6 del DB-SE-AE para tener en cuenta con precisión la distribución no uniforme de la nieve. Además, cualquier característica como parapetos, escalones en la cubierta o estructuras adyacentes que pudieran causar una acumulación significativa de nieve requerirá una consideración cuidadosa y el uso de los coeficientes de forma apropiados para la nieve acumulada. Asumir una carga de nieve uniforme basada únicamente en la

carga de nieve sobre el terreno (s_k) sería inexacto, ya que la geometría de la cubierta juega un papel crucial en cómo se acumula la nieve. Una cubierta plana retendrá más nieve que una cubierta con mucha pendiente, y las áreas donde la nieve puede acumularse, como cerca de los parapetos o en los valles de la cubierta, experimentarán cargas más altas. Consultar la Figura 3.6 y la Sección 3.5.3 del DB-SE-AE es esencial para seleccionar el coeficiente de forma (μ) correcto que corresponda al diseño específico de la cubierta de la nave industrial en Valladolid, asegurando que el análisis estructural tenga en cuenta la distribución real de la carga de nieve.

Consideraciones sobre la Exposición al Viento y la Acumulación de Nieve

El factor de exposición ***Cex*** (o ***Fex***) modifica la carga característica de nieve en la cubierta en función de la exposición del edificio al viento, tal como se describe en la Sección 3.5.1 del DB-SE-AE. [19]

Si la nave industrial está ubicada en un sitio bien protegido del viento (por ejemplo, rodeada de edificios más altos o vegetación densa), la carga característica de nieve sobre el terreno (s_k) puede reducirse multiplicándola por un factor de exposición de 0.8 (una reducción del 20%).

Por el contrario, si el edificio está situado en un lugar particularmente expuesto al viento (por ejemplo, un campo abierto o en la cima de una colina), la carga característica de nieve sobre el terreno debe aumentarse multiplicándola por un factor de exposición de 1.2 (un aumento del 20%).

Para edificios ubicados en áreas con exposición normal al viento, el factor de exposición se toma como 1.0 y no se realiza ningún ajuste a la carga característica de nieve sobre el terreno.

En el caso de una nave industrial en el Polígono de San Cristóbal, el grado de exposición al viento debe evaluarse en función de la ubicación específica dentro del parque y el entorno circundante. Si el edificio está protegido por otras unidades industriales o características del terreno, podría ser aplicable una reducción. Si está ubicado en una zona más abierta del parque, podría ser necesario un aumento. En ausencia de información específica que sugiera lo contrario, a menudo se asume un factor de exposición normal de 1.0.

Además, es importante considerar el potencial de acumulación de nieve por viento y la distribución desigual de la carga de nieve, especialmente para cubiertas con parapetos, cambios de altura o estructuras adyacentes. [19] La Sección 3.5.4 del DB-SE-AE proporciona orientación sobre el cálculo de las cargas de nieve debidas a la acumulación en situaciones específicas, como cerca de escalones en la cubierta o cubiertas inferiores adyacentes. Estas consideraciones podrían llevar a cargas de nieve locales significativamente más altas que las calculadas utilizando la fórmula básica. La exposición al viento de la nave industrial dentro del Polígono de San

Cristóbal influirá directamente en la cantidad de nieve que finalmente se acumulará en su cubierta. Un entorno de parque industrial podría ofrecer cierto grado de protección contra los fuertes vientos en comparación con un sitio completamente expuesto. Sin embargo, la ubicación específica del edificio dentro del Polígono, su orientación y la presencia de estructuras cercanas determinarán su exposición real al viento. Es necesario realizar una evaluación cuidadosa del sitio para determinar si el edificio debe clasificarse como protegido, normal o expuesto al viento y aplicar el factor de exposición correspondiente al cálculo de la carga de nieve. Además, no se debe pasar por alto en el proceso de diseño el potencial de acumulación de nieve inducida por el viento, que puede llevar a áreas localizadas de alta acumulación de nieve, especialmente en cubiertas con variaciones de altura o parapetos.

Para determinar con precisión el factor de exposición de la nave industrial, se requiere un análisis detallado de sus alrededores dentro del Polígono de San Cristóbal. Este análisis debe considerar la densidad y la altura de los edificios adyacentes, la presencia de barreras naturales o artificiales que puedan obstruir el flujo del viento y las direcciones predominantes del viento en la región de Valladolid. Si el edificio está rodeado de cerca por otras estructuras de tamaño similar o mayor, podría considerarse protegido. Si se encuentra relativamente aislado en una zona abierta del parque industrial, podría clasificarse como expuesto. En la mayoría de los casos dentro de un parque industrial moderadamente desarrollado, es probable que sea apropiado un factor de exposición normal. Sin embargo, se debe prestar especial atención a los edificios ubicados en la periferia del parque o aquellos con geometrías de cubierta inusuales que podrían ser propensos a una acumulación significativa de nieve.

Fórmula del CTE para altitudes $\geq 500m$:

$$s_0 = 0,7 + 0,001 \cdot (h - 500)$$

Ecuación 4.6. Cálculo del factor de exposición para altitudes mayores o iguales a 500m

Para una altitud (h) de 750m:

$$s_0 = 0,7 + 0,001 \cdot (750 - 500) = 0,7 + 0,25 = 0,95 \text{ kN/m}^2$$

El coeficiente de forma μ depende de la pendiente de la cubierta, para una cubierta a dos aguas simétrica con pendiente $\theta = 11,3^\circ$ si $5^\circ < \theta < 30^\circ$ y no hay acumulación de nieve especial: $\mu = 0,8$

Por tanto, la carga de nieve sería: $s_d = \mu \cdot s_0 = 0,8 \cdot 0,95 = 0,76 \text{ kN/m}^2$

Ecuación 4.7. Cálculo de la carga de nieve

Para simplificar como una carga puntual se va a calcular la carga de nieve para la longitud real del faldón:

$$\tan(\theta) = \frac{2,5}{12,5} \rightarrow \theta \approx 11,3^\circ$$

$$L = \frac{2,5}{\sin(11,3^\circ)} \approx 12,75m$$

Aplicando sobre cada uno de los faldones: $0,76 \cdot 12,75 = 9,69 \text{ kN}$

Carga total sobre los dos faldones: $9,69 \cdot 2 = 19,38 \text{ kN}$

Se va a simplificar como tres cargas puntuales de igual magnitud:

$$19,38/3 = 6,46 \text{ kN}$$

Conclusiones y Recomendaciones

Para determinar las cargas de viento, nieve y sobrecarga de uso en una nave industrial situada en el Polígono de San Cristóbal (Valladolid), se siguen los criterios establecidos en el Código Técnico de la Edificación (CTE), en especial el Documento Básico de Seguridad Estructural (DB-SE) y el DB-SE-AE (Acciones en la Edificación).

Viento: se debe identificar la zona de viento y la altitud del emplazamiento según los Anejos D y E del DB-SE-AE, para obtener la presión dinámica básica (q_b). También se debe evaluar la categoría del terreno (grado de aspereza) para determinar el coeficiente de exposición (ce) aplicable al cálculo.

Se adopta finalmente una carga puntual horizontal de 8,84 kN aplicada en el extremo superior de cada pilar.

Nieve: la carga de nieve sobre el terreno (s_k) se calcula en función de la altitud. Se aplica el coeficiente de forma (μ) según la pendiente y tipo de cubierta. Para una cubierta a dos aguas con $11,3^\circ$ de pendiente, se adopta $\mu = 0,8$. Deben considerarse también factores de exposición al viento si hay riesgo de acumulación de nieve.

Se adopta finalmente una carga total de 19,38 kN, repartida en tres cargas puntuales verticales de 6,46 kN sobre la cercha.

Sobrecarga de uso: en caso de que existan entreplantas, pasarelas o zonas de uso específico, podría aplicarse una sobrecarga de uso de acuerdo con la Tabla 3.1 del DB-SE-AE.

En tal caso, se tomaría como referencia una carga lineal vertical de 5,00 kN/m. Sin embargo, esta carga no se considerará en las simulaciones estructurales actuales.

Se recomienda utilizar software de análisis estructural que cumpla con el CTE para aplicar correctamente todas las combinaciones de carga. También es aconsejable consultar con técnicos o ingenieros estructurales familiarizados con la normativa para garantizar el cumplimiento técnico y legal. Es importante considerar todas las combinaciones de cargas permanentes, variables y accidentales indicadas en el DB-SE.

CAPÍTULO 5: *RESULTADOS*

5 RESULTADOS

Se van a simular diferentes casos variando algunos de los parámetros que pueden tener una influencia en los resultados que se van a obtener.

En primer lugar, se va a comenzar realizando la simulación de una estructura sencilla, como es un pórtico plano recto con unas dimensiones determinadas, con una distribución de cargas similar a las que se ven en los problemas de cálculo plástico y en las prácticas de la asignatura Estructuras y Construcciones Industriales. Una vez determinado el modelo se va a variar la sección de la barra del dintel con el objetivo de ver la influencia de este parámetro sobre el objetivo de esta simulación que es el valor del factor de carga última.

El siguiente paso es manteniendo la misma distribución de cargas añadir cierta complejidad al modelo modificando la geometría del pórtico haciendo de este un pórtico plano a dos aguas de unas dimensiones determinadas. De nuevo, una vez determinado el modelo se va a variar la sección de las barras de ambos dinteles con el objetivo de ver la influencia de este parámetro sobre el objetivo de esta simulación que es el valor del factor de carga última

Hasta aquí el objetivo de estos casos era realizar un análisis previo y generalista sin entrar en detalle, esto permite obtener cierto conocimiento preliminar sobre el comportamiento de la estructura.

A partir de este punto el objetivo es obtener unos resultados más cercanos a un caso real de una nave compuesta por tres pórticos en serie situada en el Polígono de san Cristóbal, Valladolid. Para ello habrá que consultar el Código Técnico de la Edificación, el cual es un documento oficial que agrupa las normativas reguladoras de la construcción de edificios en España.

Una vez se determinan las cargas equivalentes a un caso real tras consultar el CTE estas se van a aplicar en primer lugar en el mismo pórtico plano a dos aguas que se ha modelado en el caso anterior, en este caso se va a variar la sección de las barras de ambos dinteles, así como también con el objetivo de ver la influencia de este parámetro sobre el objetivo de esta simulación que es el valor del factor de carga última. Se va a seleccionar una de estas configuraciones para continuar con el estudio variando otros parámetros como las condiciones de contorno y el material.

Finalmente, una vez se ha analizado cómo afectan estos parámetros al pórtico plano a dos aguas sencillo se va a modelar una estructura más compleja que consta de tres pórticos planos en serie unidos de manera rígida. Esta estructura se va a modelar con una configuración determinada por los análisis previos en base a los resultados obtenidos. Para esta última estructura se van a estudiar dos configuraciones distintas cuya única diferencia será el límite elástico del acero utilizado. De esta manera obtendremos un resultado dos resultados de factor de carga última para la estructura final, siendo uno de ellos un escenario más conservador que el otro.

5.1 CASO I: PÓRTICO RECTO

En este primer caso se tiene un pórtico de 20m de ancho y 8m de altura con una distribución de cargas en la que se tiene una carga horizontal en el punto D de valor 1000N en sentido positivo y una carga vertical en el punto C de un valor de 400N en sentido de la gravedad, estas cargas se pueden apreciar en las *Figuras 5.1 y 5.2*. Esta distribución de cargas se va a mantener durante todo este Caso I.

Se trata de un pórtico con dos apoyos empotrados con lo cual se tiene una estructura con un grado de hiperestaticidad de tres, siendo así una estructura hiperestática.

Al ser un pórtico con dos empotramientos esto hace que se tengan más puntos con posibilidad de formar una rótula plástica siendo estos los puntos A, B, C, D, E.

De esta forma, al tratarse de un caso en una fase muy inicial del análisis permite apreciar mejor el cambio de rigidez en cada instante en el que se forman las rótulas plásticas.

Este modelo se va a estudiar con tres configuraciones diferentes de perfiles las cuales se van a explicar más detalladamente en los siguientes puntos.

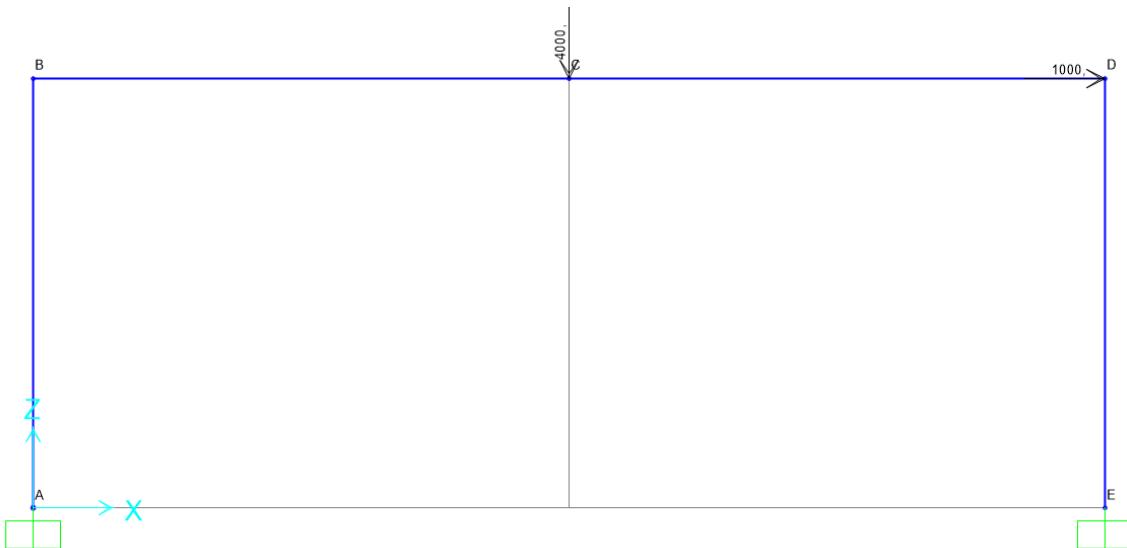


Figura 5.1. Representación distribución de cargas Caso I

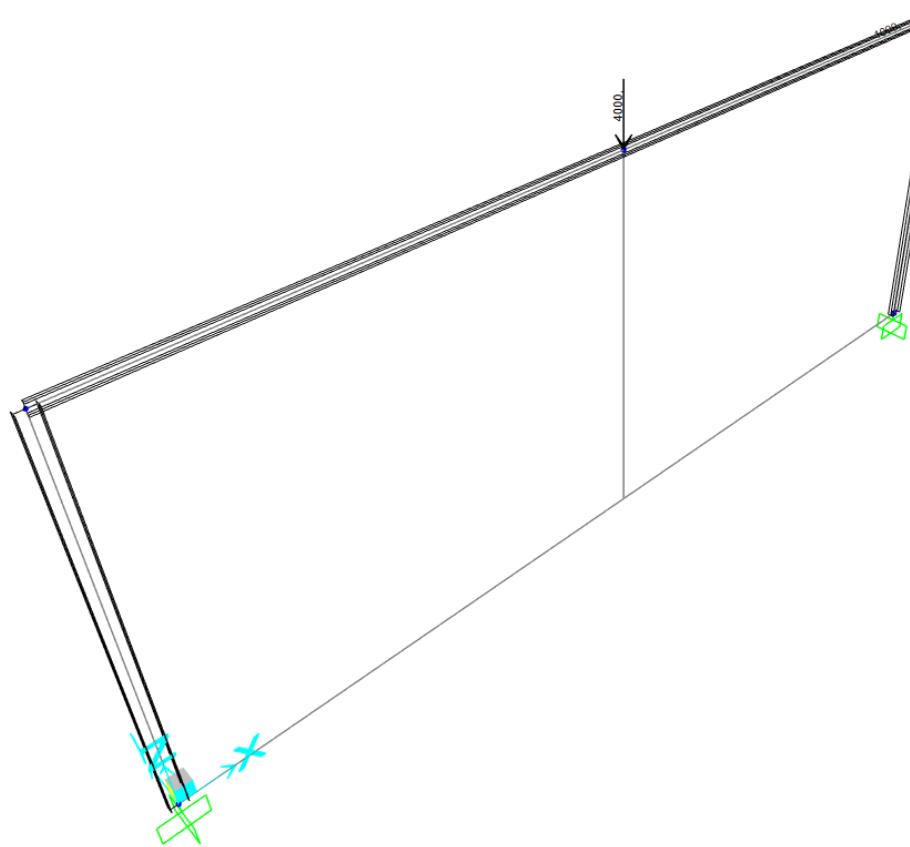


Figura 5.2. Representación 3D modelo Caso I

5.1.1 Caso I: IPE300

Para este caso se ha utilizado una configuración en la que todas las barras tienen un perfil IPE300 de acero S275 como se puede ver en la Figura 5.3.

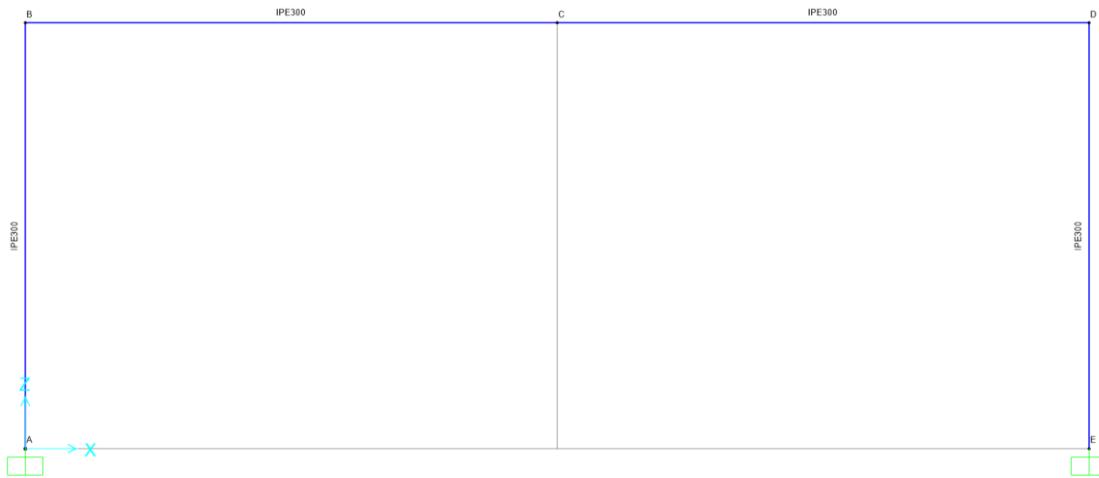


Figura 5.3. Representación modelo Caso I: IPE300

Tras el estudio de la estructura frente a colapso plástico se han obtenido los siguientes resultados de la Tabla 5.1 que se pueden ver representados gráficamente en la Figura 5.4.

	Dv (c)	FC Colapso
0	0	0
1	0,2109	14,80286
2	0,29165	16,13135
3	0,51833	17,27015
4	1	17,27042

Tabla 5.1. Resultados análisis por colapso plástico

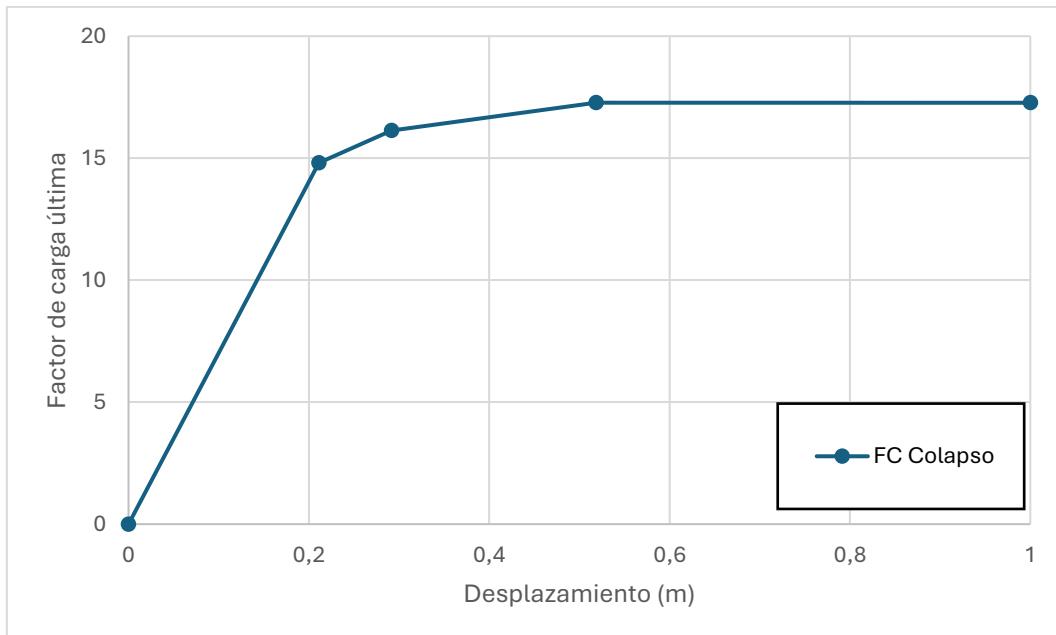


Figura 5.4. Gráfica de los resultados del análisis por colapso plástico

Ahora se procede al análisis de la estructura por pérdida de estabilidad del cual se obtienen los resultados de la Tabla 5.2 representados gráficamente en la Figura 5.5.

	Dv (c)	FC Crítica
1	0,2109	90,50966
2	0,29165	29,90865
3	0,51833	0,01261
4	1	0,01261

Tabla 5.2. Resultados análisis por pérdida de estabilidad

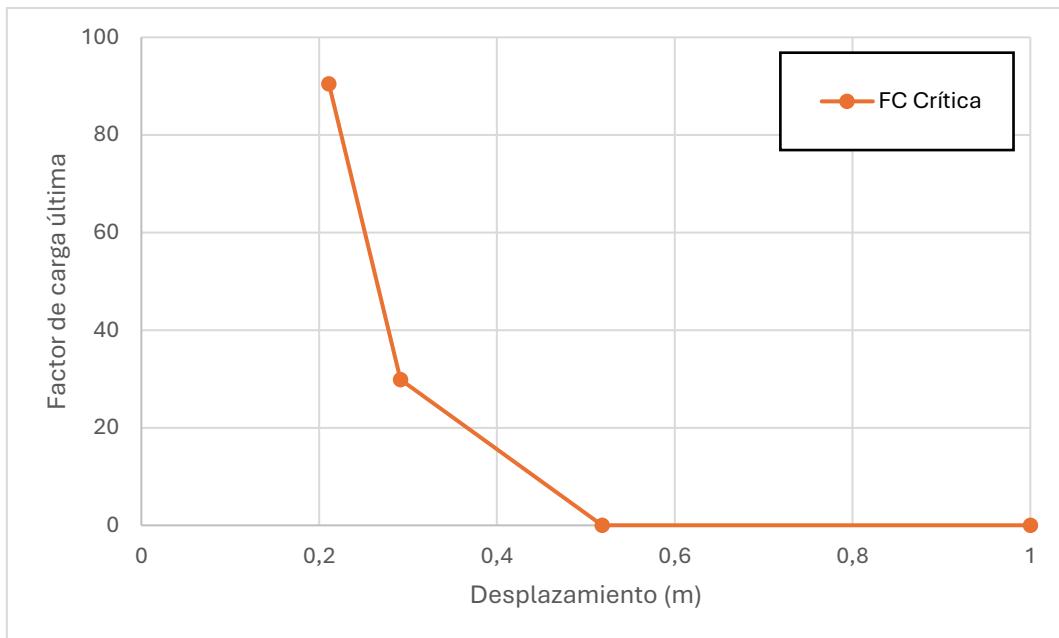


Figura 5.5. Gráfica de los resultados del análisis por pérdida de estabilidad

Para obtener el valor del factor de carga última de la estructura se procede a representar ambas curvas conjuntamente y calcular el punto de intersección de estas, esta representación gráfica se puede ver en la *Figura 5.6* obteniendo así el punto de intersección como el representado en la *Tabla 5.3*.

	U crítico (m)	P crítica (N)
Factor de carga última	0,3923	16,6369

Tabla 5.3. Valores del punto de intersección

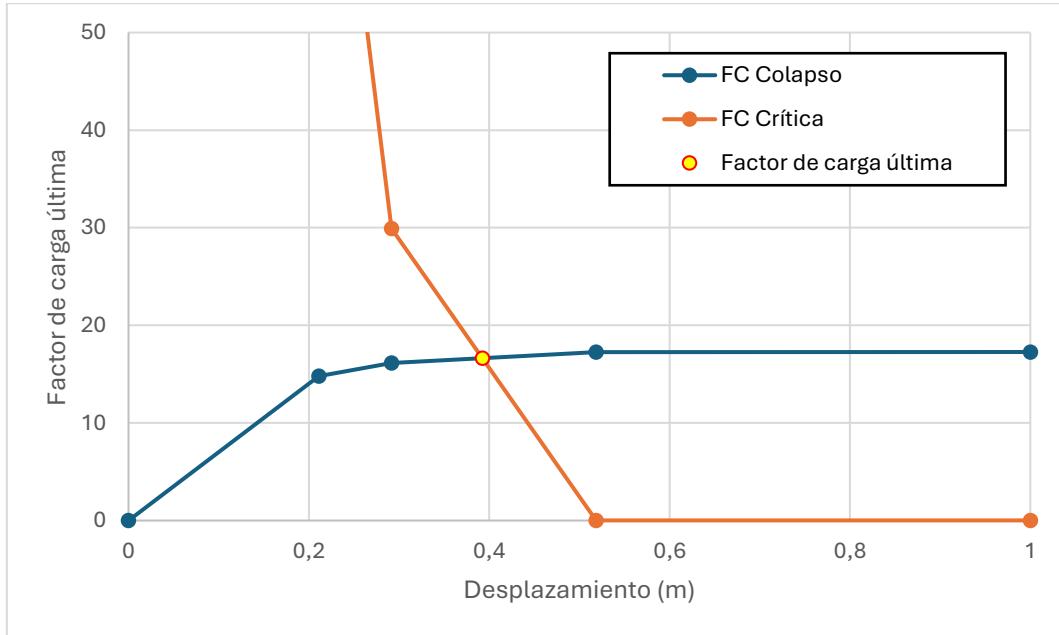


Figura 5.6. Gráfica del punto de intersección correspondiente al factor de carga última

Se puede apreciar que la estructura va a fallar por pandeo tras formarse la tercera rótula plástica y previamente a que se forme la cuarta.

De esta forma se obtiene que el factor de carga última, aproximando a dos decimales, para esta estructura con sus condiciones de contorno y distribución de cargas determinados es:

$$\lambda_u = 16,64$$

5.1.2 Caso I: IPE300+200

Para este caso se ha utilizado una configuración en la que las barras de los pilares tienen un perfil IPE300 y los dinteles un perfil IPE200 ambos de acero S275 como se puede ver en la *Figura 5.7*.

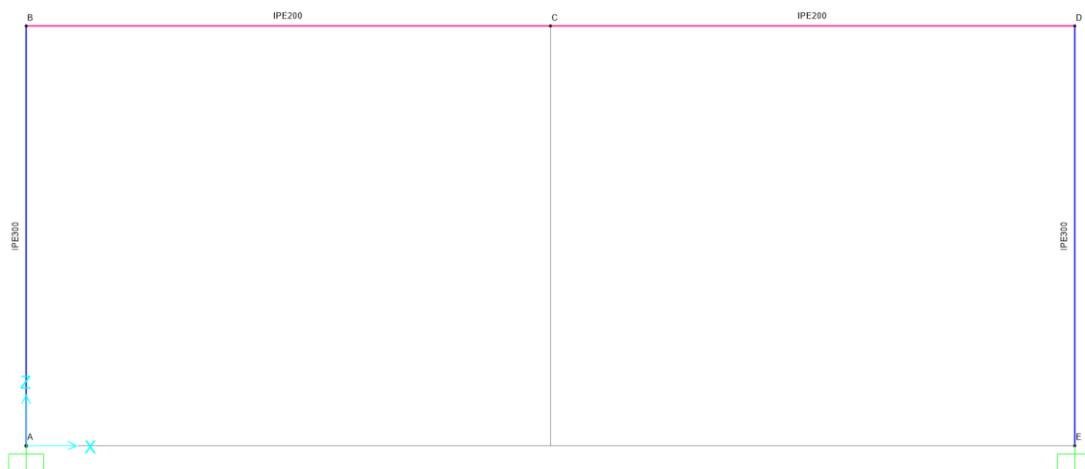


Figura 5.7. Representación modelo Caso I: IPE300

Tras el estudio de la estructura frente a colapso plástico se han obtenido los siguientes resultados de la *Tabla 5.4* que se pueden ver representados gráficamente en la *Figura 5.8*.

	Dv (c)	FC colapso
0	0	0
1	0,26937	5,81891
2	0,27839	5,86735
3	0,37293	6,07751
4	1	6,07759

Tabla 5.4. Resultados análisis por colapso plástico

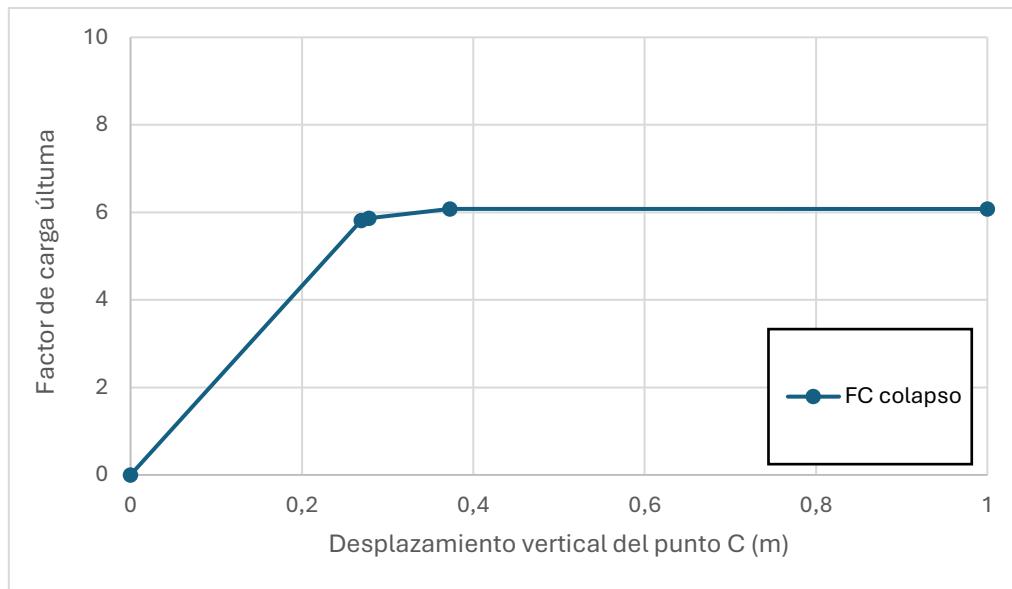


Figura 5.8. Gráfica de los resultados del análisis por colapso plástico

Ahora se procede al análisis de la estructura por pérdida de estabilidad del cual se obtienen los resultados de la *Tabla 5.5* representados gráficamente en la *Figura 5.9*.

	Dv (c)	FC crítica
1	0,26937	27,56904
2	0,27839	12,8256
3	0,37293	0,0032
4	1	0,0032

Tabla 5.5. Resultados análisis por pérdida de estabilidad

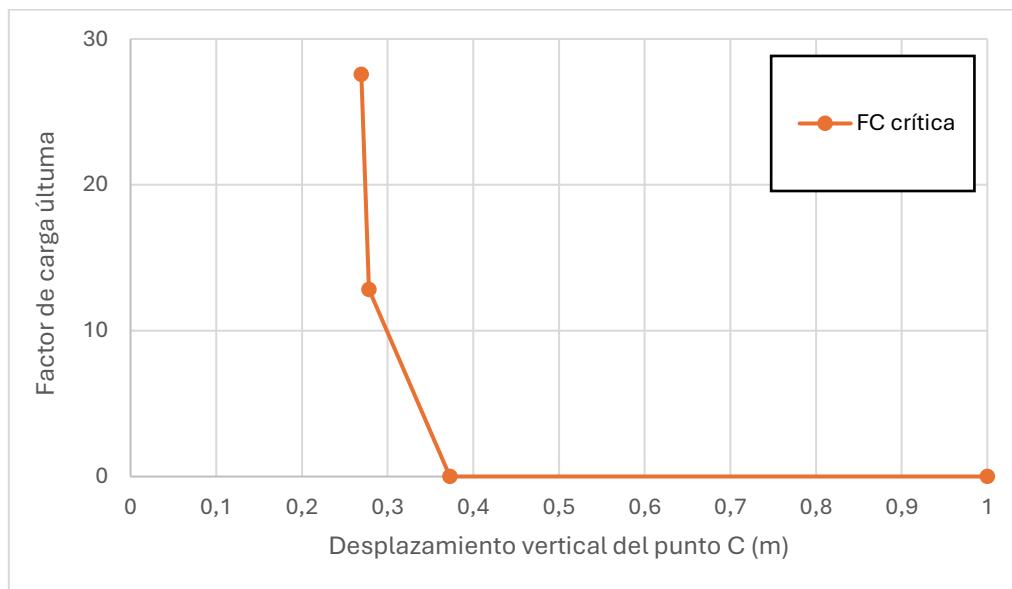


Figura 5.9. Gráfica de los resultados del análisis por pérdida de estabilidad

Para obtener el valor del factor de carga última de la estructura se procede a representar ambas curvas conjuntamente y calcular el punto de intersección de estas, esta representación gráfica se puede ver en la *Figura 5.10* obteniendo así el punto de intersección como el representado en la *Tabla 5.6*.

Factor de carga última	U crítico (M)	P crítica (N)
	0,3289	5,9796

Tabla 5.6. Valores del punto de intersección

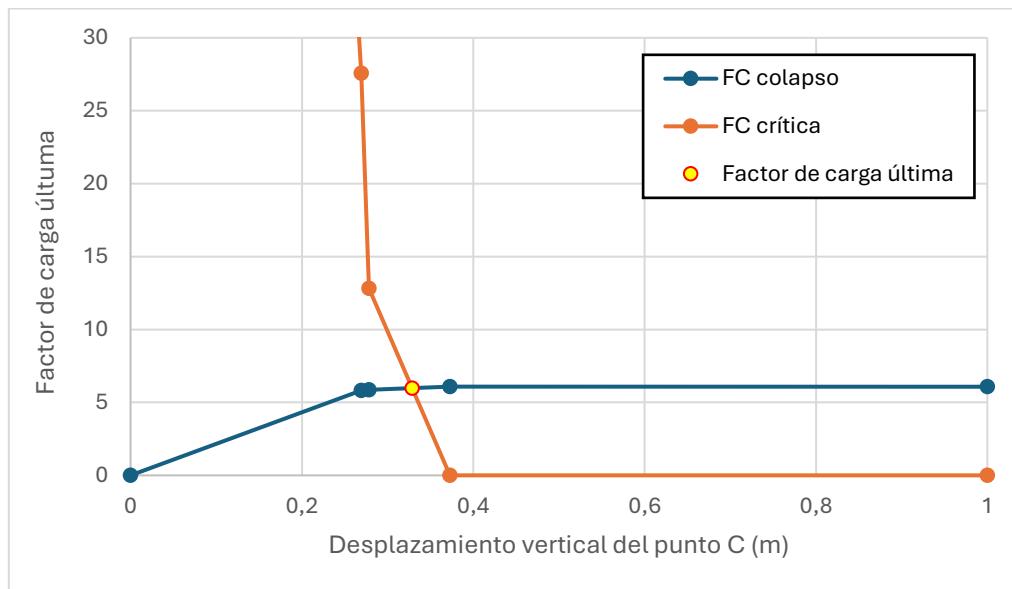


Figura 5.10. Gráfica del punto de intersección correspondiente al factor de carga última

Se puede apreciar que la estructura va a fallar por pandeo tras formarse la tercera rótula plástica y previamente a que se forme la cuarta.

De esta forma se obtiene que el factor de carga última, approximando a dos decimales, para esta estructura con sus condiciones de contorno y distribución de cargas determinados es:

$$\lambda_u = 5,98$$

5.1.3 Caso I IPE300+400

Para este caso se ha utilizado una configuración en la que las barras de los pilares tienen un perfil IPE300 y los dinteles un perfil IPE400 ambos de acero S275 como se puede ver en la *Figura 5.11*.

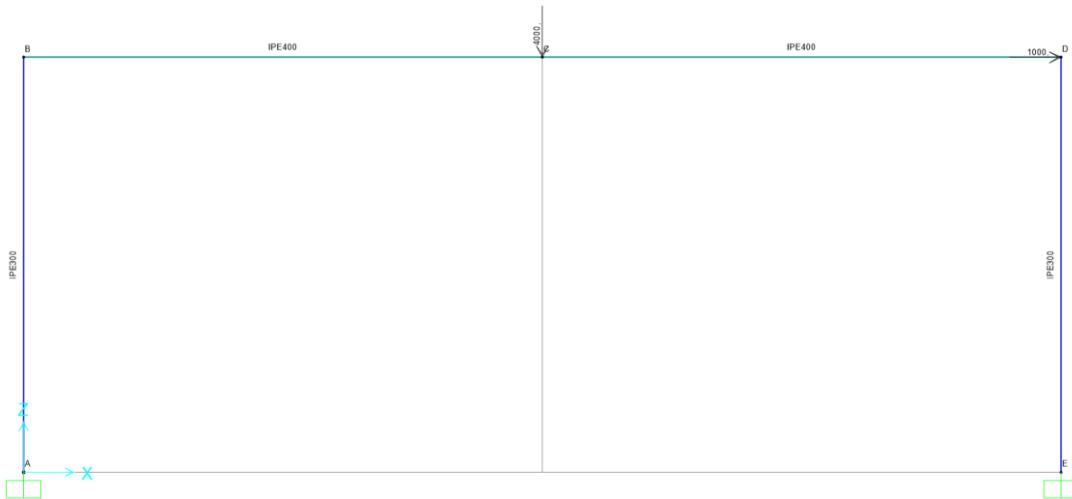


Figura 5.11. Representación modelo Caso I: IPE300+400

Tras el estudio de la estructura frente a colapso plástico se han obtenido los siguientes resultados de la *Tabla 5.7* que se pueden ver representados gráficamente en la *Figura 5.12*.

Dv (c)		FC crítica
0	0	3070,02876
1	0,14998	590,59221
2	0,19818	138,7866
3	0,34573	39,83151
4	0,48038	0,06619
5	1	0,06619

Tabla 5.7. Resultados análisis por colapso plástico

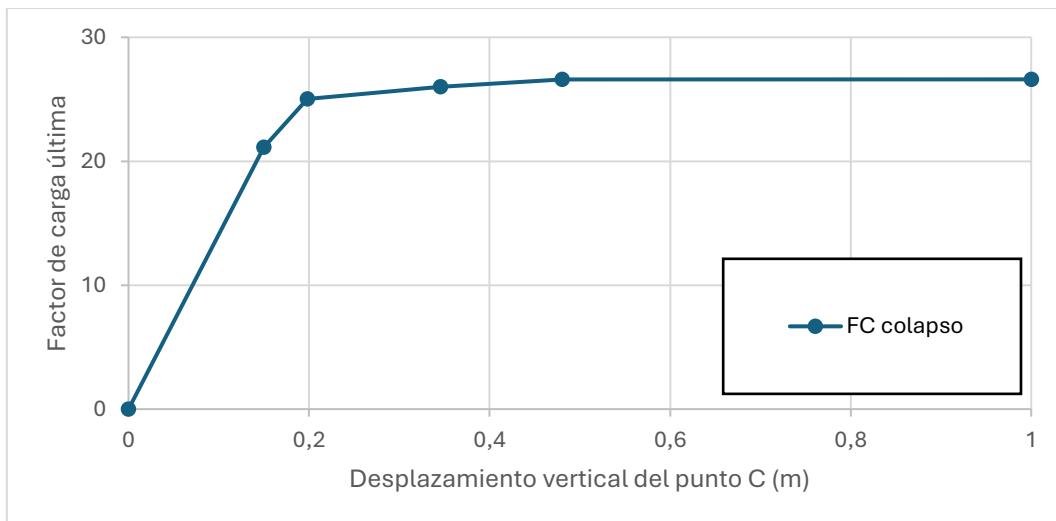


Figura 5.12. Gráfica de los resultados del análisis por colapso plástico

Ahora se procede al análisis de la estructura por pérdida de estabilidad del cual se obtienen los resultados de la *Tabla 5.8* representados gráficamente en la *Figura 5.13*.

	Dv (c)	FC crítica
1	0,14998	590,59221
2	0,19818	140,15356
3	0,34573	39,83151
4	0,48038	0,06619
5	1	0,06619

Tabla 5.8. Resultados análisis por pérdida de estabilidad

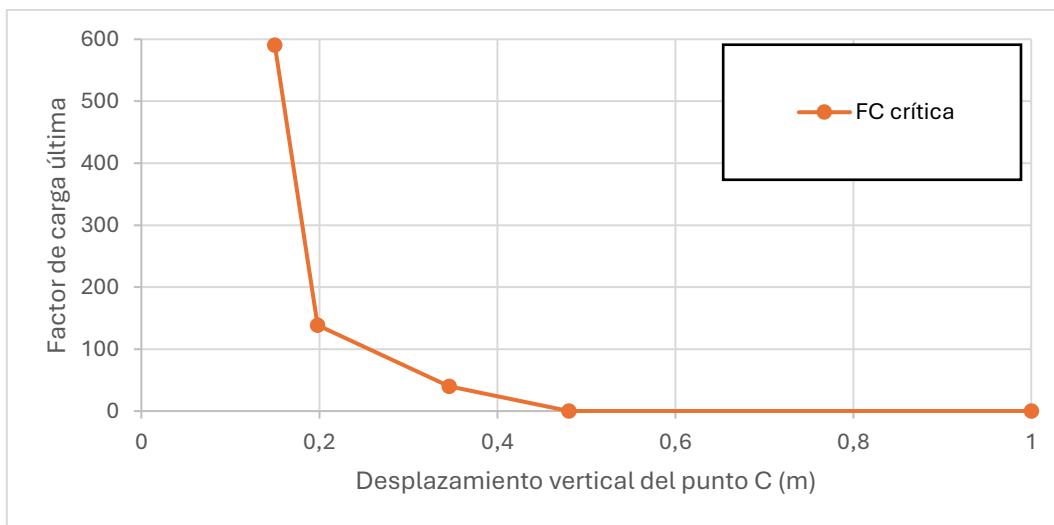


Figura 5.13. Gráfica de los resultados del análisis por pérdida de estabilidad

Para obtener el valor del factor de carga última de la estructura se procede a representar ambas curvas conjuntamente y calcular el punto de intersección de estas, esta representación gráfica se puede ver en la *Figura 5.14* obteniendo así el punto de intersección como el representado en la *Tabla 5.9*.

	U crítico	P crítica (N)
Factor de carga última	0,3918	26,2181

Tabla 5.9. Valores del punto de intersección

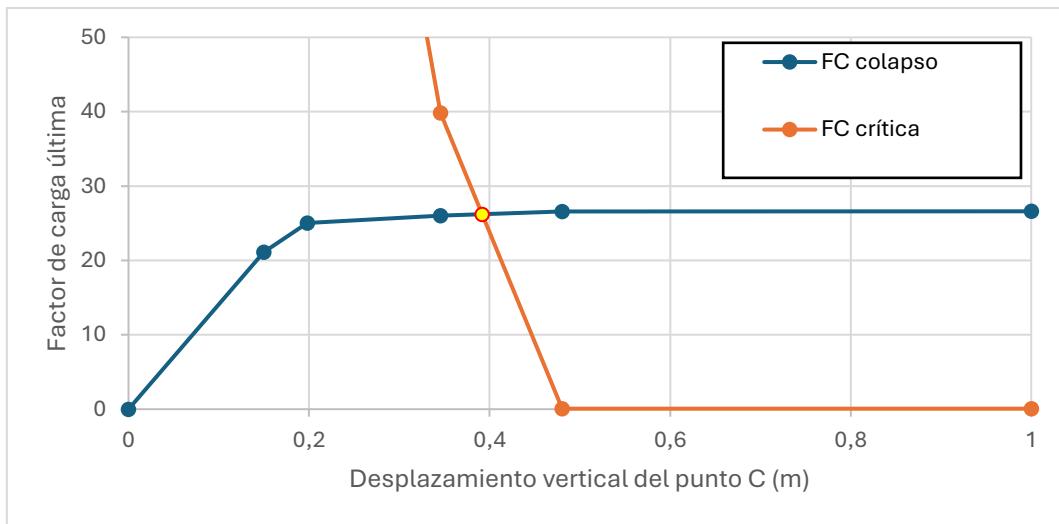


Figura 5.14. Gráfica del punto de intersección correspondiente al factor de carga última

Se puede apreciar que la estructura va a fallar por pandeo tras formarse la tercera rótula plástica y previamente a que se forme la cuarta.

De esta forma se obtiene que el factor de carga última, aproximando a dos decimales, para esta estructura con sus condiciones de contorno y distribución de cargas determinados es:

$$\lambda_u = 26,2181$$

5.2 CASO II: PÓRTICO A DOS AGUAS

En este segundo caso se tiene un pórtico a dos aguas simétrico de 25m de ancho con una altura de los pilares de 7m y la altura máxima donde se encuentra el punto de unión de los dinteles de 9,5m y con una distribución de cargas en la que se tiene una carga horizontal en el punto D de valor 1000N en sentido positivo y una carga vertical en el punto C de un valor de 400N en sentido de la gravedad, estas cargas se pueden apreciar en las Figuras 5.15 y 5.16. Esta distribución de cargas se va a mantener durante todo este Caso II.

Se trata de un pórtico con dos apoyos empotrados con lo cual se tiene una estructura con un grado de hiperestaticidad de tres, siendo así una estructura hiperestática.

Al ser un pórtico con dos empotramientos esto hace que se tengan más puntos con posibilidad de formar una rótula plástica siendo estos los puntos A, B, C, D, E.

Este modelo se va a estudiar con tres configuraciones diferentes de perfiles las cuales se van a explicar más detalladamente en los siguientes puntos.

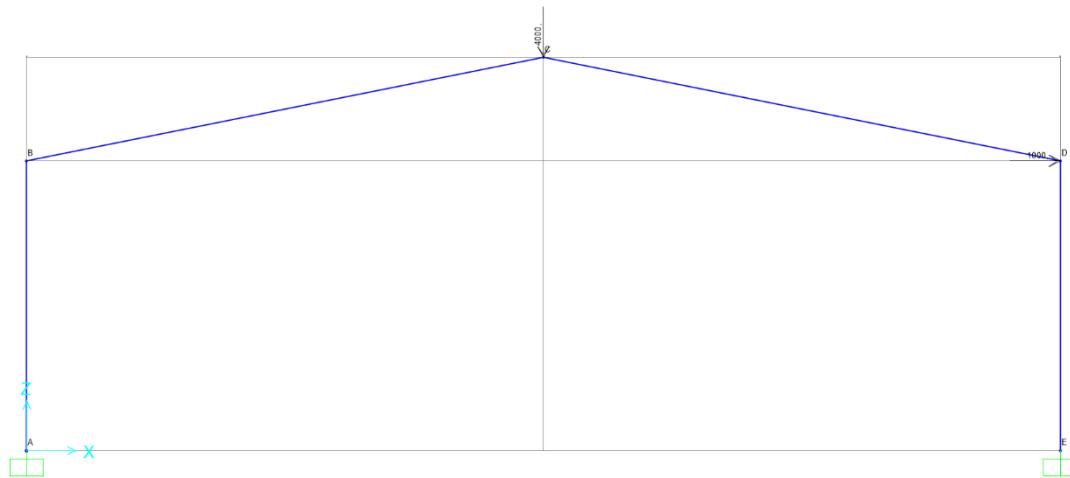


Figura 5.15. Representación distribución de cargas Caso II

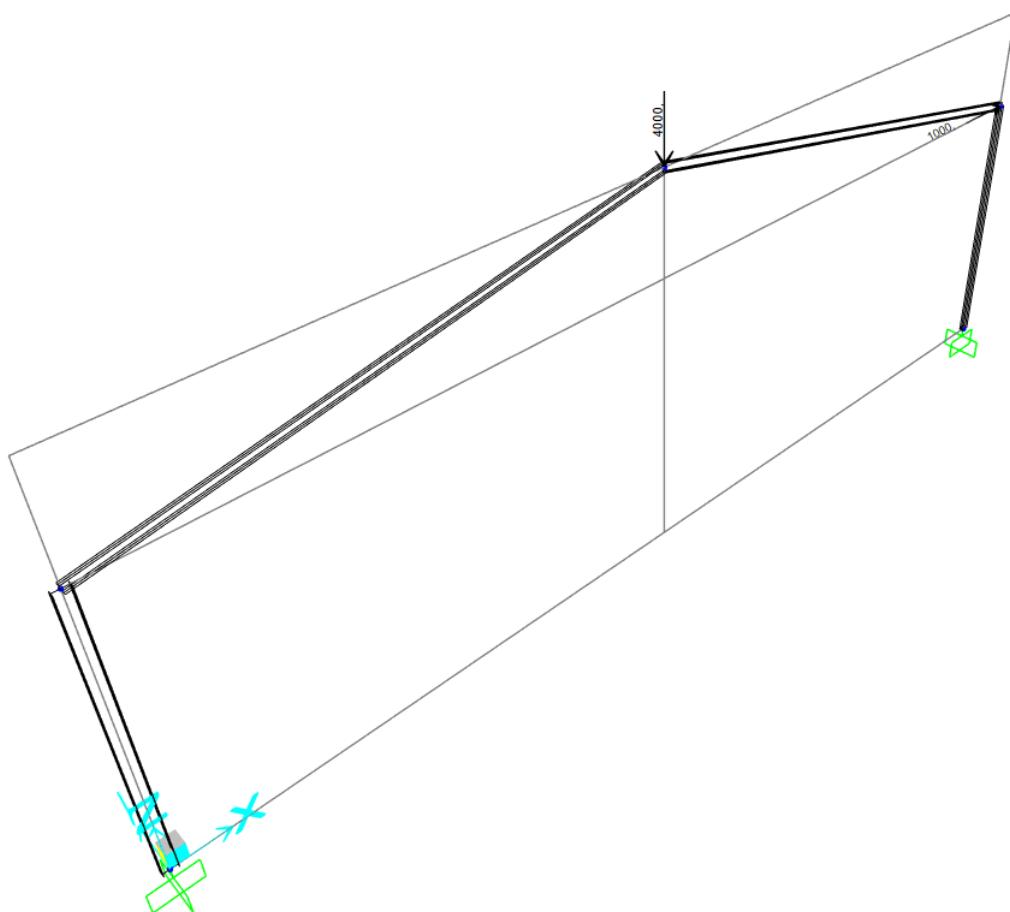


Figura 5.16. Representación 3D modelo Caso II

5.2.1 Caso II: IPE300

Para este caso se ha utilizado una configuración en la que todas las barras tienen un perfil IPE300 de acero S275 como se puede ver en la *Figura 5.17*.

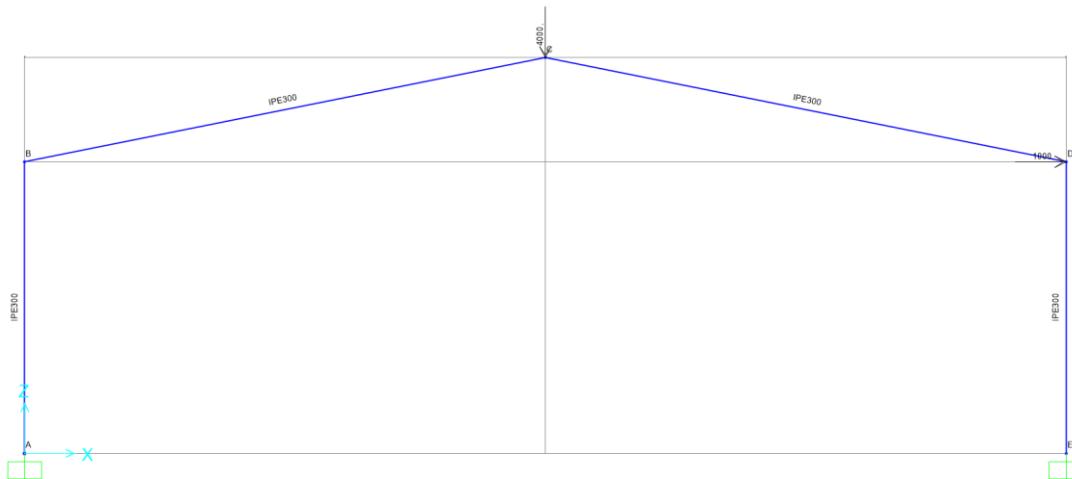


Figura 5.17. Representación modelo Caso II: IPE300

Tras el estudio de la estructura frente a colapso plástico se han obtenido los siguientes resultados de la *Tabla 5.10* que se pueden ver representados gráficamente en la *Figura 5.18*.

Dv (c)	F _C Colapso
0	0
1	0,26572
2	0,28735
3	0,5616
4	1

Tabla 5.10. Resultados análisis por colapso plástico

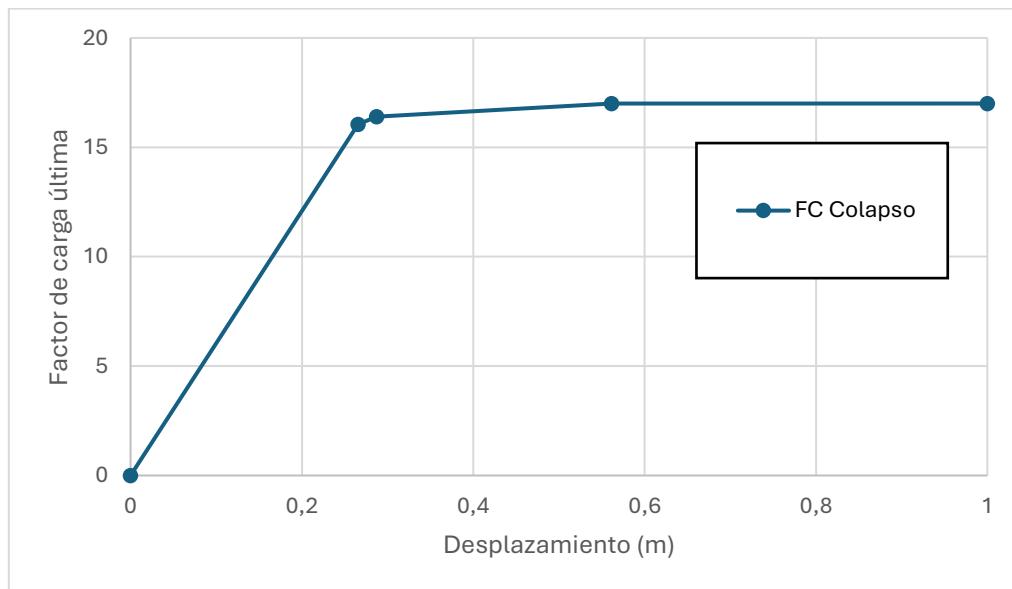


Figura 5.18. Gráfica de los resultados del análisis por colapso plástico

Ahora se procede al análisis de la estructura por pérdida de estabilidad del cual se obtienen los resultados de la *Tabla 5.11* representados gráficamente en la *Figura 5.19*.

	Dv (c)	FC Crítica
1	0,26572	330,2599
2	0,28735	115,97528
3	0,5616	0,29342
4	1	0,29342

Tabla 5.11. Resultados análisis por pérdida de estabilidad

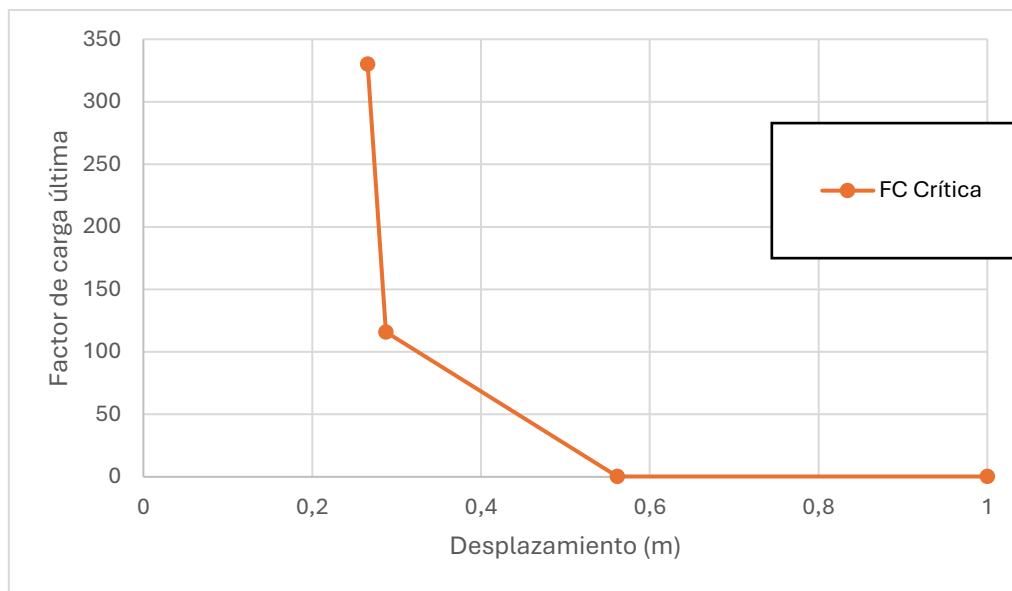


Figura 5.19. Gráfica de los resultados del análisis por pérdida de estabilidad

Para obtener el valor del factor de carga última de la estructura se procede a representar ambas curvas conjuntamente y calcular el punto de intersección de estas, esta representación gráfica se puede ver en la *Figura 5.20* obteniendo así el punto de intersección como el representado en la *Tabla 5.12*.

	U crítico (m)	P crítica (N)
Factor de carga última	0,5222	16,9160

Tabla 5.12. Valores del punto de intersección

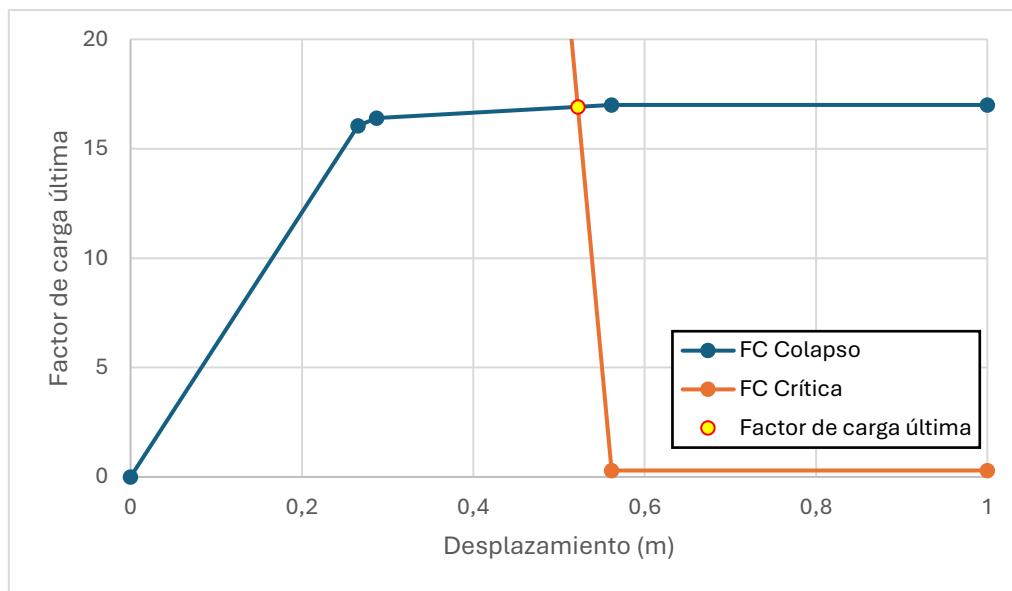


Figura 5.20. Gráfica del punto de intersección correspondiente al factor de carga última

Se puede apreciar que la estructura va a fallar por pandeo tras formarse la segunda rótula plástica y previamente a que se forme la tercera.

De esta forma se obtiene que el factor de carga última, aproximando a dos decimales, para esta estructura con sus condiciones de contorno y distribución de cargas determinados es:

$$\lambda_u = 16,92$$

5.2.2 Caso II IPE300+200

Para este caso se ha utilizado una configuración en la que las barras de los pilares tienen un perfil IPE300 y los dinteles un perfil IPE200 ambos de acero S275 como se puede ver en la Figura 5.21.

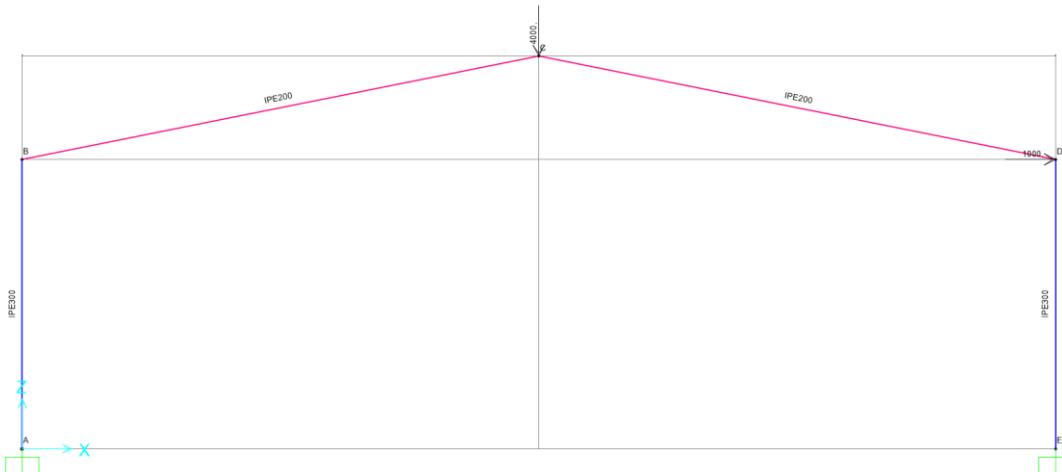


Figura 5.21. Representación modelo Caso II: IPE300+200

Tras el estudio de la estructura frente a colapso plástico se han obtenido los siguientes resultados de la *Tabla 5.13* que se pueden ver representados gráficamente en la *Figura 5.22*.

Dv (c)	FC colapso
0	0
1	0,31217
2	0,35786
3	0,39556
4	0,54094
5	1

Tabla 5.13. Resultados análisis por colapso plástico

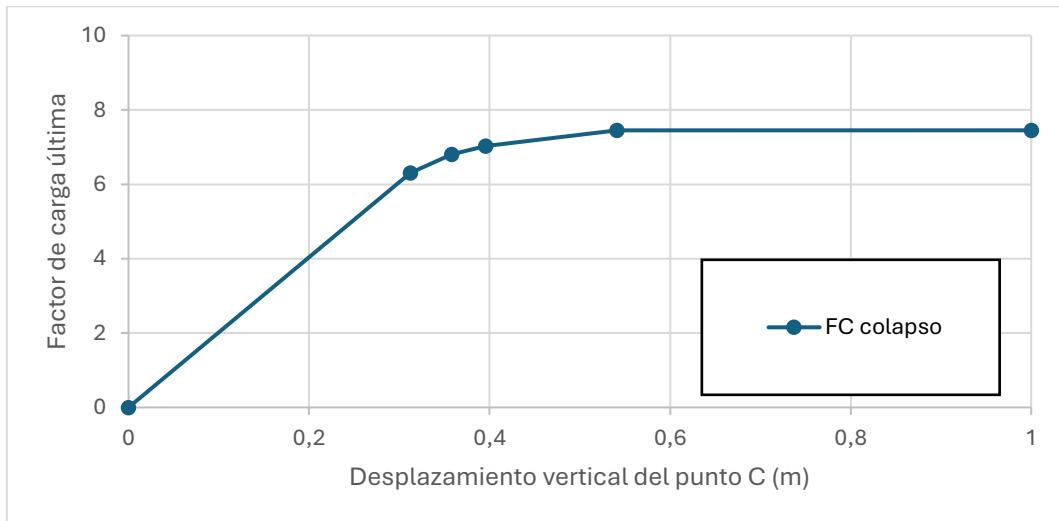


Figura 5.22. Gráfica de los resultados del análisis por colapso plástico

Ahora se procede al análisis de la estructura por pérdida de estabilidad del cual se obtienen los resultados de la *Tabla 5.14* representados gráficamente en la *Figura 5.23*.

Dv (c)	FC crítica
1	0,31217
2	0,35786
3	0,39556
4	0,54094
5	1

Tabla 5.14. Resultados análisis por pérdida de estabilidad

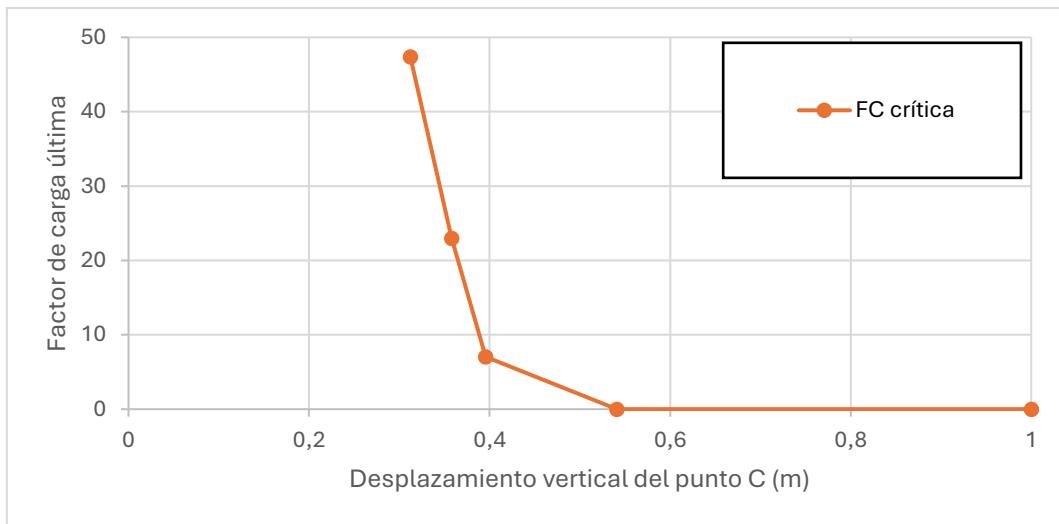


Figura 5.23. Gráfica del punto de intersección correspondiente al factor de carga última

Para obtener el valor del factor de carga última de la estructura se procede a representar ambas curvas conjuntamente y calcular el punto de intersección de las mismas, esta representación gráfica se puede ver en la *Figura 5.24* obteniendo así el punto de intersección como el representado en la *Tabla 5.15*.

Factor de carga última	U crítico	P crítica (N)
	0,3961	7,0288

Tabla 5.15. Valores del punto de intersección

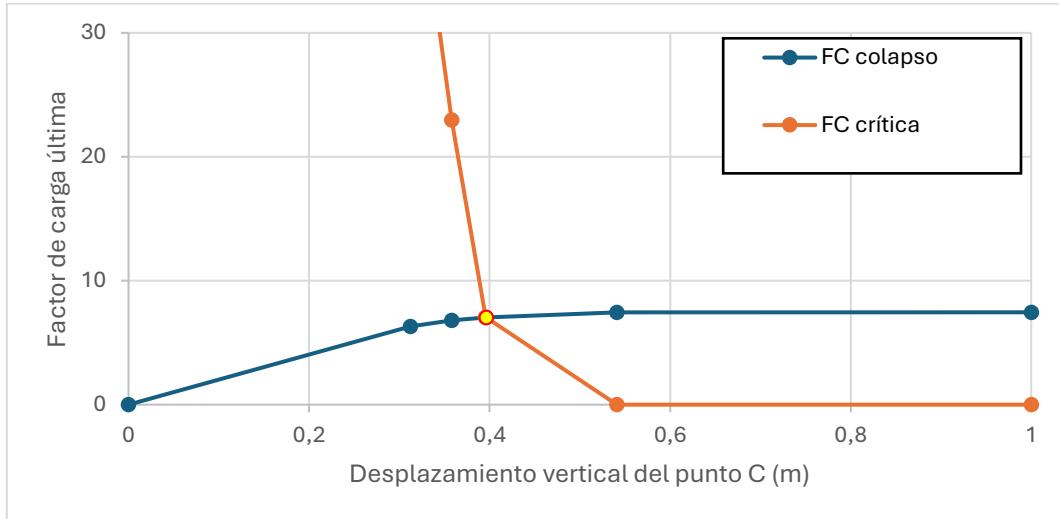


Figura 5.24. Gráfica del punto de intersección correspondiente al factor de carga última

Se puede apreciar que la estructura va a fallar por pandeo tras formarse la segunda rótula plástica y previamente a que se forme la tercera.

De esta forma se obtiene que el factor de carga última, aproximando a dos decimales, para esta estructura con sus condiciones de contorno y distribución de cargas determinados es:

$$\lambda_u = 7,03$$

5.2.3 Caso II IPE300+400

Para este caso se ha utilizado una configuración en la que las barras de los pilares tienen un perfil IPE300 y los dinteles un perfil IPE400 ambos de acero S275 como se puede ver en la *Figura 5.25*.

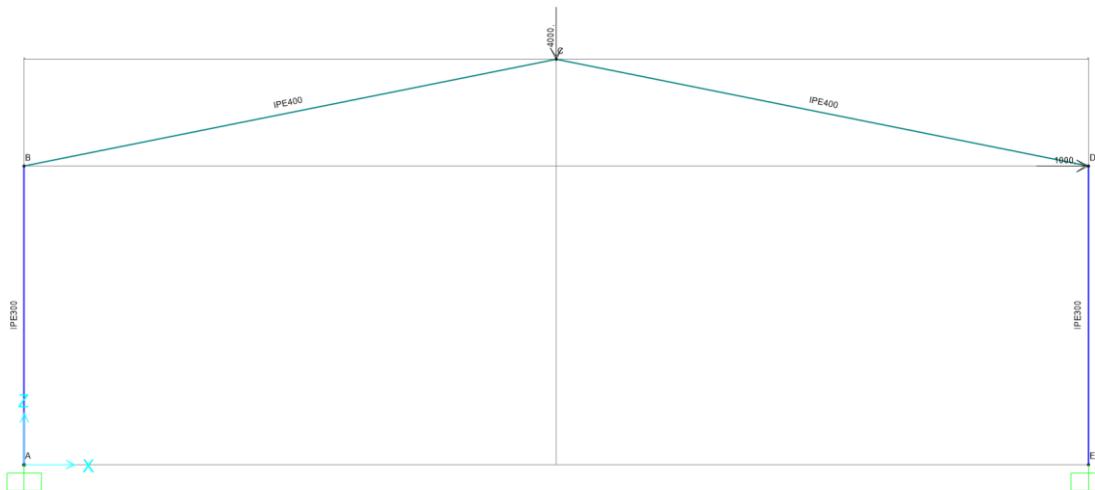


Figura 5.25. Representación modelo Caso II: IPE300+400

Tras el estudio de la estructura frente a colapso plástico se han obtenido los siguientes resultados de la *Tabla 5.16* que se pueden ver representados gráficamente en la *Figura 5.26*.

	Dv (c)	FC colapso
0	0	0
1	0,15033	17,15966
2	0,3031	23,53675
3	0,40832	23,83584
4	0,50355	23,83589
5	0,50355	23,83595
6	1	23,83622

Tabla 5.16. Resultados análisis por colapso plástico

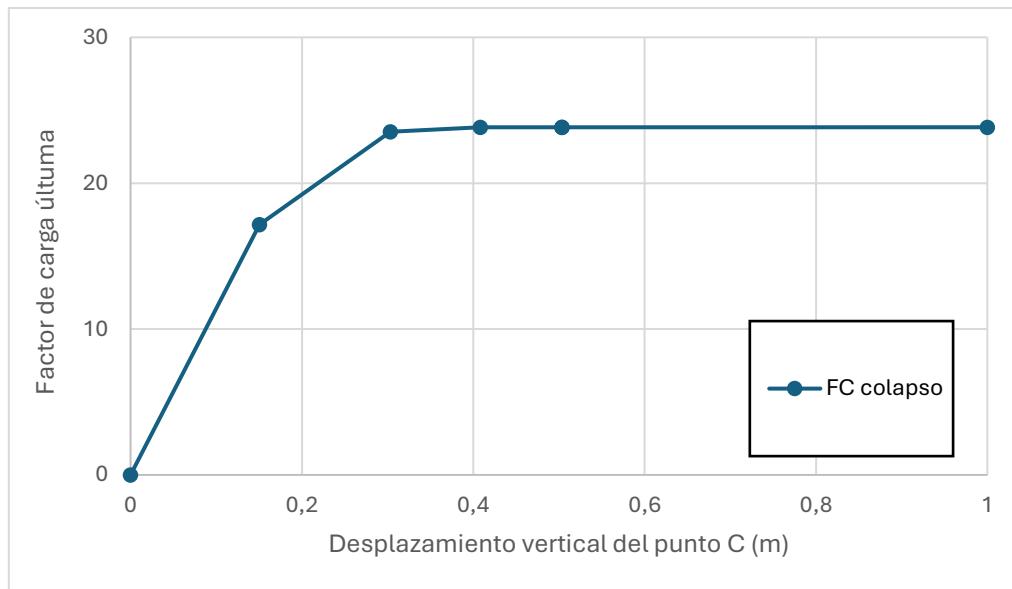


Figura 5.26. Gráfica de los resultados del análisis por colapso plástico

Ahora se procede al análisis de la estructura por pérdida de estabilidad del cual se obtienen los resultados de la Tabla 5.17 representados gráficamente en la Figura 5.27.

	Dv (c)	FC crítica
1	0,15033	508,95172
2	0,3031	180,67842
3	0,40832	0,01365
4	0,50355	0,01365
5	0,50355	0,01365
6	1	0,01364

Tabla 5.17. Resultados análisis por pérdida de estabilidad

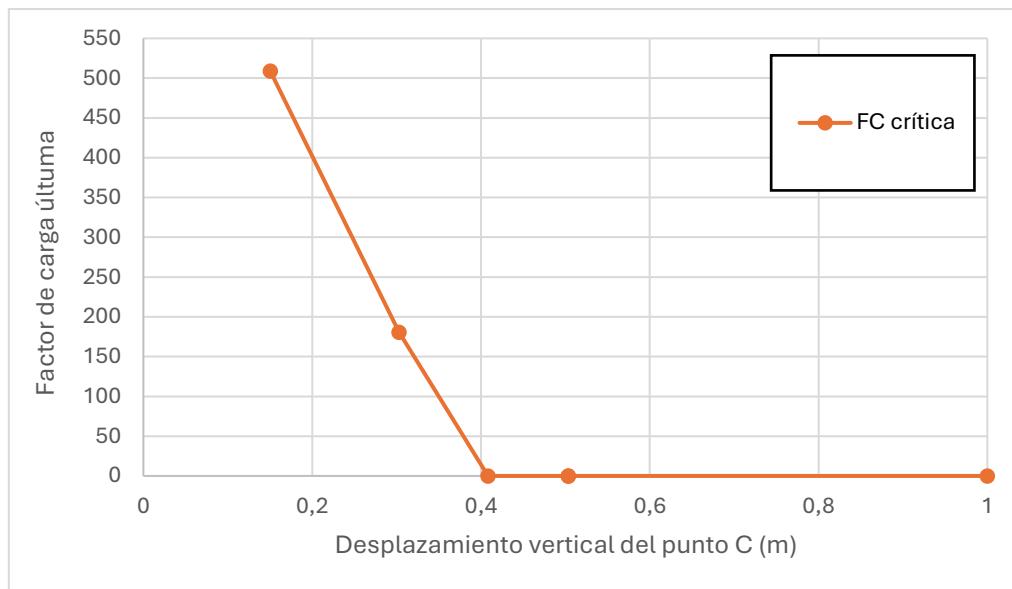


Figura 5.27. Gráfica de los resultados del análisis por pérdida de estabilidad

Para obtener el valor del factor de carga última de la estructura se procede a representar ambas curvas conjuntamente y calcular el punto de intersección de estas, esta representación gráfica se puede ver en la *Figura 5.28* obteniendo así el punto de intersección como el representado en la *Tabla 5.18*.

Factor de carga última	U crítico	P crítica (N)
	0,3945	23,7965

Tabla 5.18. Valores del punto de intersección

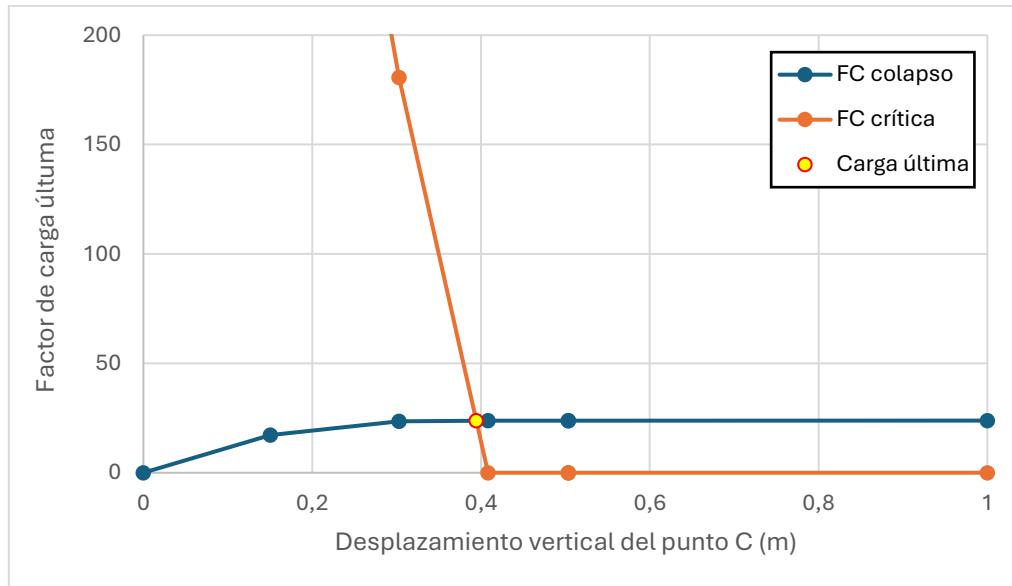


Figura 5.28. Gráfica del punto de intersección correspondiente al factor de carga última

Se puede apreciar que la estructura va a fallar por pandeo tras formarse la segunda rótula plástica y previamente a que se forme la tercera.

De esta forma se obtiene que el factor de carga última, aproximando a dos decimales, para esta estructura con sus condiciones de contorno y distribución de cargas determinados es:

$$\lambda_u = 23,80$$

5.3 CASO III: PÓRTICO A DOS AGUAS CON CARGAS SEGÚN CTE

En este tercer caso se tiene el mismo pórtico a dos aguas simétrico que en el caso II, con 25m de ancho, una altura de los pilares de 7m y la altura máxima donde se encuentra el punto de unión rígida de los dinteles de 9,5.

Lo que cambia sustancialmente para este caso es la distribución de cargas, se tiene una distribución de cargas obtenida mediante la consulta del Código Técnico de la Edificación que simula las cargas de viento y nieve en la zona del polígono de San Cristóbal en Valladolid. Estas cargas se pueden apreciar en la Figuras 5.29 y 5.30, se trata de tres cargas puntuales verticales en sentido de la gravedad las cuales simulan una carga distribuida en la cubierta correspondiente a la carga de nieve de valor 6460N y una carga horizontal de 8480N que simula la carga de viento distribuida para esta estructura. No se utilizan cargas distribuidas ya que el software SAP2000 no ofrece una fiabilidad suficiente en el análisis de este tipo de cargas. Esta distribución de cargas se va a mantener durante todo este Caso II.

Se trata de un pórtico con dos apoyos empotrados con lo cual se tiene una estructura con un grado de hiperestaticidad de tres, siendo así una estructura hiperestática.

Al ser un pórtico con dos empotramientos esto hace que se tengan más puntos con posibilidad de formar una rótula plástica siendo estos los puntos A, B, C, D, E.

Este modelo se va a estudiar con tres configuraciones diferentes de perfiles las cuales se van a explicar más detalladamente en los siguientes puntos.

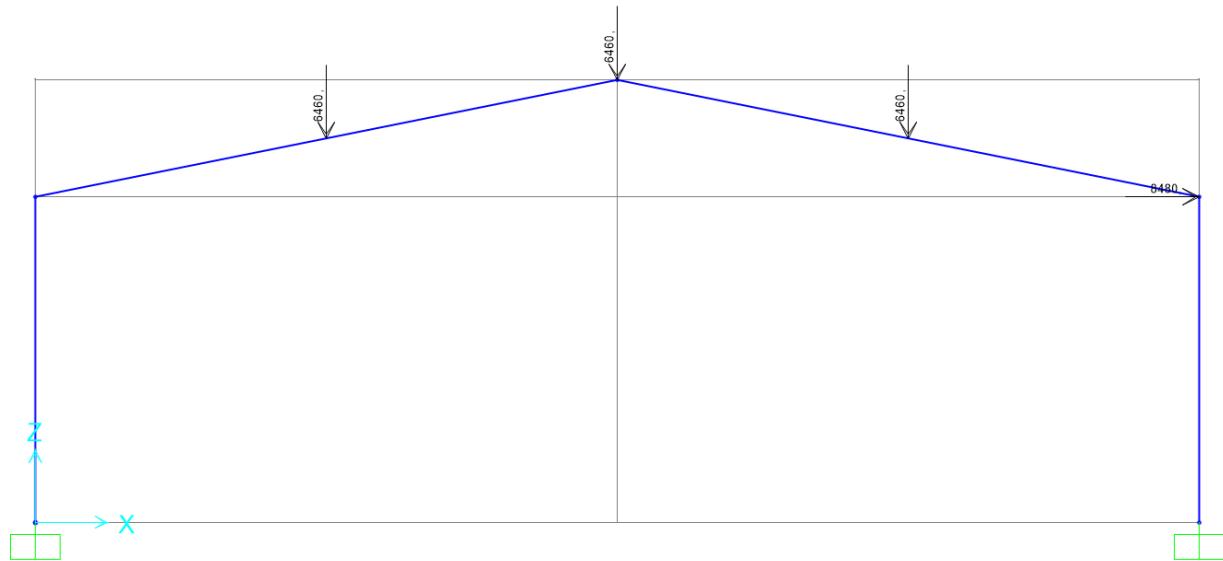


Figura 5.29. Representación distribución de cargas Caso III

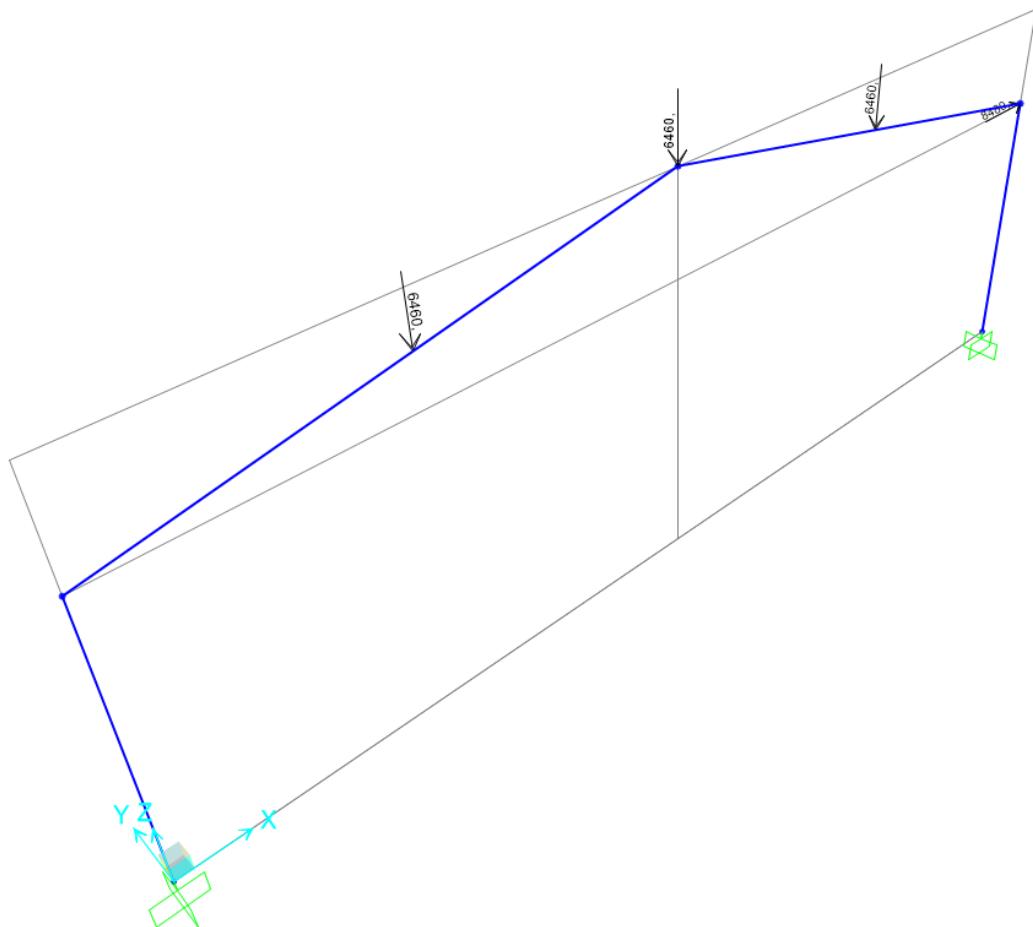


Figura 5.30. Representación 3D modelo Caso III

5.3.1 Caso III: IPE300

Para este caso se ha utilizado una configuración en la que todas las barras tienen un perfil IPE300 de acero S275 como se puede ver en la *Figura 5.31*.

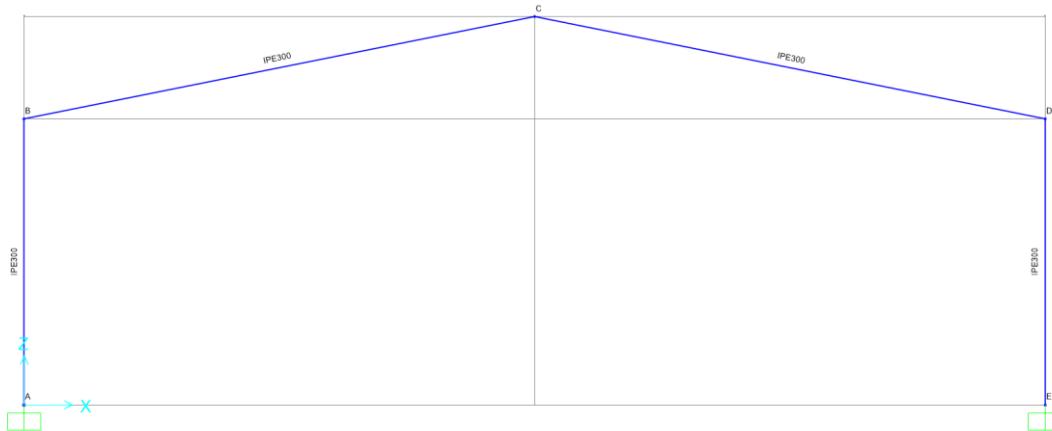


Figura 5.31. Representación modelo Caso III: IPE300

Tras el estudio de la estructura frente a colapso plástico se han obtenido los siguientes resultados de la *Tabla 5.19* que se pueden ver representados gráficamente en la *Figura 5.32*.

Dv (c)	Dv (c)	FC Colapso
0	0	0
1	0,19032	3,23676
2	0,2058	3,41798
3	0,48732	4,45749
4	0,73112	4,59795
5	1	4,59797

Tabla 5.19. Resultados análisis por colapso plástico

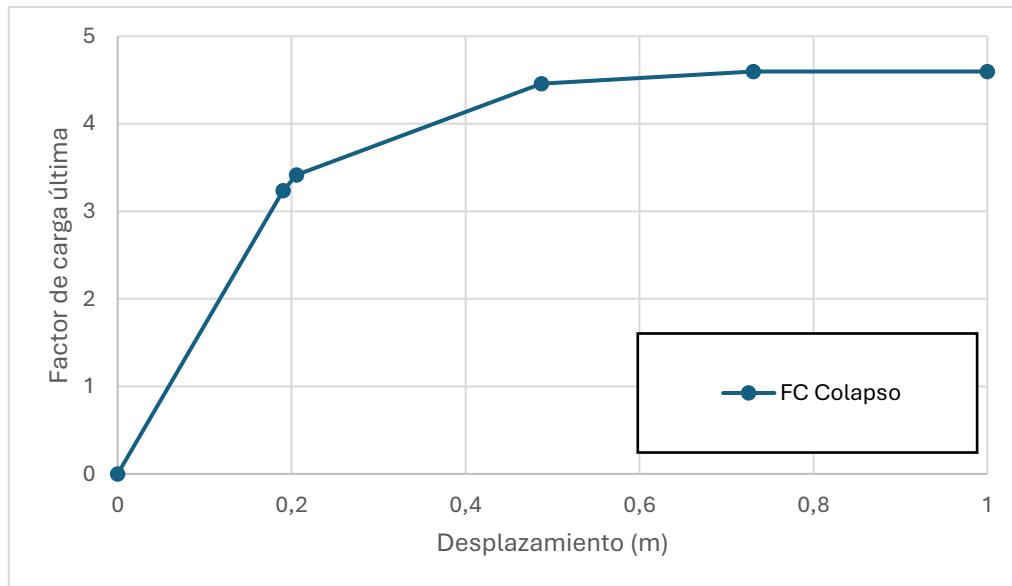


Figura 5.32. Gráfica de los resultados del análisis por colapso plástico

Ahora se procede al análisis de la estructura por pérdida de estabilidad del cual se obtienen los resultados de la *Tabla 5.20* representados gráficamente en la *Figura 5.33*.

	Dv (c)	FC Crítica
1	0,19032	92,29061
2	0,2058	76,03587
3	0,48732	9,65279
4	0,73112	0,00223
5	1	0,00223

Tabla 5.20. Resultados análisis por pérdida de estabilidad

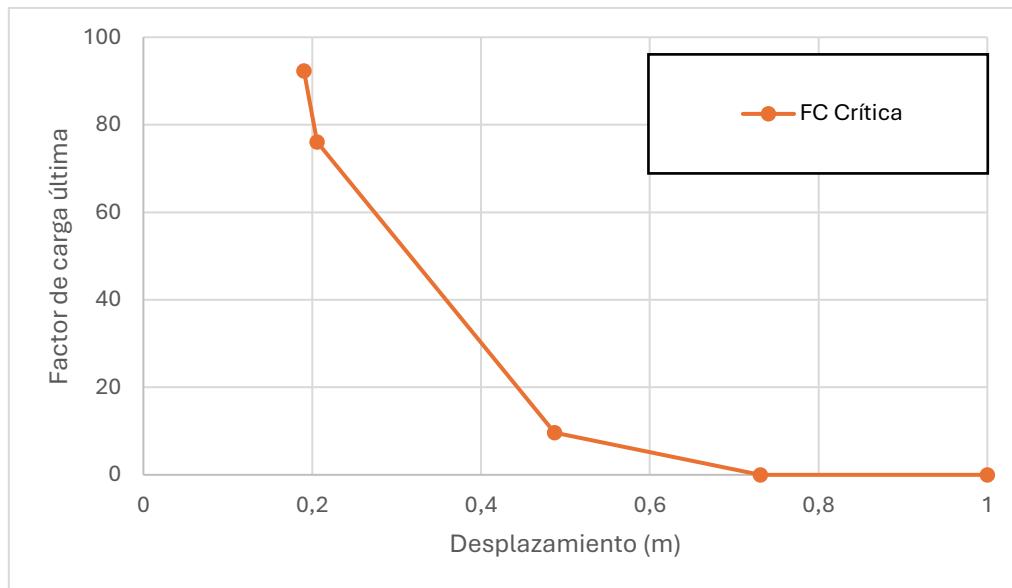


Figura 5.33. Gráfica de los resultados del análisis por pérdida de estabilidad

Para obtener el valor del factor de carga última de la estructura se procede a representar ambas curvas conjuntamente y calcular el punto de intersección de estas, esta representación gráfica se puede ver en la *Figura 5.33* obteniendo así el punto de intersección como el representado en la *Tabla 5.21*.

	U crítico (m)	P crítica (N)
Factor de carga última	0,6167	4,5320

Tabla 5.21. Valores del punto de intersección

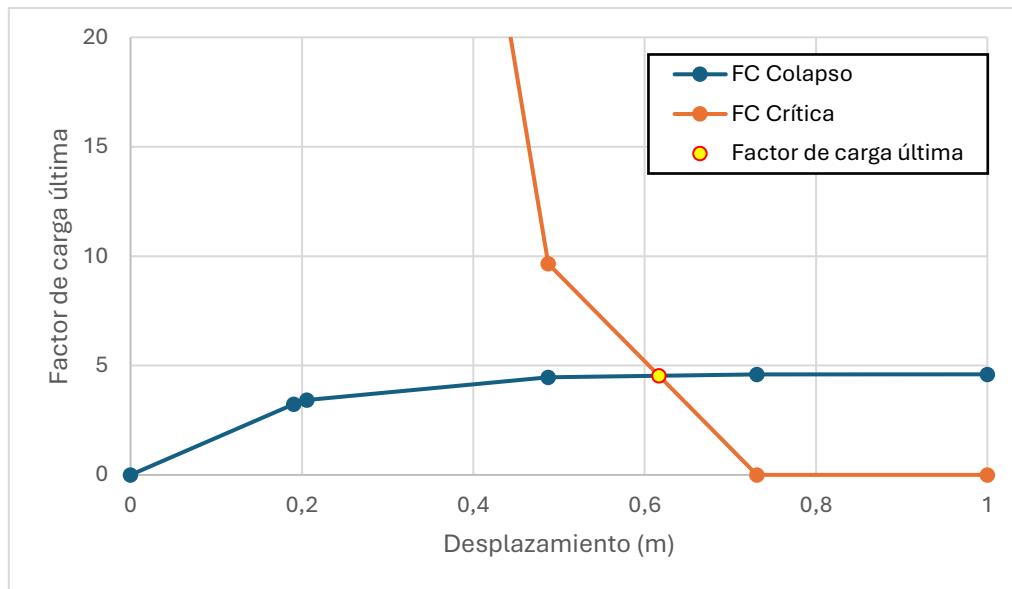


Figura 5.34. Gráfica del punto de intersección correspondiente al factor de carga última

Se puede apreciar que la estructura va a fallar por pandeo tras formarse la tercera rótula plástica y previamente a que se forme la cuarta.

De esta forma se obtiene que el factor de carga última, aproximando a dos decimales, para esta estructura con sus condiciones de contorno y distribución de cargas determinados es:

$$\lambda_u = 4,53$$

5.3.2 Caso III: IPE300+200

Para este caso se ha utilizado una configuración en la que las barras de los pilares tienen un perfil IPE300 y los dinteles un perfil IPE200 ambos de acero S275 como se puede ver en la Figura 5.35.

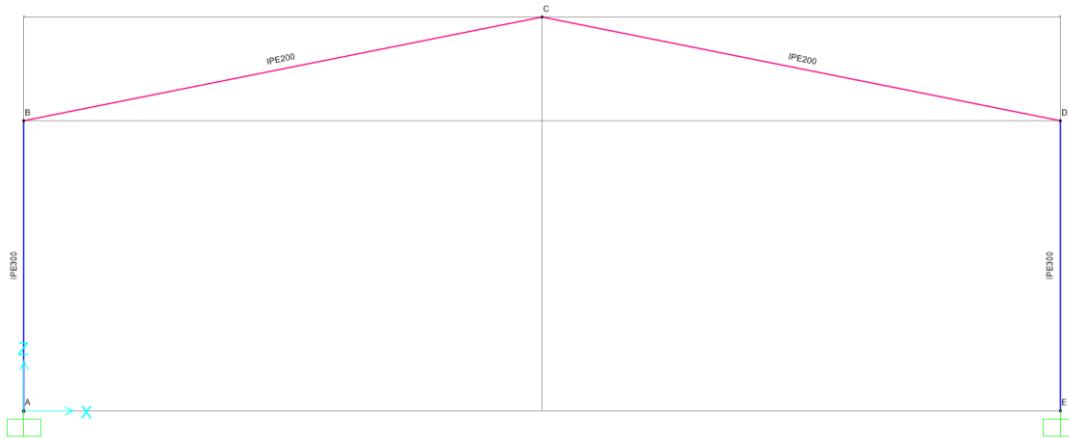


Figura 5.35. Representación modelo Caso III: IPE300+200

Tras el estudio de la estructura frente a colapso plástico se han obtenido los siguientes resultados de la *Tabla 5.22* que se pueden ver representados gráficamente en la *Figura 5.36*.

Dv (c)	FC colapso
0	0
1	0,2308
2	0,3093
3	0,41849
4	0,79175
5	1

Tabla 5.22. Resultados análisis por colapso plástico

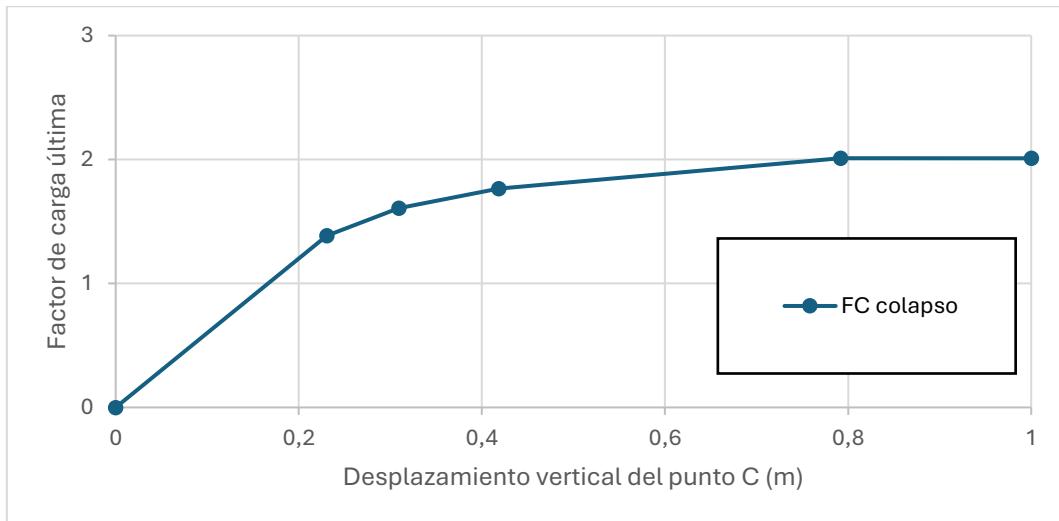


Figura 5.36. Gráfica de los resultados del análisis por colapso plástico

Ahora se procede al análisis de la estructura por pérdida de estabilidad del cual se obtienen los resultados de la *Tabla 5.23* representados gráficamente en la *Figura 5.37*.

Dv (c)	FC crítica
1	0,2308
2	0,3093
3	0,41849
4	0,79175
5	1

Tabla 5.23. Resultados análisis por pérdida de estabilidad

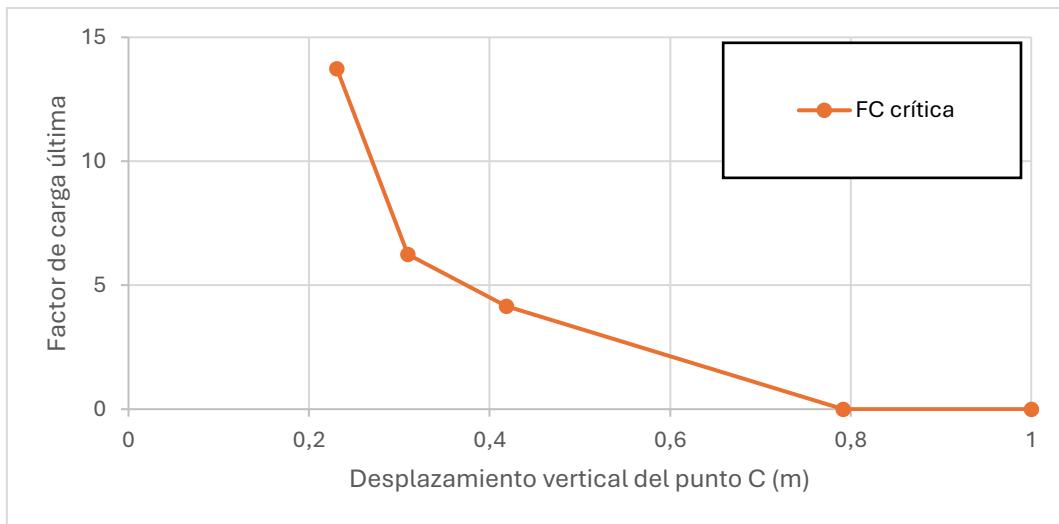


Figura 5.37. Gráfica de los resultados del análisis por pérdida de estabilidad

Para obtener el valor del factor de carga última de la estructura se procede a representar ambas curvas conjuntamente y calcular el punto de intersección de estas, esta representación gráfica se puede ver en la *Figura 5.38* obteniendo así el punto de intersección como el representado en la *Tabla 5.24*.

	U crítico	P crítica (N)
Factor de carga última	0,6213	1,8983

Tabla 5.24. Valores del punto de intersección

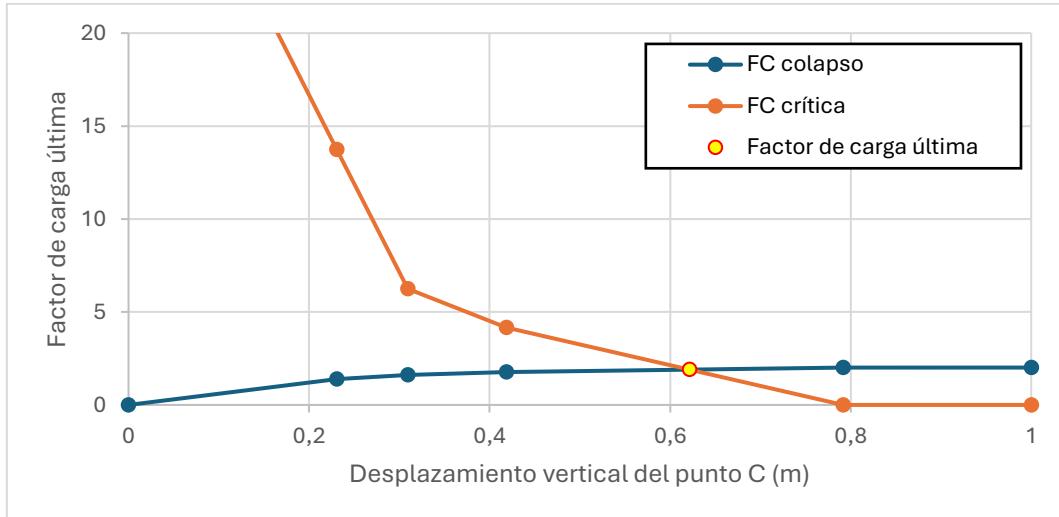


Figura 5.38. Gráfica del punto de intersección correspondiente al factor de carga última

Se puede apreciar que la estructura va a fallar por pandeo tras formarse la tercera rótula plástica y previamente a que se forme la cuarta.

De esta forma se obtiene que el factor de carga última, aproximando a dos decimales, para esta estructura con sus condiciones de contorno y distribución de cargas determinados es:

$$\lambda_u = 1,90$$

5.3.3 Caso III: IPE300+400

Para este caso se ha utilizado una configuración en la que las barras de los pilares tienen un perfil IPE300 y los dinteles un perfil IPE400 ambos de acero S275 como se puede ver en la figura 1.1

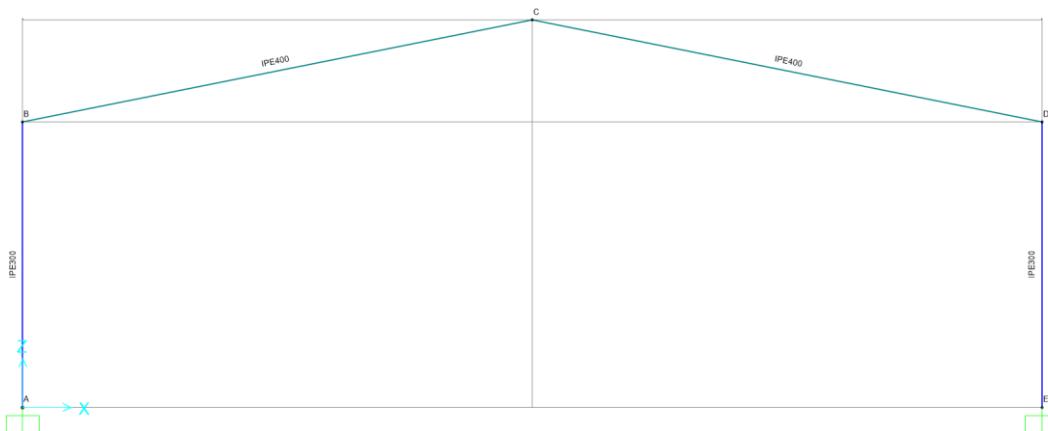


Figura 5.39. Representación modelo Caso III: IPE300+400

Tras el estudio de la estructura frente a colapso plástico se han obtenido los siguientes resultados de la Tabla 5.25 que se pueden ver representados gráficamente en la Figura 5.40.

Se puede ver la secuencia del orden en el que se forman las diferentes rótulas plásticas, así como el diagrama de esfuerzos y los valores de los momentos plásticos en el Anexo A.

	Dv (c)	FC colapso
0	0	0
1	0,11686	3,56066
2	0,41707	6,12292
3	0,64862	6,29185
4	1	6,29194

Tabla 5.25. Resultados análisis por colapso plástico

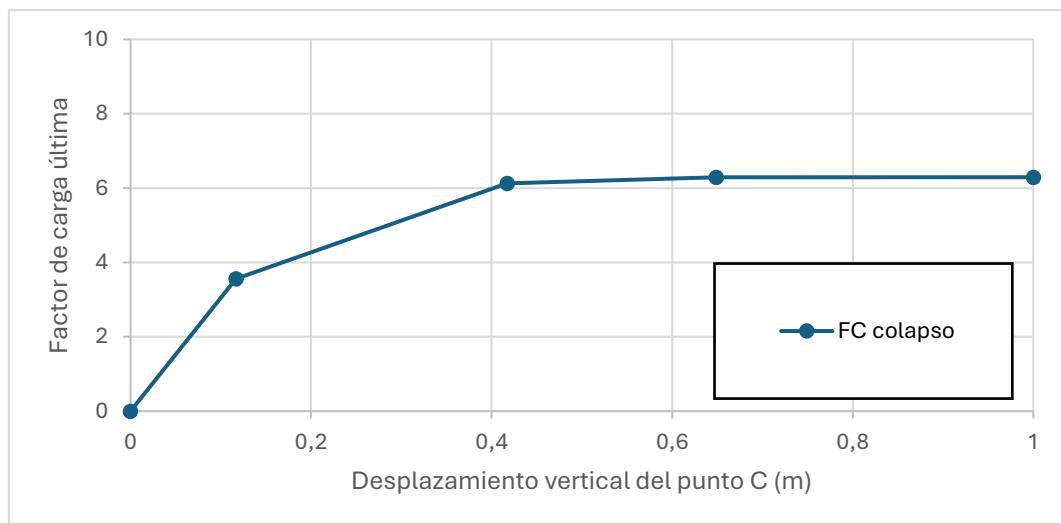


Figura 5.40. Gráfica de los resultados del análisis por colapso plástico

Ahora se procede al análisis de la estructura por pérdida de estabilidad del cual se obtienen los resultados de la Tabla 5.26 representados gráficamente en la Figura 5.41.

	Dv (c)	FC crítica
1	0,11686	121,45569
2	0,41707	14,15833
3	0,64862	0,00253
4	1	0,00253

Tabla 5.26. Resultados análisis por pérdida de estabilidad

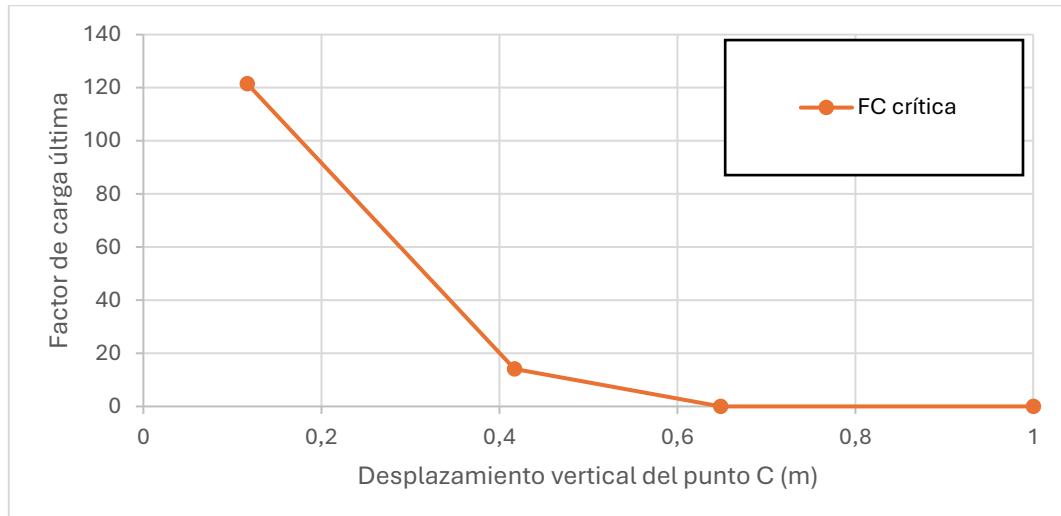


Figura 5.41. Gráfica de los resultados del análisis por pérdida de estabilidad

Para obtener el valor del factor de carga última de la estructura se procede a representar ambas curvas conjuntamente y calcular el punto de intersección de estas, esta representación gráfica se puede ver en la *Figura 5.42* obteniendo así el punto de intersección como el representado en la *Tabla 5.27*.

Factor de carga última	U crítico	P crítica (N)
	0,5470	6,2177

Tabla 5.27. Valores del punto de intersección

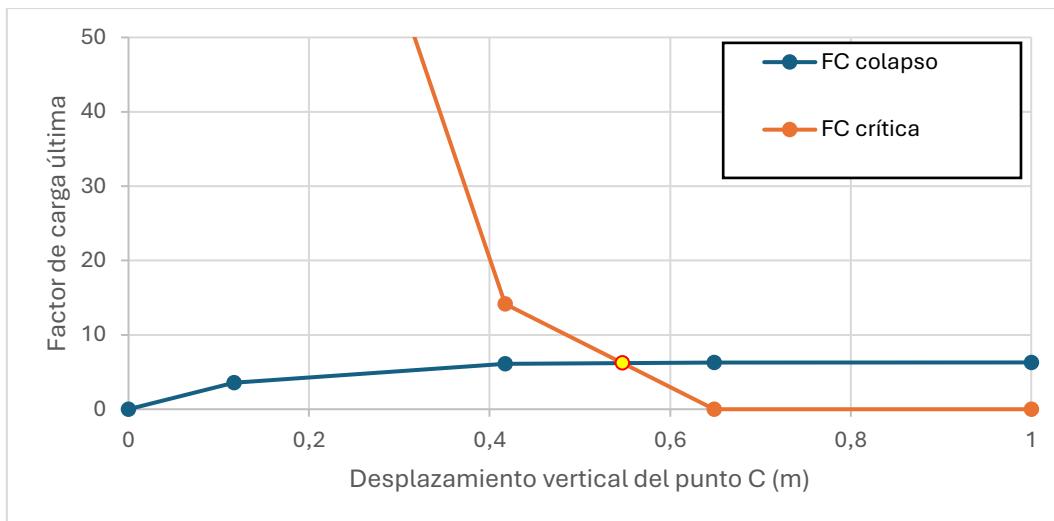


Figura 5.42. Gráfica del punto de intersección correspondiente al factor de carga última

Se puede apreciar que la estructura va a fallar por pandeo tras formarse la segunda rótula plástica y previamente a que se forme la tercera.

De esta forma se obtiene que el factor de carga última, aproximando a dos decimales, para esta estructura con sus condiciones de contorno y distribución de cargas determinados es:

$$\lambda_u = 6,22$$

Con el estudio realizado en los puntos anteriores se puede ver en la *Tabla 5.28* que, como es de esperar, la estructura que combina los perfiles IPE300 e IPE400 es la más estable puesto que se obtiene un factor de carga última mayor que para el resto de las configuraciones.

	IPE300+200	IPE300	IPE300+400
λ_u	1,90	4,53	6,22

Tabla 5.28. Resultados de factor de carga última Caso III

Se va a seleccionar esta configuración para continuar el estudio con la variación de otros parámetros que pueden afectar a este factor de carga última.

5.3.4 Caso III: IPE 300+400 BIAPOYADO

Para este caso se ha utilizado una configuración en la que las barras de los pilares tienen un perfil IPE300 y los dinteles un perfil IPE400 ambos de acero S275 como se puede ver en la *Figura 5.43*.

Aquí se tiene la peculiaridad de que en este caso se han utilizado dos apoyos fijos, reduciendo así el número de posibles rótulas plásticas que se pueden formar y el grado de hiperestaticidad el cual se ve reducido a uno.

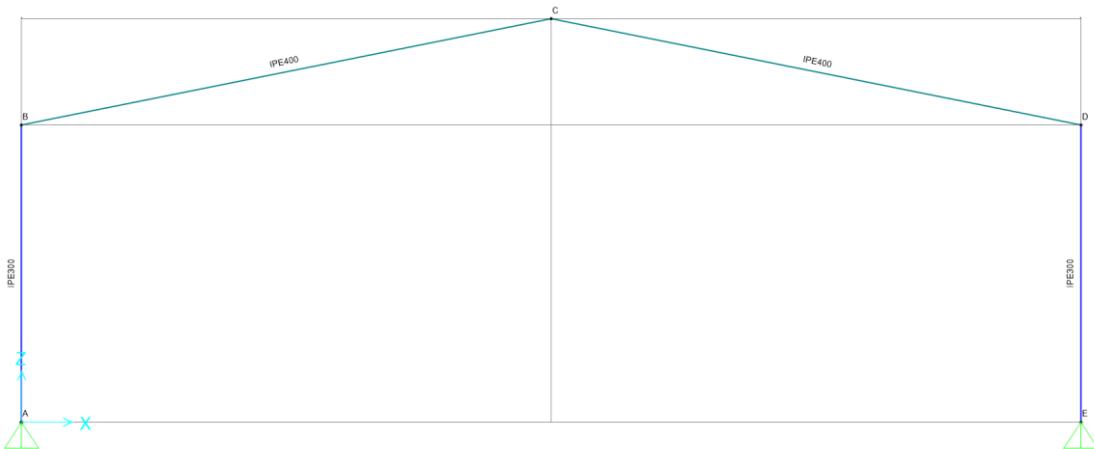


Figura 5.43. Representación modelo Caso III: IPE300+400 biapoyado

Tras el estudio de la estructura frente a colapso plástico se han obtenido los siguientes resultados de la *Tabla 5.29* que se pueden ver representados gráficamente en la *Figura 5.44*.

Se puede ver la secuencia del orden en el que se forman las diferentes rótulas plásticas, así como el diagrama de esfuerzos y los valores de los momentos plásticos en el Anexo B.

	Dv (c)	FC Colapso
0	0	0
1	0,11463	2,63324
2	0,4465	4,51122
3	1	4,51133

Tabla 5.29. Resultados análisis por colapso plástico

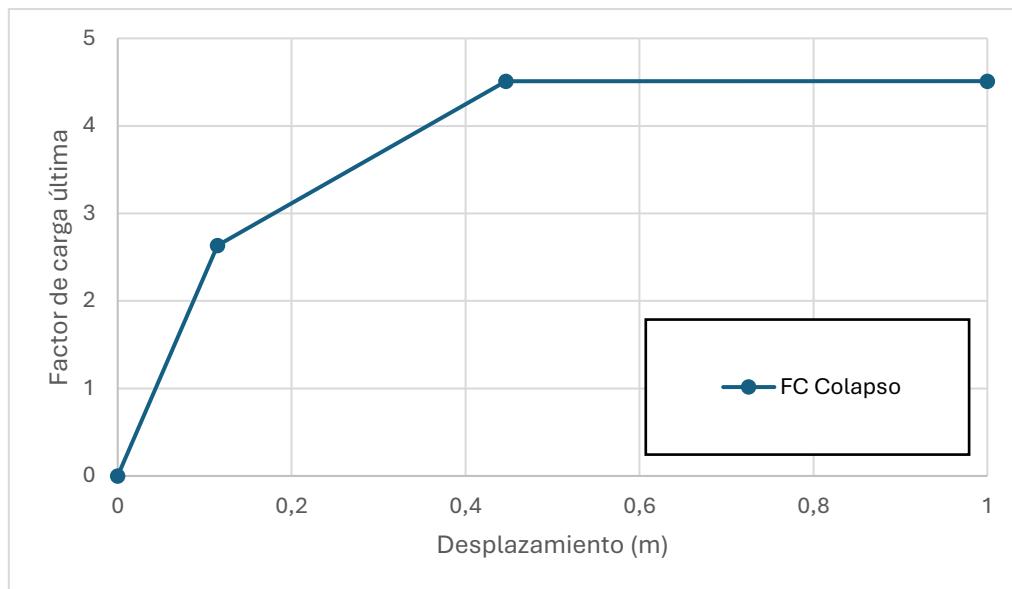


Figura 5.44. Gráfica de los resultados del análisis por colapso plástico

Ahora se procede al análisis de la estructura por pérdida de estabilidad del cual se obtienen los resultados de la Tabla 5.30 representados gráficamente en la Figura 5.45.

	Dv (c)	FC Crítica
1	0,11463	20,8353
2	0,4465	2,13E-03
3	1	2,13E-03

Tabla 5.30. Resultados análisis por pérdida de estabilidad

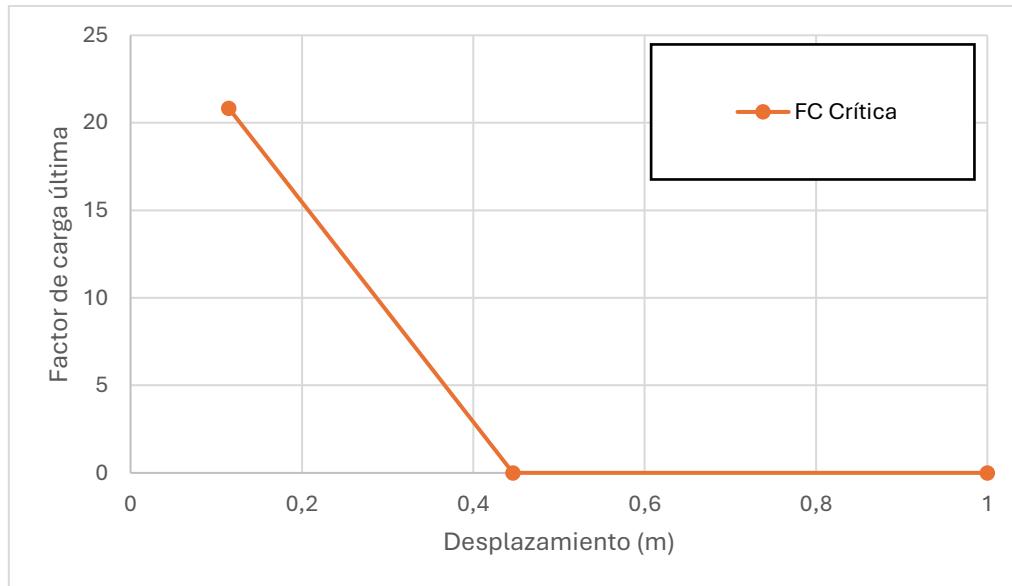


Figura 5.45. Gráfica de los resultados del análisis por pérdida de estabilidad

Para obtener el valor del factor de carga última de la estructura se procede a representar ambas curvas conjuntamente y calcular el punto de intersección de

estas, esta representación gráfica se puede ver en la *Figura 5.46* obteniendo así el punto de intersección como el representado en la *Tabla 5.31*.

Factor de carga última	U crítico (m)	P crítica (N)
	0,3806	4,1384

Tabla 5.31. Valores del punto de intersección

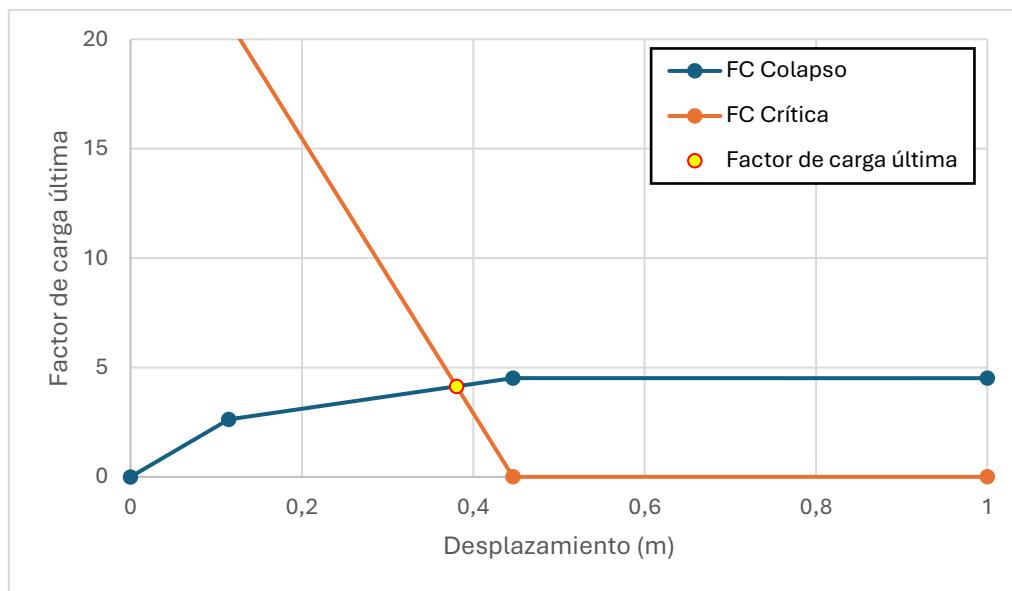


Figura 5.46. Gráfica del punto de intersección correspondiente al factor de carga última

Se puede apreciar que la estructura va a fallar por pandeo tras formarse la primera rótula plástica y previamente a que se forme la segunda.

De esta forma se obtiene que el factor de carga última, aproximando a dos decimales, para esta estructura con sus condiciones de contorno y distribución de cargas determinados es:

$$\lambda_u = 4,14$$

5.3.5 Caso III: IPE 300+400 ACERO S355

Para este caso se ha utilizado una configuración en la que las barras de los pilares tienen un perfil IPE300 y los dinteles un perfil IPE400 ambos de acero S355 como se puede ver en la *Figura 5.47*.

Se vuelve a las mismas condiciones de contorno que se habían utilizado previamente con dos apoyos empotrados, de nuevo haciendo que esta estructura tenga un grado de hiperestaticidad de tres.

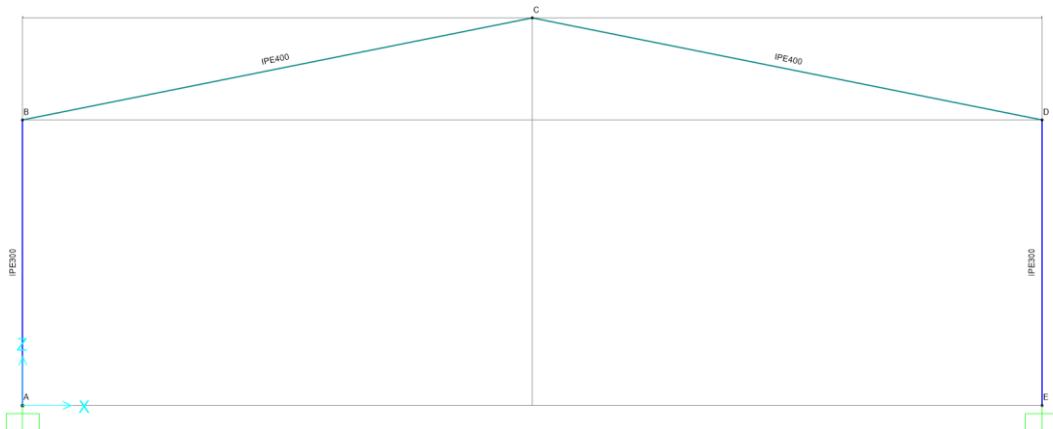


Figura 5.47. Representación modelo Caso II: IPE300+400 acero S355

Tras el estudio de la estructura frente a colapso plástico se han obtenido los siguientes resultados de la *Tabla 5.32* que se pueden ver representados gráficamente en la *Figura 5.48*.

	Dv (c)	FC colapso
0	0	0
1	0,16593	5,05614
2	0,59224	8,69455
3	0,92104	8,93442
4	1	8,93444

Tabla 5.32. Resultados análisis por colapso plástico

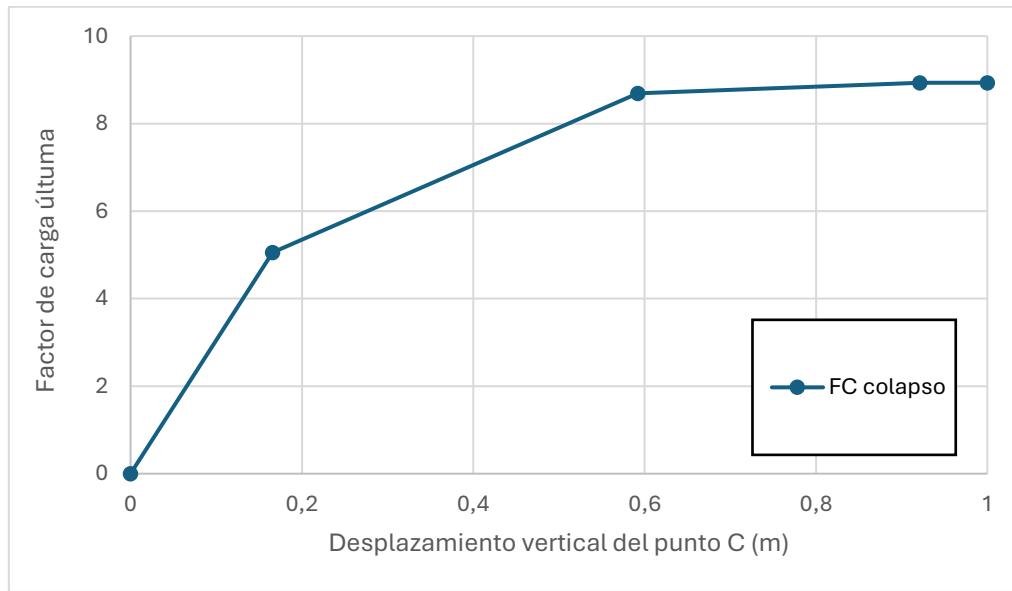


Figura 5.48. Gráfica de los resultados del análisis por colapso plástico

Ahora se procede al análisis de la estructura por pérdida de estabilidad del cual se obtienen los resultados de la *Tabla 5.33* representados gráficamente en la *Figura 5.49*.

	Dv (c)	FC crítica
1	0,16593	121,45569
2	0,59224	14,15834
3	0,92104	0,00253
4		0,00253

Tabla 5.33. Resultados análisis por pérdida de estabilidad

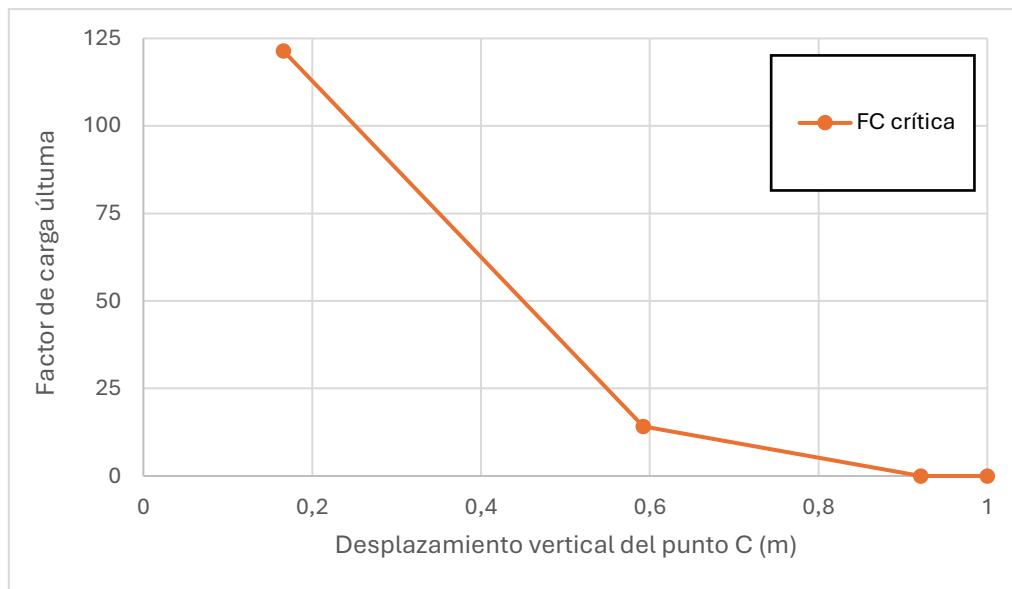


Figura 5.49. Gráfica de los resultados del análisis por pérdida de estabilidad

Para obtener el valor del factor de carga última de la estructura se procede a representar ambas curvas conjuntamente y calcular el punto de intersección de estas, esta representación gráfica se puede ver en la Figura 5.50 obteniendo así el punto de intersección como el representado en la Tabla 5.34.

	U crítico	P crítica (N)
Factor de carga última	0,7170	8,7856

Tabla 5.34. Valores del punto de intersección

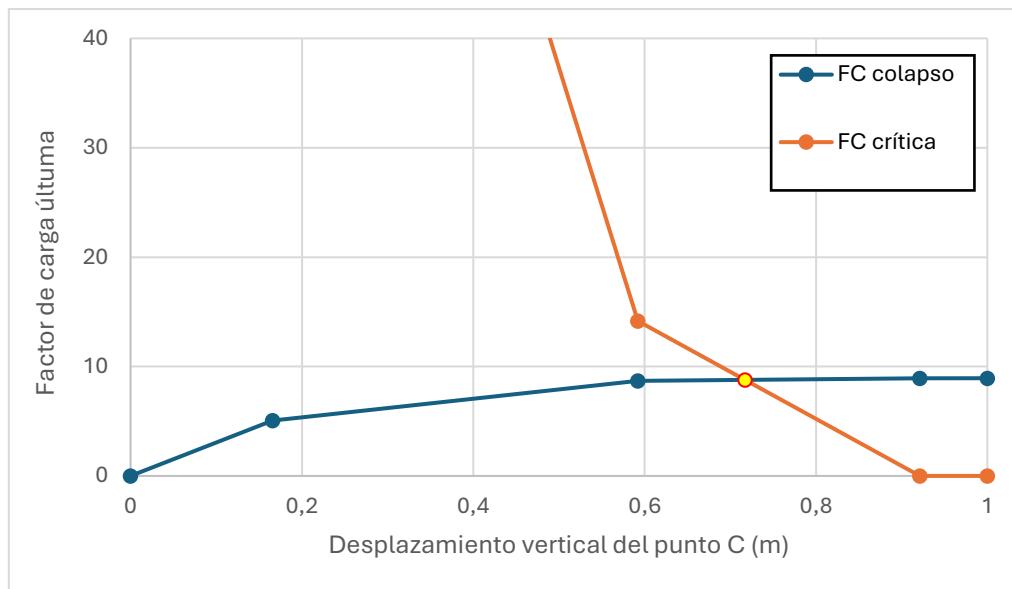


Figura 5.50. Gráfica del punto de intersección correspondiente al factor de carga última

Se puede apreciar que la estructura va a fallar por pandeo tras formarse la segunda rótula plástica y previamente a que se forme la tercera.

De esta forma se obtiene que el factor de carga última, aproximando a dos decimales, para esta estructura con sus condiciones de contorno y distribución de cargas determinados es:

$$\lambda_u = 8,79$$

5.4 CASO IV: UNIÓN TRIPLE DE PÓRTICOS A DOS AGUAS CON CARGAS SEGÚN CTE

En este cuarto y último caso se tiene el mismo pórtico a dos aguas simétrico que en el caso III, con 25m de ancho, una altura de los pilares de 7m y la altura máxima donde se encuentra el punto de unión rígida de los dinteles de 9,5, pero en este caso se van a unir en serie tres pórticos de estas características dando como resultado una anchura de la estructura de 75m.

Se va a respetar la distribución de cargas obtenida mediante la consulta del Código Técnico de la Edificación que simula las cargas de viento y nieve en la zona del polígono de San Cristóbal en Valladolid. Estas cargas se pueden apreciar en las Figuras 5.51 y 5.52, se trata de nueve cargas puntuales verticales en sentido de la gravedad las cuales simulan una carga distribuida en la cubierta correspondiente a la carga de nieve de valor 6460N y una carga horizontal de 8480N que simula la carga de viento distribuida para esta estructura. No se utilizan cargas distribuidas ya que el software SAP2000 no ofrece una fiabilidad suficiente en el análisis de este

tipo de cargas. Esta distribución de cargas se va a mantener durante todo este Caso IV.

Se trata de un pórtico con cuatro apoyos empotrados con lo cual se tiene una estructura con un alto grado de hiperestaticidad.

Este modelo es el que se ha determinado a partir de todo el estudio previo como el de mayor interés para el proyecto, finalmente se van a plantear dos escenarios para dos tipos de acero, de modo que se pueda elegir el escenario más conservador o el contrario.

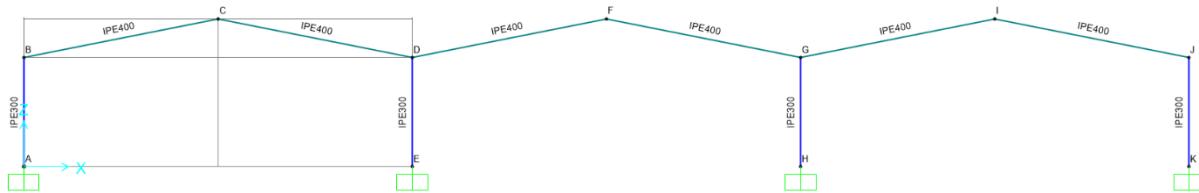


Figura 5.51 Representación modelo Caso IV

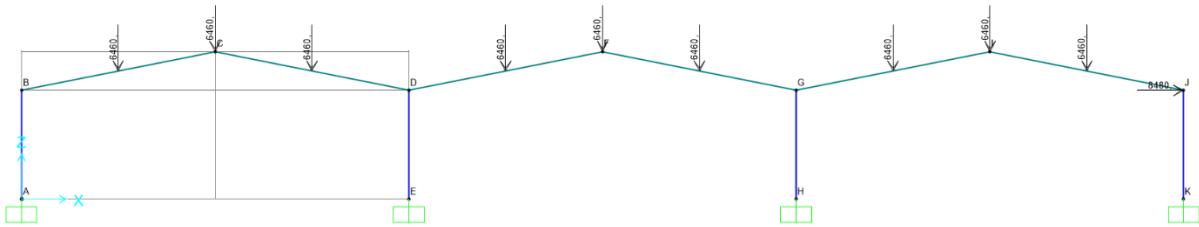


Figura 5.52. Representación distribución de cargas Caso IV

5.4.1 Caso IV: IPE300 + 400 S275

Para este caso se ha utilizado una configuración en la que las barras de los pilares tienen un perfil IPE300 y los dinteles un perfil IPE400 ambos de acero S275 como se puede ver en la Figura 5.53.

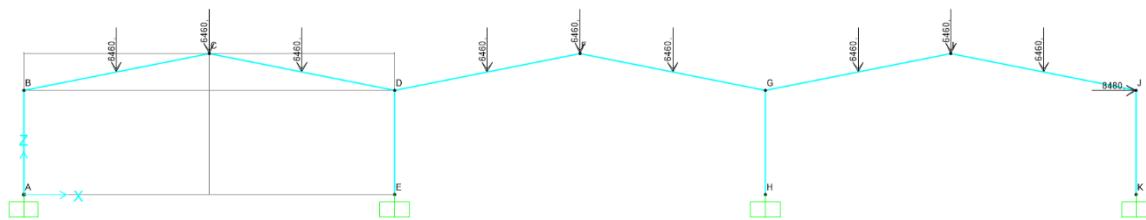


Figura 5.53. Representación modelo Caso IV: IPE300+400 S275

Tras el estudio de la estructura frente a colapso plástico se han obtenido los siguientes resultados de la Tabla 5.35 que se pueden ver representados gráficamente en la Figura 5.54.

Se puede ver la secuencia del orden en el que se forman las diferentes rótulas plásticas, así como el diagrama de esfuerzos y los valores de los momentos plásticos en el Anexo C.

	Dv (c)	FC colapso
0	0	0
1	0,09629	3,91983
2	0,23597	6,00594
3	0,37478	7,2021
4	0,49681	7,33314
5	1	7,33325

Tabla 5.35. Resultados análisis por colapso plástico

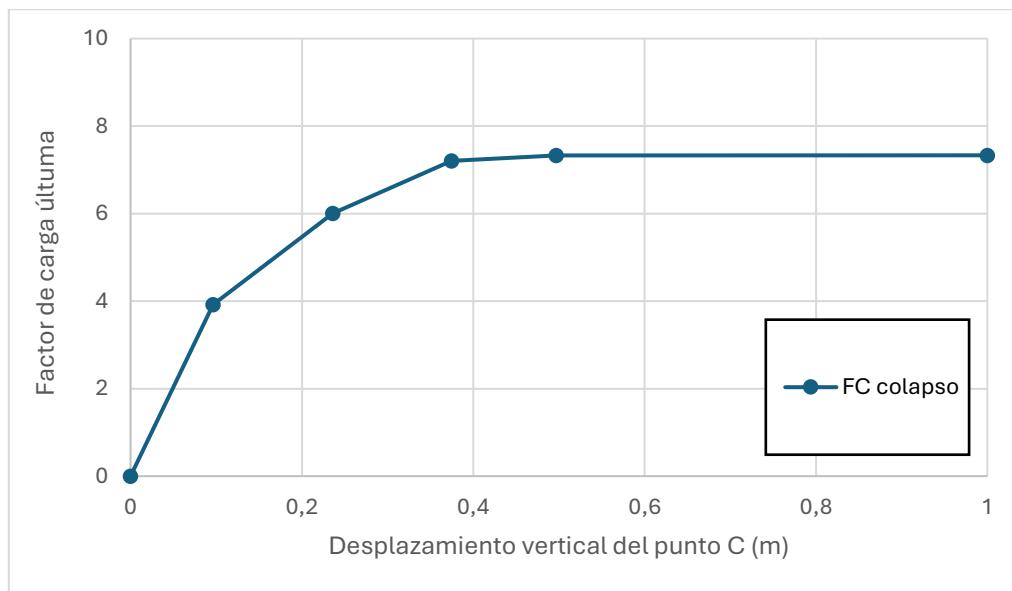


Figura 5.54. Gráfica de los resultados del análisis por colapso plástico

Ahora se procede al análisis de la estructura por pérdida de estabilidad del cual se obtienen los resultados de la *Tabla 5.36* representados gráficamente en la *Figura 5.55*.

	Dv (c)	FC crítica
0	0	160,55081
1	0,09629	142,0788
2	0,23597	113,61674
3	0,37478	19,92167
4	0,49681	0,03436
5	1	0,03437

Tabla 5.36. Resultados análisis por pérdida de estabilidad

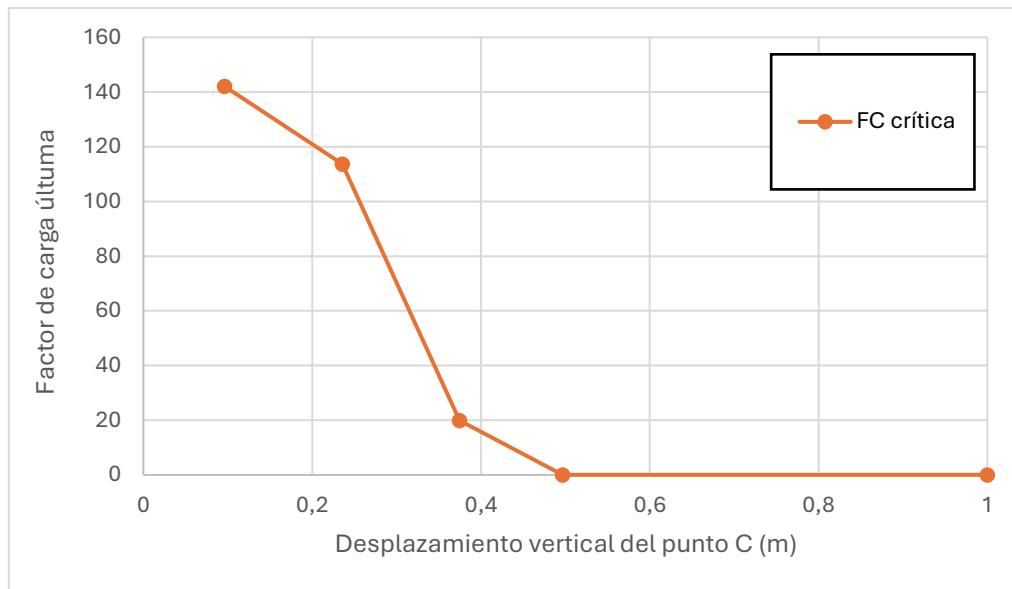


Figura 5.55. Gráfica de los resultados del análisis por pérdida de estabilidad

Para obtener el valor del factor de carga última de la estructura se procede a representar ambas curvas conjuntamente y calcular el punto de intersección de estas, esta representación gráfica se puede ver en la Figura 5.56 obteniendo así el punto de intersección como el representado en la Tabla 5.37.

	U crítico	P crítica (N)
Factor de carga última	0,4523	7,2854

Tabla 5.37. Valores del punto de intersección

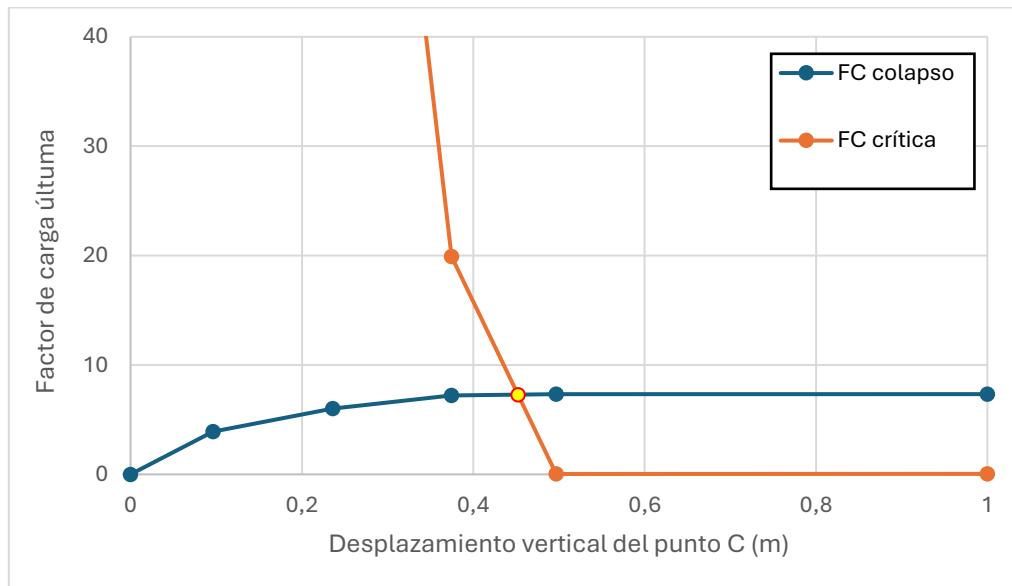


Figura 5.56. Gráfica del punto de intersección correspondiente al factor de carga última

Se puede apreciar que la estructura va a fallar por pandeo tras formarse la tercera rótula plástica y previamente a que se forme la cuarta.

De esta forma se obtiene que el factor de carga última, approximando a dos decimales, para esta estructura con sus condiciones de contorno y distribución de cargas determinados es:

$$\lambda_u = 7,29$$

5.4.2 Caso IV: IPE300 + 400 S355

Para este caso se ha utilizado una configuración en la que las barras de los pilares tienen un perfil IPE300 y los dinteles un perfil IPE400 ambos de acero S355 como se puede ver en la *Figura 5.57*.

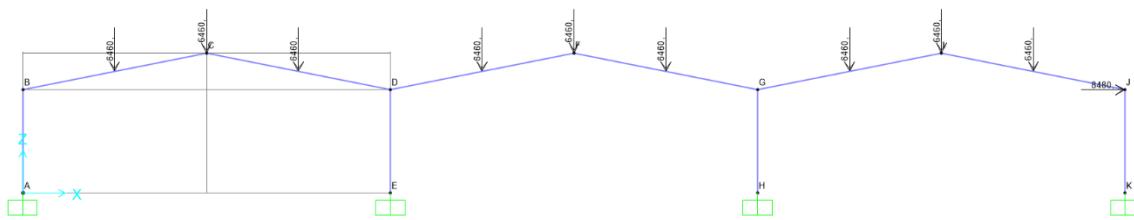


Figura 5.57. Representación modelo Caso IV: IPE300+400 S355

Tras el estudio de la estructura frente a colapso plástico se han obtenido los siguientes resultados de la *Tabla 5.38* que se pueden ver representados gráficamente en la *Figura 5.58*.

Se puede ver la secuencia del orden en el que se forman las diferentes rótulas plásticas, así como el diagrama de esfuerzos y los valores de los momentos plásticos en el Anexo D.

	Dv (c)	FC colapso
0	0	0
1	0,13673	5,56615
2	0,33508	8,52843
3	0,53219	10,22698
4	0,70546	10,41307
5	1	10,41313

Tabla 5.38. Resultados análisis por colapso plástico

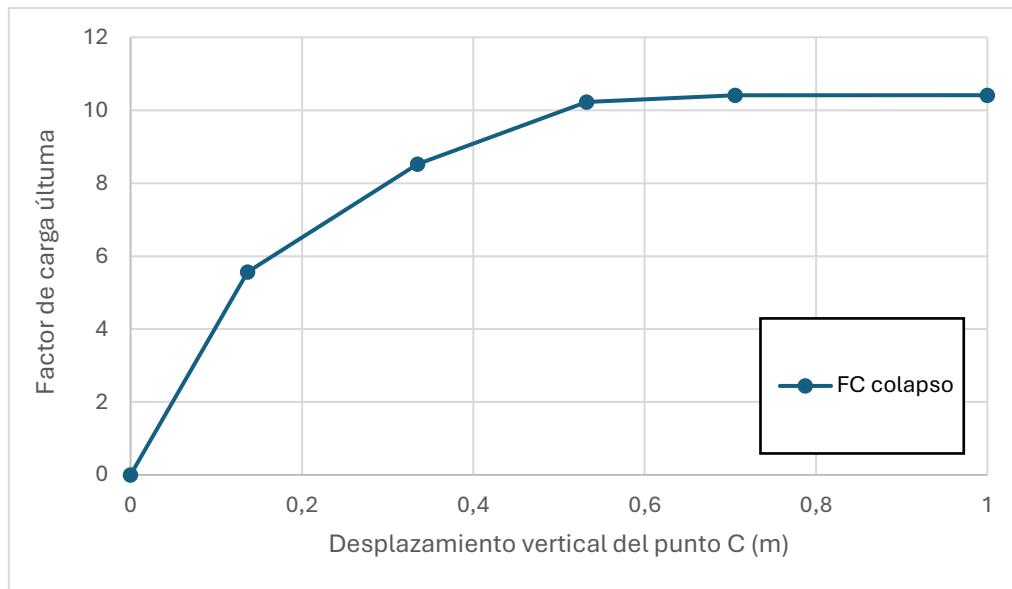


Figura 5.58. Gráfica de los resultados del análisis por colapso plástico

Ahora se procede al análisis de la estructura por pérdida de estabilidad del cual se obtienen los resultados de la Tabla 5.39 representados gráficamente en la Figura 5.59.

Dv (c)	FC crítica
0	160,55081
1	142,0788
2	113,61674
3	19,92166
4	0,03432
5	0,03432

Tabla 5.39. Resultados análisis por pérdida de estabilidad

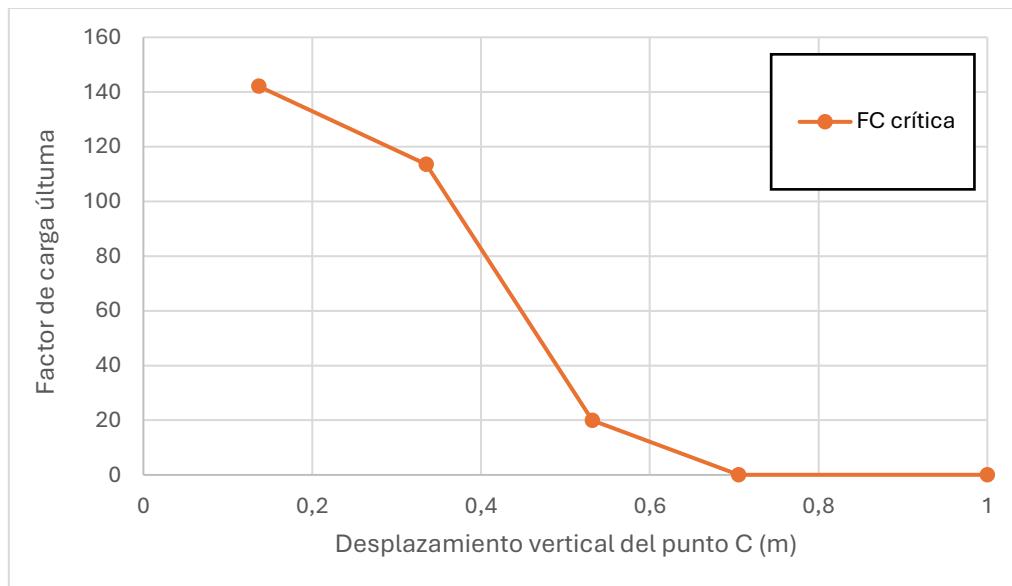


Figura 5.59. Gráfica de los resultados del análisis por pérdida de estabilidad

Para obtener el valor del factor de carga última de la estructura se procede a representar ambas curvas conjuntamente y calcular el punto de intersección de estas, esta representación gráfica se puede ver en la *Figura 5.60* obteniendo así el punto de intersección como el representado en la *Tabla 5.40*.

	U crítico	P crítica (N)
Factor de carga última	0,6159	10,3169

Tabla 5.40. Valores del punto de intersección

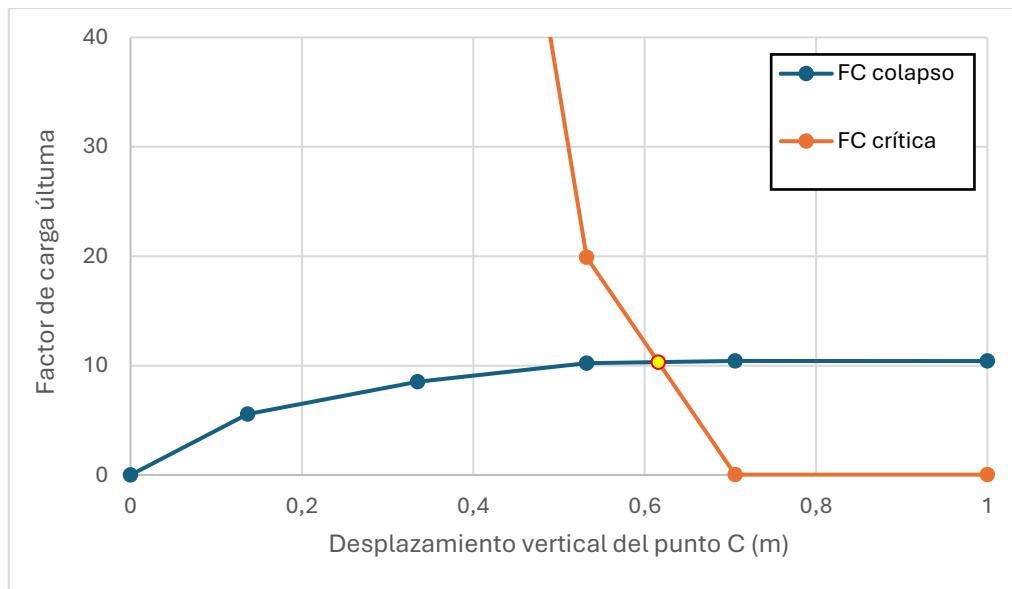


Figura 5.60. Gráfica del punto de intersección correspondiente al factor de carga última

Se puede apreciar que la estructura va a fallar por pandeo tras formarse la tercera rótula plástica y previamente a que se forme la cuarta.

De esta forma se obtiene que el factor de carga última, aproximando a dos decimales, para esta estructura con sus condiciones de contorno y distribución de cargas determinados es:

$$\lambda_u = 10,32$$

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

6 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Con este trabajo el concepto de carga última completa de una manera muy eficaz a la par que visual los conocimientos referentes a la inestabilidad en estructuras, en este caso, de estructuras metálicas.

El valor del factor de carga última representa el coeficiente por el que habría que multiplicar la distribución inicial de cargas para que colapse la estructura. Se puede apreciar cómo, al variar los diferentes parámetros de la estructura, se puede obtener una mayor seguridad frente al colapso.

Como era de esperar al aumentar la sección de las barras se obtienen valores de factor de carga última mayores y por tanto se tiene una estructura más resistente frente al colapso.

De igual manera, al utilizar un material de mayor límite elástico también se logran valores de factor de carga última mayores, aunque de esta forma no se afecta el valor del factor de carga que determina cuándo se forman las rótulas plásticas, sí el desplazamiento.

Por otra parte, al aumentar los grados de libertad de la estructura en sus apoyos, se obtienen estructuras de menor valor del factor de carga última y por tanto son estructuras menos resistentes al colapso.

Por lo general se observa que el instante en el que se produce el colapso de la estructura, el cual se representa por el punto de intersección de ambas curvas, tiene lugar entre la formación de la tercera y cuarta rótulas plásticas, sin embargo, en los casos con perfiles IPE300 en los pilares e IPE400 en los dinteles se aprecia que suele ocurrir tras formarse la segunda rótula plástica. Esto a primera vista puede parecer contradictorio ya que sobre el papel se está fortaleciendo la estabilidad de la estructura al utilizar perfiles de mayor sección, pero se está “adelantando” el colapso, esto no es cierto ya que los valores de factor de carga para los cuales se van a formar las rótulas plásticas son mayores que en los casos más desfavorables.

Por último, en el caso final se tiene una estructura que, dependiendo de la configuración, tiene un factor de carga última de entre siete y diez, lo cual se traduce en que para que se diera el colapso de la estructura se debería dar una situación de cargas de entre siete y diez veces el valor de las determinadas mediante el Código Técnico de la Edificación.

Como **líneas futuras** de este trabajo se podría continuar este estudio tratando de ser más detallado en el caso particular de la aplicación real y llevando a cabo un estudio de la nave completa en tres dimensiones. Planteando diferentes escenarios en los que se estudie su viabilidad y se realice un presupuesto de cara a optimizar el diseño de la nave siempre garantizando su fiabilidad frente al colapso.

Por ejemplo, en los dos escenarios expuestos para el caso final, el caso en el que las barras son de un acero S355 es cierto que da una mayor seguridad y fiabilidad a la estructura, pero, por otra parte, encarecerá la estructura. Por tanto, es importante determinar un valor de factor de carga mínimo admisible para tratar de optimizar al máximo la estructura y no sobredimensionarla generando unos mayores costes.

Por otra parte, se debería realizar un estudio detallado de la zona del Polígono de San Cristóbal y su mercado de parcelas, estudiando en cuáles sería viable construir la estructura y las posibles limitaciones dimensionales que pueda generar, las cuales van a tener un impacto crítico en el proyecto.

Una vez conocida la situación geográfica exacta de la nave y las condiciones del terreno se podrán determinar con mayor precisión y exactitud las cargas según el Código Técnico de Edificación.

En definitiva, se trata de realizar un análisis mucho más detallado y centrado en el caso real concreto del cual se disponga.

Otra línea futura del trabajo sería implementar este estudio dentro de las prácticas que se imparten en la asignatura de Estructuras y Construcciones Industriales del Grado de Ingeniería Mecánica en la Universidad de Valladolid con el fin de ayudar a los alumnos a comprender este fenómeno y familiarizarse aún más con un software de análisis estructural como es el propio SAP2000.

CAPÍTULO 7: *PRESUPUESTO*

7 PRESUPUESTO

7.1 INTRODUCCIÓN

El objetivo de este apartado es determinar cuáles son los costes teóricos necesarios para llevar a cabo este proyecto y analizar la viabilidad de este.

Para la realización de este, tiene mucho más peso la aportación humana que la aportación material, la cual se ve limitada prácticamente a un ordenador y a un software de cálculo de estructuras como es SAP2000.

Los costes totales son una combinación de costes indirectos y costes directos:

$$\text{Costes totales} = \text{Costes indirectos} + \text{Costes directos}$$

Ecuación 7.1. Cálculo de costes totales

- Costes indirectos: aquellos que afectan al proceso de producción, pero no afectan de forma directa al producto final. Entre ellos destacan costes administrativos y costes de explotación (internet, agua, electricidad, telefonía...)
- Costes directos: cuando hablamos de costes directos, hacemos referencia a aquellos que pueden ser asignados de forma directa e inequívoca al cálculo del precio final del producto o servicio que se ofrece. Los costes de mano de obra y material amortizable son costes directos.

7.2 COSTES DIRECTOS

En este proyecto, los costes directos engloban los costes de material amortizable y no amortizable y los costes de mano de obra.

7.2.1 Costes directos - mano de obra

Los gastos destinados a los trabajadores participantes en el proyecto son los costes de mano de obra. Para nuestro proyecto, solo es necesario el trabajo de un ingeniero.

Los costes directos de mano de obra se dividen en:

- Sueldo bruto del ingeniero.
- Coste de la seguridad social.
- Costes de formación en riesgos laborales y EPIs.

Calculando los días de trabajo efectivos en un año, sale un total de 222 días laborables. A razón de 8 horas diarias efectivas, el ingeniero trabaja un total de 1776 horas anuales.

Días totales en un año	365
Fines de semana	104
Días festivos reconocidos	11
Días laborables de vacaciones	28
Total, días útiles de trabajo	222

A razón de 8 horas diarias: 1776 h/año

Tabla 7.1. Cálculo anual de los días y horas efectivas de trabajo

En la siguiente tabla se muestran los costes anuales que supone tener un trabajador:

Sueldo bruto	32.000 €/año
Cotizaciones seguridad social (~30%)	9600 €/año
Formación PRL	100 €/año
EPIs	150 €/año
Total	41.850 €/año

Coste de mano de obra: 23,56 €/h

Tabla 7.2. Coste total del personal

A continuación, se muestran las actividades realizadas y la distribución del tiempo empleado para llevarlas a cabo.

Actividad	Horas Ingeniero
Análisis previo y estudios preliminares	100
Familiarización con el software SAP2000	105
Modelado de los casos de estudio	250
Ánalisis de los resultados	65
Optimización y corrección de modelos	70
Preparación de la documentación	150
Nº total de horas empleadas en el proyecto	740

Tabla 7.3. Distribución temporal del trabajo

El coste de que un ingeniero trabaje 740 horas, si sueldo es de 23,56 €/hora, supone 17.434,4 € de costes de mano de obra.

7.2.2 Costes directos – material amortizable

Estos costes están asociados al equipo informático y a la licencia software que se han utilizado en este proyecto. Suponiendo una amortización lineal de este material, se considera que el tiempo total de amortización lineal media sea de 3 años.

El material amortizable empleado en el proyecto es:

- Ordenador portátil HP Intel(R) Core (TM) i5-8250U
- Periféricos: ratón y monitor
- Licencia de software SAP2000

Partiendo de la estimación de que la vida útil de los materiales amortizables adquiridos es de 3 años, y teniendo en cuenta que cada año tiene 1776 horas laborables, los equipos y licencias tendrán un uso en vida útil de 5328 horas.

A continuación, se muestra el desembolso inicial de cada material, el coste de amortización, la utilización y el coste de amortización de cada uno:

Actividad	Desembolso Inicial	Coste por hora	Horas empleadas	Coste de amortización
Ordenador portátil	500 €	0,094 €/h	520	48,88 €
Periféricos	200 €	0,038 €/h	520	19,76 €
SAP2000	2820 €	0,529 €/h	345	182,51 €
Total				251,15 €

Tabla 7.4. Costes directos material amortizable

7.2.3 Costes directos – material no amortizable

Los gastos derivados de la realización del proyecto es lo que engloban los costes de material no amortizable:

Material de representación gráfica	100 €
Encuadernación	50 €
Total	150 €

Tabla 7.5. Costes directos - material no amortizable

7.2.4 Costes directos totales

En la siguiente tabla se resumen los costes directos totales:

Mano de obra	17.434,4 €
Material amortizable	251,15 €
Material no amortizable	150 €
Total	17.835,55 €

Tabla 7.6. Costes directos totales

7.3 COSTES INDIRECTOS

Los costes indirectos engloban los gastos de las actividades de una empresa que no se pueden atribuir a ninguna actividad del proyecto en concreto. Se dividen en costes administrativos y de explotación, como pueden ser electricidad, internet, telefonía, servicios comunitarios...

Costes administrativos	150 €
Costes de explotación	450 €
Total	600 €

Tabla 7.7. Costes indirectos totales

7.4 COSTES TOTALES

Para finalizar el apartado de coste económico, se recogen en la siguiente tabla los costes directos e indirectos, cuya suma es el resultado de los costes totales que conlleva la realización del proyecto:

Costes directos	17.835,55 €
Costes indirectos	600 €
Costes totales	18.435,55 €
+21% IVA	22.307,02 €

Tabla 7.8. Costes totales del proyecto

El total del proyecto, aplicando el 21% de IVA, ascienden a veinte y dos mil trescientos siete euros con dos céntimos.

CAPÍTULO 8: *BIBLIOGRAFÍA*

8 BIBLIOGRAFÍA

1. Shatarat N. Effect of Plastic Hinge Properties in Nonlinear Analysis of Highway Bridges. *Jordan J Civ Eng.* 2012;6(4):501–10. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/234698524.pdf> (citado 2025 Jul 7)
2. Inel M, Özmen HB. Effects of plastic hinge properties in nonlinear analysis of reinforced concrete buildings. *Eng Struct.* 2006;28(11):1494–1502. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/222528216> (citado 2025 Jul 7)
3. FHWA. Design Ultimate Load [Internet]. 2020 (citado 2025 Jul 7). Disponible en: <https://www.fhwa.dot.gov>
4. López-Colina C, Fafitis A. Finite element analysis of steel frames with semi-rigid connections. *Comput Struct.* 2000;77(6):639–46 [Internet]. (Citado 2025 Jul 10). Disponible en: <https://pdfs.semanticscholar.org/5766/ee4a8255a252ce319f5f02a14fc70dc5f61e.pdf>
5. Zhang Y, Wang X, Li J. Two-step approach for evaluating dynamic ultimate load of maritime structures. *Materials.* 2023;12(2):219. <https://www.mdpi.com/1996-1944/12/2/219> (citado 2025 Jul 7)
6. (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana [MITMA]. Código Estructural. Anejo 18: Bases de cálculo [Internet]. Madrid: MITMA; 2022 (citado 2025 Jul 7). Disponible en: https://cdn.mitma.gob.es/portal-web-drupal/CPH/codigo_structural/anejo_18_bases_de_calculo.pdf)
7. McCormac JC, Nelson JK. Structural analysis: engineering methods and models. Wiley; 2014.
8. Chen WF, Han D. Plasticity for structural engineers. J Ross Publishing; 2007.
9. Hibbeler RC. Structural analysis. 9th ed. Pearson; 2017.
10. Megson THG. Structural and stress analysis. Butterworth-Heinemann; 2019.
11. Timoshenko SP, Gere JM. Theory of elastic stability. Dover Publications; 2012.
12. M4 Engineering. Snap-through buckling in Simcenter 3D [Internet]. 2020 Dic 9 (citado 2025 Abr 29). Disponible en: <https://www.m4-engineering.com/snap-through-buckling-in-simcenter-3d/>
13. Sadd MH. Elasticity: theory, applications, and numerics. 4th ed. Elsevier Science; 2021.
14. Beer FP, Johnston ER, DeWolf JT, Mazurek DF. Mechanics of materials. 7th ed. New York: McGraw-Hill; 2015.

15. Gere JM, Timoshenko SP. Mechanics of materials. 4th ed. Boston: PWS Publishing; 1997.
16. Zienkiewicz OC, Taylor RL, Zhu JZ. The finite element method: its basis and fundamentals. 6th ed. Oxford: Elsevier; 2005.
17. Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. Código Técnico de la Edificación [Internet]. (citado 2025 Jul 8). Disponible en: <https://www.codigotecnico.org>
18. BOE. Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación [Internet]. (citado 2025 Abr 29). Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2006-5515>
19. Código Técnico. Documento Básico SE-AE - Seguridad estructural Acciones en la edificación [Internet]. (citado 2025 Abr 29). Disponible en: <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/SE/DBSE-AE.pdf>
20. Código Técnico. Documento Básico SE Seguridad estructural [Internet]. (citado 2025 Abr 29). Disponible en: <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/SE/DBSE.pdf>
21. Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. Documento Básico DB-SE Seguridad estructural. Anexo 1 [Internet]. (citado 2025 Jul 8). Disponible en: <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/SE/DBSE.pdf>
22. OCW UC3M. Presión dinámica del viento [Internet]. (citado 2025 Abr 29). Disponible en: https://ocw.uc3m.es/.../TECI_Tema2_4_Presion_dinamica_viento.pdf
23. Universidad de Zaragoza. Cálculo automático de acciones de viento en naves industriales con Excel [Internet]. (citado 2025 Abr 29). Disponible en: <https://zaguan.unizar.es/record/5511/files/TAZ-PFC-2010-444.pdf>
24. Sonne PV. Cargas de viento y nieve (CTE) - Cálculo de lastre [Internet]. (citado 2025 Abr 29). Disponible en: <https://www.sonne-pv.solar/...download=1>

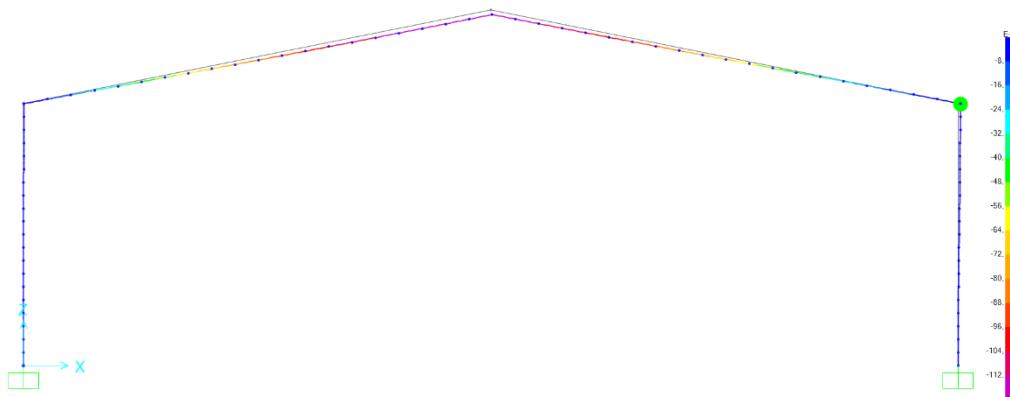
ANEXO

ANEXO A

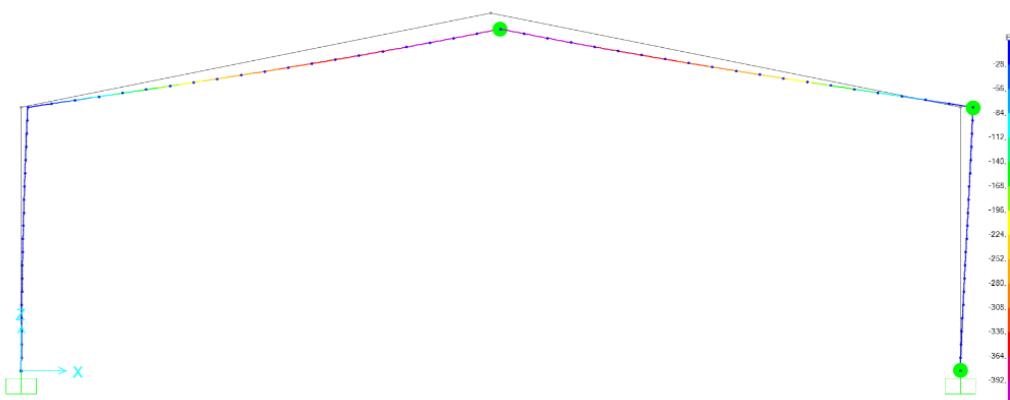
Cuando se realiza el análisis de cálculo plástico, se puede ver la evolución de la estructura conforme se van formando las diferentes rótulas plásticas, a continuación, en los Anexo A1, A2 y A3 se muestran los instantes en los que se forman las rótulas plásticas.

En las figuras se puede ver una escala de colores la cual magnifica el desplazamiento vertical del punto C, siendo este el punto central de mayor altura.

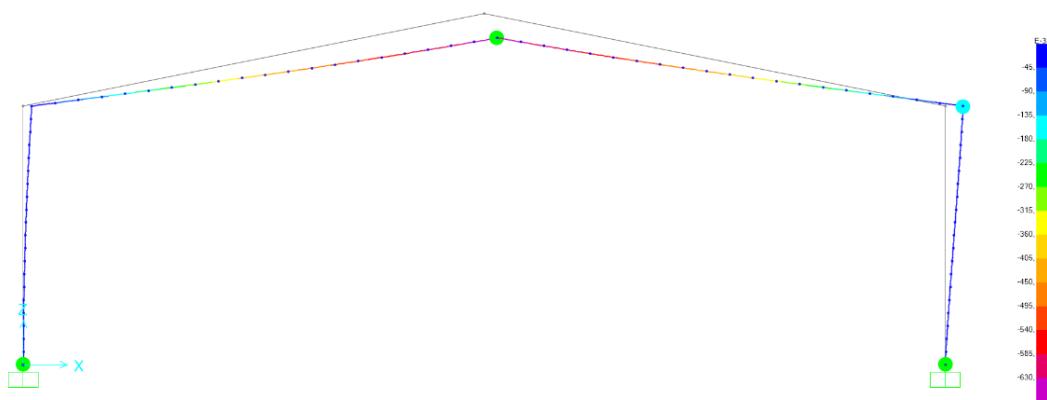
El cambio de color de las rótulas indica que se ha superado el límite giro/momento establecido previamente para cada uno de los estados, no es relevante en este estudio.



Anexo A 1. Formación de las rótulas plásticas. Caso III: IPE300+400 Paso 1

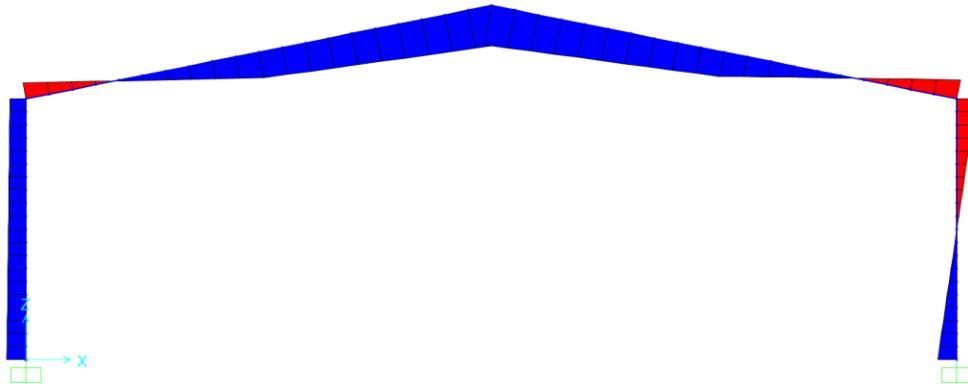


Anexo A 2. Formación de las rótulas plásticas. Caso III: IPE300+400 Paso 2



Anexo A 3. Formación de las rótulas plásticas. Caso III: IPE300+400 Paso 3

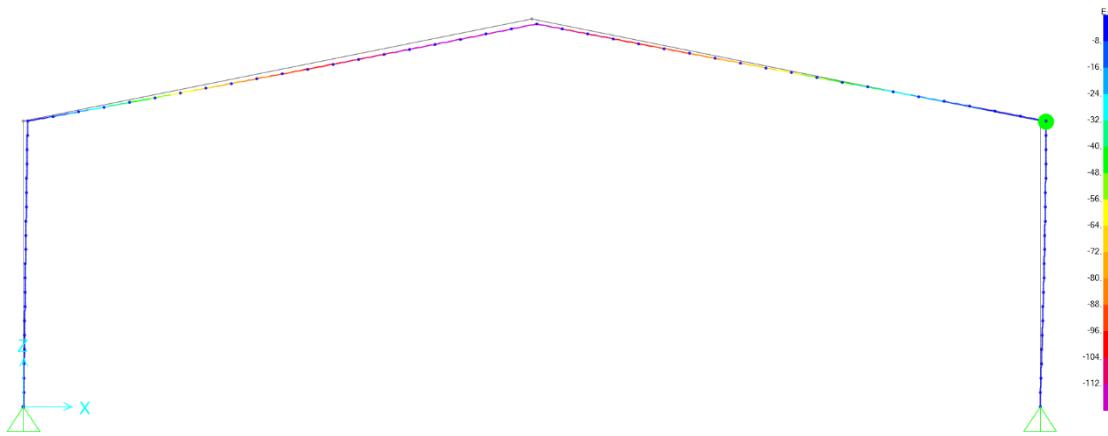
Otro tema interesante a que se puede obtener del análisis es el diagrama de momentos flectores, el cual se muestra en el Anexo A4 en el instante de colapso, con este podemos sacar fácilmente el momento plástico de las rótulas.



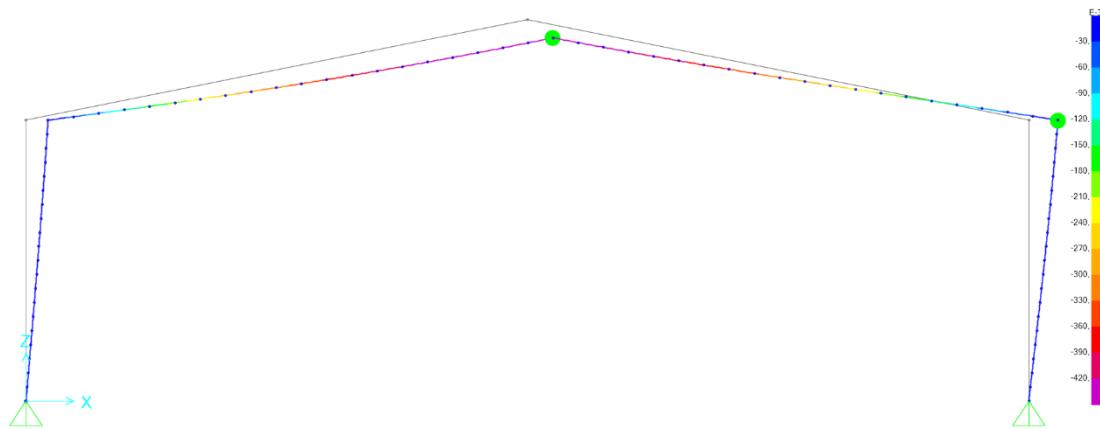
Anexo A 4. Diagrama de momentos flectores Caso III: IPE300+400

ANEXO B

En los Anexo B1 y B2 se muestran los instantes en los que se forman las rótulas plásticas.

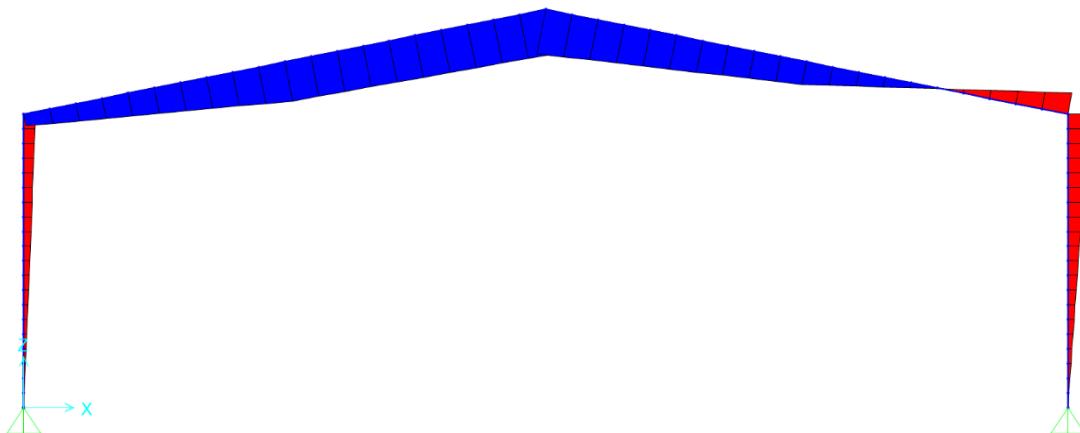


Anexo B 1. Formación de las rótulas plásticas. Caso III: IPE300+400 BIAPOYADO Paso 1



Anexo B 2. Formación de las rótulas plásticas. Caso III: IPE300+400 BIAPOYADO Paso 2

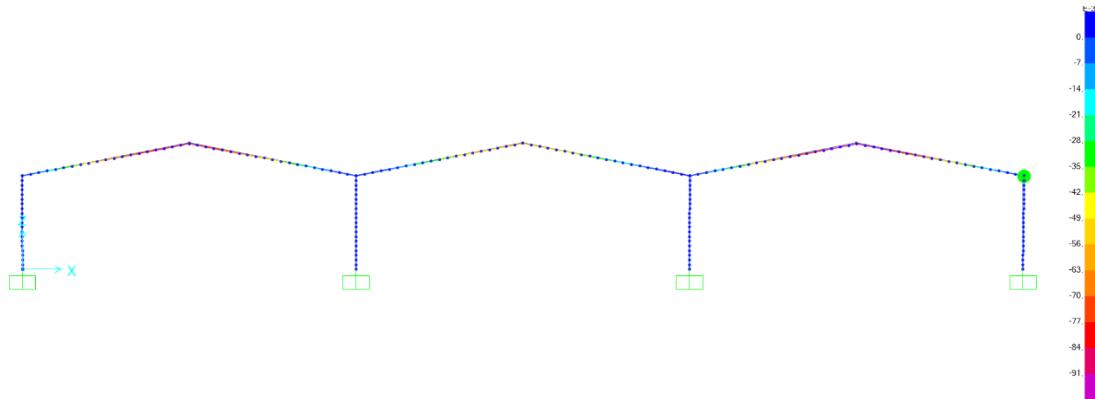
En el AnexoB3 de muestra el diagrama de momentos flectores en el instante de colapso, con este podemos sacar fácilmente el momento plástico de las rótulas.



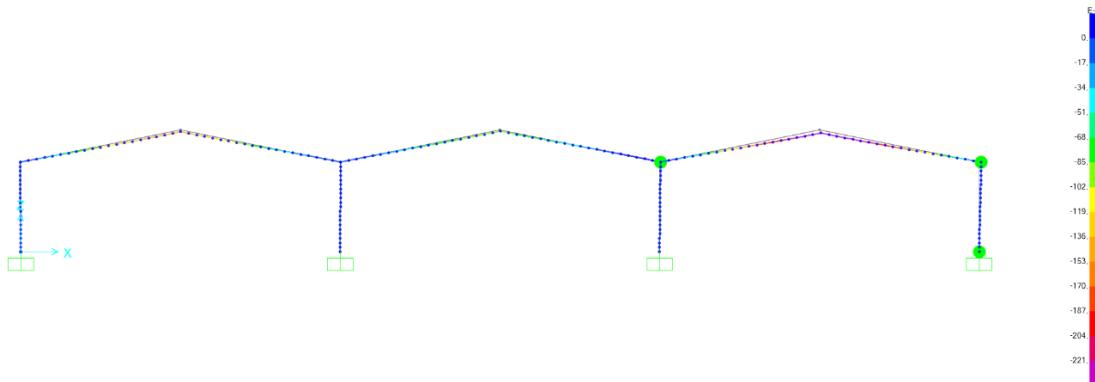
Anexo B 3. Diagrama de momentos flectores Caso III: IPE300+400 BIAPOYADO

ANEXO C

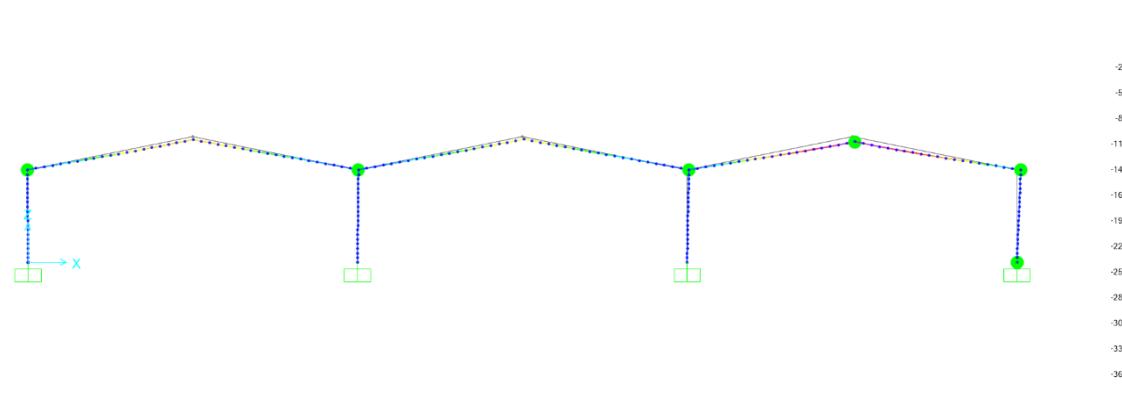
En los Anexo C1, C2 y C3 se muestran los instantes en los que se forman las rótulas plásticas.



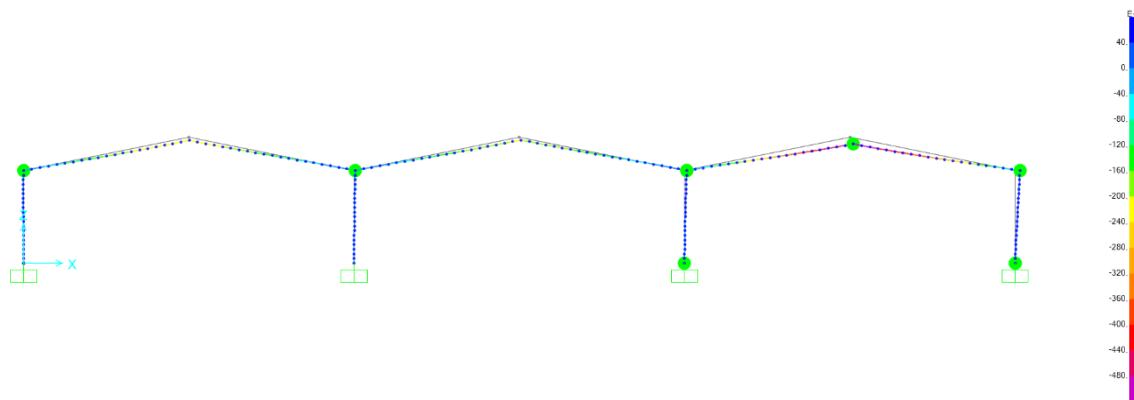
Anexo C 1. Formación de las rótulas plásticas. Caso IV: ACERO S275 Paso 1



Anexo C 2. Formación de las rótulas plásticas. Caso IV: ACERO S275 Paso 2

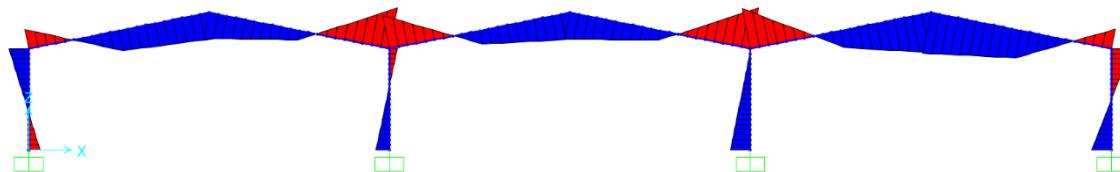


Anexo C 3. Formación de las rótulas plásticas. Caso IV: ACERO S275 Paso 3



Anexo C 4. Formación de las rótulas plásticas. Caso IV: ACERO S275 Paso 4

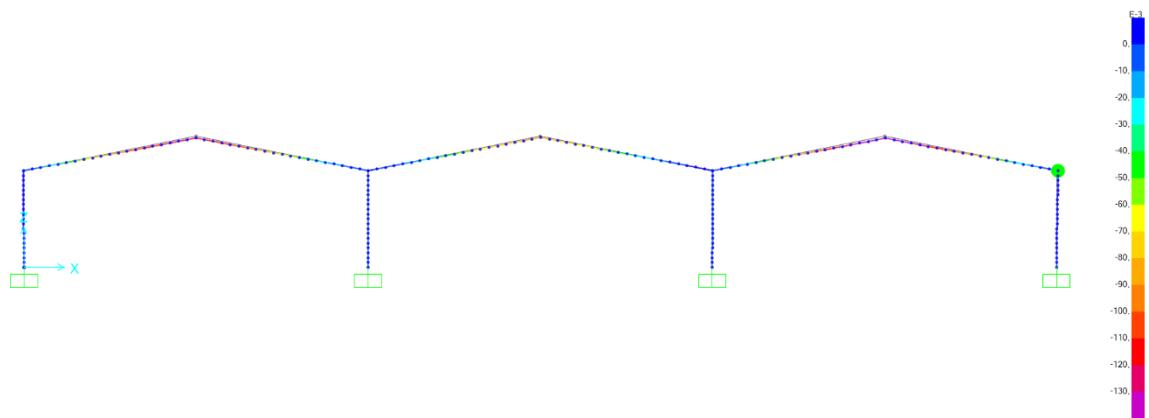
En el Anexo C4 de muestra el diagrama de momentos flectores en el instante de colapso, con este podemos sacar fácilmente el momento plástico de las rótulas.



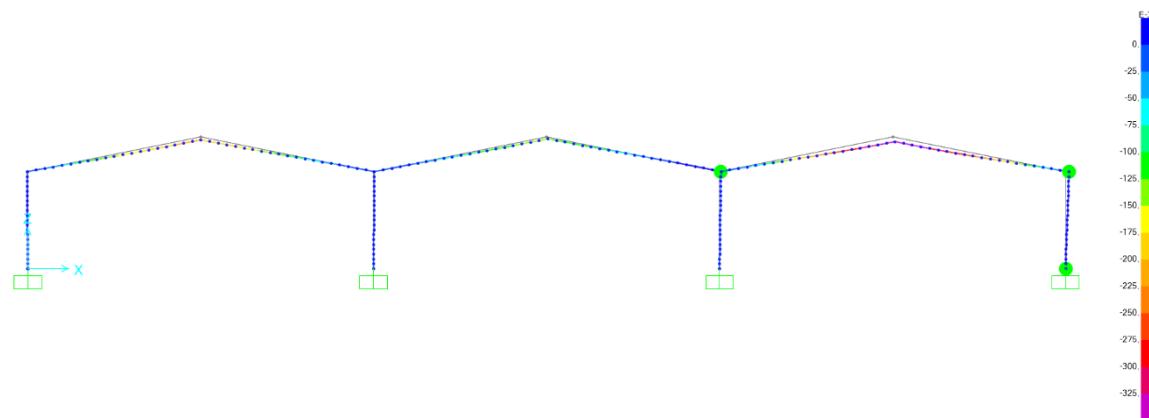
Anexo C 5. Diagrama de momentos flectores Caso IV: ACERO S275

ANEXO D

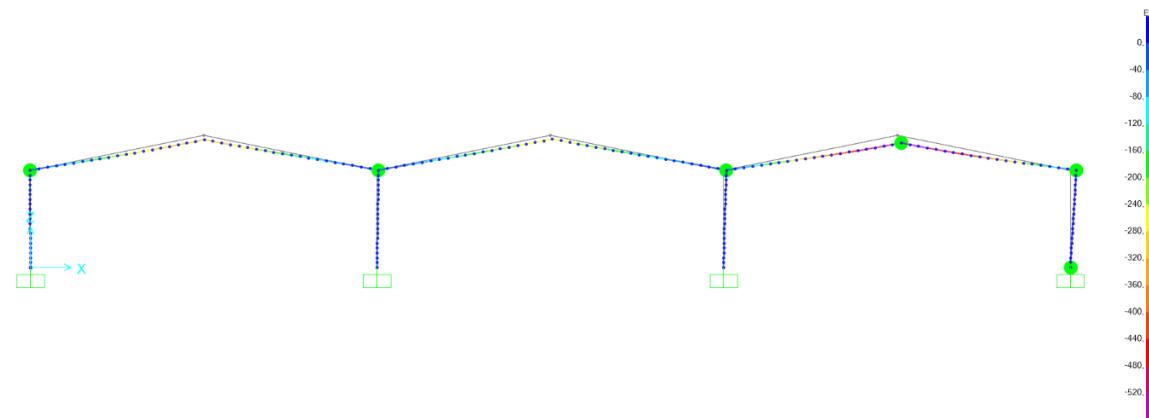
En los Anexo D1, D2, D3 y D4 se muestran los instantes en los que se forman las rótulas plásticas.



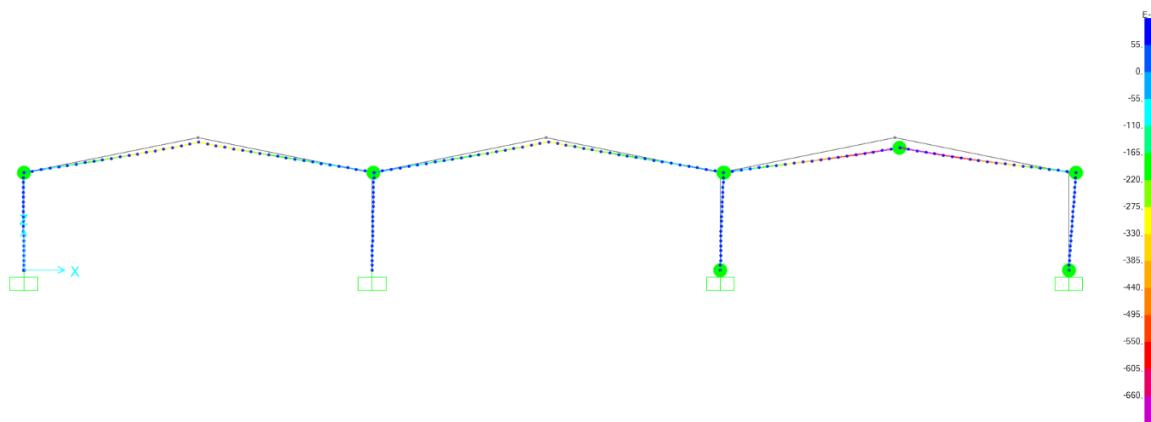
Anexo D 1. Formación de las rótulas plásticas. Caso IV: ACERO S355 Paso 1



Anexo D 2. Formación de las rótulas plásticas. Caso IV: ACERO S355 Paso 2

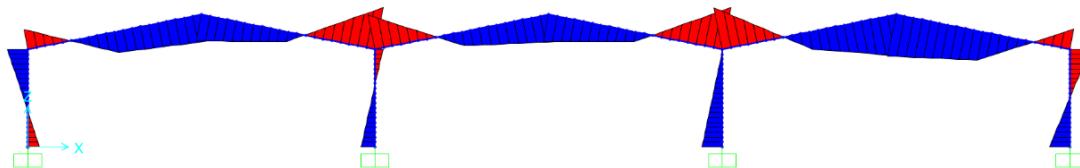


Anexo D 3. Formación de las rótulas plásticas. Caso IV: ACERO S355 Paso 3



Anexo D 4. Formación de las rótulas plásticas. Caso IV: ACERO S355 Paso 4

En el Anexo D5 se muestra el diagrama de momentos flectores en el instante de colapso, con este podemos sacar fácilmente el momento plástico de las rótulas.



Anexo D 5. Diagrama de momentos flectores Caso IV: ACERO S355