

DESARROLLO DE UN PROGRAMA EN MATLAB PARA FACILITAR EL ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LAS OREJAS DE IZAJE.

Celia Domínguez E.¹ Edwin Behrens R.² Minor Nozaki U.³

RESUMEN:

El presente proyecto aplicado, genera un programa que permite realizar los cálculos necesarios para el diseño de las orejas de izaje.

El programa permite utilizar de manera didáctica y confiable una ventana virtual, que incluye diversas funciones necesarias para su correcto uso. Dentro de los resultados que se pueden obtener a través de él, se consideran principalmente los siguientes: visualización de deformaciones y tensiones generadas por un sistema de fuerzas planas aplicadas, verificación geométrica según los requerimientos establecidos en “Especificación ANSI/AISC 360-10 para construcciones de acero”, perteneciente a *American Institute of Steel Construction*, y verificación de estados tensionales de acuerdo a una tensión admisible introducida a criterio del usuario. Estos resultados se obtienen a través del ingreso de los siguientes datos al software: dimensiones geométricas, fuerza y ángulos de aplicación de ella sobre la oreja de izaje, selección de unidades de medidas y tamaño de malla que se desea generar.

La programación se realizó a través del uso de la interfaz gráfica de Matlab GUIDE (*Graphical User Interface Development Environment*), y se validó con el software ANSYS, en donde se obtuvo un porcentaje de error de un 3% para las deformaciones, y un 5% para la tensión Von Mises, lo cual es considerado aceptable en ambos casos, debido a que el mallado que se genera en los *softwares* no es el mismo.

ABSTRACT:

The application of this project, generates a program that allows to perform the necessary calculations for the design of the hoist ears.

The program allows to use in a didactic and reliable way a virtual window, which includes various functions necessary for its correct use. Among the results that can be obtained through it, are mainly considered the following: visualization of deformations and stresses generated by a system of applied flat forces, geometric verification according to the requirements established in "ANSI/AISC 360-10 Specification for Steel Constructions", belonging to the American Institute of Steel Construction, and verification of tension states according to an admissible tension introduced at the user's discretion. These results are

¹ Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil, U. Católica de la Santísima Concepción, cdominguez@ing.ucsc.cl

² Profesor Guía, Departamento de Ingeniería Civil, U. Católica de la Santísima Concepción, ebehrens@ucsc.cl.

³ Profesor Informante, Macrosteel, Soluciones Integrales de Ingeniería, Chacabuco 485, 5to piso, Concepción, minornozaki@gmail.com.

obtained the entry of the following data into the software: geometric dimensions, strength and angles of application of it over the hoisting ear, selection of units of measures and mesh size to generate.

Programming was done through the use of the Matlab GUIDE (Graphical User Interface Development Environment) graphical interface, and was validated with ANSYS software, where an error rate of 3% was obtained for deformations, and 5% for Von Mises stress, which is considered acceptable in both cases, because the meshing generated in the software is not the same.

1 INTRODUCCIÓN

Las primeras grúas fueron inventadas en la antigua Grecia, principalmente para la construcción de edificios de grandes dimensiones. En la alta Edad Media, eran utilizadas en puertos y astilleros para estibar y construir barcos, posteriormente, con la llegada de la revolución industrial, aquellas que se construían de madera hasta ese entonces, pasaron a ser desarrolladas a base de hierro fundido y acero.

En la actualidad estas maquinarias son utilizadas constantemente para la construcción de estructuras con elevadas alturas, por lo que su correcto uso es importante para evitar accidentes. Todos los equipos de izaje deben ser examinados, certificados y verificados con la normativa de fabricación correspondiente, en donde uno de sus accesorios fundamentales, son las orejas de izaje. Este elemento estructural, consiste en una placa de acero de forma trapezoidal (generalmente) que cuenta con un agujero circular en su extremo superior, su principal función es generar puntos de apoyo para el levante de diferentes cargas que deseen ser transportadas, encontrándose soldadas a ellas con el fin de generar una mayor resistencia. En algunos casos, las orejas están compuestas por un sistema de tres de ellas y un pasador, en donde generalmente son unidas al sistema de izaje a través de grilletes o ganchos, tal como se puede observar en la Figura 1.

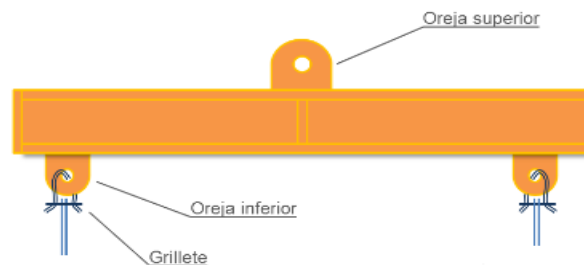


Figura 1. Sistema de izaje compuesto por tres orejas. Fuente. Elaboración propia.

A finales del siglo XXI, gracias a los avances tecnológicos, se han creado diversos *softwares* de uso mecánico y estructural, los cuales son utilizados para llevar a cabo el análisis y la verificación del diseño. Estos *softwares* trabajan a través de la implementación del método

de elementos finitos, con el propósito de obtener con mayor precisión el comportamiento real que se genera en múltiples elementos estructurales, al momento en que son sometidos a diversas utilidades. Así, finalmente, se logran estudiar con un mayor detalle, las tensiones y deformaciones a las cuales un sistema mecánico responde frente a un sistema de cargas externas. En relación a lo mencionado, la idea principal del trabajo mostrado en el presente documento, es crear un programa que optimice el análisis del diseño de las orejas de izaje, el cual se implementa a través de la interfaz gráfica de Matlab.

Con el fin de que el programa sea accesible para el diseñador, se define un orden para el ingreso de datos, el cual contempla las dimensiones geométricas del elemento, el ángulo de aplicación de la fuerza a la cual se encuentra sometido, el refinamiento de la malla que se desea generar, entre otros. Los resultados que arroja el programa, se verifican geoméricamente, según lo establecido en “Especificación ANSI/AISC 360-10 para construcciones de acero”, perteneciente a *American Institute of Steel Construction*, y son validados con el software ANSYS.

2 METODOLOGÍA

2.1 Interfaz gráfica de Matlab

El programa creado para analizar y verificar el diseño de las orejas de izaje, se implementa a través de la interfaz gráfica de Matlab GUIDE (*Graphical User Interface Development Environment*), en donde se logra que sea consistente y fácil de entender.

La interfaz utilizada, entrega la posibilidad de trabajar con diversas componentes (controles, botones, menús, gráficos, cuadros de diálogos, etc.), con el fin de proporcionar que el diseñador pueda utilizar el software, sin tener la obligación de recurrir a la incómoda sintaxis funcional, necesaria al momento de trabajar desde la línea de órdenes en Matlab.

2.1.1 Caja de texto editable (Edit text)

La caja de texto editable es una de las propiedades fundamentales dentro de la interfaz, ya que proporciona el ingreso de los diversos inputs (variables de entrada), necesarios para lograr una correcta ejecución de los códigos que se implementan en el programa.

2.1.2 Botones (Push buttons)

Los botones cumplen una de las finalidades más importantes, puesto a que son los encargados de ejecutar el código computacional creado, con el cual se lleva a cabo el respectivo análisis de diseño, junto con las verificaciones correspondientes.



2.1.3 Botones de opción (Radio buttons)

Los botones de opción, se utilizan con el propósito de elegir diversas alternativas de selección, en las cuales se pueden implementar determinadas funciones, considerando comúnmente, la visualización gráfica de resultados.

2.1.4 Cuadro de gráficos (Axes)

La propiedad de cuadro de gráficos, es la encargada de mostrar gráficamente todos los resultados obtenidos.

2.1.5 Menú desplegable (Pop-up-menu)

Al utilizar la propiedad de menú desplegable, se despliega una ventana en donde se realiza la selección de sólo una de las opciones ilustradas, la cual es la encargada de cumplir una determinada función dentro de los códigos que se ingresan en el programa.

2.2 **Implementación del método de elementos finitos**

2.2.1 Introducción al método

En ingeniería existen varias estructuras de interés práctico, que se estudian y analizan a través del método de elementos finitos. Estos tipos de estructuras poseen una geometría prismática, a la cual se le aplica el supuesto de elasticidad bidimensional, donde dependiendo de las dimensiones relativas del prisma, y del tipo de carga a la cual son sometidas, se distinguen dos categorías:

a) Tensión plana:

El estado tensional sobre un cuerpo es de tensión plana, cuando una de sus dimensiones (espesor) es mucho más pequeña que las demás, y todas las cargas están contenidas en su plano medio, tal como se observa en la Figura 2. Los problemas estructurales que se incluyen en ésta categoría, corresponden a los elementos que poseen pared delgada.

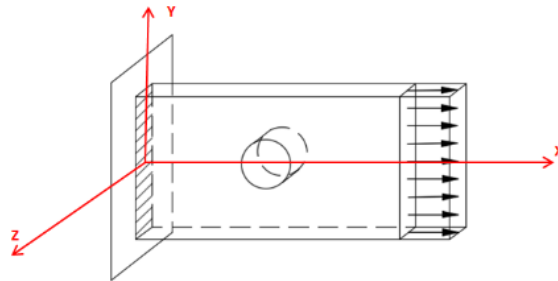


Figura 2. Ejemplo de tensión plana, correspondiente a una placa de pared delgada. Fuente. Corral, C. (2018). “Ejemplodetensiónplana”. [Figura]. Recuperado de <https://www.prontubeam.com/articulos/2018-03-23-Elasticidad-bidimensional>.

b) Deformación plana:

Se considera que un cuerpo presenta deformación plana, cuando una de sus dimensiones (longitud) es mayor a las demás, y todas las cargas están distribuidas uniformemente a lo largo de su longitud, actuando de forma ortogonal al eje longitudinal, tal como se observa en la Figura 3. Las estructuras que pueden presentar problemas de deformación plana, corresponden a presas de gravedad, tuberías, muros, túneles, entre otros.

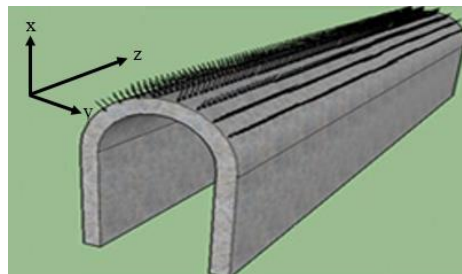


Figura 3. Ejemplo de deformación plana correspondiente a un túnel. Fuente. Elaboración propia.

De acuerdo a lo descrito, se considera que el elemento estructural en estudio, corresponde a la categoría de problemas de tensión plana, ya que las orejas de izaje se modelan como una placa, lo que corresponde a un elemento de pared delgada (se especifican sus características en el ítem que viene a continuación). Sin embargo, la teoría de elasticidad 2D, proporciona el análisis de las dos categorías de manera unificada, por lo que se debe considerar que conceptualmente, representan una clase de tipo estructural muy diferente.

El análisis de elementos finitos bidimensional, genera un modelo matemático mediante el cual el comportamiento de una estructura 3D real, se representa a través de un sólido 2D, con el fin de obtener una aproximación a la solución exacta de las ecuaciones de elasticidad, en donde la solución numérica, depende del tipo de elemento y de la calidad de la malla que se aplica.

2.2.2 Teoría de elasticidad bidimensional

Para implementar el método de elementos finitos en la teoría de análisis bidimensional, se requiere aplicar algunos conceptos:

a) Campo de desplazamiento:

Los supuestos de tensión y deformación plana, implican que las secciones transversales al eje prismático z , se deforman de igual manera, considerando un desplazamiento insignificante a lo largo del mismo, por lo que se analiza sólo una sección transversal 2D, genérica en el plano x - y .

b) Campo de deformación:

En el caso de deformación y tensión plana, se considera una deformación longitudinal ϵ_z igual a cero,. Finalmente, la tensión conjugada σ_z corresponde a cero, por lo que el vector de deformación en ambos casos se considera como:

$$\epsilon = [\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}]^T$$

c) Campo de tensión:

De acuerdo a lo descrito en el campo de deformación, se deduce que las tensiones de corte τ_{xz} y τ_{yz} son cero, y que la tensión longitudinal σ_z no contribuye al trabajo interno, lo que proporciona que en ambos casos, el vector de tensión plana se defina como:

$$\sigma = [\sigma_x, \sigma_y, \gamma_{xy}]^T$$

2.2.3 Elemento triangular de tres nodos

Este tipo de mallado, gracias a su simplicidad, es el mayormente utilizado por los ingenieros. Sin embargo, posee una precisión limitada, producto de la aproximación de desplazamiento lineal que genera campos de tensión y deformación constantes, por lo que es necesario generar mallas lo suficientemente finas, con el fin de capturar soluciones precisas en zonas de gradientes con alto desplazamiento, no obstante, debido a su geometría versátil, se considera un problema de bajo perfil, ya que es la adecuada para el refinamiento de malla adaptativa.

a) Discretización del campo de desplazamiento:

Un elemento triangular de 3 nodos, posee una numeración global i , j y k , que corresponden a los números locales 1, 2 y 3 respectivamente (Figura 4). Es importante utilizar una adecuada numeración tanto local, como global, con el propósito de generar el proceso de ensamblaje correcto.

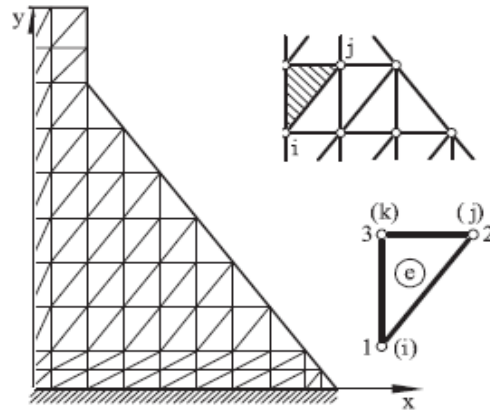


Figura 4. Elemento triangular de tres nodos. Fuente. Elaboración propia.

En la Tabla 1, se pueden observar las variables y coordenadas que se utilizan para el caso de un elemento triangular, que se compone por tres nodos.

Tabla 1. Discretización de una estructura triangular con 3 nodos.

Elemento	Nodo		Variables nodales		Coordenadas nodales	
	Local	Global	Local	Global	Local	Global
Triángulo de 3 nodos.	1	i	u_1 v_1	u_i v_i	x_1 y_1	x_i y_i
	2	j	u_2 v_2	u_j v_j	x_2 y_2	x_j y_j
	3	k	u_3 v_3	u_k v_k	x_3 y_3	x_k y_k

Con la respectiva numeración, se considera que la expresión para las funciones de forma corresponde a:

$$N_i = \frac{1}{2A^{(e)}} (a_i + b_i x + c_i y)$$

Donde

- $A^{(e)}$ es el área del elemento.
- a_i , b_i y c_i se obtienen por permutación cíclica de los índices i , j y k .
- N_i corresponde a la función de forma del nodo i , respectivamente.

En la práctica, se utiliza la misma interpolación para los desplazamientos en x e y .

b) Discretización del campo de deformación:

El vector de deformación para cualquier elemento sólido 2D se expresa como:

$$\varepsilon = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial y}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{Bmatrix} = [B_1 : B_2 : B_3] \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \end{Bmatrix}$$

Donde

$$B_i = \frac{1}{2A(e)} \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} & \frac{\partial N_i}{\partial x} \end{bmatrix}$$

c) Discretización del campo de tensiones:

La expresión discretizada para el campo de tensiones es:

$$\sigma = D \varepsilon$$

Donde D corresponde a la matriz de material elástico (matriz constitutiva).

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & 0 \\ d_{21} & d_{22} & 0 \\ 0 & 0 & d_{33} \end{bmatrix}$$

De acuerdo al teorema de Maxwell-Betti, se considera que la matriz de rigidez debe ser simétrica, pues si no, el estado elástico final no sería único, y dependería del orden y modo de aplicación de las cargas, lo que contradice el carácter lineal de la estructura.

Para el caso de elasticidad isotrópica se tiene que d_{ij} corresponde a lo ilustrado en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores correspondientes a d_{ij} .

Tensión plana	Deformación plana
$d_{11} = d_{22} = \frac{E}{1 - \nu^2}$	$d_{11} = d_{22} = \frac{E(1 - \nu)}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}$
$d_{12} = d_{21} = \nu d_{11}$	$d_{12} = d_{21} = d_{11} \frac{\nu}{1 - \nu}$
$d_{33} = \frac{E}{2(1 - \nu)}$	$d_{33} = \frac{E}{2(1 - \nu)}$

Donde E corresponde al módulo de Young y ν a la relación de Poisson.

2.3 Diseño de orejas de izaje

Las orejas de izaje pertenecen a un elemento estructural característico de las grúas, por lo que se encuentran sometidas a diversas maniobras de izaje a lo largo de su vida útil, esencialmente en etapas iniciales de un proyecto, como lo es el montaje estructural.

Con la finalidad de que éstas trabajen de manera segura, se debe realizar la verificación tanto de sus dimensiones geométricas, como de las tensiones y deformaciones resultantes al momento en que son expuestas a diversas cargas.

2.3.1 Verificación de dimensiones geométricas

Se requieren ciertos criterios de dimensiones geométricas al momento de diseñar las orejas de izaje, por lo que su verificación se realiza según lo establecido en “Especificación ANSI/AISC 360-10 para construcciones de acero”, perteneciente a *American Institute of Steel Construction*, específicamente en el comentario D5, en donde se señalan las restricciones que se deben cumplir para el caso de miembros conectados mediante pasadores. Cabe señalar que el análisis y posterior diseño proporcionado por el software propuesto, considera la utilización de orejas conectadas por medio de grilletes.

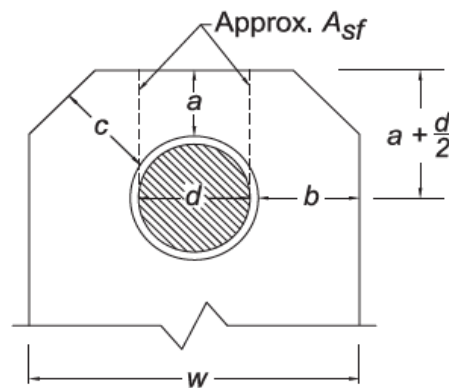


Figura 5. Dimensiones geométricas requeridas. Fuente. Figura C-D5.1. “Especificación ANSI/AISC 360-10 para construcciones de acero”.

En la Figura 5, se observan las dimensiones que se consideran al momento de realizar las restricciones, las cuales corresponde a:

- 1) $a \geq 1.33 b_e$
- 2) $w \geq 2 b_e + d$

Donde

$$b_e = 2 t + 16 \text{ mm} \leq b, \text{ (t es igual al espesor en milímetros).}$$

- 3) $c \geq a$



- 4) Cuando se espera que el pasador permita el movimiento relativo entre las partes conectadas bajo máxima carga, el diámetro de la perforación del pasador (d), no debe ser un milímetro más grande que el diámetro del pasador.

Para el caso de la geometría correspondiente al elemento estructural en estudio, se considera que $a = c$, debido a que en las orejas de izaje se representa un semicírculo en la parte superior.

2.3.2 Cálculo de tensiones y deformaciones

Una de las verificaciones más importantes en el diseño estructural de las orejas, corresponde a los estados tensionales y de deformación generados al realizar cada maniobra de montaje, esto, debido a que pueden estar sometidas a un esfuerzo, generado por un levante asociado. Para ello en este trabajo, se implementa el método de elasticidad bidimensional, en donde se debe tener en cuenta que las tensiones obtenidas son constantes en cada triángulo, siendo necesario calcular un promedio de ellas con el fin de llevarlas a cada vértice.

El diseño de las orejas es verificado a través de la tensión de Von Mises, la cual, para un estado bidimensional de tensiones, es posible determinarla a través de la siguiente expresión:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma^2_X - \sigma_X\sigma_Y + \sigma^2_Y + 3\tau^2_{XY}}$$

2.3.3 Consideraciones

Para efectos de crear una ventana virtual más completa y consistente, se implementan dos consideraciones:

- a) Aplicación de fuerza:

Cuando se realizan los cálculos para este tipo de elemento estructural, comúnmente se aplica la fuerza perpendicular al eje horizontal, sin embargo, en este caso, se implementa la opción de ingresar un ángulo de aplicación de fuerza, junto con un ángulo que especifique el área de contacto que se genera entre el pasador y el agujero. Esto, con el propósito de que sea el diseñador quien decida donde se aplica la fuerza sobre la oreja de izaje, permitiendo que se consideren diversos diámetros del pasador.

- b) Tensión admisible

Se incorpora la opción de ingresar el valor de una tensión admisible, el cual es definido a criterio del diseñador, con el fin de comprobar si el diseño cumple con las solicitaciones:

$$\sigma_{adm} \geq \sigma_{MaxVM}$$

3 RESULTADOS DE LA PROGRAMACIÓN

En la Figura 6, se presenta la ventana virtual del programa creado, en donde se requiere seguir un orden específico para obtener un buen uso del programa.

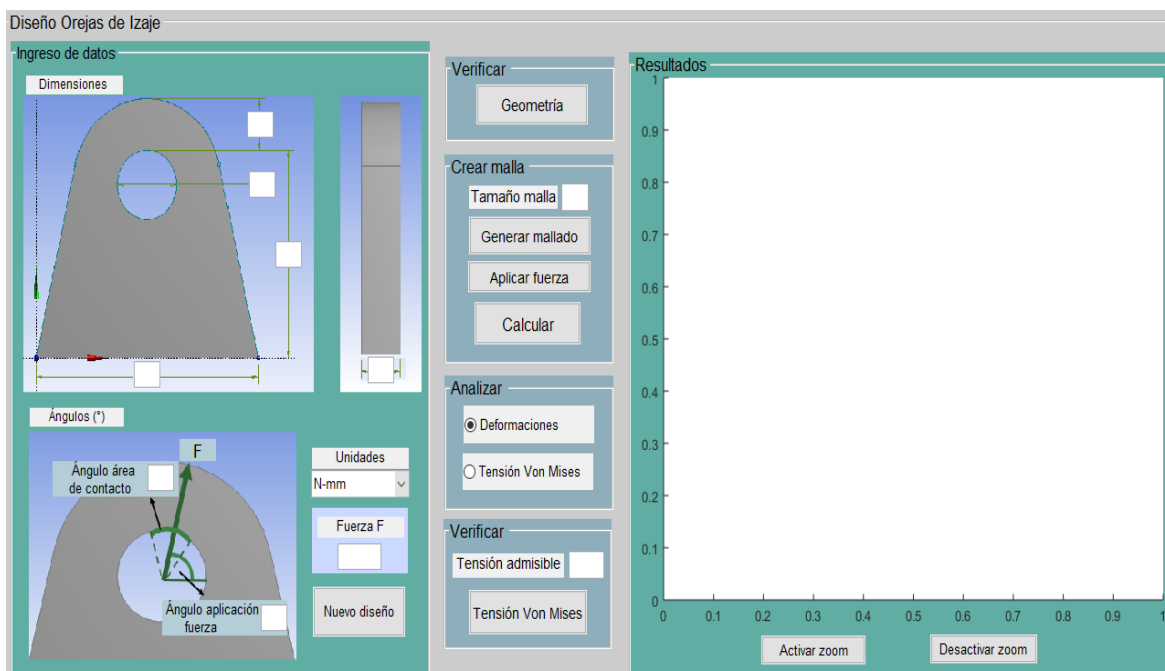


Figura 6. Imagen completa de la ventana virtual creada. Fuente. Elaboración propia.

3.1 Ingreso de datos

El programa contiene un panel llamado ingreso de datos, en el cual se ingresan las variables de entradas necesarias para el correcto funcionamiento de los botones.

a) Dimensiones

En el ingreso de las dimensiones, como se puede observar en la Figura 7, se considera la altura total (1) y (3), el diámetro del agujero (2), el ancho total (4) y finalmente el espesor (5).

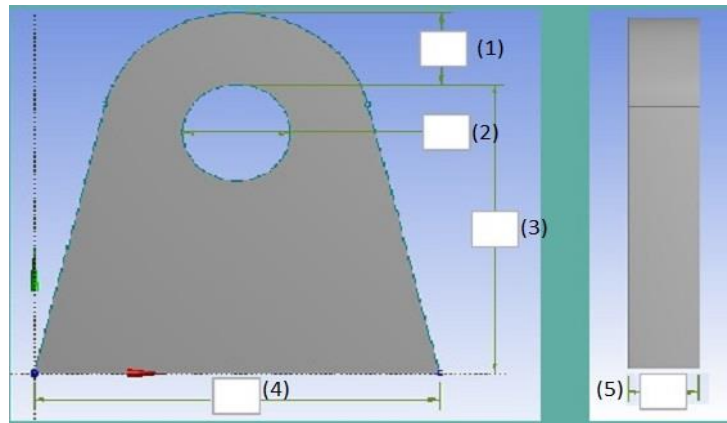


Figura 7. Dimensiones geométricas de la oreja de izaje. Fuente. Elaboración propia.

b) Ángulos

Para el ingreso de los ángulos, se especifica una fuerza F , tal como se observa en la Figura 8, con el propósito de definir el sentido de aplicación, el cual se considera con respecto a la horizontal. También se agregan dos cuadros de textos, con el fin de especificar los ángulos de aplicación y contacto de la fuerza F .

Los ángulos se ingresan en grados.

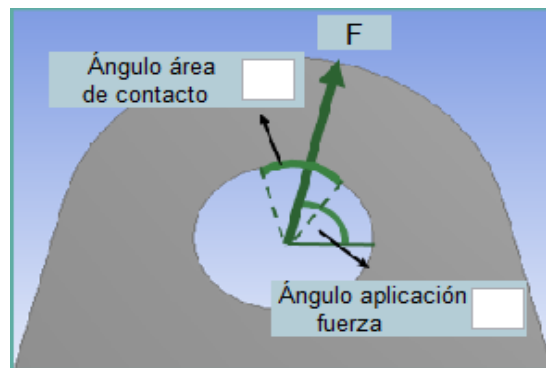


Figura 8. Ángulos necesarios para aplicar el sentido de la fuerza. Fuente. Elaboración propia.

c) Unidades

Se considera un menú despegable llamado “Unidades”, el cual permite utilizar diferentes unidades de medidas, que se consideran a criterio del diseñador, lo que facilita el uso del programa.

d) Fuerza

Corresponde a la fuerza que se aplica en la oreja de izaje, al momento de realizar los cálculos para el diseño.

e) Nuevo diseño

Además de las variables de entrada, en este panel se encuentra un botón llamado “Nuevo diseño”, el cual se encarga de borrar los valores ingresados en la ventana virtual, para así, lograr el ingreso de nuevos inputs y generar una nueva prueba de diseño.

3.2 Verificar

En el programa se contemplan dos paneles llamados “Verificar”, los cuales cumplen distintas funciones:

a) Geometría

En el primer panel se encuentra un botón llamado geometría, quien se encarga de devolver un mensaje en donde se menciona si se cumple con los criterios establecido en “Especificación ANSI/AISC 360-10 para construcciones de acero”, perteneciente a *American Institute of Steel Construction*.

b) Tensión Von Mises

Es uno de los últimos paneles que se encuentran en la ventana virtual creada, el cual cumple dos funciones (Figura 9): ingresar la tensión admisible que se considera a criterio del diseñador, y ejecutar el botón “Tensión Von Mises”, el cual verifica si la tensión admisible es mayor o igual a la máxima tensión que se presenta en el diseño. Cabe destacar, que, en caso de no cumplir, se genera una imagen que ilustra en que sector se produce la falla de la oreja.

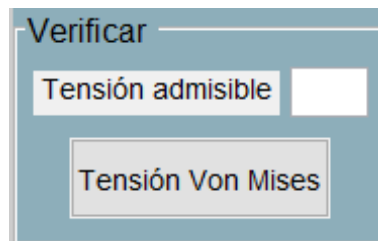


Figura 9. Panel perteneciente al programa, llamado “Verificar”. Fuente. Elaboración propia.

3.3 Crear malla

En el panel llamado “Crear malla”, se desarrollan varias funciones (Figura 10), las cuales son fundamentales para el correcto cálculo del diseño.

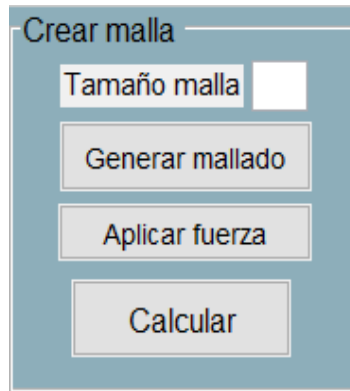


Figura 10. Panel perteneciente al programa, llamado “Crear malla”. Fuente. Elaboración propia.

a) Tamaño de malla.

Como el programa se implementa a través del método de elementos finitos, es necesario dejar como input el tamaño del mallado que se desea generar, para así, poder representar de forma correcta la geometría de la oreja de izaje, además de obtener mejores resultados en la determinación de estados tensionales.

b) Generar mallado

Se cuenta con un botón llamado “Generar mallado”, el cual se encarga de generar la malla, y así, poder representarla gráficamente.

c) Aplicar fuerza

El botón llamado “Aplicar fuerza”, se encarga de ejecutar el código que ilustra una imagen, en donde se observa si los ángulos ingresados cumplen con el área de contacto que genera la fuerza ingresada por el diseñador.

d) Calcular

Este botón cumple una de las funciones más importantes, ya que es quien realiza todos los cálculos implementados en el código computacional creado.

3.4 Analizar

En este panel se encuentran dos botones, quienes se encargan de analizar las deformaciones y tensiones que se presentan en la oreja de izaje, al estar expuesta a las variables que se ingresan al usar el programa. La función de cada botón de opción es:



a) Deformaciones:

Genera la imagen en donde se representa visualmente las deformaciones que ocurren en la oreja de izaje, al momento de estar sometida a una determinada fuerza.

b) Tensión Von Mises:

Botón encargado de ilustrar la imagen de las tensiones que son generadas al momento de aplicar la fuerza, entregando la opción de visualizar el valor de la tensión, una vez que se sobrepone el cursor en la imagen.

3.5 Resultados

Finalmente, se presenta un panel llamado “Resultados”, en donde se ilustran todos los resultados, además de poseer dos botones que cumplen las siguientes funciones:

a) Activar zoom:

Se activa la posibilidad de acercar la imagen, con el fin de visualizar detalladamente el resultado obtenido.

b) Desactivar zoom:

Se desactiva la opción de alejar la imagen, volviendo a su tamaño original.

4 VALIDACIÓN DE RESULTADOS

Para validar los resultados de las deformaciones y tensiones, se utiliza el software ANSYS. Se consideran los datos ilustrados en la Tabla 3.

Tabla 3. Datos considerados para la validación del programa.

Dimensiones (mm)	- Altura total: 140. - Ancho: 200. - Diámetro perforación: 50. - Espesor: 10.
Fuerza (N)	- 8000.
Ángulos (grados)	- Aplicación fuerza: 90. - Área de contacto: 180.
Tamaño de malla (mm)	- 5

Al considerar un ángulo de aplicación de fuerza correspondiente a 90° , y un ángulo de área de contacto igual a 180° (semicírculo superior de la oreja de izaje), sólo se aplican esfuerzos en las componentes del eje y, tal como se muestra en las Figuras 11 y 12.

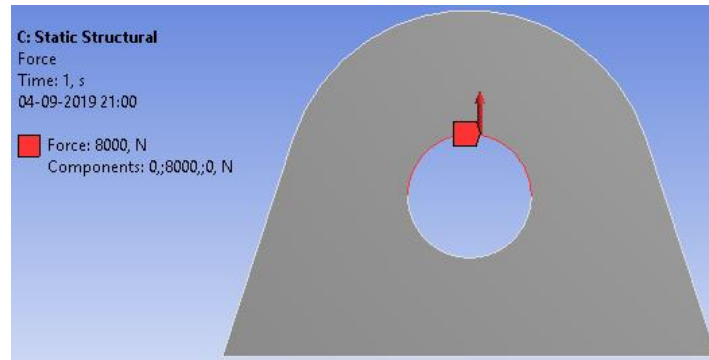


Figura 11. Aplicación de fuerza en el software ANSYS. Fuente. Elaboración propia.

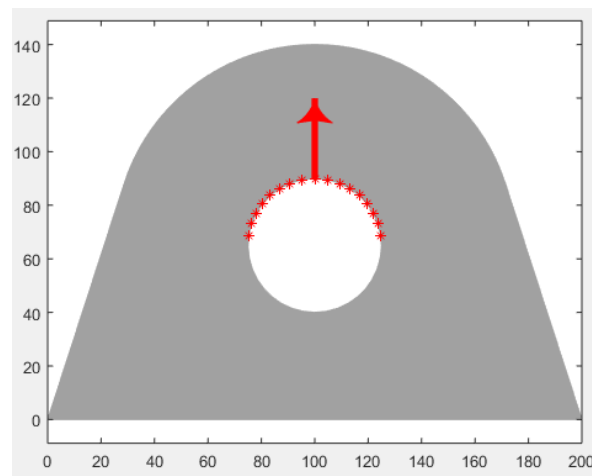


Figura 12. Aplicación de fuerza en el programa creado. Fuente. Elaboración propia.

4.1 Validación de deformación

Con el ingreso de los datos en cada programa, se obtienen los resultados de las deformaciones totales, en donde la máxima de cada uno de ellos, corresponden a las ilustradas en la Tabla 4.

Tabla 4. Máxima deformación obtenida en cada programa.

Matlab	ANSYS
6,10E-06 m	6,31E-06 m

Como el diseño del programa se enfoca en ser de uso didáctico y amigable, se implementa la opción de visualizar los resultados, en donde en las Figuras 13 y 14, se puede observar que coinciden las deformaciones, ya a que en ambos casos se genera la misma deformada del elemento estructural. Se debe considerar que ANSYS entrega por defecto los resultados en metros, y el programa creado en milímetros, tal como se ingresan los datos a prueba.

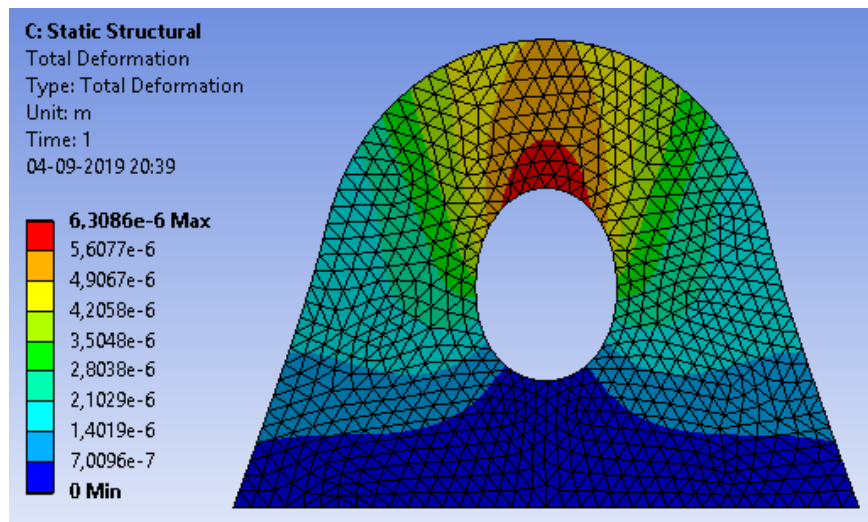


Figura 13. Deformación obtenida a través del software ANSYS. Fuente. Elaboración propia.

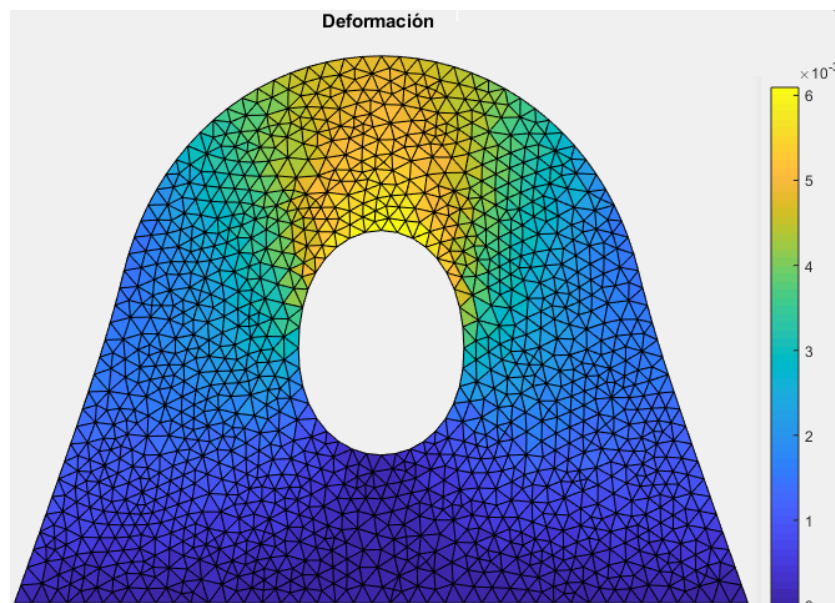


Figura 14. Deformación obtenida a través del programa creado. Fuente. Elaboración propia.

4.2 Validación Tensión Von Mises

Al igual que las deformaciones, se obtiene las máximas tensiones a través de ambos programas, las cuales corresponden a las ilustradas en la Tabla 5.

Tabla 5. Máximas Tensiones Von Mises, obtenidas en cada programa.

Matlab	ANSYS
2,85E+07 Pa	2,70E+07 Pa

En las Figuras 15 y 16, se puede observar la máxima tensión obtenida en ambos programas, la cual coincide en los dos casos, concentrándose en la zona central del elemento estructural.

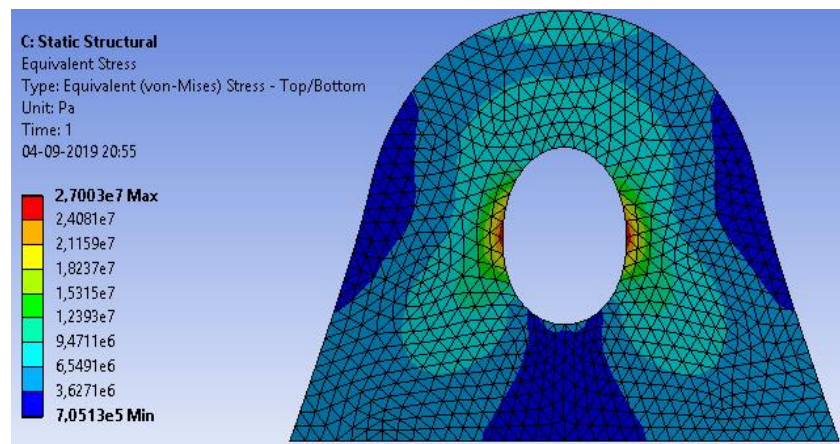


Figura 15. Tensión Von Mises obtenida a través del software ANSYS. Fuente. Elaboración propia.

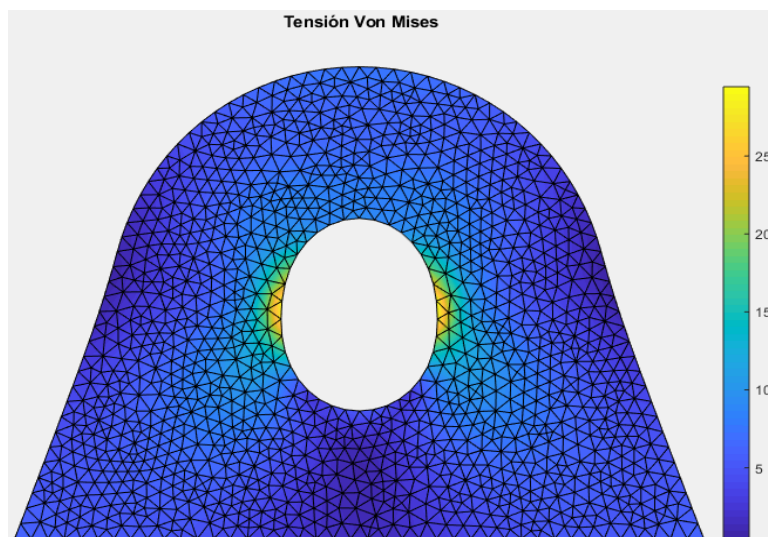


Figura 16. Tensión Von Mises obtenida a través del programa creado. Fuente. Elaboración propia.

Para el caso de la imagen que se genera al obtener las tensiones, se implementa la opción de visualizar el valor de ellas, seleccionando el cursor en el lugar que se desee, lo cual facilita al diseñador encontrar en que zona se produce la falla. En la figura 17, se puede observar la máxima tensión que se obtiene al ingresar los valores de prueba, la cual concuerda con lo especificado anteriormente, considerando que se encuentra en N/mm².

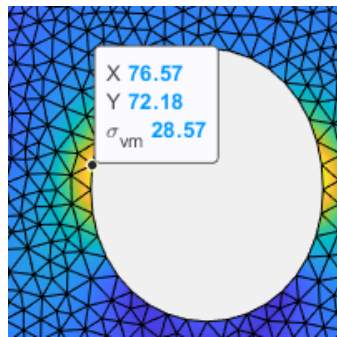


Figura 17. Máxima tensión obtenida a través del cursor. Fuente. Elaboración propia.

4.3 Porcentaje de error experimental

Para lograr validar el programa creado, se calcula un porcentaje de error experimental, con el fin de demostrar que los resultados son reales y confiables.

a) Deformaciones

El porcentaje de error para el resultado de las deformaciones máximas obtenidas corresponde a un 3%, el cual se obtiene a través de:

$$\%Error = \frac{|Def. ANSYS - Def. Matlab|}{Def. ANSYS} * 100$$

$$\%Error = \frac{|(6,31E - 06m) - (6,10E - 06m)|}{6,31E - 06m} * 100$$

$$\%Error = 3\%$$

b) Tensión Von Mises

El porcentaje de error para el resultado de las Tensiones Von Mises máximas obtenidas, corresponde a un 5%, el cual se obtiene a través de:

$$\%Error = \frac{|Tvm. ANSYS - Tvm. Matlab|}{Tvm. ANSYS} * 100$$

$$\%Error = \frac{|(2,70E + 07Pa) - (2,85E + 07Pa)|}{2,70E + 07Pa} * 100$$

$$\%Error = 5\%$$

El resultado de porcentaje de error, en ambos casos es considerado aceptable, debido a que el mallado que se genera en ANSYS y Matlab, no son los mismos.

5 LIMITACIONES

El programa requiere de la instalación de Matlab, ya que posee comandos específicos, que son ejecutados con la última versión de éste, lo que imposibilita abrir la ventana a través de un ejecutable. Esto genera un problema al usuario que no tenga las licencias correspondientes para la instalación, por lo que se considera una limitación importante que se debe considerar.

6 CONCLUSIONES

El software creado permite al diseñador utilizar una interfaz amigable y consistente, ya que incluye diversas características que facilitan el diseño y análisis de las orejas de izaje.

El programa se implementó con la interfaz gráfica de Matlab, en donde con la ayuda de los conocimientos adquiridos en cursos de programación aplicada y análisis de estructuras, se logró desarrollar un código computacional que permite estudiar el estado tensional bidimensional de un sólido, en base al método de elementos finitos. El estudio se aplicó a un cuerpo sometido a tensión plana, ya que la típica proyección de las orejas de izaje, caracterizan a este elemento como uno de pared delgada.

A través del software, se desarrollan diversas funciones que son necesarias para su correcto uso, como el ingreso de las dimensiones geométricas y cargas en las unidades de medida que el usuario estime conveniente para sus cálculos. Así, se logra conocer el comportamiento que se presenta en el elemento al estar sometido a diferentes esfuerzos, lo que se facilita a través de la visualización de los resultados de las deformaciones y estados tensionales. Además de los cálculos correspondientes, se implementó la opción de verificación geométrica, la cual se desarrolló a través de lo estipulado en “Especificación ANSI/AISC 360-10 para construcciones de acero”, perteneciente a *American Institute of Steel Construction*; para el caso de estado tensionales, se ingresa un valor de tensión admisible el cual queda a criterio del usuario. Gracias a éstas verificaciones, se logra comprobar que el diseño es seguro y adecuado, lo cual corresponde al objetivo principal de este trabajo.

La validación del programa se realizó a través del software ANSYS, el cual otorga resultados de análisis de acuerdo a la implementación del método de elementos finitos, concordando con el que se programó en el código creado; se ingresaron valores a modo de prueba, con los que se logró verificar y validar los resultados, arrojando un porcentaje de error de 3% para las deformaciones, y un 5% para los estados tensionales. Esta diferencia se produjo por el tamaño de malla, pues el software ANSYS entrega soluciones una vez que convergen sus resultados.



Todas las funciones mencionadas se consideraron con el propósito de mejorar la exactitud del cálculo que actualmente se desarrolla, además de optimizar el tiempo invertido en el diseño de las orejas de izaje, lo cual finalmente se logra llevar a cabo a través del uso del software, cumpliendo con el objetivo principal del presente documento.

7 REFERENCIAS

AISC. (2010). *Specification for Structural Steel Buildings*. American Institute of Steel Construction, Chicago. Illinois. EE.UU.

Barragán Guerrero, D.O. (2008). Manual de interfaz gráfica de usuario en matlab. Ecuador. https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/10740/11/MATLAB_GUIDE.pdf.

Hill, R. (1950). *The Mathematical Theory of Plasticity*. Clarendon Press. Oxford.

Onate. E. (2009). *Structural Analysis with the Finite Element Method. Linear Statics Volume 1. Basis and Solids*. Springer.