



BENEMÉRITA **U**NIVERSIDAD **A**UTÓNOMA DE **P**UEBLA

FACULTAD DE INGENIERÍA
COLEGIO DE INGENIERÍA MECÁNICA Y
ELÉCTRICA

**“Simulaciones por el Método de los
Elementos Finitos en Software Libre de
modelos elasto-plásticos de los
materiales”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
**LICENCIATURA EN
INGENIERÍA MECÁNICA Y
ELÉCTRICA**

PRESENTA:

Héctor Hernández Ceballos

ASESOR:

Dr. Filiberto Candia García

CODIRECTORES:

Roberto Carlos Ambrosio Lázaro

10/2025

M. I. Angel Cecilio Guerrero Zamora
Director de la Facultad de Ingeniería
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Presente.

El que suscribe: Dr. Filiberto Candia García, director del tema de tesis:

“SIMULACIONES POR EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS EN SOFTWARE LIBRE DE MODELOS ELASTO-PLÁSTICOS DE LOS MATERIALES”

Presentada por el C. Héctor Hernández Ceballos -201910340-, pasante del Colegio de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, y en atención al oficio No. SAC/1413/2025 con fecha de emisión 17 de septiembre de 2025, me permito informar a Usted que después de haber revisado cuidadosamente el contenido temático, metodología, redacción y ortografía de la tesis correspondiente, no tengo inconveniente en autorizar la impresión del mismo.

Sin otro particular, le reitero la seguridad de mi más atenta y distinguida consideración.

Atentamente
“Pensar bien, para vivir mejor”
H. Puebla de Z. a 19 de septiembre de 2025


Dr. Filiberto Candia García
Director de Tema

D'FCG/BARV
C.c.p. Archivo



Oficio No. SAC/1413/2025

**C. Héctor Hernández Ceballos -201910340-
Pasante de la carrera de ingeniería Mecánica y Eléctrica
Presente.**

En atención al Tema de Tesis que puso Usted a consideración de la Coordinación de Área y de esta Secretaría Académica en coordinación con la Dirección de ésta Facultad de Ingeniería, dentro del marco de Titulación por Examen Profesional, como medio de Titulación se dio revisión y se ha autorizado el tema denominado:

“SIMULACIONES POR EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS EN SOFTWARE LIBRE DE MODELOS ELASTO-PLÁSTICOS DE LOS MATERIALES”

Por lo anterior hacemos de su conocimiento que se asigna como director de tema al Dr. Filiberto Candia García y como Codirector Dr. Roberto Carlos Ambrosio Lázaro.

Sin más por el momento, le envío la seguridad de mi consideración más distinguida.

Atentamente
“Pensar bien, para vivir mejor”
H. Puebla de Z. a 17 de septiembre de 2025

M. I. Angel Cecilio Guerrero Zambora
Director



M'ACGZ/M'VGL/barv
C.c.p. Interesado
C.c.p. Archivo

Facultad
de Ingeniería

Bld. Valsequillo y Av. San Claudio
s/n, edif. ING - 4, Col. San Manuel,
Ciudad Universitaria,
Puebla, Pue. C.P. 72570
222 229 55 00 Ext. 7610

A mis padres, mis abuelos y mi familia, por su amor, apoyo incondicional y aliento constante durante esta etapa.

Al cuerpo académico de la facultad, a mi director de tesis, por compartir sus conocimientos y orientarme a lo largo de mi formación.

Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo validar el uso del software de código libre Salome Meca como una alternativa viable para la enseñanza y el aprendizaje del Método de Elemento Finito en el ámbito universitario. A través de diversas simulaciones, se analizaron modelos sometidos a condiciones de carga y geometrías representativas, con el fin de evaluar la precisión, estabilidad y facilidad de implementación del programa. Los resultados obtenidos muestran que Salome Meca ofrece un desempeño confiable y comparable con el de herramientas comerciales de mayor costo, lo que lo convierte en una opción accesible para su integración en el aula.

Además, el estudio demuestra que la incorporación de este software en la formación académica puede mejorar la comprensión de fenómenos mecánicos complejos, optimizar el proceso de enseñanza-aprendizaje y servir como base para proyectos de investigación, reforzando su posición como una herramienta estratégica en la educación superior para ingenierías.

Tabla de Contenido

Capitulo I. Protocolo de investigación.....	1
Antecedentes.....	1
Problemática.....	1
Objetivos.....	1
Hipótesis.....	2
Capitulo II. Marco de Referencia.....	2
Marco conceptual.....	2
Caracterización estática de los materiales.....	2
Tensor de Tensiones (σ).....	2
Deformaciones (ϵ).....	2
Obtención de la matriz de rigidez elemental.....	3
La caracterización.....	6
La estática.....	6
Correlación entre estática y caracterización.....	7
El esfuerzo.....	7
La deformación.....	8
Los Materiales.....	8
Matriz de rigidez para un material isotrópico.....	11
Matriz de rigidez para un material anisotrópico.....	12
Matriz de rigidez para un material Ortotrópico.....	14
Relación entre tensiones y deformaciones.....	16
Matriz de rigidez para materiales monoclinicos.....	16
La prueba de tensión.....	17
La curva Esfuerzo-Deformación.....	18
Capitulo III. Marco Metodológico.....	20
Diseño de investigación.....	20
Tipo de investigación.....	20
Alcance.....	21
Método.....	21
.....	23

Capitulo IV. Desarrollo Tecnológico y científico.....	24
Capitulo V. Análisis y validación de resultados.....	33
Modelo elastoplástico mediante curva de comportamiento no lineal.....	33
Modelo elastoplástico mediante endurecimiento.....	36
Modelo elastoplástico.....	38
Modelo elástico lineal.....	40
Impacto social.....	42
Impacto tecnológico.....	42
Impacto económico y productivo.....	42
Conclusiones.....	44
Bibliografía.....	45
Anexos.....	46

Tabla de Imágenes

Imagen 1. Forma general del tensor de tensiones.....	2
Imagen 2. Tensor de segundo orden para deformaciones	3
Imagen 3. Representación gráfica de las componentes del tensor tensión en una base ortogonal.	3
Imagen 4. Forma general de la Ley de Hooke.....	3
Imagen 5. Matriz general de rigidez.....	4
Imagen 6. Matriz de rigidez reducida a 54 constantes.....	4
Imagen 7. Propiedades de los aceros.....	9
Imagen 8. Matriz de rigidez para un elemento isotrópico.....	11
Imagen 9. Matriz de rigidez para un elemento anisotrópico.....	12
Imagen 10. Matriz de rigidez para un elemento ortotrópico	14
Imagen 11. Matriz de relación para tensión y deformación.....	16
Imagen 12. Matriz de rigidez para un elemento monoclinico	16
Imagen 13. Síntesis de los tipos de materiales.....	17
Imagen 14. Procedimiento de análisis comparativo de modelos elasto-plásticos.	23
Imagen 15. Sub-procedimiento para determinar las gráficas de los modelos elasto-plásticos.	23

Tabla de Gráficas

Gráfica 1. Esfuerzo vs Deformación.....	18
Gráfica 1. Esfuerzo vs Deformación.....	18
Gráfica 2. Esfuerzo vs Deformación para el primer modelo simulado	27
Gráfica 3. Esfuerzo vs Deformación para el segundo modelo simulado	29
Gráfica 4. Esfuerzo vs Deformación para el tercer modelo simulado	31
Gráfica 5. Esfuerzo vs Deformación para el cuarto modelo simulado	32

Tabla de Tablas

Tabla 1. Comparativa de las propiedades de los materiales	10
-----------------------------------------------------------------	----

Capítulo I. Protocolo de investigación

Antecedentes

El análisis de materiales es crucial en el diseño mecánico, ya que permite evaluar su capacidad para soportar cargas mediante curvas esfuerzo-deformación. Las simulaciones estructurales no lineales basadas en el Método de los Elementos Finitos (MEF) han ganado relevancia académica al permitir modelar con precisión materiales elasto-plásticos. Sin embargo, el uso de software libre, como Salome Meca, sigue siendo limitado en las instituciones de educación superior (IES).

El Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 9 de la Agenda 2030 resalta la importancia de la innovación tecnológica y la infraestructura sostenible, aspectos que pueden potenciarse al incorporar estas herramientas en la enseñanza y la investigación.

El uso de software libre como Salome Meca en las IES permite realizar análisis precisos y accesibles, favoreciendo la formación de ingenieros con competencias en simulaciones asistidas por computadora. Esta estrategia no solo generaliza el acceso a herramientas tecnológicas, sino que también contribuye al cumplimiento del ODS 9 al fomentar la innovación y el desarrollo sostenible.

Problemática

En las Instituciones de Educación Superior (IES), la falta de adopción de software libre para análisis estructurales limita significativamente la formación de los estudiantes en simulaciones avanzadas. Esta situación no solo reduce el acceso a tecnologías modernas y accesibles, sino que también restringe la capacidad de los alumnos para explorar diversas herramientas que fomenten la innovación en sus proyectos académicos. Al depender exclusivamente de software propietario, se disminuyen las oportunidades de aprendizaje práctico y flexible, afectando el desarrollo de habilidades clave en el uso de metodologías avanzadas, como el análisis no lineal. Esto puede traducirse en una menor competitividad profesional y una limitada capacidad para enfrentar desafíos técnicos complejos en su futura carrera.

Objetivos

Validar el uso de software libre, como Salome Meca, en las Instituciones de Educación Superior (IES) para ampliar el acceso a los estudiantes hacia plataformas que contribuyan con su formación profesional.

Aproximar los resultados de simulaciones realizadas Salome Meca, software libre, a datos obtenidos mediante pruebas experimentales, para así validar su uso en IES.

Hipótesis

El uso de software libre, como Salome Meca, en las Instituciones de Educación Superior (IES) permitirá ampliar el acceso de los estudiantes a herramientas de simulación y análisis, favoreciendo su formación profesional al brindarles experiencias prácticas comparables a las obtenidas con software propietario, sin incurrir en costos adicionales para las instituciones o los alumnos.

Capítulo II. Marco de Referencia

Marco conceptual

Caracterización estática de los materiales

El diseño mecánico requiere un profundo conocimiento de los materiales empleados, lo cual se logra principalmente a través de la práctica experimental. Entre los diversos métodos para estudiar las propiedades de los materiales, el ensayo de tracción se destaca como el más importante y utilizado, para posteriormente procesar los datos de salida y poder construir una curva de esfuerzo y deformación.

Tensor de Tensiones (7)

El tensor de tensiones es una representación matemática que describe las tensiones en un punto de un material. En tres dimensiones, es un tensor de segundo orden, representado por una matriz 3×3.

La forma general del tensor de tensiones es:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}$$

Imagen 1. Forma general del tensor de tensiones

Los elementos diagonales ($\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$) representan las tensiones normales, mientras que los elementos fuera de la diagonal ($\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$) representan las tensiones de corte.

Deformaciones (7)

Las deformaciones describen los cambios relativos en la forma o tamaño de un material. En 3D, también se representan mediante un tensor de segundo orden.

$$\epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & \gamma_{xy}/2 & \gamma_{xz}/2 \\ \gamma_{xy}/2 & \epsilon_{yy} & \gamma_{yz}/2 \\ \gamma_{xz}/2 & \gamma_{yz}/2 & \epsilon_{zz} \end{bmatrix}$$

Imagen 2. Tensor de segundo orden para deformaciones

Los elementos diagonales (ϵ_{xx} , ϵ_{yy} , ϵ_{zz}) representan las deformaciones normales, mientras que los elementos fuera de la diagonal (γ_{xy} , γ_{yz} , γ_{xz}) representan las deformaciones por corte.

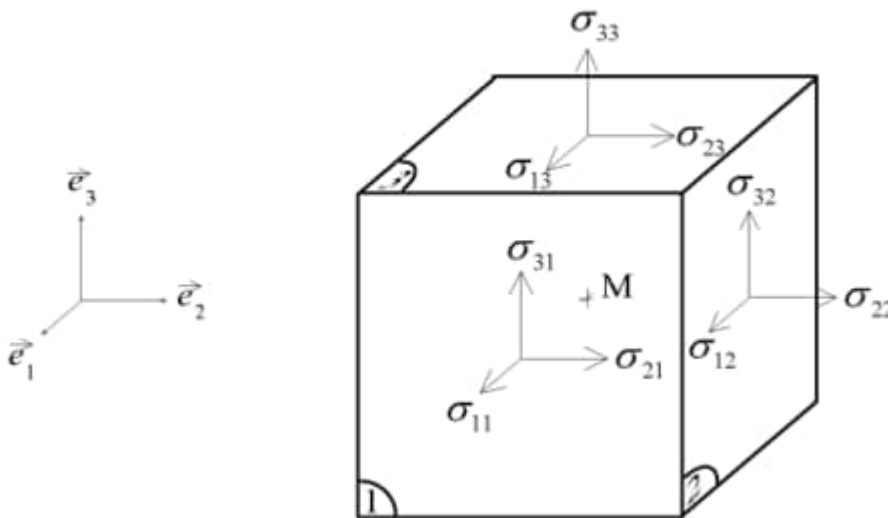


Imagen 3. Representación gráfica de las componentes del tensor tensión en una base ortogonal.

Obtención de la matriz de rigidez elemental

La Ley de Hook dice que cada uno de los componentes de esfuerzo en un punto es una función lineal de los componentes de estado de la deformación en el punto; matemáticamente se puede expresar como:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \epsilon_{kl}$$

Imagen 4. Forma general de la Ley de Hooke

Donde C_{klmn} son constantes elásticas, hay 81 constantes que corresponden a los índices i, j, k, l . Que toman valores iguales a 1, 2 y 3. C_{klmn} relacionan el esfuerzo en las direcciones de i, j con la deformación en las direcciones de k, l .

En general la matriz de rigidez consta de 81 constantes independientes, y la forma general de la matriz de rigidez para el tensor esfuerzo – deformación será:

$$\begin{bmatrix} P_{11} \\ P_{12} \\ P_{13} \\ P_{21} \\ P_{22} \\ P_{23} \\ P_{31} \\ P_{32} \\ P_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{1111} & c_{1112} & c_{1113} & c_{1121} & c_{1122} & c_{1123} & c_{1131} & c_{1132} & c_{1133} \\ c_{1211} & c_{1212} & c_{1213} & c_{1221} & c_{1222} & c_{1223} & c_{1231} & c_{1232} & c_{1233} \\ c_{1311} & c_{1312} & c_{1313} & c_{1321} & c_{1322} & c_{1323} & c_{1331} & c_{1332} & c_{1333} \\ c_{2111} & c_{2112} & c_{2113} & c_{2121} & c_{2122} & c_{2123} & c_{2131} & c_{2132} & c_{2133} \\ c_{2211} & c_{2212} & c_{2213} & c_{2221} & c_{2222} & c_{2223} & c_{2231} & c_{2232} & c_{2233} \\ c_{2311} & c_{2312} & c_{2313} & c_{2321} & c_{2322} & c_{2323} & c_{2331} & c_{2332} & c_{2333} \\ c_{3111} & c_{3112} & c_{3113} & c_{3121} & c_{3122} & c_{3123} & c_{3131} & c_{3132} & c_{3133} \\ c_{3211} & c_{3212} & c_{3213} & c_{3221} & c_{3222} & c_{3223} & c_{3231} & c_{3232} & c_{3233} \\ c_{3311} & c_{3312} & c_{3313} & c_{3321} & c_{3322} & c_{3323} & c_{3331} & c_{3332} & c_{3333} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_{11} \\ q_{12} \\ q_{13} \\ q_{21} \\ q_{22} \\ q_{23} \\ q_{31} \\ q_{32} \\ q_{33} \end{bmatrix}$$

Imagen 5. Matriz general de rigidez

Para reducir las constantes de 81 a 36, se logra dado que el tensor del esfuerzo es simétrico, entonces:

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$$

$$\sigma_{ij} = C_{ijklel} ; \sigma_{ji} = C_{ijklel}$$

Entonces:

$$C_{ijkl} = C_{klji}$$

Debido a la simetría en los tensores de esfuerzo, hay seis maneras independientes de expresar i y j juntos y todavía nueve maneras independientes de expresar k y l juntos. De este modo, con esta simetría el número de constantes elásticas independientes se reduce a $(6 \times 9) = 54$, de 81 originales.

Gracias a la simetría de los tensores de deformación, se pueden remover las últimas tres columnas de la matriz anterior, así se obtiene una nueva matriz de rigidez con dimensiones de 6×6 .

$$\begin{bmatrix} \dot{\sigma}_{11} \\ \dot{\sigma}_{22} \\ \dot{\sigma}_{33} \\ \dot{\sigma}_{12} \\ \dot{\sigma}_{23} \\ \dot{\sigma}_{13} \\ \dot{\sigma}_{21} \\ \dot{\sigma}_{32} \\ \dot{\sigma}_{31} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{1111} & C_{1122} & C_{1133} & C_{1112} & C_{1123} & C_{1113} \\ C_{2211} & C_{2222} & C_{2233} & C_{2212} & C_{2223} & C_{2213} \\ C_{3311} & C_{3322} & C_{3333} & C_{3312} & C_{3323} & C_{3313} \\ C_{1211} & C_{1222} & C_{1233} & C_{1212} & C_{1223} & C_{1213} \\ C_{2311} & C_{2322} & C_{2333} & C_{2312} & C_{2323} & C_{2313} \\ C_{1311} & C_{1322} & C_{1333} & C_{1312} & C_{1323} & C_{1313} \\ C_{2111} & C_{2122} & C_{2133} & C_{2212} & C_{2123} & C_{2213} \\ C_{3211} & C_{3222} & C_{3233} & C_{3212} & C_{3223} & C_{3213} \\ C_{3111} & C_{3122} & C_{3133} & C_{3112} & C_{3123} & C_{3113} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\epsilon}_{11} \\ \dot{\epsilon}_{22} \\ \dot{\epsilon}_{33} \\ 2\dot{\epsilon}_{12} \\ 2\dot{\epsilon}_{23} \\ 2\dot{\epsilon}_{13} \end{bmatrix}$$

Imagen 6. Matriz de rigidez reducida a 54 constantes

El Principio de los Trabajos Virtuales (PTV) dice que el "Trabajo virtual externo" será igual que el "Trabajo virtual interno". Entonces, igualando los trabajos externos e internos obtenemos:

$$\{\delta_e\}^T [P_e] + \{\delta_e\}^T \int [N_e]^T \{q_e\} dV_e + \{\delta_e\}^T \int [N_e]^T [P_e] dS_e = \{\delta_e\}^T \int [B_c]^T [D] [B_e] \{\delta_e\} dV_e$$

Y eliminando los términos de $\{\delta_e\}^T$ resulta:

$$[P_e] + \int [N_e]^T \{q_e\} dV_e + \int [N_e]^T [P_e] dS_e = \int [B_c]^T [D] [B_e] dV_e \{\delta_e\}$$

Fuerzas en nodos
Fuerzas de superficie trasladadas a nodos
Fuerzas de volumen trasladadas a nodos
Matriz de rigidez del elemento
Desplazamientos en los nodos

$$\{F_e\} = [k_e]\{\delta_e\}$$

Que es la ecuación matricial de equilibrio del elemento.

Una vez obtenidas las matrices de rigidez elementales y trasladadas las fuerzas a los nodos se trabaja del mismo modo que en un cálculo matricial de estructuras:

- a. Se han de pasar las matrices de los elementos y los vectores de fuerzas o desplazamientos a coordenadas globales y se usa la matriz de rotación [R] para las submatrices de la matriz de rigidez.

$$[R] = \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\text{sen}\alpha \\ \text{sen}\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix}$$

- b. Se debe ensamblar la matriz de rigidez global [K0] uniendo las diferentes matrices elementales.
- c. Se resuelve el sistema de ecuaciones resultante.

Resumen del método

1. Discretizar la estructura en elementos.
2. Obtener la matriz de funciones de forma [Nt]
 - a. Funciones que tienen valor 1 en el nodo correspondiente y 0 en el resto.
3. Identificar las condiciones de:

- a. Compatibilidad $[\delta]$, que relacionan deformaciones y desplazamientos de los elementos.
 - b. Comportamiento $[D]$, que relacionan tensiones y deformaciones. Ley de Hook en casos elásticos.
4. Obtener la llamada Matriz de deformación del elemento $[Bt]$.
 5. Obtener la Matriz de rigidez del elemento $[Kt]$.
 6. Pasar las Matrices de rigidez elementales a coordenadas globales si es necesario.
 7. Ensamblar la matriz de rigidez de toda la estructura.
 8. Obtener el vector de Fuerzas $\{Ft\}$ a través de las fuerzas en los nodos equivalentes a las cargas distribuidas en volumen qt o de superficie pt . Considerando los diferentes vectores de fuerzas elementales se obtiene el global $\{F0\}$.
 9. Resolver la ecuación matricial para obtener los desplazamientos de los nodos y las reacciones.

La caracterización

En el contexto de la ciencia de materiales, la caracterización se refiere a la evaluación de las propiedades físicas, químicas, mecánicas y estructurales de un material. Esto es crucial para determinar cómo se comportará el material bajo diferentes condiciones y cómo puede ser optimizado para aplicaciones específicas.

La estática

La estática es una rama de la mecánica que se encarga del análisis de las fuerzas y momentos en sistemas que se encuentran en equilibrio estático. Este equilibrio implica que los cuerpos bajo estudio permanecen en reposo o se mueven con velocidad constante. La condición fundamental para el equilibrio estático establece que la resultante vectorial de todas las fuerzas aplicadas sobre el cuerpo debe ser nula, así como la suma de los momentos de fuerza alrededor de cualquier punto. (Ecuaciones 1, 2)

$$\sum F = 0; \sum M = 0$$

Correlación entre estática y caracterización

La estática y la caracterización de materiales están estrechamente interrelacionadas en el campo de la ingeniería y la ciencia de materiales. Su relación puede ser vista en algunos aspectos tales como:

1. Determinación de propiedades mecánicas
2. Análisis de fallo

Referente a la determinación de las propiedades mecánicas, la caracterización del material proporciona datos cruciales como el módulo de elasticidad (E), el coeficiente de Poisson y la resistencia a la tracción.

Así mismo dentro de un análisis de fallo, cuando una estructura colapsa, el análisis estático ayuda a entender cómo se distribuyeron las fuerzas y dónde ocurrió el fallo. La caracterización de los materiales involucrados puede revelar debilidades, como defectos microestructurales o propiedades mecánicas inadecuadas.

El esfuerzo

El esfuerzo es una magnitud fundamental que describe la intensidad de las fuerzas internas que actúan dentro de un material cuando se le aplican cargas externas. El esfuerzo se define como la fuerza aplicada sobre una unidad de área y se expresa comúnmente en pascuales (Pa) o en megapascuales (MPa) en el Sistema Internacional de Unidades (SI).

Matemáticamente, el esfuerzo (σ) se expresa como:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Donde F es la fuerza aplicada (en newtons, N). A es el área sobre la cual se distribuye la fuerza (en metros cuadrados, m^2)

El esfuerzo puede clasificarse en varias categorías, dependiendo de la dirección de la fuerza aplicada en relación con la superficie considerada:

- Esfuerzo normal: Se desarrolla perpendicularmente a la superficie.
 - Esfuerzo de tracción (tensión): Alarga el material.
 - Esfuerzo de compresión: Acorta el material.
- Esfuerzo cortante: Actúa tangencialmente a la superficie.

La deformación

La deformación describe el cambio en la forma o las dimensiones de un material bajo la acción de fuerzas externas. Se define como la medida de la alteración en la forma o tamaño de un material en respuesta a la aplicación de esfuerzos. Puede ser un cambio en la longitud, el volumen o la forma, y se expresa generalmente como una fracción o porcentaje del tamaño original. Matemáticamente, la deformación (ε) se define como:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

Donde ΔL es el cambio en la longitud y L_0 es la longitud original.

La deformación se clasifica en varios tipos según la naturaleza del esfuerzo y la respuesta del material:

1. Deformación Elástica:
 - a. Es reversible, es decir, el material recupera su forma original al eliminarse la carga y sigue a la Ley de Hooke en el rango elástico, donde la deformación es proporcional al esfuerzo.
2. Deformación Plástica:
 - a. Es permanente; el material no recupera su forma original tras la eliminación de la carga. Ocurre cuando el esfuerzo aplicado excede el límite elástico del material, llevando a un reordenamiento permanente de la estructura interna.

Los Materiales

El acero

Un material es cualquier sustancia que tiene propiedades físicas y químicas específicas y que se utiliza para fabricar productos, estructuras o componentes. Los materiales se clasifican generalmente en varias categorías basadas en su composición y propiedades, como metales, cerámicos, polímeros, compuestos y biomateriales.

Dentro de los metales, se profundiza sobre el acero, que es una aleación principalmente de hierro con una cantidad de carbono que varía generalmente entre el 0.02% y el 2.14% en peso, y puede contener otros elementos como manganeso, cromo y níquel para mejorar ciertas propiedades. Tiene alta resistencia a la tracción, buena ductilidad, y es altamente conductivo térmica y eléctricamente. Sin embargo, puede corroerse en ambientes húmedos y requiere protección o aleación adecuada para mejorar la resistencia a la corrosión.

Metal	Precio (UK£ (US\$) tonelada ⁻¹)	Densidad (Mg m ⁻³)	Módulo de Young (GPa)	Límite elástico (MPa)	Resistencia a tracción (MPa)	Ductilidad	Tenacidad a la fractura (MPa m ^{1/2})	Temperatura de fusión (K)	Calor específico (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	Conductividad térmica (W m ⁻¹ K ⁻¹)	Coefficiente expansión térmica (MK ⁻¹)
Hierro	100 (140)	7,9	211	50	200	0,3	80	1809	456	78	12
Acero dulce	200-230 (260-300)	7,9	210	220	430	0,21	140	1765	482	60	12
Acero alto carbono	150 (200)	7,8	210	350-1600	650-2000	0,1-0,2	20-50	1570	460	40	12
Aceros débilmente aleados	180-250 (230-330)	7,8	203	290-1600	420-2000	0,1-0,2	50-170	1750	460	40	12
Aceros aleados	1100-1400 (1400-1800)	7,8	215	170-1600	460-1700	0,1-0,5	50-170	1680	500	12-30	10-18

Imagen 7. Propiedades de los aceros

Se utiliza ampliamente en la construcción de edificios y puentes, en la fabricación de automóviles, y en la producción de herramientas y maquinaria debido a su resistencia y versatilidad.

Los cerámicos

Los materiales cerámicos son materiales inorgánicos no metálicos, constituidos por elementos metálicos y no metálicos enlazados principalmente mediante enlaces iónicos y/o covalentes. Las composiciones químicas de los materiales cerámicos varían considerablemente, desde compuestos sencillos a mezclas de muchas fases complejas enlazadas.

El ladrillo es uno de los materiales tipo cerámica o arcilla cocida más antiguo que se viene utilizando en el sector de la construcción y con propiedades como una gran resistencia a la compresión, así como el aislamiento acústico y térmico

Polímeros y materiales compuestos

Los polímeros son macromoléculas formadas por la repetición de unidades más pequeñas llamadas monómeros, que se unen mediante enlaces covalentes. Estas estructuras pueden ser lineales, ramificadas o reticuladas, dependiendo de cómo se dispongan los monómeros.

Al igual que ocurre con los metales y los cerámicos, existe un gran número de polímeros, las principales clasificaciones de polímeros son:

- Termoplásticos como el polietileno, que se reblandece con el calentamiento.
- Termoestables o resinas como el epoxi, que endurecen cuando dos componentes (una resina y un endurecedor) se calientan juntos.
- Elastómeros o gomas.
- Polímeros naturales como la celulosa, la lignina y las proteínas.

Los diferentes tipos de materiales pueden ser clasificados de acuerdo con su comportamiento direccional: isotrópicos, anisotrópicos, ortotrópicos y monoclinicos. Cada tipo de material se caracteriza por cómo sus propiedades varían con la dirección.

TIPO DE MATERIAL	DESCRIPCIÓN	EJEMPLOS	PROPIEDADES CARACTERÍSTICAS
ISOTRÓPICO	Las propiedades son uniformes en todas las direcciones.	-Metales (como el aluminio y el acero) -Vidrio -Plásticos termoplásticos	Módulo de elasticidad, coeficiente de expansión térmica, y conductividad térmica son constantes en todas las direcciones.
ANISOTRÓPICO	Las propiedades varían en función de la dirección.	-Cristales -Maderas- -Materiales compuestos (como fibra de vidrio y fibra de carbono en ciertas orientaciones)	Las propiedades mecánicas y físicas como la resistencia, la elasticidad, y la conductividad pueden ser diferentes según la dirección.
ORTOTRÓPICO	Las propiedades varían en tres direcciones mutuamente perpendiculares. Es un caso especial de anisotropía.	-Madera laminada - Fibra de carbono orientada -Placas compuestas	- Tres módulos de elasticidad, tres coeficientes de Poisson, y seis módulos de corte independientes.
MONOCLÍNICO	Las propiedades varían según dos direcciones perpendiculares y una inclinada. Es menos simétrico que el Ortotrópico.	- Algunos cristales como el yeso - Algunos compuestos poliméricos con orientación específica	- Nueve constantes elásticas independientes en la matriz de rigidez.

Tabla 1. Comparativa de las propiedades de los materiales

Matriz de rigidez para un material isotrópico

Un material isotrópico tiene la propiedad de que sus características elásticas son independientes de la dirección. Esto simplifica significativamente el análisis de tensiones y deformaciones, ya que se pueden describir completamente con solo dos parámetros elásticos: el módulo de Young (E) y el coeficiente de Poisson (ν).

La relación entre las tensiones y las deformaciones en un material isotrópico se describe por la Ley de Hooke generalizada en 3D, que en forma matricial se puede expresar como:

$$\{\sigma\} = [C] \{\epsilon\}$$

Donde:

- σ es el vector de tensiones
- C es la matriz de rigidez del material
- ϵ es el vector de deformaciones

Estructura de la matriz de rigidez

Para un material isotrópico en 3D, la matriz de rigidez $[C]$ es una matriz simétrica de 6×6 , donde los elementos C_{ij} están definidos en términos de los parámetros elásticos E y ν como sigue:

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} \end{bmatrix}$$

Imagen 8. Matriz de rigidez para un elemento isotrópico

La matriz de rigidez se deriva al considerar las relaciones constitutivas entre las tensiones y deformaciones para un material isotrópico en el espacio tridimensional. Utilizando la Ley de Hooke generalizada, estas relaciones se pueden escribir como:

$$C_{11} = \frac{E(1 - \nu)}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}$$

$$C_{12} = \frac{E\nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}$$

$$C_{44} = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

Para un material isotrópico, los coeficientes C_{ijkl} se pueden expresar únicamente en términos de E y ν , resultando en la forma simplificada de la matriz de rigidez mostrada anteriormente.

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}\epsilon_{kl}$$

Matriz de rigidez para un material anisotrópico

Un material anisotrópico es aquel cuyas propiedades elásticas varían con la dirección de aplicación de la carga. A diferencia de los materiales ortotrópicos, que tienen tres direcciones principales con propiedades distintas, los materiales anisotrópicos pueden tener propiedades diferentes en cualquier dirección dentro del material.

Para un material anisotrópico en el caso general, la relación entre las tensiones $\{\sigma\}$ y las deformaciones $\{\epsilon\}$ se describe mediante una matriz de rigidez completamente poblada, es decir, una matriz simétrica de 6x6 con 21 constantes elásticas independientes y se representa como:

$$[\mathbf{C}] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{15} & C_{25} & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{56} \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66} \end{bmatrix}$$

Imagen 9. Matriz de rigidez para un elemento anisotrópico

Aquí, cada C_{ij} es un coeficiente de elasticidad que relaciona una componente de la tensión con una componente de la deformación.

La relación general entre las tensiones y las deformaciones en un material anisotrópico se expresa como:

$$\{\sigma\} = [C] \{\epsilon\}$$

- σ es el vector de tensiones.

$$\{\sigma\} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}$$

- C es la matriz de rigidez de 6x6.
- ϵ es el vector de deformaciones

$$\{\epsilon\} = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}$$

Para derivar la matriz de rigidez de un material anisotrópico, se utilizan las propiedades de simetría de las tensiones y las deformaciones. La matriz $[C]$ es simétrica debido a la conservación de la energía y se puede derivar a partir de la función de energía de deformación elástica.

En un material anisotrópico general, cada componente de la tensión puede depender de todas las componentes de la deformación. Esto requiere la especificación de 21 constantes elásticas independientes debido a la simetría de la matriz de rigidez (ya que es simétrica, solo la mitad más la diagonal son independientes).

Matriz de rigidez para un material Ortotrópico.

La matriz de rigidez para un material ortotrópico es más compleja que la de un material isotrópico, ya que debe considerar las propiedades distintas en las tres direcciones principales. En este contexto, la matriz de rigidez se utiliza para relacionar las tensiones y las deformaciones en el material de manera que se refleje esta variabilidad direccional.

Propiedades elásticas

- Tres módulos de Young: E_x , E_y y E_z
- Tres módulos de corte: G_{xy} , G_{yz} y G_{zx}
- Seis coeficientes de Poisson: ν_{xy} , ν_{yx} , ν_{yz} , ν_{zy} , ν_{zx} y ν_{xz}

Los coeficientes de Poisson están relacionados por la simetría, lo que implica que:

$$\frac{\nu_{xy}}{E_x} = \frac{\nu_{yx}}{E_y}, \quad \frac{\nu_{yz}}{E_y} = \frac{\nu_{zy}}{E_z}, \quad \text{y} \quad \frac{\nu_{zx}}{E_z} = \frac{\nu_{xz}}{E_x}.$$

La matriz de rigidez (\mathbf{C}) para un material ortotrópico en 3D es una matriz simétrica de 6×6 , dada por:

$$[\mathbf{C}] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix}$$

Imagen 10. Matriz de rigidez para un elemento ortotrópico

donde los elementos C_{ij} se expresan en términos de las propiedades elásticas del material:

$$C_{11} = \frac{E_x}{(1 - \nu_{xy}\nu_{yx} - \nu_{yz}\nu_{zy} - \nu_{zx}\nu_{xz} - 2\nu_{xy}\nu_{yz}\nu_{zx})}$$

$$C_{22} = \frac{E_y}{(1 - \nu_{xy}\nu_{yx} - \nu_{yz}\nu_{zy} - \nu_{zx}\nu_{xz} - 2\nu_{xy}\nu_{yz}\nu_{zx})}$$

$$C_{33} = \frac{E_z}{(1 - \nu_{xy}\nu_{yx} - \nu_{yz}\nu_{zy} - \nu_{zx}\nu_{xz} - 2\nu_{xy}\nu_{yz}\nu_{zx})}$$

$$C_{12} = \frac{\nu_{yx}E_x}{(1 - \nu_{xy}\nu_{yx} - \nu_{yz}\nu_{zy} - \nu_{zx}\nu_{xz} - 2\nu_{xy}\nu_{yz}\nu_{zx})}$$

$$C_{13} = \frac{\nu_{zx}E_x}{(1 - \nu_{xy}\nu_{yx} - \nu_{yz}\nu_{zy} - \nu_{zx}\nu_{xz} - 2\nu_{xy}\nu_{yz}\nu_{zx})}$$

$$C_{23} = \frac{\nu_{zy}E_y}{(1 - \nu_{xy}\nu_{yx} - \nu_{yz}\nu_{zy} - \nu_{zx}\nu_{xz} - 2\nu_{xy}\nu_{yz}\nu_{zx})}$$

$$C_{44} = G_{yz}$$

$$C_{55} = G_{zx}$$

$$C_{66} = G_{xy}$$

Relación entre tensiones y deformaciones

La relación general entre las tensiones (σ) y las deformaciones (ϵ) para un material ortotrópico se puede expresar como:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}$$

Imagen 11. Matriz de relación para tensión y deformación

Matriz de rigidez para materiales monoclinicos

Los materiales monoclinicos se definen por tener una simetría que les permite tener planos de elasticidad únicos a lo largo de dos direcciones, mientras que la tercera dirección es diferente. Este tipo de material se encuentra en ciertas estructuras cristalinas y compuestos, donde las propiedades mecánicas varían según la orientación respecto al eje de simetría.

Para un material monoclinico, la matriz de rigidez se simplifica respecto a la de un material anisotrópico general, pero aún es más compleja que la de un material ortotrópico. La matriz de rigidez en el caso monoclinico se puede expresar de la siguiente forma:

$$[\mathbf{C}] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & C_{36} \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & C_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{45} & C_{55} & 0 \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix}$$

Imagen 12. Matriz de rigidez para un elemento monoclinico

En esta matriz, se observan las siguientes características:

- Los elementos fuera de la diagonal relacionados con la deformación por corte σ_{xy}, σ_{yz} , y σ_{zx} están en cero debido a la simetría monoclinica.

- Hay algunas interacciones adicionales específicas entre las componentes de tensión normal y de corte en la dirección z.

La simetría monoclinica permite que se reduzca el número de constantes elásticas independientes a 13, en lugar de las 21 requeridas para un material anisotrópico completamente general. Esto se debe a que ciertas simetrías en el material imponen restricciones en las relaciones de elasticidad, reduciendo así la complejidad de la matriz de rigidez.

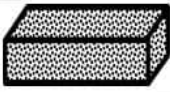
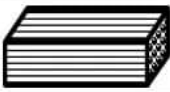
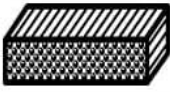
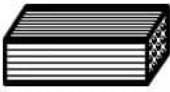
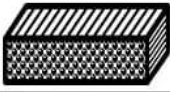
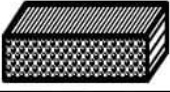
Tipo de material	Módulos elásticos	Orientación de la muestra		Módulo elástico determinado por IET usando Sonelastic®
Isotrópico	E, G, ν	-		E, G, ν
Transversalmente isotrópico	$E_1, E_2 = E_3,$ $G_{12} = G_{13}, G_{23},$ $\nu_{12} = \nu_{13}, \nu_{23}$	1		$E_1, G_{12} = G_{13}$
		2 o 3		$E_2, G_{\text{eff}} (G_{12}, G_{23})$
Ortotrópico	$E_1, E_2, E_3,$ $G_{12}, G_{13}, G_{23},$ $\nu_{12}, \nu_{21},$ $\nu_{13}, \nu_{31},$ ν_{23}, ν_{32}	1		$E_1, G_{\text{eff}} (G_{12}, G_{13})$
		2		$E_2, G_{\text{eff}} (G_{12}, G_{23})$
		3		$E_3, G_{\text{eff}} (G_{13}, G_{23})$

Imagen 13. Síntesis de los tipos de materiales

La prueba de tensión

Una prueba destructiva de tensión es un método experimental crucial en la caracterización de materiales, que evalúa la resistencia y ductilidad de un material bajo una carga axial aplicada.

El objetivo principal de una prueba de tensión es medir la capacidad del material para soportar fuerzas de tracción y determinar varias propiedades mecánicas clave, tales como:

- Resistencia a la tracción máxima (σ_u): La máxima tensión que el material puede soportar antes de fracturarse.

Validación de software libre para simulaciones por elemento finito

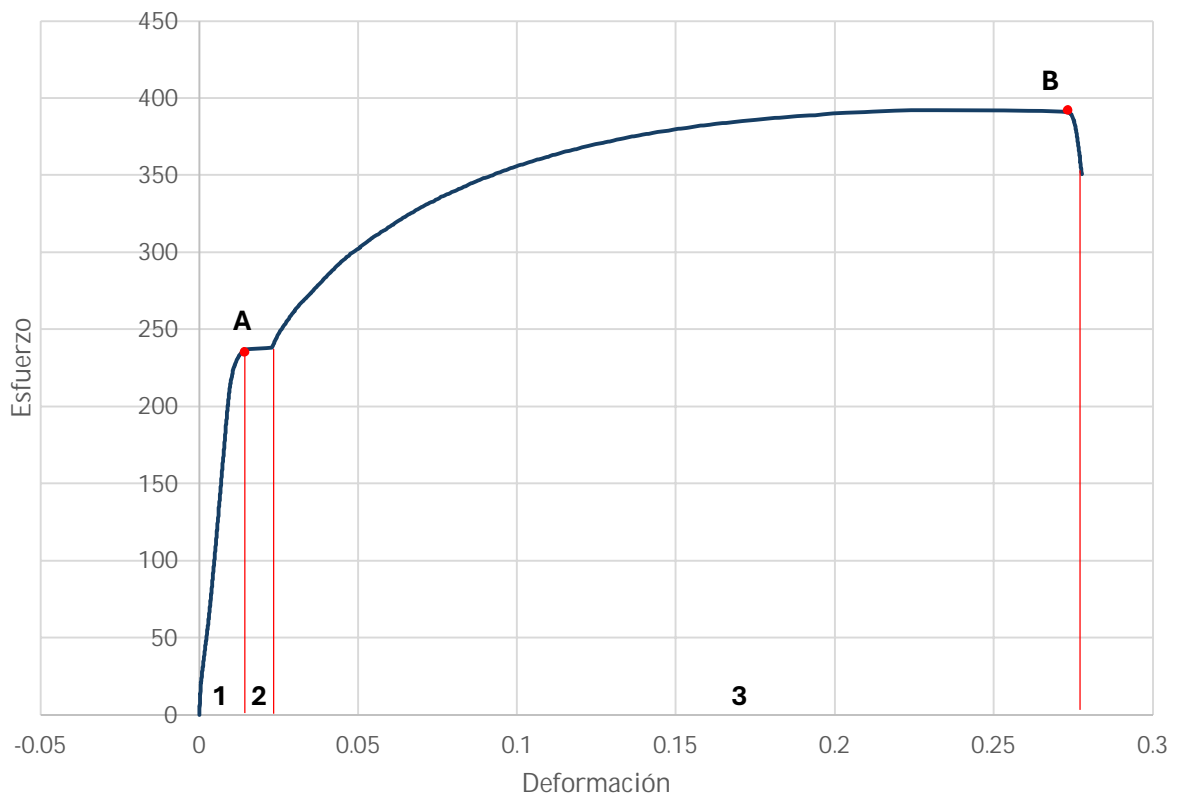
- Límite elástico (σ_y): El máximo esfuerzo que el material puede soportar sin deformarse permanentemente.
- Módulo de elasticidad (E): Una medida de la rigidez del material en la región elástica.
- Alargamiento a la rotura: La capacidad del material para estirarse antes de fracturarse, indicando su ductilidad.
- Curva esfuerzo-deformación: La relación entre la tensión aplicada y la deformación resultante, proporcionando una visión completa del comportamiento del material bajo carga.

La prueba de tensión produce una curva esfuerzo-deformación, que revela información crítica sobre el comportamiento del material.

La curva Esfuerzo-Deformación

Con los datos obtenidos en la prueba experimental se grafica de forma que, los valores del esfuerzo se colocan en eje vertical y la deformación en el eje horizontal.

Las unidades en las que se presentan los datos de la Deformación unitaria (ϵ) y el Esfuerzo (σ) corresponden a milímetros (mm) y Mega Pascales (MPa) respectivamente.



Gráfica 1. Esfuerzo vs Deformación

Gráfica 2. Esfuerzo vs Deformación

Dentro de la gráfica se pueden identificar tres principales zonas para el objeto de estudio:

1. Zona elástica
2. Zona de fluencia
3. Zona plástica

La zona elástica es la región inicial de la curva esfuerzo-deformación en la que la relación entre el esfuerzo (σ) y la deformación (ϵ) es lineal. En esta zona, el material se comporta de acuerdo con la ley de Hooke, y cualquier deformación que se produzca es completamente reversible.

La zona de fluencia es la región de la curva esfuerzo-deformación en la que el material experimenta una deformación significativa sin un aumento considerable en el esfuerzo aplicado. Es una característica común en materiales dúctiles como el acero.

La zona plástica es la región de la curva esfuerzo-deformación en la que el material experimenta deformaciones permanentes significativas, y la relación entre esfuerzo y deformación ya no es lineal. Esta zona se caracteriza por una deformación irreversible que persiste incluso después de retirar la carga.

Así mismo, los puntos denominados A y B dentro de la gráfica, representan:

- A. Limite elástico
- B. Esfuerzo máximo

El límite elástico es el punto en la curva esfuerzo-deformación a partir del cual un material comienza a experimentar deformación plástica. Antes de este punto, cualquier deformación que se produzca es elástica, lo que significa que el material volverá a su forma original una vez que se retire la carga aplicada.

El esfuerzo máximo es la máxima tensión que un material puede soportar antes de comenzar a experimentar una deformación considerable y continua sin un incremento proporcional en la carga.

El esfuerzo último es la máxima tensión nominal registrada justo antes de la fractura del material.

Capítulo III. Marco Metodológico

Diseño de investigación

En el diseño mecánico el desarrollo de toda innovación en la industria metalmeccánica (automotriz, aeronáutica y aeroespacial), involucra temas de gestión de la calidad y atención de la agenda 2030, con prioridad en el ODS 9, que busca promover una industrialización sostenible y fomentar la innovación (ONU, 2023).

Siendo la selección de los materiales y el uso de su modelo de comportamiento elasto-plástico un recurso tecnológico de poca divulgación y aplicación en la configuración de escenarios de emulación de los procesos productivos y de fabricación, a través del empleo de softwares de simulación basados en el Método de los Elementos Finitos (MEF). Condición de alta valía al elaborar procedimientos de inspección y verificación que minimizan la variabilidad o incertidumbre dimensional en el desarrollo e innovación de nuevos productos.

Cuando se reconoce la relación entre el comportamiento de la geometría en función de los modelos teóricos elasto-plásticos de los materiales es posible configurar escenarios digitales-virtuales que emulan las inconsistencias en el ensamble de un producto completo antes de su fabricación e incrementen la efectividad de las filosofías de calidad (Enríquez, 2016), (Gutierrez, 2013).

Para llevar a cabo la investigación, es fundamental definir una metodología que permita analizar la relación entre los modelos elasto-plásticos de los materiales y su impacto en la variabilidad dimensional de los procesos productivos. Para ello, se puede emplear un enfoque cuantitativo basado en simulaciones computacionales mediante el Método de los Elementos Finitos (MEF), lo que permitirá validar escenarios digitales antes de la fabricación física.

Tipo de investigación

La presente investigación se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo, dado que se fundamenta en la recolección y análisis de datos numéricos para validar el uso de software libre de simulación y análisis por el Método de los Elementos Finitos (MEF) en Instituciones de Educación Superior (IES). A través de métricas objetivas, se evaluará la precisión y eficacia de estas herramientas en comparación con pruebas en laboratorio, midiendo variables como el error relativo en los resultados de simulación y la capacidad de predicción de fallas estructurales en materiales empleados en la industria metalmeccánica.

Además, se recopilarán datos sobre su impacto en la formación de estudiantes, el nivel de adopción en proyectos académicos y su contribución a la transferencia tecnológica. De esta manera, el estudio busca generar evidencia empírica que respalde la

integración del software libre en la enseñanza e investigación dentro de las IES, fortaleciendo su vínculo con el sector industrial.

Alcance

El alcance de la investigación es explicativo, ya que busca no solo describir el impacto del software libre en la educación superior, sino también analizar y comprender la relación entre su implementación y la mejora en la formación de los estudiantes. Se pretende identificar cómo el uso de estas herramientas influye en la adquisición de competencias técnicas, en la optimización de metodologías de enseñanza y en la transferencia de conocimiento hacia el sector industrial.

Además, se recopilarán datos sobre su nivel de adopción en proyectos académicos y su contribución a la transferencia tecnológica, explicando los factores que favorecen o limitan su integración en el ámbito educativo. De esta manera, el estudio busca generar evidencia empírica que respalde la incorporación del software libre en la enseñanza e investigación dentro de las IES, fortaleciendo su vínculo con el sector productivo y contribuyendo a la formación de profesionales con mayor preparación en simulación y análisis estructural.

Método

El desarrollo es inductivo-experimental por simulación digital-virtual mediante software libre (open source) basado en el MEF, para usar y aplicar modelos elasto-plásticos determinados por una prueba experimental destructiva de tensión. Siguiendo el siguiente procedimiento que ilustra la secuencia y procedimiento del análisis comparativo realizado, para la configuración mediante gráficas de diferentes modelos elasto-plásticos de un mismo material.

El estudio se organiza en actividades que configuran un proceso de enseñanza-aprendizaje (figura 14), alineadas por las recomendaciones del diseño de un caso de estudio (Álvarez y Álvarez, 2018). El procedimiento de Simulación Estructural No Lineal con Software Libre incluye una investigación bibliográfica intensiva, con el propósito de: comprender de forma sistemática el avance de la simulación no lineal de elementos estructurales mediante software libre para la simulación y análisis no lineal por el MEF (figura 15).

1. Resumen del marco teórico del análisis no lineal de elementos estructurales mediante el MEF.
2. Síntesis del funcionamiento operativo y estructura de ejecución del software libre para la simulación y análisis de los modelos elasto-plásticos usados en el MEF.
3. Determinación de casos de estudio de modelos elasto-plásticos para realizar la simulación y análisis estructural no lineal en software libre.

4. Comparativa de la simulación y análisis estructural entre modelos elasto-plásticos de comportamiento no lineal mediante el uso de software libre.
5. Organización y documentación de la ejecución secuencial de las actividades sistemáticas de la simulación y análisis no lineal de elementos estructurales, mediante modelos elasto-plásticos.
6. Reporte de resultados: gráficas comparativas de modelos elasto-plásticos definidos a partir de la curva ingenieril de un material isotrópico.

En cuanto al subproceso para la determinación de las gráficas de los diversos modelos elasto-plásticos, este se define por la figura 16.

1. Determinar el tipo de material a trabajar en la simulación.
2. Determina los datos tabulados en una hoja de Excel de una prueba destructiva a tensión y se elabora su grafica como referencia.
3. Graficar los datos tabulados de la prueba experimental.
4. Seleccionar los modelos elastoplásticos representativos de la simulación no lineal usada en el software basado en el MEF.
5. Procesar secuencialmente las ecuaciones de solución analítica en el software Excel.
6. Asociar la tabulación del material con la secuencia analítica.
7. Graficar los datos tabulados del resultado analítico.
8. Comparar la gráfica inicial con la gráfica de resultados del modelo analítico.
9. Describir de manera comparativa la diferencia entre ambas curvas de las gráficas, el análisis incluye:
 - a. Descripción del problema y diagrama esquemático
 - b. Diagrama de cuerpo libre
 - c. Descripción de la solución por el método exacto
 - d. Código de procesamiento y solución por el MEF utilizando software libre
 - e. Recogida textual de resultados
10. Simular la variabilidad de los resultados de cada modelo utilizado en una tabla comparativa.

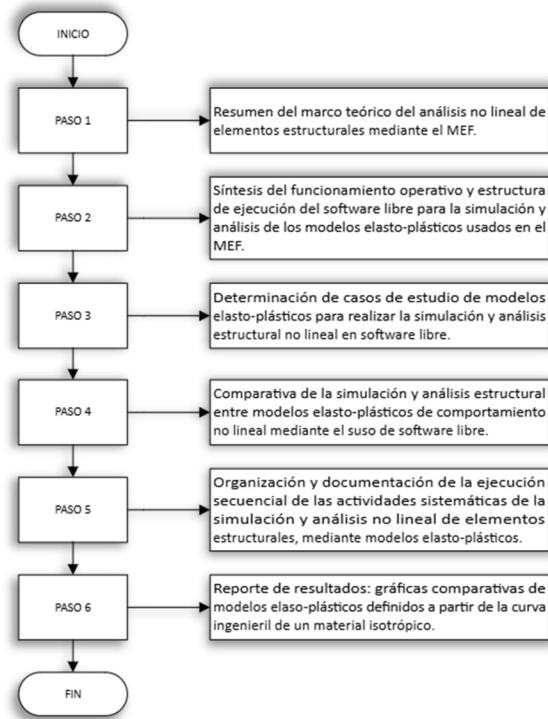


Imagen 14. Procedimiento de análisis comparativo de modelos elasto-plásticos.

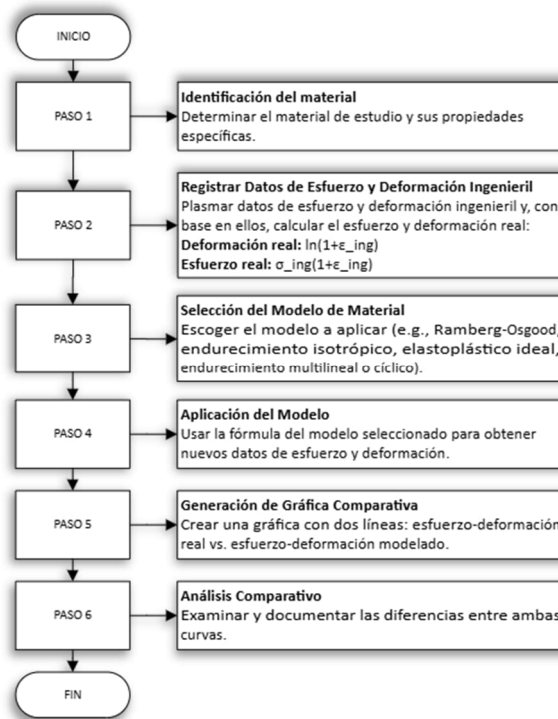


Imagen 15. Sub-procedimiento para determinar las gráficas de los modelos elasto-plásticos.

Capítulo IV. Desarrollo Tecnológico y científico

Configuración del modelo elastoplástico mediante curva de comportamiento no lineal

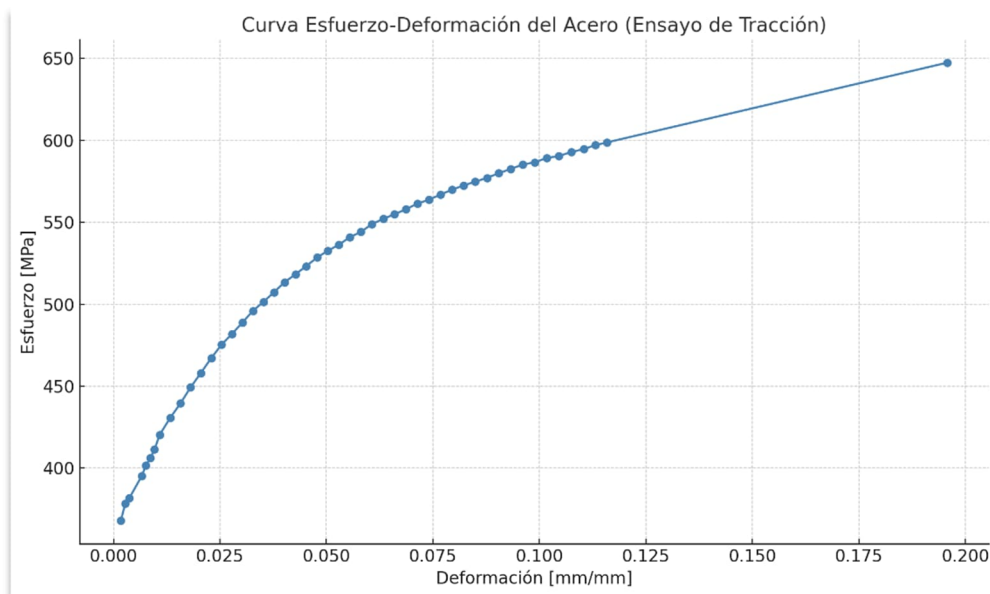
1. Definición del material:

Se seleccionó un acero como material base, estableciendo sus propiedades mecánicas fundamentales. El módulo de elasticidad fue fijado en 215 GPa, y el coeficiente de Poisson en 0.3, lo cual proporciona una base adecuada para un análisis de deformaciones en régimen elástico e inelástico.

E	215507120000.0	1.12
NU	0.3	1.12
<input checked="" type="checkbox"/> RHO	7850.0	1.12

2. Caracterización del comportamiento plástico:

Para modelar el comportamiento no lineal del material, se utilizó una curva esfuerzo-deformación obtenida experimentalmente. Esta curva permite simular con mayor precisión la transición del régimen elástico al plástico durante la aplicación de carga.



3. Tipo de ensayo simulado:

La simulación corresponde a un ensayo de tracción uniaxial, en el que la carga es aplicada de forma perpendicular a la cara superior de la probeta.



4. Aplicación de la carga:

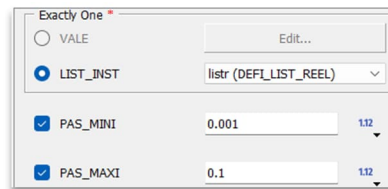
La carga fue configurada como una presión distribuida sobre la cara superior del cuerpo de prueba. Esta se aplicó de manera progresiva mediante una rampa de incremento que va de 0 a 1, con valores de normalización entre 1.0 y 0.1.

	INST	Function
1	0.0	0.0
2	1.0	1.0

	Until	Interval type	Value
1	1.0	Step length	0.1

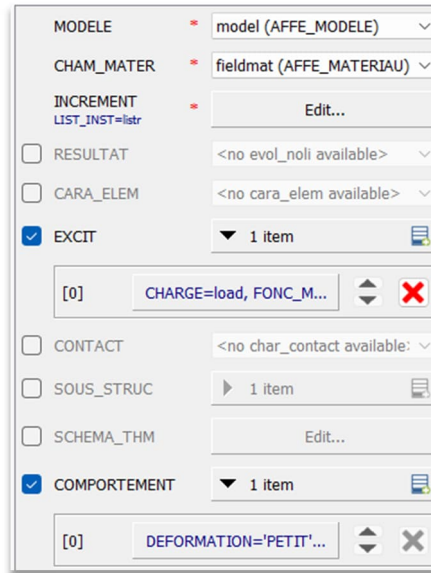
5. Control de incrementos:

Se establecieron incrementos mínimos de 0.001 y máximos de 0.1, lo cual permite un balance entre la estabilidad numérica y la eficiencia computacional del análisis.



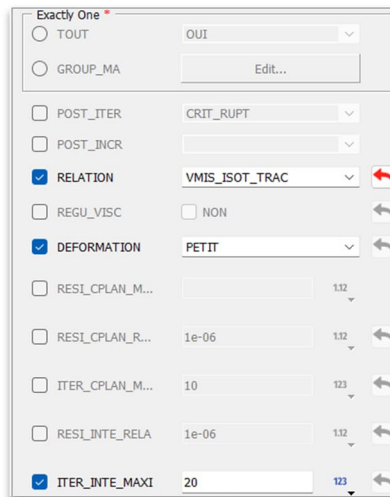
6. Tipo de análisis:

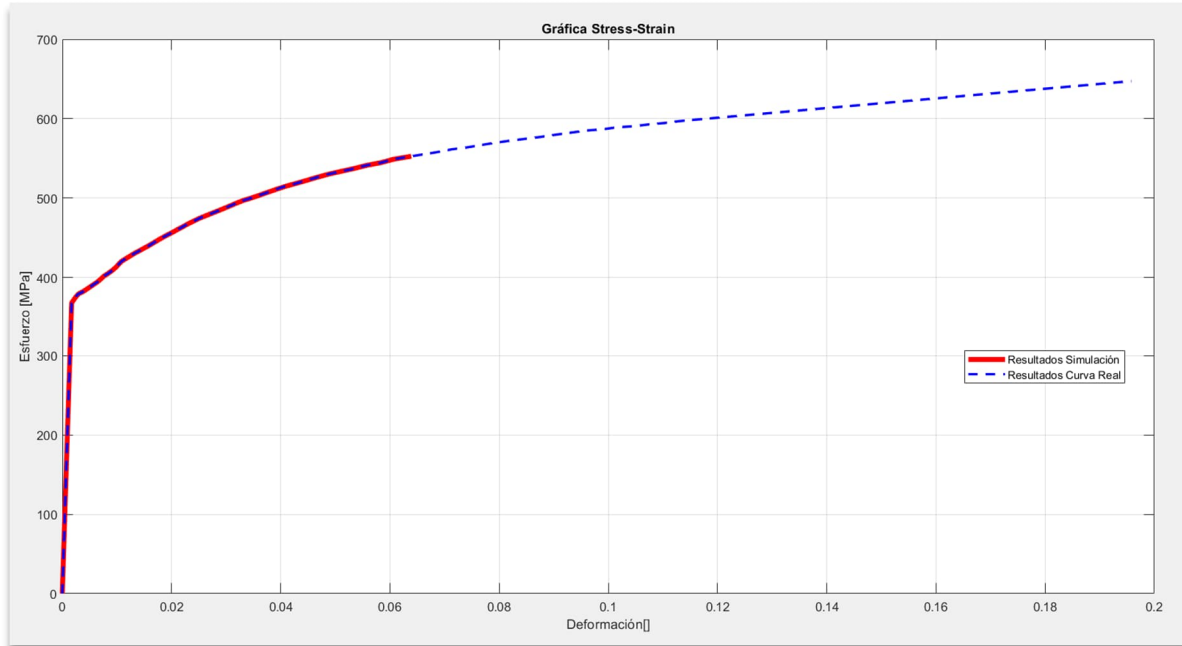
Se llevó a cabo un análisis estático no lineal, el cual considera los efectos del endurecimiento plástico y las no linealidades geométricas o del material.



7. Principio del medio continuo:

En el análisis se incluyeron todas las condiciones de excitación del modelo: las cargas aplicadas, las restricciones mecánicas (condiciones de frontera), y el comportamiento en régimen de pequeñas deformaciones, lo que permitió un modelado realista del fenómeno simulado.





Gráfica 3. Esfuerzo vs Deformación para el primer modelo simulado

La gráfica presentada muestra la relación esfuerzo-deformación obtenida a partir de la simulación del ensayo de tracción aplicado sobre una probeta de acero (línea roja continua), utilizando un análisis estático no lineal, y los datos de la curva real del acero sometido a la prueba de tensión (línea azul discontinua).

En ella se observa un comportamiento típico de materiales dúctiles, donde la curva inicia con una pendiente pronunciada que representa la zona elástica, correspondiente al módulo de elasticidad del material (en este caso, 215 GPa). Esta etapa se caracteriza por una relación lineal entre el esfuerzo y la deformación, hasta alcanzar el límite elástico.

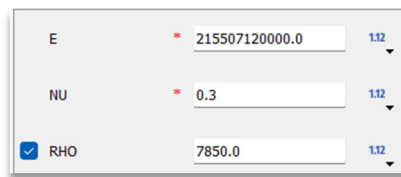
La coincidencia en la forma global de las curvas sugiere que la simulación no solo reproduce el comportamiento general del material, sino que también logra acercarse mucho a sus propiedades mecánicas reales.

En otras palabras, el modelo matemático usado en la simulación está bien calibrado y tiene un alto grado de fidelidad con respecto al comportamiento físico observado en el experimento.

Configuración del modelo elastoplástico mediante endurecimiento.

1. Definición del material

Del mismo modo que el modelo mediante curva de comportamiento no lineal, la configuración del material se repite. Un acero con módulo de elasticidad igual a 215 GPa, y el coeficiente de Poisson en 0.3



E	215507120000.0	1.12
NU	0.3	1.12
<input checked="" type="checkbox"/> RHO	7850.0	1.12

2. Configuración del comportamiento plástico:

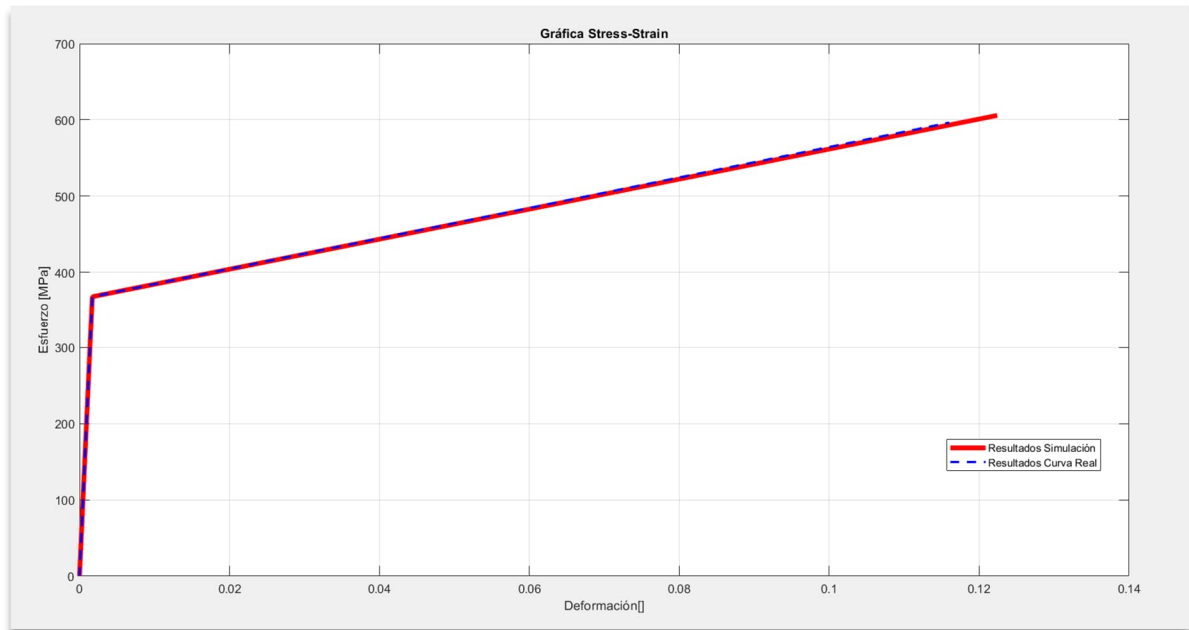
En Salome-Meca, el parámetro EPSI representa la deformación plástica equivalente acumulada del material, utilizada para definir el comportamiento plástico con endurecimiento. Valores como 0.001 a 0.4 indican el rango de deformaciones plásticas en el que el material evoluciona desde la fluencia inicial hasta una etapa avanzada de endurecimiento.



EPSI	
1	0.001
2	0.4

3. Tipo de ensayo simulado, aplicación de la carga, incrementos y tipo de análisis.

Para el resto de los pasos del modelo, como el tipo de ensayo simulado, la aplicación de la carga, los incrementos utilizados y el tipo de análisis, se conservó la misma configuración empleada en la simulación anterior. Esto incluye la simulación de un ensayo de tracción uniaxial, la aplicación progresiva de la carga mediante una rampa con normalización de 1.0 a 0.1, el uso de incrementos mínimos de 0.001 y máximos de 0.1, así como la ejecución de un análisis estático no lineal, manteniendo la coherencia en las condiciones de frontera y parámetros numéricos para asegurar la comparabilidad entre modelos.}



Gráfica 4. Esfuerzo vs Deformación para el segundo modelo simulado

Al comparar las gráficas, el modelo anterior logra una mejor coincidencia con los datos reales en toda la curva esfuerzo-deformación. Particularmente, en la zona plástica, la curva simulada del primer modelo sigue más de cerca la trayectoria de la curva experimental, lo que indica que reproduce con mayor precisión el comportamiento mecánico real del material.

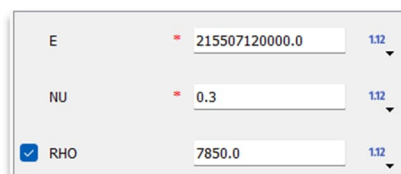
En cambio, el nuevo modelo elastoplástico con endurecimiento muestra una desviación creciente hacia el final, con valores de esfuerzo superiores a los observados en el experimento. Esta diferencia sugiere que el efecto de endurecimiento incorporado al modelo FEM podría estar sobreestimando la resistencia del material bajo deformación prolongada.

Configuración del modelo elastoplástico.

El modelo elástico-plástico con endurecimiento describe el comportamiento de un material que, tras alcanzar su límite de fluencia, continúa aumentando su resistencia conforme se incrementa la deformación plástica. En este caso, el esfuerzo no permanece constante durante la fase plástica, sino que se incrementa de manera progresiva, reflejando el fenómeno de endurecimiento por deformación. Esta configuración permite una representación más precisa del comportamiento de materiales dúctiles como el acero. Por otro lado, el modelo elástico-plástico sin endurecimiento, dice que, una vez alcanzado el límite de fluencia, el material sigue deformándose sin que el esfuerzo aumente, manteniéndose constante en la fase plástica. Aunque este modelo es más simple y menos demandante, no refleja con precisión el endurecimiento real que presentan muchos materiales bajo una carga continua.

1. Configuración del material

Del mismo modo, los parámetros para el módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson permanecen iguales, 215 GPa y 0.3 respectivamente.



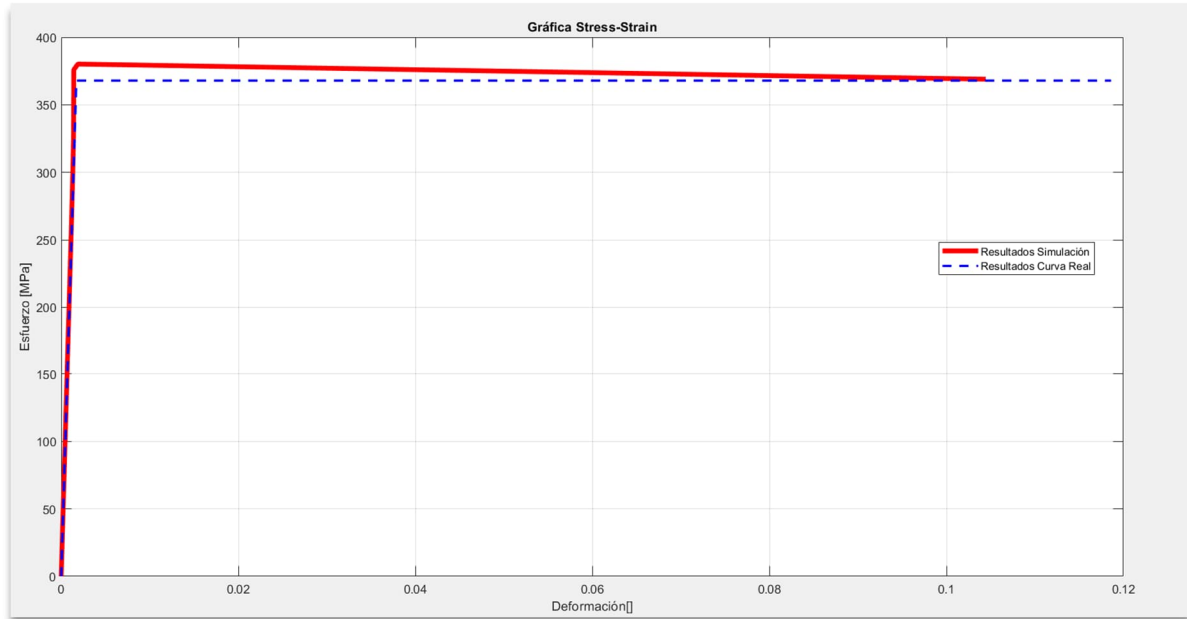
2. Configuración del comportamiento plástico

Dentro del software, el parámetro ECRO_LINE nos permite definir un comportamiento plástico con endurecimiento isotrópico lineal, donde el esfuerzo de fluencia crece linealmente con la deformación plástica. Es decir, cuando el material entra en la zona plástica la resistencia incrementa de manera proporcional a la deformación plástica.



3. Tipo de ensayo simulado, aplicación de la carga, incrementos y tipo de análisis.

Se mantuvo la misma configuración utilizada en la simulación anterior para el resto de los parámetros del modelo, incluyendo el tipo de ensayo (tracción en un eje), la aplicación de la carga mediante una rampa con normalización de 1.0 a 0.1, los incrementos de carga (mínimo de 0.001 y máximo de 0.1), y el análisis estático no lineal. Esta consistencia garantiza condiciones comparables entre ambos modelos.



Gráfica 5. Esfuerzo vs Deformación para el tercer modelo simulado

En este modelo sin endurecimiento, la zona elástica se comporta de manera muy similar a la curva real: ambas aumentan el esfuerzo rápidamente con una pendiente casi idéntica. Sin embargo, en la zona plástica comienzan a notarse diferencias. La curva simulada se desvía ligeramente de la curva experimental hacia el final, mientras que el modelo anterior logra seguir más de cerca esa trayectoria. Esto indica que, aunque en la fase elástica ambos modelos funcionan bien, el anterior representa mejor el comportamiento del material cuando empieza a deformarse de forma permanente.

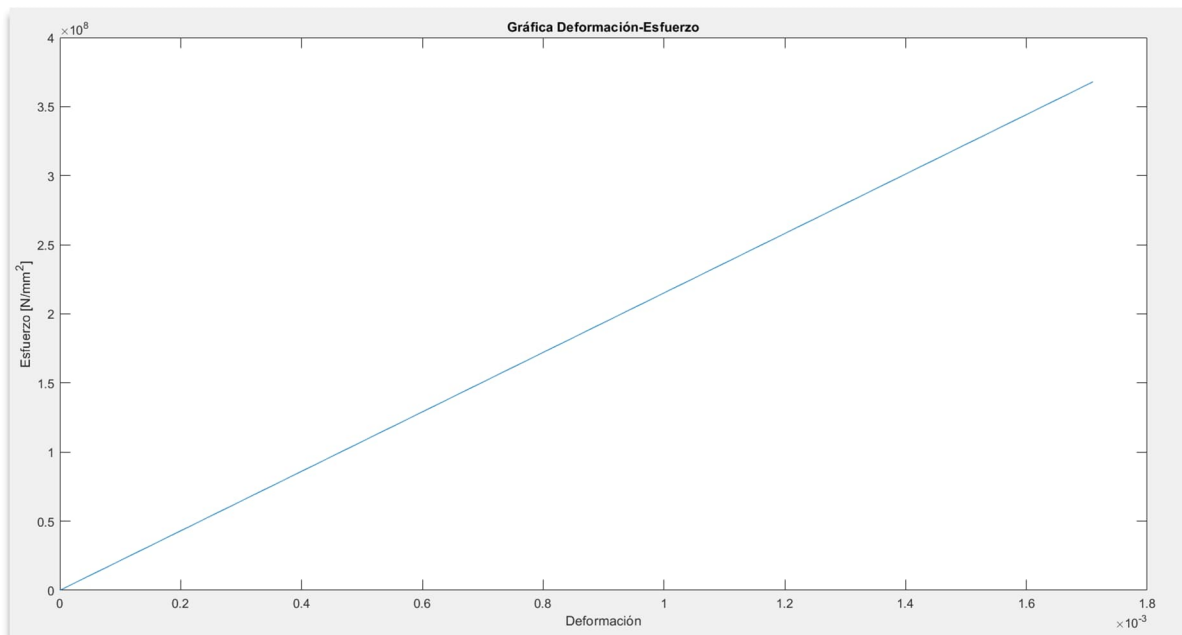
Configuración del modelo elástico

Un modelo elástico lineal representa un material que se deforma proporcionalmente al esfuerzo y recupera totalmente su forma al retirar la carga, sin considerar deformaciones permanentes. En cambio, un modelo elástico-plástico incluye una fase plástica posterior al límite de fluencia, donde el material sufre deformaciones irreversibles, permitiendo simular comportamientos más realistas bajo cargas elevadas.

Esta configuración es el acercamiento más básico que se puede hacer cuando hablamos de simulaciones por medio del Método de Elemento Finito.

En Salome-Meca, la configuración de un modelo elástico lineal es bastante sencilla, ya que solo requiere definir dos parámetros fundamentales: el módulo de elasticidad (E) y el coeficiente de Poisson (ν).

E	215507120000.0	1.12
NU	0.3	1.12
<input checked="" type="checkbox"/> RHO	7850.0	1.12

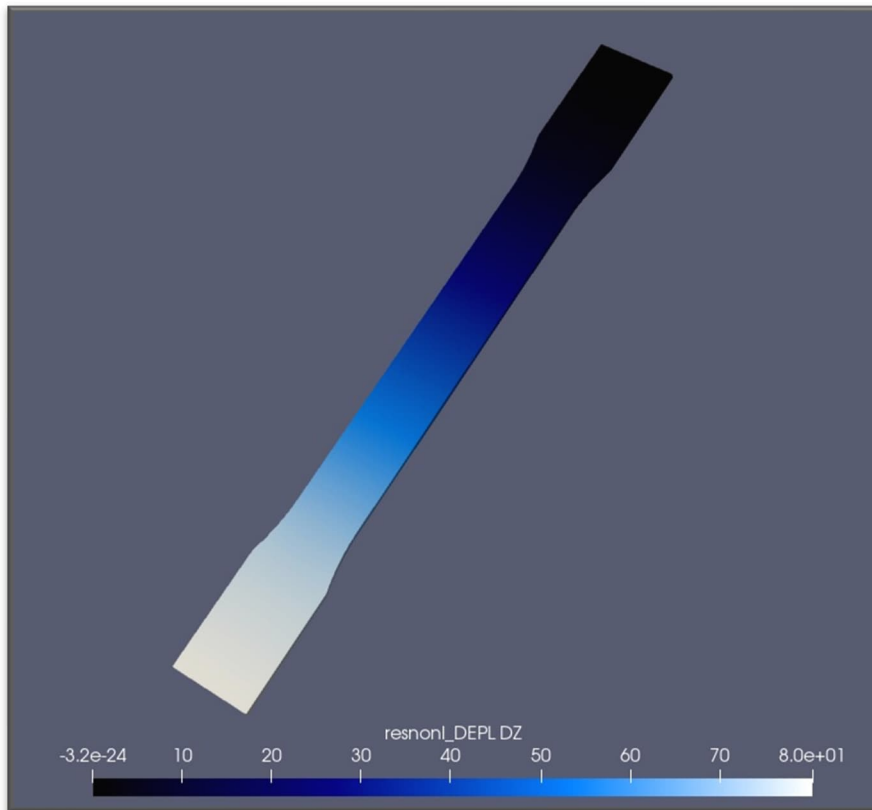


Gráfica 6. Esfuerzo vs Deformación para el cuarto modelo simulado

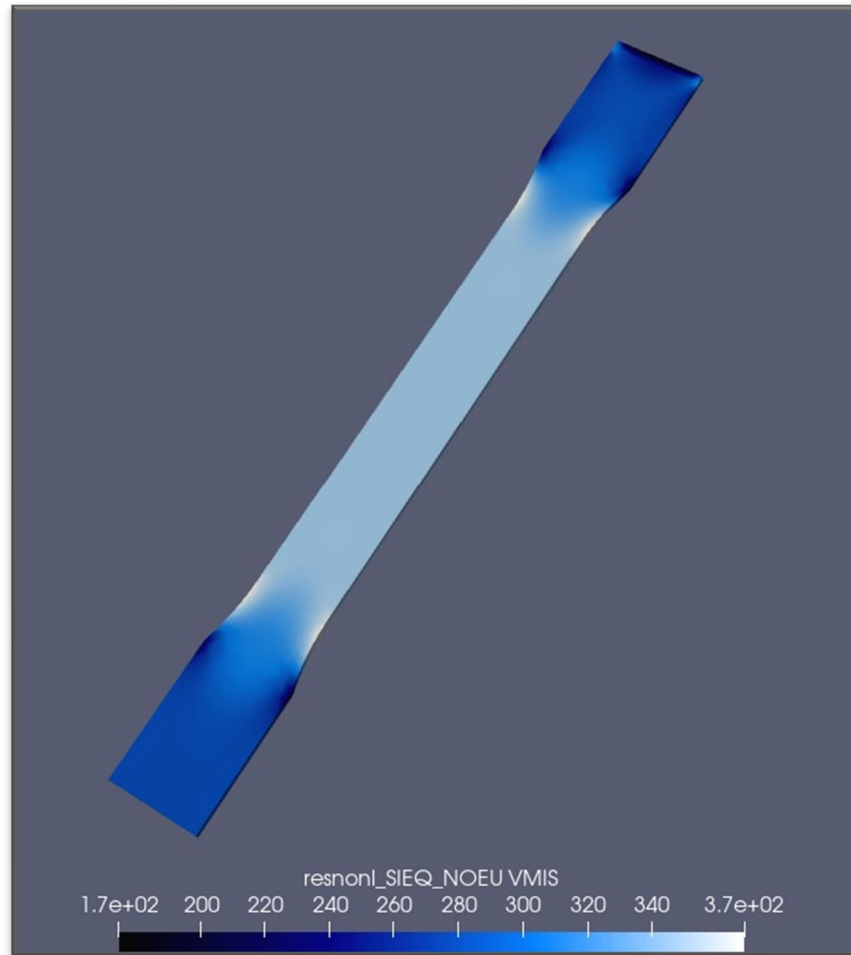
En la gráfica se muestra una relación directa entre la deformación y el esfuerzo: conforme aumenta la deformación, el esfuerzo también lo hace de manera proporcional, lo que se traduce en una línea de tipo pendiente. Esto refleja que el material responde de forma totalmente elástica, sin mostrar signos de plastificación ni endurecimiento. Es decir, el material recuperaría su forma original al retirar la carga, siempre y cuando no se sobrepase el límite elástico. Este tipo de modelo es útil para describir materiales en condiciones de carga moderada, aunque no capta el comportamiento real cuando se producen deformaciones permanentes.

Capítulo V. Análisis y validación de resultados

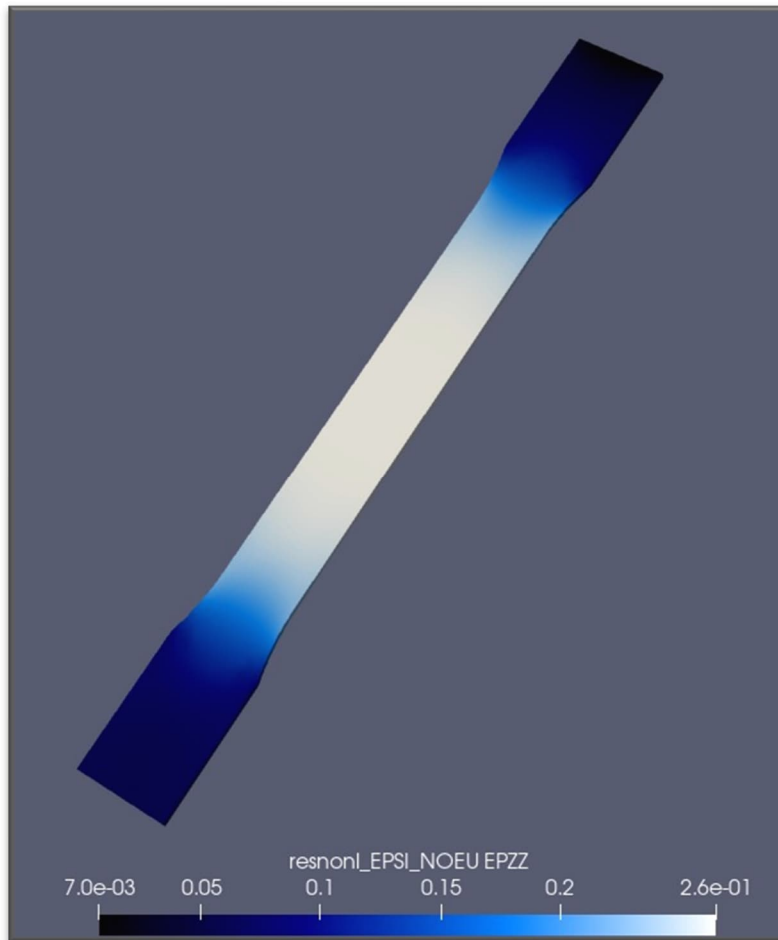
Modelo elastoplástico mediante curva de comportamiento no lineal



Para el desplazamiento axial (D_z), se observa un gradiente uniforme desde el extremo fijo hasta el extremo donde se aplica la tracción, alcanzando un desplazamiento máximo cercano a 80 mm. Esta representación valida el modelo estático no lineal utilizado en la simulación, evidenciando una deformación progresiva y continua en la dirección de carga, típica de un ensayo de tracción bien configurado.

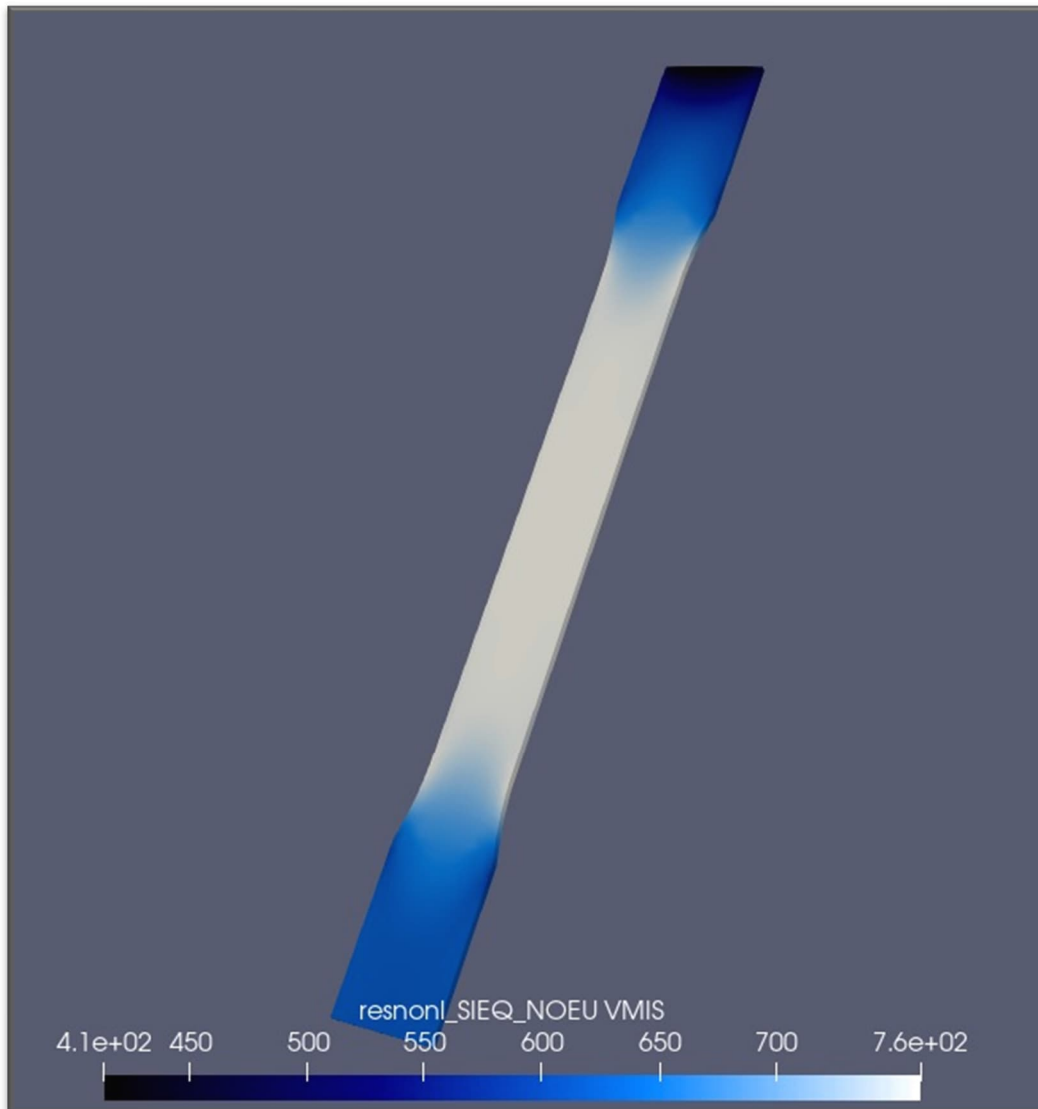


Para el esfuerzo equivalente de Von Mises (V_{mis}), los valores más altos se localizan en la misma región central, lo que confirma que es ahí donde se desarrolla la mayor concentración de esfuerzos, con un pico de hasta 370 MPa. La distribución de esfuerzos es coherente con la transición del comportamiento elástico a plástico.

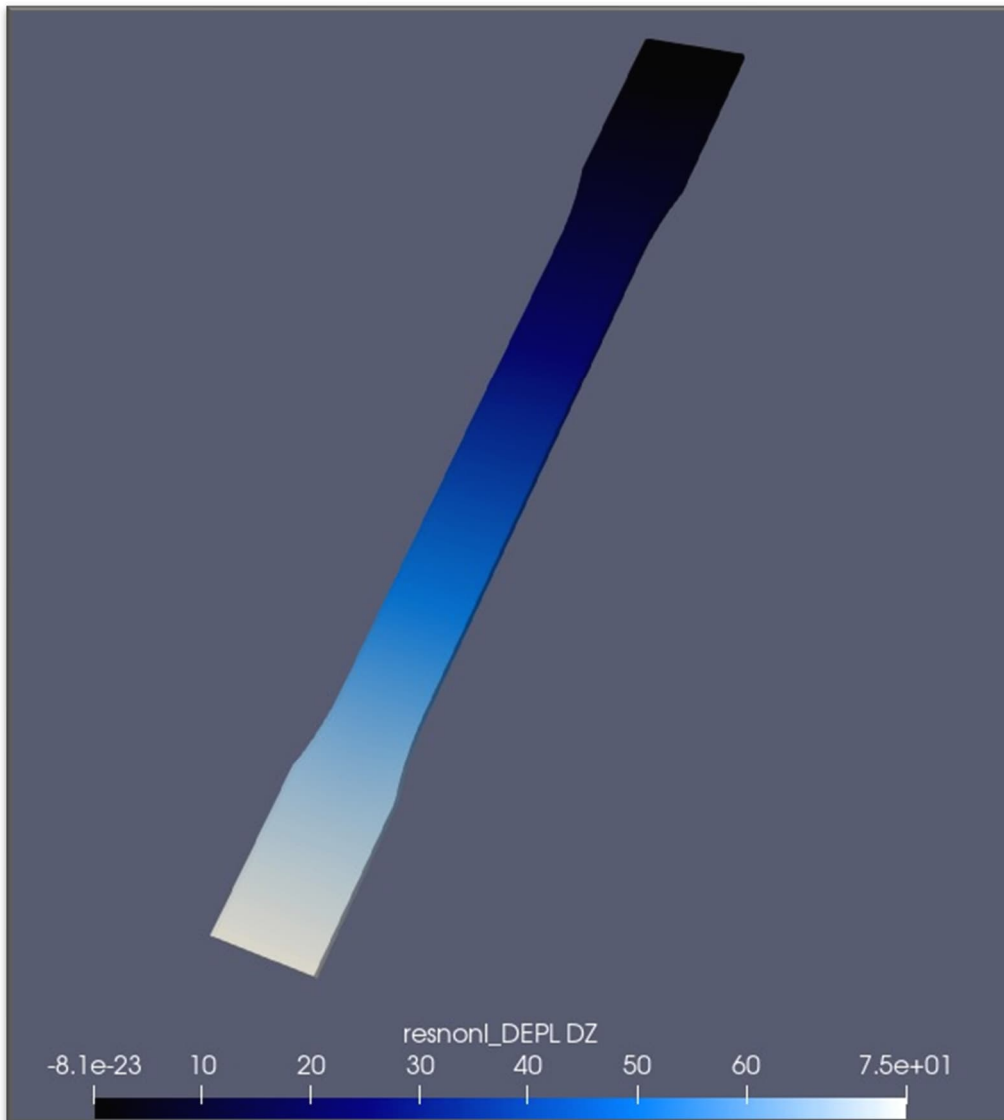


En el caso de la deformación plástica axial (EPzz), se observa que las mayores deformaciones se concentran en la zona central, lo cual es coherente con el diseño geométrico de la probeta y con el comportamiento mecánico esperado del acero una vez superado el límite elástico. Los tonos más claros en el centro indican una deformación plástica significativa, alcanzando valores cercanos a 0.26, señal de que el material ha entrado plenamente en su régimen plástico.

Modelo elastoplástico mediante endurecimiento

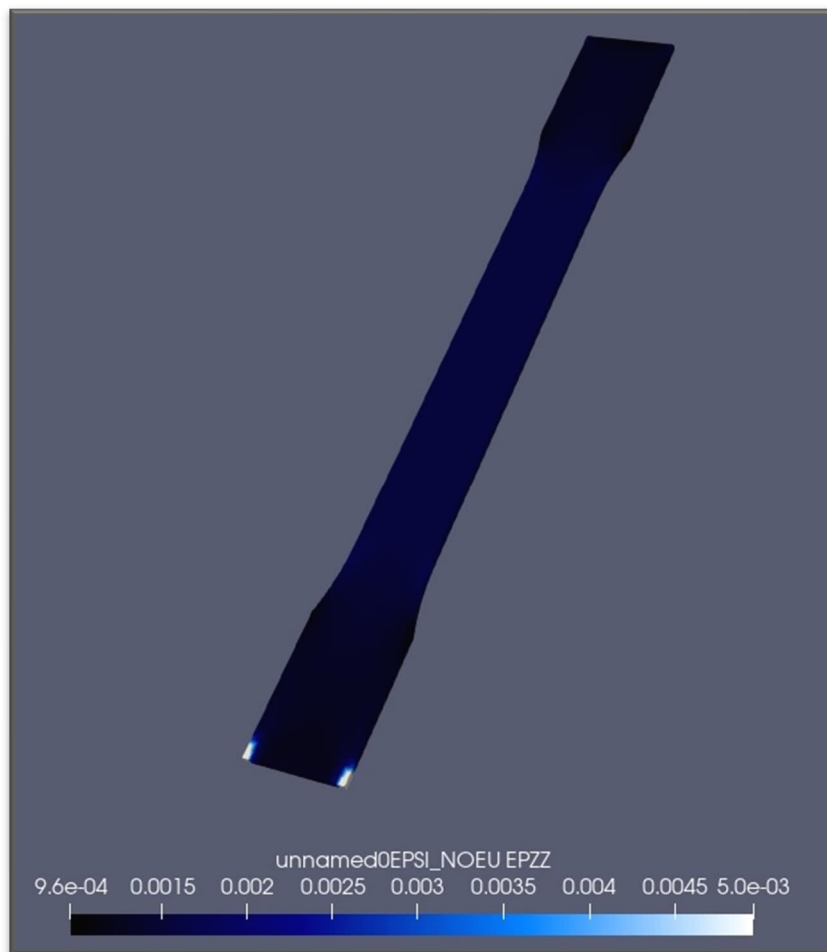


En la imagen, se observan los resultados del campo de esfuerzos de Von Mises obtenidos al final de la simulación. Se aprecia una concentración de esfuerzos en las zonas de sujeción, alcanzando valores cercanos a los 760 MPa, mientras que el centro del espécimen mantiene esfuerzos menores.

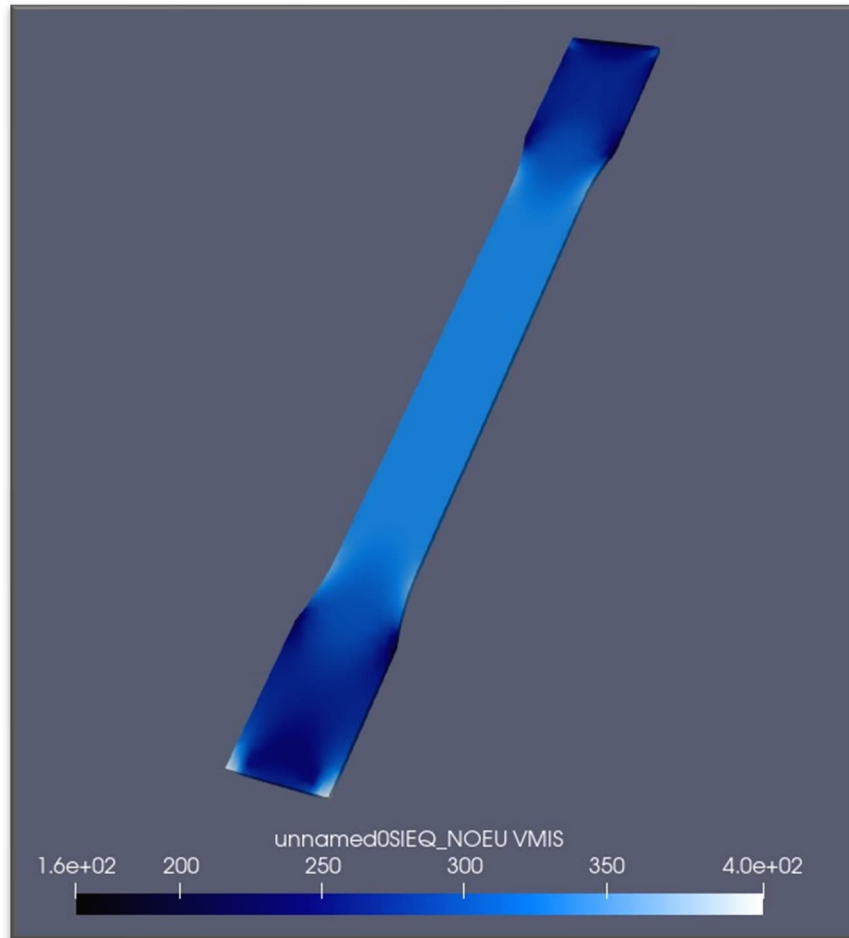


Se representa la distribución de desplazamientos en la dirección axial (DZ), observándose un gradiente uniforme desde un extremo al otro de la probeta. El desplazamiento máximo alcanza aproximadamente 75 mm, lo que indica que el modelo respondió de manera estable bajo la carga impuesta.

Modelo elastoplástico

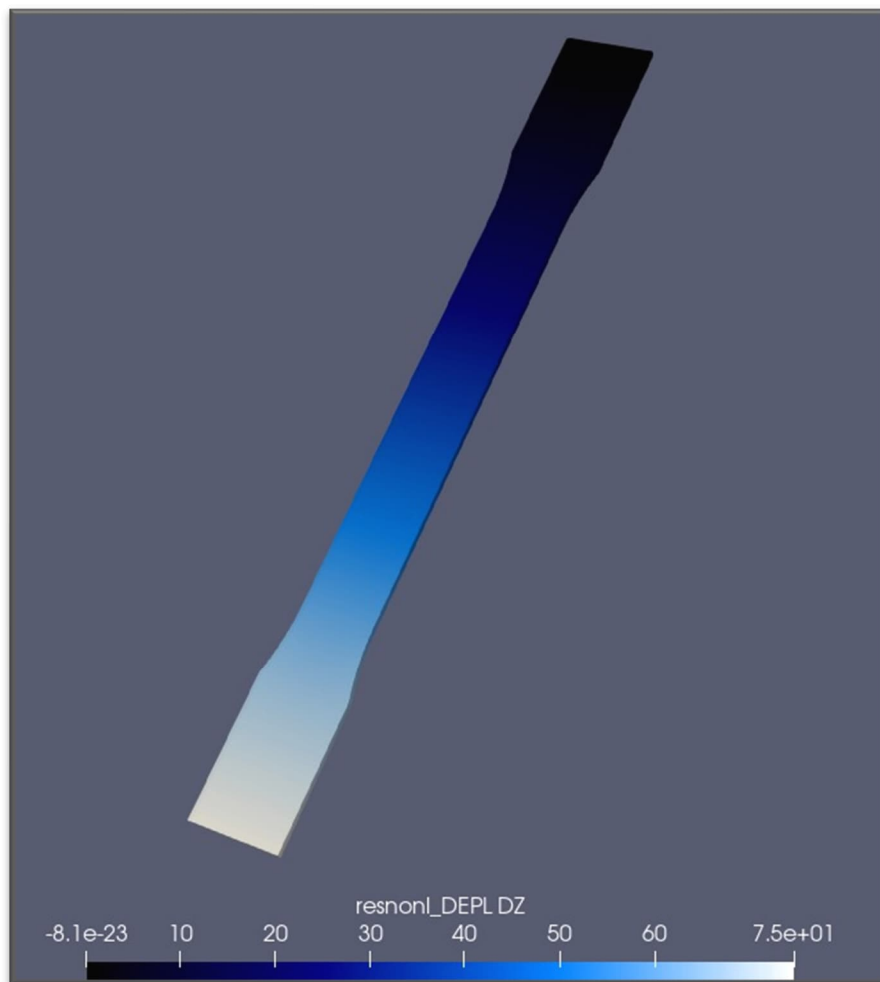


La imagen muestra la deformación plástica axial en la dirección Z (EPZZ). Los valores van de $9.6e-04$ mm a $5.0e-03$ mm, con zonas más claras indicando mayor deformación acumulada. Al tratarse de una configuración más básica, los resultados no se acercan tanto a los obtenidos en simulaciones anteriores más detalladas, lo que limita la precisión en la representación del comportamiento real del material.

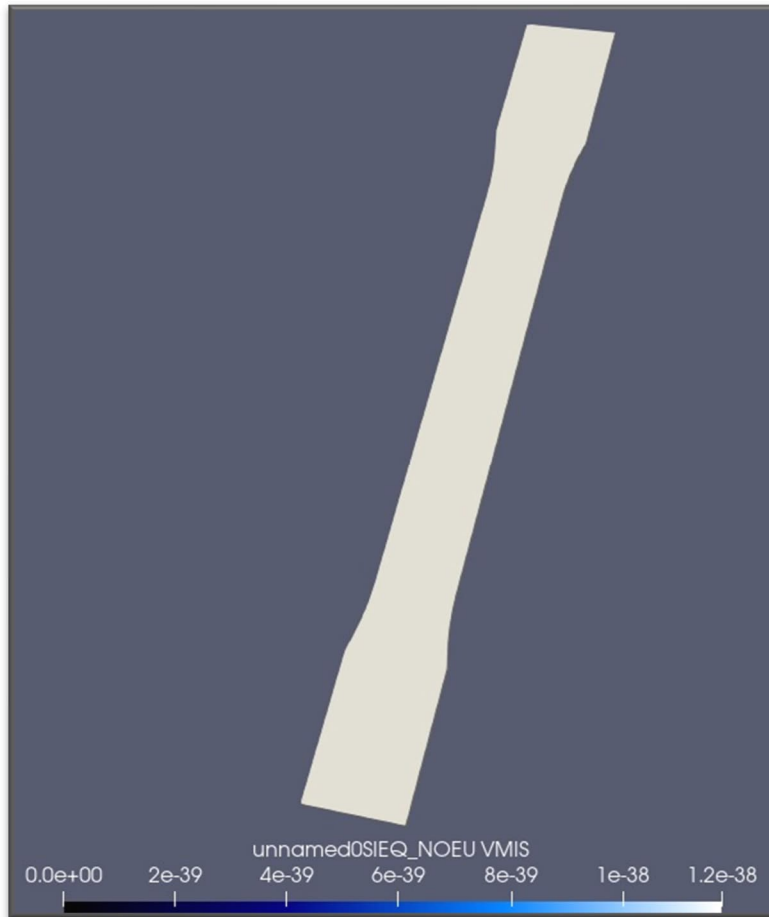


A diferencia de simulaciones anteriores, para el esfuerzo de Von Mises, donde se alcanzaron valores pico de 370 MPa, en esta simulación tenemos valores máximos de hasta 140 MPa, lo que concuerda con la menor exactitud del modelo.

Modelo elástico lineal



Al tratarse de un modelo lineal, la deformación es proporcional a la carga aplicada, siguiendo la ley de Hooke, lo que permite una representación más simplificada del comportamiento del material frente al esfuerzo.



La fuerza, al ser aplicada en un único incremento, ocasiona que la visualización del esfuerzo de Von Mises se represente de manera uniforme en la probeta, dando un valor pico máximo de hasta 120 MPa.

Impacto social

La implementación de Salome Meca en ambientes universitarios promueve una formación más sólida y actualizada en el área de simulación por elementos finitos, al permitir que los estudiantes se familiaricen con herramientas profesionales desde etapas tempranas de su desarrollo académico. El uso de este tipo de software favorece el aprendizaje activo y práctico, facilitando la comprensión de conceptos teóricos mediante su aplicación en entornos de modelado realista.

Además, incentiva la participación estudiantil en proyectos de investigación aplicada y en el desarrollo de propuestas innovadoras orientadas a resolver problemas del entorno. Esta experiencia práctica fortalece el perfil de egreso y mejora la preparación de los futuros profesionistas para enfrentar los retos tecnológicos y sociales de la industria y el sector público.

Impacto tecnológico

Desde el punto de vista tecnológico, la incorporación de Salome Meca en el entorno educativo impulsa el desarrollo de habilidades altamente demandadas en la industria moderna, como la automatización de análisis, el trabajo con scripts en Python y la capacidad de personalizar modelos numéricos.

El software permite realizar simulaciones complejas por el método de elementos finitos, utilizando módulos que pueden integrarse con otras herramientas de análisis y diseño, ampliando así el ecosistema de aprendizaje. Su naturaleza abierta permite que los estudiantes no solo se limiten a operar interfaces gráficas, sino que comprendan la lógica detrás del modelado y la resolución de problemas físicos, fortaleciendo su formación como futuros ingenieros. Además, el uso de tecnologías abiertas contribuye a la creación de soluciones adaptadas a necesidades específicas del entorno local, sin depender de proveedores externos o licencias restrictivas, lo que impulsa la innovación y el desarrollo tecnológico regional.

Impacto económico y productivo

En términos económicos, el uso de software libre como Salome Meca en proyectos universitarios genera un ahorro considerable en licencias comerciales, lo cual es especialmente relevante para instituciones públicas o con presupuestos limitados. Este

ahorro puede redirigirse hacia otros recursos estratégicos como la adquisición de equipo de cómputo, materiales didácticos o apoyo a estudiantes.

A nivel productivo, la formación de profesionales capaces de aplicar herramientas accesibles en contextos reales genera un impacto positivo en pequeñas y medianas empresas, que normalmente no cuentan con los recursos para adquirir software propietario. Al transferir estos conocimientos al sector productivo, se potencia la capacidad de innovación local y se mejora la eficiencia en procesos de diseño, análisis y validación estructural. Esto se traduce en productos más competitivos, reducción de errores en etapas de manufactura y una mejor toma de decisiones basada en simulaciones numéricas confiables.

Conclusiones

Derivado de las simulaciones realizadas con el software Salome Meca, se comprobó que, este software de código libre ofrece un rendimiento técnico adecuado para su utilización dentro de las actividades docentes y de investigación en las instituciones de educación superior. Los resultados obtenidos muestran comportamientos consistentes y confiables para la resolución de simulaciones por el método de elemento finito, con una capacidad de representación y análisis de datos que es comparable con otros softwares comerciales bajo licencia. Esta validación revalida que Salome Meca, aparte de ser capaz de abordar casos de estudio con diferentes geometrías y condiciones de carga, facilita la comprensión de los fenómenos mecánicos para los estudiantes, ayudando en su interacción con modelos computacionales complejos.

El uso de software libre en entornos educativos representa una oportunidad accesible para fortalecer las habilidades y conocimientos de futuros ingenieros, ya que proporciona una plataforma abierta a la experimentación sin las restricciones aplicadas por licencias costosas y versiones estudiantiles o de prueba. Además, la interfaz de Salome Meca ayuda a llevar un proceso de modelado de fácil seguimiento, desde la creación de geometrías hasta la definición de mallas y condiciones de frontera, facilitando la aplicación de conocimientos de materias previas.

La implementación de este tipo de herramientas en las instituciones de educación superior (IES) no solo contribuye al desarrollo de habilidades técnicas, sino que también promueve una cultura de aprovechamiento de recursos tecnológicos de libre acceso, lo que se traduce en una formación más completa y adaptada a las necesidades del sector industrial. Al validar su aplicabilidad en el aula, este trabajo sienta las bases para que siguientes generaciones de estudiantes puedan acceder a técnicas de simulación avanzadas sin involucrar el aspecto económico que, en el caso de muchos estudiantes, representa una limitante, incrementando su capacidad para enfrentar retos profesionales con un enfoque más innovador y sustentado en el análisis computacional.

En resumen, los resultados favorables obtenidos consolidan a Salome Meca como una alternativa eficiente, accesible y técnicamente sólida para la enseñanza y la investigación en ingeniería, reforzando el vínculo entre la formación académica y la práctica profesional, y abriendo la puerta a nuevas oportunidades de innovación y transferencia tecnológica en el ámbito educativo.

Bibliografía

Hernández Sampieri, Roberto, Fernández Collado, Carlos, Baptista Lucio, María del Pilar (2014). Metodología de la investigación (6° ed.). México: [McGraw Hill Interamericana Editores S.A. de C.V.](#) .

García-Argüelles, L. Á., López-Medina, F. L., Moreno-Toiran, G., & Ortigosa-Garcell, C. (2018). El método experimental profesional en el proceso de enseñanza -aprendizaje de la Química General para los estudiantes de la carrera de ingeniería mecánica. *Revista Cubana de Química*, 30(2), 328-345. <http://scielo.sld.cu/pdf/ind/v30n2/ind13218.pdf>

Kardak, A. A., & Sinclair, G. B. (2019). Stress Concentration Factors for ASTM E8/E8M-16a Standard Round Specimens for Tension Testing. *Journal Of Testing And Evaluation*, 48(1), 711-719. <https://doi.org/10.1520/jte20190549>

Rodrigo, M. D. M., Romero, P. M., Gil, A. P., & García, M. L. R. (2013). Resistencia de materiales. En *Universitat Jaume I eBooks*. <https://doi.org/10.6035/infitec.2002.12>

Ruiz, M. C., & Díaz, E. I. B. (2002). Mecánica de estructuras. En *Edicions UPC eBooks*. <https://doi.org/10.5821/ebook-9788498802139>

Tensile testing. (2004). <https://doi.org/10.31399/asm.tb.tt2.9781627083553>

User's Documentation — SALOME vVersion 9.15 documentation. (s. f.). <https://docs.salome-platform.org/latest/main/gui.html>

Zurita-Cruz, J. N., Márquez-González, H., Miranda-Novales, G., & Villasis-Keever, M. Á. (2018). Estudios experimentales: diseños de investigación para la evaluación de intervenciones en la clínica. *Deleted Journal*, 65(2), 178-186. <https://doi.org/10.29262/ram.v65i2.376>

Validación de software libre para simulaciones por elemento finito

Anexos



ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL RADIO DE GIRO EN SECCIONES TRANSVERSALES QUE FALLAN POR PANDEO

Filiberto Candia García¹, Roberto Carlos Ambrosio Lazáro², Juan Pablo Hidalgo Toxqui³, Héctor Hernández Ceballos⁴

RESUMEN

En las instituciones públicas de educación superior, los estudiantes de ingeniería muestran baja capacidad para analizar datos y gráficos de simulaciones virtuales basadas en el método de los elementos finitos (MEF), que se emplean para solucionar problemas de diseño en elementos esbeltos de acero que fallan por pandeo global. Se busca diseñar un procedimiento para el análisis, interpretación y presentación del comportamiento del radio de giro, asociado a la relación de esbeltez. El estudio compara distintas configuraciones de radios de giro y concluye que un diseño simétrico de la sección transversal mejora la capacidad de carga crítica.

ABSTRACT

In public higher education institutions, engineering students show low ability to analyze data and graphs from virtual simulations based on the finite element method (FEM), which are used to solve design problems in slender steel elements that fail due to global buckling. The aim is to design a procedure for the analysis, interpretation and presentation of the behavior of the radius of gyration, associated with the slenderness relationship. The study compares different gyration radius settings and concludes that a symmetrical cross-section design improves critical load capacity.

INTRODUCCIÓN

En el campo de la ingeniería estructural, se considera relevante estudiar el comportamiento de las secciones transversales abiertas y cerradas que experimentan fallos por pandeo global. Siendo una acción primordial para garantizar la seguridad y eficiencia de los sistemas estructurales, especialmente en construcciones verticales. El análisis detallado del fenómeno de pandeo global se realiza mediante simulaciones virtuales usando el Método de Elemento Finito (MEF), que permite replicar el evento de forma confiable y económica, en contraste con los costosos ensayos experimentales. Aprovechando la simulación virtual-digital como una herramienta estratégica para explorar diversas configuraciones de trabajo estructural y obtener datos precisos de las deformaciones ante la ocurrencia de falla.

En cuanto al estudio del pandeo local y el pandeo por flexotorsión, se presentarán estudios y análisis en próximas contribuciones. Debido a que cada fenómeno requiere ser estudiado por separado de manera independiente para comprenderlo, antes de realizar un análisis integrado de las diferentes ocurrencias de pandeo (global, local y flexotorsión) en un elemento estructural esbelto de acero ya sea de sección abierta o cerrada.

¹ Profesor Investigador. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. 4 Sur 104 Centro Histórico C.P. 72000. Puebla, México. Cel. 2227108051. filiberto.candia@correo.buap.mx

² Profesor Investigador. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. 4 Sur 104 Centro Histórico C.P. 72000. Puebla, México. Cel. 2225103462. roberto.ambrosio@correo.buap.mx

³ Profesor Investigador. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. 4 Sur 104 Centro Histórico C.P. 72000. Puebla, México. Cel. 222527872. pablo.toxqui@correo.buap.mx

⁴ Estudiante. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. 4 Sur 104 Centro Histórico C.P. 72000. Puebla, México. Cel. 2311390049. filiberto.candia@correo.buap.mx

El análisis que se presenta en este trabajo permite comprender mejor la relación entre el radio de giro y la ocurrencia de pandeo global, proporcionando diferentes perspectivas para el diseño y la mejora de sistemas y elementos estructurales esbeltos frente a este tipo de fallas, que resultan ser comunes dentro del ámbito del diseño estructural cuando los elementos trabajan de manera cercana y continua en un estado límite (figura 1).

Históricamente el radio de giro ha sido un elemento imprescindible para obtener los coeficientes de pandeo actuales en elementos esbeltos de acero con probabilidad de pandeo global. Surgiendo el cuestionamiento ¿Por qué? es necesario continuar estudiando la ocurrencia de pandeo global tanto lineal como no lineal. Debido a la recurrencia común del análisis estructural mediante software basado en el Método de los Elementos Finitos (FEM), que analiza este fenómeno desde la emulación del comportamiento cercano a la realidad, a través de la simulación digital-virtual, que permite determinar los desplazamientos y deformaciones máximas con alta aproximación.

La respuesta inmediata es la búsqueda de un coeficiente adimensional gradualmente más sofisticado, que incluya parámetros adicionales que permitan describir el fenómeno de pandeo global, más allá de la variable del radio de giro, sin excluir la relación de esbeltez, el tipo de sección transversal y el límite elástico, para diseñar de manera eficiente sistemas estructurales seguro y resilientes. Estos coeficientes deben ser capaces de reducir la tensión y al mismo tiempo incrementar la resistencia al pandeo global, además de incrementar el valor de la carga segura que una columna puede soportar sin pandeo global (Pomares et al., 2021).

La definición de los conceptos asociados al fenómeno de pandeo elástico o inelástico se realizan a partir de los autores (Beer et al., 2010), (Gere y Goodno, 2009). Coincidiendo que el radio de giro carece de concepto físico, pero se considera como la distancia (desde el eje de referencia) en la cual toda el área de la sección transversal podría concentrarse y aún tener el mismo momento de inercia que el área original. La ec. 1 define analíticamente el radio de giro en el eje x donde I_x es el momento de inercia y A el área de la sección transversal.

$$r_x = \sqrt{\frac{I_x}{A}} \quad (1)$$

La definición de la relación de esbeltez ec. 2, es el concepto del cociente de la longitud (L) y el radio de giro ec. (2).

$$\text{Relación de esbeltez} = \frac{L}{r} \quad (2)$$

A partir de la relación de esbeltez es posible determinar la carga crítica de una columna ec. (3).

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (3)$$

Teniendo el valor de la carga crítica se encuentra el valor del esfuerzo crítico ec. (4).

$$\sigma_{cr} = \frac{P_{cr}}{A} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L}{r}\right)^2} \quad (4)$$

Con la información recabada de las ec. 1 a 4 se configura la gráfica de la curva de Euler, figura 1, que representa el comportamiento de la relación de esbeltez versus el esfuerzo de fluencia. Con la información de las ec. 5 a 9 se configura la gráfica de la curva de la secante. Asimismo, los textos de los autores (Beer et al., 2010) y (Gere y Goodno, 2009), exponen las condiciones comunes de pandeo (figura 2), siendo las configuraciones d) un extremo fijo y un extremo empotrado y c) ambos extremos fijos, las condiciones que se estudiarán en este documento y que posteriormente se comparan los resultados del análisis y simulación por el MEF, con las representaciones gráficas de las ecuaciones teóricas de Euler (figura 1) y de la secante (figura 2).

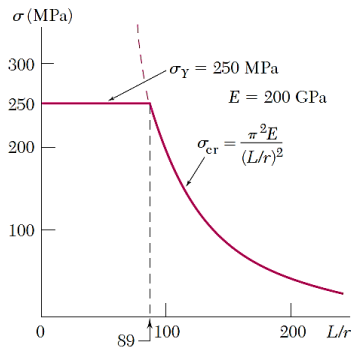


Figura 1 Gráfica representativa de la curva de Euler, para acero de $E=200$ GPa y $\sigma_{fy}=36\ 250$ MPa. Fuente: tomada de (Beer et al., 2010).

(a) Columna articulada-articulada	(b) Columna empotrada-libre	(c) Columna empotrada-empotrada	(d) Columna empotrada-articulada
$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2}$	$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{4L^2}$	$P_{cr} = \frac{4\pi^2 EI}{L^2}$	$P_{cr} = \frac{2.046 \pi^2 EI}{L^2}$
$L_e = L$	$L_e = 2L$	$L_e = 0.5L$	$L_e = 0.699L$
$K = 1$	$K = 2$	$K = 0.5$	$K = 0.699$

Figura 2 Configuraciones de pandeo. Fuente: tomada de (Gere y Goodno, 2009).

Para la condición de pandeo c) la ec. (5) provee la solución con valores de: $k=0.699$ y longitud efectiva (L_e) $L_e=0.699*L$.

$$P_{cr} = \frac{2.046\pi^2 EI}{L^2} \quad (5)$$

En el caso de la condición de pandeo d), la ec. (6) proporciona la solución con valores de: $k=0.5$ y $L_e=0.5*L$.

$$P_{cr} = \frac{4\pi^2 EI}{L^2} \quad (6)$$

Para cargas excéntricas la ec. (7) de la secante y_{max} es la solución de mayor uso y refiere la máxima deflexión de una columna ante la aplicación de una carga fuera del eje centroidal de la sección transversal, sin falla por pandeo. En cuanto a la determinación del esfuerzo máximo al aplicar la fórmula de la secante, este se encuentra mediante la ec. (8).

$$y_{max} = e \left(\sec \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{P}{P_{cr}}} - 1 \right) \quad (7)$$

$$\sigma_{max} = \frac{P}{A} \left(1 + \frac{ec}{r^2} \sec \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{P}{P_{cr}}} \right) \quad (8)$$

Para el caso de carga a compresión el esfuerzo máximo se establece por la ec. (9), donde σ_y = esfuerzo de fluencia.

$$\sigma_{max} = 0.5\sigma_y \quad (9)$$

La figura 3, muestra el concepto de relación de esbeltez crítica que diferencia el límite de estabilidad elástica y estabilidad inelástica. Que comparada con la gráfica de la figura 1, se observa que la gráfica de Euler establece como límites de la relación de esbeltez, y cuando son menores de 100 refieren falla por compresión y cuando son mayores a 200, refieren falla por pandeo global.

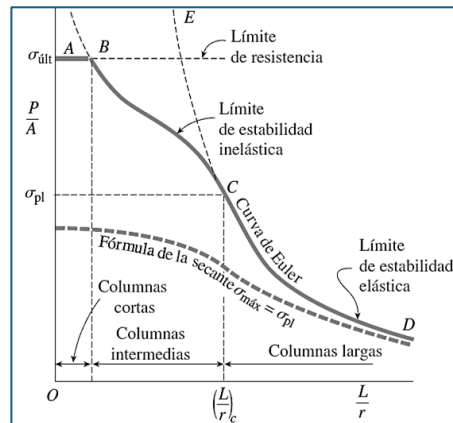


Figura 3 Gráfica comparativa de la curva de Euler y la curva de la secante. Fuente: tomada de (Gere y Goodno, 2009).

En cuanto a los factores de seguridad ec. (10) y ec. (11), este es $5/3$ cuando $\frac{KL}{r} = 0$ y aumenta gradualmente a $23/12$ cuando $\frac{KL}{r} = \left(\frac{KL}{r}\right)_c$ siendo K el factor de longitud efectiva, para relaciones de esbeltez mayores, el factor de seguridad permanece constante en este valor de n_2 .

$$n_1 = \frac{5}{3} + \frac{3\left(\frac{KL}{r}\right)}{8\left(\frac{KL}{r}\right)_c} - \frac{\left(\frac{KL}{r}\right)^3}{8\left(\frac{KL}{r}\right)_c^3} \quad (10)$$

$$n_2 = \frac{23}{12} \approx 1.92 \quad (11)$$

HIPOTESIS

En una sección transversal tipo C fabricado bajo la norma NTC 5685 (Ternium, 2023), formada por dos perfiles tipo C en configuración tipo cajón. Se realiza la simulación comparativa de una solución de tipo estático lineal variando la dimensión de la pestaña de un valor nominal 17 mm (r_3) a un valor de 0 mm (r_1), un valor subdimensionado de 8.5 mm (r_2) y un valor sobredimensionado a 34 mm (r). Como referencia se utiliza la sección simple tipo C (r_0). Los perfiles de sección abierta que cumplen con la norma NTC 5685, cubren los requisitos de manera homologa a la norma ASTM A1011/A1011M-13, que describe la especificación estándar para acero, chapa y fleje, laminado en caliente, al carbono, estructural, de baja aleación de alta resistencia, de baja aleación de alta resistencia con formabilidad mejorada y de resistencia ultra alta.

Se verifican los resultados favorables o no favorables en función del cambio en los valores de:

- La dimensión de los radios de giro
- La relación de esbeltez
- Capacidad de carga crítica

MÉTODO

La propuesta se orienta mediante el método experimental profesional siendo pertinente y factible, porque influye en la formación científica de los estudiantes de las carreras en Ingeniería, motivando a que perfeccionen sus habilidades aplicadas para la práctica y habilidad del manejo de software para la simulación virtual-digital. Al mismo tiempo que los faculta a la solución de problemas profesionales y profundización teórica que les dirige hacia las actividades de verificación/validación (García-Argülles et al., 2018). Asimismo, el procedimiento del método experimental permite concretar las acciones y operaciones del trabajo independiente y los conduce a la apropiación de conocimientos y habilidades experimentales e investigativas de manera autodidacta, que contribuye al descubrimiento de nuevos conocimientos de la ciencia y la tecnología desde las ventajas y beneficios de la simulación virtual-digital aplicada (Hernández-Junco et al., 2022) a través del uso de software basado en el MEF.

El diseño de la secuencia de la simulación se orienta con la guía del trabajo de (Lei et al., 2022), donde al comparar la capacidad de carga máxima y las curvas de carga-desplazamiento, se determina el modelo de elementos finitos que puede reproducir efectivamente el comportamiento de la falla por pandeo global. La metodología experimental por simulación virtual-digital empleada en este estudio se diseñó de manera (figura 4) que se logra obtener una comprensión profunda del comportamiento del radio de giro en secciones transversales propensas a fallos por pandeo global. El proceso metodológico se realizó de manera secuencial, con el propósito de abordar cada fase con puntualización en cuanto a los valores de la relación de esbeltez y la carga crítica.

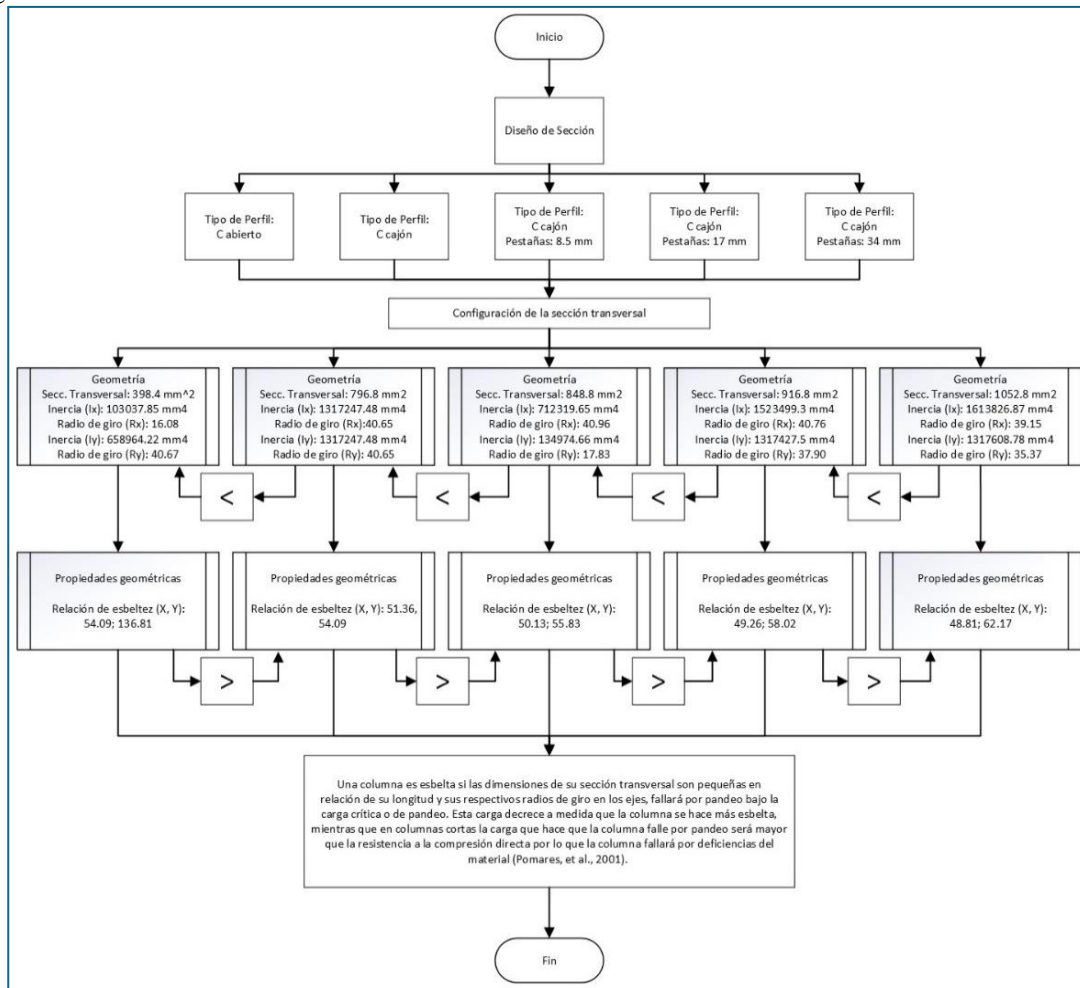


Figura 4 Diagrama secuencial que define la comparativa de radios de giro. Fuente: desarrollo propio.

Antes de iniciar con el procedimiento de la figura 4, se realizó la búsqueda de información relacionada con un caso de estudio (Fratamico, 2017) que ofreciera una detallada información acerca de cómo simular fallas por pandeo global en elementos estructurales esbeltos. Esta búsqueda se orientó hacia casos que abarcaran tanto enfoques experimentales como simulaciones a través del MEF, permitiendo configurar un escenario completo de los aspectos prácticos y teóricos necesarios para realizar simulaciones por pandeo global.

La investigación de esta información permitió discriminar el estudio de los casos de pandeo local y pandeo por flexotorsión en este trabajo, debido a la escasa información encontrada sobre estos tipos de falla y diseñar una metodología pertinente de simulación por medio de software basado en el MEF. También mediante la revisión de la literatura, se tomó la decisión de no considerar el efecto de las imperfecciones y de los esfuerzos residuales, de manera que a futuro poder contar con un antecedente documentado sobre el comportamiento del pandeo global sin consideración y considerando imperfecciones y esfuerzos residuales.

Posteriormente, se empleó la solución procedimental integrada por una metodología que utiliza el análisis lineal, el análisis de pandeo y el análisis no lineal (Fratamico, 2017), desarrollando un caso de estudio propio (figura 4). Este caso de estudio se dibujó considerando aspectos clave como la geometría, condiciones de borde, discretización y variación de las variables de control, focalizando especialmente el concepto del radio de giro. La elección de un enfoque No Lineal en la solución permitió capturar de manera más precisa la complejidad del comportamiento estructural ante cargas críticas, que fueron determinadas por el primer modo de pandeo.

RESULTADOS

GRÁFICA DE LA RELACIÓN DE ESBELTEZ

Con apoyo del software Matlab licencia de campus de la IES, se realizó la figura 5, que representa a las curvas (teóricas y experimentales) del comportamiento de las secciones en estudio para evaluar el comportamiento de la relación de esbeltez (Pomares et al., 2021). Al evaluar los resultados obtenidos variando el radio de giro, se ha identificado un comportamiento que describe falla a compresión y no falla por pandeo al ser evaluados los elementos estructurales a una longitud de 2200 milímetros, con un módulo de Young de $E = 200000$ MPa, un esfuerzo de fluencia $f_y = 250$ MPa y esfuerzo último de $f_u = 460$ MPa, que coinciden con la caracterización del material en el software.

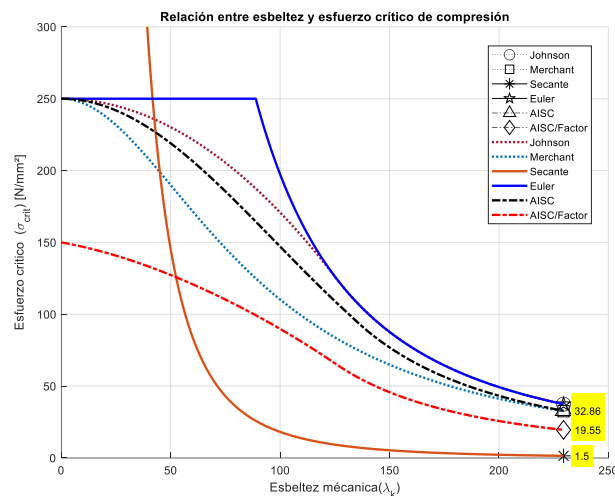


Figura 5 Comparativa de rango completo de las gráficas del comportamiento de la relación de esbeltez vs esfuerzo crítico. Fuente: desarrollo propio.

La figura 5, representa el comportamiento de rango completo (13200 mm) de una sección C abierta sin pestañas, para mostrar la capacidad del Script de Matlab utilizado al graficar de manera comparativa. Destaca por observación simple el valor del esfuerzo crítico para distintas formulaciones teóricas y experimentales de diversos autores. Los valores de mayor interés son los de la curva de Euler que proporciona los valores para el rango lineal del esfuerzo crítico menor al f_y , la curva de la secante funcional para comportamientos lineales y



no lineales, así como la curva experimental del AISC que también proporciona una referencia a las condiciones elásticas e inelásticas.

La figura 6 es la representación del esfuerzo crítico para una sección C simple, abierta sin pestañas, donde se resalta que es deseable realizar un análisis No Lineal de simulación virtual-digital con software basado en el MEF, pues todas las curvas aproximan su comportamiento como no lineal, por debajo del 0.5 del f_y , sin embargo, su estabilidad es baja por su coeficiente de relación de esbeltez cercano a 136.

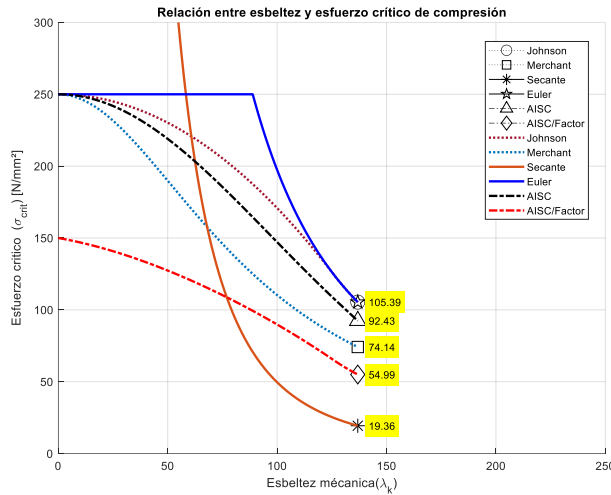


Figura 6 Gráfica de la relación de esbeltez vs esfuerzo crítico de elemento estructural con longitud de 2200 mm sección C abierta sin pestañas. Fuente: desarrollo propio.

La figura 7, muestra que para una sección abierta C con pestañas nominales de 17 mm, el comportamiento es mayor a $0.5 f_y$ para los modelos de Euler, Johnson y AISC, sin embargo disminuye la relación de esbeltez de 113, por efecto de la adición de las pestañas.

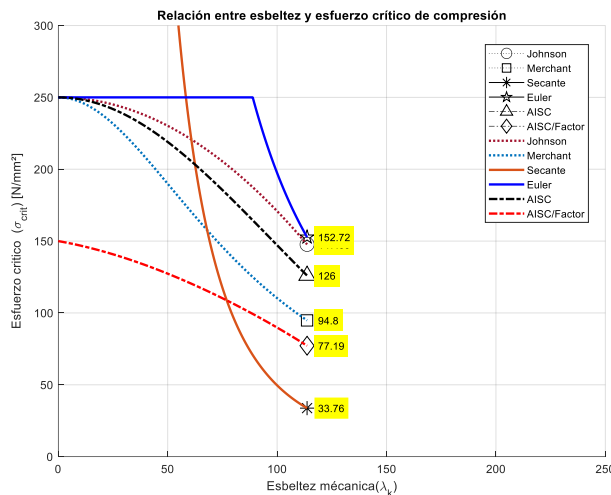


Figura 7 Gráfica de la relación de esbeltez vs esfuerzo crítico de elemento estructural con longitud de 2200 mm sección C abierta pestañas 17 mm. Fuente: desarrollo propio.

La figura 8, indica que al configurar secciones cajón aun cuando estas no se refuerzan con pestañas, el comportamiento pasa a la zona de valores de f_y , menores a $0.5f_y$, por ello, para resultados de validez se requiere solo de una simulación Lineal, se destaca la observación de un valor fuera del máximo esfuerzo de fluencia, que registra la curva de la secante. El valor de la relación de esbeltez se determina como 54.

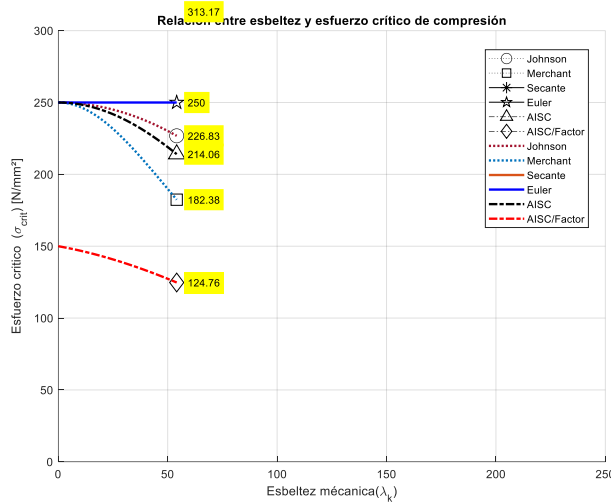


Figura 8 Gráfica de la relación de esbeltez vs esfuerzo crítico de elemento estructural con longitud de 2200 mm sección C cajón sin pestañas. Fuente: desarrollo propio.

La figura 9, refiere que el uso de pestañas disminuye el valor del esfuerzo crítico de falla, sin embargo, algunas curvas se encuentran por arriba de $0.5f_y$. Con respecto a la referencia del valor de la curva de Euler se determina que un análisis lineal sería suficiente para realizar un análisis y simulación por software basado en el MEF. La relación de esbeltez se determina con un valor de Lineal 55.

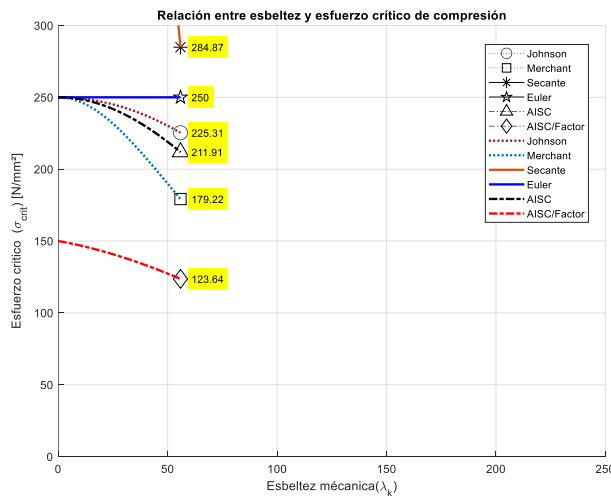


Figura 9 Gráfica de la relación de esbeltez vs esfuerzo crítico de elemento estructural con longitud de 2200 mm sección C cajón pestañas 8.5 mm. Fuente: desarrollo propio.

La figura 10, que cuenta con la condición de fabricación nominal del perfil C, con respecto al tamaño de las pestañas que se midieron de 17 mm. El valor del esfuerzo crítico mostrado por la curva de la secante disminuyó, pero, aun así, la mayoría de los valores son mayores a $0.5f_y$, que refiere un incremento de resistencia por la adición de las pestañas. El valor de la relación de esbeltez es de 58, siendo importante mencionar que tanto la estabilidad como su comportamiento a pandeo local es más factible de replicar mediante la simulación virtual-digital, debido a que la inercia deja de ser simétrica y la falla por pandeo local tiende a originarse por esta referencia, debido a que un eje se puede considerar como débil cuando tiene el menor momento de inercia.

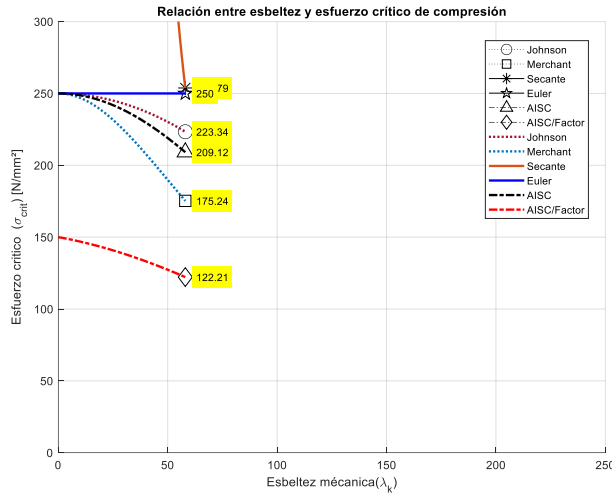


Figura 10 Gráfica de la relación de esbeltez vs esfuerzo crítico de elemento estructural con longitud de 2200 mm sección C cajón pestañas 17 mm. Fuente: desarrollo propio.

La figura 11a, verifica que los valores del esfuerzo crítico se acercan a $0.5f_y$, esta condición mantiene el comportamiento de la estabilidad de los elementos estructurales esbeltos de acero, dentro de los límites del esfuerzo de fluencia. Siendo requerida una simulación lineal para determinar comportamientos cercanos a la realidad por la simulación virtual-digital. Se destaca la convergencia entre las fórmulas de la Secante y del AISC una teórica y otra experimental que distinguen la validez del presente estudio. El valor de la relación de esbeltez se estimó en 62.

En otro momento aleatorio, con una finalidad ilustrativa, también se observó la convergencia de las curvas de la relación de esbeltez vs esfuerzo crítico (figura 11b). Al multiplicar al doble de manera arbitraria el valor del área con el mismo valor del menor momento de inercia, se observó que la falla por pandeo global es más probable debido a que la relación de esbeltez toma un valor de 88.

El comportamiento de los valores de la relación de esbeltez y del esfuerzo crítico, orienta la toma de decisiones a realizar un análisis no lineal para determinar el desplazamiento de la falla por pandeo global.

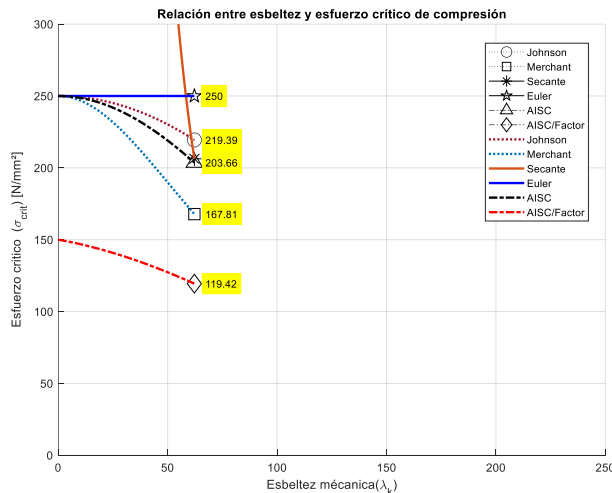


Figura 11a Gráfica de la relación de esbeltez vs esfuerzo crítico de elemento estructural con longitud de 2200 mm sección C cajón pestañas 34 mm. Fuente: desarrollo propio.

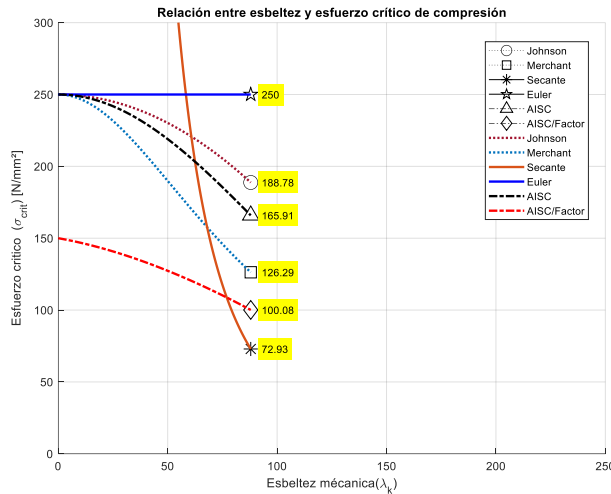


Figura 11b Gráfica de la relación de esbeltez vs esfuerzo crítico de elemento estructural con longitud de 2200 mm sección C cajón pestañas 34 mm y multiplicación del área por un valor de 2. Fuente: desarrollo propio.

SIMULACIÓN DE LAS GRÁFICA DE LA RELACIÓN DE ESBELTEZ

Esta sección presenta los resultados del análisis y la simulación realizados por medio del software ANSYS Student Version. La ejecución fue de tipo no lineal en todas las simulaciones (figuras 12-17):

- Para determinar el factor de multiplicación por el modo de pandeo que permite establecer la carga crítica, se utilizó una carga inicial de 1 Newton, que se estableció a partir de un análisis lineal.
- En cuanto al modo de pandeo se solicitaron tres valores y se tomo de referencia el primer modo, como carga crítica.
- Para estimar la fuerza y desplazamiento en el eje Y (vertical), se utilizó un análisis no lineal que permite capturar el comportamiento del elemento estructural ante el pandeo global, que también se muestran en gráficas siguientes.

La figura 12, muestra la simulación de la sección C abierta sin pestañas en la figura 12a, se observa un comportamiento de pandeo global, donde la influencia de la ausencia de las pestañas muestra que no se genera deformación de la sección transversal y la fuerza y deformación se concentran en la sección media longitudinal del elemento estructural.

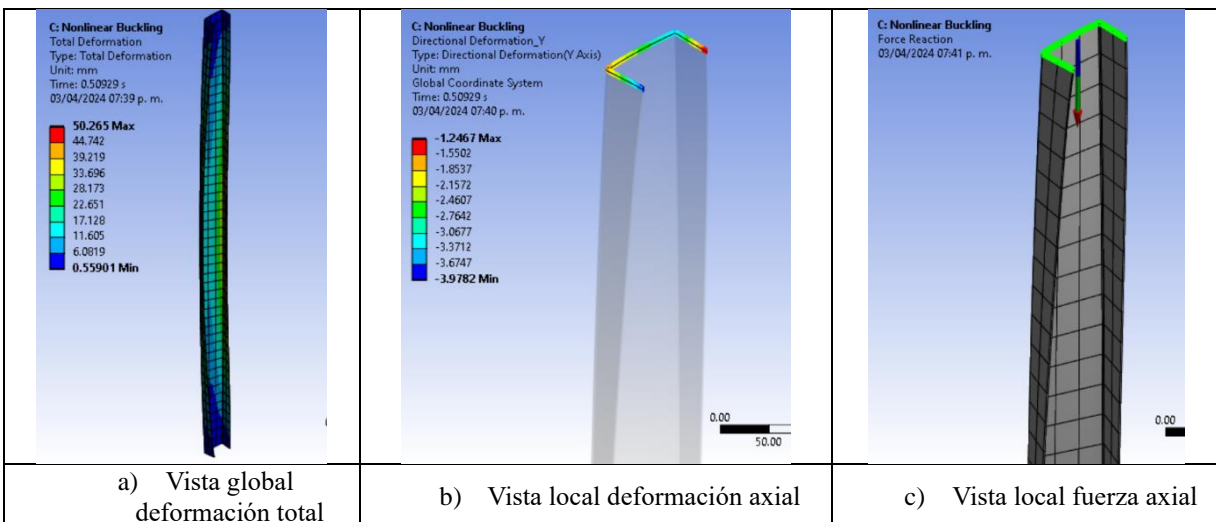


Figura 12 Comportamiento No Lineal de sección C abierta pestañas 0 mm. Fuente: desarrollo propio.

La figura 13, muestra la simulación de la sección C abierta con pestañas de 17 mm, en la figura 13a, se observa un comportamiento de pandeo global menor a la sección sin pestañas (figura 12a), donde la influencia de las pestañas muestra que se genera deformación de la sección transversal, disminuyendo la concentración de la fuerza y la deformación en la sección media longitudinal del elemento estructural.

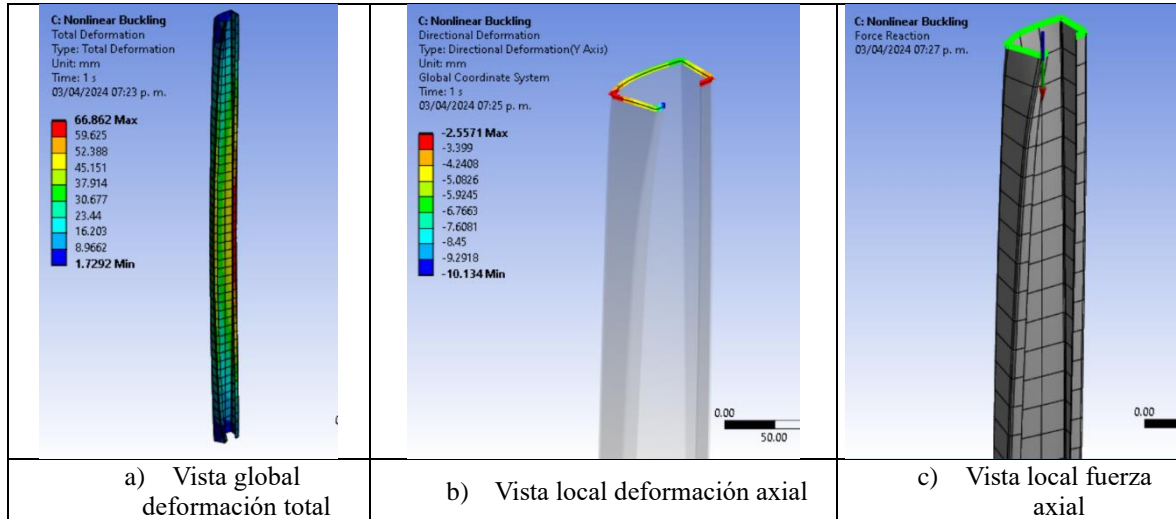


Figura 13 Comportamiento No Lineal de sección C abierta pestañas 17 mm. Fuente: desarrollo propio.

La figura 14, muestra la simulación de la sección C tipo cajón sin pestañas, en la figura 14a, se observa un comportamiento de pandeo global mucho menor a la sección abierta sin y con pestañas (figuras 11a y 12a), donde la influencia de ausencia de las pestañas muestra que se genera deformación proporcional de la sección transversal, disminuyendo la concentración de la fuerza y la deformación en la sección media longitudinal del elemento estructural.

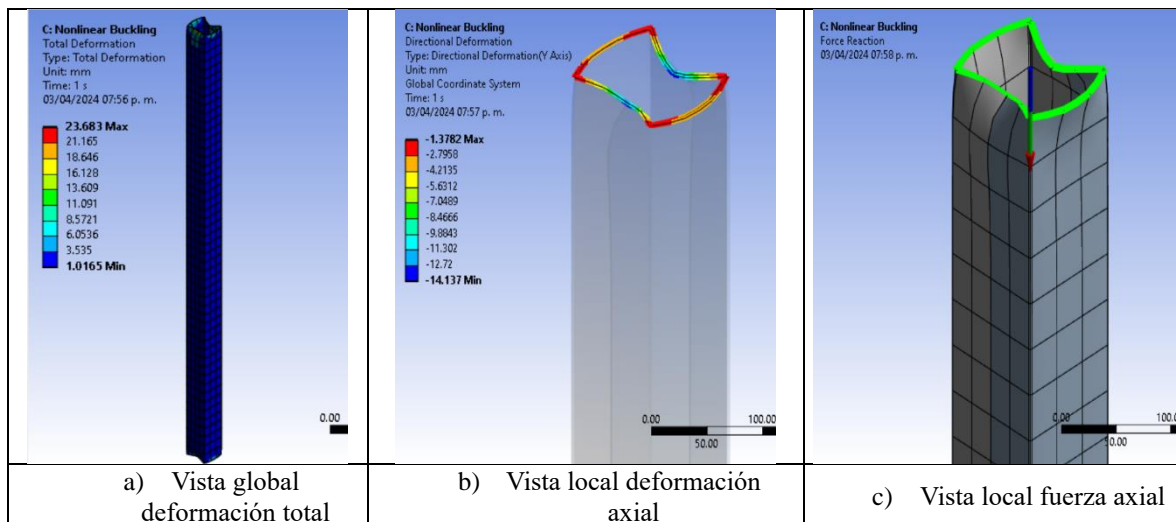


Figura 14 Comportamiento No Lineal de sección C tipo cajón pestañas 0 mm. Fuente: desarrollo propio.

La figura 15, muestra la simulación de la sección C tipo cajón con pestañas de 8.5 mm, en la figura 15a, se observa un comportamiento de pandeo global mucho menor a la sección tipo cajón sin pestañas (figuras 14a), donde la influencia de presencia de las pestañas muestra que se genera una deformación no proporcional en la sección transversal, siendo más débil los bordes sin pestañas, y continua disminuyendo la concentración de la fuerza y la deformación en la sección media longitudinal del elemento estructural.

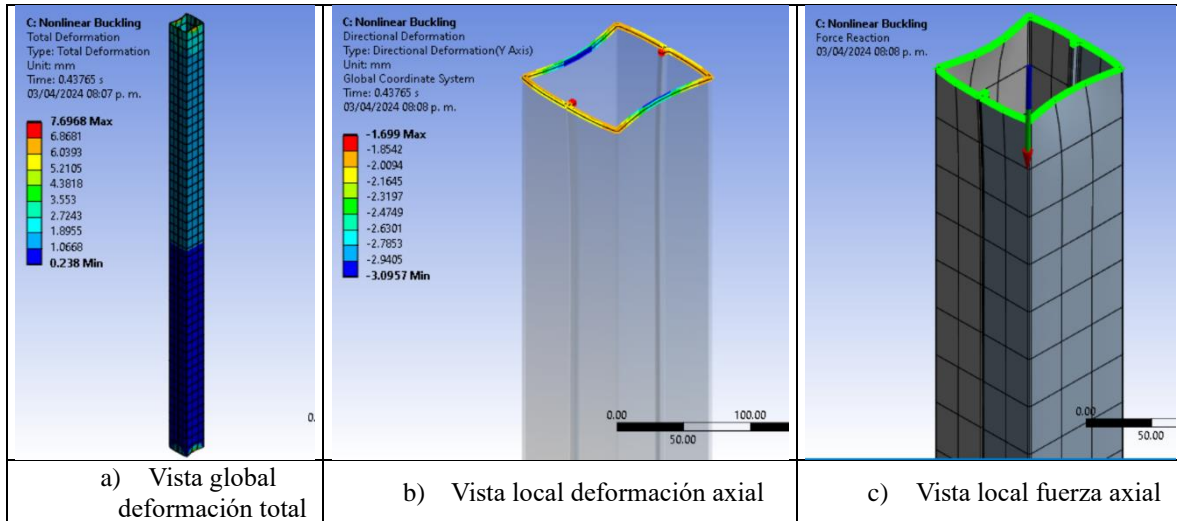


Figura 15 Comportamiento No Lineal de sección C tipo cajón pestañas 8.5 mm. Fuente: desarrollo propio.

La figura 16, muestra la simulación de la sección C tipo cajón con pestañas de 17 mm, en la figura 16a, se observa un comportamiento de pandeo global mayor a la sección tipo cajón con pestañas de 8.5 mm (figura 15a), donde por la influencia de las pestañas más grandes se observa una deformación proporcional en la sección transversal, compensando la deformación de los bordes sin pestañas, y se incrementa la concentración de la fuerza y la deformación en la sección media longitudinal del elemento estructural.

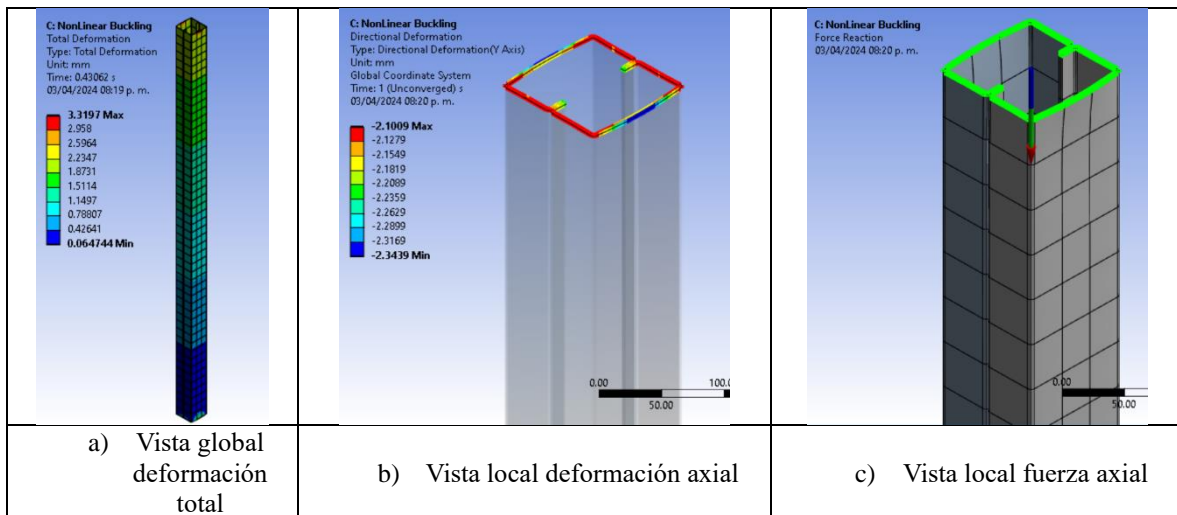


Figura 16 Comportamiento No Lineal de sección C tipo cajón pestañas 17 mm. Fuente: desarrollo propio.

La figura 17, muestra la simulación de la sección C tipo cajón con pestañas de 34 mm, en la figura 17a, se observa un comportamiento de pandeo global mayor a la sección tipo cajón con pestañas de 17 mm (figura 16a), donde por la influencia de las pestañas más grandes se observa una deformación proporcional y homogénea en la sección transversal, compensando la deformación de los bordes sin pestañas, y se incrementa la concentración de la fuerza y la deformación en la sección media longitudinal del elemento estructural.

Simplificando el análisis la presencia de pestañas disminuye la deformación de la sección transversal de los elementos estructurales ante una carga crítica y permite que la fuerza y el desplazamiento se transmitan a la sección central longitudinal, disminuyendo la ocurrencia de un colapso súbito, sin embargo, para hacer una afirmación se requiere ampliar el estudio a estados límites de pandeo local y flexotorsión, de manera que sea mucho más amplio el panorama de las fallas por inestabilidad elástica e inelástica.

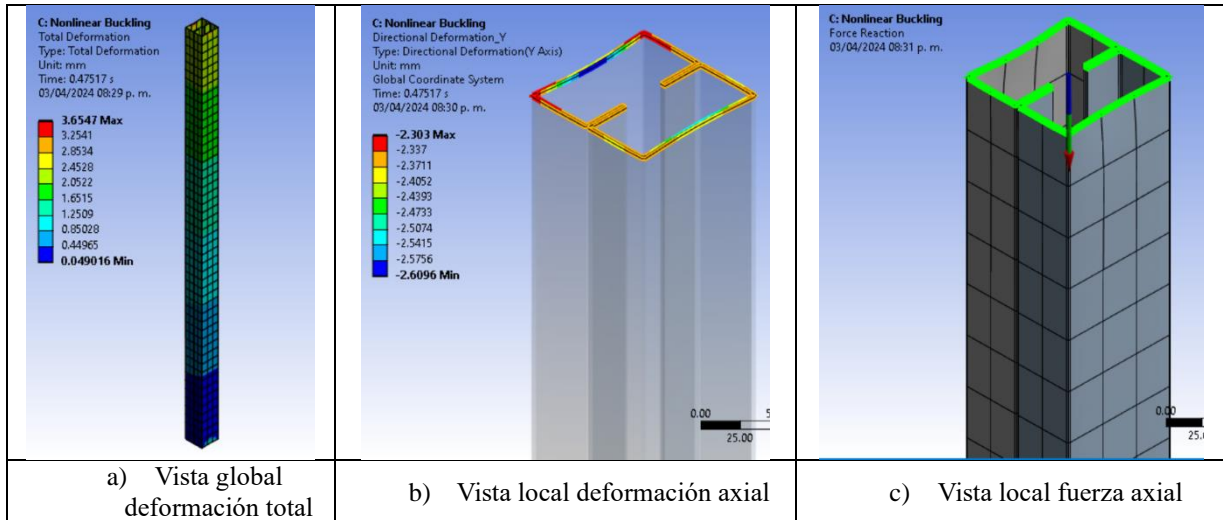


Figura 17 Comportamiento No Lineal de sección C tipo cajón pestañas 34 mm. Fuente: desarrollo propio.

La tabla 1, es el concentrado de los resultados de la fuerza máxima del análisis y simulación de pandeo global por el MEF, de las diversas configuraciones geométricas de la sección transversal. Asimismo, la tabla 2, concentra los resultados de la comparativa de radio de giro y la variación de la carga crítica y desplazamientos axiales.

Tabla 1 Concentrado de la comparativa del análisis y simulación por el MEF de las fuerzas de pandeo global. Fuente: desarrollo propio.

	Pandeo Lineal			Pandeo No Lineal	
	Modo 1 Pandeo (N)	Factor de Multiplicación (N)	Fuerza Máxima (N)	Fuerza Máxima (Ton)	Desplazamiento Máximo (mm)
1. Sección Simple C/pestañas 17 mm	52784.00	1.00	52784.00	5.27	1.40
	Pandeo Lineal			Pandeo No Lineal	
2. Sección Simple S/pestañas	39194.00	1.00	39194.00	3.91	1.25
	Pandeo Lineal			Pandeo No Lineal	
3. Cajón Sin Pestañas	140180.00	1.00	140180.00	14.01	1.60
	Pandeo Lineal			Pandeo No Lineal	
4. Cajón C/Pestañas 8.5 mm	192970.00	1.00	192970.00	19.29	1.95
	Pandeo Lineal			Pandeo No Lineal	
5. Cajón C/Pestañas 17 mm	211150.00	1.00	211150.00	21.11	2.10
	Pandeo Lineal			Pandeo No Lineal	

6. Cajón C/Pestañas 34 mm	Modo 1 Pandeo (N)	Factor de Multiplicación (N)	Fuerza Máxima (N)	Fuerza Máxima (Ton)	Desplazamiento Máximo (mm)
	290880.00	1.00	290880.00	29.09	2.30

DISCUSIÓN

En el estado del arte (Pomares et al., 2021) que refiere la falla por pandeo global, establece que el radio de giro es un elemento indispensable para determinar el comportamiento de los elementos estructurales esbeltos. Sin embargo, la recomendación es continuar evaluando relaciones más complejas que expliquen, contribuyan y complementen los aportes teóricos y experimentales existentes, más allá del radio de giro como variable de mayor relevancia, permitiendo observar después del análisis y simulación por MEF en la tabla 2, que:

- En secciones abiertas al disminuir disminuye la capacidad de carga crítica de pandeo (elemento 2 de la tabla 2).
- En secciones cerradas al disminuir el radio de giro incrementa la capacidad de carga crítica por pandeo (elemento 6 de la tabla 2).
- Al variar el área de las secciones transversales, mientras mayor sea el área transversal mayor será la capacidad de carga crítica.

Tabla 2 Concentrado de la comparativa radio de giro-relación de esbeltez-carga crítica. Fuente: desarrollo propio.

Elemento 2200 mm	Longitud Pestaña (mm)	Área Sección Transversal (mm ²)	Radio de giro (Menor)	Relación de Esbeltez	Carga crítica de falla (Newton)	Carga crítica de falla (Ton)
1 Sección C abierta	17.00	458.4	19.35	113.69	52784.00	5.28
2 Sección C abierta	0.00	398.4	16.08	136.85	39194.00	3.92
3 Sección Cajón	0.00	796.8	40.66	54.11	140170.00	14.02
4 Sección Cajón	8.50	848.8	39.40	55.84	192970.00	19.30
5 Sección Cajón	17.00	916.8	37.91	58.04	211150.00	21.12
6 Sección Cajón	34.00	1052.8	35.38	62.19	290880.00	29.09

Las figuras 18 perfil C abierto con pestañas de 17 mm y 19 perfil C abierto sin pestañas, son las gráficas del análisis y la simulación realizada por MEF, en ambos casos el comportamiento es inestable, y asociado a la relación de esbeltez. En la figura 18, se presenta un comportamiento no lineal muy definido y posteriormente se muestra la falla a poco más de 6.5 Tn. En cuanto al perfil sin pestañas el comportamiento es muy definido de forma lineal hasta 3 Tn y posteriormente presenta un comportamiento no lineal y falla a poco más de 5 Tn. En ambos casos la inestabilidad es mucho mayor en el perfil sin pestañas, así como también presenta la menor capacidad de carga crítica.

La figura 20, es una comparativa de las gráficas de las figuras 18 y 19, que hace evidente la diferencia de capacidad de carga y la tendencia de falla abrupta, por parte de la sección sin pestañas.

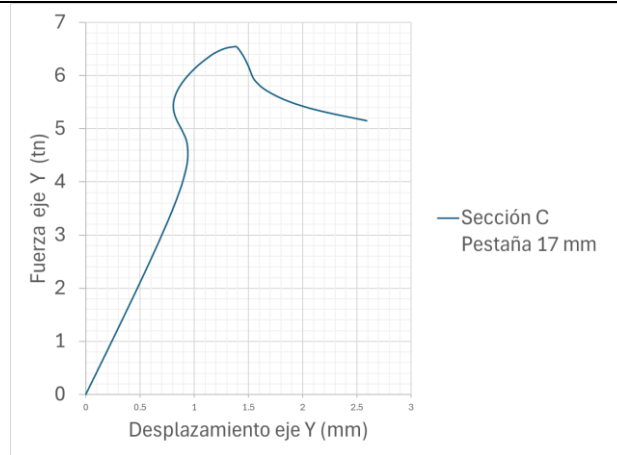


Figura 18 Gráfica acumulativa del comportamiento No Lineal de sección C abierta pestañas 17 mm.
Fuente: desarrollo propio.

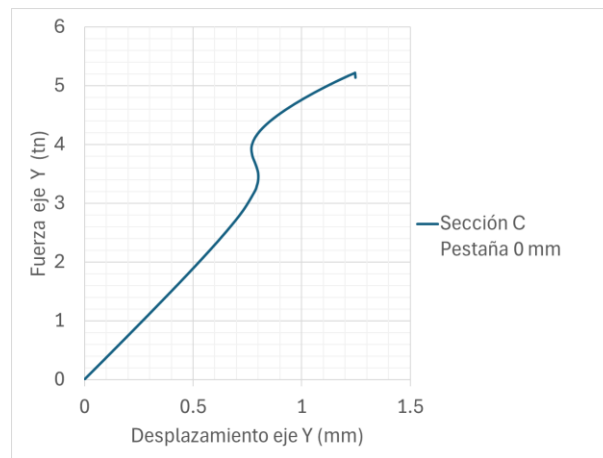


Figura 19 Gráfica acumulativa del comportamiento No Lineal de sección C abierta pestañas 0 mm.
Fuente: desarrollo propio.

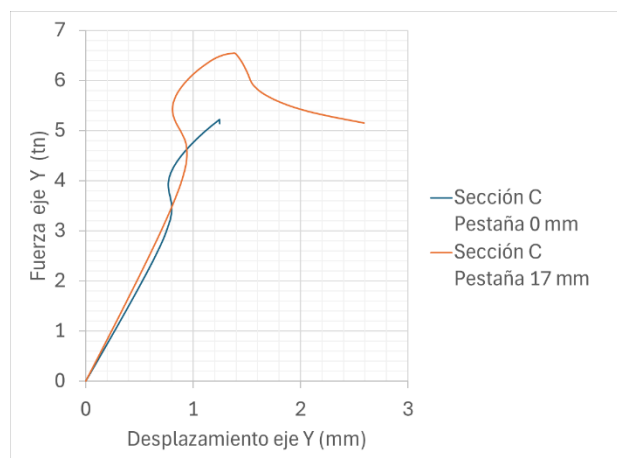


Figura 20 Gráfica relación uno a uno comparativa de sección C abierta con pestañas de 17 mm y pestañas de 0 mm. Fuente: desarrollo propio.

La sección tipo cajón sin pestañas figura 21, muestra un comportamiento lineal hasta la falla por fluencia y posteriormente pierde su capacidad de carga, presentando grandes deformaciones.

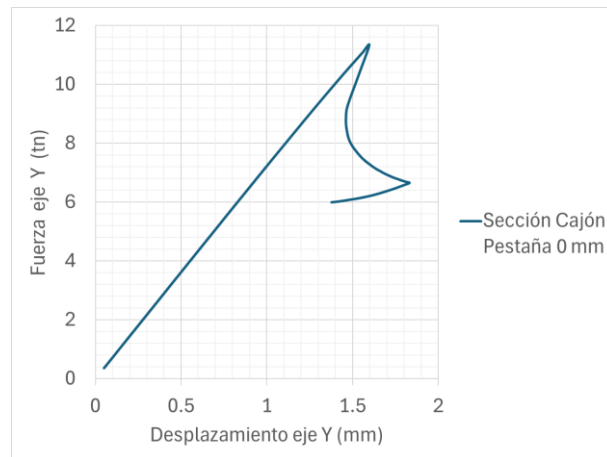


Figura 21 Gráfica del comportamiento No Lineal de la sección C tipo cajón con pestañas 0 mm.
Fuente: desarrollo propio.

La sección tipo cajón con pestañas de 8.5 mm (figura 22), muestra un comportamiento singular, una vez que falla su capacidad de carga, refiere una rápida compresión y posteriormente presenta grandes deformaciones.

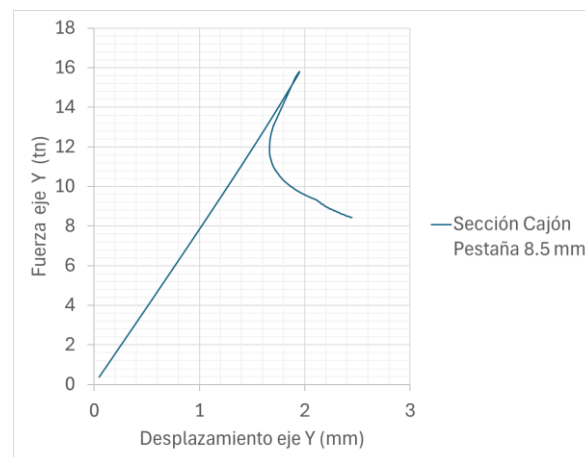


Figura 22 Gráfica del comportamiento No Lineal de la sección C tipo cajón con pestañas 8.5 mm.
Fuente: desarrollo propio.

La sección tipo cajón con pestañas de 17 mm (figura 23), muestra un comportamiento lineal desplazamiento-carga, con reducida zona de fluencia. Con una capacidad de carga mayor en cuanto fuerza crítica con respecto a la sección con pestañas de 8.5 mm y sin pestañas. Esta sección presenta un estable desplazamiento lineal, siendo su comportamiento no dúctil ante la falla, presentando pequeñas deformaciones ante colapso.

La sección tipo cajón con pestañas de 34 mm (figura 24), muestra un comportamiento lineal desplazamiento-carga, con reducida zona de fluencia. Con una capacidad de carga mayor en cuanto fuerza crítica con respecto a la sección con pestañas de 8.5 y 17 mm. Es la sección que presenta el mayor desplazamiento lineal, siendo su comportamiento no dúctil ante la falla, presentando pequeñas deformaciones ante colapso.

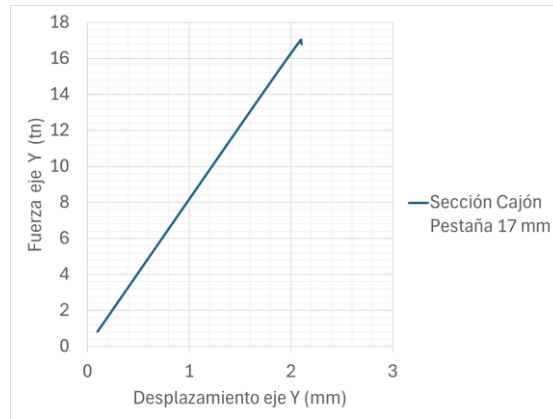


Figura 23 Gráfica del comportamiento No Lineal de la sección C tipo cajón con pestañas 17 mm.
Fuente: desarrollo propio.

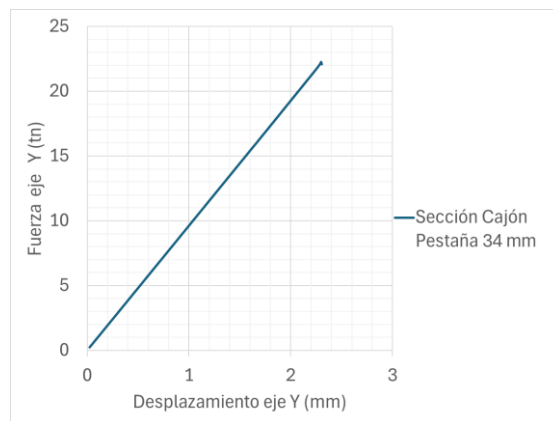


Figura 24 Gráfica del comportamiento No Lineal de la sección C tipo cajón con pestañas 34 mm.
Fuente: desarrollo propio.

La figura 25, muestra de manera comparativa el comportamiento, que cada sección transversal tipo cajón, tiene con respecto a la variación del tamaño de las pestañas. Se identifica que la falla del elemento estructural esbelto es imprevisto y abrupto, a diferencia que en las secciones sin o con menor dimensión de pestaña, permite observar un comportamiento dúctil.

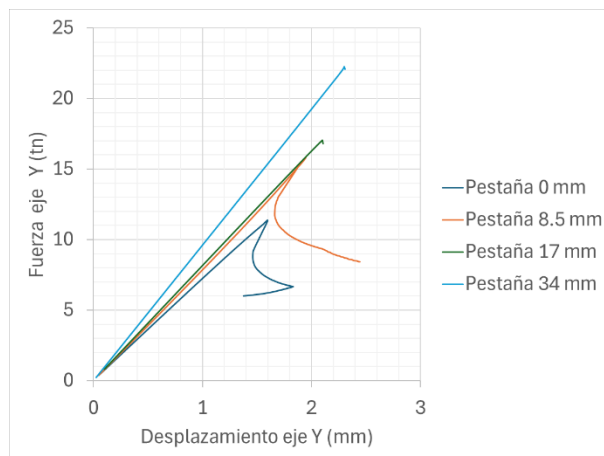


Figura 25 Gráfica comparativa de la sección C tipo cajón con tamaño de pestañas: 0, 8.5, 17 y 34 mm.
Fuente: desarrollo propio.

CONCLUSIONES

En cuanto al estudio y análisis convencional en las IES de falla por pandeo global en elementos esbeltos por parte de la academia. Ha sido claro que la revisión de los procedimientos tradicionales que son reportados por diversas referencias bibliográficas, este debe ser revalorado como tema de investigación incorporando el análisis y simulación por el MEF. Favoreciendo una sólida formación profesional aplicada, sobre los conceptos de diseño estructural de sistemas esbeltos, que presentan geometrías, solicitaciones de carga y restricciones complejas, debido a que la evaluación de su comportamiento requiere una revisión extraordinaria y alternativa al diseño convencional.

El aprovechar los recursos numéricos de los softwares de CAD/CAM/CAE es una ventaja competitiva para evaluar las propiedades geométricas de nuevas secciones transversales, para elementos esbeltos de acero, ya que aceleran las tareas y simplifican los diseños de complejas y abstractas secciones transversales, al transformarlas a geometrías simples y definidas como sólidos primitivos o elementos unidimensionales, sin embargo, la capacidad para reproducir los modelos en 3D, es una favorable característica que emula la realidad operativa del comportamiento a falla por pandeo global de los elementos y sistemas estructurales.

Un beneficio del software basado en el MEF es la inmediata evaluación a través de gráficas de comportamiento, gestionadas por software de alto nivel, que proporciona resultados tabulados en función de los grados de libertad de cada elemento estructural. Siendo una alternativa factible que permite observar la tendencia del comportamiento físico cuando falla de un elemento estructural esbelto de acero, tanto en un análisis lineal como no lineal.

Finalmente, el software comercial basado en el MEF, con una orientación previa de análisis (simulación lineal o no lineal) permite al diseñador estructural realizar evaluaciones de comportamiento cercanas a la realidad con alta aproximación y proporcionar un nuevo apoyo en el diseño de construcciones verticales que utilizan elementos estructurales esbeltos de acero.

TRABAJO FUTURO

En la siguiente evaluación del comportamiento de los radios de giro y su incidencia en la falla por pandeo, se incluirá el fenómeno de las imperfecciones de la geometría y el comportamiento a flexotorsión, para comparar la evolución compleja de una falla por pandeo.

REFERENCIAS

AISC. (2018). “**Steel Construction Manual 2017**”, AISC.

alacero. (2016). “**Especificaciones para construcciones de acero**”, Retrieved 26 de marzo de 2024, from https://www.canacero.org.mx/aceroenmexico/descargas/especificacion_para_construcciones_de_acero-aisc_360-16.pdf

Beer, F., Johnston, E., DeWolf, J., y Mazurek, D. (2010). “**Mecánica de Materiales**”, Mc Graw Hill.

Fratamico, D. C. (2017). “**Experiments, analysis and design of built-up cold-formed steel columns**”, Thesis for the degree of Doctor of Philosophy, Johns Hopkins University, Baltimore. Retrieved 03 de 2024.

García-Argüelles, L., López-MEdian, F., Moreno-Toiran, G., y Ortigosa-Garcell, C. (2018). “**El método experimental profesional en el proceso de enseñanza–aprendizaje de la Química General para los estudiantes de la carrera de ingeniería mecánica**”, *Revista Cubana de Química*, 30(2), 328-345. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-54212018000200013

Gere, J., y Goodno, B. (2009). “**Mecánica de Materiales**”, CENGAGE.

Hernández-Junco, L., Machado-Bravo, E., Martínez-Sarda, E., Bermúdez-Jiménez, L., y Andreu-Gómez, N. (2022). “**El método de solución de las tareas experimentales en el laboratorio químico**”, *Revista Cubana de Química*, 34(1), 19-33. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-54212022000100019



Lei, G., Ming, N., Xingkun, X., Linyue, B., y Lixiang, H. (2022). “**Local and Global Interactive Buckling Capacity of Thin-Walled Box-Section Members of BS700 High-Strength Steel under Axial Compression**”, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022(1), 1-12. <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2022/9259324>

López, D. G. (2018). **Estabilidad Lateral: Momento Crítico de Vuelco**”, Trabajo de fin de Máster, Universidad de Valladolid, Valladolid. Retrieved 03 de 2024.

Pomares, J., Pereiro-Barceló, J., González, A., y Aguilar, R. (2021). “**Safety Issues in Buckling of Steel Structures by Improving Accuracy of Historical Methods**”, *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 18(22), 1-21. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ijerph182212253>

Sabau, G. (2020). “**Flexural Buckling of High-Strength Steel Columns**”, LULEA University of Tehnology. Retrieved 10 de marzo de 2024, from <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1393318/FULLTEXT01.pdf>

Ternium. (2023). “**Ternium Tubería y perfiles**”, Retrieved 26 de marzo de 2024, from Descubre las soluciones que Ternium tiene para ti: https://mx.ternium.com/es/productos?utm_medium=cpc&utm_source=google&utm_term=ternium%20acero&utm_campaign=aw_ternium_brn_think_sem_brand_terms_leads&hsa_acc=5368015878&hsa_cam=15193289641&hsa_grp=128249293566&hsa_ad=646279977323&hsa_src=g&hsa_tgt=kwd-322

Zurita-Cruz, J., Márquez-González, H., Miranda-Novales, G., y Villasís-Keever, M. (2018). “**Estudios experimentales: diseños de investigación para la evaluación de intervenciones en la clínica**”, *Rev Alerg Mex.*, 65(2), 178-186. <https://doi.org/https://doi.org/10.29262/ram.v65i2.376>