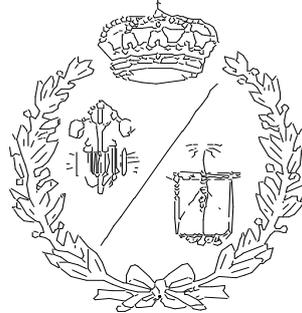


**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Proyecto Fin de Grado

**ESTUDIO COMPARATIVO DE LA
RESISTENCIA A PANDEO LATERAL DE
ARCOS DE ACERO CON ALMAS DE CHAPA
CORRUGADA**

**(COMPARATIVE STUDY OF THE LATERAL
TORSIONAL BUCKLING RESISTANCE OF STEEL
ARCHES WITH CORRUGATED PLATE WEBS)**

Para acceder al Título de

GRADUADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Autor: Francisco Guardo González

Director: Miguel Ángel Serna Oliveira

Febrero - 2023

INDICE

1. INTRODUCCION.....	1
1.1 EL ARCO COMO ELEMENTO ESTRUCTURAL.....	1
1.2 TIPOLOGÍAS DE ARCOS.	3
1.3 ESTABILIDAD DE ARCOS.....	5
1.4 MODOS BÁSICOS DE PANDEO.....	8
1.5 OBJETO DEL TFG.	10
2. ESTUDIO COMPARATIVO DE RESISTENCIA A PANDEO LATERAL.	12
2.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.	12
2.2 GEOMETRÍA DE ARCOS.....	18
2.2.1 <i>Comparativa de pesos totales por unidad de longitud.</i>	24
2.3 MODELO DE ELEMENTOS FINITOS.....	26
2.3.1 <i>Estudio de convergencia.</i>	26
2.3.2 <i>Modelo de elementos finitos.</i>	31
2.4 RESULTADOS DE PANDEO LATERAL.	38
3. ESTUDIO COMPARATIVO DE CARGAS ULTIMAS.	46
3.1 IMPERFECCIONES INICIALES.	46
3.2 ANÁLISIS NO-LINEAL.....	48
3.3 RESULTADOS.....	49
4. CONCLUSIONES.....	69
5. BIBLIOGRAFÍA.....	72

RESUMEN

Mediante el análisis por elementos finitos (Programa ANSYS) en el trabajo fin de grado se abordó el estudio comparativo de la resistencia a pandeo lateral de arcos de acero no arriostrados, con diferente morfología de sección 'I', sometidos a cargas en su plano.

En primer lugar, se realizó un análisis lineal para cada una de las diferentes secciones estudiadas con el objetivo de determinar la carga elástica teórica de pandeo lateral.

Por último, se llevó a cabo un análisis no lineal con imperfecciones iniciales con el objetivo de determinar la carga última en las diferentes secciones estudiadas. Las imperfecciones iniciales se obtuvieron a través del análisis lineal en el que se determina la carga elástica teórica de pandeo lateral, aplicando un factor de escala de valor 0,04. La carga aplicada durante el análisis no lineal con imperfecciones iniciales fue igual al valor de la carga elástica teórica de pandeo lateral multiplicada por dos.

En cuanto a la morfología de la sección, en el estudio se contempló los siguientes tipos de perfiles en 'I' de acero:

1. Perfil con alma plana.
2. Perfil con alma plana y 6 rigidizadores transversales.
3. Perfil con alma plana y 12 rigidizadores transversales.
4. Perfil con alma de chapa corrugada rectangular.
5. Perfil con alma de chapa corrugada trapezoidal.
6. Perfil con alma de chapa corrugada triangular.

ABSTRACT

Using finite element analysis (ANSYS software) in the final degree project, a comparative study of the lateral buckling resistance of unbraced steel arches, with different 'I' section morphology, subjected to in-plane loads was carried out.

Firstly, a linear analysis was carried out for each of the different sections studied in order to determine the theoretical elastic lateral buckling load.

Finally, a non-linear analysis with initial imperfections was carried out in order to determine the ultimate load in the different sections studied. The initial imperfections were obtained through the linear analysis in which the theoretical elastic load of lateral buckling is determined, applying a scale factor of 0.04 value. The load applied during the non-linear analysis with initial imperfections was equal to the value of the theoretical elastic lateral buckling load multiplied by two.

In terms of section morphology, the following types of steel 'I' sections were considered in the study:

1. Flat web section.
2. Profile with flat web and 6 transverse stiffeners.
3. Profile with a flat web and 12 transverse stiffeners.
4. Profile with rectangular corrugated sheet metal web.
5. Profile with trapezoidal corrugated sheet web.
6. Profile with triangular corrugated sheet web

1. INTRODUCCION.

1.1 EL ARCO COMO ELEMENTO ESTRUCTURAL.

El arco es un elemento estructural de directriz curva, que salva grandes y pequeñas luces, bien como cubierta, bien para sostener un forjado o formando parte de un puente. Este transmite toda la carga que soporta a los apoyos mediante una fuerza oblicua que se denomina empuje. [1]

El arco ha sido un elemento muy utilizado a lo largo de la historia en todo tipo de construcciones, desde puramente arquitectónicas de gran importancia social (catedrales, palacios, castillos), hasta las necesarias para salvar los problemas de adaptación a la naturaleza resueltos por la ingeniería (puentes, acueductos, etc). [2]

El arco fundamentalmente soporta cargas en su plano, distribuyéndose de manera uniforme sobre él. Los esfuerzos predominantes que van a marcar el dimensionamiento de su sección son, por lo tanto, el esfuerzo axial y el esfuerzo flector.

El esfuerzo axial proporciona una distribución de tensiones constante sobre la sección lo que provoca que todas las fibras trabajen por igual. El flector, por el contrario, sobrecarga las fibras extremas de la sección. De este modo, las deformaciones producidas por el esfuerzo flector son mucho mayores.

Para minimizar las tensiones provocadas por el esfuerzo axial se debe aumentar el área de la sección, sin embargo, para minimizar las tensiones producidas por la flexión se debe aumentar el canto de la sección (inercia). Es así como, los elementos sometidos a flexión siempre exigen mayores dimensiones que los sometidos solo a axial.

Para el diseño de arcos se opta por estructuras que soporten cargas axiales principalmente, para así conseguir salvar grandes luces optimizando el material de una manera óptima.

En arcos, la compresión presenta como aspecto negativo la inestabilidad. La posibilidad de pandeo del elemento comprimido está íntimamente relacionada con su esbeltez, y, por tanto, con su inercia. De este modo, los arcos se diseñan bajo la óptica de limitar la esbeltez y mejorar su rigidez a flexión.

Por otro lado, tenemos la tracción. La única tipología estructural que trabaja a tracción pura por excelencia es el cable sometido a cargas cualesquiera. Inteligentemente, gracias a su nula rigidez a flexión, cambia de geometría y adopta la forma de funicular de dichas cargas.

El cable se vuelve una estructura voluble cuando las cargas varían con el tiempo, lo cual no es recomendable en términos de diseño de estructuras, ya que se busca solidez. Para salvar este problema aparece el arco, que es la alternativa simétrica trabajando a compresión. La forma intuitiva que se le da al arco es aquella que consiga la compresión pura en toda su directriz, el antifunicular, y, por tanto, dependerá de la tipología de carga. De este modo, los arcos parabólicos dependerán de cargas uniformes en planta, los arcos catenarios de su propio peso y los arcos circulares serán antifuniculares de cargas radiales.

El arco es una estructura que trabaja siempre a flexo-compresión, incluso con cargas para las que su directriz sea el antifunicular perfecto. Por consiguiente, no cabe hablar estrictamente de antifunicularidad y hay que disponer siempre una importante resistencia a flexión.

Un arco transmite las cargas hasta los apoyos. De esta forma el arco es un sistema en equilibrio. La parte superior del arco está sometida a esfuerzos de compresión y transmite esfuerzos horizontales hacia el exterior, tratando de separar los puntos de apoyo.

De este modo, a la hora de diseñar un arco, hay que tener en cuenta que el intento de disminuir las flexiones realizando arcos poco rígidos se ve limitado por el aumento de esbeltez que conduce a la inestabilidad.

La inestabilidad en arcos se manifiesta de tres maneras, las cuales se detallarán más adelante:

- a) Pandeo en el plano del arco.
 - Pandeo simétrico.
 - Pandeo asimétrico.
- b) Pandeo fuera del plano de un arco.
- c) Snap-through.

1.2 TIPOLOGÍAS DE ARCOS.

Los arcos se pueden clasificar:

a) Según su directriz.

Las tipologías más estudiadas han sido las que buscaban un arco sometido a compresión pura, lo cual ha implicado una geometría antifunicular de la carga a la que estaba sometido. Los esquemas de estudio para los diseñadores han sido los siguientes:

- Arcos circulares sometidos a presión radial.
- Arcos catenaria sometidos a una carga uniforme a lo largo del eje del arco.
- Arcos parabólicos sometidos a cargas uniformes en proyección horizontal.

La directriz pierde importancia cuando la sobrecarga móvil es fuerte respecto al propio peso, por lo tanto, para elegir una directriz apropiada se tantean los funiculares y se consideran leyes de tensiones máximas.

También podemos encontrar otras tipologías menos interesantes desde el punto de vista de la ingeniería, pero que también han sido estudiadas mucho más puntualmente. Estas tipologías hacen que el arco fundamentalmente este sometido a flexión:

- Arcos circulares sometidos a carga uniforme constante en proyección horizontal.
- Arcos circulares sometidos a carga puntual en corona.

A lo largo de la historia del cálculo estructural todas estas tipologías se han analizado para arcos con distintos tipos de vínculos.

b) Restricciones estructurales:

Los tipos de arcos más utilizados según sus restricciones estructurales son:

- Biarticulados: Indeterminado en primer grado. Es el arco más utilizado frecuentemente.
- Biempotrados: Indeterminado en tercer grado. Se construyen casi siempre en mampostería o concreto, cuando la base del arco se apoya en roca, en bloques

masivos de mampostería o en cimentaciones pesadas de concreto armado, posiblemente apoyadas en pilotes que llegan al estrato rocoso. Este tipo de arcos son más deformables que el empotrado, y, a igualdad de tensiones admisibles, pueden servir para rebajar tensiones térmicas y de movimiento dentro de unos límites aceptables.

- Atirantados: Empleados en puentes en los que las fuerzas horizontales del arco se transmiten mediante la tensión de la cuerda inferior en lugar de ir hacia los cimientos del puente. [3]
- Triarticulados: Es estáticamente determinado, por ello ni los errores de construcción, ni los asentamientos, ni los cambios de temperatura generan esfuerzos adicionales. Es el más flexible de todos los tipos. Este tipo de arco tiene una gran ventaja en sus asientos, pero tiene como desventaja su gran deformidad.

c) Por la sección transversal:

Podemos distinguir dos tipos de arcos, los de sección constante y los de sección variable.

Elementos que considerar en el diseño de un arco:

- Cimentación: La cimentación es un grupo de elementos estructurales su misión es transmitir las cargas de la construcción o elementos apoyados a este al suelo distribuyéndolas de forma que no superen su presión admisible ni produzcan cargas zonales. Debido a que la resistencia del suelo es, generalmente, menor que la de los pilares o muros que soportará, el área de contacto entre el suelo y la cimentación será proporcionalmente más grande que los elementos soportados. [4]
- Luz: Anchura de un arco, esto es, distancia horizontal entre sus apoyos. [5]
- Relación entre el parámetro flecha-luz y la carga crítica de pandeo lateral.
- Relación entre el parámetro canto-luz y la carga crítica de pandeo lateral.
- Tipología: La tipología es la ciencia que estudia los tipos o clases, la diferencia intuitiva y conceptual de las formas de modelo o de las formas básicas. La tipología se utiliza mucho en términos de estudios sistemáticos en diversos campos de estudio para definir diferentes categorías. [6]
- Restricciones estructurales: Restringen o limitan el desplazamiento del modelo.
- Tipo de sección transversal.

1.3 ESTABILIDAD DE ARCOS.

“El pandeo se define como un fenómeno de inestabilidad elástica que puede darse en elementos esbeltos al ser comprimidos y que se manifiesta por la aparición de importantes desplazamientos transversales a la dirección principal de compresión”. [7, p. 26]

“La inestabilidad en arcos se manifiesta de tres maneras:

- a) Pandeo en el plano del arco.

Existen dos posibles tipos de pandeo del arco en su propio plano, que se produzca uno u otro depende fundamentalmente de la esbeltez del elemento y de la geometría adoptada en función de su directriz.

- Pandeo simétrico (Figura 1.1):

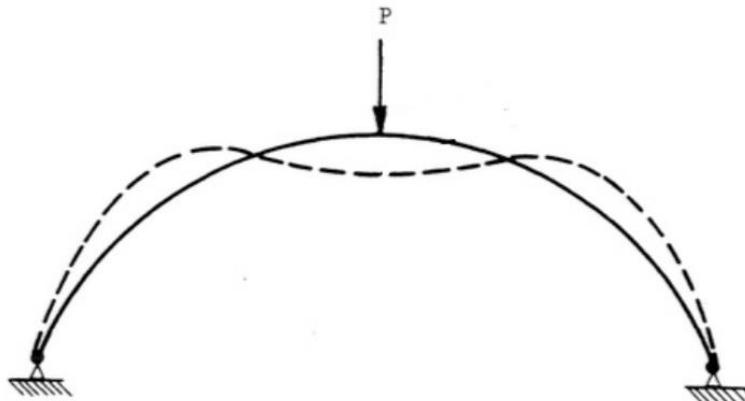


Figura 1.1. Pandeo simétrico de un arco.

- Pandeo asimétrico (Figura 1.2):

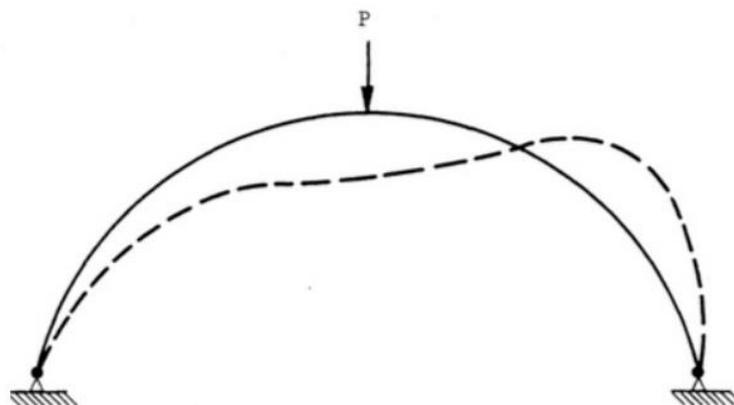


Figura 1.2. Pandeo asimétrico de un arco.

b) Pandeo fuera del plano de un arco (Figura 1.3).

Se produce debido a la aparición de torsión y flexión lateral en la sección. Ocurre en arcos estrechos con baja rigidez a flexión lateral.

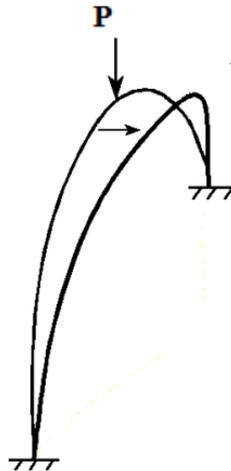


Figura 1.3. Pandeo fuera del plano de un arco.

c) Snap-through (Figura 1.4).

Es un problema de inestabilidad característico de los arcos debido a su especial geometría. Consiste en la inversión completa del arco, adoptando una nueva posición de equilibrio que le permite continuar con su labor resistente.

En la imagen siguiente se observa perfectamente el fenómeno descrito:

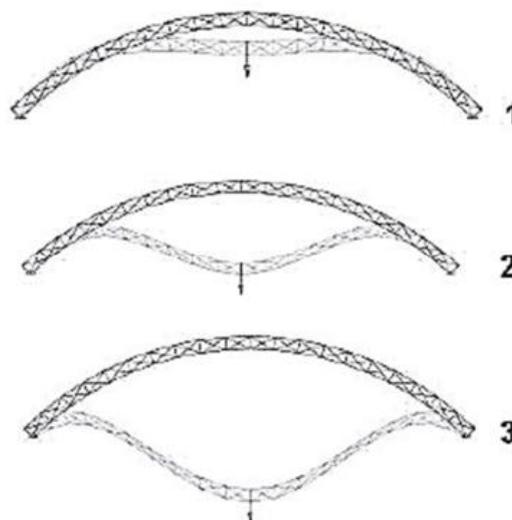


Figura 1.4. Fenómeno de Snap-through.

Al aumentar la carga que actúa sobre el arco, éste se irá deformando y en consecuencia aumentarán los esfuerzos de compresión y las reacciones horizontales en los apoyos.

Al llegar a una determinada posición (punto límite) el arco se vuelve inestable continuando su deformación hasta llegar a una posición de arco completamente invertido. Una vez alcanzada esta nueva configuración de equilibrio el arco se encuentra apto para admitir nuevos incrementos de carga.

A continuación se muestra el gráfico carga-desplazamiento que describe este tipo de inestabilidad (Figura 1.5):

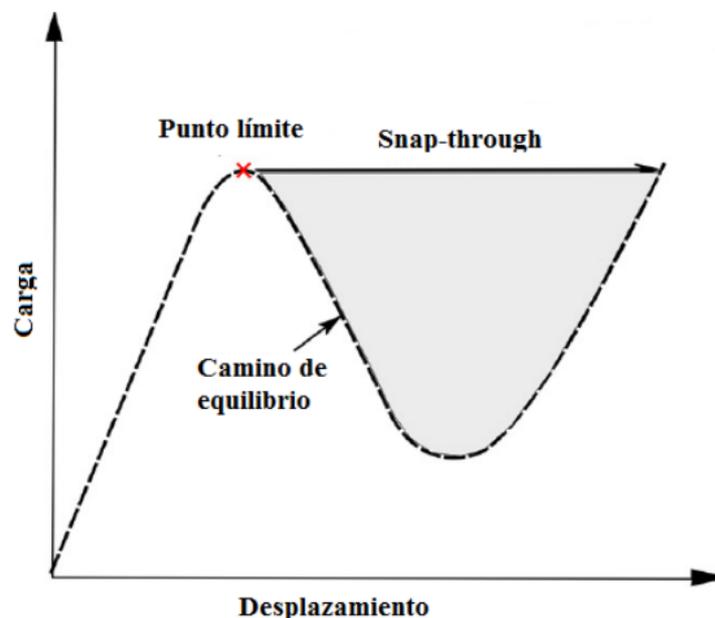


Figura 1.5. Gráfico carga-desplazamiento Snap-through.

Aunque la nueva configuración de equilibrio alcanzada por el arco le permita continuar con su labor resistente, éste se da por agotado ya que deja de cumplir los requisitos de servicio". [7, p. 30]

1.4 MODOS BÁSICOS DE PANDEO.

Existen diferentes maneras o modos de fallo por pandeo que pueden darse en los elementos estructurales dependiendo de su configuración. Para un elemento estructural frecuentemente hay que verificar varios de ellos y garantizar que las cargas están lejos de las cargas críticas asociadas a cada modo o manera de pandear. Los modos típicos son:

El primer modo de pandeo del arco, el pandeo local, depende de los espesores de las alas, el alma, la geometría de la sección I, el tipo de carga y la restricción lateral. El pandeo local es el que aparece en piezas o elementos aislados o que estructuralmente pueden considerarse aislados. En este caso la magnitud de la carga crítica viene dada según el caso de la fórmula de Leonhard Euler o la de Engesser.

“Pueden desarrollarse seis modos básicos de pandeo. Los dos primeros corresponden al pandeo local del ala (Figura 1.6) y al pandeo local del alma (Figura 1.7). Estos modos de pandeo local pueden estar presentes en diferentes ubicaciones del arco dependiendo de la distribución de las fuerzas internas. En la transición del pandeo del ala al pandeo del alma puede estar presente un modo combinado”. [8, p. 3]

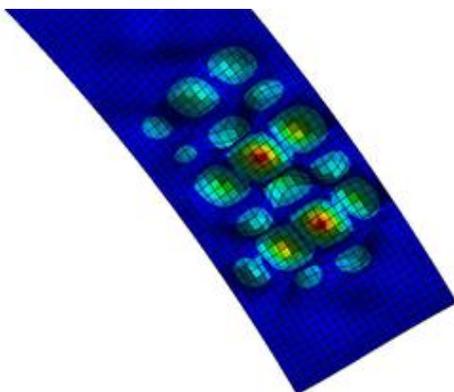


Figura 1.6. Pandeo local del alma.

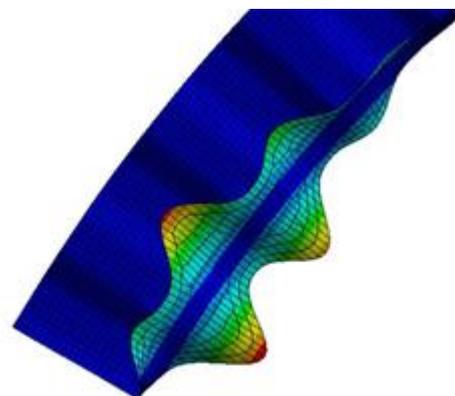


Figura 1.7. Pandeo local del ala.

Por último, tenemos el segundo modo de pandeo del arco, el pandeo global. En una estructura compleja pueden aparecer modos de deformación en los que los desplazamientos no sean proporcionales a las cargas y la estructura pueda pandear globalmente sin que ninguno de los elementos estructurales alcance su propia carga de pandeo. Debido a este factor, la carga crítica global de cierto tipo de estructuras es mucho menor que la carga crítica (local) de cada uno de sus elementos.

“Los arcos de restricción no laterales pueden desarrollar tres modos básicos de pandeo global: pandeo torsional (Figura 1.8), pandeo torsional lateral (Figura 1.9) y pandeo de flexión fuera de plano (Figura 1.10). Por otro lado, si el arco está coaccionalmente restringido, puede doblarse globalmente siguiendo un modo de pandeo de flexión en el plano (Figura 1.11). Al igual que con los modos de pandeo local, el pandeo global puede tener zonas de transición donde aparece una combinación de modos”. [8, p. 4]

- “Pandeo flexional: Modo de pandeo en el cual un elemento en compresión se flecta lateralmente sin giro ni cambios en su sección transversal.
- Pandeo torsional: Modo de pandeo en el cual un elemento en compresión gira alrededor de su centro de corte.
- Pandeo flexo-torsional: Modo de pandeo en el cual un elemento en compresión se flecta y gira simultáneamente sin cambios en su sección transversal.
- Pandeo lateral-torsional: Modo de pandeo de un elemento a flexión que involucra deflexión normal al plano de flexión y, de manera simultánea, giro alrededor del centro de corte”. [9]

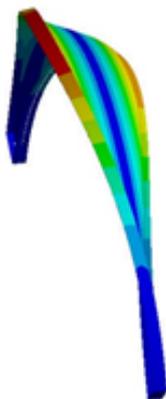


Figura 1.8. Pandeo torsional.

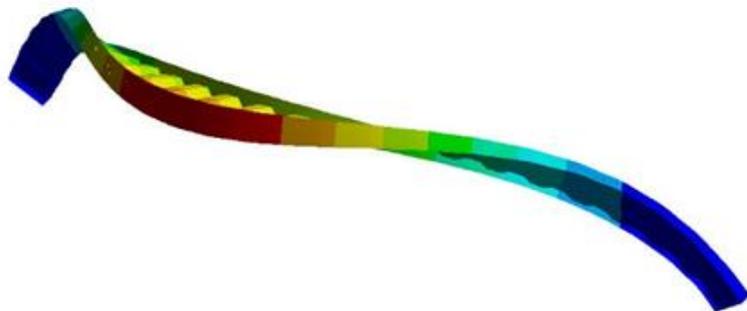


Figura 1.9. Pandeo torsional lateral.



Figura 1.10. Pandeo de flexión fuera del plano.



Figura 1.11. Pandeo de flexión en el plano.

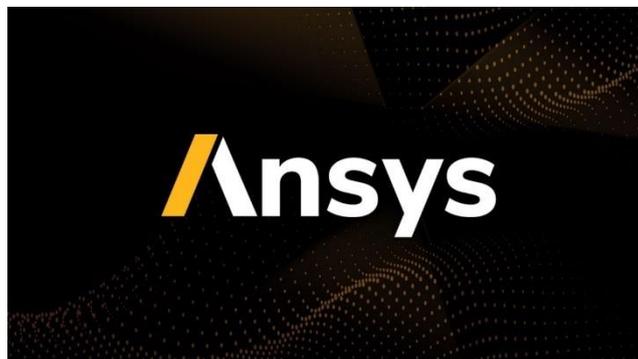
1.5 OBJETO DEL TFG.

Mediante el análisis por elementos finitos (Programa ANSYS) el trabajo fin de grado abordará el estudio comparativo de la resistencia a pandeo lateral de arcos de acero no arriostrados, con diferente morfología de sección, sometidos a cargas en su plano.

Específicamente, los análisis a realizar serán los relativos a la determinación de la carga elástica teórica de pandeo lateral, en primer lugar, y a la determinación de la carga última, mediante análisis no lineal con imperfecciones iniciales, en segundo lugar.

En cuanto a la morfología de la sección, el estudio contempla los siguientes tipos de perfiles en 'I' de acero:

1. Perfil con alma plana.
2. Perfil con alma plana y 6 rigidizadores transversales.
3. Perfil con alma plana y 12 rigidizadores transversales.
4. Perfil con alma de chapa corrugada rectangular.
5. Perfil con alma de chapa corrugada trapezoidal.
6. Perfil con alma de chapa corrugada triangular.



“ANSYS, Inc. Fue fundada en 1970 (Swanson Analysis Systems, Inc.) ANSYS desarrolla, comercializa y presta soporte a la ingeniería a través de software de simulación para predecir cómo funcionará y reaccionará determinado producto bajo un entorno real. ANSYS continuamente desarrolla tecnología enfocada en la simulación y a través del tiempo ha adquirido otros softwares para ofrecer un paquete de aplicaciones que pueden ser unificadas para los problemas más complejos. Además, presta soporte a la industria. ANSYS, Inc. es un software de simulación ingenieril. Está desarrollado para funcionar bajo la teoría de elemento finito para estructuras y volúmenes finitos para fluidos”. [10]

Ansys es un programa de aplicación general para el cálculo con elementos finitos que permite resolver problemas estructurales, eléctricos, magnéticos, térmicos y de fluidos.

“El Método de los Elementos Finitos (MEF) es una potente, rápida y versátil herramienta para el análisis y diseño de sistemas mecánicos. Como herramienta de análisis, permite calcular la respuesta de un determinado sistema con unas condiciones de contorno y cargas dadas; como herramienta de diseño, permite evaluar la influencia que tienen en él parámetros de diseño como la geometría, el material, la naturaleza de las cargas, etcétera”.

[11]

El método de los elementos finitos comprende dos aproximaciones:

- Aproximación física del dominio a través de los nodos (puntos donde se ubican las variables de cálculo) y elementos (representan el dominio y conectan los nodos) imponiendo una serie de condiciones de contorno.
- Aproximación de la solución (desplazamientos en este caso) a través de los desplazamientos nodales y las funciones de forma.

En resumen, el TFG tiene por objeto evaluar el riesgo que presenta una estructura metálica en arco de pandear lateralmente considerando todos los factores que realmente influyen en el problema. Se trata de determinar de manera sencilla y rápida si el pandeo lateral va a ser un fenómeno crítico en un arco de acero concreto.

2. ESTUDIO COMPARATIVO DE RESISTENCIA A PANDEO LATERAL.

2.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.

En primer lugar, hay que detallar que para el análisis por elementos finitos de los arcos circulares de sección 'I' se ha utilizado el programa ANSYS.

Como se ha comentado con anterioridad, el estudio contempla los siguientes tipos de perfiles en 'I' de acero:

1. Perfil con alma plana.
2. Perfil con alma plana y 6 rigidizadores transversales.
3. Perfil con alma plana y 12 rigidizadores transversales.
4. Perfil con alma de chapa corrugada rectangular.
5. Perfil con alma de chapa corrugada trapezoidal.
6. Perfil con alma de chapa corrugada triangular.

El primero de los análisis por realizar, es la determinación de la carga elástica teórica de pandeo lateral mediante un análisis lineal.

Análisis lineal de pandeo.

“El método lineal de cálculo asume que el cambio de rigidez debido a la deformación de la estructura es despreciable y por tanto las propiedades no cambian durante todo el proceso de deformación, manteniendo la rigidez inicial de la estructura.

Bajo esta hipótesis, se cumplen los principios de proporcionalidad y superposición, y la respuesta del sistema es la misma con independencia del orden de aplicación de las cargas. Así, suponer comportamiento lineal permite calcular la respuesta de forma sencilla y rápida.

Este tipo de análisis permite calcular el valor de la carga crítica de pandeo usando teorías clásicas lineales como la de Euler.

Se aplica a estructuras en fase elástica con una geometría no muy compleja, o incluso a estructuras complejas cuando se considera que las diferencias producidas por un análisis más detallado son despreciables y asumibles.

Para este tipo de análisis no se pueden tener en cuenta las no linealidades reales del problema.

El cálculo de las cargas críticas de pandeo se basa en la resolución del problema de autovalores y autovectores (implementado en los programas de cálculo de elementos finitos) que se representa a continuación:

Antes de que ocurra el pandeo, la estructura se encuentra en un estado de equilibrio lineal. El aumento de la fuerza aplicada sobre la estructura puede describirse consecuentemente como:

$$([K] + [K_G])\{\Delta U\} = \{\Delta R\}$$

Donde $[K]$ representa la matriz de rigidez elástica, $[K_G]$ la matriz de rigidez geométrica, ΔU representa el vector del incremento del desplazamiento y ΔR el vector del incremento de la fuerza nodal aplicada.

La matriz de rigidez geométrica modela el cambio de rigidez a flexión que se produce en la estructura debido a que existen compresiones (disminuye la rigidez) o tracciones (aumenta la rigidez).

La formulación matricial de la matriz de rigidez geométrica usada para la resolución de este problema es una aproximación de la teoría clásica, en la cual se consideran funciones de estabilidad que relacionan las fuerzas aplicadas y las deformaciones. La matriz de rigidez geométrica para elementos de 6 grados de libertad viene dada por:

$$[K_G] = -\frac{P}{L} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{6}{5} & -\frac{L}{10} & 0 & -\frac{6}{5} & -\frac{L}{10} \\ 0 & 0 & \frac{2L^2}{15} & 0 & \frac{L}{10} & -\frac{L^2}{30} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{6}{5} & \frac{L}{10} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{L}{10} & \frac{2L^2}{15} \end{bmatrix}$$

De acuerdo con la teoría lineal de algebra, se cumple:

$$|[K] + [K_G]| = 0$$

Bajo la hipótesis de pequeñas deformaciones se tiene que K_G es proporcional al esfuerzo y por tanto las cargas externas también están relacionadas de manera lineal.

Como resultado asumiendo una relación lineal entre la carga crítica de pandeo y la carga aplicada.

$$\{P\}_{crítica} = \lambda \{P\}$$

y definiendo $\overline{K_G}$ como la matriz de rigidez geométrica por unidad de carga, se llega a:

$$[K_G] = \lambda [\overline{K_G}]$$

Reescribiendo la ecuación se obtiene:

$$|[K] + \lambda [\overline{K_G}]| = 0$$

Donde la resolución del problema de autovalores anterior permite determinar las distintas cargas críticas de pandeo de la estructura λ (factor por el que se deben multiplicar las cargas externas para que se desencadene el problema de pandeo) y sus correspondientes autovectores asociados a los modos de pandeo de esta". [7, p. 33]

En este trabajo, se realiza un análisis lineal para cada una de las diferentes secciones mediante el software Ansys con el objetivo de determinar la carga elástica teórica de pandeo lateral.

En la siguiente imagen (Figura 2.1) se muestra el esquema utilizado en el software para llevar a cabo el siguiente análisis:

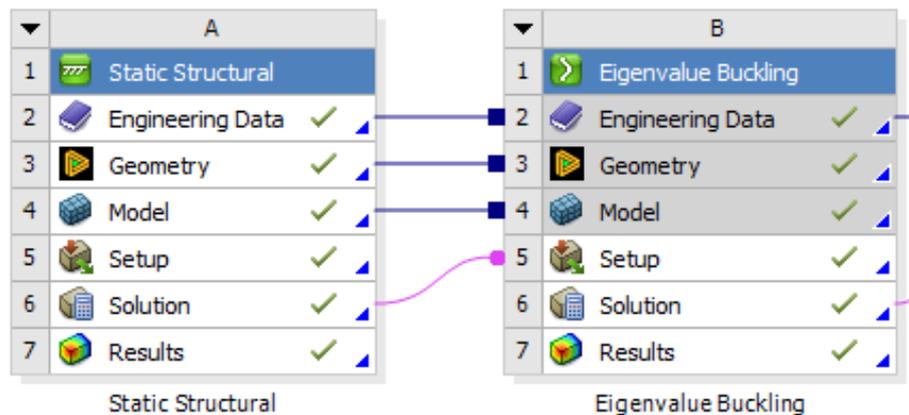


Figura 2.1. Análisis lineal para la determinación de la carga elástica teórica de pandeo lateral – ANSYS.

Por último, el segundo de los análisis por realizar es la determinación de la carga última, mediante un análisis no lineal con imperfecciones iniciales.

Análisis no lineal con imperfecciones iniciales.

“A diferencia del método lineal, sí se tendrá en cuenta el cambio de rigidez producido en la estructura como consecuencia de su deformación. Este método se basa en la aplicación de pequeños pasos de carga, en los cuáles se calculan las nuevas propiedades de la estructura como consecuencia del cambio de rigidez, hasta que se alcanza una configuración de equilibrio inestable.

Este análisis permite incluir tanto la no linealidad geométrica de la estructura como la no linealidad del material, obteniendo por tanto mejores aproximaciones a la carga crítica de pandeo real.

Además, permite realizar un análisis post-pandeo de la estructura, siempre y cuando la aparición de la inestabilidad no suponga el fin de su capacidad portante. De ahí que sea muy utilizado para analizar el fenómeno de snap-through explicado anteriormente.

A continuación, se presenta el desarrollo para el cálculo no lineal implementado en el método de los elementos finitos:

La ecuación que gobierna el problema estructural puede ser descrita como:

$$K(u)\Delta u = \Delta P$$

Donde Δu representa el desplazamiento incremental desconocido, ΔP la carga incremental aplicada y K la matriz de rigidez de la estructura que depende de la deformación de esta. Para resolver este tipo de problemas no lineales la mayoría de los programas de elementos finitos usan métodos muy efectivos como el método Newton-Raphson.

Dicho método empieza con una solución inicial (arbitraria) $u = u_i$ para determinar la magnitud del siguiente incremento:

$$\Delta u_i = K^{-1}(u_i)\Delta P$$

y el vector de carga residual:

$$\Delta R_i = \Delta P - K(u_i)\Delta u_i$$

que deberá ser 0 o como máximo el criterio de convergencia impuesto previamente.

De manera que si no se satisface la hipótesis anterior se adoptará una nueva solución inicial desarrollando todo el proceso de nuevo. Este procedimiento se repite hasta que la convergencia sea lograda". [7, p. 35]

$$u_{i+1} = u_i + \Delta u_i$$

$$\Delta u_{i+1} = K^{-1}(u_{i+1})\Delta P$$

$$\Delta R_{i+1} = \Delta P - K(u_{i+1})\Delta u_{i+1}$$

En este trabajo, se ha llevado a cabo un análisis no lineal con imperfecciones iniciales utilizando el software de elementos finitos Ansys, con el objetivo de determinar la carga última en varias secciones 'I' de arcos de acero. Este tipo de análisis es especialmente importante ya que permite evaluar el comportamiento del material cuando se somete a cargas extremas y considera las imperfecciones iniciales presentes en la estructura. Estas imperfecciones se obtienen a través de un primer análisis lineal en el que se determina la carga elástica teórica de pandeo lateral, aplicando un factor de escala de valor 0,04. La carga aplicada durante el análisis no lineal con imperfecciones iniciales es igual al valor de la carga elástica teórica de pandeo lateral multiplicada por dos.

En la siguiente imagen (Figura 2.2) se muestra el esquema utilizado en el software para llevar a cabo el siguiente análisis:

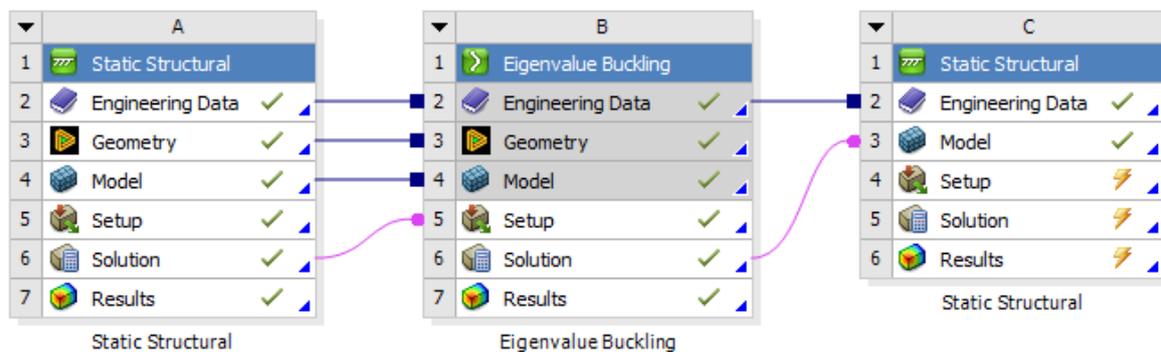


Figura 2.2. Análisis no lineal con imperfecciones iniciales para la determinación de la carga última – ANSYS.

2.2 GEOMETRÍA DE ARCOS.

Arco de alma plana.

El arco circular de acero de sección 'I' con alma plana se define mediante los siguientes elementos: línea media circular (Figura 2.3) y sección 'I' (Figura 2.4).

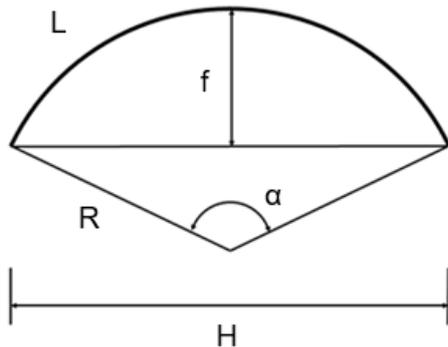


Figura 2.3. Línea media circular.

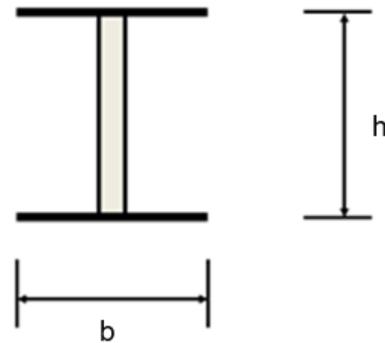


Figura 2.4. Sección 'I'.

Geometría de arco circular definida por una longitud total $L = 24000$ mm y un ángulo $\alpha = 90^\circ$. En consecuencia, tenemos un radio $R = 15279$ mm, $H = 21608$ mm y flecha de arco $f = 4475$ mm. La sección transversal está definida por una altura $h = 1000$ mm y una base $b = 500$ mm. Podemos observar (Figura 2.5.) el arco circular de sección 'I' con alma plana.

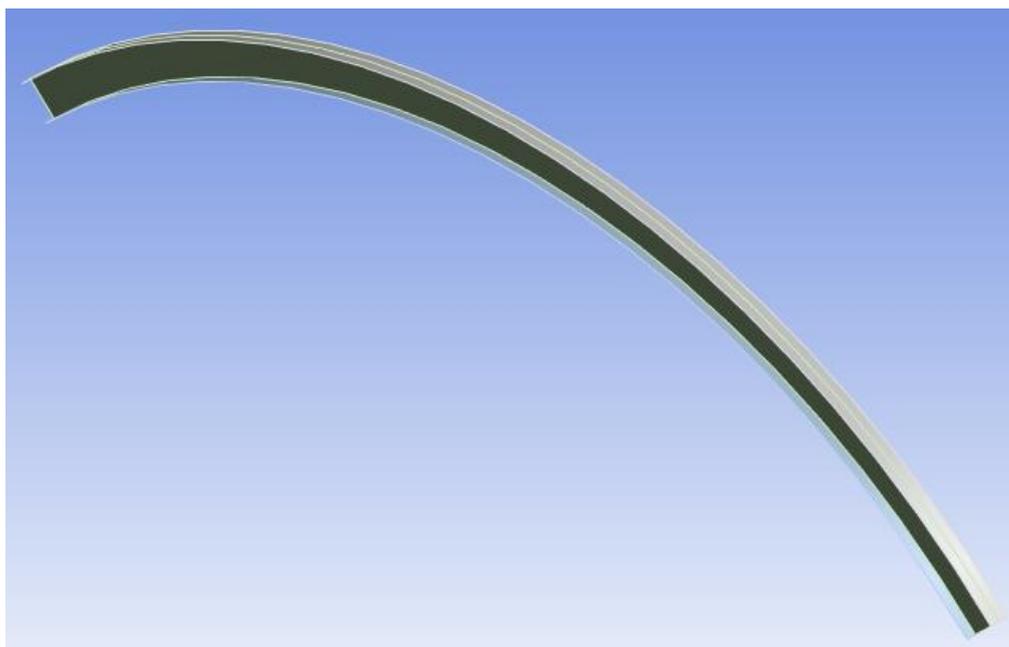


Figura 2.5. Arco circular de sección 'I' con alma plana.

Arco de alma plana con 6 rigidizadores transversales.

El arco circular de acero de sección 'I' con alma plana y 6 rigidizadores transversales se define mediante los siguientes elementos: línea media circular (Figura 2.3) y sección 'I' (Figura 2.4).

Geometría de arco circular definida por una longitud total $L= 24000$ mm y un ángulo $\alpha= 90^\circ$. En consecuencia, tenemos un radio $R= 15279$ mm, $H= 21608$ mm y flecha de arco $f= 4475$ mm. La sección transversal está definida por una altura $h= 1000$ mm y una base $b= 500$ mm.

Los rigidizadores transversales están colocados de un extremo a otro del arco con una separación de $\theta=18^\circ$ entre ellos. Podemos observar (Figura 2.6) el arco circular de sección 'I' con alma plana y 6 rigidizadores transversales.

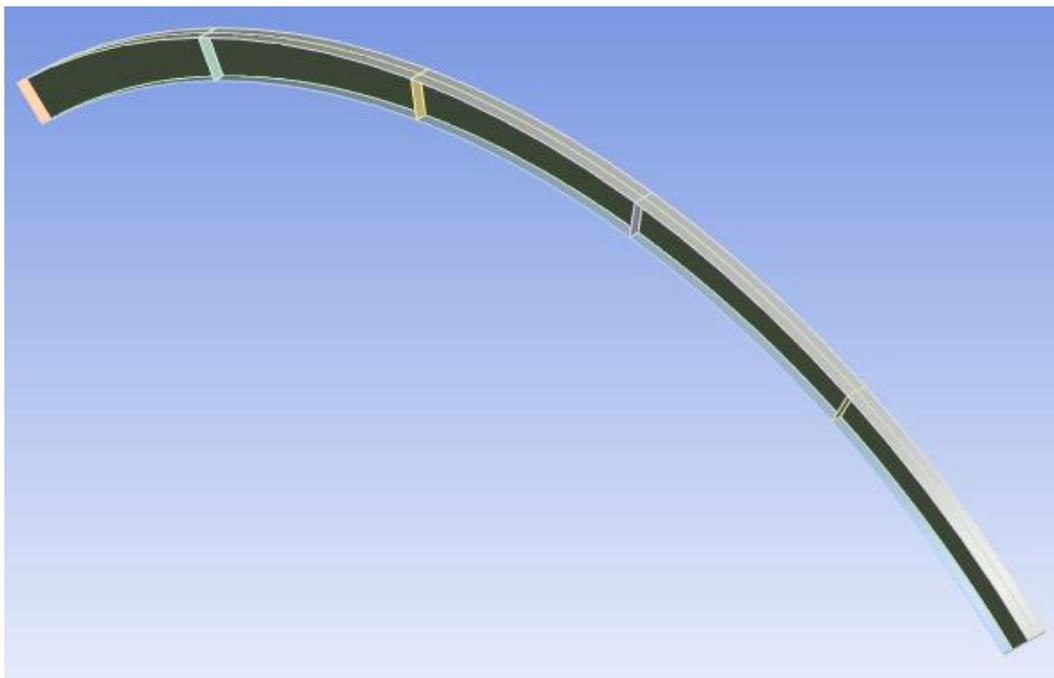


Figura 2.6. Arco circular de sección 'I' con alma plana y 6 rigidizadores transversales.

Arco de alma plana con 12 rigidizadores transversales.

El arco circular de acero de sección 'I' con alma plana y 12 rigidizadores transversales se define mediante los siguientes elementos: línea media circular (Figura 2.3) y sección 'I' (Figura 2.4).

Geometría de arco circular definida por una longitud total $L= 24000$ mm y un ángulo $\alpha= 90^\circ$. En consecuencia, tenemos un radio $R= 15279$ mm, $H= 21608$ mm y flecha de arco $f= 4475$ mm. La sección transversal está definida por una altura $h= 1000$ mm y una base $b= 500$ mm.

Los rigidizadores transversales están colocados de un extremo a otro del arco con una separación de $\theta=8.18^\circ$ entre ellos. Podemos observar (Figura 2.7) el arco circular de sección 'I' con alma plana y 12 rigidizadores transversales.

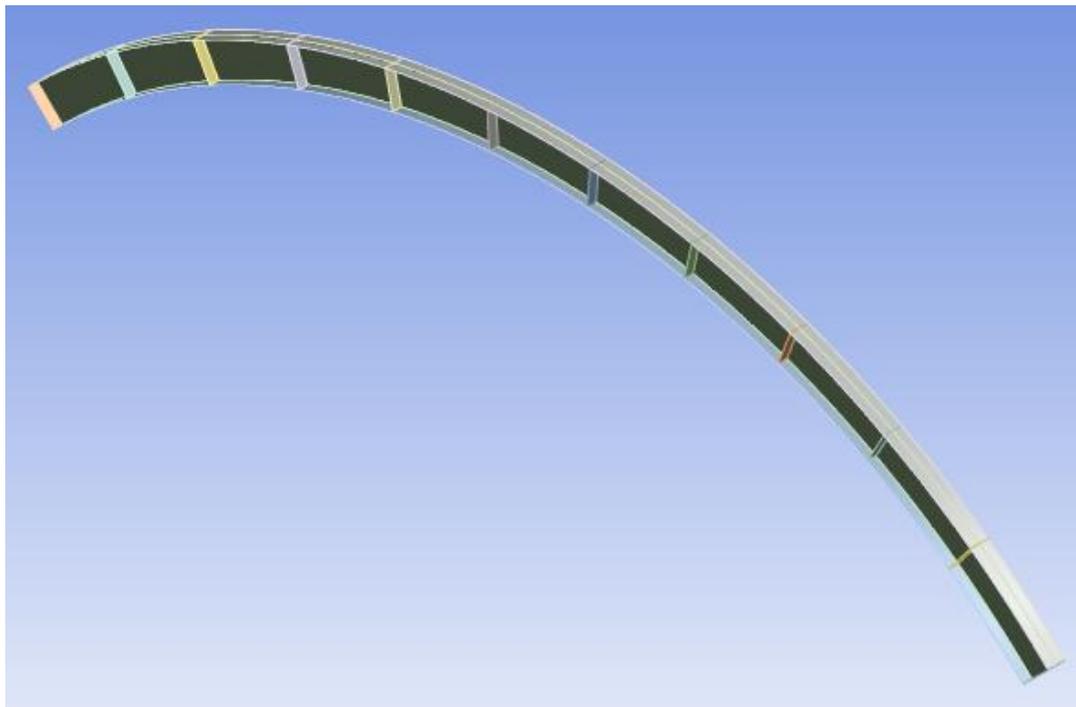


Figura 2.7. Arco circular de sección 'I' con alma plana y 12 rigidizadores transversales.

Arco de alma corrugada rectangular.

El arco circular de acero de sección 'I' con alma corrugada rectangular se define mediante los siguientes elementos: línea media circular (Figura 2.3), sección 'I' (Figura 2.4) y sección alma corrugada rectangular (Figura 2.8).

Geometría de arco circular definida por una longitud total $L= 24000$ mm y un ángulo $\alpha= 90^\circ$. En consecuencia, tenemos un radio $R= 15279$ mm, $H= 21608$ mm y flecha de arco $f= 4475$ mm. La sección transversal está definida por una altura $h= 1000$ mm y una base $b= 500$ mm. El alma corrugada rectangular tiene una geometría definida por $a_1= 300$ mm y $a_2= 150$ mm.

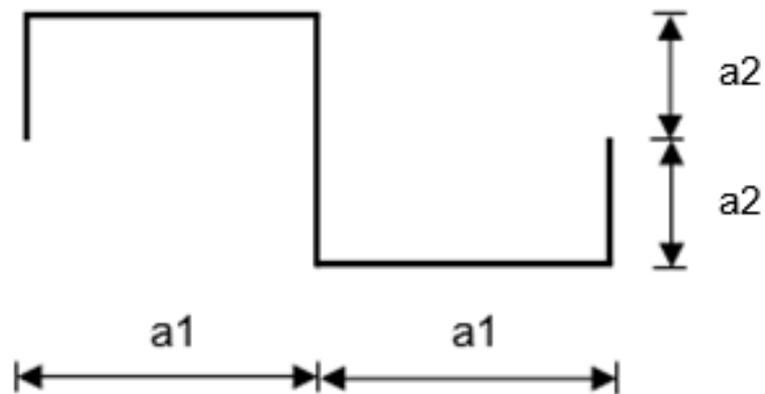


Figura 2.8. Sección del alma corrugada rectangular.

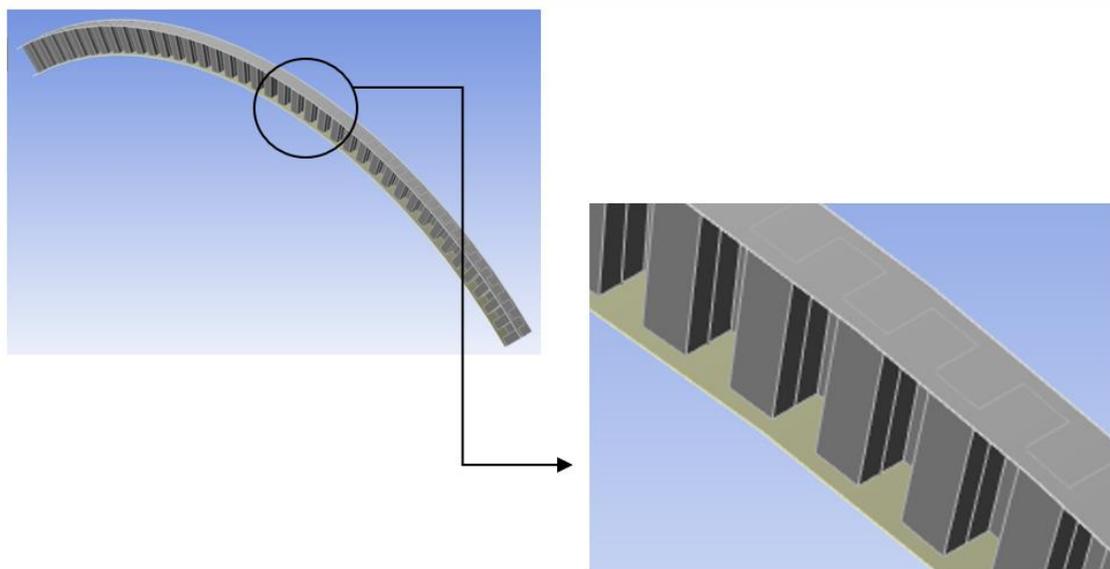


Figura 2.9. Arco circular de sección 'I' con alma corrugada rectangular.

Arco de alma corrugada trapezoidal.

El arco circular de acero de sección 'I' con alma corrugada trapezoidal se define mediante los siguientes elementos: línea media circular (Figura 2.3), sección 'I' (Figura 2.4) y sección alma corrugada trapezoidal (Figura 2.10).

Geometría de arco circular definida por una longitud total $L = 24000$ mm y un ángulo $\alpha = 90^\circ$. En consecuencia, tenemos un radio $R = 15279$ mm, $H = 21608$ mm y flecha de arco $f = 4475$ mm. La sección transversal está definida por una altura $h = 1000$ mm y una base $b = 500$ mm. El alma corrugada trapezoidal tiene una geometría definida por $a_1 = 50$ mm, $a_2 = 200$ mm, $a_3 = 100$ mm y $a_4 = 150$ mm.

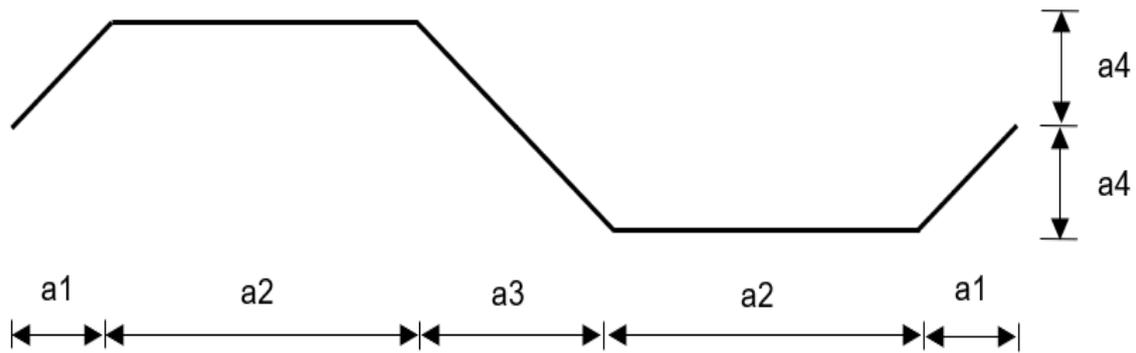


Figura 2.10. Sección del alma corrugada trapezoidal.

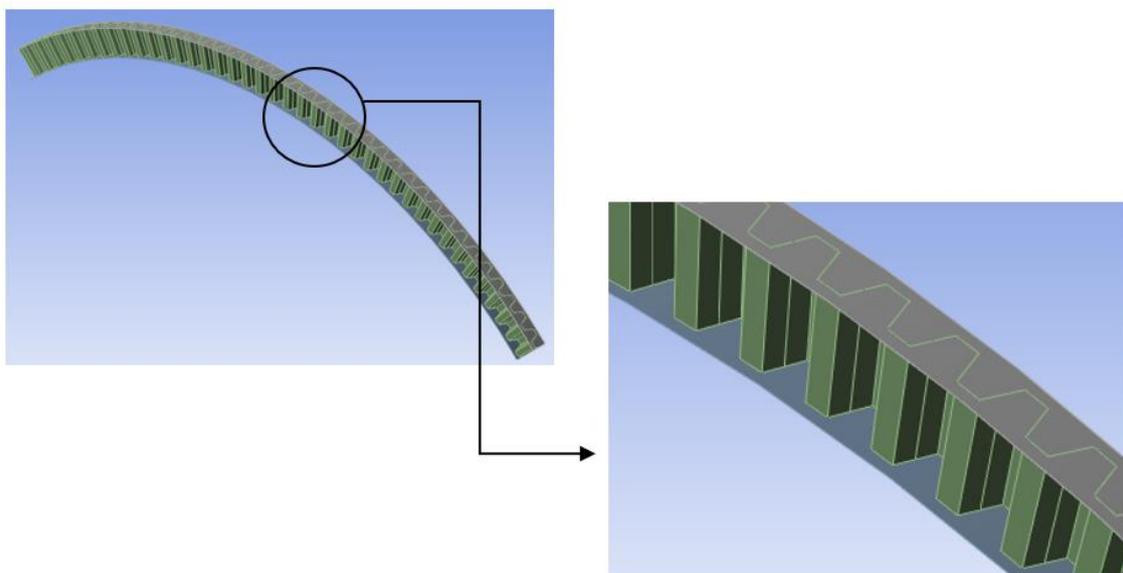


Figura 2.11. Arco circular de sección 'I' con alma corrugada trapezoidal.

Arco de alma corrugada triangular.

El arco circular de acero de sección 'I' con alma corrugada triangular se define mediante los siguientes elementos: línea media circular (Figura 2.3), sección 'I' (Figura 2.4) y sección alma corrugada triangular (Figura 2.12).

Geometría de arco circular definida por una longitud total $L = 24000$ mm y un ángulo $\alpha = 90^\circ$. En consecuencia, tenemos un radio $R = 15279$ mm, $H = 21608$ mm y flecha de arco $f = 4475$ mm. La sección transversal está definida por una altura $h = 1000$ mm y una base $b = 500$ mm. El alma corrugada triangular tiene una geometría definida por $a_1 = 150$ mm, $a_2 = 300$ mm y $a_3 = 150$ mm.

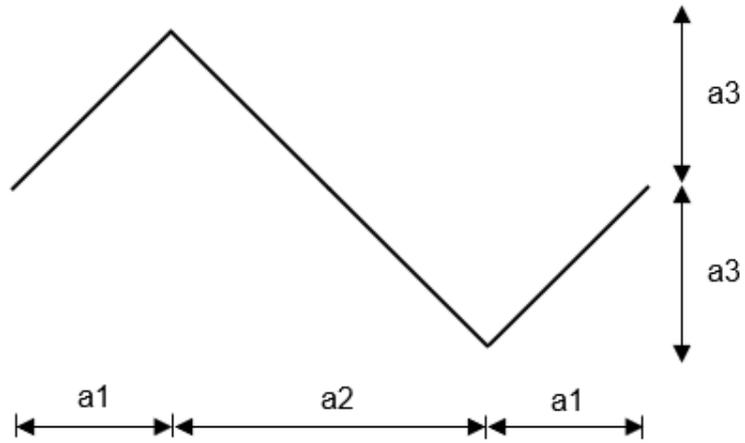


Figura 2.12. Sección del alma corrugada triangular.

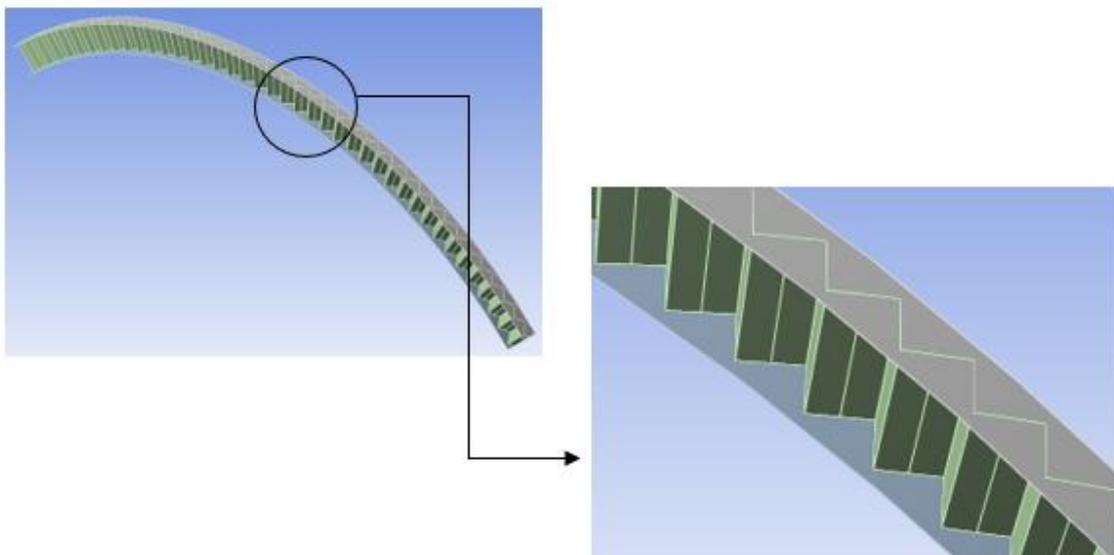


Figura 2.13. Arco circular de sección 'I' con alma corrugada triangular.

2.2.1 Comparativa de pesos totales por unidad de longitud.

En primer lugar, hay que tener en cuenta que las dimensiones de los alas de los diferentes arcos de acero de sección 'I' estudiados son las mismas, de este modo todos los alas tendrán el mismo volumen. La suma del volumen del ala superior y el ala inferior tiene un valor de 0,4803 m³.

Por otro lado, es necesario tener en cuenta que el volumen de las almas de los arcos de acero estudiados varía en función de la geometría empleada. De este modo, la masa de los diferentes arcos será distinta.

En la siguiente tabla (Tabla 2.1), se muestran los valores de volumen y masa de los diferentes arcos de acero:

Tipo de sección	Volumen alas (m ³)	Volumen alma (m ³)	Peso específico (kg/m ³)	Masa alma (kg)
AP	0,4803	0,240	7850	5653,884
AP (6R)	0,4803	0,270	7850	5893,623
AP (12R)	0,4803	0,300	7850	6123,785
ACTRI	0,4803	0,339	7850	6435,116
ACTRA	0,4803	0,413	7850	7012,327
ACR	0,4803	0,480	7850	7538,277

Tabla 2.1. Tabla de volúmenes y masas.

A continuación, podemos observar (Tabla 2.2) los diferentes valores de peso total por unidad de longitud obtenidos para cada una de las diferentes secciones y el incremento de peso total por unidad de longitud (%).

Tipo de sección	Peso total por unidad de longitud (kg/m)	Incremento de peso total por unidad de longitud (%)
AP	235,577	0
AP (6R)	245,566	4,2403
AP (12R)	255,156	8,3111
ACTRI	268,128	13,8176
ACTRA	292,178	24,0267
ACR	314,092	33,3292

Tabla 2.2. Tabla de volúmenes y masas.

Tomando como referencia el arco de acero de sección 'I' con alma plana, se puede observar el incremento de peso total por unidad de longitud (%) para cada una de las diferentes secciones estudiadas.

2.3 MODELO DE ELEMENTOS FINITOS.

2.3.1 Estudio de convergencia.

Un proyectista de estructuras debe analizar con cautela la aceptación de todos los resultados numéricos obtenidos en un programa de cálculo de estructuras no lineal de elementos finitos. Siempre se debe desconfiar de la maquina y valorar de forma rigurosa los resultados obtenidos con el fin de comprobar que el mecanismo que ha llevado al agotamiento es razonable y la falta de convergencia final del proceso no es debida a circunstancias meramente numéricas.

En todos los casos de colapso final de la estructura se debe producir un aumento 'desproporcionado' del valor del desplazamiento lateral del centro del arco en los momentos finales de la vida de la estructura, lo que indica que la causa 'real' del final del arco es el pandeo lateral. En caso contrario, el colapso del arco se debe a cuestiones meramente tensionales, como consecuencia de la plastificación de numerosas secciones de este.

La figura 2.14 muestra la forma que debe presentar la gráfica carga-desplazamiento en el caso de colapso de un arco por pandeo lateral. [2]

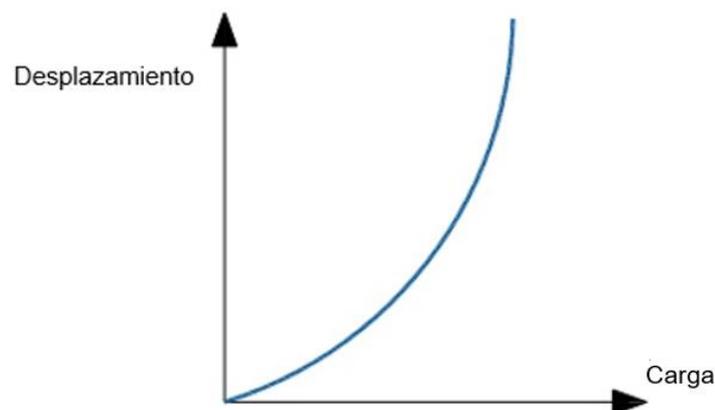


Figura 2.14. Forma de la gráfica carga-desplazamiento en el caso de colapso de un arco por pandeo lateral.

En el modelado de elementos finitos, una malla más refinada, por lo general, da como resultado una solución más precisa. Sin embargo, a medida que la malla se vuelve más refinada, el tiempo de cálculo aumenta. Para obtener una malla que equilibre de manera satisfactoria la exactitud y los recursos informáticos, se realiza un estudio de convergencia de malla. [12]

Para el estudio de convergencia se han tenido en cuenta los datos obtenidos de los estudios realizados en todos los arcos de acero circulares de sección 'I'. Una vez realizados todos los análisis, se ha podido observar que el arco menos resistente es el que posee alma plana y el más resistente es el arco con alma corrugada rectangular.

De este modo, en el estudio de convergencia se han analizado los arcos de acero circulares de sección 'I' con alma plana y con alma corrugada rectangular.

Arco de alma plana

En primer lugar, se ha tomado el arco de acero de sección 'I' que posee el alma plana y se han realizado cinco análisis utilizando tamaños de malla de diferente valor con el fin de observar los resultados e intentar encontrar una malla que equilibre de manera satisfactoria la exactitud y los recursos informáticos.

Podemos observar (Tabla 2.3) que Ansys nos ofrece unos resultados de deformación total del elemento bastante similares a medida que refinamos la malla y por consiguiente, aumentamos el número de elementos a analizar. De este modo, el error de cálculo entre usar una malla más o menos refinada será relativamente pequeño y aceptable.

Resultados de convergencia.

Tamaño de malla	Número de elementos	Fuerza de pandeo (N)	Desplazamiento total (m)	Carga ultima (N)
0,05	19231	2,35E+06	0,52547	0,77886
0,08	7441	2,36E+06	0,53122	0,77832
0,1	5286	2,36E+06	0,53515	0,77863
0,15	2405	2,37E+06	0,54572	0,7777
0,2	1090	2,38E+06	0,54545	0,778

Tabla 2.3. Resultados de convergencia.

Tomando los siguientes tamaños de malla en el análisis del arco circular con alma plana se han obtenido los siguientes valores, donde podemos visualizar (Figura 2.15) una convergencia notable.

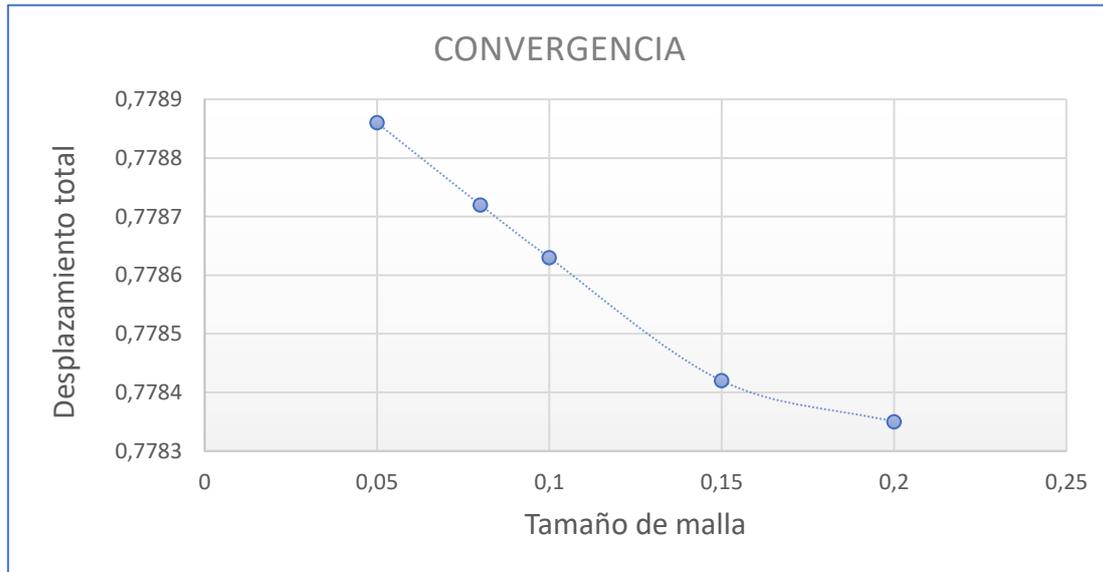


Figura 2.15. Gráfica de convergencia - Arco de alma plana.

Se puede observar (Figura 2.16) como para los diferentes valores de malla, los valores de carga y desplazamiento total son prácticamente iguales.

De este modo, se ha decidido tomar un tamaño de malla igual a 0,1 para así poder trabajar con una malla menos refinada y por consiguiente menos elementos. Esto nos permite realizar todos los análisis de una manera más sencilla y con un notable ahorro de tiempo en las operaciones de cálculo.

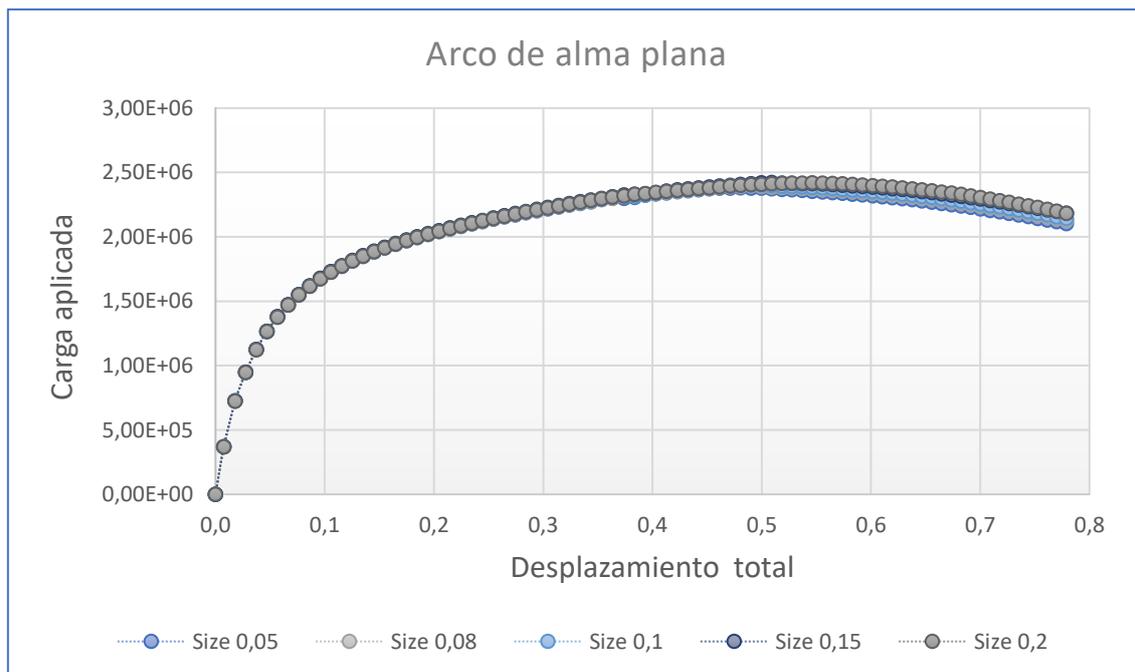


Figura 2.16. Gráfica de resultados - Arco de alma plana.

Arco de alma corrugada rectangular.

En segundo lugar, se ha tomado el arco de acero de sección 'I' que posee el alma corrugada rectangular y se han realizado cinco análisis utilizando tamaños de malla de diferente valor con el fin de observar los resultados e intentar encontrar una malla que equilibre de manera satisfactoria la exactitud y los recursos informáticos.

Podemos observar (Tabla 2.4) que Ansys nos ofrece unos resultados de deformación total del elemento bastante similares a medida que refinamos la malla y por consiguiente, aumentamos el número de elementos a analizar. De este modo, el error de cálculo entre usar una malla más o menos refinada será relativamente pequeño y aceptable.

Resultados de convergencia.

Tamaño de malla	Número de elementos	Fuerza de pandeo (N)	Desplazamiento total (m)	Carga ultima (N)
0,05	28839	5966300	0,57564	4,57E+06
0,08	13187	6016500	0,51816	4,61E+06
0,1	7923	6083000	0,50937	4,65E+06
0,15	3536	6193500	0,49022	4,73E+06
0,2	2866	6356100	0,48211	4,83E+06

Tabla 2.4. Resultados de convergencia - Arco de alma corrugada rectangular.

Tomando los siguientes tamaños de malla en el análisis del arco circular con alma corrugada rectangular se han obtenido los siguientes valores, donde podemos visualizar (Figura 2.17) una convergencia notable.

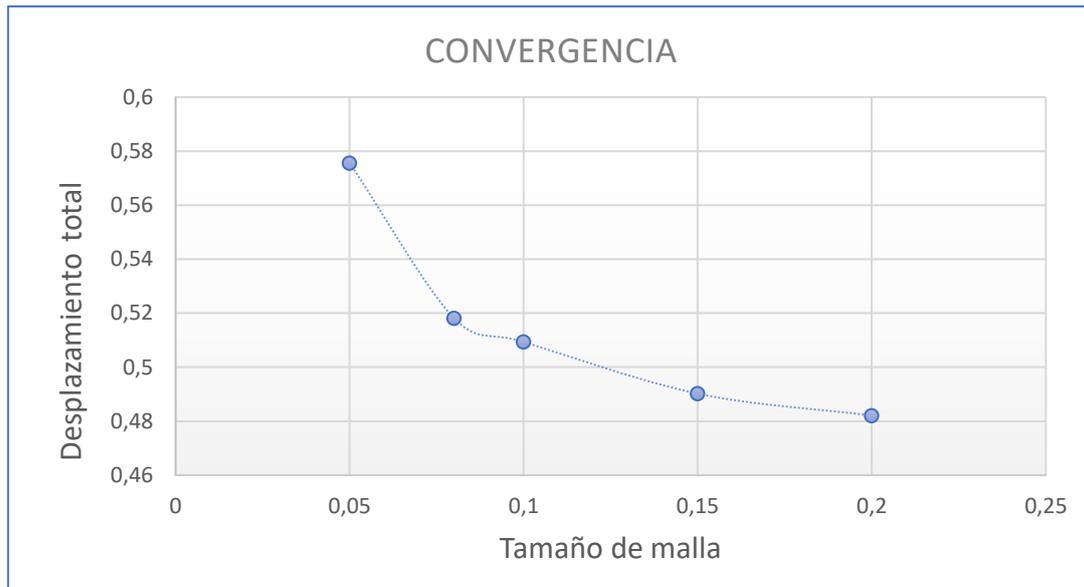


Figura 2.17. Gráfica de convergencia - Arco de alma corrugada rectangular.

Se puede observar (Figura 2.18) como para los diferentes valores de malla, los valores de carga y desplazamiento total son prácticamente iguales.

De este modo, se ha decidido tomar un tamaño de malla igual a 0,1 para así poder trabajar con una malla menos refinada y por consiguiente menos elementos. Esto nos permite realizar todos los análisis de una manera más sencilla y con un notable ahorro de tiempo en las operaciones de cálculo.

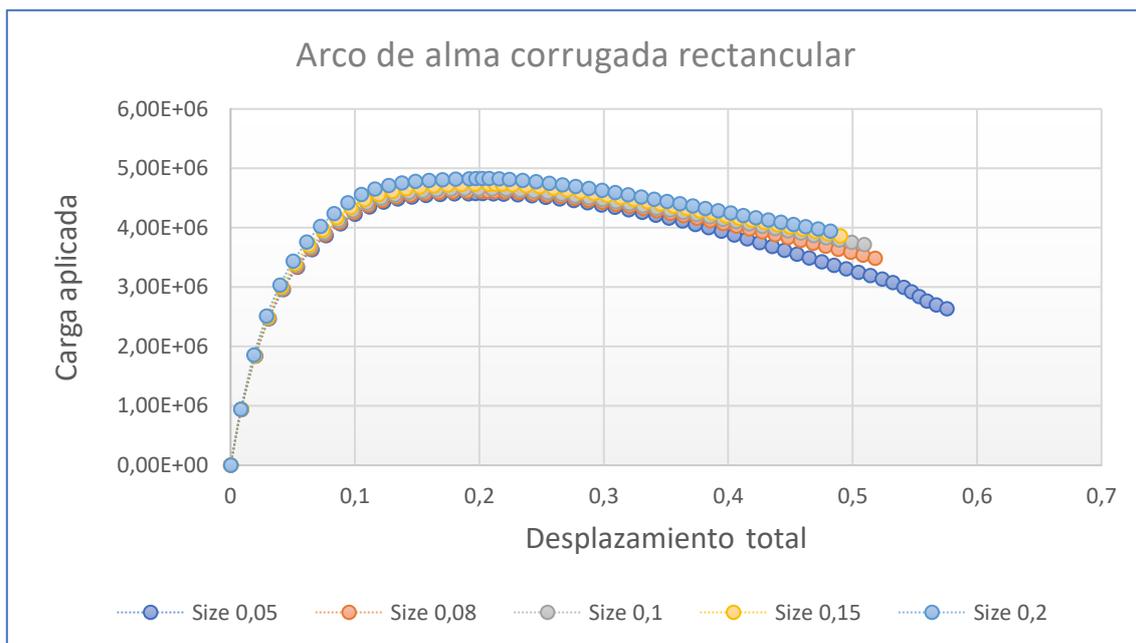


Figura 2.18. Gráfica de resultados - Arco de alma corrugada rectangular

2.3.2 Modelo de elementos finitos.

En esta entrada vamos a hablar sobre el tamaño de malla que deben tener nuestros modelos de elementos finitos para análisis estructurales.

“Cuando tenemos nuestro primer contacto con el método, generalmente en Escuelas Universitarias, lo primero que se nos enseña es que el método de elementos finitos es un método aproximado para la resolución de ecuaciones diferenciales parciales, y que salvo para algunos tipos de elementos, su precisión aumenta con la mayor discretización del problema, es decir, disminuyendo el tamaño de elemento y en consecuencia aumentando el número de elementos del modelo.

De este modo, y con objeto de minimizar el error en la aplicación del método, se suele proponer la realización de estudios de convergencia de malla.

Indicar que aunque los valores aquí presentados son válidos para la mayoría de escenarios que nos encontramos a la hora de realizar modelos de elementos finitos para análisis estructurales, para aquellos componentes de alta responsabilidad, geometría compleja y altos gradientes de tensiones, será necesario realizar un estudio de convergencia de la malla con objeto de obtener resultados suficientemente precisos, así como utilizar técnicas de post-proceso mediante elementos dummies para capturar con mayor precisión las tensiones en bordes y superficies libres”. [13]

En todos los modelos estudiados en este trabajo se ha decidido tomar un tamaño de malla igual a 0,1 para así poder trabajar con una malla menos refinada y por consiguiente menos elementos. Esto nos permite realizar todos los análisis de una manera más sencilla y con un notable ahorro de tiempo en las operaciones de cálculo. Para ello, hay que tener en cuenta que el error de cálculo entre usar una malla más o menos refinada sea relativamente pequeño y aceptable.

Arco de alma plana.

Para este primer modelo, utilizando un tamaño de malla igual a 0,1 obtenemos un mallado que posee 5286 elementos. En la figura 2.19 podemos observar un detalle del mallado en el arco de alma plana.

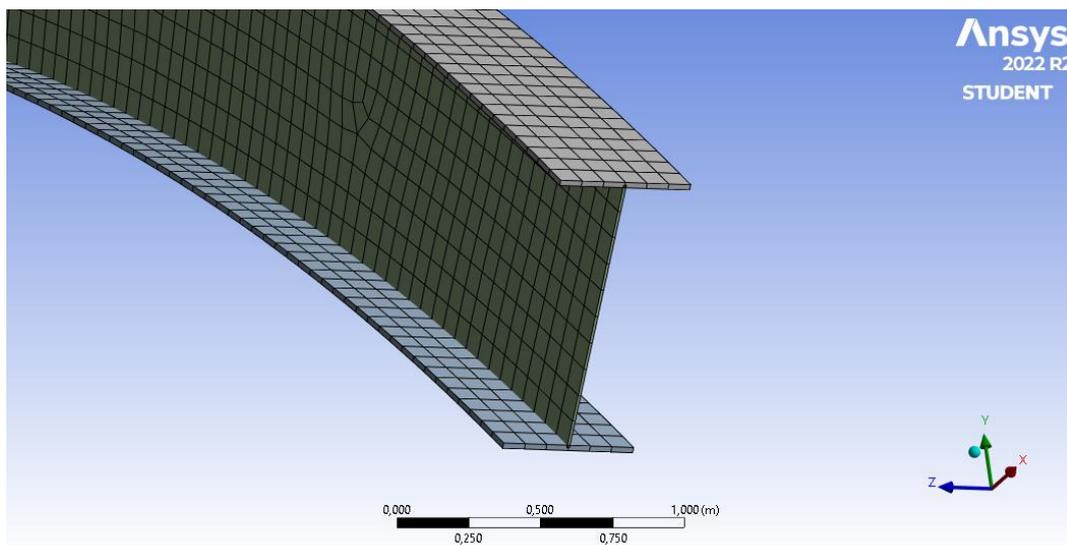


Figura 2.19. Detalle del mallado en el arco de alma plana.

Arco de alma plana con 6 rigidizadores transversales.

Para este modelo, utilizando un tamaño de malla igual a 0,1 obtenemos un mallado que posee 5631 elementos. En las figuras 2.20 y 2.21 podemos observar el mallado del arco de alma plana con 6 rigidizadores transversales.

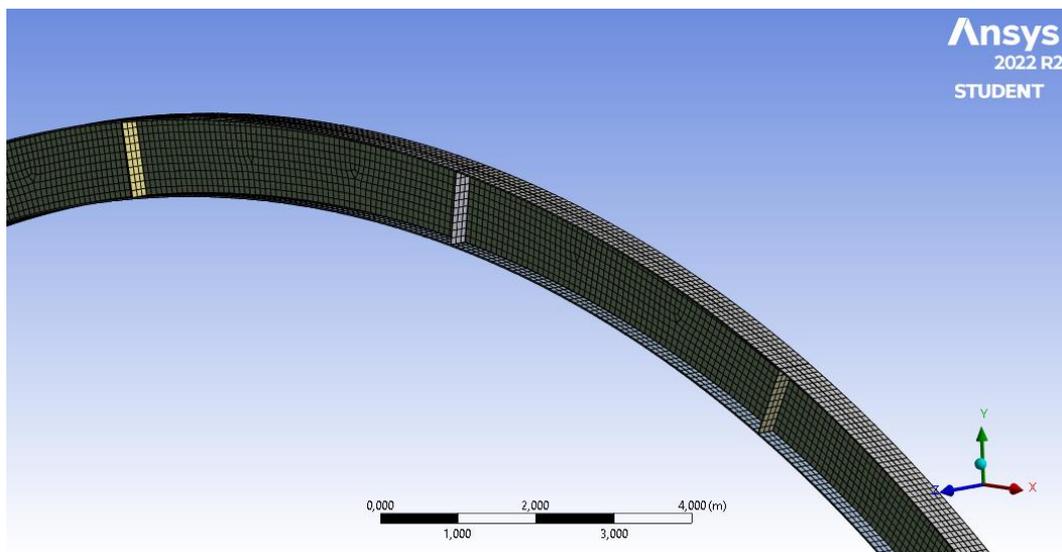


Figura 2.20. Mallado del arco de alma plana con 6 rigidizadores transversales.

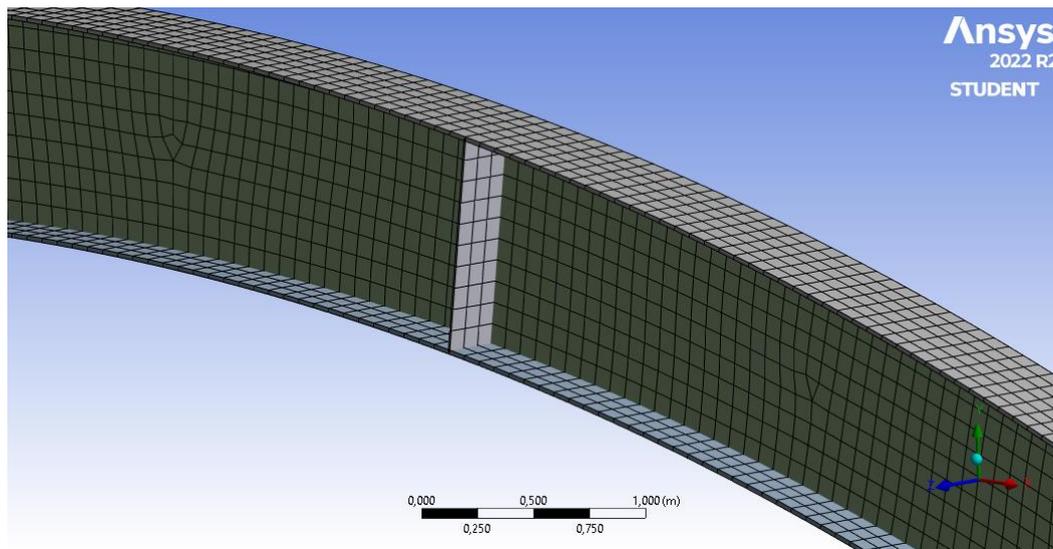


Figura 2.21. Detalle del mallado en el arco de alma plana con 6 rigidizadores transversales.

Arco de alma plana con 12 rigidizadores transversales.

Para este modelo, utilizando un tamaño de malla igual a 0,1 obtenemos un mallado que posee 6055 elementos. En las figuras 2.22 y 2.23 podemos observar el mallado del arco de alma plana con 12 rigidizadores transversales.

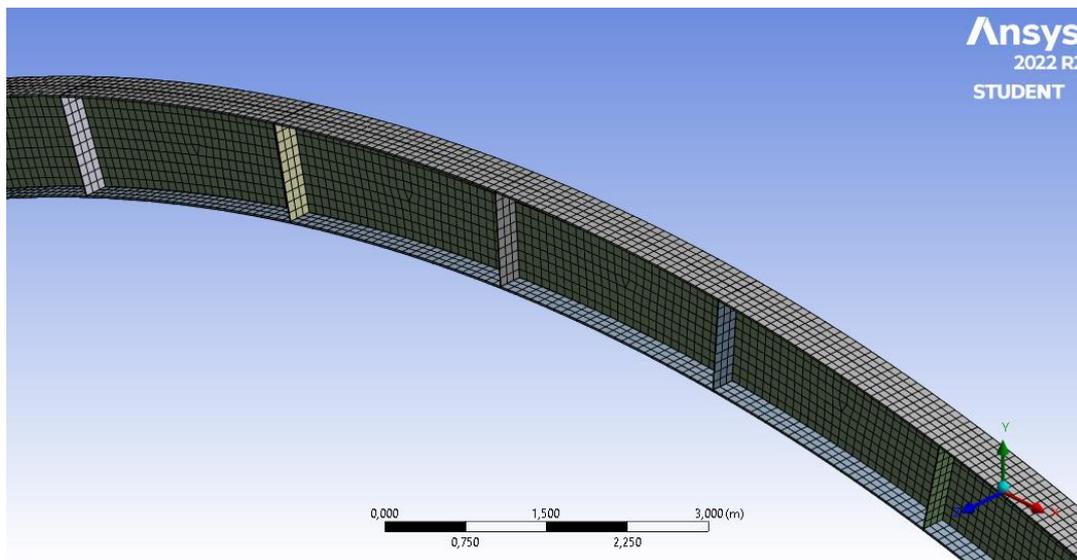


Figura 2.22. Mallado del arco de alma plana con 12 rigidizadores transversales.

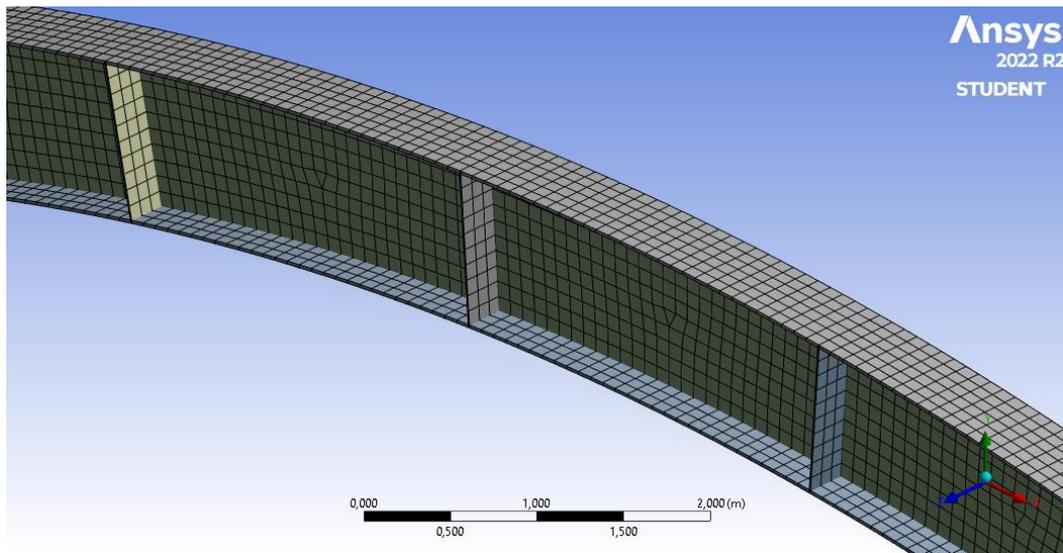


Figura 2.23. Detalle del mallado en el arco de alma plana con 12 rigidizadores transversales.

Arco de alma corrugada rectangular.

Para este modelo, utilizando un tamaño de malla igual a 0,1 obtenemos un mallado que posee 7923 elementos. En las figuras 2.24 y 2.25 podemos observar el mallado del arco de alma corrugada rectangular.

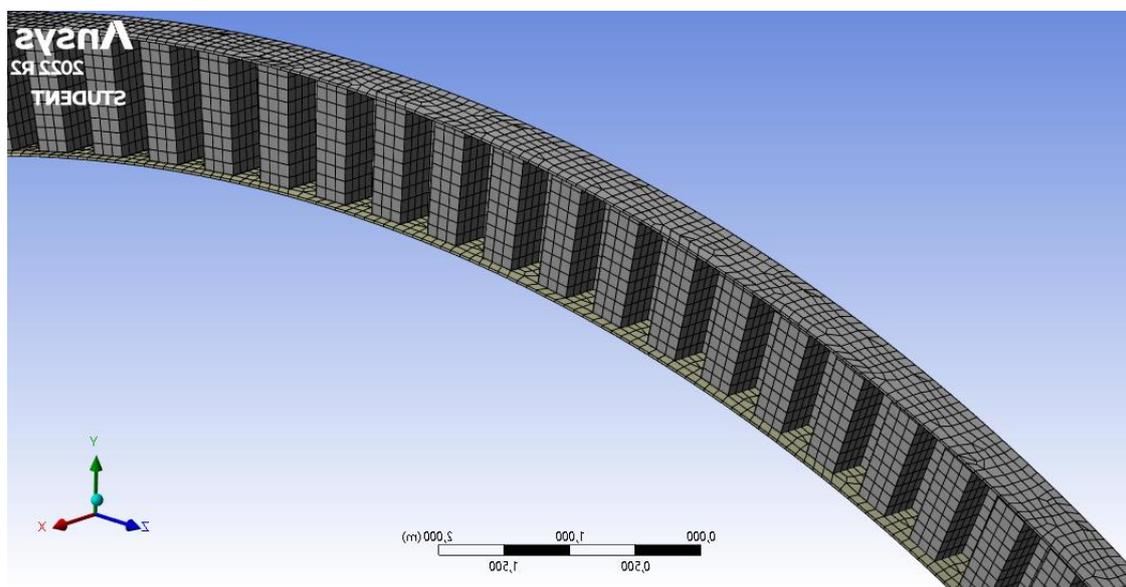


Figura 2.24. Mallado del arco de alma corrugada rectangular.

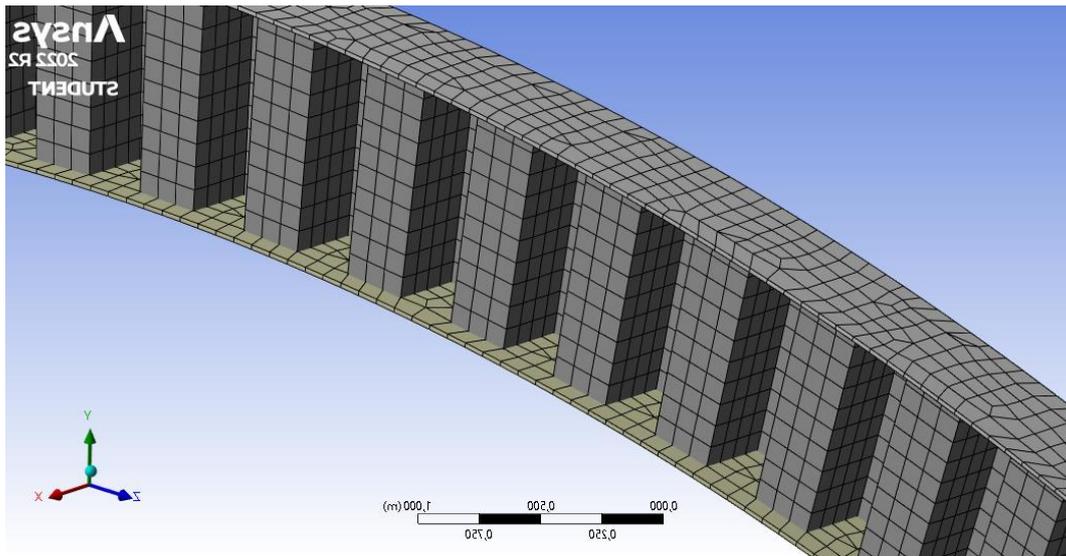


Figura 2.25. Detalle del mallado en el arco de alma corrugada rectangular.

Arco de alma corrugada trapezoidal.

Para este modelo, utilizando un tamaño de malla igual a 0,1 obtenemos un mallado que posee 7072 elementos. En las figuras 2.26 y 2.27 podemos observar el mallado del arco de alma corrugada trapezoidal.

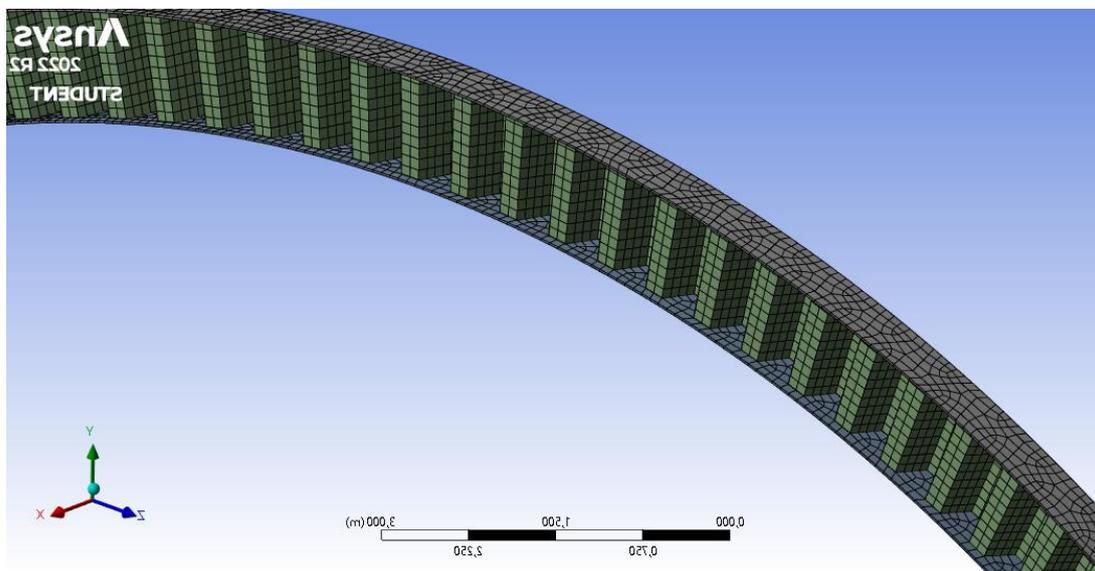


Figura 2.26. Mallado del arco de alma corrugada trapezoidal.

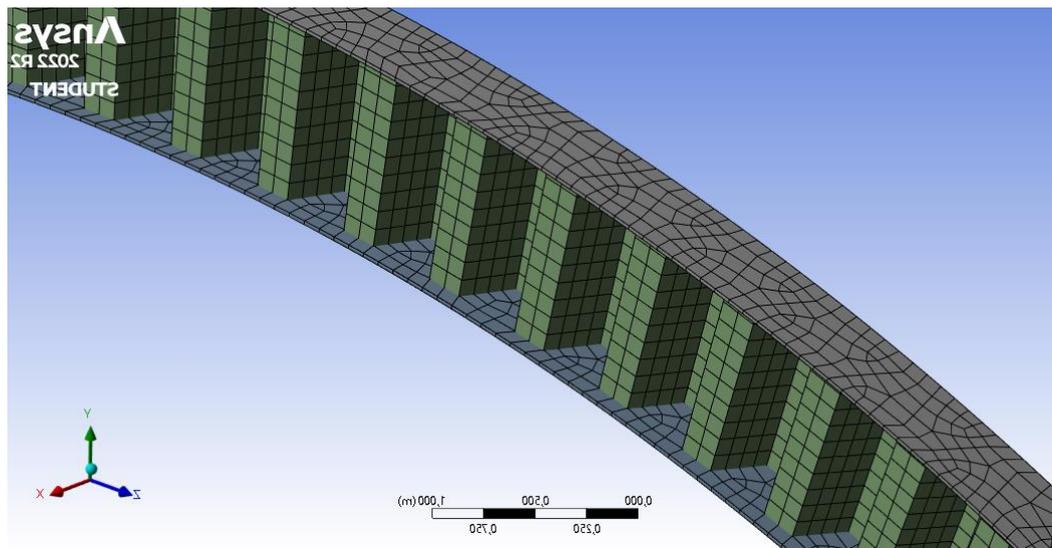


Figura 2.27. Detalle del mallado en el arco de alma corrugada trapezoidal.

Arco de alma corrugada triangular.

Para este modelo, utilizando un tamaño de malla igual a 0,1 obtenemos un mallado que posee 5958 elementos. En las figuras 2.28 y 2.29 podemos observar el mallado del arco de alma corrugada triangular.

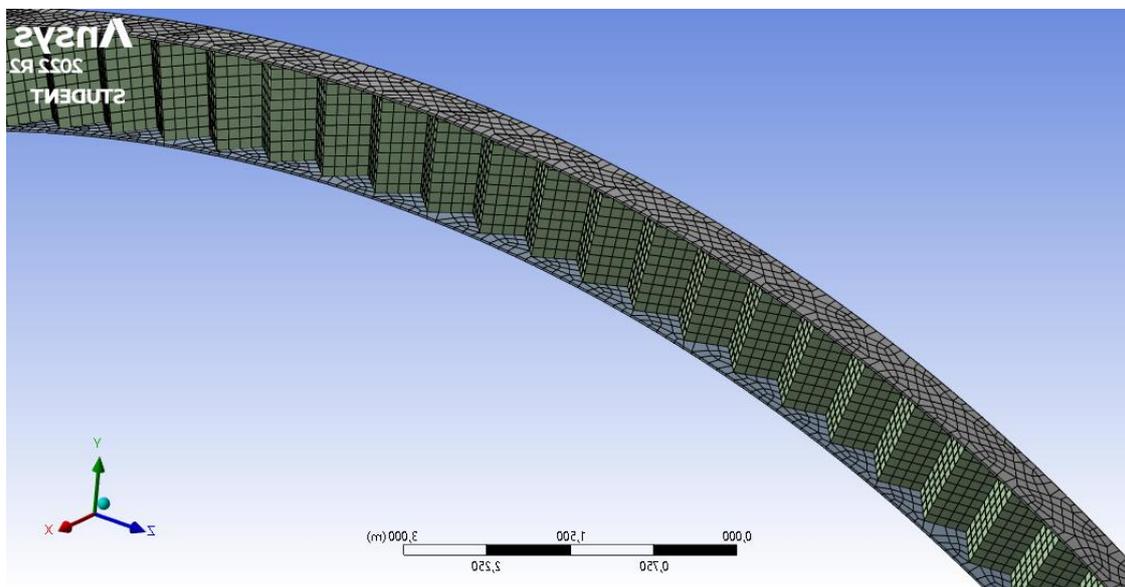


Figura 2.28. Mallado del arco de alma corrugada triangular.

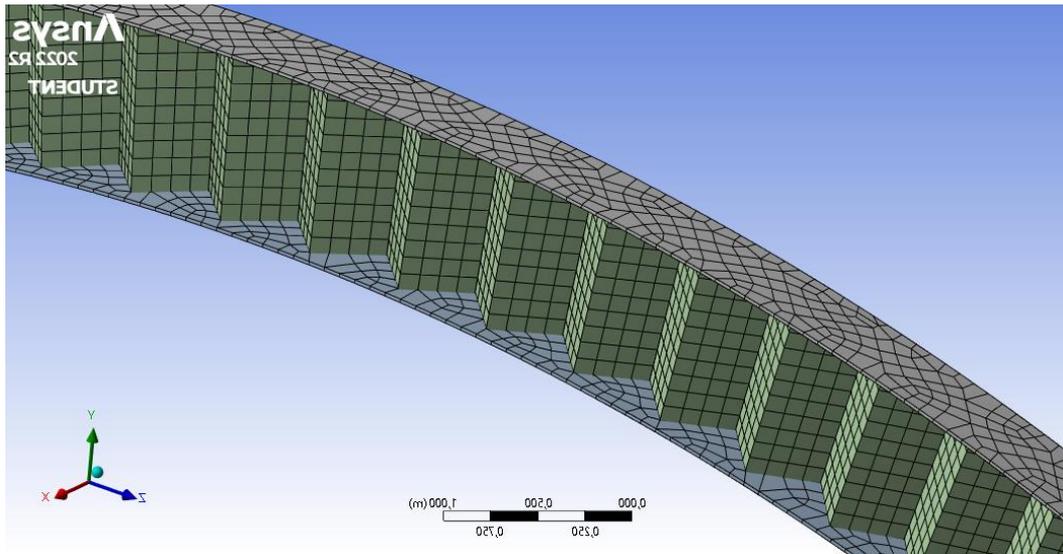


Figura 2.29. Detalle del mallado en el arco de alma corrugada triangular.

2.4 RESULTADOS DE PANDEO LATERAL.

Es importante destacar que el pandeo lateral es un fenómeno que ocurre cuando una estructura, como un arco de acero, se deforma lateralmente debido a la acción de cargas externas. Esto puede ser peligroso ya que puede provocar la falla de la estructura. Por lo tanto, es crucial tener en cuenta la resistencia a pandeo lateral al diseñar y construir arcos de acero. En este sentido, la elección del perfil adecuado puede ser determinante para garantizar la seguridad y estabilidad de la estructura.

La carga crítica de pandeo es la máxima carga que es capaz de soportar una pieza conservando su estabilidad. Una vez superado ese valor límite, la pieza sufrirá pandeo a lo largo de su longitud.

Los resultados obtenidos en el análisis de pandeo lateral de arcos de acero de sección 'I' muestran que la resistencia de los arcos varió dependiendo del tipo de perfil utilizado.

Los resultados indican que el arco de acero de sección 'I' con alma de chapa corrugada rectangular fue el que presentó mayor resistencia a las cargas críticas de pandeo. Por otro lado, el arco de acero de sección 'I' con alma plana fue el que presentó menor resistencia.

Arco de alma plana.

En este trabajo se han realizado análisis lineales de pandeo lateral para distintos arcos de acero de sección 'I' mediante el programa Ansys. El objetivo de estos análisis ha sido evaluar la capacidad de resistencia para cada una de las secciones utilizadas y determinar el modo de pandeo más crítico.

En los resultados se pueden observar dos modos de pandeo, para los cuales se ha obtenido la carga de pandeo mínima. Los resultados muestran que el primer modo de pandeo se produce con mayor facilidad, ya que la fuerza de pandeo necesaria para alcanzar el límite de resistencia es menor que para el segundo modo. De este modo, la carga crítica de pandeo lateral de menor valor será la que se tenga en consideración.

La carga crítica de pandeo lateral para el arco de acero de sección 'I' de alma plana tiene un valor de $2,3605E+06$ N.

A continuación, se presentan las figuras 2.30 y 2.31 que ilustran los resultados obtenidos para cada uno de los modos de pandeo.

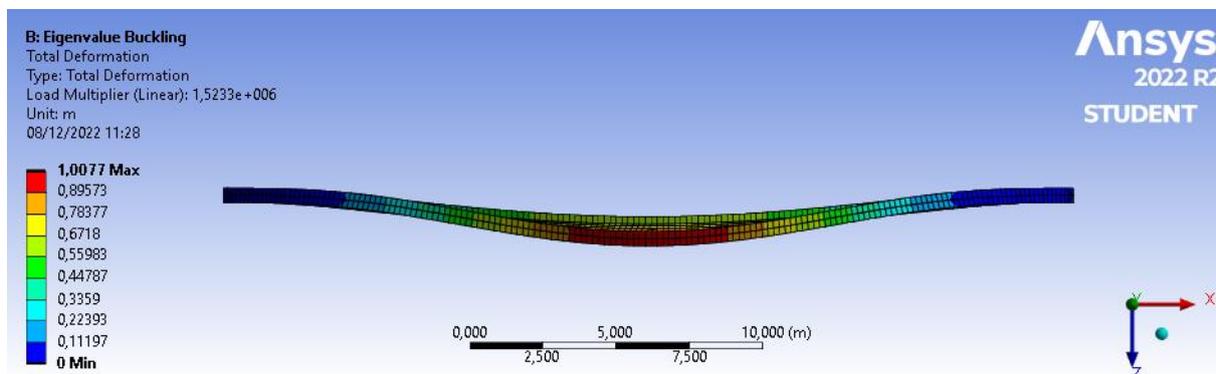


Figura 2.30. Primer modo de pandeo - Arco de alma plana.

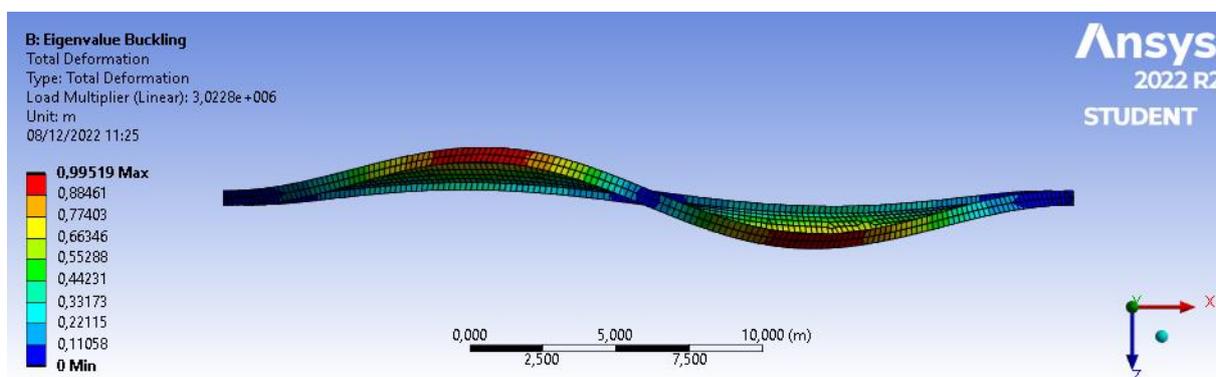


Figura 2.31. Segundo modo de pandeo - Arco de alma plana.

Arco de alma plana con 6 rigidizadores transversales.

En los resultados se pueden observar dos modos de pandeo, para los cuales se ha obtenido la carga de pandeo mínima. Los resultados muestran que el primer modo de pandeo se produce con mayor facilidad, ya que la fuerza de pandeo necesaria para alcanzar el límite de resistencia es menor que para el segundo modo. De este modo, la carga crítica de pandeo lateral de menor valor será la que se tenga en consideración.

La carga crítica de pandeo lateral para el arco de acero de sección 'I' de alma plana con 6 rigidizadores transversales tiene un valor de 2,8209E+06 N.

A continuación, se presentan las figuras 2.32 y 2.33 que ilustran los resultados obtenidos para cada uno de los modos de pandeo.

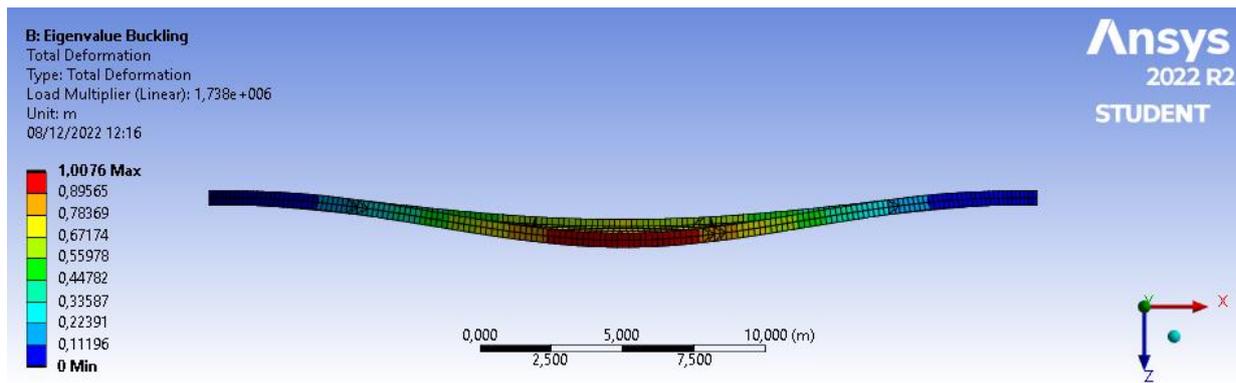


Figura 2.32. Primer modo de pandeo - Arco de alma plana con 6 rigidizadores transversales.

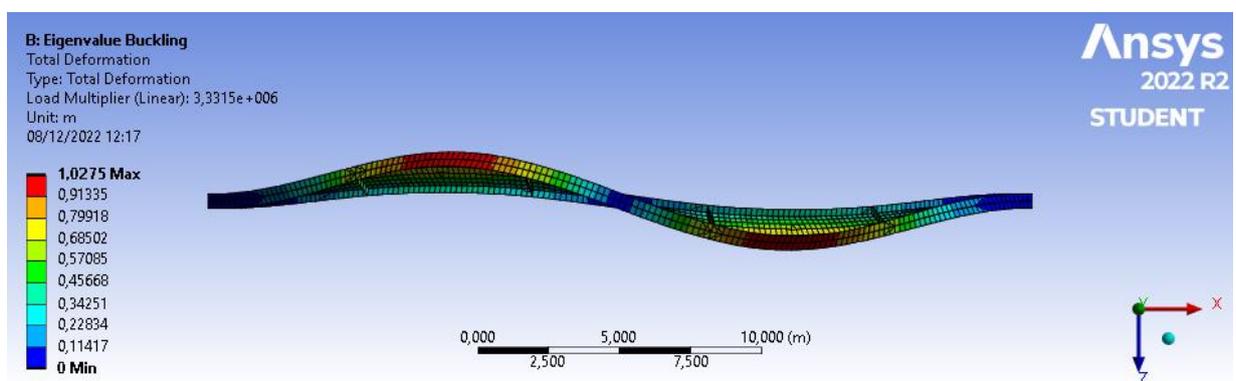


Figura 2.33. Segundo modo de pandeo - Arco de alma plana con 6 rigidizadores transversales.

Arco de alma plana con 12 rigidizadores transversales.

En los resultados se pueden observar dos modos de pandeo, para los cuales se ha obtenido la carga de pandeo mínima. Los resultados muestran que el primer modo de pandeo se produce con mayor facilidad, ya que la fuerza de pandeo necesaria para alcanzar el límite de resistencia es menor que para el segundo modo. De este modo, la carga crítica de pandeo lateral de menor valor será la que se tenga en consideración.

La carga crítica de pandeo lateral para el arco de acero de sección 'I' de alma plana con 12 rigidizadores transversales tiene un valor de 3,8467E+06 N.

A continuación, se presentan las figuras 2.34 y 2.35 que ilustran los resultados obtenidos para cada uno de los modos de pandeo.

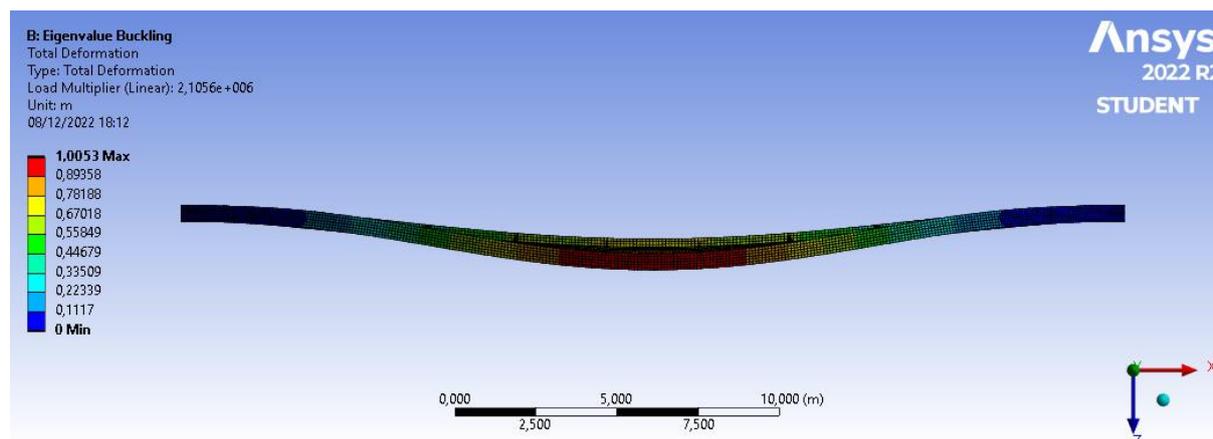


Figura 2.34. Primer modo de pandeo - Arco de alma plana con 12 rigidizadores transversales.

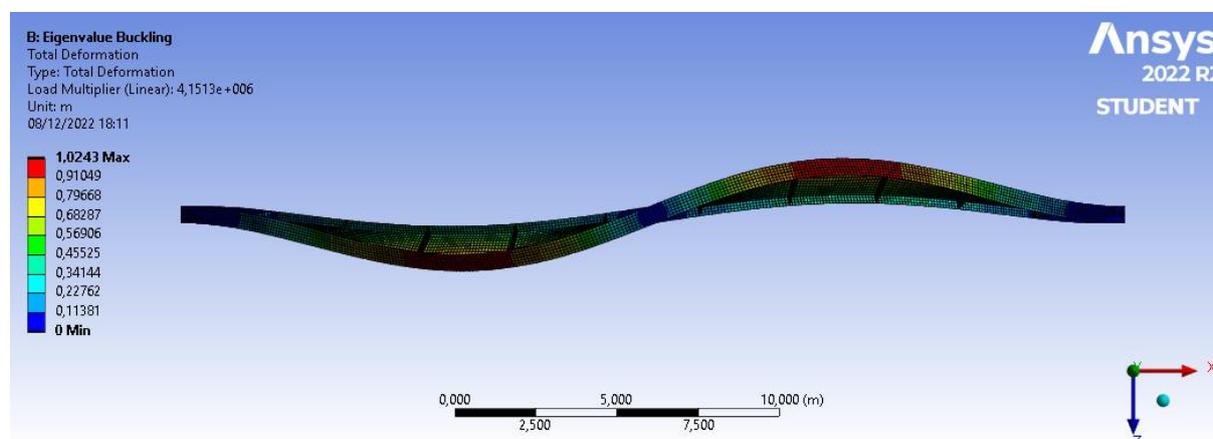


Figura 2.35. Segundo modo de pandeo - Arco de alma plana con 12 rigidizadores transversales.

Arco de alma corrugada rectangular.

En los resultados se pueden observar dos modos de pandeo, para los cuales se ha obtenido la carga de pandeo mínima. Los resultados muestran que el primer modo de pandeo se produce con mayor facilidad, ya que la fuerza de pandeo necesaria para alcanzar el límite de resistencia es menor que para el segundo modo. De este modo, la carga crítica de pandeo lateral de menor valor será la que se tenga en consideración.

La carga crítica de pandeo lateral para el arco de acero de sección 'I' de alma corrugada rectangular tiene un valor de 6,083E+06 N.

A continuación, se presentan las figuras 2.36 y 2.37 que ilustran los resultados obtenidos para cada uno de los modos de pandeo.

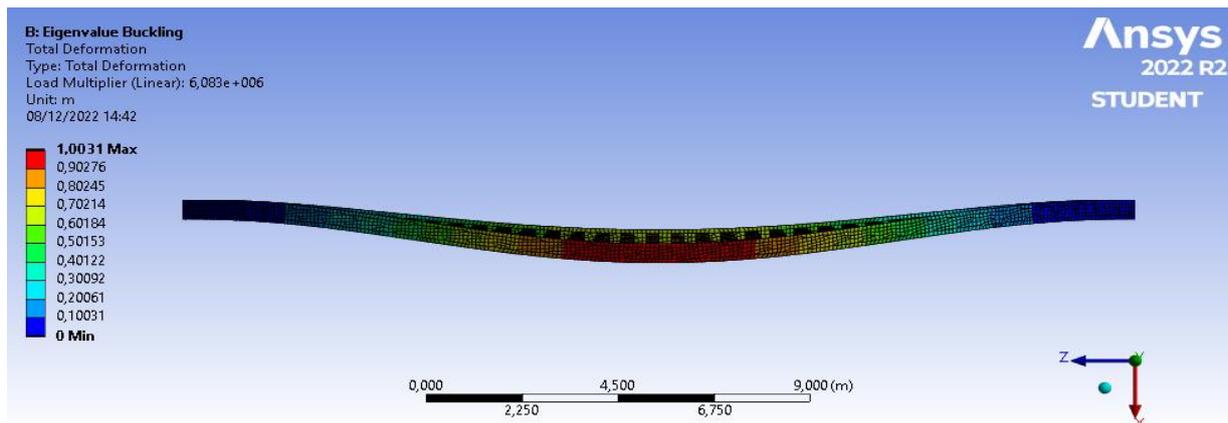


Figura 2.36. Primer modo de pandeo - Arco de alma corrugada rectangular.

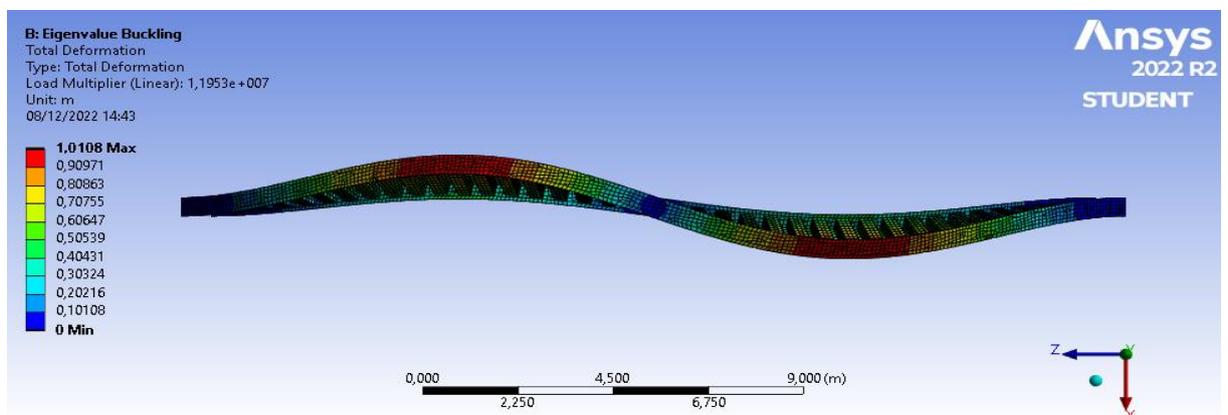


Figura 2.37. Segundo modo de pandeo - Arco de alma corrugada rectangular.

Arco de alma corrugada trapezoidal.

En los resultados se pueden observar dos modos de pandeo, para los cuales se ha obtenido la carga de pandeo mínima. Los resultados muestran que el primer modo de pandeo se produce con mayor facilidad, ya que la fuerza de pandeo necesaria para alcanzar el límite de resistencia es menor que para el segundo modo. De este modo, la carga crítica de pandeo lateral de menor valor será la que se tenga en consideración.

La carga crítica de pandeo lateral para el arco de acero de sección 'I' de alma corrugada trapezoidal tiene un valor de $5,7315E+06$ N.

A continuación, se presentan las figuras 2.38 y 2.39 que ilustran los resultados obtenidos para cada uno de los modos de pandeo.

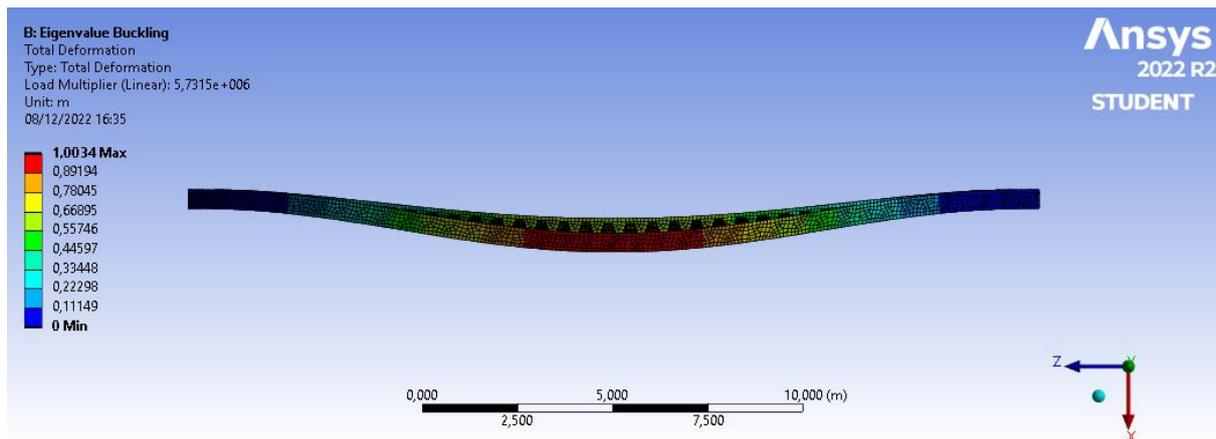


Figura 2.38. Primer modo de pandeo - Arco de alma corrugada trapezoidal.

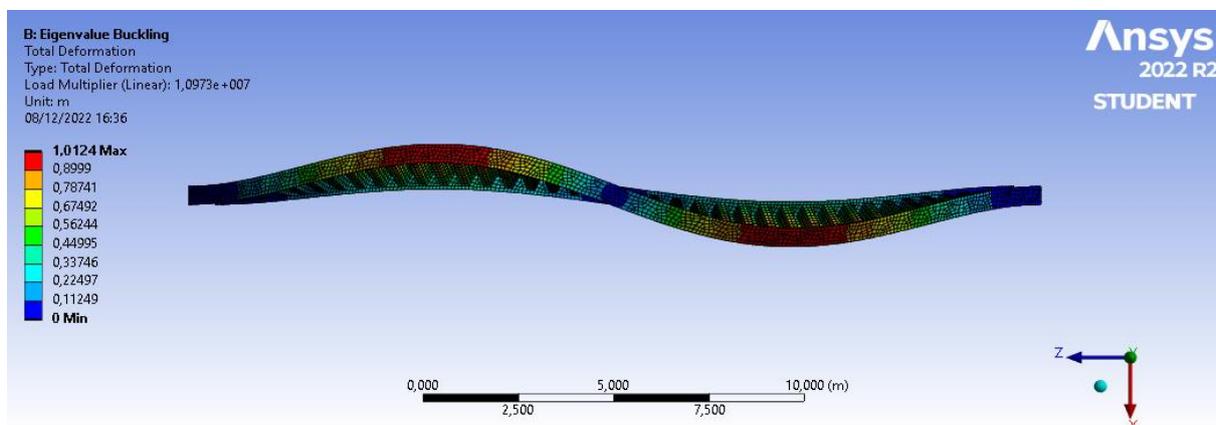


Figura 2.39. Segundo modo de pandeo - Arco de alma corrugada trapezoidal.

Arco de alma corrugada triangular.

En los resultados se pueden observar dos modos de pandeo, para los cuales se ha obtenido la carga de pandeo mínima. Los resultados muestran que el primer modo de pandeo se produce con mayor facilidad, ya que la fuerza de pandeo necesaria para alcanzar el límite de resistencia es menor que para el segundo modo. De este modo, la carga crítica de pandeo lateral de menor valor será la que se tenga en consideración.

La carga crítica de pandeo lateral para el arco de acero de sección 'I' de alma corrugada triangular tiene un valor de $5,379E+06$ N.

A continuación, se presentan las figuras 2.40 y 2.41 que ilustran los resultados obtenidos para cada uno de los modos de pandeo.

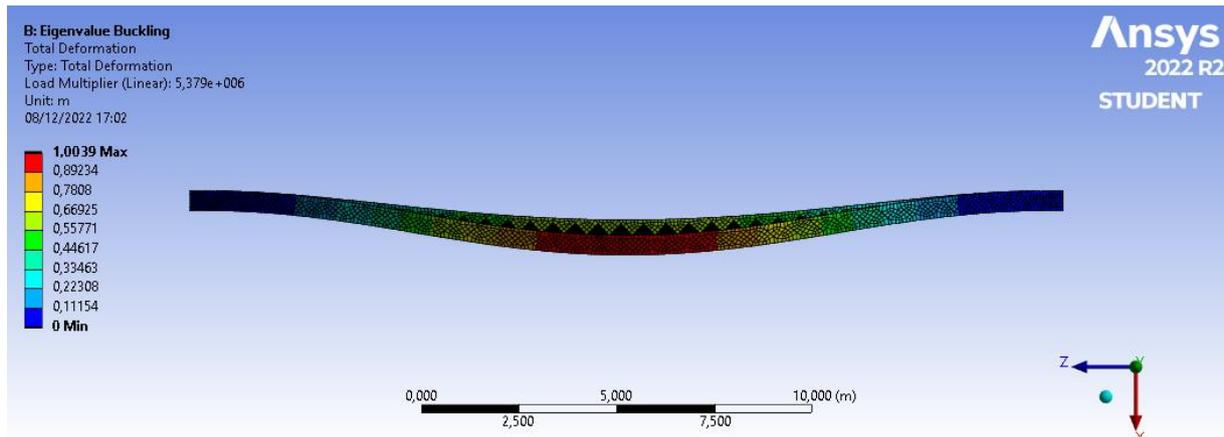


Figura 2.40. Primer modo de pandeo - Arco de alma corrugada triangular.

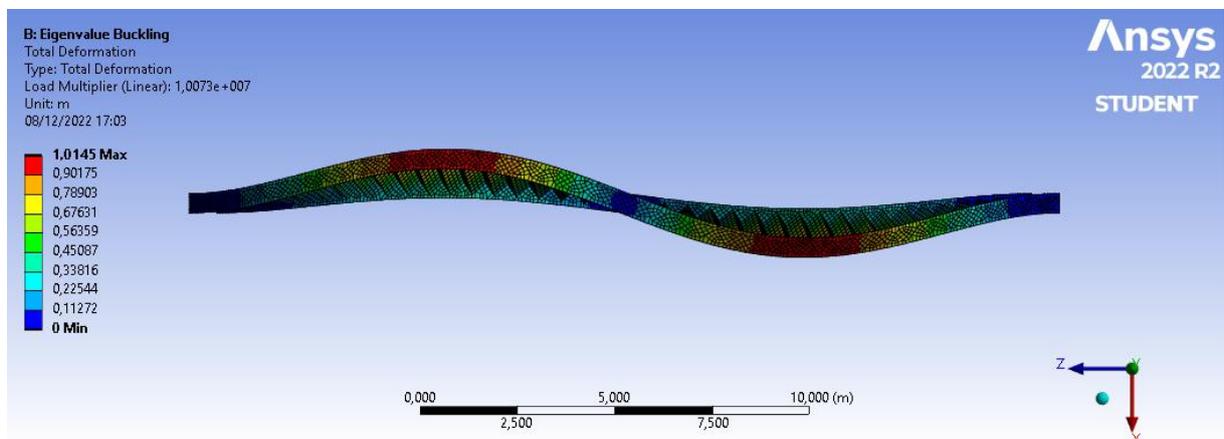


Figura 2.41. Segundo modo de pandeo - Arco de alma corrugada triangular.

Resultados - Pandeo lateral.

Los arcos de acero son estructuras muy utilizadas en la construcción debido a su gran capacidad portante y a su versatilidad. En este estudio, se han analizado diferentes tipos de secciones de arcos de acero con el fin de determinar cuál de ellos es el más resistente al pandeo lateral. Para ello, se ha realizado un análisis lineal con el software Ansys y se han obtenido los resultados presentados en la tabla 2.5:

Tipo de sección	Carga Pandeo (N)
AP	2,3605E+06
AP (6R)	2,8209E+06
AP (12R)	3,8467E+06
ACTRI	5,379E+06
ACTRA	5,7315E+06
ACR	6,083E+06

Tabla 2.5. Resultados de pandeo lateral.

Al comparar el arco de acero con la menor resistencia frente al pandeo lateral con los demás resultados, se pudo apreciar un aumento en la capacidad de resistencia en los distintos arcos analizados. El arco de acero de sección 'I' con alma plana logró soportar una carga de pandeo de valor 2,3605E+06 N, siendo así el arco con la menor resistencia frente a dicha flexión.

- El arco de acero de sección 'I' con alma plana y 6 rigidizadores, obtuvo un aumento de 1,2 veces su resistencia frente al pandeo lateral.
- El arco de acero de sección 'I' con alma plana y 12 rigidizadores, obtuvo un aumento de 1,63 veces su resistencia frente al pandeo lateral.
- El arco de acero de sección 'I' con alma corrugada triangular, obtuvo un aumento de 2,28 veces su resistencia frente al pandeo lateral.
- El arco de acero de sección 'I' con alma corrugada trapezoidal, obtuvo un aumento de 2,43 veces su resistencia frente al pandeo lateral.
- El arco de acero de sección 'I' con alma corrugada rectangular, obtuvo un aumento de 2,58 veces su resistencia frente al pandeo lateral.

Además, se puede observar que, en general, los arcos con almas corrugadas tienden a ser más resistentes que los arcos con alma plana.

3. ESTUDIO COMPARATIVO DE CARGAS ULTIMAS.

3.1 IMPERFECCIONES INICIALES.

Las imperfecciones iniciales son desviaciones o deformaciones que existen en una estructura desde el momento de su construcción. Estas imperfecciones pueden ser debidas a diversas causas:

- Fabricación imprecisa de los elementos estructurales.
- Tolerancias en la colocación de estos elementos.
- Deformación debida a la propia carga a la que está expuesta a la estructura.
- Deformaciones permanentes debidas a procesos de soldadura, corte o plegado de los elementos estructurales.

Las imperfecciones iniciales pueden ser medidas o estimadas de diversas maneras, dependiendo del tipo de estructura y de los elementos que la componen. Algunos métodos comunes para medir o estimar las imperfecciones iniciales son:

- Medidas directas: consisten en medir físicamente las imperfecciones con instrumentos especializados, como micrómetros, calibradores o dispositivos de medición láser.
- Métodos basados en el modelado matemático: consisten en utilizar modelos matemáticos que pueden predecir las imperfecciones iniciales a partir de parámetros conocidos, como las tolerancias de fabricación o la deformación debida a la propia carga.
- Métodos basados en el ensayo: consisten en someter a la estructura a cargas controladas y medir las deformaciones que se producen, para luego estimar las imperfecciones iniciales a partir de estas deformaciones.

En el ámbito de la ingeniería estructural, es importante tener en cuenta las imperfecciones iniciales debido a que pueden afectar a la capacidad de la estructura para soportar cargas. Por ejemplo, si una estructura tiene una imperfección inicial que la hace inclinarse ligeramente, esto puede afectar a su capacidad para soportar cargas y a su estabilidad a largo plazo. Además, las imperfecciones iniciales también pueden afectar a la distribución de esfuerzos en la estructura y, por tanto, a su comportamiento frente a cargas dinámicas.

Para tener en cuenta las imperfecciones iniciales en el proceso de diseño de una estructura, se realizan métodos como el análisis estructural no lineal. Además, también se pueden utilizar medidas de protección y refuerzo para reducir el impacto de las imperfecciones iniciales en la estructura.

3.2 ANÁLISIS NO-LINEAL.

“Un análisis no lineal es aquel que considera el comportamiento tenso-deformacional de los materiales y la no linealidad geométrica, descartando de manera directa el principio de superposición.

Debido a la invalidez del principio de superposición, los formatos de seguridad aplicados en los análisis lineales no pueden ser aplicados de forma directa en los no lineales. Esto ha incentivado el desarrollo de formatos de seguridad para ser aplicados tanto en el análisis como en el diseño no lineal, promoviendo también el estudio de los parámetros que más afectan la respuesta última real de la estructura.

La determinación de la carga última fuera del plano de un arco de acero debe considerar, entre otros, el comportamiento no lineal geométrico de la estructura, el carácter elastoplástico del acero, la presencia de autotensiones, las imperfecciones geométricas constructivas y la propagación de zonas plastificadas a lo largo de la directriz. La única herramienta válida para su cálculo es el método de elementos finitos. La resolución del problema no lineal se realiza de forma incremental, linealizando cada pequeño escalón de carga y ajustándolo iterativamente”. [14]

3.3 RESULTADOS.

La elección de la sección adecuada de un arco de acero es fundamental para garantizar su capacidad para soportar cargas y su estabilidad a largo plazo. Existen diversas formas y secciones de arcos de acero disponibles en el mercado, y cada una de ellas presenta sus propias características y ventajas. Por ello, es importante tener en cuenta las imperfecciones iniciales en el proceso de diseño de una estructura y realizar un análisis adecuado para determinar su influencia en el comportamiento de los arcos.

En este trabajo, se lleva a cabo un estudio comparativo de cargas ultimas en arcos de acero de diferentes secciones 'I' con imperfecciones iniciales mediante el programa Ansys. El objetivo del estudio ha sido evaluar la capacidad portante de los arcos y determinar cómo la sección transversal y las imperfecciones iniciales influyen en su comportamiento no lineal.

Arco de alma plana.

En la siguiente grafica (Figura 3.1) se presentan los resultados de carga-desplazamiento para el arco de acero de sección 'I' con alma plana.

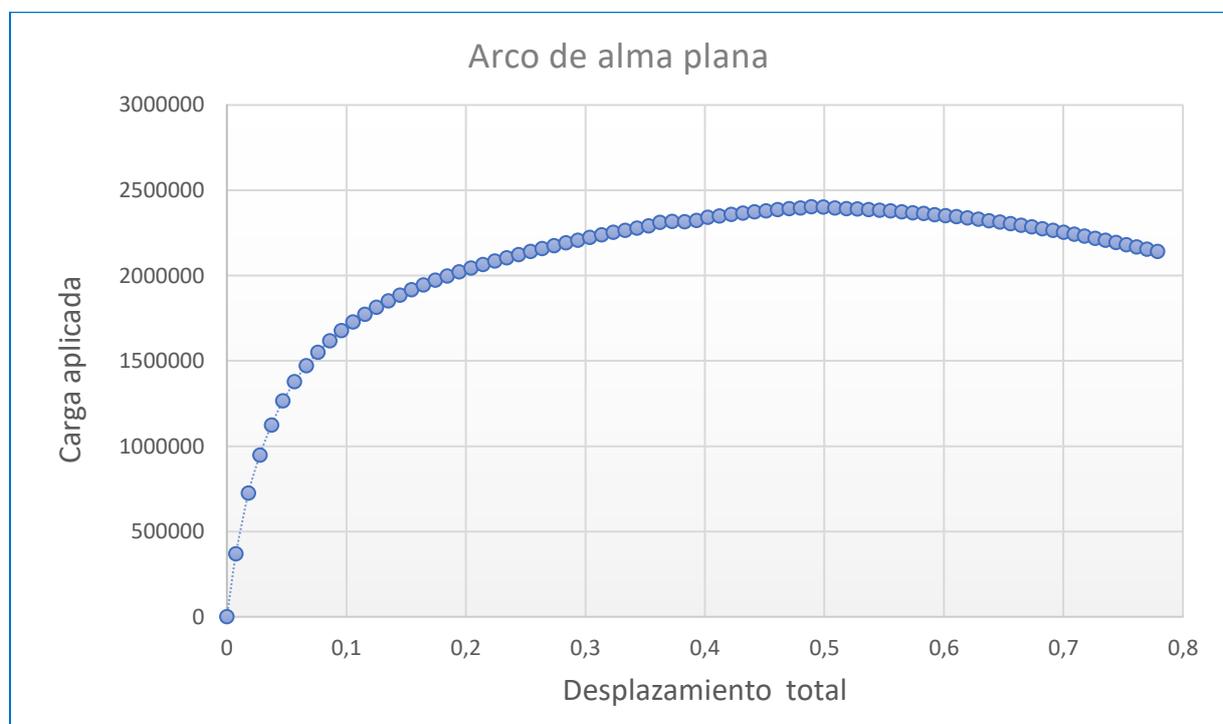


Figura 3.1. Gráfica de resultados carga-desplazamiento - Arco de alma plana.

Como se puede ver en la gráfica, la deformación del arco aumenta de manera progresiva a medida que aumenta la carga aplicada, hasta alcanzar un punto crítico en el que se produce el colapso estructural. A partir de este punto, se inicia la pérdida de la capacidad portante del arco. La carga ultima para el arco de acero de sección 'I' de alma plana tiene un valor de 2,40E+06 N.

En la siguiente tabla (Tabla 3.1) se presentan los resultados numéricos obtenidos mediante el programa de elementos finitos Ansys.

Tabla de resultados:

Desplazamiento total (m)	Carga (N)
0	0,00E+00
7,63E-03	3,69E+05
1,81E-02	7,24E+05
2,76E-02	9,47E+05
3,73E-02	1,12E+06
4,69E-02	1,26E+06
5,66E-02	1,38E+06
6,64E-02	1,47E+06
7,62E-02	1,55E+06
8,60E-02	1,62E+06
9,58E-02	1,68E+06
0,10562	1,73E+06
0,11542	1,77E+06
0,12522	1,81E+06
0,13502	1,85E+06
0,14481	1,88E+06
0,15459	1,92E+06
0,16452	1,94E+06
0,17447	1,97E+06
0,18441	2,00E+06
0,19435	2,02E+06
0,2043	2,04E+06
0,21424	2,06E+06
0,22418	2,08E+06
0,23412	2,10E+06
0,24405	2,12E+06
0,25399	2,14E+06
0,26392	2,16E+06
0,27385	2,18E+06
0,28377	2,19E+06
0,29369	2,21E+06
0,3036	2,22E+06

0,31351	2,24E+06
0,32341	2,25E+06
0,33328	2,27E+06
0,34315	2,28E+06
0,35294	2,29E+06
0,36243	2,31E+06
0,37258	2,32E+06
0,38303	2,32E+06
0,39302	2,32E+06
0,40235	2,34E+06
0,41223	2,35E+06
0,42197	2,36E+06
0,4317	2,37E+06
0,44143	2,37E+06
0,45114	2,38E+06
0,46083	2,39E+06
0,4705	2,39E+06
0,48007	2,40E+06
0,48924	2,40E+06
0,49899	2,40E+06
0,50874	2,40E+06
0,51835	2,39E+06
0,52765	2,39E+06
0,53697	2,39E+06
0,54621	2,38E+06
0,55546	2,38E+06
0,5647	2,37E+06
0,57392	2,37E+06
0,58311	2,36E+06
0,59229	2,36E+06
0,60144	2,35E+06
0,61056	2,34E+06
0,61965	2,34E+06
0,62872	2,33E+06
0,63776	2,32E+06
0,64677	2,31E+06
0,65575	2,30E+06
0,66469	2,29E+06
0,67361	2,28E+06
0,68249	2,27E+06
0,69135	2,26E+06
0,70019	2,25E+06
0,70899	2,24E+06
0,71777	2,23E+06
0,72653	2,22E+06
0,73527	2,21E+06
0,74399	2,19E+06
0,75268	2,18E+06
0,76135	2,17E+06

0,77	2,15E+06
0,77863	2,14E+06
0,78723	2,13E+06
0,7958	2,11E+06
0,80436	2,10E+06
0,81289	2,08E+06
0,8214	2,07E+06
0,82988	2,05E+06
0,83835	2,04E+06
0,84681	2,02E+06
0,85525	2,01E+06
0,86369	400000

Tabla 3.1. Resultados - Arco de alma plana

Arco de alma plana con 6 rigidizadores transversales.

En la siguiente grafica (Figura 3.2) se presentan los resultados de carga-desplazamiento para el arco de acero de sección 'I' de alma plana con 6 rigidizadores transversales.

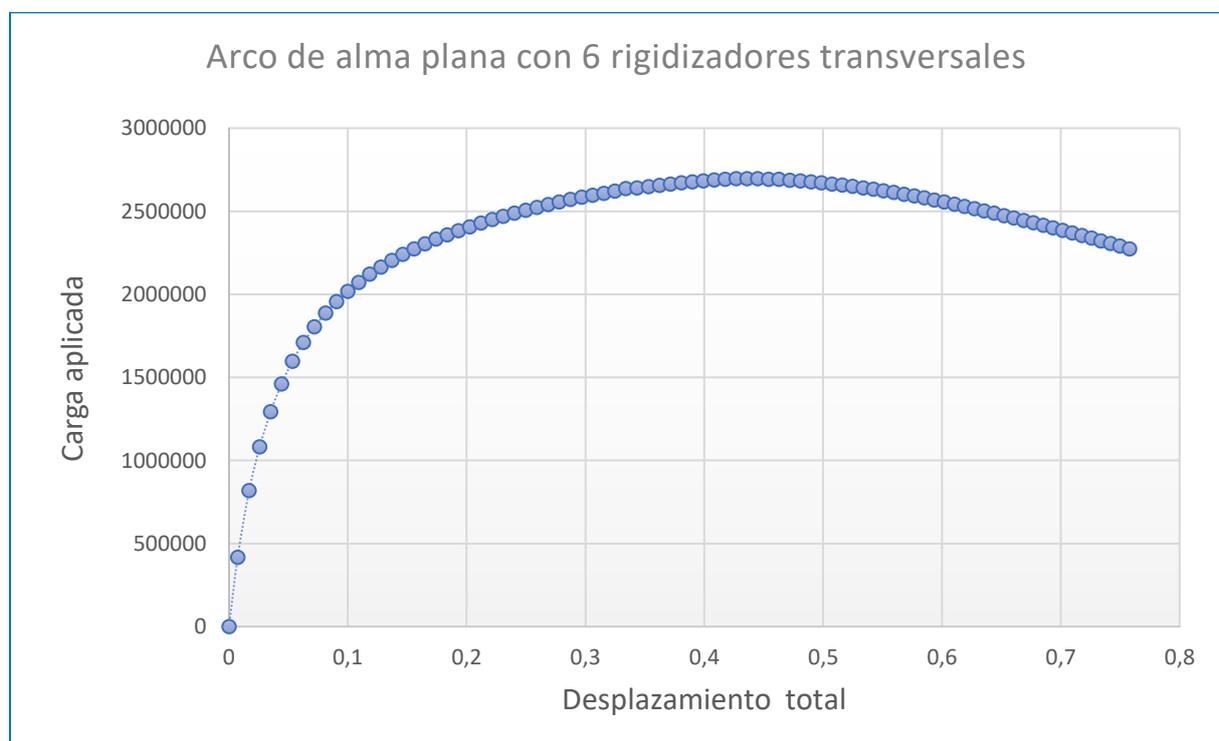


Figura 3.2. Gráfica carga-desplazamiento - Arco de alma plana con 6 rigidizadores transversales.

Como se puede ver en la gráfica, la deformación del arco aumenta de manera progresiva a medida que aumenta la carga aplicada, hasta alcanzar un punto crítico en el que se produce el colapso estructural. A partir de este punto, se inicia la pérdida de la capacidad portante del arco. La carga última para el arco de acero de sección 'I' de alma plana con 6 rigidizadores transversales tiene un valor de $2,70E+06$ N.

En la siguiente tabla (Tabla 3.2) se presentan los resultados numéricos obtenidos mediante el programa de elementos finitos Ansys.

Tabla de resultados:

Desplazamiento total (m)	Carga (N)
0	0,00E+00
7,25E-03	4,17E+05
1,69E-02	8,18E+05
2,59E-02	1,08E+06
3,50E-02	1,29E+06
4,41E-02	1,46E+06
5,33E-02	1,60E+06
6,26E-02	1,71E+06
7,19E-02	1,80E+06
8,12E-02	1,89E+06
9,05E-02	1,96E+06
9,98E-02	2,02E+06
0,10915	2,07E+06
0,11846	2,12E+06
0,12776	2,16E+06
0,13706	2,20E+06
0,14635	2,24E+06
0,15563	2,27E+06
0,16491	2,30E+06
0,17424	2,33E+06
0,18367	2,36E+06
0,19311	2,38E+06
0,20254	2,41E+06
0,21198	2,43E+06
0,22141	2,45E+06
0,23084	2,47E+06
0,24027	2,49E+06
0,24969	2,51E+06
0,25911	2,52E+06
0,26853	2,54E+06
0,27794	2,56E+06
0,28734	2,57E+06

0,29673	2,58E+06
0,3061	2,60E+06
0,31545	2,61E+06
0,32469	2,62E+06
0,33386	2,64E+06
0,34345	2,64E+06
0,35299	2,65E+06
0,36227	2,66E+06
0,37153	2,66E+06
0,38079	2,67E+06
0,39003	2,68E+06
0,39925	2,68E+06
0,40846	2,69E+06
0,41766	2,69E+06
0,42682	2,70E+06
0,43593	2,70E+06
0,4449	2,70E+06
0,45399	2,69E+06
0,4627	2,69E+06
0,47196	2,69E+06
0,48094	2,68E+06
0,48977	2,68E+06
0,4986	2,67E+06
0,50739	2,66E+06
0,51615	2,66E+06
0,52488	2,65E+06
0,53359	2,64E+06
0,54226	2,63E+06
0,5509	2,62E+06
0,5595	2,61E+06
0,56808	2,60E+06
0,57663	2,59E+06
0,58514	2,58E+06
0,59361	2,57E+06
0,60207	2,55E+06
0,6105	2,54E+06
0,6189	2,53E+06
0,62727	2,52E+06
0,63562	2,50E+06
0,64394	2,49E+06
0,65224	2,47E+06
0,66053	2,46E+06
0,66879	2,45E+06
0,67702	2,43E+06
0,68523	2,42E+06
0,6934	2,40E+06
0,70154	2,38E+06
0,70966	2,37E+06
0,71775	2,35E+06

0,72582	2,34E+06
0,73386	2,32E+06
0,74189	2,31E+06
0,74988	2,29E+06
0,75786	2,27E+06
0,76583	4500000

Tabla 3.2. Resultados - Arco de alma plana con 6 rigidizadores transversales.

Arco de alma plana con 12 rigidizadores transversales.

En la siguiente grafica (Figura 3.3) se presentan los resultados de carga-desplazamiento para el arco de acero de sección 'I' de alma plana con 12 rigidizadores transversales.

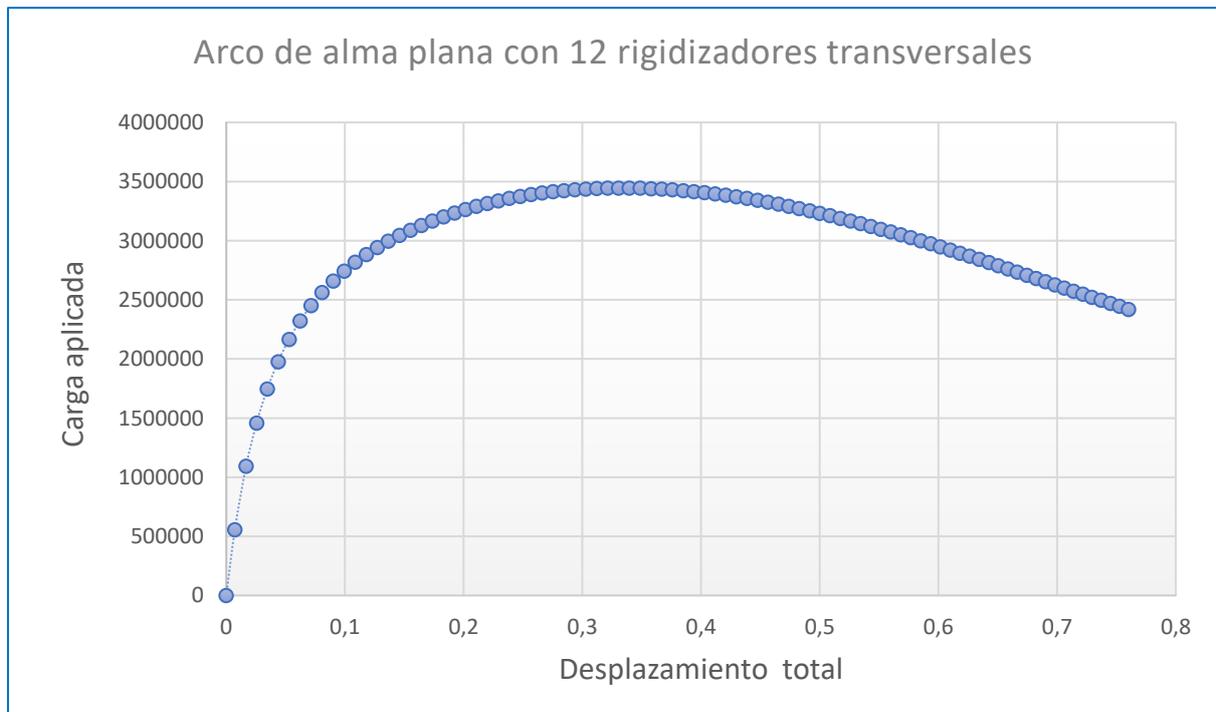


Figura 3.3. Gráfica carga-desplazamiento - Arco de alma plana con 12 rigidizadores transversales.

Como se puede ver en la gráfica, la deformación del arco aumenta de manera progresiva a medida que aumenta la carga aplicada, hasta alcanzar un punto crítico en el que se produce el colapso estructural. A partir de este punto, se inicia la pérdida de la capacidad portante del arco. La carga ultima para el arco de acero de sección 'I' de alma plana con 12 rigidizadores transversales tiene un valor de 3,45E+06 N.

En la siguiente tabla (Tabla 3.3) se presentan los resultados numéricos obtenidos mediante el programa de elementos finitos Ansys.

Tabla de resultados:

Desplazamiento total (m)	Carga (N)
0	0
7,21E-03	556704
1,67E-02	1093380
2,55E-02	1457640
3,46E-02	1747680
4,37E-02	1978260
5,29E-02	2165880
6,21E-02	2321280
7,14E-02	2452140
8,07E-02	2563740
9,00E-02	2660160
9,93E-02	2744460
0,10863	2818800
0,11794	2884860
0,12725	2944260
0,13656	2997600
0,14586	3045780
0,15516	3090000
0,16445	3130680
0,17373	3168060
0,18301	3202560
0,19228	3234660
0,20154	3263820
0,21078	3290520
0,22002	3315060
0,22925	3337740
0,23846	3358140
0,24765	3376200
0,25682	3391800
0,26597	3405000
0,27516	3416100
0,28442	3425160
0,29366	3432600
0,30289	3438480
0,3121	3442740
0,32129	3445140
0,33046	3446160
0,33962	3445500
0,34874	3444600
0,35784	3441240

0,36691	3436740
0,37597	3431220
0,38501	3424560
0,39404	3416640
0,40303	3407160
0,41199	3396480
0,42093	3384780
0,42985	3372120
0,43874	3358380
0,4476	3343560
0,45644	3327540
0,46524	3310500
0,47401	3292320
0,48275	3273600
0,49146	3254040
0,50013	3233460
0,50876	3212040
0,51736	3190080
0,52593	3167700
0,53448	3145020
0,543	3121920
0,5515	3098520
0,55996	3074760
0,5684	3050520
0,57678	3025740
0,58514	3000480
0,59345	2974860
0,60172	2948700
0,60994	2922300
0,61813	2895780
0,62628	2869140
0,6344	2842320
0,64248	2815380
0,65052	2788500
0,65853	2761560
0,66652	2734740
0,67448	2707980
0,6824	2681100
0,69029	2654280
0,69815	2627460
0,706	2601000
0,71383	2574780
0,72164	2548680
0,72942	2522760
0,73718	2497020
0,74492	2471400
0,75265	2445900
0,76036	2420700
0,76806	2395740

0,77574	2371140
0,78342	2346780
0,79108	2322720
0,79873	2299140
0,80638	2275800
0,81402	2252880
0,82165	2230320
0,82929	2208120
0,83691	2186280
0,84453	6000000

Tabla 3.3. Resultados - Arco de alma plana con 12 rigidizadores transversales.

Arco de alma corrugada rectangular.

En la siguiente grafica (Figura 3.4) se presentan los resultados de carga-desplazamiento para el arco de acero de sección 'I' de alma corrugada rectangular.

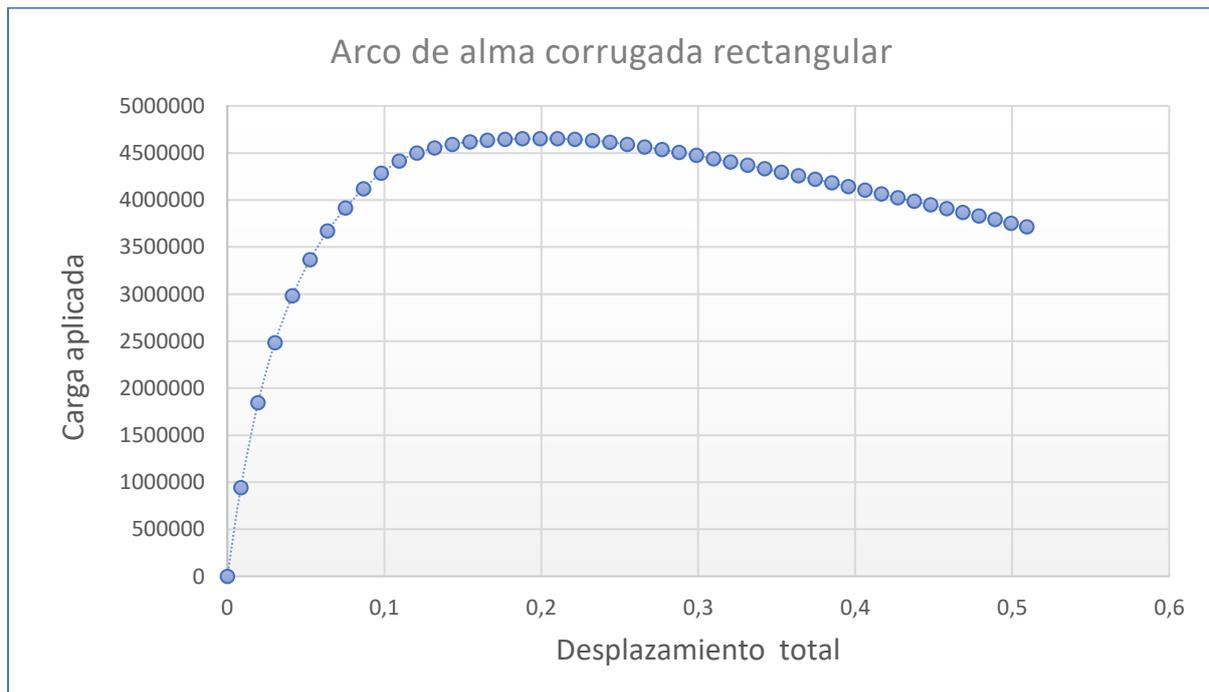


Figura 3.4. Gráfica carga-desplazamiento - Arco de alma corrugada rectangular.

Como se puede ver en la gráfica, la deformación del arco aumenta de manera progresiva a medida que aumenta la carga aplicada, hasta alcanzar un punto crítico en el que se produce el colapso estructural. A partir de este punto, se inicia la pérdida de la capacidad portante

del arco. La carga ultima para el arco de acero de sección 'I' de alma corrugada rectangular tiene un valor de 4651900 N.

En la siguiente tabla (Tabla 3.4) se presentan los resultados numéricos obtenidos mediante el programa de elementos finitos Ansys.

Tabla de resultados:

Desplazamiento total (m)	Carga (N)
0	0
8,58E-03	940890
1,96E-02	1844500
3,03E-02	2482000
4,15E-02	2980600
5,27E-02	3365200
6,39E-02	3669800
7,53E-02	3916200
8,67E-02	4118400
9,81E-02	4285700
0,1095	4415500
0,12082	4498100
0,1321	4551400
0,14334	4591600
0,15453	4616400
0,16572	4633400
0,17688	4644200
0,18803	4649900
0,19917	4651900
0,21031	4650600
0,22145	4644300
0,23258	4632600
0,24368	4614500
0,25476	4591100
0,26582	4564500
0,27685	4536100
0,28786	4506100
0,29882	4473700
0,30974	4438900
0,32062	4403300
0,33147	4368400
0,34227	4331700
0,35304	4295400
0,36377	4257900
0,37445	4219800
0,38509	4182200

0,39566	4141700
0,40624	4104000
0,41673	4063400
0,4272	4024600
0,43762	3985900
0,44801	3948000
0,45832	3908000
0,46862	3869200
0,47887	3831200
0,48905	3791200
0,49923	3752700
0,50937	3715000
0,51945	10000000

Tabla 3.4. Resultados - Arco de alma corrugada rectangular.

Arco de alma corrugada trapezoidal.

En la siguiente grafica (Figura 3.5) se presentan los resultados de carga-desplazamiento para el arco de acero de sección 'I' de alma corrugada trapezoidal.

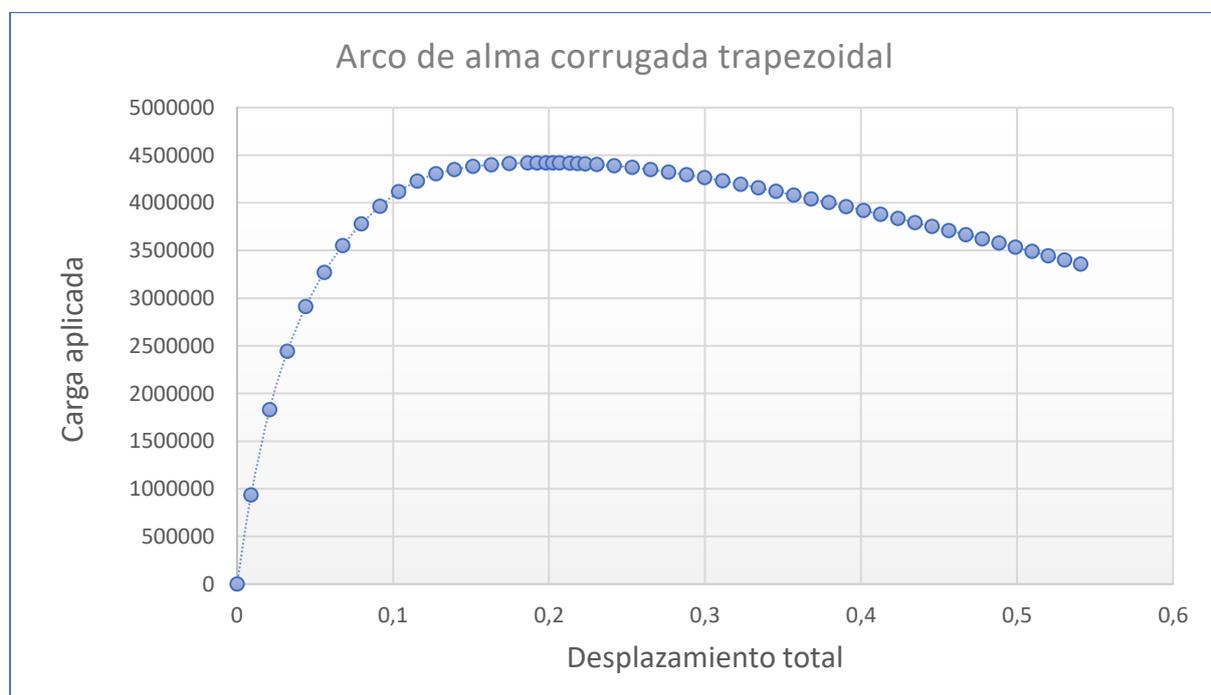


Figura 3.5. Gráfica carga-desplazamiento - Arco de alma corrugada trapezoidal.

Como se puede ver en la gráfica, la deformación del arco aumenta de manera progresiva a medida que aumenta la carga aplicada, hasta alcanzar un punto crítico en el que se produce

el colapso estructural. A partir de este punto, se inicia la pérdida de la capacidad portante del arco. La carga ultima para el arco de acero de sección 'I' de alma corrugada trapezoidal tiene un valor de 4,42E+06 N.

En la siguiente tabla (Tabla 3.5) se presentan los resultados numéricos obtenidos mediante el programa de elementos finitos Ansys.

Tabla de resultados:

Desplazamiento total (m)	Carga (N)
0	0
9,04E-03	936340
2,09E-02	1831200
3,23E-02	2441900
4,41E-02	2911600
5,59E-02	3269800
6,78E-02	3551600
7,97E-02	3778600
9,17E-02	3964700
0,10367	4116900
0,11563	4230000
0,12753	4304600
0,13936	4349800
0,15115	4381000
0,16291	4400800
0,17464	4412800
0,18635	4419300
0,1922	4420200
0,19805	4419900
0,20243	4419600
0,20681	4418500
0,21339	4416700
0,21832	4414100
0,22325	4410700
0,23064	4404200
0,24172	4390200
0,25338	4371100
0,26501	4347700
0,27663	4322100
0,28821	4294100
0,29977	4264900
0,31126	4230900
0,32273	4196100
0,33412	4157800
0,34548	4119700

0,35679	4081000
0,36807	4042500
0,37929	4002800
0,39046	3962100
0,40158	3921600
0,41262	3878900
0,42362	3836700
0,43456	3794600
0,44548	3753400
0,45628	3709600
0,46707	3667000
0,47777	3623300
0,48842	3579300
0,49902	3535000
0,50955	3490200
0,52003	3445300
0,53047	3400500
0,54086	3356200
0,55124	10000000

Tabla 3.5. Resultados - Arco de alma corrugada trapezoidal.

Arco de alma corrugada triangular.

En la siguiente grafica (Figura 3.6) se presentan los resultados de carga-desplazamiento para el arco de acero de sección 'I' de alma corrugada triangular.

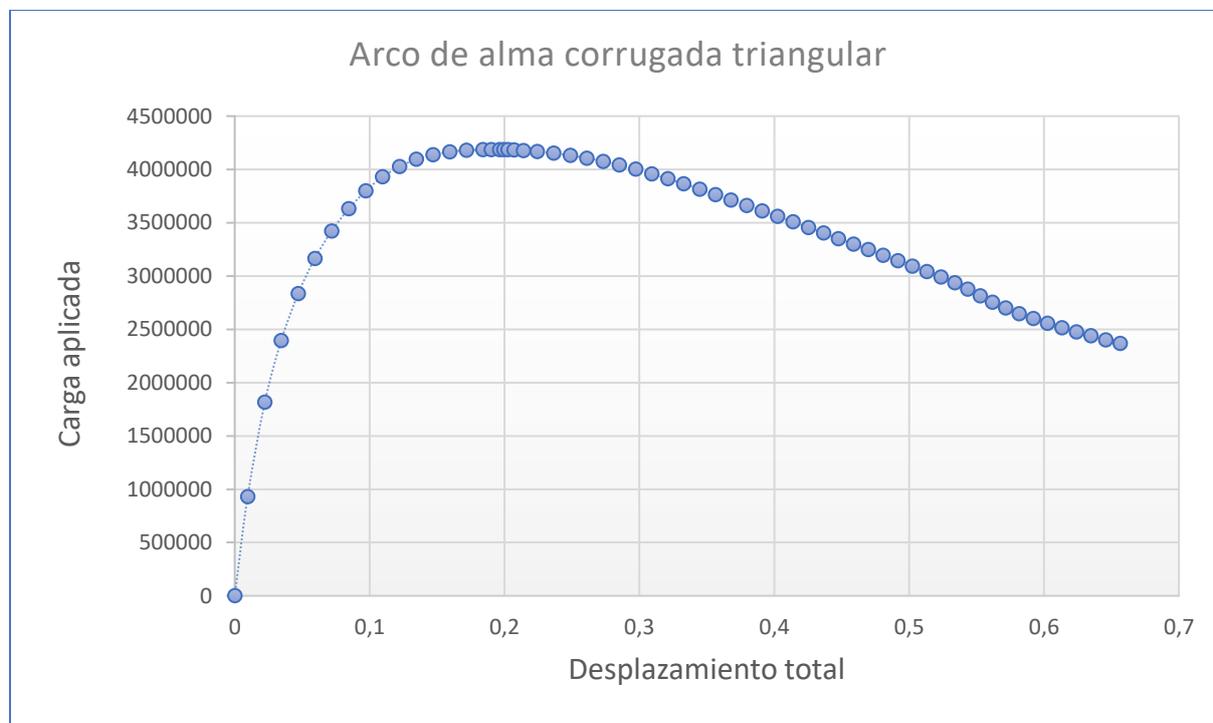


Figura 3.6. Gráfica carga-desplazamiento - Arco de alma corrugada triangular.

Como se puede ver en la gráfica, la deformación del arco aumenta de manera progresiva a medida que aumenta la carga aplicada, hasta alcanzar un punto crítico en el que se produce el colapso estructural. A partir de este punto, se inicia la pérdida de la capacidad portante del arco. La carga ultima para el arco de acero de sección 'I' de alma corrugada triangular tiene un valor de 4185600 N.

En la siguiente tabla (Tabla 3.6) se presentan los resultados numéricos obtenidos mediante el programa de elementos finitos Ansys.

Tabla de resultados:

Desplazamiento total (m)	Carga (N)
0	0
9,55E-03	930640

2,23E-02	1814800
3,45E-02	2395300
4,70E-02	2833600
5,94E-02	3164400
7,19E-02	3423000
8,45E-02	3630500
9,71E-02	3799100
0,10963	3931300
0,12218	4027800
0,13467	4094300
0,1471	4137000
0,15948	4164500
0,17182	4178900
0,18412	4185000
0,19026	4185600
0,1964	4185400
0,19947	4184800
0,20253	4183900
0,20713	4181700
0,21402	4177000
0,22435	4167600
0,23657	4152100
0,24878	4131200
0,26096	4105700
0,2731	4075900
0,2852	4041100
0,29723	4002100
0,30918	3958400
0,32107	3911900
0,33291	3864300
0,34467	3814600
0,35637	3763900
0,368	3713300
0,37957	3661900
0,39109	3611000
0,40256	3559900
0,41397	3508300
0,42527	3455900
0,43651	3403600
0,44767	3351100
0,45878	3299000
0,46981	3246600
0,48076	3195100
0,49162	3143500
0,50241	3091800
0,51314	3041300
0,52363	2990000
0,5338	2936000
0,54347	2876500

0,55263	2814000
0,56183	2753700
0,5715	2698500
0,58166	2647100
0,59202	2600200
0,60255	2556400
0,61323	2515000
0,62401	2475600
0,63482	2437800
0,64565	2401300
0,65647	2367000
0,66732	10000000

Tabla 3.6. Resultados - Arco de alma corrugada triangular.

Resultados – Cargas ultimas.

En este trabajo se ha llevado a cabo un estudio comparativo de la capacidad portante de diferentes arcos de acero con imperfecciones iniciales bajo cargas aplicadas. El objetivo del estudio ha sido determinar cómo la sección transversal del arco influye en la capacidad portante y en el comportamiento no lineal de los arcos bajo carga. Para ello, se ha realizado un análisis no lineal utilizando el software Ansys y se han obtenido los siguientes resultados, presentados en la tabla 3.7:

Tipo de sección	Carga Ultima (N)
AP	2,40E+06
AP (6R)	2,70E+06
AP (12R)	3,45E+06
ACTRI	4,18E+06
ACTRA	4,42E+06
ACR	4,65E+06

Tabla 3.7. Resultados de cargas ultimas para las diferentes secciones.

Como se puede observar, los valores de cargas últimas varían significativamente entre las diferentes secciones estudiadas. Al comparar el arco de acero con la menor resistencia frente a la carga ultima con los demás resultados, se pudo apreciar un aumento en la capacidad de resistencia en los distintos arcos analizados. El arco de acero de sección 'I' con alma plana logró soportar una carga ultima de valor 2,40E+06 N, siendo de este modo el arco con menor resistencia.

- El arco de acero de sección 'I' con alma plana y 6 rigidizadores, posee una resistencia 12,5% mayor.
- El arco de acero de sección 'I' con alma plana y 12 rigidizadores, posee una resistencia 43,75% mayor.
- El arco de acero de sección 'I' con alma corrugada triangular, posee una resistencia 74,17% mayor.
- El arco de acero de sección 'I' con alma corrugada trapezoidal, posee una resistencia 84,17% mayor.
- El arco de acero de sección 'I' con alma corrugada rectangular, posee una resistencia 93,75% mayor.

Gráfica de resultados.

La gráfica de comparación (Figura 3.7) muestra como los arcos con almas corrugadas son más resistentes frente a cargas elevadas que los arcos con almas planas. Estos poseen una rigidez inicial más elevada y de este modo, una pendiente mayor. El arco de acero de sección 'I' con alma corrugada rectangular resultó ser el más resistente frente a cargas elevadas, mientras que el arco de acero de sección 'I' con alma plana fue el más débil. Además, se puede observar que los arcos con almas planas son capaces de soportar deformaciones mayores a lo largo del mismo proceso de integración.

Los resultados obtenidos en este estudio son importantes ya que la resistencia y la deformación son dos factores clave a considerar en el diseño estructural de arcos de acero. Estos resultados pueden ser útiles para la selección óptima de un arco de acero en una aplicación determinada, y también pueden servir como una guía para futuros estudios en este campo.

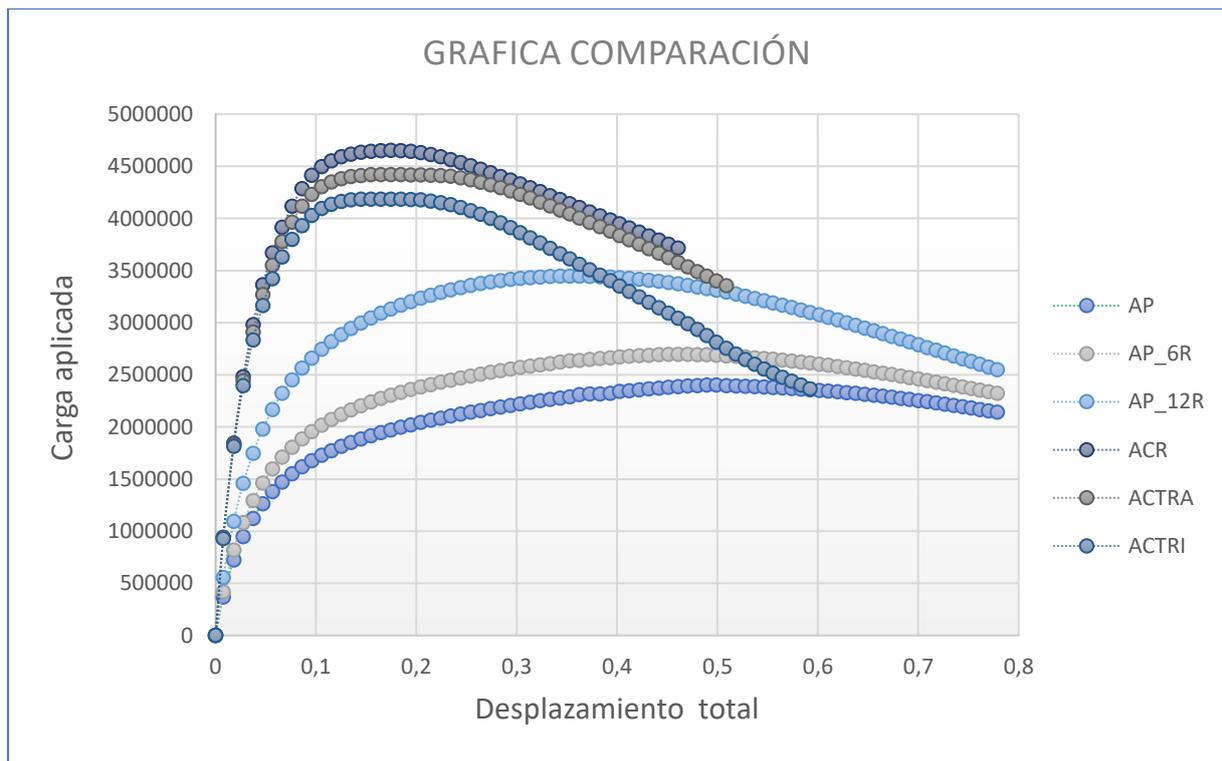


Figura 3.7. Grafica de comparación carga-desplazamiento para las diferentes secciones.

Rigidez inicial.

La rigidez inicial es una medida de la resistencia de un elemento estructural a ser deformado bajo carga. Se relaciona con la capacidad de un material para resistir cambios en su forma original sin sufrir daños permanentes.

El parámetro de 'rigidez inicial' mide la capacidad de resistencia del arco a deformaciones pequeñas y puede afectar a su comportamiento no lineal bajo cargas más elevadas. Los resultados obtenidos muestran que el arco de sección 'I' con alma corrugada rectangular tiene una rigidez inicial mayor que el resto de las secciones, lo que puede explicar en parte su alta resistencia frente a cargas elevadas.

En un estudio comparativo de cargas últimas, es importante tener en cuenta la rigidez inicial de los arcos de acero debido a que esto afecta la capacidad del arco para resistir cargas de diseño.

$$\text{Rigidez inicial} = \frac{\frac{\text{Carga de pandeo}}{10}}{\delta \text{ equivalente a dicha carga}}$$

En la siguiente tabla (Tabla 3.8) se presentan los valores de rigidez inicial para cada una de las diferentes secciones estudiadas:

Tipo de sección	Rigidez inicial (N/m)
AP	4,84E+07
AP (6R)	5,76E+07
AP (12R)	7,72E+07
ACTRI	9,74E+07
ACTRA	1,04E+08
ACR	1,10E+08

Tabla 3.8. Valores de rigidez inicial para las diferentes secciones.

4. CONCLUSIONES.

En resumen, en el trabajo de fin de carrera se abordó el estudio comparativo de la resistencia a pandeo lateral de arcos de acero no arriostrados con diferentes morfologías de sección 'I' sometidas a cargas en su plano. A través del análisis por elementos finitos utilizando el programa ANSYS, se realizaron dos análisis: uno lineal y otro no lineal con imperfecciones iniciales.

Los resultados obtenidos en el análisis lineal indicaron lo siguiente:

Al comparar el arco de acero con la menor resistencia frente al pandeo lateral con los demás resultados, se pudo apreciar un aumento en la capacidad de resistencia en los distintos arcos analizados. El arco de acero de sección 'I' con alma plana logró soportar una carga de pandeo de valor $2,3605E+06$ N, siendo así el arco con la menor resistencia frente a dicha flexión.

- El arco de acero de sección 'I' con alma plana y 6 rigidizadores, obtuvo un aumento de 1,2 veces su resistencia frente al pandeo lateral.
- El arco de acero de sección 'I' con alma plana y 12 rigidizadores, obtuvo un aumento de 1,63 veces su resistencia frente al pandeo lateral.
- El arco de acero de sección 'I' con alma corrugada triangular, obtuvo un aumento de 2,28 veces su resistencia frente al pandeo lateral.
- El arco de acero de sección 'I' con alma corrugada trapezoidal, obtuvo un aumento de 2,43 veces su resistencia frente al pandeo lateral.
- El arco de acero de sección 'I' con alma corrugada rectangular, obtuvo un aumento de 2,58 veces su resistencia frente al pandeo lateral.

Los resultados obtenidos en el análisis no lineal con imperfecciones iniciales indicaron lo siguiente:

Al comparar el arco de acero con la menor resistencia frente a la carga última con los demás resultados, se pudo apreciar un aumento en la capacidad de resistencia en los distintos arcos analizados. El arco de acero de sección 'I' con alma plana logró soportar una carga última de valor $2,40E+06$ N, siendo de este modo el arco con menor resistencia.

- El arco de acero de sección 'I' con alma plana y 6 rigidizadores, posee una resistencia 12,5% mayor.
- El arco de acero de sección 'I' con alma plana y 12 rigidizadores, posee una resistencia 43,75% mayor.
- El arco de acero de sección 'I' con alma corrugada triangular, posee una resistencia 74,17% mayor.
- El arco de acero de sección 'I' con alma corrugada trapezoidal, posee una resistencia 84,17% mayor.
- El arco de acero de sección 'I' con alma corrugada rectangular, posee una resistencia 93,75% mayor.

Por otro lado, en el presente trabajo se considera el parámetro de 'rigidez inicial'.

El parámetro de 'rigidez inicial' mide la capacidad de resistencia del arco a deformaciones pequeñas y puede afectar a su comportamiento no lineal bajo cargas más elevadas. Los resultados obtenidos muestran que el arco de sección 'I' con alma corrugada rectangular tiene una rigidez inicial mayor que el resto de las secciones, lo que puede explicar en parte su alta resistencia frente a cargas elevadas.

En un estudio comparativo de cargas últimas, es importante tener en cuenta la rigidez inicial de los arcos de acero debido a que esto afecta la capacidad del arco para resistir cargas de diseño.

$$\text{Rigidez inicial} = \frac{\frac{\text{Carga de pandeo}}{10}}{\delta \text{ equivalente a dicha carga}}$$

Por último, es necesario tener en cuenta el incremento de peso por unidad de longitud (%) para hablar de un aumento en la resistencia.

Al comparar el arco de acero de sección 'I' con alma plana, el cual obtuvo el menor peso total por unidad de longitud, con los demás resultados, se obtuvieron los siguientes resultados:

- El arco de acero de sección 'I' con alma plana y 6 rigidizadores, obtuvo incremento de peso total por unidad de longitud de 4,2403 %.

- El arco de acero de sección 'I' con alma plana y 12 rigidizadores, obtuvo incremento de peso total por unidad de longitud de 8,3111 %.
- El arco de acero de sección 'I' con alma corrugada triangular, obtuvo incremento de peso total por unidad de longitud de 13,8176 %.
- El arco de acero de sección 'I' con alma corrugada trapezoidal, obtuvo incremento de peso total por unidad de longitud de 24,0267 %.
- El arco de acero de sección 'I' con alma corrugada rectangular, obtuvo incremento de peso total por unidad de longitud de 33,3292 %.

En conclusión, los resultados obtenidos en este trabajo sugieren lo siguiente:

En primer lugar, los arcos de acero no arriostrados con almas planas que poseen rigidizadores transversales son más resistentes al pandeo lateral que el arco de acero con alma plana. Esa mejora se consigue aumentando el peso en torno a un 6 %.

Por último, los arcos de acero no arriostrados con almas corrugadas son más resistentes al pandeo lateral que el arco de acero con alma plana. Esa mejora se consigue aumentando el peso en torno a un 25 %.

Además, se recomienda continuar investigando la resistencia a pandeo lateral en arcos de acero no arriostrados con diferentes morfologías de sección 'I', especialmente en arcos con almas corrugadas, ya que los resultados obtenidos en este trabajo sugieren que estos perfiles pueden ser más resistentes que otros perfiles estudiados.

5. BIBLIOGRAFÍA.

- [1] L. M. Gómez García, «El arco como elemento estructural,» 14 Marzo 2016. [En línea]. Available: <http://iycblogluismi.blogspot.com/2016/03/el-arco-como-elemento-estructural.html>. [Último acceso: Octubre 2022].
- [2] I. Hinoja Sánchez-Barbudo, «Tesis Doctoral: Pandeo lateral de estructuras metálicas en arco,» Julio 2009. [En línea]. Available: https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/15384/Q_Tesis_HIN.pdf?sequence=1. [Último acceso: Octubre 2022].
- [3] D. Español de Ingeniería, «Real Academia de Ingeniería,» [En línea]. Available: <https://diccionario.raing.es/es/lema/arco-atirantado>. [Último acceso: Noviembre 2022].
- [4] G. Cipsa, «La cimentación y tipos de cimentaciones,» [En línea]. Available: <https://www.cipsa.com.mx/38/noticias/la-cimentacion-y-tipos-de-cimentaciones/>. [Último acceso: Noviembre 2022].
- [5] «Glosario ilustrado de arte arquitectónico,» [En línea]. Available: <https://www.glosarioarquitectonico.com/glossary/luz/#:~:text=Anchura%20de%20un%20arco%2C%20esto,altura%20de%20las%20dovelas%20centrales..> [Último acceso: Noviembre 2022].
- [6] Significados, «Significado de Tipología,» 2013. [En línea]. Available: <https://www.significados.com/tipologia/>. [Último acceso: Noviembre 2022].
- [7] F. J. Pacheco Toledano, «Comportamiento a pandeo de puentes arco,» 2016. [En línea]. Available: <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/90880/fichero/Trabajo+Fin+de+Grado.pdf>. [Último acceso: Noviembre 2022].
- [8] Serna.M.A, López.C, Díez.R y Ibañez.J.R, «Buckling analysis of circular arches with trapezoidal corrugated web,» Santander.
- [9] E. Libre, «Pandeo,» 2018. [En línea]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/Pandeo>. [Último acceso: Noviembre 2022].

- [10] E. Libre, «Ansys,» 2017. [En línea]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/ANSYS>. [Último acceso: Noviembre 2022].
- [11] P. V. Universidad, «Diseño Mecánico mediante elementos finitos: Guía docente,» [En línea]. Available: https://ocw.ehu.eus/pluginfile.php/52294/mod_resource/content/1/GU%C3%8DA%20DOCENTE.pdf. [Último acceso: Noviembre 2022].
- [12] Autodesk, «Cómo realizar un estudio de convergencia de malla,» Mayo 2015. [En línea]. Available: <https://knowledge.autodesk.com/es/search-result/caas/sfdcarticles/sfdcarticles/ESP/How-to-Perform-a-Mesh-Convergence-Study.html>. [Último acceso: Diciembre 2022].
- [13] Icemm, «Modelos de elementos finitos - Definición del tamaño de malla en análisis estructurales,» Junio 2021. [En línea]. Available: <https://www.icemm.com/modelos-de-elementos-finitos-definicion-del-tamano-de-malla-en-analisis-estructurales/>. [Último acceso: Diciembre 2022].
- [14] R. A. Maldonado tapia, «Sensibilidad y seguridad de estructuras en régimen no lineal,» Febrero 2012. [En línea]. Available: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/14777/TFM%20-%20Ronnie%20Antonio%20Maldonado%20Tapia.pdf>. [Último acceso: Noviembre 2022].