

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO

CARRERA:
INGENIERÍA CIVIL

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:
INGENIERA E INGENIERO CIVIL

TEMA:
**VERIFICACIÓN DE LA CONEXIÓN PRECALIFICADA TIPO ALA
SOLDADA SIN REFUERZO Y ALMA SOLDADA (WUF-W), SEGÚN EL AISC-358-
16, MEDIANTE UN MODELO DE ELEMENTOS FINITOS EN EL SOFTWARE
ANSYS**

AUTORES:
CHICAIZA MOLINA DEYSI MARCELA
CURAY FLORES ELVIS FABRICIO

TUTOR:
TORRES BERNI WILSON RAMIRO

Quito, diciembre del 2020

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

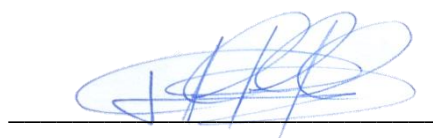
Nosotros: Deysi Marcela Chicaiza Molina, con documento de identificación N° 0503803512 y Elvis Fabricio Curay Flores con documento de identificación N° 1720520988, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos de patrimoniales en virtud que somos autores del trabajo de titulación intitulado: VERIFICACIÓN DE LA CONEXIÓN PRECALIFICADA TIPO ALA SOLDADA SIN REFUERZO Y ALMA SOLDADA (WUF-W), SEGÚN EL AISC-358-16, MEDIANTE UN MODELO DE ELEMENTOS FINITOS EN EL SOFTWARE ANSYS, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de Ingeniero Civil, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente. En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, diciembre de 2020



Deysi Marcela Chicaiza Molina

050380351-2



Elvis Fabricio Curay Flores

172052098-8

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación, VERIFICACIÓN DE LA CONEXIÓN PRECALIFICADA TIPO ALA SOLDADA SIN REFUERZO Y ALMA SOLDADA (WUF-W), SEGÚN EL AISC-358-16, MEDIANTE UN MODELO DE ELEMENTOS FINITOS EN EL SOFTWARE ANSYS, realizado por Chicaiza Molina Deysi Marcela y Curay Flores Elvis Fabricio, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito, diciembre de 2020

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Wilson Ramiro', with a stylized flourish extending from the bottom left.

PhD. Torres Berni Wilson Ramiro

CI: 1710259845

AGRADECIMIENTO

Para cumplir una meta se requiere de varios pilares por eso quiero agradecer a Dios, a mis padres y hermanos por su paciencia en todo este proceso.

A la Universidad Politécnica Salesiana que me permitió una excelente formación académica y humana.

Dicen que los verdaderos consejos se valoran por cada vivencia y las mejores vivencias son de nuestra vida universitaria. Por eso quiero agradecer también a mis maestros por su apoyo incondicional que me permitio aprender y encontrar mi potencial, al Ing. Fernando Ulloa quien es mi mentor y mi ejemplo a seguir por su ímpetud, a la Ing. Verónica Yépez por cada enseñanza que me permitió reflexionar, a la Ing. Lucerito Serrato por motivarme cuando me veía caer, Arq. Doris Andrade por esas clases que me inspiraban a seguir delante en la carrera y por último Ing. Gabriela Soria quien me permitio compartir varias conversaciones que me ayudaron a mejorar como persona. *«Solo una buena persona puede ser un excelente maestro y hacer que un estudiante sin propósitos vuelva a creer en si mismo, gracias.»*

DEYSI MARCELA CHICAIZA MOLINA.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO I.....	1
GENERALIDADES	1
1.1 Justificación.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.2.1 Objetivo General.....	2
1.2.2 Objetivos específicos	2
1.3 Alcance.....	2
1.4 Método de elementos finitos y software Ansys	2
1.5 Introducción al método de elementos finitos.....	4
1.5.1 Dominio.....	4
1.5.2 Sistemas discretos	4
1.5.3 Sistemas continuos.....	5
1.5.4 Grados de libertad.....	5
1.5.5 Condiciones de contorno	5
1.5.6 Convergencia	5
1.5.7 No linealidad.....	5
1.5.8 Mallado.....	7
1.5.9 Aplicación del método de elementos finitos.....	10
1.6 Esfuerzos de Von Mises	21
1.7 Generalidades del software.....	21
1.7.1 Interfaz de ANSYS	22

CAPÍTULO II.....	27
CONEXIÓN PRECALIFICADA.....	27
2.1 Compacidad sísmica.....	30
2.2 Limites geométricos de la conexión.....	30
2.2.1 Propiedades del Material	33
2.3 Comprobación de la resistencia del material que conforma el nudo a las solicitaciones de esfuerzos a la que es sometido.....	36
2.3.1 Carga de la columna.....	37
2.3.2 Viga.....	39
2.3 Dimensionamiento de los huecos de acceso de la soldadura en la viga, así como la placa de conexión entre la viga y la columna.....	46
2.4 Estados límites de la placa de corte.....	48
2.5 Verificación de los esfuerzos a los que son sometidos tanto el alma como el patín de la columna	49
2.6 Soldadura.....	52
2.6.1 Diseño de la soldadura de filete, en la unión de la placa de corte con el patín de la columna.....	53
2.6.2 Diseño de la soldadura de filete en la unión de la placa de corte con el alma de la viga.....	55
2.6.3 Diseño de la soldadura (CJP), que conecta tanto el patín de la viga con el patín de la columna, como el alma de la viga con el patín de la columna.....	56
2.6.4 Propiedad Mecánica del Electrodo.....	57

2.6.5	Protocolo de carga.....	58
2.6.6	Datos considerados para la verificación de la conexión en Ansys	60
CAPÍTULO III		61
MODELO DE CONEXIÓN EN ANSYS		61
3.1	Introducción.....	61
3.2	Pre-proceso	61
3.2.1	Generación del modelo.....	61
3.2.2	Modelo estructural	68
3.2.3	Mallado.....	72
3.3	Análisis	77
3.3.1	Generalidades y definición del modelo	78
3.4	Post -Proceso	86
3.5	Criterios de Ansys.....	100
CONCLUSIONES.....		105
RECOMENDACIONES		107
REFERENCIAS		109

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.....	32
Tabla 2.....	33
Tabla 3.....	37
Tabla 4.....	53
Tabla 5.....	59
Tabla 6.....	60
Tabla 7.....	89
Tabla 8.....	94
Tabla 9.....	94
Tabla 10.....	95
Tabla 11.....	95

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	3
Figura 2	6
Figura 3	7
Figura 4	8
Figura 5	9
Figura 6	10
Figura 7	11
Figura 8	13
Figura 9	17
Figura 10.	21
Figura 11	23
Figura 12.	24
Figura 13.	25
Figura 14.	27
Figura 15.	28
Figura 16.	31
Figura 17.	33
Figura 18.	41
Figura 19.	42
Figura 20.	46
Figura 21.	47
Figura 22.	48
Figura 23.	56

Figura 24.	57
Figura 25.	58
Figura 26.	59
Figura 27.	62
Figura 28.	63
Figura 29.	64
Figura 30.	64
Figura 31.	65
Figura 32.	66
Figura 33.	66
Figura 34.	67
Figura 35.	68
Figura 36.	69
Figura 37.	69
Figura 38.	70
Figura 39.	71
Figura 40.	71
Figura 41.	72
Figura 42.	73
Figura 43.	74
Figura 44.	74
Figura 45.	75
Figura 46.	76
Figura 47.	76
Figura 48.	77

Figura 49.	78
Figura 50.	79
Figura 51.	79
Figura 52.	80
Figura 53.	81
Figura 54.	82
Figura 55.	82
Figura 56.	84
Figura 57.	84
Figura 58.	85
Figura 59.	85
Figura 60.	86
Figura 61.	87
Figura 62.	88
Figura 63.	90
Figura 64.	91
Figura 65.	92
Figura 66.	93
Figura 67.	96
Figura 68.	97
Figura 69.	99
Figura 70.	103

RESUMEN

En nuestro país actualmente la innovación en la construcción viene a partir de la utilización de estructura metálica, logrando tener una mejor acogida que las estructuras convencionales. Para garantizar la vida útil de estas estructuras se deben establecer diferentes análisis por esta razón en el presente trabajo de titulación se realizará la verificación de la conexión a momento “Welded Unreinforced Flange–Welded Web (WUF-W)” y su comportamiento no lineal, utilizando la interfaz WORKBENCH del software ANSYS 19.0.

A partir de la verificación de la conexión se establece criterios de utilización de ANSYS, programa diseñado para generar mejoras y soluciones a proyectos. El software trabaja mediante la simulación de problemas a partir de metodología de elementos finitos “FEM” (Finite Element Method), cuya ecuación de comportamiento está en función de derivadas parciales.

Para la modelación se requiere saber las características geométricas del material en estudio (viga-columna), por lo que tomaremos en cuenta el modelo del artículo de (Y. Ohtori, 2004), estructura de 9 pisos que cumple las especificaciones del (AISC.341, 2016).

Palabras clave: Metodología, elementos finitos, modelación, criterios.

ABSTRACT

Currently in our country, innovation in construction comes apart from the use of a metallic structure, achieving a better reception than conventional structures. In order to guarantee the useful life of these structures, different analyzes must be established for this reason, in this qualification work, the verification of the connection will be carried out in a moment "Unreinforced welded flange - Welded Web (WUF-W)" and its behavior does not linear, using the WORKBENCH interface of the ANSYS 19.0 software.

After verifying the connection, criteria for using ANSYS are established, a program designed to generate improvements and solutions to projects. The software works by simulating problems from the finite element methodology "FEM" (Finite element method), whose behavior equation is based on partial derivatives.

For modeling, it is required to know the geometric characteristics of the material under study (beam-column), so we will take into account the model of the article by (Y. Ohtori, 2004), a 9-story structure that meets the specifications of (AISC.341, 2016).

Keywords: Methodology, finite elements, modeling, criteria.

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1 Justificación

En la actualidad la construcción se ha desarrollado sustancialmente con el paso de los años, llegando a ser frecuentemente usada la estructura metálica, debido a la resistencia y fiabilidad que presenta el acero, y sobre todo a la reducción del tiempo que se tiene en la construcción. En este estudio detallaremos la utilización de las herramientas que presenta el software ANSYS 19.0 para la modelación de una conexión metálica mediante el método de elementos finitos.

Debido a la seguridad y confiabilidad que debe tener una estructura se emplea el uso de conexiones, que son fundamentales en el estudio de desempeño de una edificación antes las acciones sísmicas, por esta razón en la normativa (AISC.358, 2016) encontramos diferentes conexiones precalificadas que obedecen los requerimientos (AISC.341, 2016), para aplicaciones sísmicas en marcos intermedios a momentos (IMF) y marcos especiales a momento (SMF), y por consiguiente, en este proyecto nos centraremos en verificar la conexión a momento “Ala soldada sin refuerzo y alma soldada (WUF-W)” debido a su frecuente uso, por el bajo costo que representa su elaboración y a la simplicidad que tiene en el diseño de la misma.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Comprobar la conexión precalificada por las especificaciones del AISC-358, “Conexión de ala soldada sin refuerzo y alma soldada - (WUF-W)”, mediante un modelo de elementos finitos en el programa ANSYS

1.2.2 Objetivos específicos

1. Generar un modelo de elementos finitos con las condiciones de borde y las propiedades del material apropiadas para el análisis no lineal.
2. Analizar y verificar en ANSYS la conexión “Ala soldada sin refuerzo y alma soldada (WUF-W)” precalificada con base en él (AISC.358, 2016).
3. Establecer criterios de utilización de la plataforma Workbench del software ANSYS en la modelación de estructuras especiales con base en el Método de Elementos Finitos.

1.3 Alcance

En el presente trabajo de titulación se realizará la verificación de la conexión precalificada “WUF-W”, según las especificaciones del (AISC.358, 2016), mediante un modelo de elementos finitos con base a un análisis no lineal, a través del software ANSYS versión 19.0.0.2017113019.

1.4 Método de elementos finitos y software Ansys

El capítulo I, denota los aspectos fundamentales del software ANSYS, aplicado a la metodología de elementos finitos que es el más utilizado para resolver problemas de diferentes disciplinas de ingeniería, cuyo comportamiento se basa en la resolución de sistemas de ecuaciones en derivadas parciales. De esta manera el software será aplicado

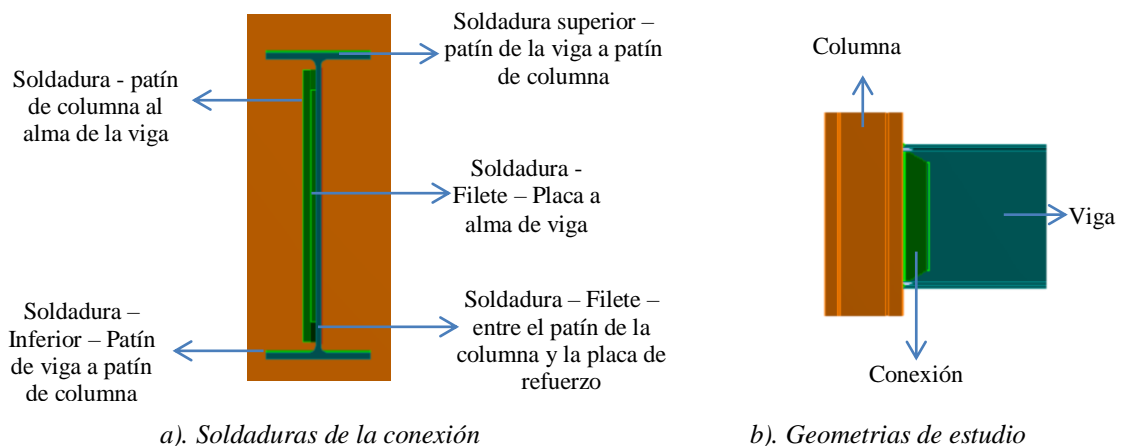
a la verificación de la conexión precalificada a momento tipo “Ala soldada sin refuerzo y alma soldada WUF-W “.

La conexión tipo WUF-W, se caracteriza por el tipo de unión soldada que se presenta entre la columna y la viga que llegan al nodo analizado, presentado soldadura de penetración completa y soldadura de filete de esta manera se encuentran ubicadas según la siguiente descripción:

- Soldadura de penetración completa de patín superior de viga.
- Soldadura de penetración completa de patín inferior de viga.
- Soldadura de penetración completa de patín inferior de columna al alma de la viga.
- Soldadura de filete entre la placa de refuerzo y el alma de viga.
- Soldadura de filete entre el patín de la columna y la placa de refuerzo.

Figura 1.

Conexión WUF-W



Elaborado por: Los autores.

1.5 Introducción al método de elementos finitos

El desarrollo de nuevas tecnologías, implica la ampliación de nuevos conocimientos que faciliten el análisis de los comportamientos que presentan las estructuras. Los problemas estructurales generan amplias interrogantes a diferentes esfuerzos que se generan, por esta razón es importante realizar un análisis detallando de su desempeño.

El método de elementos finitos (MEF), se establece bajo la necesidad de conocer y entender un comportamiento cercano al real que sufre una estructura, cuando se encuentra sometido a diferentes condiciones externas (esfuerzo, temperatura, etc.). El método fue desarrollado para resolver problemas de ingeniería, mediante la discretización del sistema continuo o dominio, formado por elementos, los cuales están delimitados a partir de sus nodos. De esta manera el método propone funciones de interpolación que permiten resolver las incógnitas nodales, mediante ecuaciones constitutivas se definen los estados de tensión de los elementos que constituyen la discretización propuesta.

Para tener una mejor comprensión del MEF se debe tener claro el siguiente glosario:

1.5.1 Dominio

Se denomina dominio a la zona geométrica o espacio físico conformado por varios elementos que forman un sistema.

1.5.2 Sistemas discretos

Son aquellos que están constituidos por la unión de los elementos y se pueden definir de una manera perfecta en un número finito de grados de libertad.

1.5.3 Sistemas continuos

Son aquellos que al contrario de los sistemas discretos, requieren para su resolución un número infinito de grados de libertad.

1.5.4 Grados de libertad

Se trata del número de incógnitas a resolver en un movimiento (desplazamientos y rotaciones) que se presentan en el dominio discretizado.

1.5.5 Condiciones de contorno

Se refiere a los valores conocidos en el objeto de estudio que pueden afectar a su comportamiento, tales como desplazamientos, velocidades y temperatura, etc.

1.5.6 Convergencia

Se presenta con base a la estabilidad que se logra en los resultados, a medida que se disminuye el tamaño de los elementos y se aumenta el número de nodos.

1.5.7 No linealidad

Cuando las deformaciones específicas en un elemento al igual que los desplazamientos no son pequeños, conlleva a un análisis no lineal de la misma, lo cual incurre en la no linealidad del material debido a ciertas zonas en donde se alcanzaron deformaciones muy considerables, formando de esta manera articulaciones plásticas, del mismo modo también incurre en la no linealidad geométrica debido a los grandes desplazamientos que se presenta en un elemento estructural.

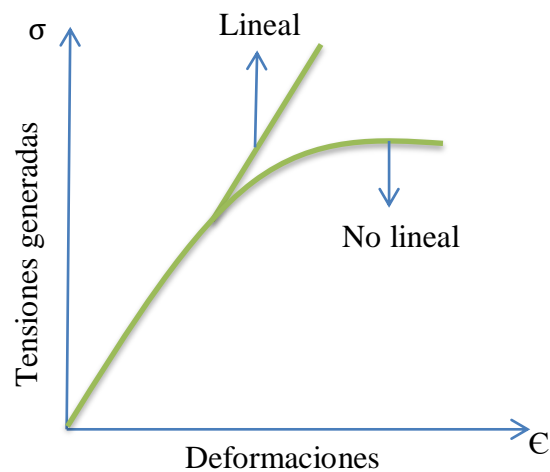
No linealidad debida al material

Es la resultante del comportamiento no lineal de los materiales estructurales e incluye efectos como fluencia de metales, fluencia lenta (*creep*), relajación de tensiones y fisuración. (Crisafulli, 2018)

Superando el límite elástico de un material se incurre en deformaciones permanentes lo cual corresponde a la no linealidad del material, como se observa en la Figura 2

Figura 2.

Curva de tensión - deformación.



Elaborado por: Los autores.

No linealidad geométrica

Los efectos que causan la no linealidad de la geometría son las cargas de gravedad que se presentan en la estructura, lo que lleva al aumento de fuerzas internas en los miembros y conexiones, tomando en cuenta el efecto de segundo orden, es decir las fuerzas gravitacionales actuando sobre la geometría de la estructura deformada

No linealidad de contacto

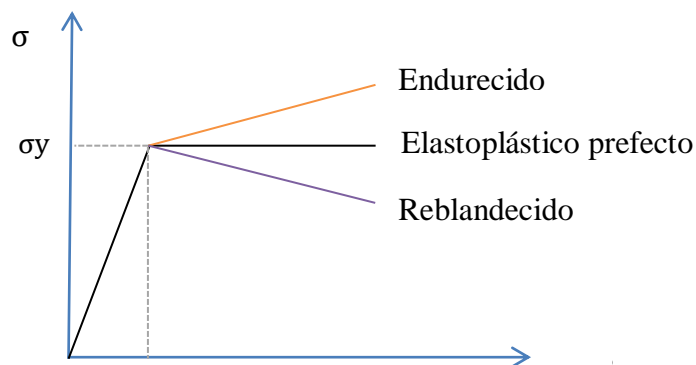
La no linealidad de contacto se produce cuando los cuerpos interactúan entre sí, existiendo contacto unilateral, concentrados (mayor contacto entre elementos), auto contacto (contacto entre las mismas partes del elemento) y diversificados.

Bilinealidad del material

La bilinealidad del material, se encuentra referido al tipo de comportamiento constitutivo que tiene un cierto material cuando ha superado su estado tensional límite, si el material continúa soportando incrementos de cargas se dice que su comportamiento es de endurecimiento, es decir que la gráfica de su constitutiva presenta una pendiente positiva ya que presenta una rigidez remanente, por otro lado si la gráfica de su constitutiva presenta una pendiente negativa se dice que se trata de un comportamiento reblandecido, y si su pendiente es nula se dice que su comportamiento es elastoplástico perfecto, por lo que su deformación total estará dada por un tramo elástico que se recupera y un tramo plástico que permanece, como se muestra en la Figura 3.

Figura 3.

Respuestas elastoplásticas.



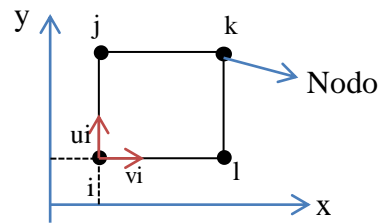
Elaborado por: Los autores.

1.5.8 Mallado

Representa la generación de puntos que son conocidos como “nodos”, los mismos que a su vez se encargan de conectar los elementos entre sí, como del almacenamiento de la información de sus coordenadas espaciales. Como se muestra en la Figura 4.

Figura 4.

Coordenadas cartesianas del nodo i.



Elaborado por: Los autores.

Tipos de mallado

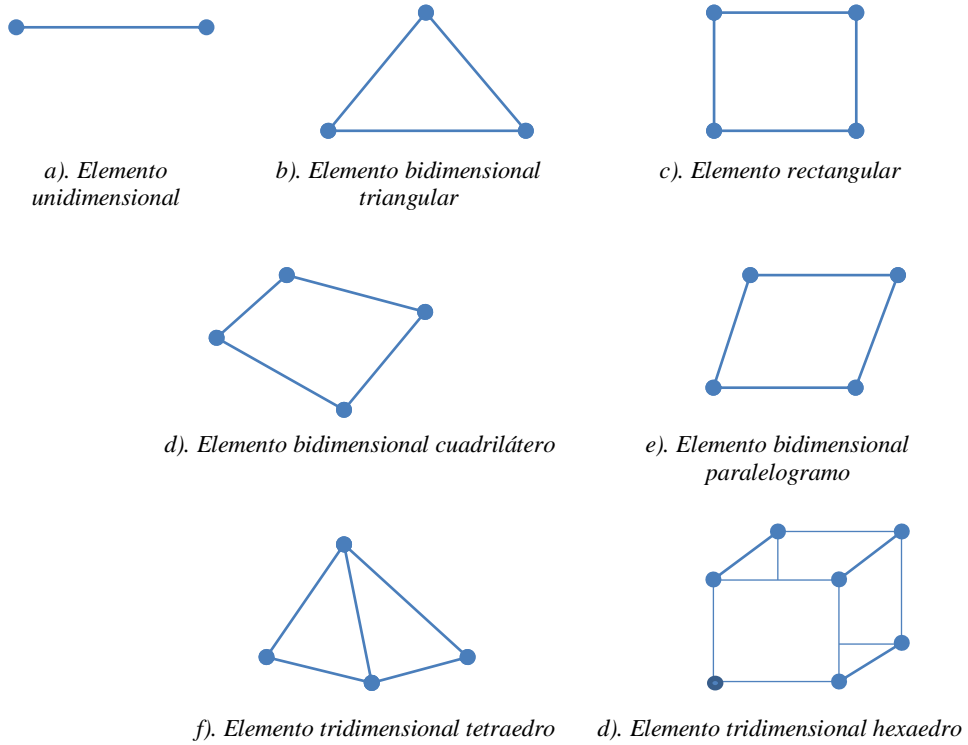
Mallado estructural.- Este mallado es aplicable solo para estructuras que no tengan complejidad geométrica, permitiendo un rápido análisis. Los elementos generalmente usados son: cuadrilátero en dos dimensiones y hexaedros en tres dimensiones.

Mallado no estructural.- Permite analizar estructuras con geometrías complejas, exigiendo un mayor procesamiento computacional y tiempo de cálculo ya que se puede presentar elementos triangulares y cuadriláteros en dos dimensiones, tetraedros y hexaedros en tres dimensiones.

En la Figura 5, podremos observar los diferentes elementos que se presentan en el mallado.

Figura 5.

Tipos de elementos que se presentan en el mallado.



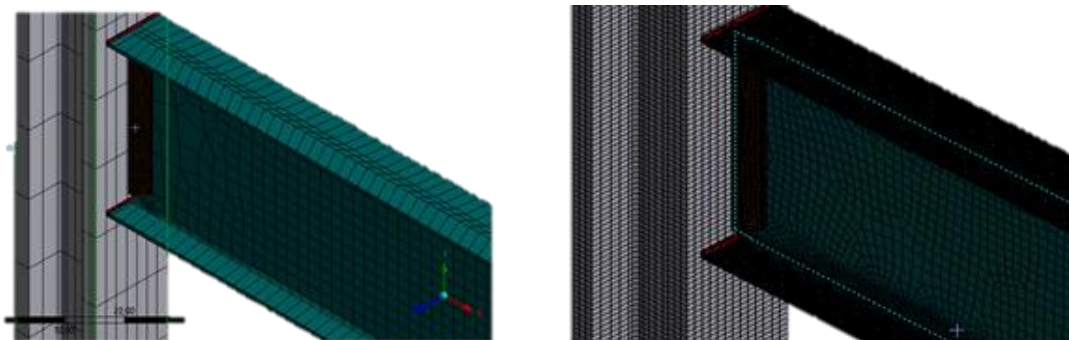
Elaborado por: Los autores.

Refinado

En el caso que se requiera un resultado más preciso, se utiliza el refinado en forma secuencial con el fin de incrementar la división del elemento, determinando una solución correcta como se puede apreciar en la Figura 6.

Figura 6.

Tamaños de mallado en un sistema estructural.



a. Mallado sin refinar.

b. Mallado con refinamiento.

Elaborado por: Los autores.

1.5.9 Aplicación del método de elementos finitos.

El método es aplicado a las variaciones originadas en el nodo como (desplazamientos, tensiones, presiones o velocidad), evaluando al elemento y determinando resultados de las ecuaciones matriciales que se forman en el proceso de la metodología. De esta manera para comprender la metodología de elementos finitos establecida por el software Ansys 19.0, se requiere saber cómo se aplica su modelo matemático que lo presentamos a continuación:

Campo de deformaciones.

La metodología se presenta mediante la discretización del dominio, enlazando los elementos finitos mediante los nodos originados, en donde se van a evaluar los desplazamientos.

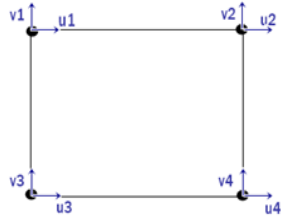
Los elementos que se pueden presentar y ser sujetos de análisis son tres: en un medio unidimensional, bidimensional y tridimensional como se expresa en la Figura 7.

Figura 7.

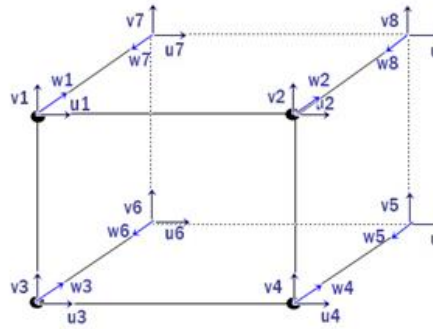
Elementos que presentan para un análisis de elementos finitos.



a). Elementos de dos nudos unidimensionales



b). Elementos para un sistema dimensional



c). Elementos para un sistemas tridimensional

Elaborado por: Los autores.

Debido a la discretización, se resuelve el comportamiento de los elementos como se presenta en la Figura 7, mediante aproximaciones numéricas que rigen diferentes funciones matemáticas. De esta manera la metodología considera el vector que origina la deformación en cada punto del elemento:

- Vector “v” para los elementos unidimensionales, ver la Figura 7a y de esta manera se presenta la Ecuación 1:

$$v = N(x, y) \tag{Ecuación 1}$$

- Vector “v” para elementos bidimensionales ver la Figura 7b y de esta manera se presenta la Ecuación 2

$$v = \begin{Bmatrix} u(x, y) \\ v(x, y) \end{Bmatrix} \tag{Ecuación 2}$$

- Vector “v” para elementos tridimensionales ver la Figura 7c y de esta manera se presenta la Ecuación 3:

$$v = \begin{pmatrix} u(x, y, z) \\ v(x, y, z) \\ w(x, y, z) \end{pmatrix}$$

Ecuación 3

Donde:

- N - Funciones de interpolación del elemento.
- u, v, w – Vectores de desplazamientos
- x, y, z - Coordenadas

Se considera las funciones de interpolación N, para un promedio ponderado de los desplazamientos “U, V, W”, que se originan en los nodos de cada elemento como se indica en la Ecuación 4.

$$U = \sum NU \quad V = \sum NV \quad W = \sum NW \quad \text{Ecuación 4}$$

La forma matricial para interpolación de un elemento se establece con la Ecuación 5:

$$u = N\delta^e \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

- δ^e - Vector de desplazamientos en los nodos del elemento “e”, se representa en la Ecuación 6.

$$\delta^e = \{u_1, v_1, u_2, v_2, \dots, u_n, v_n\}^T \quad \text{Ecuación 6}$$

La matriz de la función de interpolación se formula a partir del número de filas determinadas por los desplazamientos y un número de columnas que se encuentran

determinadas por los grados de libertad. Para una mejor explicación se presenta la Ecuación 7 para un elemento bidimensional.

$$N = \begin{bmatrix} N1 & 0 & N2 & 0 & \dots & Nn & 0 \\ 0 & N1 & 0 & N2 & \dots & 0 & Nn \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 7}$$

Deformaciones Unitarias.

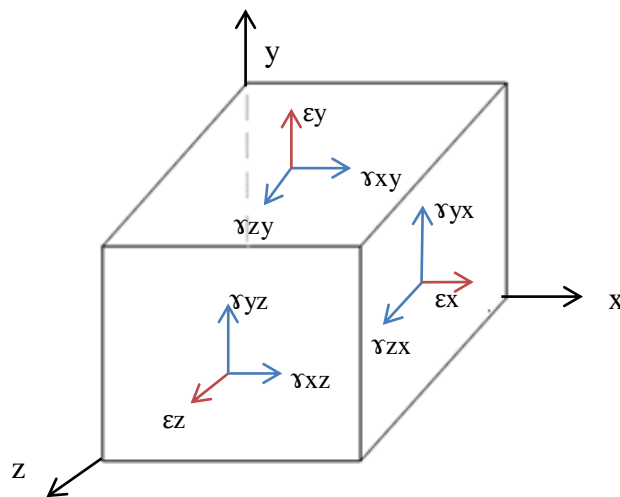
Para un sólido tridimensional como se presenta en la Figura 8 se conoce:

- ϵ - Deformaciones unitarias.
- γ - Deformaciones de cortante

Teniendo así el valor desplazamiento en función de derivadas como se presenta en la Ecuación 9.

Figura 8.

Deformaciones en un elemento finito en un sólido tridimensional.



Elaborado por: Los autores.

Donde la expresión matricial de la forma unitaria para un elemento bidimensional es:

$$\varepsilon = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = \partial u \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde la expresión matricial de la forma unitaria para un elemento tridimensional es:

$$\varepsilon = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \partial u \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde:

- ∂u – Operados matricial de las deformaciones unitarias.

Para continuar con el análisis de la metodología de elementos finitos, se procede a la sustitución de las funciones y se obtiene la Ecuación 10

$$\varepsilon = \partial u = \partial N \delta^e = A \delta^e \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

- A – Constante que relaciona las deformaciones en los nodos con deformaciones unitarias en cualquier punto.

Dada la función “N” y la matriz “A” se tiene la Ecuación 11 que definen la estructuración de la matriz de deformaciones. (Lizarza, 2011)

$$A = \partial N = \partial \begin{bmatrix} N1 & 0 & 0 & N2 & 0 & 0 \\ 0 & N1 & 0 & 0 & N2 & 0 \\ 0 & 0 & N1 & 0 & 0 & N2 \\ & Nn & 0 & 0 & & \\ \vdots & 0 & Nn & 0 & & \\ 0 & 0 & 0 & Nn & & \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 11}$$

Relación tensión – deformación unitaria.

En este proceso se debe tener en cuenta la discretización del dominio, donde a medida que se minimice los elementos su estado de tensión se acercará a un estado uniforme y constante, donde se define la Ecuación 12, (Lizarza, 2011)

En el caso que el movimiento sea constante y tenga su dirección perpendicular, es decir $\sigma_z = 0$.

$$\sigma = C \epsilon^R = DA\delta^R = 0 \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde:

- C – Matriz elástica que depende del módulo de elasticidad E y del módulo de Poisson ν
- σ – Tensión
- D, A, C - Constantes
- δ^R – Vector de deformación para el movimiento del solido rígido
- ϵ^R – Deformación unitaria para el movimiento del solido rígido

Criterio de convergencia.

Las funciones de interpolación deben cumplir el criterio de convergencia que implica sumar sucesivamente la energía de todos los elementos. De esta manera se cumple el principio de trabajo virtual, el cual debe cumplir el requerimiento de continuidad de desplazamientos para un número de grados de libertad donde se debe calcular la energía elástica como lo indica la Ecuación 13.

$$U = \frac{1}{2} \int_V \sigma^T \epsilon \, dv = \frac{1}{2} \sum_n \int_{v_n} \sigma^T \epsilon \, dv + U_{\text{cont}} \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde:

- U_{cont} – Energía elástica acumulada la cual debe ser nula.
- T – Temperatura

En el caso de no cumplir el requerimiento se presenta la Ecuación 14 para la energía elástica acumulada en deformaciones finitas no continuas. (Lizarza, 2011)

$$U_{\text{cont}} = \frac{1}{2} \int_{V=0}^1 \sigma^T (\epsilon_{\text{cont}}) \, dv = \text{indeterminado} \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde:

- ϵ_{cont} – Deformaciones unitarias en el contorno

Si en el contorno la deformación unitaria es finita, aunque no sea continua su energía acumulada se representa como la Ecuación 15 . (Lizarza, 2011)

$$U_{\text{cont}} = \frac{1}{2} \int_{V=0}^1 \sigma^T (\epsilon_{\text{cont}}) \, dv = 0 \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde:

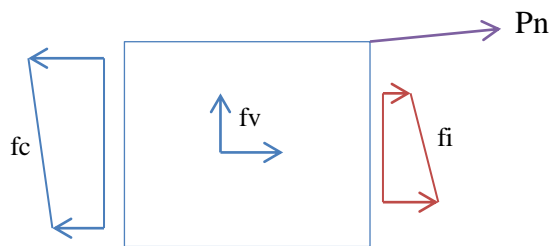
- ϵ_{cont} – Deformaciones unitarias en el contorno

Ecuaciones de equilibrio de un elemento.

Una vez definidas las ecuaciones de desplazamientos, deformaciones unitarias, tensiones y aclarados el criterio de convergencia, se consideran las fuerzas actuantes como se indica en la Figura 9.

Figura 9.

Fuerzas actuantes en un elemento finito.



Elaborado por: Los autores.

- f_v - Fuerzas exteriores en todo el volumen del sistema al interior del elemento.
- f_s - Fuerzas exteriores en la superficie que son aplicadas en el contorno libre del elemento.
- f_i - Fuerzas interiores que son aplicadas en la superficie de la unión del contorno del elemento con los elementos vecinos.
- P_n - Fuerzas exteriores aplicadas en los nodos.

De esta manera se establece la Ecuación 16, donde se presenta el trabajo virtual de fuerzas en el método de elementos finitos.

$$\delta W^e = \int_v^1 \delta u^T f_v dv + \int_s^1 \delta u^T f_s ds + \int_i^1 \delta u^T f_i ds + \delta \delta^{eT} P_N^e \quad \text{Ecuación 16}$$

Por lo tanto la ecuación de equilibrio se representa de la siguiente manera:

$$\int_v^1 \delta \epsilon^T \sigma dv = \int_v^1 \delta u^T f_v dv + \int_s^1 \delta u^T f_s ds + \int_i^1 \delta u^T f_i ds + \delta \delta^{eT} P_N^e \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde:

- La variación virtual en un campo de deformación es: $\delta u = N \delta \delta^e$
- La variación de las deformaciones unitarias es: $\delta \epsilon = A \delta \delta^e$
- La variación que corresponde a los grados de libertad de los nodos es: $\delta \delta^e$

Las deformaciones y tensiones deben calcularse a partir del campo de desplazamientos virtuales, igualándola a la variación de la energía elástica "U" acumulada en el elemento como se indica en la Ecuación 19.

$$W^e = \int_v^1 \delta \epsilon^T \sigma dv = \delta U^e \quad \text{Ecuación 18}$$

Donde:

- "δ ε^T" - variación en las deformaciones unitarias definidas por la Ecuación 19

$$\begin{aligned} \int_v^1 \delta u^T q_v dv + \int_s^1 \delta u^T q_s ds + \int_c^1 \delta u^T q_c ds + \delta \delta^{eT} P^e n \\ = \int_v^1 \delta \epsilon^T \sigma dv \end{aligned} \quad \text{Ecuación 19}$$

Sustituyendo las fuerzas aplicadas en los nodos (tensiones y deformaciones unitarias), se consigue llegar a la representación de equilibrio del elemento finito considerado en la Ecuación 20.

$$\int_v^1 A^T C A dv \delta^n = \int_v^1 N^T q_v dv + \int_s^1 N^T q_s ds + \int_v^1 A^T C \epsilon_0 dv - \int_v^1 A^T \sigma_0 dv + P_i^n + P_n^n$$

Ecuación 20

Donde:

- Se define la matriz de rigidez dada por la Ecuación 21.

$$K^n = \int_v^1 A^T C A dv$$

Ecuación 21

- $dv = dx dy dz$

- Vector de fuerzas nodales equivalentes o fuerzas de volumen del sistemas, se encuentra dada por la Ecuación 22 (Lizarza, 2011)

$$P_v^n = \int_v^1 N^T q_v dv$$

Ecuación 22

- Valores nodales de las fuerzas de volumen: $q_v = N q_v^e$

- Vector de fuerzas nodales equivalentes a partir de las fuerzas exteriores de la superficie dada por la Ecuación 23. (Lizarza, 2011)

$$P_s^n = \int_s^1 N^T q_s ds$$

Ecuación 23

- Valores nodales de las fuerzas de volumen: $q_s = N q_s^e$

- Vector de fuerzas nodales equivalentes dadas por las deformaciones iniciales del material dada por la Ecuación 24. (Lizarza, 2011)

$$P_T^n = \int_v^1 A^T C \epsilon_0 dv \quad \text{Ecuación 24}$$

- Vector de fuerzas nodales equivalentes dadas por las tensiones iniciales del material como se presenta en la Ecuación 25. (Lizarza, 2011)

$$P_a^e = - \int_v^1 A^T \sigma_0 dv \quad \text{Ecuación 25}$$

De la Ecuación 20, se considera un sistema continuo definido, aplicado para cada uno de los elementos, al cual debemos agregar el equilibrio de frontera en todos los nodos de unión entre los elementos como lo indica la Ecuación 26, que representa el equilibrio de toda la estructura como resultado. (Lizarza, 2011)

$$K \Delta = P_V + P_S + P_T + P_a + P_n \quad \text{Ecuación 26}$$

Donde:

- K – Matriz de rigidez de la estructura completa.
- Δ – Vector determinado para grados de libertad de toda la estructura.
- P_n – Vector de fuerzas exteriores.
- $P_V + P_S + P_T + P_a$ – Vector de fuerzas nodales equivalentes producidos por las fuerzas de volumen, superficie, deformaciones y tensiones.

1.6 Esfuerzos de Von Mises

Los esfuerzos de Von Mises son usados en ingeniería estructural como teoría de fallo, ya que estos esfuerzos sirven como indicador para un buen diseño de materiales dúctiles.

Esta teoría estipula que un material dúctil comenzara a ceder, siempre y cuando el esfuerzo de Von Mises sea igual o mayor al esfuerzo de fluencia del material, de acuerdo a lo estipulado por (Montenegro Daniel, 2011). Estos esfuerzos pueden ser calculados a través de la *Ecuación 27*.

$$\sigma' = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad \text{Ecuación 27}$$

Donde:

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ = tensiones principales de un sólido deformable.

1.7 Generalidades del software

A continuación se realizará una presentación simple sobre las generalidades del software ANSYS 19.0 que más adelante se profundizará algunos temas de interés en el capítulo III.

Figura 10.

Logo del software Ansys.



Nota: Swanson Analysis Systems. Fuente: (ANSYS, 2009)

Ansys 19.0 es un software que simula el comportamiento de un sistema aplicable a diferentes campos de la ingeniería, desarrollado a partir de la teoría del método de elementos finitos (MEF), ofrece al diseñador mejores capacidades de pre-proceso, análisis y post-proceso.

1.7.1 Interfaz de ANSYS

Para la generación de modelos dentro del software ANSYS se establecen los parámetros físicos que se desean estudiar, se genera el mallado y se obtiene la solución a partir de la determinación de ecuaciones de derivadas parciales que gobiernan el problema; y de esta manera Ansys nos ofrece dos diferentes interfaces para el análisis, como los siguientes:

Lenguaje de diseño paramétrico de Ansys (APDL)

Esta plataforma se basa en un lenguaje de instrucciones y comandos donde el usuario define el modelo mediante un lenguaje de programación.

Workbench

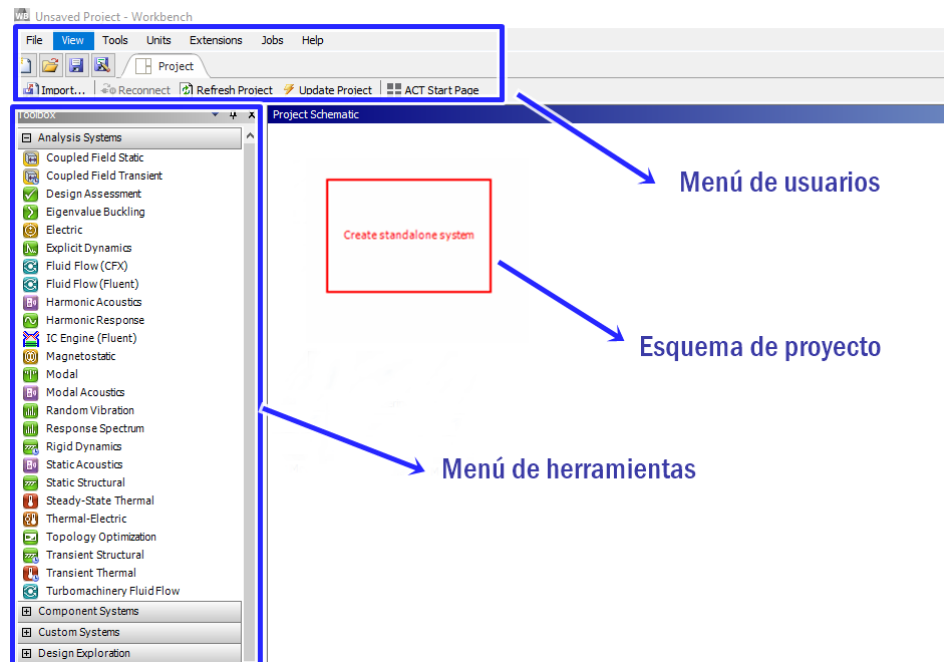
Es una plataforma amigable, rápida y de interacción eficiente con software como AutoCad y SolidWorks. Presenta una estructuración con diferentes interfaces gráficas, basándose en un despliegue de procesos sistemáticos para la modelación de sistemas de ingeniería como indica en la Figura 11. (ANSYS, 2009)

- Menú de usuarios. - Es aquel donde se encuentran todas las funciones básicas del programa.
- Esquema de proyecto.- Es el área de interfaz que controla el proyecto a partir del bloque de análisis.

- Menú de herramientas. - Es aquel donde se encuentran las plantillas del sistema para estructurar el proyecto

Figura 11

Interfaz de Workbench, donde se encuentra las barras de herramientas principales con las funciones más utilizadas para la realización del proyecto.

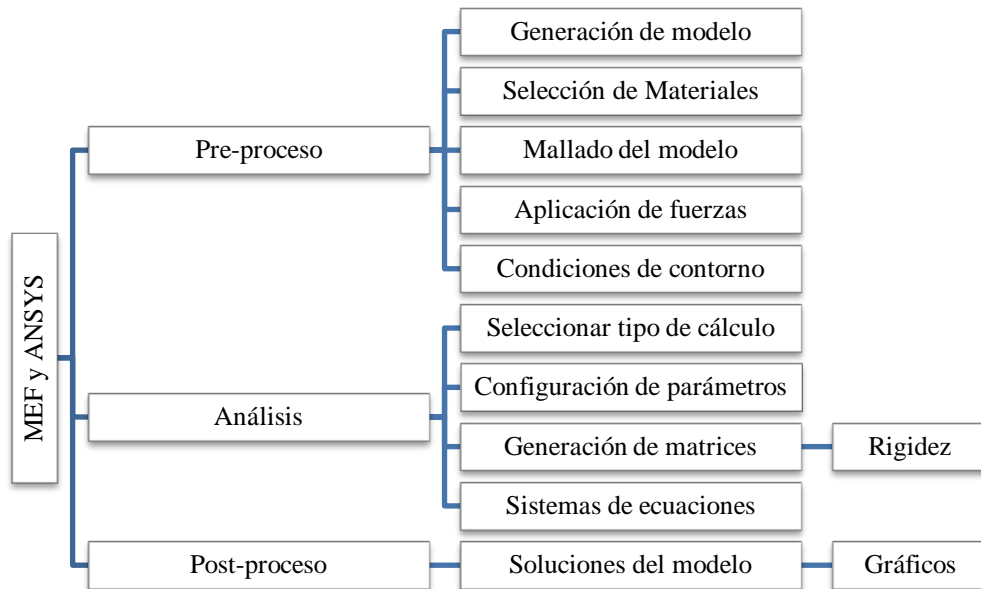


Elaborado por: Los autores.

De esta manera el flujo de análisis con el que trabaja ANSYS presenta tres procesos fundamentales para la resolución de problemas de ingeniería, como se indican en la Figura 12.

Figura 12.

Esquema de trabajo.



Elaborado por: Los autores.

Flujo de análisis de Ansys.

Indicadores del bloque de análisis.

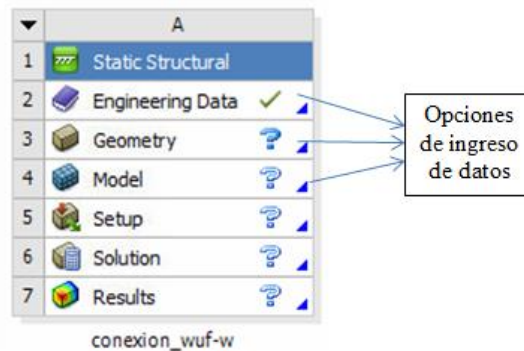
Recursos establecidos por el software para la configuración de cada parámetro que requiere el modelo.

Pre-proceso

Ansys nos ofrece diferentes etapas para la construcción del modelo como se presenta en la Figura 13.

Figura 13.

Ventana de módulo de Ansys "Static Structural"



Elaborado por: Los autores a través del Software ANSYS.

- Engineering data.- Parámetro que nos permite la definición de las propiedades del material del sistema que se modelara.
- Geometry.- Opción donde se puede crear la geometría o importarla desde otro software y nos permite editar cuantas veces se requiera.
- Model.- Nos permite crear la interfaz de mallado, establecer los contactos que se encuentran en la geometría.
 - ❖ Meshing.- Nos permite una fácil manipulación de métodos de generación de mallado (Automático, Hexaédrico, Tetraédrico, Barrido (Swept) y Multizona)

Análisis

Ansys nos presenta un escenario de análisis de datos, permitiendo la generación y ensamblaje de las ecuaciones para dar solución al sistema como se presenta en la Figura 13.

- Setup.- Configuración, modelo físico, asignación de condiciones de borde y cargas.

- Solution.- Mediante este parámetro se realiza un cálculo por la metodología de elementos finitos con el objetivo de asegurar un análisis correcto de la malla creada, permitiendo de esta manera un análisis:
 - Análisis general: Análisis lineal, no lineal, anisotropía, cálculo de desplazamientos y tensiones.
 - Análisis de pandeo: Cálculo de cargas de pandeo y de la estructura deformada.
 - Análisis Modales: Cálculo de modos de vibración, frecuencia, simetría axial y cíclicas.
 - Análisis Armónicos: Cálculo de cargas de viento, oleaje y granizo
 - Análisis de espectro: Cálculo espectral, acelerogramas, vibraciones, tensiones y deformaciones.

Post-Proceso

La función de post-proceso se encuentra definida por el parámetro “Results” que crea una simulación gráfica con movimiento como se presenta en la Figura 13, donde se puede visualizar valores de nodos, administrar vistas, líneas aerodinámicas, deformaciones, contornos, esfuerzos y exportación de datos en HTML, Excel, JPEG, GIF, PNG.

CAPÍTULO II

CONEXIÓN PRECALIFICADA

En el presente capítulo se describe las características, comportamiento y consideraciones que se debe tomar en cuenta para el diseño de la conexión (WUF-W)” con sus siglas en inglés “Welded Unreinforced Flange–Welded Web Moment Connection”.

La conexión tipo WUF-W está diseñada para provocar que la rotación inelástica se desarrolle principalmente por la fluencia de la viga en la región adyacente a la cara de la columna. La rotura de la conexión es controlada con base en detalles especiales de requerimiento asociado con la soldadura de unión entre el patín de la viga con el patín de la columna, entre la unión de la soldadura del alma de la viga y el patín de la columna y de la forma de los hoyos de acceso a la soldadura, de acuerdo a los criterios establecidos en (AISC.341, 2016), como se indica en la Figura 14.

Figura 14.

Conexión WUF-W.



Elaborado por: Los autores.

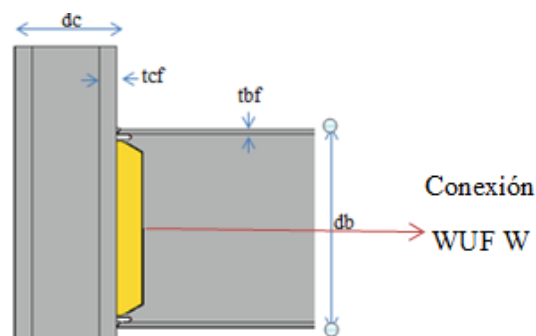
Las uniones entre el patín de la viga con el patín de la columna y entre el ala de la viga con el patín de la columna se lo deberá realizar con soldadura de penetración completa o complete joint penetration (CJP), la unión entre la placa de corte con el alma de la viga y entre el patin de la columna con la placa de corte se lo realizará con soldadura de filete. La placa de corte deberá tener un espesor mayor o igual al espesor del alma de la viga. El arriostramiento lateral de la viga deberá satisfacer los requerimientos provistos en (AISC.341, 2016), el cual indica la separación mínima que deberá existir entre cada arriostramiento, tanto el patín inferior como el superior de la viga deben estar arriostrados. El comienzo del arriostramiento se lo realizará a una distancia de 1 a 1.5 veces el peralte de la viga, medido desde la cara de la columna, con el fin de formar una zona protegida en donde se desarrollarán las deformaciones inelásticas y por lo tanto no se permite adherir ningún elemento que no sea autorizado por el diseño.

La conexión precalificada para pórticos a momentos, y en concordancia con el (AISC.358, 2016), consta de los siguientes detalles constructivos como se muestra en la

Figura 15.

Figura 15.

Detalle constructivo de la conexión WUF-W.



Elaborado por: Los autores.

Donde:

- dc: Peralte de la columna
- db: Peralte de la viga
- tbf: Espesor del patín de la viga
- tcf: Espesor del patín de la columna

Dado el (AISC.341, 2016) para el caso de la conexión WUF-W los sistemas para aplicar son:

- Pórticos especiales a momento (SMF). Es el sistema que desarrolla una cantidad adecuada de deformación inelástica al estar sometida a esfuerzos, gracias a la gran ductilidad que tienen los elementos que conforman la unión. Esto quiere decir que el sistema SMF tiene la capacidad de disipar mucha energía.

El sistema debe satisfacer las siguientes condiciones:

La conexión debe desarrollar una rotación inelástica de al menos 0.04 radianes, su resistencia a la flexión medida desde la cara de la columna, debe ser al menos el 80% del momento plástico de la viga ($0.8M_p$), para una rotación de 0.04 radianes.

- Pórticos intermedios a momento (IMF). Al igual que en el sistema SMF, los sistemas IMF también desarrollan cantidades limitadas de deformaciones inelásticas, pero en menor proporción. Esto quiere decir que tiene menor capacidad para disipar energía, debido a la menor ductilidad que presentan los elementos que conforman la unión.

El sistema debe satisfacer las siguientes condiciones:

La conexión debe desarrollar una rotación inelástica de al menos 0.02 radianes, su resistencia a la flexión medida desde la cara de la columna, debe ser al menos el 80% del momento plástico de la viga ($0.8M_p$), para una rotación de 0.02 radianes.

De acuerdo a la necesidad de disipación de energía que se necesita en zonas sísmicas, se decidió adoptar el sistema SMF.

2.1 Compacidad sísmica.

Se dice que un perfil es compacto cuando el perfil tiene la capacidad suficiente para soportar al momento flector actuante en el rango plástico, sin que se produzca el pandeo lateral torsional del mismo, por lo que es necesario controlar la zona de compresión de su sección transversal, ya que en este sector se producirá la falla por pandeo.

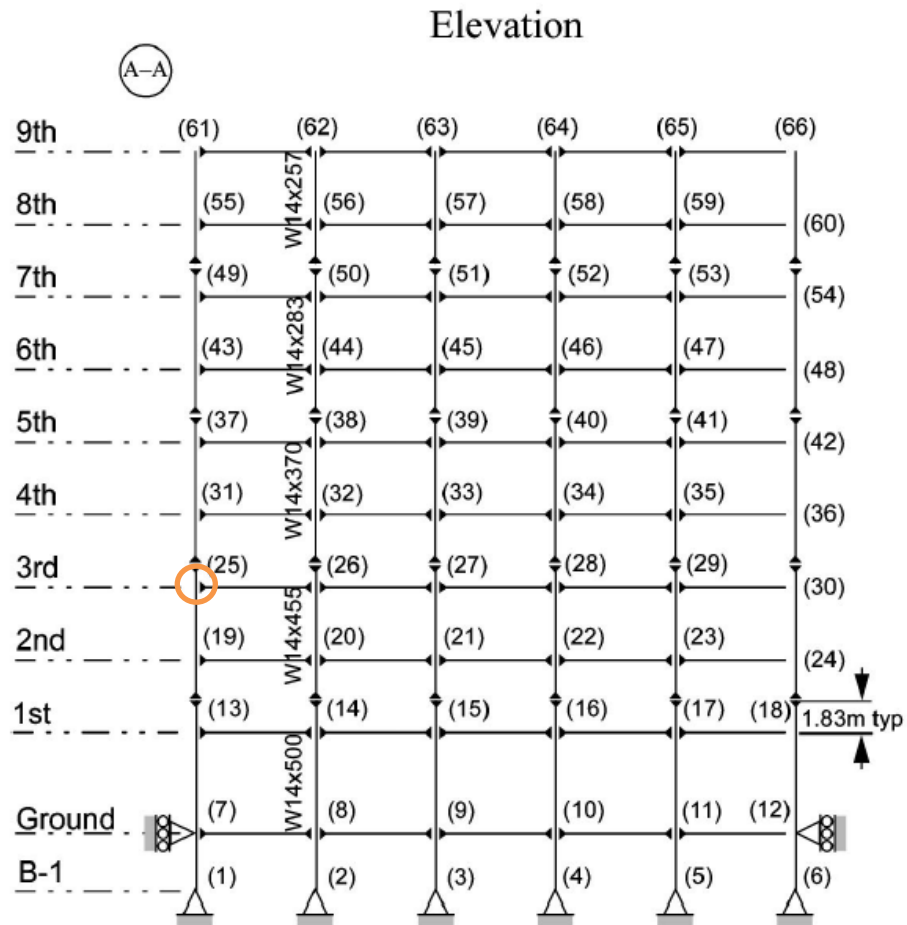
Un perfil es sísmicamente compacto, cuando el perfil es capaz de soportar deformaciones inelásticas mayores a 6 o 7 veces la deformación de fluencia. De esta manera (AISC.341, 2016) recomienda la utilización de la tabla D1.1 para miembros de moderada y alta ductilidad.

2.2 Limites geométricos de la conexión.

Para establecer los parámetros que ayudarán a validar la conexión, se ha tomado como referencia las secciones tanto de viga como columna que conforman el nudo de borde del tercer piso de una edificación de 9 pisos propuesta por (Y. Ohtori, 2004), como se muestra en la Figura 16.

Figura 16.

Edificación de 9 pisos.



Nota: Detalla de elevación. Fuente: (Y. Ohtori, 2004)

La selección del nudo de borde se debe esencialmente a la mínima cantidad de elementos que intervendrán en su posterior análisis, simplificando de esta manera el procedimiento para obtención de los resultados en el software Ansys.

A continuación, se presenta las propiedades mecánicas de las secciones que conforman el nudo.

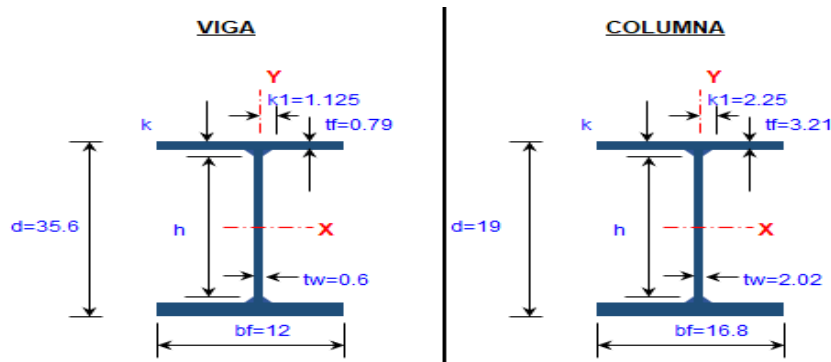
Tabla 1.*Propiedades de la sección.*

Descripción	VIGA (W36X135)			COLUMNA (W14X455)		
Área	A =	39.7	plg.^2	A =	34	plg.^2
Peralte	d =	35.6	plg.	d =	9	plg.
Espesor del alma	tw =	0.6	plg.	tw =	.02	plg.
Ancho del patín	bf =	12	plg.	bf =	6.8	plg.
Espesor del patín	tf =	0.79	plg.	tf =	.21	plg.
Distancia desde la cara exterior del patín hasta el final del talón en el alma	k(det) =	1.6875	plg.	k(det) =	.5	plg.
Distancia desde el centroide hasta el final del talón	k1 =	1.125	plg.	k1 =	.25	plg.
Peso por cada pie	wt./ft. =	135	Plg/f	wt./ft. =	55	Plg/ft.
Inercia en x	Ix =	7800	plg.^4	Ix =	190	plg.^4
Módulo de sección elástico en x	Sx =	439	plg.^3	Sx =	56	plg.^3
Radio de giro en x	rx =	14	plg.	rx =	.33	plg.
Módulo de sección plástico en x	Zx =	509	plg.^3	Zx =	36	plg.^3
Inercia en y	Iy =	225	plg.^4	Iy =	560	plg.^4
Módulo de sección elástico en y	Sy =	37.7	plg.^3	Sy =	04	plg.^3
Radio de giro en y	ry =	2.38	plg.	ry =	.38	plg.
Módulo de sección plástico en y	Zy =	59.7	plg.^3	Zy =	68	plg.^3
Distancia entre los centroides del patín	ho =	34.8	plg.	ho =	5.8	plg.
Momento torsional de inercia	J =	7	plg.^4	J =	95	plg.^4
Constante de pandeo	Cw =	68100	plg.^6	Cw =	60000	plg.^6

Elaborado por: Los autores.

Figura 17.

Propiedades de la sección.



Elaborado por: Los autores a partir de (Y. Ohtori, 2004)

2.2.1 Propiedades del Material

Tabla 2.

Propiedades mecánicas del acero.

Propiedades Mecánicas del Acero				
Laminado en caliente	Material			
	ASTM A36/A36M		ASTM A572/A572M	
Relación entre el límite de fluencia esperado y el límite de fluencia mínimo especificado	Ry	1.5	Ry	1.1
Relación entre la resistencia a la tracción esperada y la resistencia a la tracción mínima especificada	Rt	1.2	Rt	1.1
Esfuerzo mínimo de fluencia del acero	Fy	36 ksi	Fy	50 ksi
Es la resistencia a la tracción mínima especificada	Fu	58 ksi	Fu	65 ksi
Módulo de elasticidad del acero	E	29.000 ksi	E	29.000 ksi

Elaborado por: Los autores a partir de la normativa (AISC.341, 2016)

Limitaciones de viga

Para determinar las limitaciones que presenta la geometría de la viga a analizar, se tomará como referencia los criterios establecidos en el (AISC.358, 2016), por lo que a continuación se desglosará el análisis de cada una de las recomendaciones propuestas en la norma.

- a) Las vigas pueden ser laminadas o armadas a partir de placas soldadas.
- b) El peralte de la viga se limita a un máximo de W36 o W920 en el sistema métrico, cumpliendo nuestro diseño el requerimiento.

El perfil “W” es el más utilizado, también conocido como perfil de patín ancho y es doblemente simétrico con respecto al eje x como del eje y.

El número que viene después de la sigla “W” corresponde al valor del peralte del perfil, para el caso de la viga corresponde a un peralte de 36 plg o 920 mm para el sistema métrico.

- c) El peso de la viga está limitado a un máximo de 150 lbf/ft o (224kg/m).

Dado el peso de la viga a estudiar de 135 lbf/ft, se puede notar que el peso de la viga se encuentra entre el límite establecido.

- d) Para el espesor del patín t_f debe cumplir $t_f \leq 1\text{plg}$.

$0.79\text{ plg} < 1\text{ plg}$ Cumple el requerimiento.

- e) La relación entre $\frac{L}{d} \geq 7$ para sistemas SMF.

Donde:

- L: Longitud de la viga
- d: Peralte de la viga

$$\frac{360\text{ plg}}{35.6\text{ plg}} > 7$$

10.11 > 7 Cumple el requerimiento.

- f) La relación $\frac{bf}{2tf}$ debe ser menor que $0.32 \sqrt{\frac{E}{R_y \cdot F_y}}$ para que el patín sea sísmicamente compacto.

Donde:

- bf: Ancho del patín
- E: Modulo de elasticidad
- tf: Espesor del patín

$$\frac{12 \text{ plg}}{2 \times 0.79 \text{ plg}} \leq 0.32 \sqrt{\frac{29000}{1.5 \times 36}}$$

7.59 ≤ 7.97 Cumple el requerimiento.

- g) La relación $\frac{h}{tw}$ debe ser menor que $2.57 \sqrt{\frac{E}{R_y \cdot F_y}}$ para que el alma sea sísmicamente compacta.

$$\frac{32.125 \text{ plg}}{0.6 \text{ plg}} \leq 2.57 \sqrt{\frac{29000}{1.5 \times 36}}$$

53.54 ≤ 59.56 Cumple el requerimiento.

- h) La zona protegida será la distancia desde la cara de la columna hasta una distancia igual a la altura de la viga (d). En este caso d=35.6 plg

Limitaciones de la columna

Para determinar las limitaciones que presenta la columna en la conexión, es importante aclarar que en este caso la columna al estar conformada por el material ASTM A572 de grado 50 presenta mayor resistencia que el material ASTM A36, debido a un mayor límite de fluencia y al tipo de aleación que conforma dicho material, además:

- a) La viga deberá ser conectada al patín de la columna.
- b) El peralte de la columna se limita a un máximo de W36 o W920 en el sistema métrico.

W14 < W36 Cumple el requerimiento.

- c) No existe límites en el peso de la columna.
- d) No existe límites para el espesor del patín de la columna.
- e) La relación $\frac{bf}{2tf}$ debe ser menor que $0.32 \sqrt{\frac{E}{R_y \cdot F_y}}$ para que el patín sea sísmicamente compacto.

$$\frac{16.8 \text{ plg}}{2 \times 3.21 \text{ plg}} \leq 0.32 \sqrt{\frac{29000}{1.1 \times 50}}$$

$2.62 \leq 7.35$ Cumple el requerimiento.

Nota: El diseño está establecido por capacidad del material, por esta razón no se presenta las cargas actuantes.

- f) La relación $\frac{h}{tw}$ debe ser menor que $2.57 \sqrt{\frac{E}{R_y \cdot F_y}}$ para que el alma sea sísmicamente compacto.

$$\frac{10 \text{ plg}}{2.02 \text{ plg}} \leq 2.57 \sqrt{\frac{29000}{1.1 \times 50}}$$

$4.95 \leq 59.01$ Cumple el requerimiento.

2.3 Comprobación de la resistencia del material que conforma el nudo a las sollicitaciones de esfuerzos a la que es sometido.

Cálculo del momento plástico de la viga donde se establece la *Ecuación 28*.

$$M_p = F_y \cdot Z_b$$

Ecuación 28

$$M_p = 36000 \frac{\text{lbf}}{\text{plg}^2} \times 509 \text{ plg}^3 = 1.83 \times 10^7 \text{ lbf} \cdot \text{plg}$$

2.3.1 Carga de la columna.

Para determinar la carga que recibe la columna, a continuación, se detalla los datos tanto de los vanos como de las cargas de cada uno de sus respectivos pisos de acuerdo al documento (Y. Ohtori, 2004) .

Tabla 3.

Datos de cargas del edificio.

<i>Edificio de 9 pisos</i>			<i>Edificio de 9 pisos</i>		
<i>N.º Pisos</i>	<i>Carga (lbf)</i>		<i>N.º vanos</i>	<i>Longitud (ft)</i>	
B-1			1	30	
Ground	2123		2	30	
	000				
1	2222		3	30	
	000				
2	2175		4	30	
	800				
3	2175		5	30	
	800				
4	2175				
	800				
5	2175				
	800				
6	2175		Área de la	22500	t^2
	800		edificación		
7	2175				
	800				
8	2175		Área de	900	t^2
	800		cada vano		
9	2354				
	000				

Elaborado por: Los autores.

Nota: Cabe recalcar que los valores de la carga de cada piso incluyen la carga de uso, así como la carga de los elementos que conforma la edificación y la carga producida por los efectos sísmicos.

Para el cálculo de carga distribuida correspondiente a la cubierta se lo realizará de acuerdo a lo establecido en la Ecuación 29.

W: Carga distribuida

$$W1 = \frac{\text{Carga del piso 9}}{\text{Área de la edificación}} \quad \text{Ecuación 29}$$

$$W1 = \frac{2354000 \text{ lbf}}{22500 \text{ ft}^2}$$

$$W1 = 104.622 \frac{\text{lbf}}{\text{ft}^2}$$

Para el cálculo de la carga distribuida de cada piso se lo realizará de acuerdo a lo establecido en la Ecuación 30.

$$W2 = \frac{\text{Carga del piso 8}}{\text{Área de la edificación}} \quad \text{Ecuación 30}$$

$$W2 = \frac{2175800 \text{ lbf}}{22500 \text{ ft}^2}$$

$$W2 = 96.702 \frac{\text{lbf}}{\text{ft}^2}$$

Cálculo del momento probable de la viga de acuerdo a lo establecido en la Ecuación 31.

$$M_{pr} = C_{pr} * R_y * F_{yb} * Z_{xb}$$

Donde:

M_{pr} : Momento máximo probable en la articulación plástica.

Z_{xb} : Módulo de sección plástico de la viga.

C_{pr} : Factor para tener en cuenta la resistencia máxima de la conexión, incluido el endurecimiento por deformación, la restricción local, el refuerzo adicional y otras condiciones de conexión. (AISC.358, 2016)

El valor de C_{pr} corresponde a 1.4 para las conexiones de momento WUF-W, dicho valor se basa en datos experimentales que muestran un alto grado de endurecimiento por deformación. (AISC.358, 2016)

$$M_{pr} = 1.4 \times 1.5 \times 36,000 \times 509$$

$$M_{pr} = 3.84 \times 10^7 \text{ lbf} * \text{plg}$$

2.3.2 Viga

Determinación de la longitud no arriostrada de la viga de acuerdo a lo establecido en la Ecuación 32, sugerido por (AISC.341, 2016).

$$L_b = 0.095 * r_y * \frac{E}{R_y * F_y} \qquad \text{Ecuación 32}$$

Donde:

L_b : Longitud no arriostrada para el estado límite de fluencia.

r_y : Radio de giro sobre el eje y.

F_y : Tensión de fluencia mínima de la viga.

Pub: Carga última de la viga debido a la carga vertical.

$$Lb = 0.095 * 6.0452 * \frac{2'100,000}{1.5 * 2530}$$

$$Lb = 317.79 \text{ cm}$$

$$Lb = 10.42 \text{ ft}$$

Determinación del número de vigas secundarias que se conectan a la viga principal de acuerdo a la Ecuación 33.

$$\text{N.}^\circ \text{ Vigas} = \frac{\text{Longitud del vano}}{Lb} - 1 \quad \text{Ecuación 33}$$

$$\text{N.}^\circ \text{ Vigas} = \frac{30 \text{ ft}}{10 \text{ ft}} - 1$$

$$\text{N.}^\circ \text{ Vigas} = 2$$

Determinación de la carga ultima de la viga de acuerdo a lo establecido en la Ecuación 34.

$$\text{Pub} = \frac{\text{Longitud del vano} * W2 * Lb}{2} \quad \text{Ecuación 34}$$

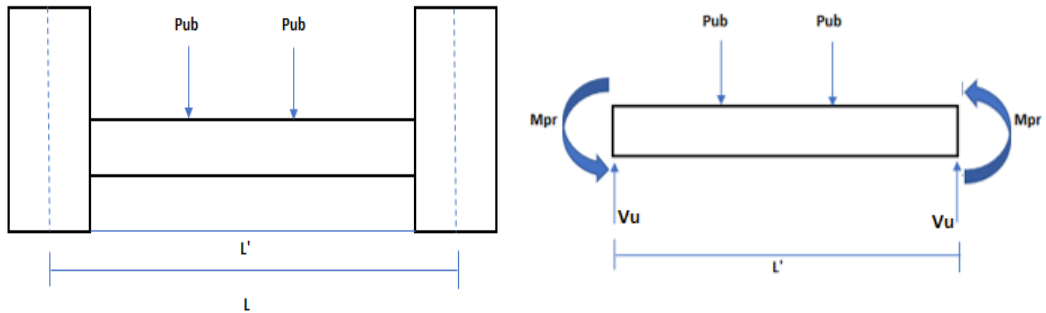
$$\text{Pub} = \frac{30 * 96.702 * 10}{2}$$

$$\text{Pub} = 1.45 \times 10^4 \text{ lbf}$$

Determinación del cortante de la viga de acuerdo a lo establecido en la Ecuación 35.

Figura 18.

Corte producido en la cara de la columna.



Elaborado por: Los autores.

$$V_u = \frac{2 * M_{pr}}{L'} + P_{ub}$$

Ecuación 35

$$V_u = \frac{2 * M_{pr}}{\text{Longitud del vano} - d_c} + P_{ub}$$

Donde:

- V_u : Corte producido en la cara de la columna.
- L' : Longitud de la viga.
- d_c : Peralte de la columna

$$V_u = \frac{2 \times 3.84 \times 10^7}{30 \times 12 - 19} + 1.45 \times 10^4$$

$$V_u = 2.25 \times 10^5 \text{ lbf}$$

Criterio de Columna fuerte – viga débil

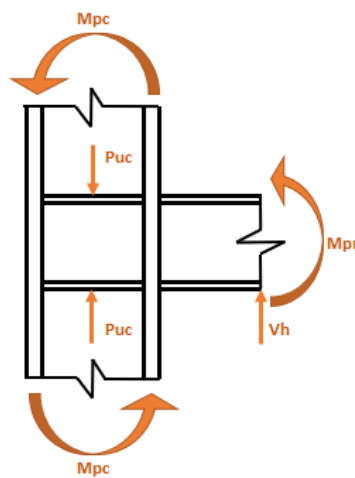
La finalidad de este criterio, es asegurar que la viga llegue antes que la columna al estado límite por fluencia debido a la flexión de la misma. De acuerdo a este

criterio se realizará la relación de capacidad, la cual se encuentra descrita en la Ecuación 36.

$$\frac{\Sigma M'_{pc}}{\Sigma M'_{pb}} > 1 \quad \text{Ecuación 36}$$

Figura 19.

Momento y Fuerzas que actúan en la conexión.



Elaborado por: Los autores.

Cálculo del $\Sigma M'_{pc}$ de acuerdo a lo descrito en la en la Ecuación 37.

$$\Sigma M'_{pc} = \Sigma Z_{xc} \cdot (F_{yc} - P_{uc}/A_{gc}) \quad \text{Ecuación 37}$$

Cálculo del $\Sigma M'_{pb}$ de acuerdo a lo descrito en la en la Ecuación 38.

$$\Sigma M'_{pb} = \Sigma (M_{pr} + M_{uv}) \quad \text{Ecuación 38}$$

Donde:

- $\Sigma M'_{pc}$: Sumatoria de las resistencias nominales a la flexión de las columnas, tanto arriba como abajo de la unión con el eje central de la viga, con una reducción por carga axial en la columna.
- $\Sigma M'_{pb}$: Sumatoria de las resistencias esperadas debido a la flexión de las vigas en la ubicación de las rótulas plásticas con el eje central de la columna.
- Z_{xc} : Módulo plástico de la columna.
- F_{yc} : Tensión de fluencia mínima de la columna.
- P_{uc} : Resistencia a la compresión requerida.
- A_{gc} : Área bruta de la columna.
- M_{uv} : Momento adicional de corte tomado desde la ubicación de las rótulas plásticas hacia el eje central de la columna.

Columna:

$$\Sigma M'_{pc} = 2 * Z_{xc} * F_{yc}$$

$$\Sigma M'_{pc} = 2 * 936 * 50,000$$

$$\Sigma M'_{pc} = 9.36 * 10^7 \text{ lbf. plg}$$

Viga:

$$\Sigma M'_{pb} = \Sigma \left(C_{pr} * R_y * F_{yb} * Z_{xb} + \frac{2 * C_{pr} * R_y * F_{yb} * Z_{xb}}{(Longitud \text{ del vano} - dc)} * \frac{dc}{2} \right)$$

Donde:

- Ry: Relación entre el límite de fluencia esperado y el límite de fluencia mínimo especificado.
- dc: Peralte de la columna.

$$\Sigma M'_{pb} = \Sigma \left(1.4 \times 1.5 \times 36,000 \times 509 + \frac{2 * 1.4 \times 1.5 \times 36,000 \times 509}{(30 \times 12 - 19)} \times \frac{19}{2} \right)$$

$$\Sigma M'_{pb} = 4.06 \times 10^7 \text{ lbf. plg}$$

$$\frac{\Sigma M'_{pc}}{\Sigma M'_{pb}} > 1$$

$$\frac{9.36 \times 10^7 \text{ lbf. plg}}{4.06 \times 10^7 \text{ lbf. plg}} > 1$$

$$2.31 > 1$$

Resistencia a corte del alma de la viga por flexión

La resistencia a corte está determinada de acuerdo a lo escrito en la Ecuación 39.

$$V_n = 0.6 \cdot A_w \cdot F_y \cdot C_v$$

Ecuación 39

Donde:

- Vn: Resistencia nominal al corte.
- Aw: Área del alma de la viga.
- Fy: Tensión mínima de fluencia.
- Cv: Coeficiente de corte del alma.

$$\text{Si } \frac{h}{t_w} \leq 1.10 \sqrt{\frac{K_v \cdot E}{f_y}}; \quad C_v = 1$$

Donde:

- h: Distancia libre entre alas.
- tw: Ancho del alma de la viga.
- Kv: Coeficiente de pandeo por corte del alma.
- E: Módulo de elasticidad del material.

$K_v = 5.34$; cuando no existe rigilizador en el alma

$$54.1 \leq 1.10 \sqrt{\frac{5.34 \times 29,000}{36}}$$

$54.1 < 72.15$ Cumple con el requerimiento.

Determinación del área del alma de la viga de acuerdo a lo descrito en la Ecuación 40

$$A_w = (d_b - 2t_{f_b})t_w \quad \text{Ecuación 40}$$

Donde:

- d_b : Peralte de la viga.
- t_{f_b} : Ancho del patín.
- V_u : Corte producido en la cara de la columna.

$$A_w = (35.6 - 2 \times 0.79)0.6$$

$$A_w = 20.412 \text{ plg}^2$$

$$V_n = 0.6 \cdot A_w \cdot f_y \cdot C_v$$

$$V_n = 0.6 \times 20.412 \times 36,000 \times 1$$

$$V_n = 441 \times 10^5 \text{ lbf}$$

$$V_n > V_u$$

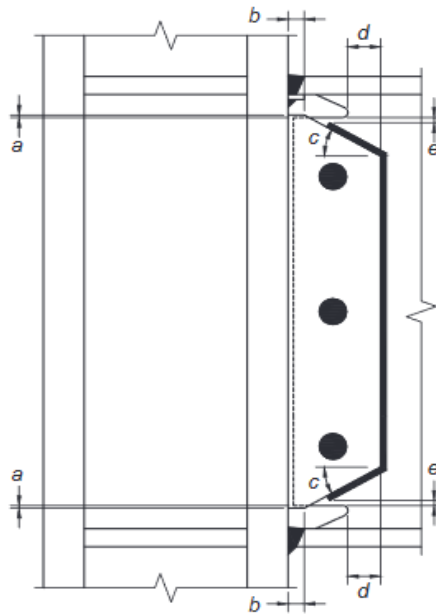
$$4.41 \times 10^5 \text{ lbf} > 2.25 \times 10^5 \text{ lbf} \quad \text{Cumple con el requerimiento.}$$

2.3 Dimensionamiento de los huecos de acceso de la soldadura en la viga, así como la placa de conexión entre la viga y la columna.

Para establecer las dimensiones tanto de los huecos de soldadura presente en la viga como de la placa que conecta la viga con la columna, se procede a seguir los pasos descritos tanto en la Figura 20 como en la Figura 21 recomendados en la Norma (AISC.360, 2016)

Figura 20.

Detalle de la placa de corte de la conexión WUF-W.



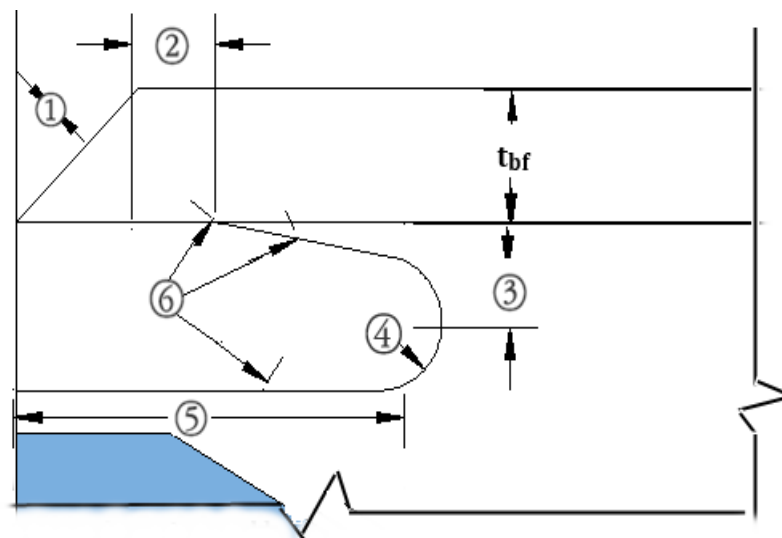
Nota: Dimensionamiento de orificios. Fuente: (AISC.360, 2016)

Donde:

- $a = \frac{1}{4}$ plg mínimo y a $\frac{1}{2}$ plg máximo
- $b = 1$ plg mínimo
- $c = 30^\circ \pm 10^\circ$
- $d = 2$ plg mínimo
- $e = \frac{1}{2}$ plg distancia mínima, 1 plg distancia máxima desde el final de la soldadura de filete hasta el borde del orificio de acceso.

Figura 21.

Detalle del hueco de soldadura de la conexión WUF-W.

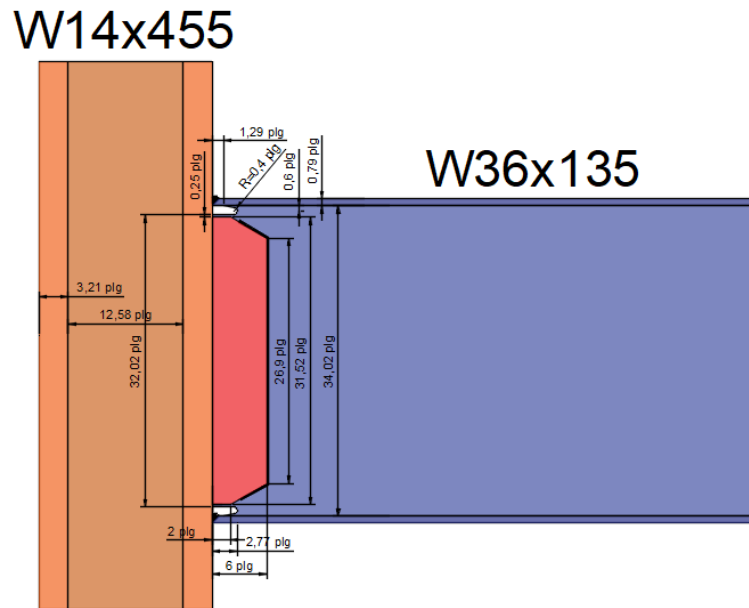


- | | |
|--|-----------------------|
| 1.- Corte de soldadura | 4.- Radio mínimo 10mm |
| 2.- Mayor que t_{bf} 0 13mm | 5.- $3t_{bf}$ |
| 3.- $\frac{3}{4}t_{bf}$ a t_{bf} (mínimo 19mm) | 6.- Ver FEMA 353 |

Nota: Dimensionamiento. Fuente: (Granados)

Figura 22.

Detalle de dimensiones de la conexión WUF-W.



Elaborado por: Los autores.

2.4 Estados límites de la placa de corte.

a) Cálculo de la falla por fluencia del acero de la placa, por medio de la Ecuación 41.

$$P_y = 0.9 * A_{sp} * F_y$$

Ecuación 41

$$P_y = 0.9 * (h_p * t_p) * F_y$$

Donde:

- P_y : Carga resistente a fluencia.
- A_{sp} : Área de acero de la placa.
- h_p : Altura de la Placa.
- t_p : Espesor de la placa.

$$P_y = 0.9 \times (26.9 \times 0.6) \times 36,000$$

$$P_y = 5.23 \times 10^5 \text{ lbf}$$

b) Cálculo de la falla por corte en la placa, por medio de la Ecuación 42.

$$P_v = 0.75 * A_n * F_{ub} \quad \text{Ecuación 42}$$

$$P_v = 0.75 * (h_p * t_p) * F_{ub}$$

Donde:

- P_v : Carga resistente a corte.
- A_n : Área neta de la placa.
- h_p : Altura de la placa.
- F_{ub} : Resistencia a tracción.

$$P_v = 0.75 \times (26.9 \times 0.6) \times 58,000$$

$$P_v = 7.02 \times 10^5 \text{ lbf}$$

2.5 Verificación de los esfuerzos a los que son sometidos tanto el alma como el patín de la columna

a) Cálculo de la flexión del Patín de la columna, por medio de la Ecuación 43.

$$R_n = 0.9 * 6.25 * F_{yc} * t_f^2 \quad \text{Ecuación 43}$$

Donde:

- R_n : Resistencia de diseño.

$$R_n = 0.9 * 6.25 \times 50,000 \times 3.21^2$$

$$R_n = 2.9 \times 10^6 \text{ lbf}$$

- El cálculo de la distancia entre el patín inferior de la viga hasta el centroide del patín superior de la viga, está dado por la Ecuación 44.

$$h_v = d_b - t_{f_b}/2$$

Ecuación 44

$$h_v = 35.6 - \frac{0.79}{2}$$

$$h_v = 35.205 \text{ plg}$$

b) Para determinar el corte al que está siendo sometido la columna se hace uso de la Ecuación 45.

$$V_{uc} = \frac{0.85 * M_{pr}}{h_v}$$

Ecuación 45

Donde:

- V_{uc} : Corte al que esta siendo sometido la columna por la acción de la viga.

$$V_{uc} = \frac{0.85 * 3.84 \times 10^7}{35.205}$$

$$V_{uc} = 9.27 \times 10^5 \text{ lbf}$$

$$R_n \geq V_{uc}$$

$$2.9 \times 10^6 \text{ lbf} > 9.27 \times 10^5 \text{ lbf } \textit{Ok; no se necesita rigidizadores}$$

c) Cálculo de la fluencia del alma de la columna, por medio de la Ecuación 46.

$$R_n = F_{yc} * t_{wc} * (5k_c + l_b)$$

Ecuación 46

Donde:

- k_c : Distancia desde la cara exterior del ala hasta el pie del filete del alma.
- l_b : Longitud de apoyo.
- k_{det} : Distancia desde el centro del alma hasta el borde exterior de la soldadura que une el alma con el patín.

$$R_n = F_{yc} * t_{wc} * (5 * (t_{f_c} + k_{det c}) + (t_{f_b} + k_{det b}))$$

$$R_n = 50,000 \times 2.02 * (5 * (3.21 + 4.5) + (0.79 + 1.6875))$$

$$R_n = 4.14 \times 10^6 \text{ lbf}$$

$$R_n \geq V_{uc}$$

$$4.14 \times 10^6 \text{ lbf} > 9.27 \times 10^5 \text{ lbf } \textit{Ok; no se necesita rigidizadores.}$$

d) Cálculo del aplastamiento del alma de la columna, por medio de la Ecuación 47.

$$R_n = 0.75 * 0.8 * t_w^2 * \left[1 + 3 * \left(\frac{l_b}{d_c} \right) * \left(\frac{t_w}{t_f} \right)^{1.5} \right] \quad \text{Ecuación 47}$$

$$* \sqrt{\frac{E * F_{yc} * t_f}{t_w}}$$

$$R_n = 0.75 \times 0.8 \times 2.02^2 \times \left[1 + 3 \times \left(\frac{2.4775}{19} \right) \times \left(\frac{2.02}{3.21} \right)^{1.5} \right] \times \sqrt{\frac{29'000,000 \times 50,000 \times 3.21}{2.02}}$$

$$R_n = 4.44 \times 10^6 \text{ lbf}$$

$$R_n \geq V_{uc}$$

$$4.44 \times 10^6 \text{ lbf} > 9.27 \times 10^5 \text{ lbf } \textit{Ok; no se necesita rigidizadores}$$

e) Cálculo del pandeo del alma de la columna, por medio de la Ecuación 48.

$$R_n = 0.9 * \left(\frac{24 * t_w^3 * \sqrt{E * F_{yc}}}{h_c} \right) \quad \text{Ecuación 48}$$

Donde:

- h_c : Distancia libre entre alas de la columna.

$$R_n = 0.9 \times \left(\frac{24 \times 2.02^3 \times \sqrt{29'000,000 \times 50,000}}{32.125} \right)$$

$$R_n = 6.67 \times 10^6 \text{ lbf}$$

$$R_n \geq V_{uc}$$

$$6.67 \times 10^6 \text{ lbf} > 9.27 \times 10^5 \text{ lbf} \text{ Ok; no se necesita rigidizadores}$$

f) Cálculo del corte en la zona del panel del alma de la columna, por medio de la Ecuación 49.

$$R_n = 0.6 * F_{yc} * d_c * t_{w_c} \left(1 + \frac{3 * b f_c * t_{f_c}^2}{d_b * d_c * t_{w_c}} \right) \quad \text{Ecuación 49}$$

$$R_n = 0.6 \times 50,000 \times 19 \times 2.02 \left(1 + \frac{3 \times 16.8 \times 3.21^2}{35.6 \times 19 \times 2.02} \right)$$

$$R_n = 1.59 \times 10^6 \text{ lbf}$$

$$R_n \geq V_{uc}$$

$$1.59 \times 10^6 \text{ lbf} > 9.27 \times 10^5 \text{ lbf} \text{ Ok; no se necesita rigidizadores}$$

Como se puede observar la resistencia mínima de la columna ante la sollicitación de cargas concentradas corresponde al valor de $1.59 \times 10^6 \text{ lbf}$ debido a la flexión del patín de la columna.

De la misma forma se puede concluir que la zona del panel en el nodo no necesita de rigidizadores ya que la concentración de esfuerzos que afecta dicha zona no es lo suficientemente grande para producir un daño significativo en ese lugar.

2.6 Soldadura.

La soldadura de junta de penetración completa (CJP), se lo debe realizar de tal manera que el patín de la viga se conecte perfectamente con el patín de la columna, del mismo modo se debe conectar el alma de la viga con el patín de la columna, teniendo en

cuenta que el espesor de la garganta efectiva debe ser el espesor de la parte más delgada a conectar, (AISC.360, 2016).

La soldadura de filete se lo realizara para unir la placa de refuerzo con el alma de la viga y con el patín de la columna.

El tamaño de las soldaduras de filete debe ser de tal manera que logre transmitir la fuerza calculada, para lo cual se recomienda la utilización de los criterios establecidos por el (AISC.360, 2016).

Tabla 4.

Tamaño Mínimo de Soldadura de Filete.

Tamaño mínimo de soldadura de filete	
Espesor de parte unida más delgada, mm	Tamaño de soldadura de filete, mm
Hasta 6 inclusive	3
Entre 6 y 13	5
Entre 13 y 19	6
Mayor que 19	8

Nota: Tamaños de soldadura dados. Fuente: (Aguirre, 2016)

2.6.1 Diseño de la soldadura de filete, en la unión de la placa de corte con el patín de la columna.

Dimensiones de la placa= 31.52x6x0.6 plg

- Para el cálculo de la resistencia mínima de la soldadura, se hará uso de la Ecuación 50.

$$R_{s_{\min}} = 0.6 * hp * tp * Ry * Fy \quad \text{Ecuación 50}$$

- $R_{s_{\min}}$: Resistencia mínima de la soldadura que debe tener.

$$R_{s_{\min}} = 0.6 \times 31.52 \times 0.6 \times 1.5 \times 36,000$$

$$R_{s_{\min}} = 6.13 \times 10^5 \text{ lbf}$$

- Cálculo de la resistencia de la soldadura por unidad de longitud, mediante la utilización de la Ecuación 51

$$R_{s_{\text{SOL}}} = 0.32 * E_{\text{elec}} * g \quad \text{Ecuación 51}$$

Donde:

- $R_{s_{\text{SOL}}}$: Resistencia de la soldadura
- E_{elec} : Resistencia del electrodo
- g : Garganta de soldadura

$$R_{s_{\text{SOL}}} = 0.32 \times 70,000 \times 0.9$$

$$R_{s_{\text{SOL}}} = 2.02 \times 10^4 \text{ lbf/plg}$$

- Cálculo de la longitud del cordón de soldadura, mediante la utilización de la Ecuación 52.

$$L_s = \frac{R_{s_{\min}}}{R_{s_{\text{SOL}}}} \quad \text{Ecuación 52}$$

Donde:

- L_s : Longitud del cordón de soldadura

$$L_s = \frac{6.13 \times 10^5}{2.02 \times 10^4}$$

$$L_s = 30.35 \text{ plg}$$

Por lo tanto, el electrodo a utilizar será de **70 ksi**.

2.6.2 Diseño de la soldadura de filete en la unión de la placa de corte con el alma de la viga.

Para el presente diseño, se tomará el corte que se produce en la cara de la columna.

$$V_u = 2.25 \times 10^5 \text{ lbf}$$

- Cálculo de la resistencia de la soldadura por unidad de longitud, mediante la utilización de la Ecuación 53.

$$R_{SOL} = 0.32 * E_{elec} * g \quad \text{Ecuación 53}$$

$$R_{SOL} = 0.32 \times 70,000 \times 0.4$$

$$R_{SOL} = 8.96 \times 10^3 \text{ lbf/plg}$$

- Cálculo de la longitud del cordón de soldadura, mediante la utilización de la Ecuación 54.

$$L_s = \frac{V_u}{R_{SOL}} \quad \text{Ecuación 54}$$

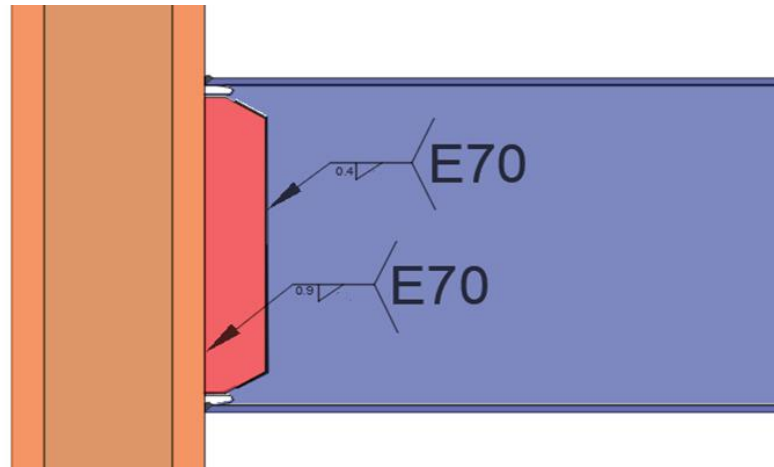
$$L_s = \frac{2.25 \times 10^5}{8.96 \times 10^3}$$

$$L_s = 25.1 \text{ plg}$$

Como se puede observar en la Figura 23 se muestra la ubicación de la soldadura de filete en la conexión.

Figura 23.

Detalle de la soldadura de filete en la conexión.



Elaborado por: Los autores.

2.6.3 Diseño de la soldadura (CJP), que conecta tanto el patín de la viga con el patín de la columna, como el alma de la viga con el patín de la columna.

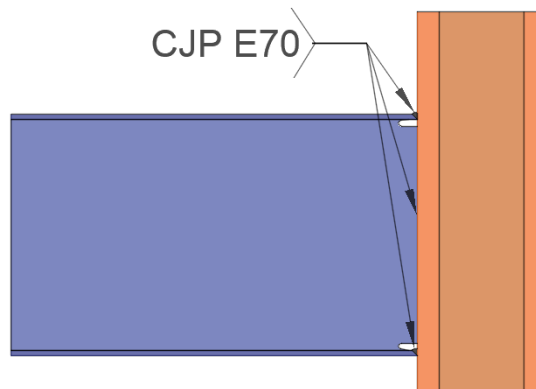
A continuación, se detallan los criterios a tomar en cuenta para realizar la soldadura de penetración completa:

- La soldadura de junta de penetración completa (CJP), se lo deberá realizar de tal manera que garantice la perfecta unión de los elementos a conectar.
- El espesor mínimo de la soldadura será igual al espesor del elemento más delgado a conectar.
- La resistencia de la soldadura deberá ser mayor a la resistencia a tracción de los elementos a conectar.
- El bisel de los elementos a conectar deberá estar entre (30 a 45) grados.

De acuerdo a lo mencionado con anterioridad, se requiere de un electrodo de 70 ksi para conectar las secciones indicadas en la Figura 24 por medio de la soldadura (CJP).

Figura 24.

Detalle de la soldadura CJP en la conexión.



Elaborado por: Los autores.

2.6.4 Propiedad Mecánica del Electrodo.

Para la elaboración del modelo, es necesario definir las propiedades mecánicas que presenta el electrodo de soldadura a utilizar, por lo que a continuación se detalla las propiedades del electrodo E-70:

- F_y (ksi) = 75
- F_u (ksi) = 85

Nota: las propiedades del electrodo mostradas en el cuadro anterior, corresponden a los establecidos por la compañía **Lincoln electric**.

2.6.5 Protocolo de carga.

Por medio del protocolo de carga se realiza la calificación de una conexión, esto se lo hace en base a un ensayo experimental de daño acumulativo de carga y descarga, la cual tiene que soportar un momento flector en la cara de la columna superior al 80% del momento plástico que actúa en la viga, para una rotación de 0.04 rad para ser considerado como una conexión resistente a momento.

A continuación, se presentan los ciclos de carga a los que debe ser sometido la conexión para ser considerada una conexión resistente a momento.

Figura 25.

Ciclos de carga para conexión resistente a momento.

6	ciclos de θ	=	0.00375	rad
6	ciclos de θ	=	0.005	rad
6	ciclos de θ	=	0.0075	rad
4	ciclos de θ	=	0.01	rad
2	ciclos de θ	=	0.015	rad
2	ciclos de θ	=	0.02	rad
2	ciclos de θ	=	0.03	rad
2	ciclos de θ	=	0.04	rad

Nota: Referencia de ciclo de carga. Fuente: (AISC.341, 2016)

Nota: se continúa cargando en incrementos de $\theta = 0.01$ rad, con dos ciclos de carga en cada paso.

En base a los ciclos de carga, se inducirá los desplazamientos a los que estará expuesta la viga de la conexión, para ello se utilizará la longitud de la viga, la cual corresponde a la longitud del vano de la edificación de 9 pisos.

Longitud del vano = 360 plg.

Tabla 5.

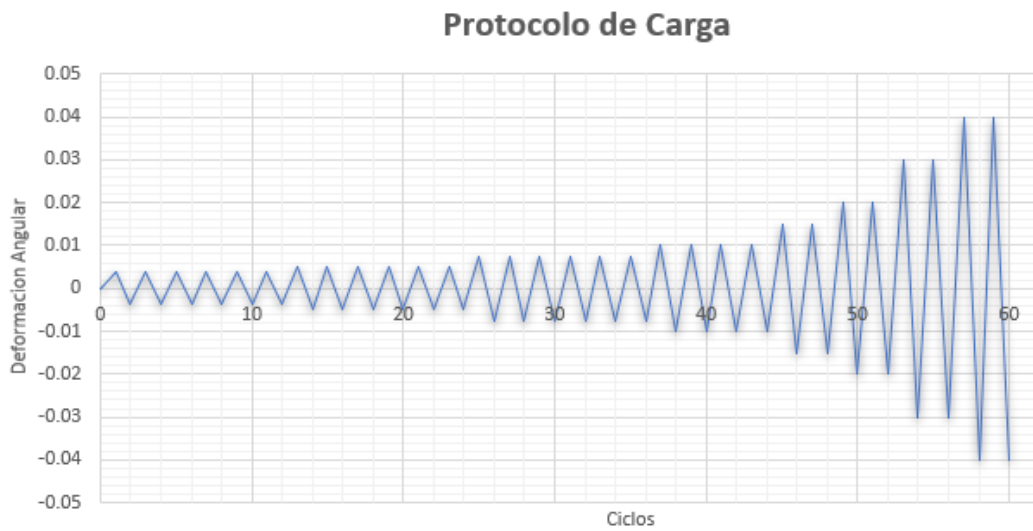
Desplazamiento de la viga para cada ciclo de carga.

<i>Giro (rad)</i>	<i>Desplazamiento (plg)</i>
0.00375	1.35
0.005	1.8
0.0075	2.7
0.01	3.6
0.015	5.4
0.02	7.2
0.03	10.8
0.04	14.4
0.05	18
0.06	21.6

Elaborado por: Los autores.

Figura 26.

Protocolo de carga.



Elaborado por: Los autores.

2.6.6 Datos considerados para la verificación de la conexión en Ansys

Tabla 6

Datos ingresados al software Ansys.

Resumen de Datos			
Tipo de Material			
Acero			
Geometría de la sección			
Viga			W36X135
Columna			W14X455
Placa de Refuerzo			31.52x6x0.6 plg
Propiedades Mecánicas del Acero			
Acero ASTM A-36			
fy	36 ksi	fu	58 ksi
			29000 ksi
E			
Acero ASTM 572 G.50			
fy	50 ksi	fu	65 ksi
			29000 ksi
E			
Propiedades Mecánicas del Electrodo			
E-70 ksi			
fy	70 ksi	fu	85 ksi
			29000 ksi
E			
Protocolo de Carga			

Elaborado por: Los autores.

CAPÍTULO III

MODELO DE CONEXIÓN EN ANSYS

3.1 Introducción

En el presente capítulo III se presenta el desarrollo de la conexión “Ala soldada sin refuerzo y alma soldada (WUF-W)”, en el software Ansys, donde se detalla los procesos de la modelación y se presentará el análisis realizado en la interfaz WORKBENCH.

3.2 Pre-proceso

3.2.1 Generación del modelo.

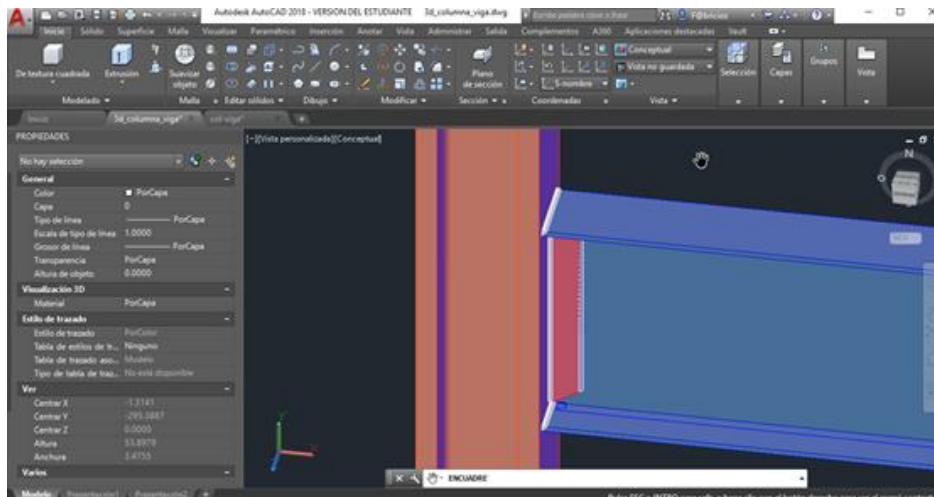
La generación de la conexión a momento (WUF-W)”, se describe con el siguiente procedimiento.

Ingreso de Geometría

En nuestro caso la geometría fue modelada en AutoCad, donde las dimensiones de la columna y viga se encuentran en (Y. Ohtori, 2004), especificado en el capítulo II.

Figura 27.

Pantalla de AutoCAD, modelación de la estructura (Viga-columna y conexión).



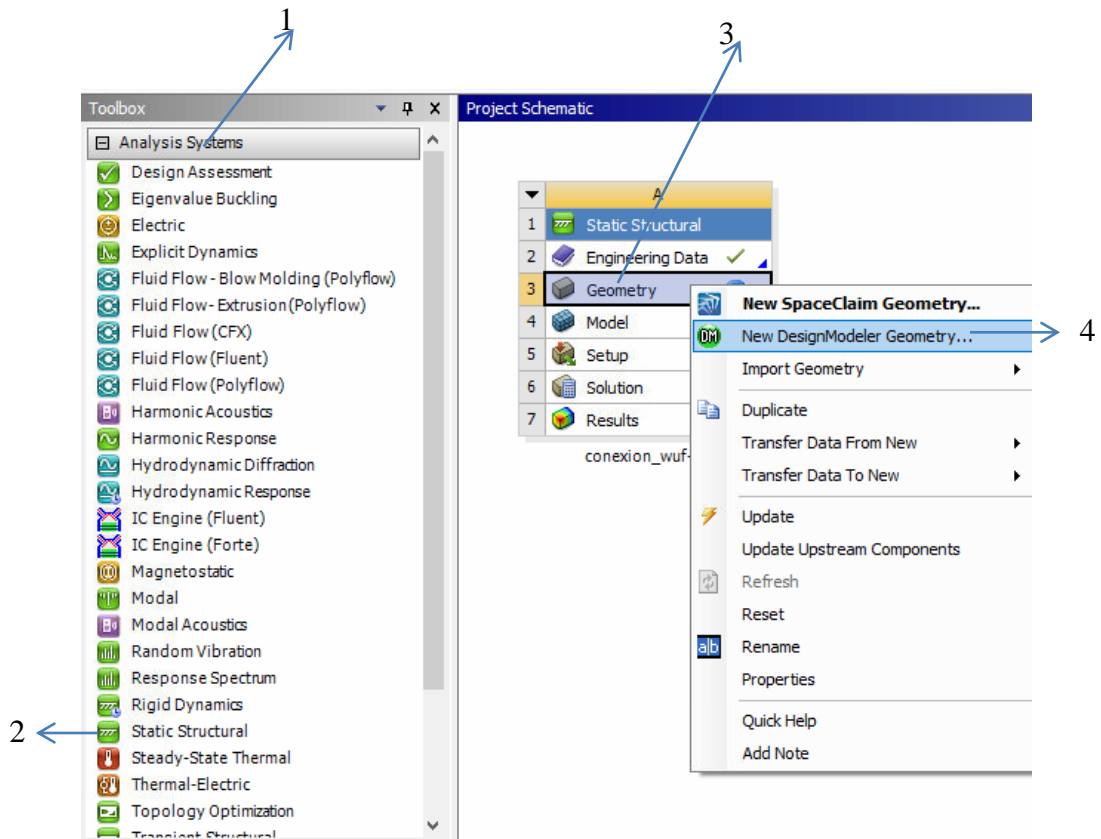
Elaborado por: Los autores a través del Software AutoCad.

El proceso a seguir consiste en importar la geometría como se indica en la Figura 28.

1. Clic en la ventana de Analysis Systems
2. Clic en Static Structural
3. Clic en Geometry
4. Clic New Desing Modeler Geometry

Figura 28.

Ventana de Workbench.



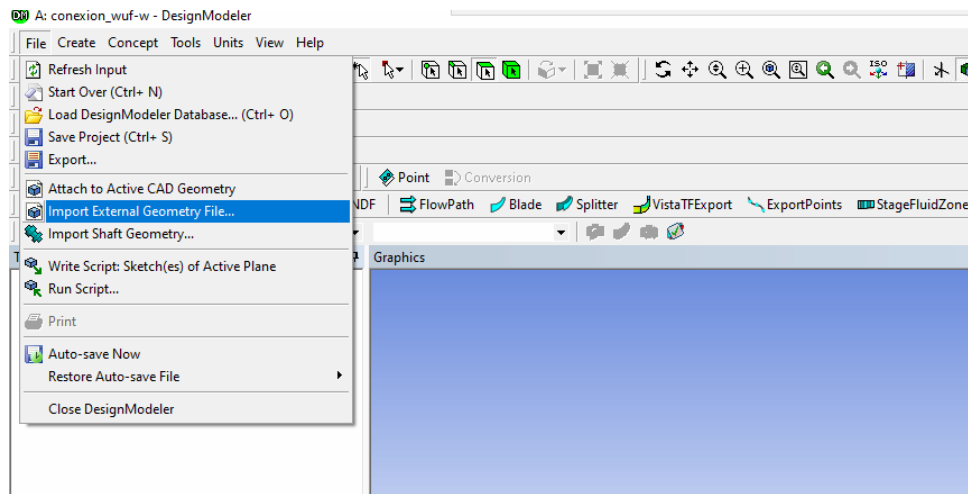
Elaborado por: Los autores a través del Software ANSYS.

A continuación, se genera la ventana Design Modeler, donde se encuentran las herramientas de dibujo.

Ingresamos a “File” y a continuación se despliega un menú donde se procede a importar la geometría en “Import External Geometry File”, como se indica en la Figura 29, para posteriormente buscar el archivo del modelo.

Figura 29.

Ventana Design Modeler.



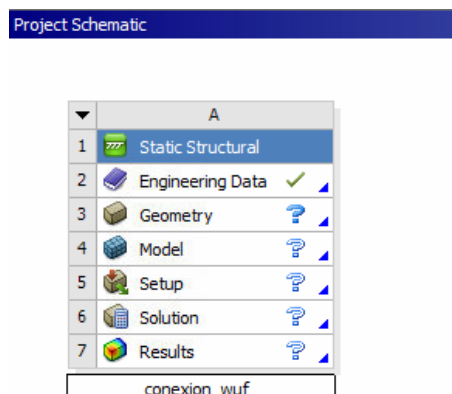
Elaborado por: Los autores a través del Software ANSYS.

Características del Material

Para añadir las características de material, ingresamos desde la ventana “Project Schematic”, menú “Engineering Data” como se indica en la Figura 30.

Figura 30.

Ventana de trabajo – Project Schematic.

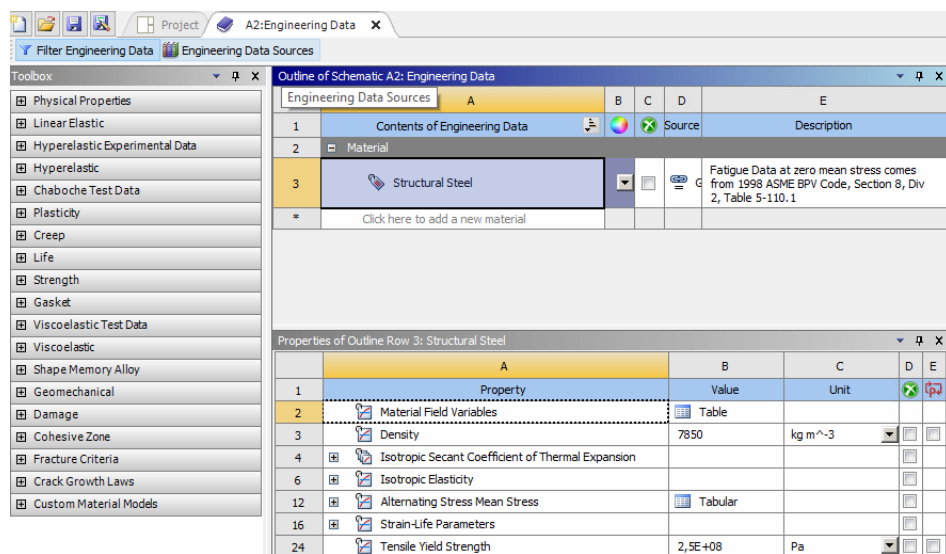


Elaborado por: Los autores a través del Software ANSYS.

En la Figura 31 se muestra la ventana “Engineering Data” que permite ingresar las características del material y la geometría, que se encuentran especificadas en la Tabla 6.

Figura 31.

Ventana Engineering Data.



Elaborado por: Los autores a través del Software ANSYS.

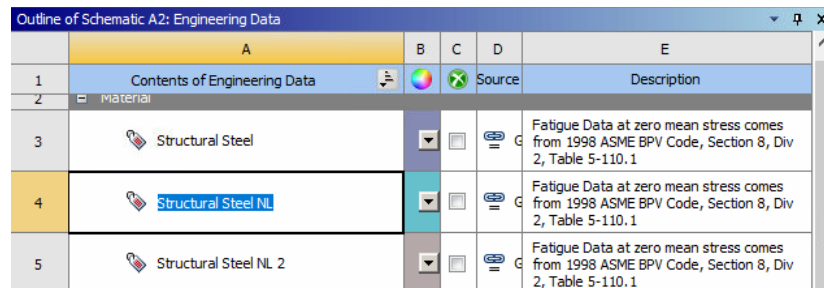
Engineering Data.- Ventana de registro de materiales que presenta diferentes menús:

- Engineering Data Sources.- Menú de ingreso de los diferentes tipos de materiales
- Property.- Menú de ingreso de propiedades de materiales.

Para nuestro análisis seleccionamos el análisis no lineal, posteriormente se procede a ingresar los materiales del modelo y sus propiedades como se indica en la Figura 32.

Figura 32.

Menú definición de generalidades de los materiales.



	A	B	C	D	E
1	Contents of Engineering Data			Source	Description
2	Material				
3	Structural Steel				Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
4	Structural Steel NL				Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
5	Structural Steel NL 2				Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1

Elaborado por: Los autores a través del Software ANSYS.

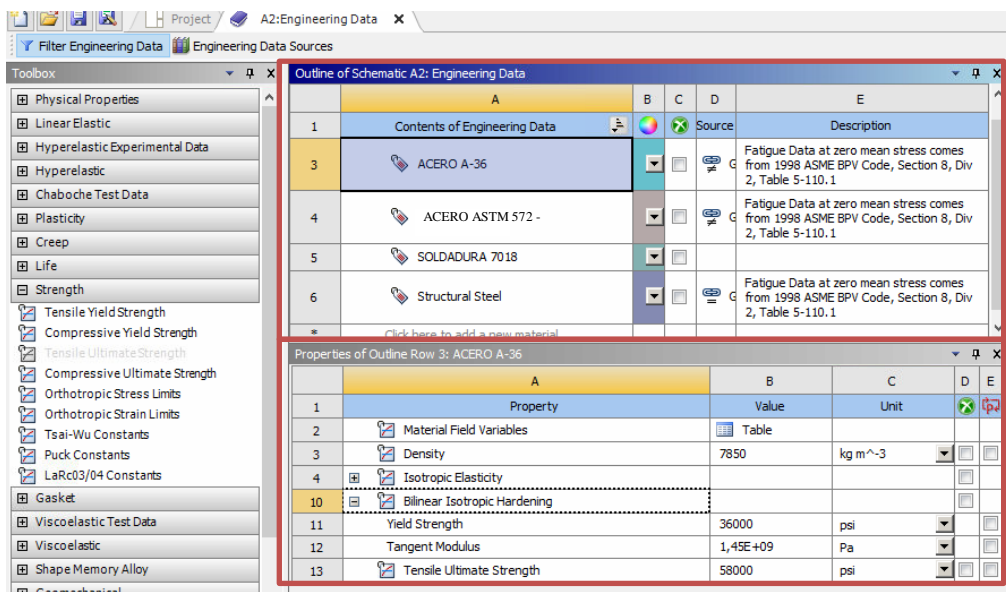
Para ingresar las propiedades de los materiales realizamos el siguiente proceso.

Señalamos el material e ingresamos las propiedades del material en el menú Toolbox.

Damos clic en Strength, donde se despliega un nuevo menú de datos. Dicho procedimiento se lo realizará para todos los materiales.

Figura 33.

Ventana de ingreso de materiales y propiedades.



	A	B	C	D	E
1	Contents of Engineering Data			Source	Description
3	ACERO A-36				Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
4	ACERO ASTM 572 -				Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
5	SOLDADURA 7018				
6	Structural Steel				Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1

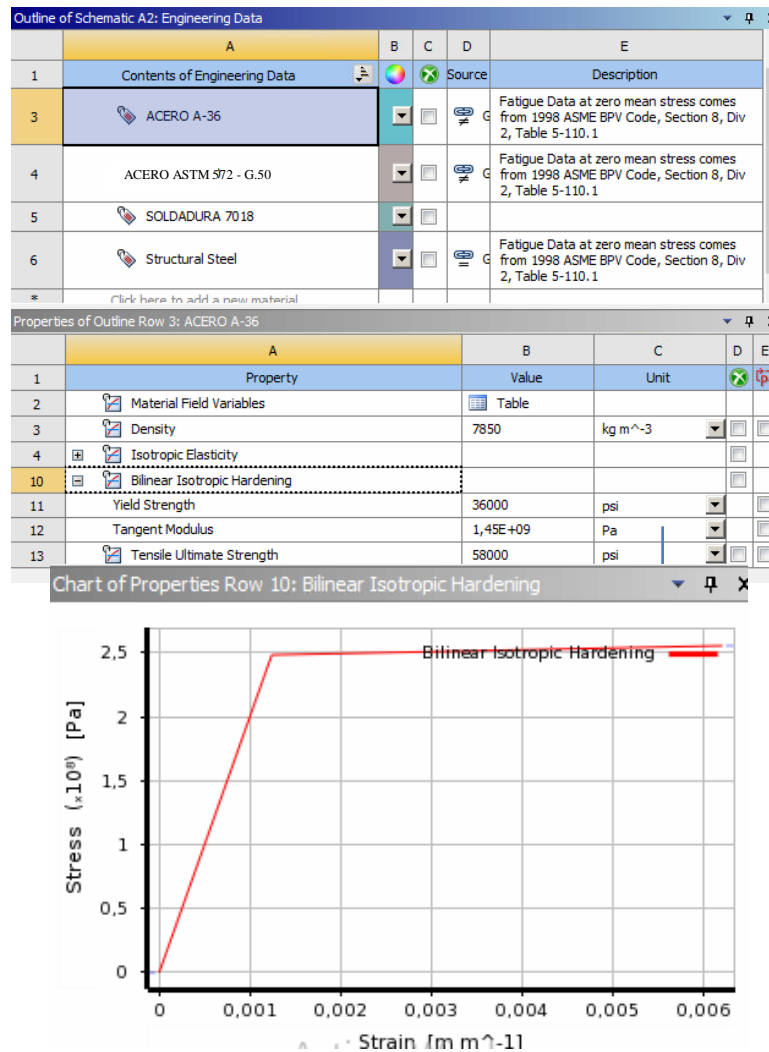
	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	7850	kg m ⁻³		
4	Isotropic Elasticity				
10	Bilinear Isotropic Hardening				
11	Yield Strength	36000	psi		
12	Tangent Modulus	1,45E+09	Pa		
13	Tensile Ultimate Strength	58000	psi		

Elaborado por: Los autores a través del Software ANSYS.

Una vez ingresados los materiales tenemos la generación de la gráfica “Bilineal” del Acero A-36, como se indica la Figura 34, en el cual se considera una rigidez de posfluencia del 5%, de acuerdo a lo recomendado en el software Ansys.

Figura 34.

Menú de datos del Acero A-36.

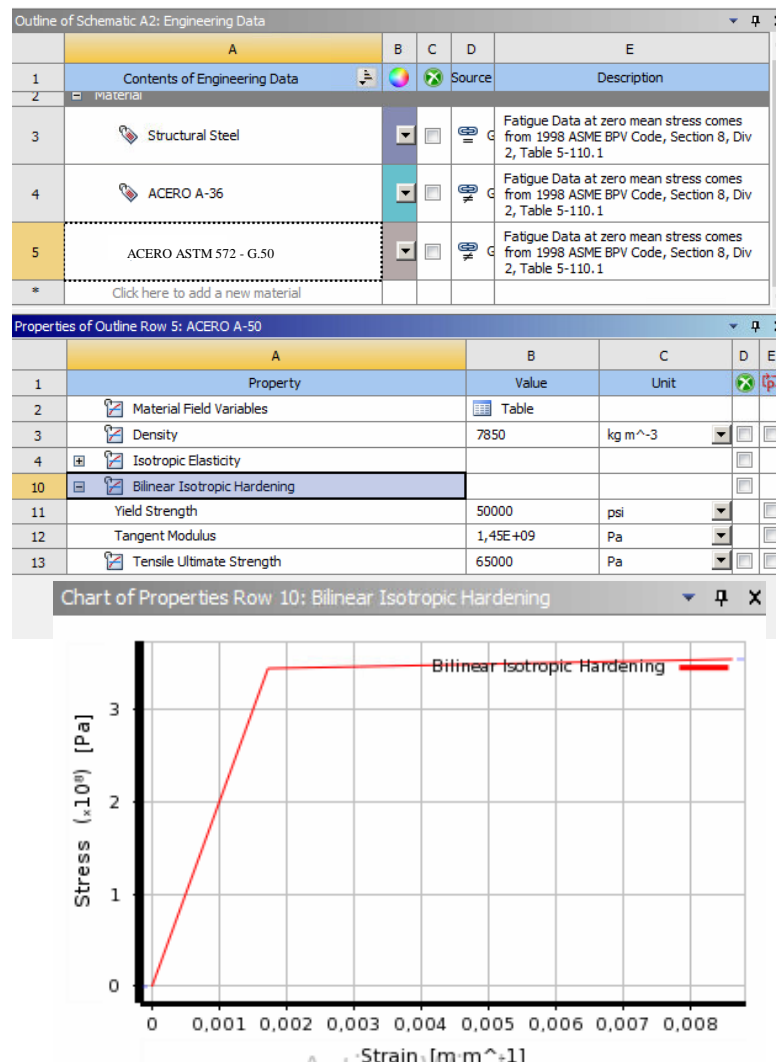


Elaborado por: Los autores a través del Software ANSYS.

Para el Acero A-50 tenemos las siguientes propiedades y gráfica “Bilineal” como se indica la Figura 35, en el cual se considera una rigidez de posfluencia del 5%, de acuerdo a lo recomendado en el software Ansys.

Figura 35.

Menú de datos del acero A-50.



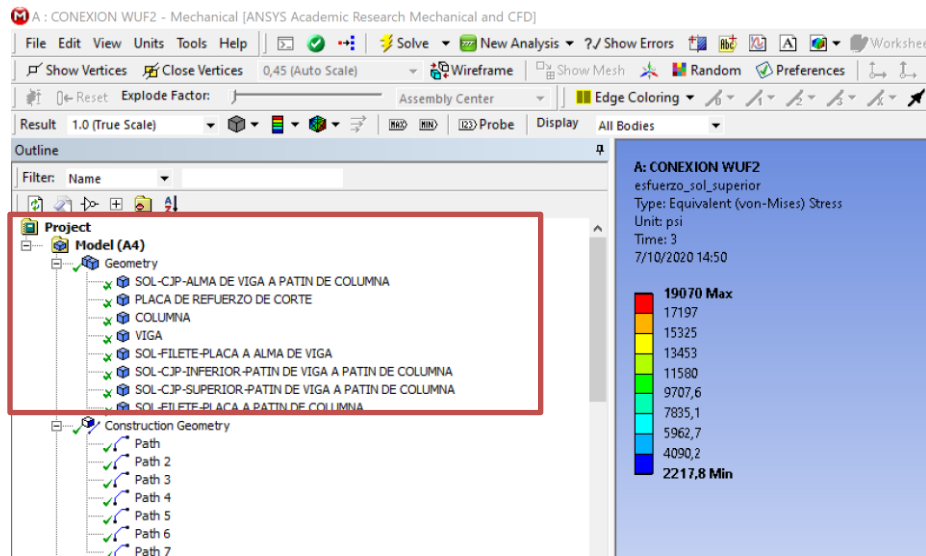
Elaborado por: Los autores a través del Software ANSYS.

3.2.2 Modelo estructural

Procedemos a la configuración del escenario para la geometría, ingresamos desde la barra “Project Schematic”, menú “Model” como se indica en la Figura 30 e identificamos todas las partes de la geometría importada como se muestra en la Figura 36.

Figura 36.

Flujo grama para la generación de modelo.

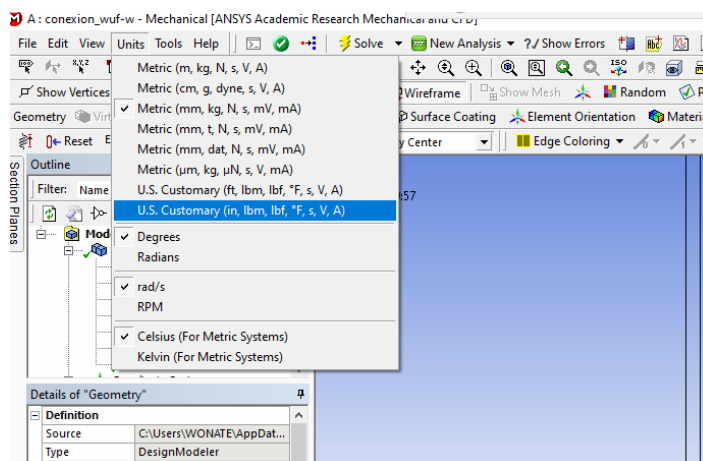


Elaborado por: Los autores a través del Software ANSYS.

Para la definición de unidades del modelo, damos clic en la barra como se indica en la Figura 37.

Figura 37.

Barra de unidades.



Elaborado por: Los autores a través del Software ANSYS.

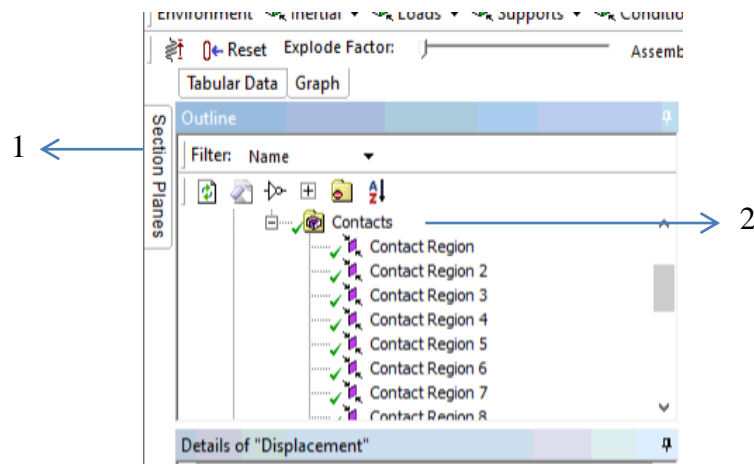
Contactos

Para ingresar los diferentes contactos que se requieren para el estudio seguimos los siguientes pasos.

1. Ingresar al menú (Selection Planes)
2. Clic en Contacts

Figura 38.

Menú para ingresar condiciones de contorno.



Elaborado por: Los autores a través del Software ANSYS.

Una vez desplegado el menú de contorno, se tiene varias regiones para la aplicación del tipo de contacto y procedemos a seguir los siguientes pasos para la asignación.

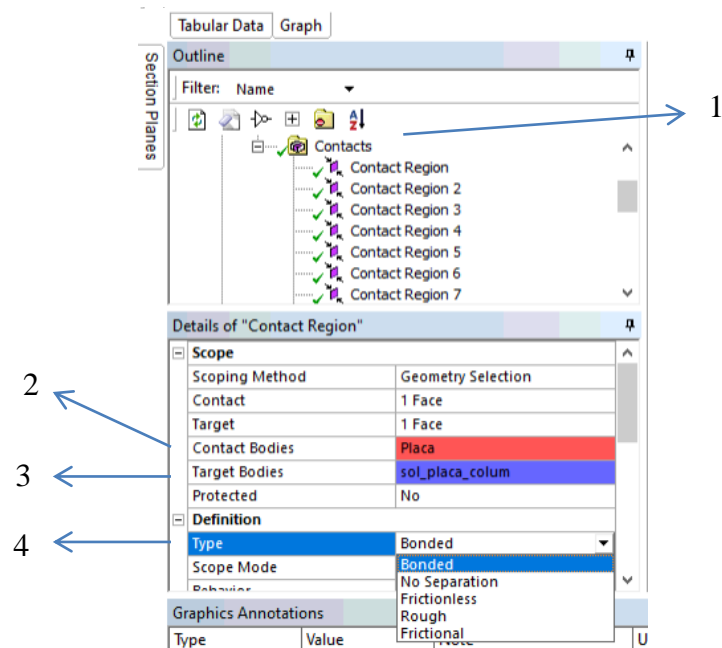
1. Ingresar al menú y seleccionar “Contact Región”, dependiendo el contacto que se desee analizar.

Verificamos las regiones de contacto en:

- a. Contact Bodies
 - b. Targer Bodies,
2. Colocar el tipo de contacto “Type”.

Figura 39.

Menú de tipo de contacto.

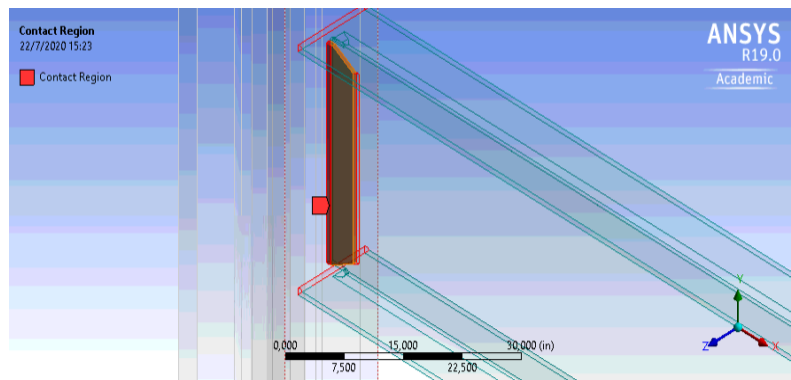


Elaborado por: Los autores a través del Software ANSYS.

Como se puede apreciar en la Figura 39 se debe seleccionar la región de contacto respecto al cuerpo de contacto y al cuerpo del objeto.

Figura 40.

Pantalla de Ansys, selección de región de contacto de la placa.



Elaborado por: Los autores a través del Software ANSYS.

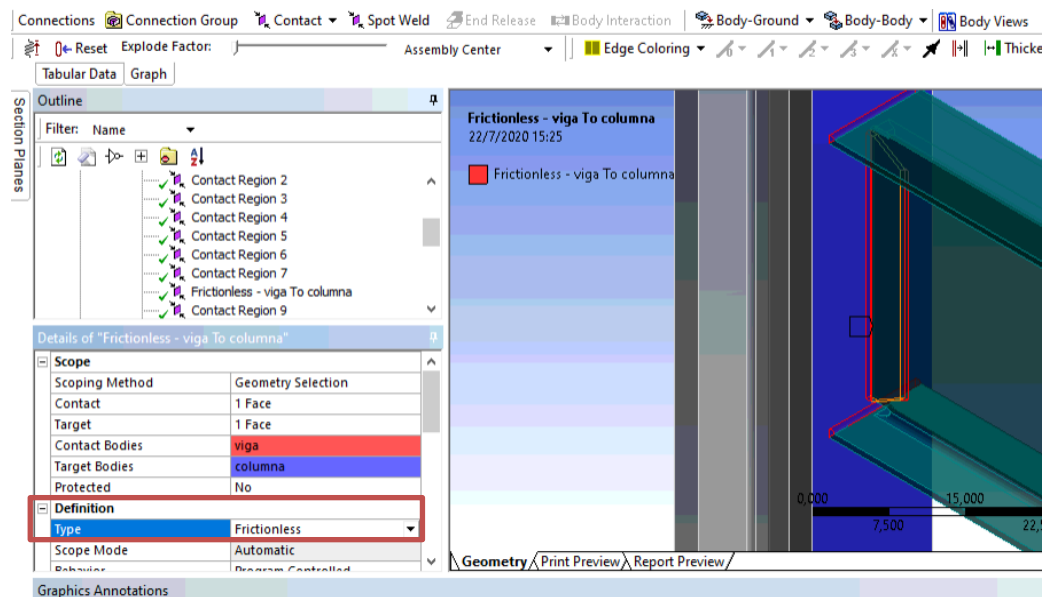
Para nuestro análisis definiremos dos tipos de regiones:

1.- Región de contacto **Bonded**.- Se presenta para todas las regiones vinculadas directamente, el cual garantiza que se aplique el análisis a todas las regiones de contacto (superficies, sólidos, líneas, caras, aristas).

2.- Región de contacto **Frictionless**. Se presenta para el caso de regiones que no se encuentran vinculadas directamente, se presenta también en casos de sistemas empernados, este comando es utilizado para regiones que producen fricción.

Figura 41.

Designación de tipos de contacto.



Elaborado por: Los autores a través del Software ANSYS.

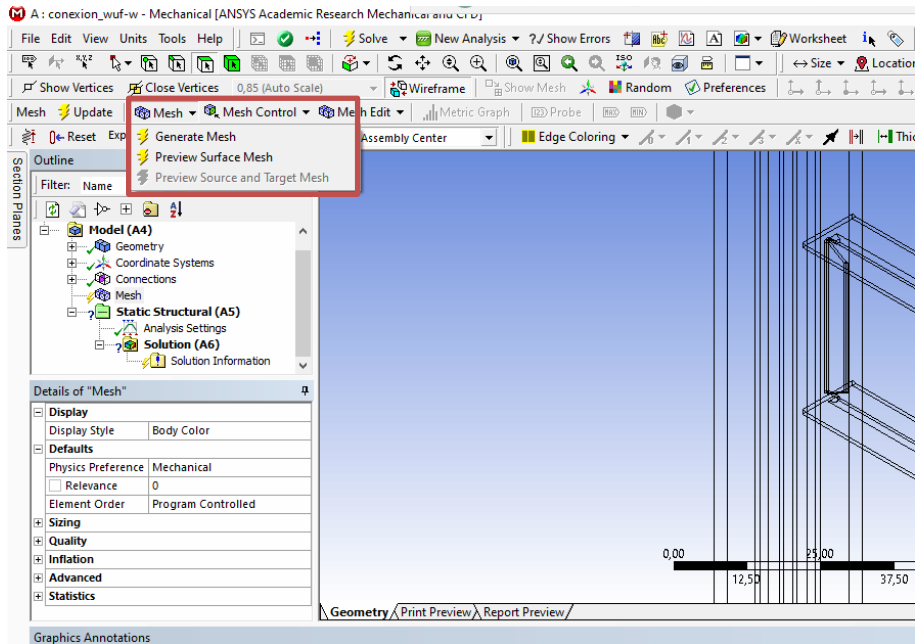
3.2.3 Mallado

La generación de mallado se lo realiza a través del comando "Mesh" como se indica en la Figura 42, donde nos permite modificar los diferentes tamaños de malla.

El objetivo principal del software Ansys es poder modificar el mallado y optar por un método adecuado para tener resultados precisos.

Figura 42.

Barra de mallado.



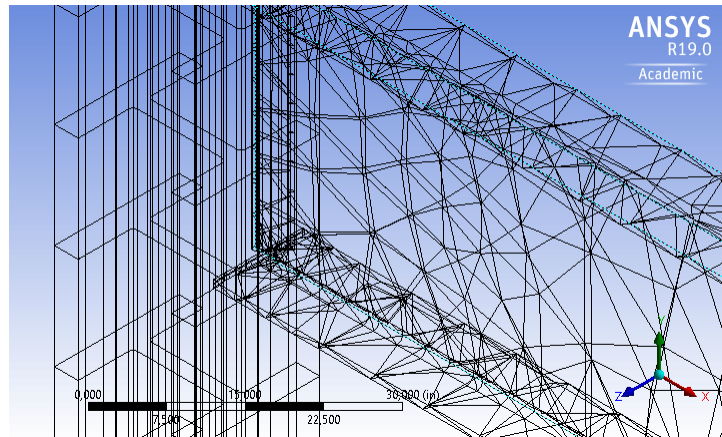
Elaborado por: Los autores a través del Software ANSYS.

Para generar la malla damos clic en la barra de mallado “Mesh”, donde se despliegan la opción de generación de mallado y previo mallado de la superficie.

Seleccionaremos “previo mallado de superficie” donde Ansys nos presenta un mallado automático como se muestra en la Figura 43.

Figura 43.

Generación de mallado en el elemento.



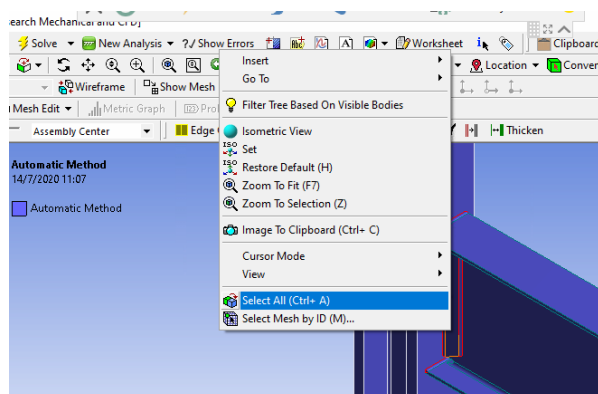
Elaborado por: Los autores a través del Software ANSYS.

Refinación de mallado.

Para la refinación de malla procedemos a seleccionar las regiones de análisis, clic izquierdo en la pantalla de Ansys, donde se despliega un menú y se procede a seleccionar “Select All”, como se indica en la Figura 44.

Figura 44.

Generación de refinado de mallado.



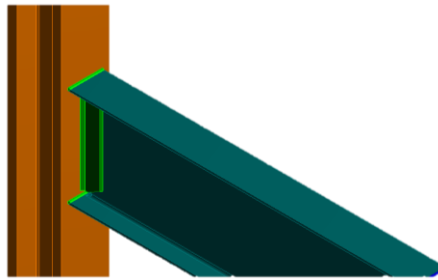
Elaborado por: Los autores a través del Software ANSYS.

En nuestro caso procedemos a seleccionar la geometría completa como se indica en la Figura 45 y el método automático de mallado.

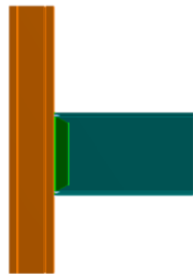
Figura 45.

Región de soldadura.

Soldadura



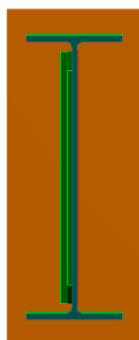
a) *Vista 3D. Soldadura*



b) *Vista frontal*



c) *Vista superior*



d) *Vista lateral izquierdo*



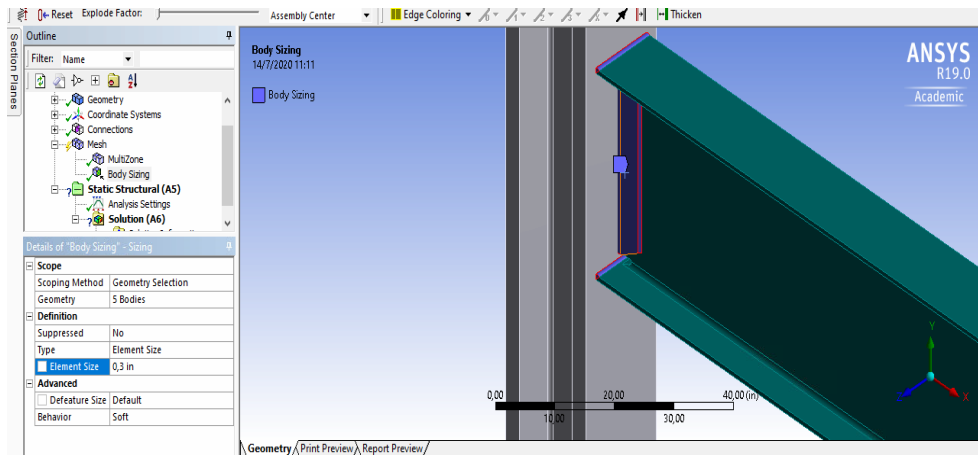
e) *Vista posterior*

Elaborado por: Los autores a través del Software ANSYS.

Conexión

Figura 46.

Región en la conexión.

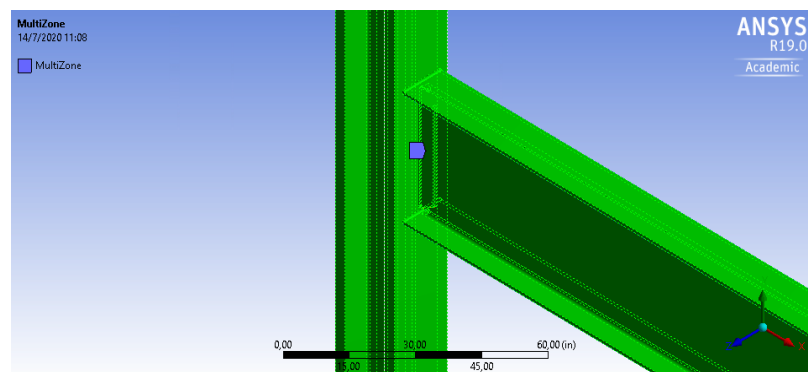


Elaborado por: Los autores a través del Software ANSYS.

Viga – Columna

Figura 47.

Región Viga. Columna.



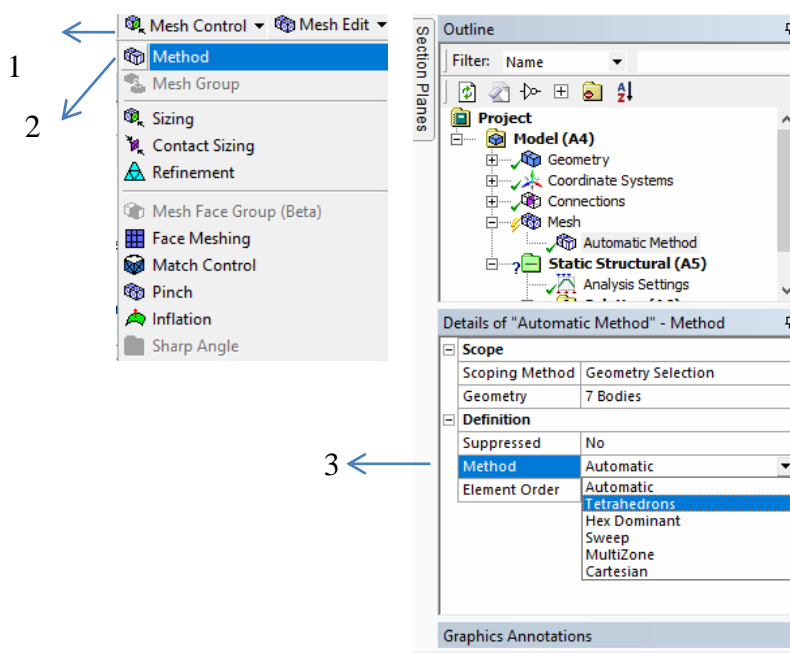
Elaborado por: Los autores a través del Software ANSYS.

Una vez seleccionadas las regiones, desplegamos los parámetros para la selección del método de malla adecuado para el refinamiento, como se indica en la Figura 48.

1. Clic en Mesh Control
2. Clic en Method
3. Seleccionar el método de malla que se requiera para el estudio.

Figura 48.

Menú de selección de método para mallado.



Elaborado por: Los autores a través del Software ANSYS.

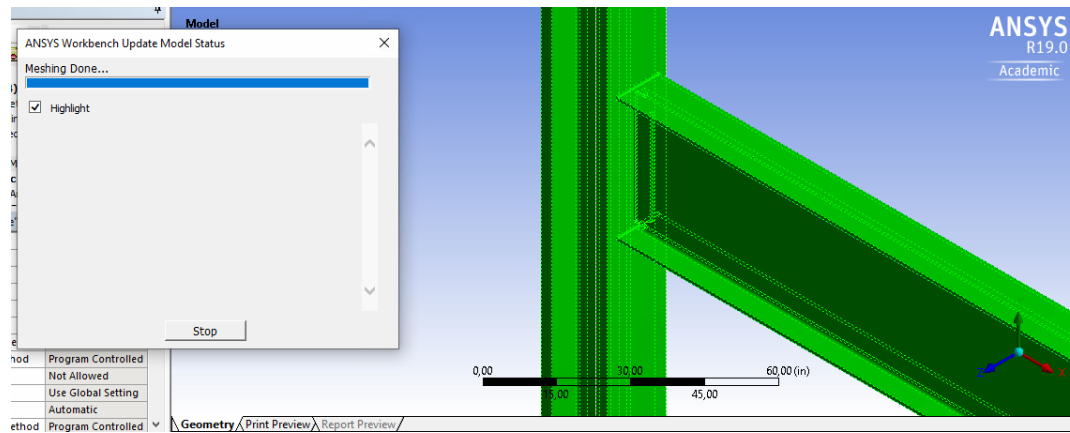
Como se observa en la Figura 48, Ansys 19.0 nos proporciona varias opciones de métodos, que para el caso de nuestra conexión seleccionaremos tetraedros.

3.3 Análisis

En este proceso empieza la generación del análisis del mallado seleccionado, como se indica en la Figura 49.

Figura 49.

Generación de malla.



Elaborado por: Los autores a través del Software ANSYS.

3.3.1 Generalidades y definición del modelo

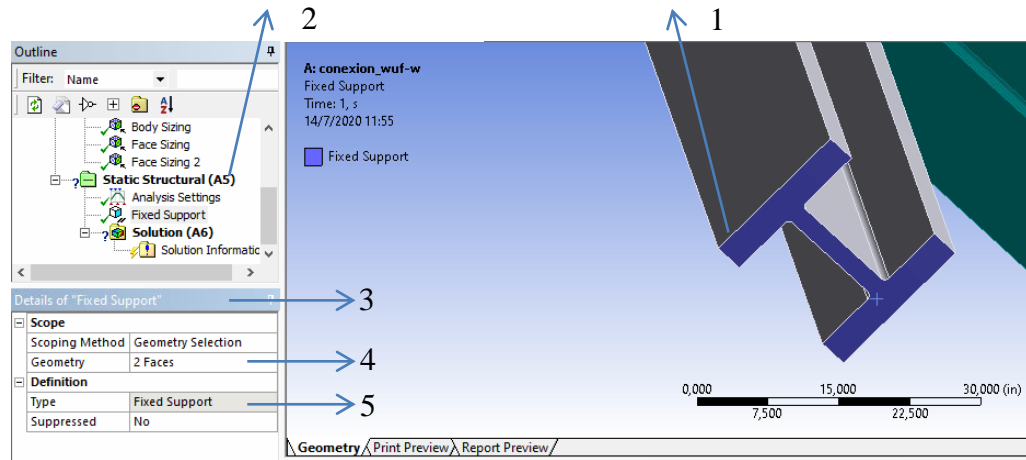
Empotramiento del segmento

Para realizar el empotramiento de la geometría, realizamos los siguientes pasos como se indica en la Figura 50.

1. Seleccionar segmento
2. Clic en Static Structural
3. Fixed Support
4. Geometry – 2 Faces,
5. Type - Fixed Support

Figura 50.

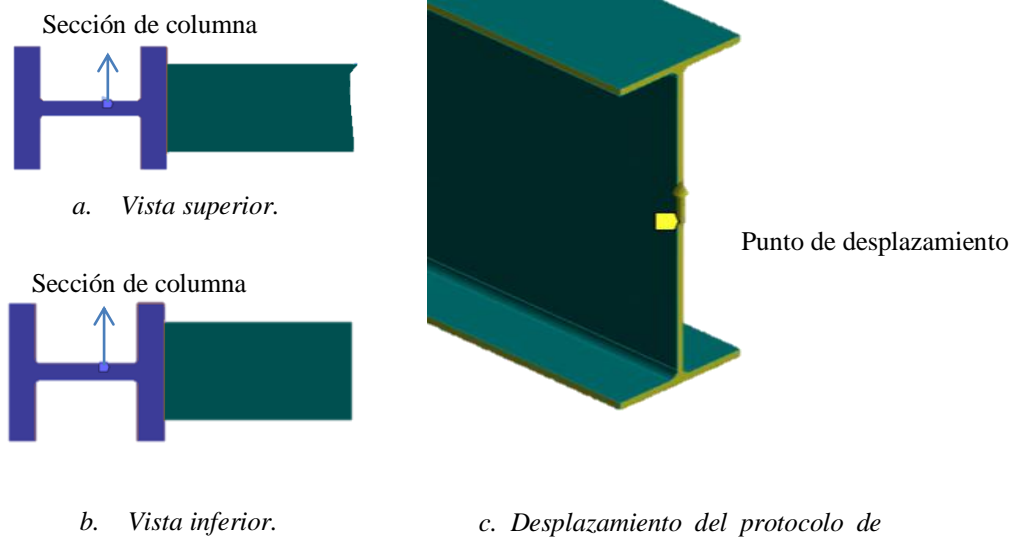
Definición de empotramiento.



Elaborado por: Los autores a través del Software ANSYS.

Figura 51.

Desplazamiento de viga por protocolo de carga y desplazamiento de columna restringida.



Elaborado por: Los autores a través del Software ANSYS.

Protocolo de carga

Procedemos a ingresar el protocolo de carga, que forma parte del sistema para calificación de una conexión sismorresistente, relacionando las magnitudes de las deformaciones con el número de ciclos que reflejan las demandas máximas de deformaciones.

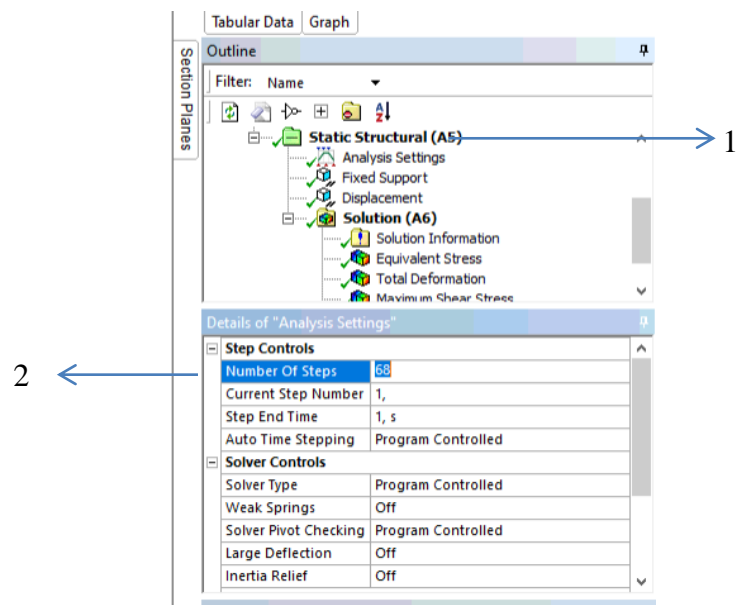
De esta manera se indica el proceso de ingreso de datos en Ansys 19.0.

Seleccionamos

1. Analysis Settings - número de pasos “68” determinados por el protocolo de carga
2. Clic en Number of Steps

Figura 52.

Menú de ingreso de datos para el protocolo de carga.



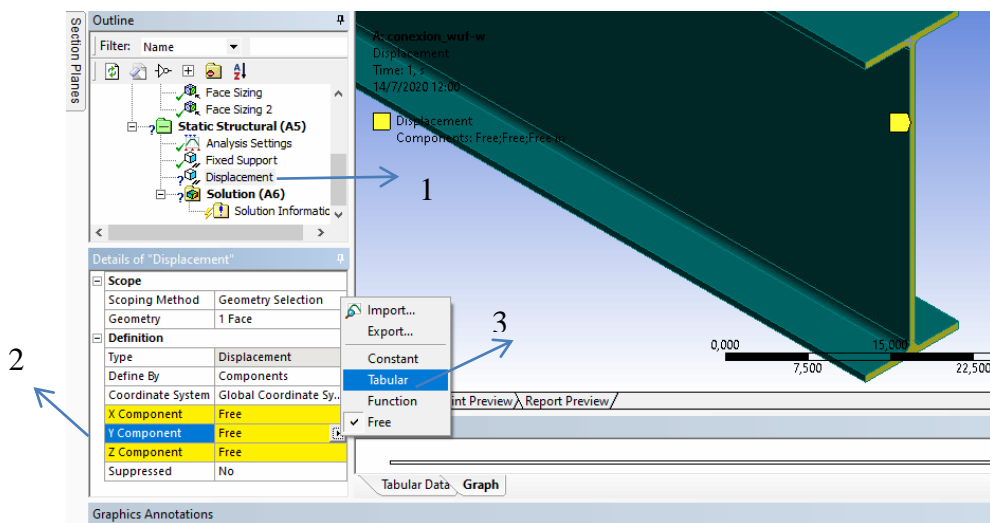
Elaborado por: Los autores a través del Software ANSYS.

Seleccionamos:

1. Displacement
2. Clic en Y Component
3. Clic en Tabular

Figura 53.

Menú de ingreso eje para el protocolo de carga.

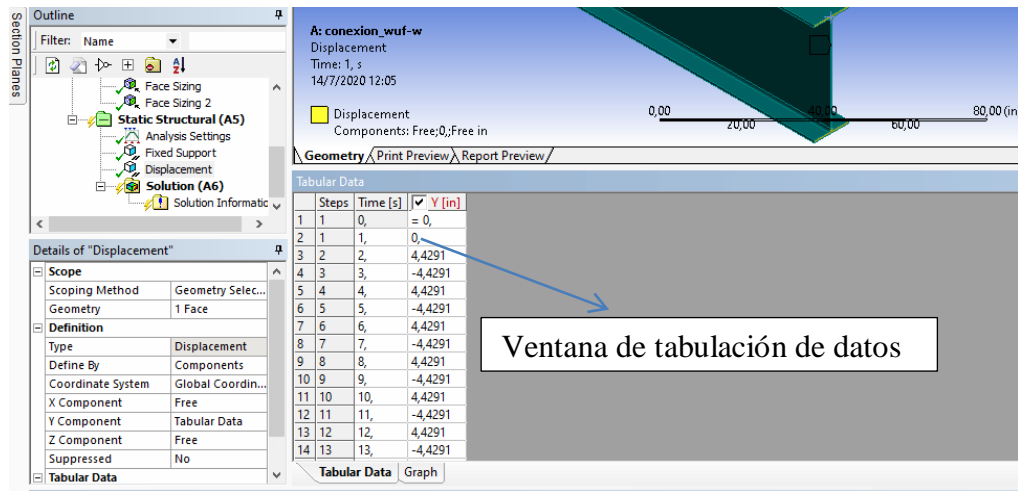


Elaborado por: Los autores a través del Software ANSYS.

Ingreso de datos del protocolo de carga, donde se presentan 60 datos en el eje y

Figura 54.

Ventana de tabla de datos.

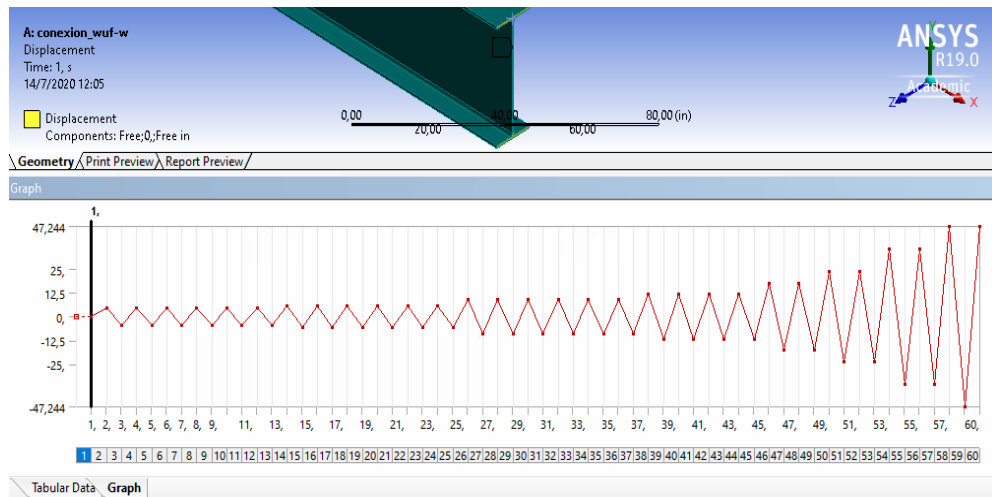


Elaborado por: Los autores a través del Software ANSYS.

Seleccionamos la pestaña Graph y se muestra la gráfica de protocolo de carga para el eje “y”.

Figura 55.

Gráfica de protocolo de carga en Ansys.



Elaborado por: Los autores a través del Software ANSYS.

Evaluación del desempeño de la conexión.

Para la evaluación de desempeño de la conexión en Ansys 19.0, el menú de barras nos presenta diferentes opciones para el análisis a partir de la inspección y evaluación de las fuerzas aplicadas en las geometrías existentes en el análisis como se describe a continuación:

Inertial.- Calcula aceleraciones para contrarrestar cargas aplicadas y es utilizada para análisis estáticos lineales.

Loads.- Cálculo de aceleración, gravedad, velocidad, presión, presión hidrostática, fuerza remota, carga de rodamiento, pretensado de pernos, momento – momento aplicado, carga articular e interfaz de fluido.

Supports.- Cálculo con fijaciones en soporte fijo, desplazamientos, desplazamientos remotos, soporte sin fricción, soporte solo de compresión, soporte cilíndrico y soporte elástico.

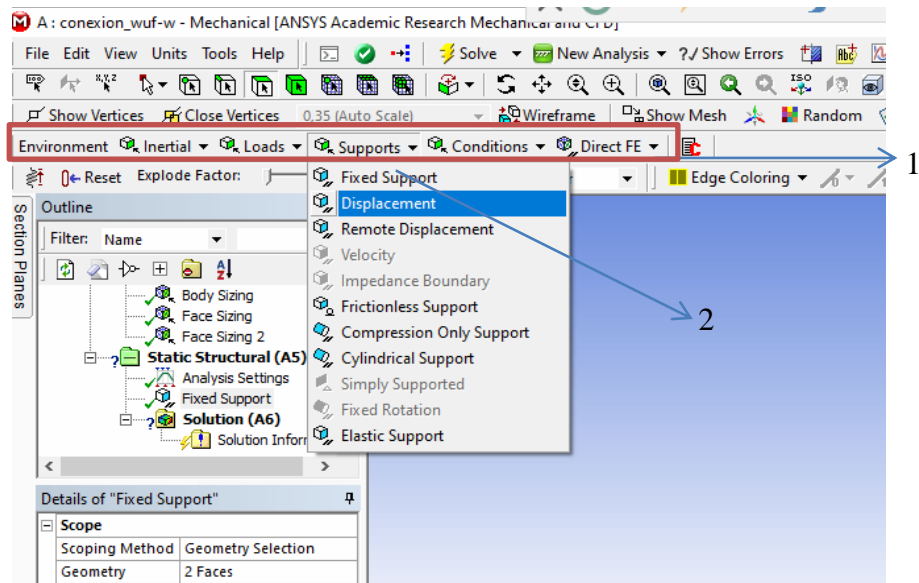
Conditions.- Donde tenemos el uso de condiciones de frontera de presión, flujo, velocidad y condiciones de contorno.

Se procede a seleccionar el análisis y respuestas que se requiere para la conexión, siguiendo el procedimiento que se indica a continuación en las barras de Ansys 19.0.

1. Ingresamos a la barra de herramientas de Ansys
2. Seleccionamos los resultados que deseamos en Support

Figura 56.

Menú de respuestas.

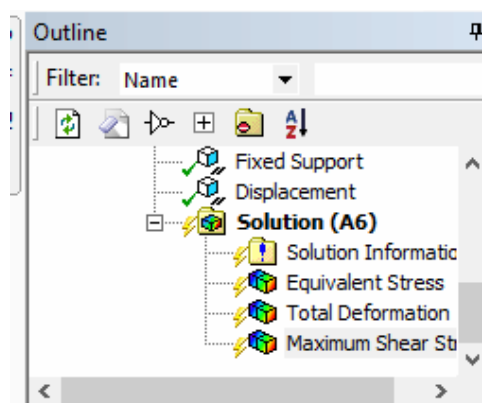


Elaborado por: Los autores a través del Software ANSYS.

Del procedimiento anterior se despliega la pestaña de soluciones para las respuestas esperadas requeridas seleccionadas.

Figura 57.

Pestana de soluciones.

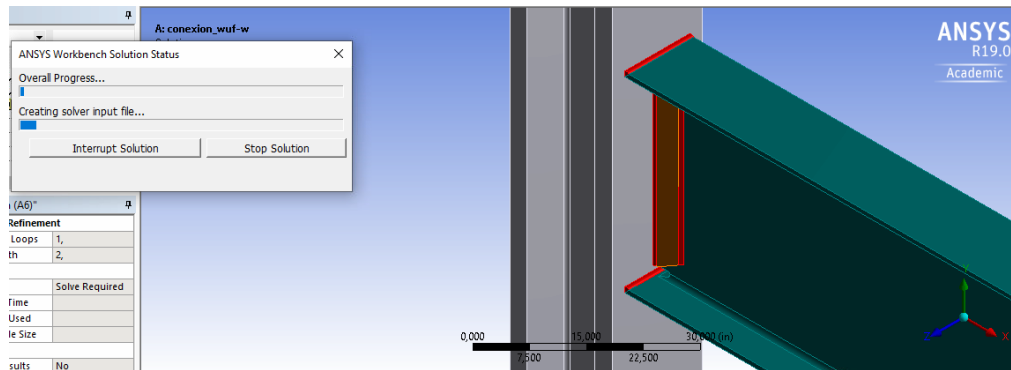


Elaborado por: Los autores a través del Software ANSYS.

Y se procede al análisis del diseño.

Figura 58.

Pantalla de corrido de los sistemas diseñados.

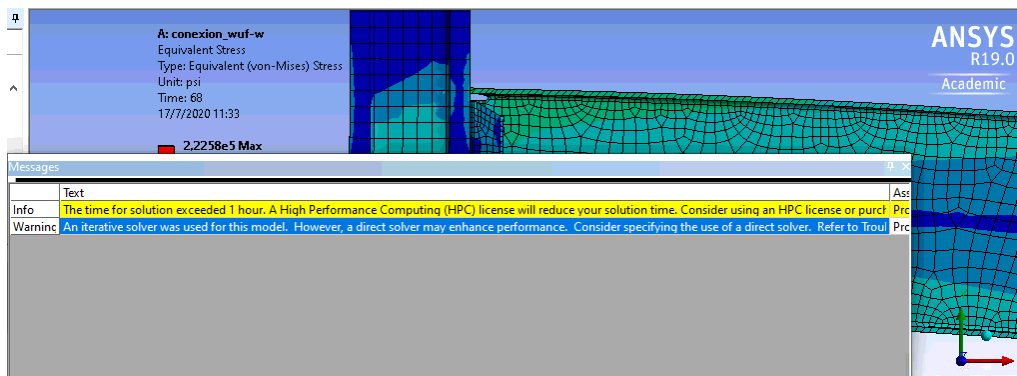


Elaborado por: Los autores a través del Software ANSYS.

A continuación se presenta la pantalla de resultados expuestos por Ansys

Figura 59.

Pantalla de resultados de Ansys.



Elaborado por: Los autores a través del Software ANSYS.

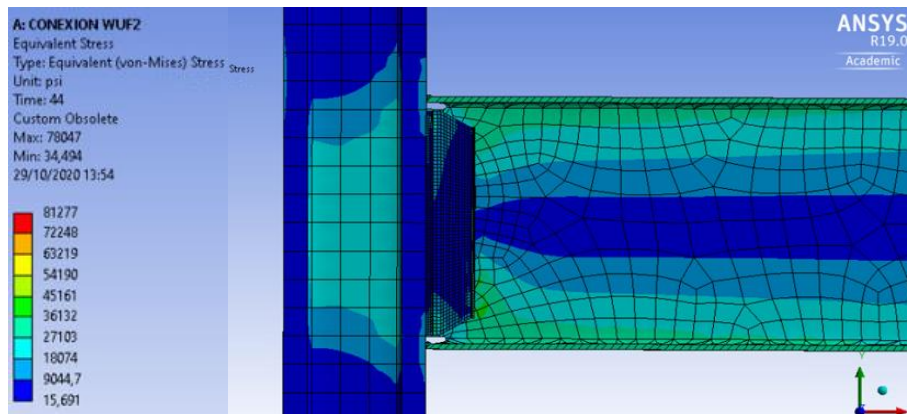
3.4 Post -Proceso

Una vez aplicado el protocolo de carga a nuestra conexión en el programa ANSYS R19.0, se procede a obtener los resultados que se producen por dicho protocolo, como es el caso de la carga o fuerza que se aplica a la viga y genera los respectivos desplazamientos. La finalidad de este proceso es establecer los momentos que actúan en la cara de la columna, los cuales se originan por la carga y por la longitud que tiene la viga, para que de esta manera se pueda desarrollar la evaluación de la conexión a momento.

Los esfuerzos de Von-Mises nos da una idea de donde se está produciendo la plastificación del material, con ello podemos conocer los esfuerzos a los que está siendo sometido todos los elementos de la conexión.

Figura 60.

Esfuerzos de Von-Mises en la conexión.



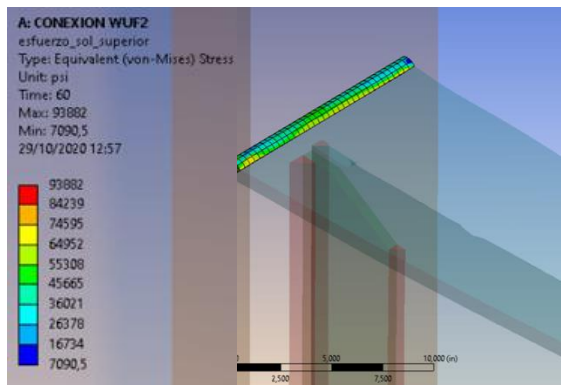
Elaborado por: Los autores a través del Software ANSYS.

Por medio del análisis de los esfuerzos de Von-Mises se puede establecer las tensiones a que está siendo sometido las soldaduras de unión, tanto de los patines como de la placa de refuerzo y de la unión del patín de la columna con el alma de la viga, por

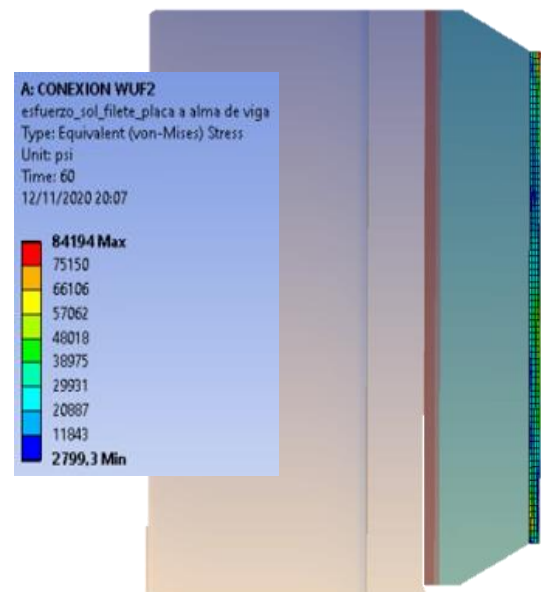
lo que a continuación en la Figura 61 y en la Figura 62 se muestra las soldaduras que unen cada uno de los elementos.

Figura 61.

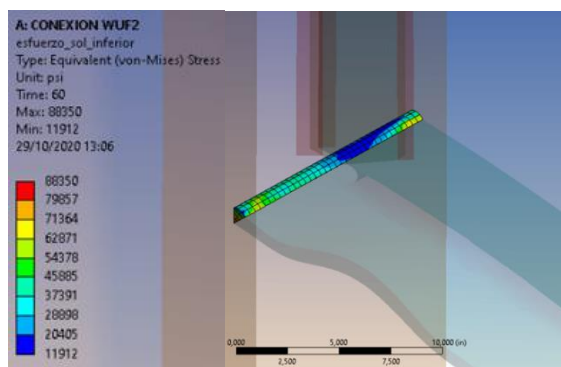
Esfuerzos de Von-Mises para las uniones de soldadura CJP de la conexión WUF-W.



a. *Esfuerzos de Von-Mises en la soldadura superior.*



b. *Esfuerzos de Von-Mises en la soldadura CJP – alma de la viga a patín*



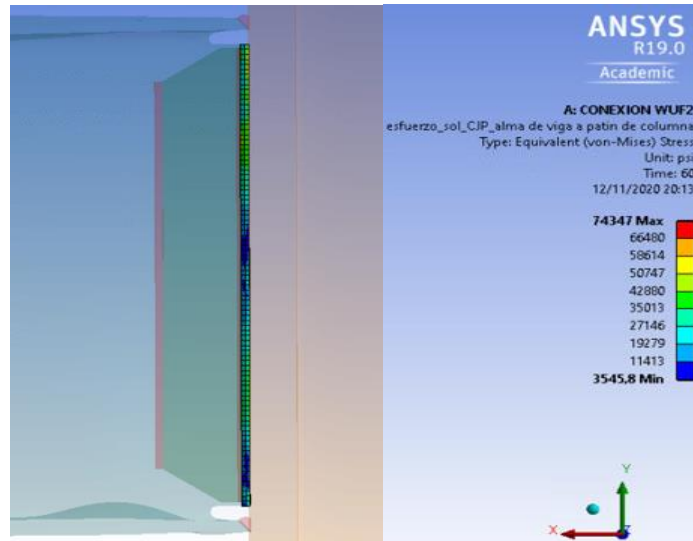
c. *Esfuerzos de Von-Mises en la soldadura inferior.*

Elaborado por: Los autores a través del Software ANSYS.

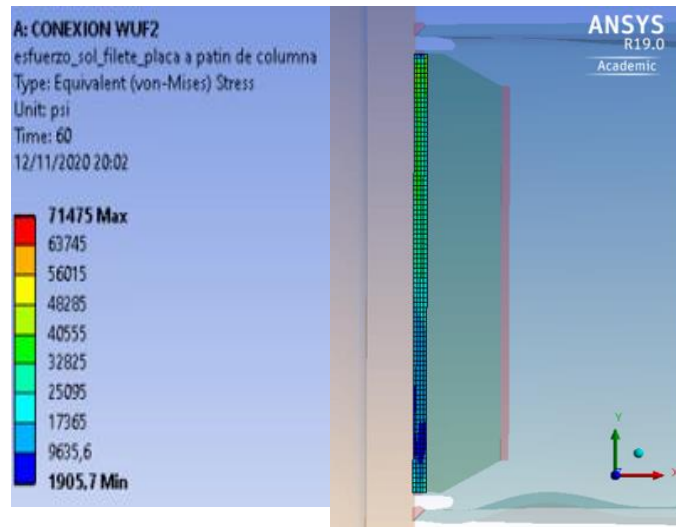
Figura 62.

Esfuerzos de Von-Mises para las uniones de soldadura de filete de la conexión

WUF-W.



a. Esfuerzos de Von-Mises en la soldadura filete –alma de la viga a patín de columna



b. Esfuerzos de Von-Mises en la soldadura filete –placa a patín de columna.

Elaborado por: Los autores a través del Software ANSYS.

Tabla 7.

Esfuerzo de la soldadura de los elementos unidos.

Elementos de soldadura	Esfuerzo en (ksi)
Soldadura CJP del Patín Superior de la Viga con el Patín de la Columna	11.68 – 70.37
Soldadura CJP del Patín Inferior de la Viga con el Patín de la Columna	11.51 – 69.75
Soldadura CJP del Patín de la Columna con el Alma de la Viga	0.26 – 66.06
Soldadura de Filete del Patín de la Columna con la Placa de Refuerzo	0.71 – 32.22
Soldadura de Filete de la Placa de Refuerzo con el Alma de la Viga	1.28 – 68.37

Elaborado por: Los autores.

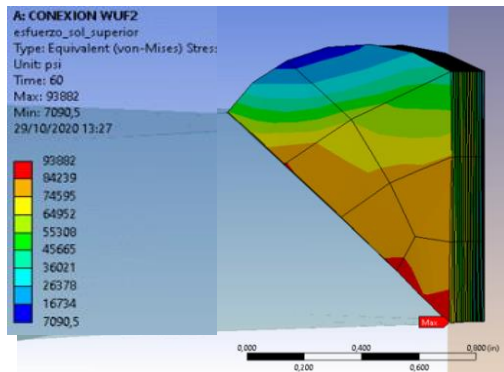
La Tabla 7 muestra los intervalos de esfuerzos a los que está siendo sometido la soldadura que une cada uno de los elementos, y en base a esto, se puede observar que los esfuerzos son menores al esfuerzo de fluencia de la soldadura de (70 ksi), por lo que la soldadura de unión en general no fallará.

Cabe aclarar que, aunque no falle la soldadura en conjunto, está si presenta puntos críticos de rotura, es decir, en ciertos sectores se ha superado el esfuerzo último de corte. Estos puntos críticos se deben esencialmente a la concentración de esfuerzos

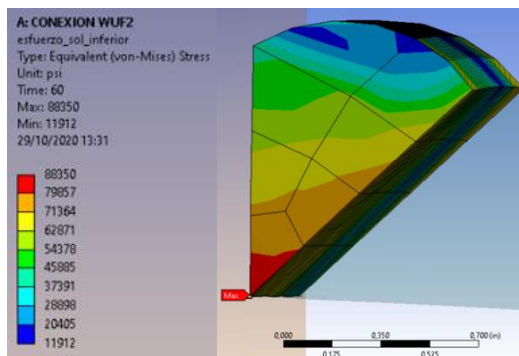
existentes en la geometría de cada uno de los elementos de soldadura, en la Figura 63 se puede observar la ubicación de los puntos críticos.

Figura 63.

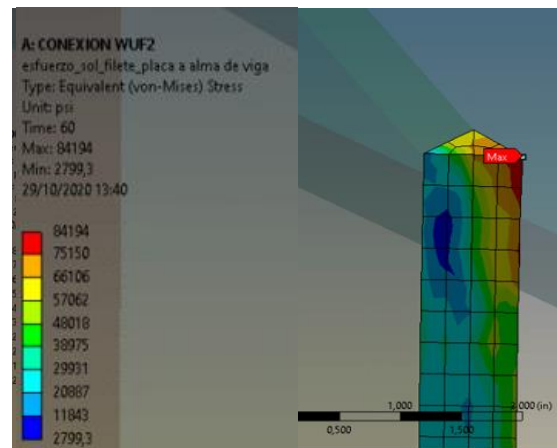
Ubicación del posible comienzo de falla de la soldadura en la conexión.



a. *Esfuerzos de Von-Mises en la soldadura superior.*



b. *Esfuerzos de Von-Mises en la soldadura inferior.*



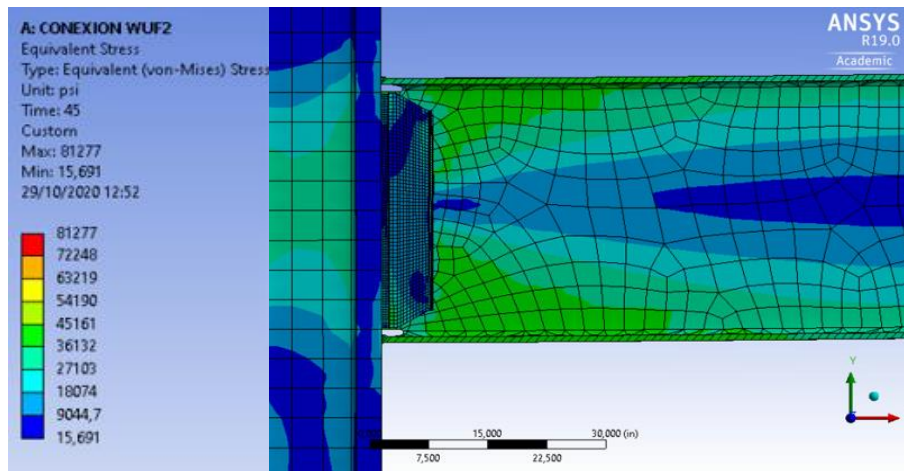
c. *Esfuerzos de Von-Mises en la soldadura filete – placa a alma de viga.*

Elaborado por: Los autores a través del Software ANSYS.

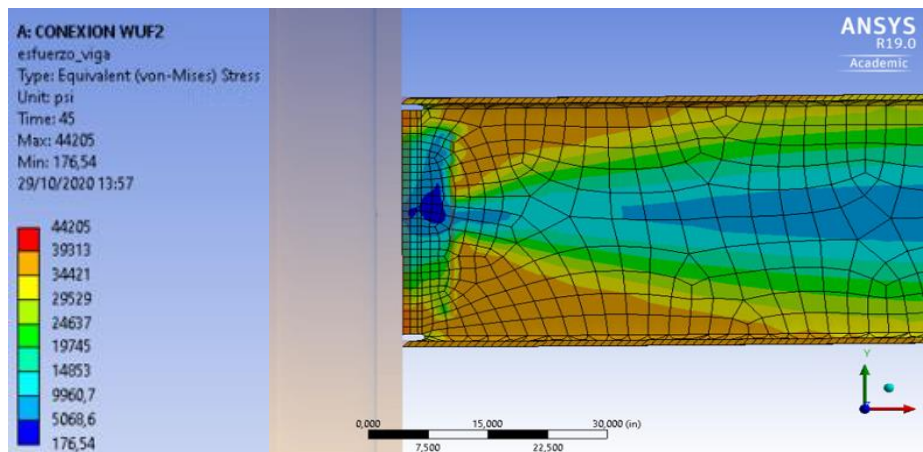
En el caso de la viga, se puede observar el lugar en donde se está produciendo la rótula plástica en función de los esfuerzos de Von-Mises, por lo cual el intervalo de esfuerzos a los que está siendo sometido la rótula plástica de la viga están entre (1.23 a 57.06) ksi, es decir se está produciendo la plastificación de la misma, ya que los esfuerzos han superado el esfuerzo de fluencia del material de (36 ksi) (Montenegro Daniel, 2011), esto se puede apreciar de mejor manera en la Figura 64.

Figura 64.

Esfuerzos de Von-Mises para la viga.



a. Esfuerzos de Von-Mises en la conexión.



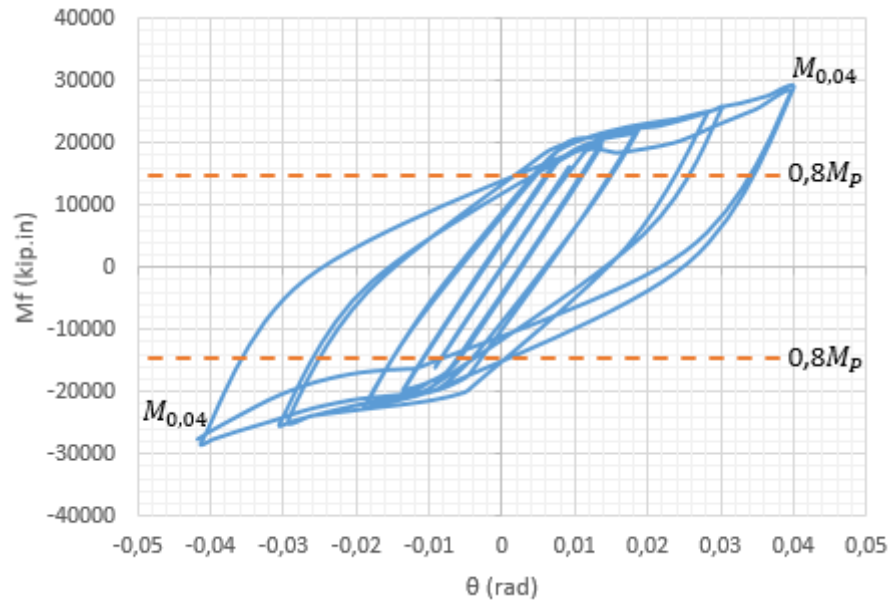
b. Esfuerzos de Von-Mises en la viga.

Elaborado por: Los autores a través del Software ANSYS.

De acuerdo a los criterios establecidos en la sección E3.6c de las disposiciones sísmicas del (AISC.341, 2016), para lograr garantizar la calificación de la conexión, se establece que la conexión deberá estar en la capacidad de desarrollar por lo menos el 80% del momento plástico de la viga (0.8Mp), para una rotación de 0.04rad, en la Figura 65 se observa la curva de histéresis de la conexión, la misma que relaciona el momento en la cara de la columna con la rotación establecida en el protocolo de carga.

Figura 65.

Momento en la cara de la columna para una deformación angular de 0.04 rad.



Elaborado por: Los autores.

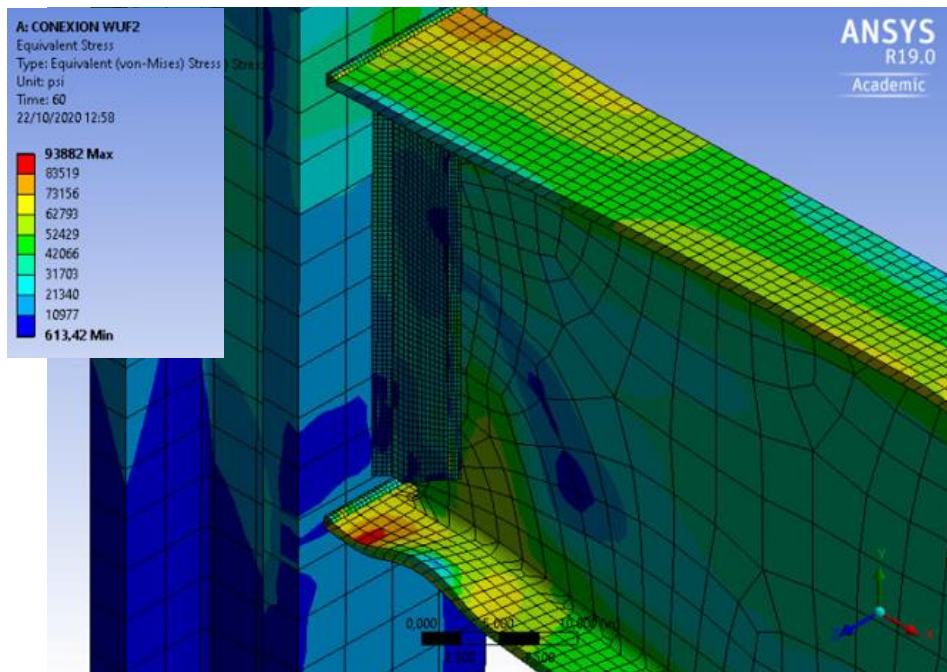
Como se puede observar el momento que se desarrolla en la cara de la columna para una deformación de 0.04rad corresponde a un valor de 28,531 kip.in, el mismo que supera con notoriedad al momento de plastificación evaluado al 80% de 14,640 kip.in, por lo cual la conexión puede ser usada en sistemas SMF.

A partir de la deformación angular de 0.04rad la viga ya no se encuentra en condiciones de disipar más energía, debido a la pérdida de rigidez del material, ya que los patines de la viga han llegado a su capacidad máxima, es decir han llegado a su esfuerzo ultimo de rotura.

A continuación en la Figura 66 se muestra el pandeo que sufre el patín de la viga para un instante de tiempo de 60s, el mismo que corresponde a una deformación angular de 0.04 rad del protocolo de carga, de acuerdo a lo descrito en la Figura 26.

Figura 66.

Pandeo del Patín de la viga para un intervalo de tiempo de 60s.



Elaborado por: Los autores a través del Software ANSYS.

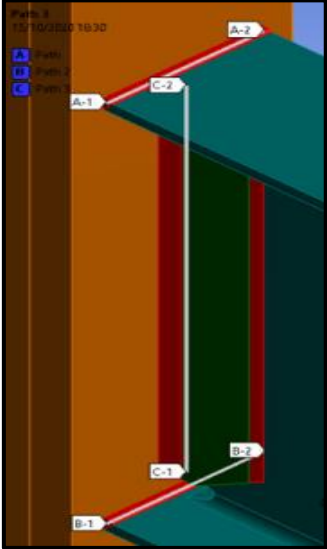
Al observar la Figura 66 nos podemos dar cuenta la distribución que tienen los esfuerzos de Von Mises en la conexión, los cuales representan energía de distorsión.

Para entender el comportamiento que tienen cada uno de los elementos que componen la conexión, primero es necesario establecer los puntos en donde se obtendrán los datos de los esfuerzos para cada uno de los elementos, los cuales ayudaran a caracterizar de mejor manera el comportamiento que tiene la conexión en general.

En las siguientes tablas se muestra la ubicación de cada uno de los elementos en donde se ha obtenido los datos de esfuerzo para caracterizar el comportamiento de la conexión.

Tabla 8.

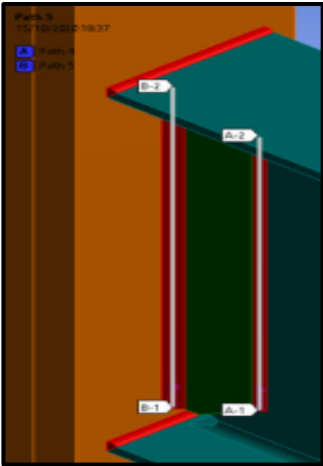
Elementos de Soldadura CJP

Ubicación del Elemento	Desde	Descripción
	A1-A2	Soldadura CJP de Patín Superior
	B1-B2	Soldadura CJP de Patín Inferior
	C1-C2	Soldadura CJP de Patín de columna al Alma de la Viga

Elaborado por: Los autores.

Tabla 9.

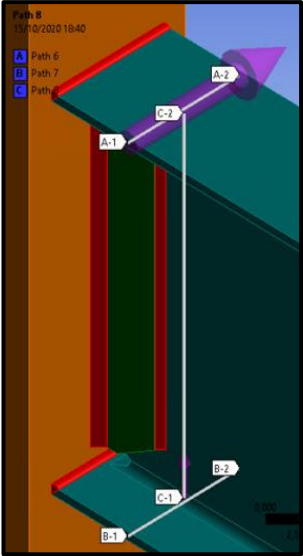
Elementos de Soldadura de Filete

Ubicación del Elemento	Desde	Descripción
	A1-A2	Soldadura de filete entre la Placa de Refuerzo y el Alma de la viga
	B1-B2	Soldadura de filete entre el Patín de la Columna y la Placa de Refuerzo

Elaborado por: Los autores.

Tabla 10.

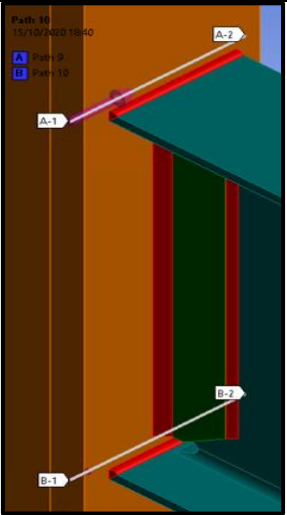
Elementos de Viga

Ubicación del Elemento	Desde	Descripción
	A1-A2	Patín Superior de Viga
	B1-B2	Patín Inferior de Viga
	C1-C2	Alma de Viga

Elaborado por: Los autores.

Tabla 11.

Patín de Columna

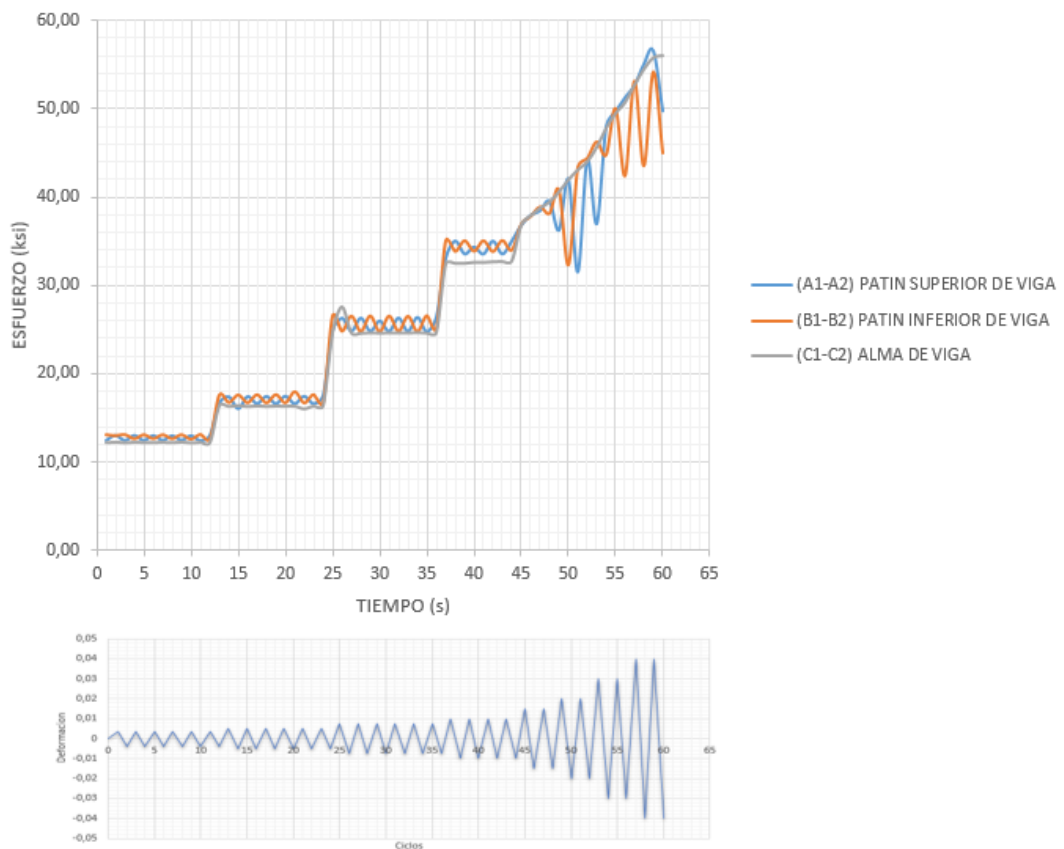
Ubicación del Elemento	Desde	Descripción
	A1-A2	Patín de Columna que conecta al Patín Superior de Viga
	B1-B2	Patín de Columna que conecta al Patín Inferior de Viga

Elaborado por: Los autores.

Para entender de mejor manera lo que está sucediendo en la viga, se procede a realizar el análisis de la evolución del esfuerzo a través del tiempo, como se muestra en la Figura 67.

Figura 67.

Evolución del esfuerzo de la viga a través del tiempo.



Elaborado por: Los autores.

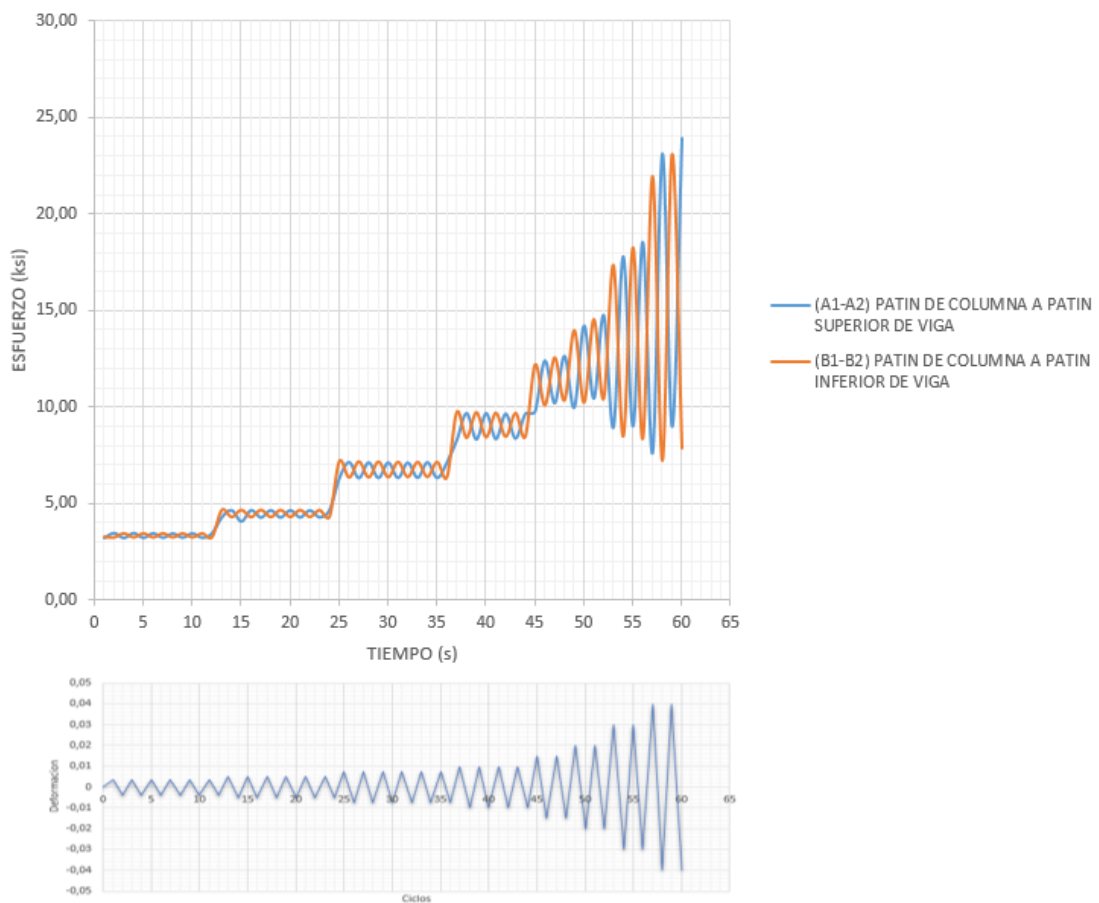
De acuerdo a lo expuesto en la Figura 67 se puede evidenciar el comportamiento que tienen tanto los patines de la viga como el alma, por lo que al observar el desarrollo que tienen los tres elementos que conforman la viga a través del tiempo se puede notar la constancia que tienen cada uno de los esfuerzos en cada ciclo de carga, sin embargo la constancia del desarrollo de los esfuerzos se ve interrumpida a

partir del instante de tiempo de 45s, esto se debe a la plastificación que sufre el material por haber superado su esfuerzo de fluencia de (36 ksi).

El análisis de los esfuerzos se lo debe realizar también para la columna, de tal manera de garantizar que la viga plastifique antes que la columna, asegurando de esta manera el criterio de columna fuerte-viga débil. En la Figura 68 se muestra la evolución de los esfuerzos en el patín de la columna.

Figura 68.

Evolución del esfuerzo que sufre el patín de la columna producto de los patines de la viga a través del tiempo.



Elaborado por: Los autores.

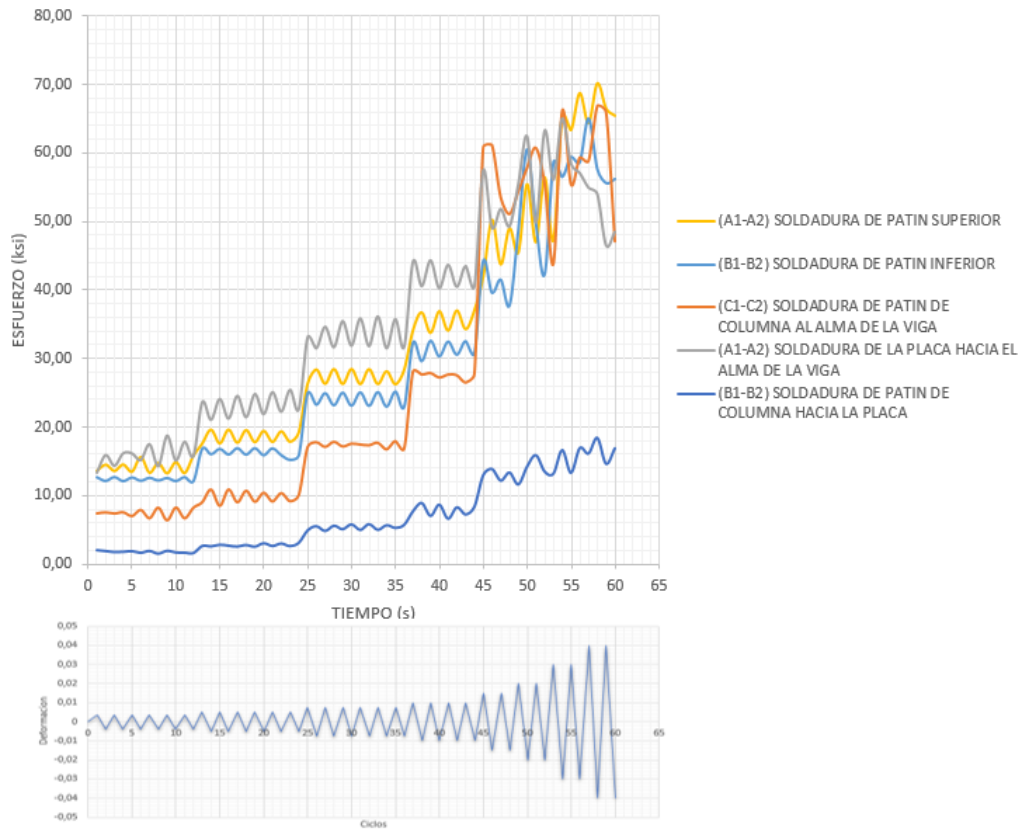
Al analizar el desarrollo que tienen los esfuerzos a través del tiempo, se puede notar que no existe variaciones que afecten el comportamiento del patín de la columna, ya que los esfuerzos no han superado el esfuerzo de fluencia del material de (50 ksi), esto quiere decir que la columna se encuentra trabajando en el rango elástico en donde los esfuerzos son directamente proporcionales a sus deformaciones.

Al no presentarse distorsiones que afecte la integridad de la conexión, tanto en la zona del panel como en la columna con respecto a la viga, se puede concluir que dicha característica contribuye a la estabilidad de la conexión, y esto evita su pérdida de rigidez, la razón fundamental para que ocurra esto es que la columna es 2.31 veces más fuerte que la viga, lo que provoca que la conexión logre desarrollar de buena manera su deformación angular, sin presentar degradación de su resistencia en la columna.

Una vez analizado los elementos tanto de la viga como del patín de la columna, se procede a desarrollar el respectivo análisis de los esfuerzos en los elementos de soldadura como de muestra en la Figura 69.

Figura 69.

Evolución del esfuerzo a través del tiempo en los elementos de soldadura, los cuales se encargan de garantizar la unión tanto de la viga como de la columna en la conexión.



Elaborado por: Los autores.

Al igual que en caso de la viga se observa en la soldadura un desarrollo constante de los esfuerzos, sin embargo, al igual que en la viga los esfuerzos presentan distorsión a partir del instante de tiempo correspondiente a 45s, esto se debe a que la viga se encuentra plastificando en ese instante de tiempo, lo cual ocasiona que los esfuerzos de la viga se distribuyan de manera desproporcional hacia la soldadura de unión, sin embargo esto no significa que la soldadura se encuentre plastificando, ya que

en ningún momento los esfuerzos que se encuentran presentes en las soldaduras han superado el esfuerzo de fluencia de la misma.

Después de tener en claro el comportamiento que tienen cada uno de los elementos que conforman la conexión, se puede decir que su comportamiento en general es el esperado para una conexión precalificada, ya que la viga ha logrado desarrollar una deformación angular del 0.04rad para pórticos especiales a momento, y con ello se ha logrado garantizar que la viga plastifique antes que la columna respetando de esta manera el criterio de columna fuerte-viga débil de acuerdo a lo establecido en el (AISC.341, 2016), de la misma manera se garantiza la debida integridad de la soldadura de unión, ya que esta no fallará.

3.5 Criterios de Ansys

Los criterios que se expondrán a continuación están basados en la experiencia adquirida al modelar un caso de ingeniería en específico, como es el caso de la conexión precalificada tipo WUF-W, el mismo que fue modelado en el software ANSYS R19.0.

- a) **Unidades de trabajo:** es uno de los primeros criterios que hay que tomar en cuenta al momento de comenzar a realizar un modelo en Ansys, ya que esto puede incurrir en errores que afectaran a la geometría del modelo, y además a los resultados obtenidos. Esto se aprecia de mejor manera en la Figura 37.
- b) **Propiedades de los materiales:** se deberá establecer bien cada una de las propiedades de los materiales que se usarán, sin embargo, Ansys en su catálogo tiene una cierta cantidad de materiales más utilizados en ingeniería, los cuales vienen con sus propiedades mecánicas bien definidas. Por lo tanto, es deber del usuario determinar si dichas propiedades se ajustan al requerimiento de su modelo,

ya que el usuario podrá cambiarlo siempre y cuando la situación de su modelo lo amerite, esto se aprecia de mejor manera en la Figura 34.

c) **Importar Geometría:** sí la interfaz de Ansys es algo complicada para los usuarios que recién estén indagando en el manejo del mismo, Ansys, al igual que otros programas da la opción de importar archivos, los cuales pueden estar generados en diversos programas siempre y cuando los archivos se guarden en un formato que Ansys reconozca. Se hace mención a esto, ya que en ciertos casos es mucho más fácil realizar la geometría en otro software que el usuario tenga conocimiento previo, que intentar realizarlo directamente en Ansys, esto se debe al ahorro de tiempo que se tendrá cuando se requiera trabajar inmediatamente con el software Ansys, esto se aprecia de mejor manera en la Figura 29.

d) **Condiciones de contorno:** es otro de los criterios a tomar en cuenta, puesto que, hay que asegurar que la condiciones que determinan el comportamiento de un modelo, se asemejen en mayor medida al comportamiento real de los elementos que componen dicha estructura, por tal motivo para realizar el análisis de la conexión se restringió tanto el desplazamiento como el giro en los extremos de la columna para que de esta manera se asemeje al comportamiento real que se va a tener en una estructura sometida a carga lateral, del mismo modo en la viga se restringió el desplazamiento tanto en el eje “X” como el eje “Z” permitiendo de esta manera solo el desplazamiento en el eje “Y” y el giro alrededor del eje “Z”, el cual es producto del protocolo de carga. Esto se puede apreciar de mejor manera en la Figura 51.

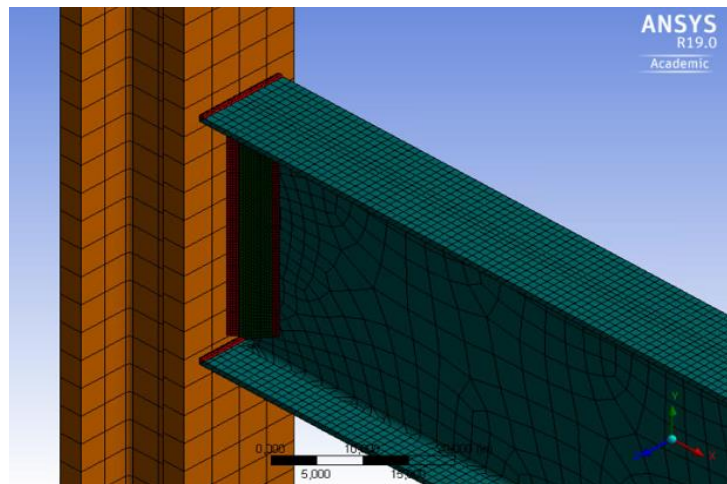
e) **Superficie de contacto:** la importancia de determinar bien las superficies de contacto radica en no incurrir en errores que afecten el comportamiento del modelo, puesto que Ansys al ser un software que intenta facilitar en gran medida el trabajo

que vendrá realizando el usuario, da cosas por echas, como es el caso de las superficies de contacto, ya que Ansys determina por defecto que dichas superficies de contacto se encuentran perfectamente unidas, lo que conlleva a errores pues en algunos casos ocurrirá esto, pero en otros casos no será así, esto dependerá del modelo que intente caracterizar cada usuario, por tal motivo se debe tener claro la función que debe cumplir cada una de las superficies de contacto en el modelo, ya que se puede incurrir en el error anteriormente mencionado. Esto se aprecia de mejor manera en la Figura 39.

f) **Mallado de los elementos:** Ansys al ser un software basado en el método de elementos finitos nos permite realizar mallados muy finos para la obtención de mejores resultados, sin embargo, esto no significa que no exista repercusiones por tener un mallado muy fino, ya que esto ocasiona que se necesite de una gran capacidad computacional para la obtención de mejores resultados, limitando de esta manera el número de simulaciones que se pueda realizar, debido a esto es recomendable tener un mallado adecuado de todos los elementos, de tal manera que nos permita obtener resultados aceptables del comportamiento de los elementos estructurales que serán objeto de estudio. Esto se aprecia de mejor manera en la Figura 70.

Figura 70.

Tamaño del mallado en los elementos de la conexión.



Elaborado por: Los autores.

g) **Método de mallado:** cuando se determina las dimensiones del mallado de los elementos, es importantes establecer el tipo de método que se quiera utilizar para la obtención de los resultados, esta acción se lo debe realizar de tal manera que el método escogido para el mallado se ajuste a la geometría del elemento, dicho esto, se puede establecer que en un mismo modelo se puede tener más de un método de mallado, siempre y cuando los métodos empleados se ajusten a su geometría y no interfieran entre sí.

Estos tipos de métodos se basan en los tipos de elementos que se tiene en el mallado, y estos tipos de elementos de mallado se lo puede apreciar de mejor manera en la Figura 5.

h) **Aplicación de la carga:** cuando se requiera aplicar una carga al elemento estructural en Ansys, se lo puede realizar de dos formas, la primera es conociendo el valor de la fuerza o carga que se requiera aplicar, y la otra forma se lo realiza por medio del desplazamiento que genera la carga aplicada en un punto concreto, este

último fue el escogido para realizar el análisis de nuestra conexión, ya que por medio del protocolo de carga expuesto en la Tabla 5 se aplicaron las deformaciones que sufre la viga en forma de desplazamientos, esto se realizó de esta manera de acuerdo a lo estipulado en el (AISC.341, 2016).

En las recomendaciones que se presentan dentro del capítulo siguiente, también se pueden encontrar algunos criterios de aporte en la modelación con base en Ansys.

CONCLUSIONES

A partir de lo siguiente se logró realizar la modelación adecuada de la geometría de la conexión y de los elementos de soldaduras requeridos en la misma. Del mismo modo se implementó las debidas restricciones del sistema, así como las características y propiedades que presenta el material que lo conforman y esto a su vez fue objeto de análisis en el programa ANSYS, por el método de elementos finitos para realizar la validación de la conexión.

Se demostró la validación que tiene la conexión bajo la acción de cargas cíclicas establecidas en el protocolo de carga, por lo que se obtuvo resultados favorables, ya que la conexión logró desarrollar resistencia después de haber cumplido con 29 ciclos de carga hasta alcanzar un valor de momento de 28,531 kip.in, con una deformación angular de 0.04rad, por lo que la conexión cumple con los criterios establecidos en el (AISC.341, 2016) para pórticos resistente a momento con capacidad especial de disipación.

Una vez analizado la relación de los momentos probables tanto para la viga como para la columna, el cual se encuentra descrito en la *Ecuación 36*, se establece que la columna es 2.31 veces más resistente que la viga, lo cual logra que la conexión desarrolle de mejor manera su capacidad de deformación, ya que la columna y la zona del panel no presentan distorsiones, y esto ocasiona que no exista pérdida de rigidez.

La conexión calificada tipo WUF-W, al no tener mayor número de elementos que la componen, como es el caso de la columna, viga y de la placa de refuerzo, se convierte en una conexión de fácil diseño y fácil montaje siempre y cuando se cuide de los niveles de calidad en las juntas soldadas, por lo que se debería de realizar en nuestro medio.

Una desventaja de la conexión sería su mano de obra, ya que se requiere de mano de obra calificada para realizar las uniones de soldadura, lo que conlleva a un mayor costo de la obra.

Se otorga al estudiante de ingeniería civil o a la persona interesada que haga uso de este documento, la obtención de una guía práctica del manejo del programa ANSYS aplicado a un caso de mecánica de sólidos bajo condiciones de no linealidad.

RECOMENDACIONES

Se debe tener cuidado en la manipulación del software Ansys al momento de realizar la modelación de los elementos, se tiene que verificar que los elementos no estén transpuestos entre sí, asegurar que las áreas de contacto entre elementos se encuentren acorde a las condiciones propuestas, ya que puede inducir en fallas críticas al momento de obtener los resultados del modelo.

Una adecuada discretización del sistema continuo, garantiza valores fiables con respecto al comportamiento del sistema, puesto que mientras más pequeña sea la malla de la discretización para el sistema continuo, esta se ajustará de una mejor manera a la geometría de dicho sistema.

Cuando se habla del grado de precisión nos estamos refiriendo principalmente a la confiabilidad que se tienen en los resultados, por lo que mientras más precisión se requiera, el tamaño del mallado deberá ser mucho menor hasta que exista una convergencia en los resultados obtenidos.

Un aumento en el número de elementos que conforman el mallado, generara un mayor número de nodos y un mayor número de ecuaciones para resolver el sistema, lo que conlleva a un mayor tiempo computacional para la resolución de las ecuaciones, por lo que se requiere de una computadora más potente y de una licencia adecuada que nos permita realizar el trabajo.

El tiempo requerido para realizar el análisis de la conexión WUF-W fue aproximadamente de 5 días con un mallado no tan adecuado para dicho análisis, puesto que realizar un mejor ajuste del mallado de la conexión, conlleva a un mayor tiempo

computacional del mismo, por lo que se optó a realizar un ajuste del mallado de acuerdo a la característica del computador y al tipo de licencia que se tiene del software.

Ansys al ser un software muy versátil, abarca diferentes tipos de soluciones para un gran campo de la ingeniería, por lo que se recomienda su utilización mayormente en el campo de investigación para situaciones concretas. Esto se debe al grado de precisión que se requiera en los resultados para establecer el comportamiento del elemento que va hacer objeto de estudio.

Revisar las sugerencias que establece el programa con respecto a la utilización de comandos en la parte de ayuda.

REFERENCIAS

- Aguirre, C. (2016). *Especificaciones para construcciones de acero*. Alacero. Obtenido de https://www.construccionenacero.com/sites/construccionenacero.com/files/publicacion/especificacion_para_construcciones_de_acero_-_aisc_360-16_0.pdf
- AISC.341. (2016). *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*. Chicago: AISC. Obtenido de <https://www.aisc.org/globalassets/aisc/publications/standards/seismic-provisions-for-structural-steel-buildings-ansi-aisc-341-16.pdf>
- AISC.358. (2016). *Prequalified connections for special and intermediate steel moment frames for seismic applications*. AISC. Obtenido de <https://www.aisc.org/globalassets/aisc/publications/standards/a358-18w.pdf>
- AISC.360. (2016). *Specification for Structural Steel Buildings*. Chicago: AISC. Obtenido de https://www.aisc.org/globalassets/aisc/publications/standards/a360-16-spec-and-commentary_june-2018.pdf
- ANSYS, I. (2009). *Workbench Platform-12.1_12.1*. Canonsburg.
- Crisafulli, F. (2018). *Diseño sismorresistente de construcciones de acero*. Mendoza, Argentina: Alacero. Obtenido de https://www.alacero.org/sites/default/files/u16/disenosismorresistente_de_construcciones_de_acero-5ta_ed.pdf

- González, W., Chacón G. (2020). Consideraciones sísmicas para conexiones resistentes a momento con columnas de sección cuadrada y vigas W. *Cedex*. Obtenido de <http://ingenieriacivil.cedex.es/index.php/ingenieria-civil/article/view/2421#sec-1>
- Granados, R. (1985). *Sociedad Mexicana de Ingenieria Estructural, A.C.* Obtenido de <http://www.smie.org.mx/actividades/simposio-30-aniversario-sismos-septiembre-1985/archivos/curso-acero-imca-conexiones-rigiditas-entre-vigas-columnas-raul-granados.pdf>
- Jhoffre, M. (2018). *Análisis matemático y simulación numérica del comportamiento de fluidos en un caldero pirotubular vertical*. CUENCA. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/15478>
- Lizarza, J. T. (2011). *Métodos de los Elementos Finitos para Análisis Estructural*. España: UNICOPIA C.B. Obtenido de https://www.academia.edu/7224640/Metodo_de_los_elementos_finitos_para_Analisis_Estructural
- Martín, C. T. (2013). *Análisis de estructuras de barras con leyes constitutivas no lineales*. Sevilla. Obtenido de http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/5226/fichero/proyecto_corregido1.pdf
- Montenegro Daniel, A. P. (2011). *Programa computacional didáctico para el aprendizaje del diseño estático y dinámico en ingeniería mecánica*. Quito. Obtenido de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/4315/1/CD-3929.pdf>

Y.Ohtori, R.E.Christenson, A., B.F.Spencer Jr., M., & and S.J.Dyke, M. (2004).

Benchmark Control Problems for Seismically Excited Nonlinear Buildings. 20.

doi:10.1061/~ASCE!0733-9399~2004!130:4~366!