

CAPÍTULO 5

SIMULACIÓN

5.1. Simulación del puente metálico modular de 36 metros de luz.

5.1.1. Determinación de las cargas a ser ingresadas al programa.

Datos generales:

Ancho de calzada:	$A_c := 3.6$	[m]
Longitud de la viga:	$L_v := 3.6$	[m]
Espesor de la losa de hormigón:	$t_{lh} := 0.20$	[m]
Ancho cooperante de la viga:	$A_{cp} := 1.5$	[m]
Densidad del hormigón:	$W_h := 2.4$	$\left(\frac{\text{Ton}}{\text{m}^3}\right)$
Densidad del acero:	$W_s := 7.85$	$\left(\frac{\text{Ton}}{\text{m}^3}\right)$
Peso de la carpeta asfáltica: (para un espesor de 25 mm)	$W_{ca} := 0.044$	$\left(\frac{\text{Ton}}{\text{m}^2}\right)$
Peso del piso metálico: (para un espesor de 3.5 mm)	$W_{pm} := 0.04196$	$\left(\frac{\text{Ton}}{\text{m}^2}\right)$
Peso de postes y pasamanos:	$W_{pp} := 0.050$	$\left(\frac{\text{Ton}}{\text{m}}\right)$
Carga del eje posterior del camión	$P := 14.54$	[Ton]
Carga del eje frontal del camión	$p := 3.64$	[Ton]
Factor de impacto:	$FI := 1.21$	
Factor de excentricidad	$Fe := 1.5$	

5.1.1.1. Carga muerta posterior.

Esta carga actuará sobre las vigas transversales o de piso y esta constituida por el peso de la losa de hormigón, la carpeta asfáltica, el piso metálico (Kubilosa) y las protecciones laterales.

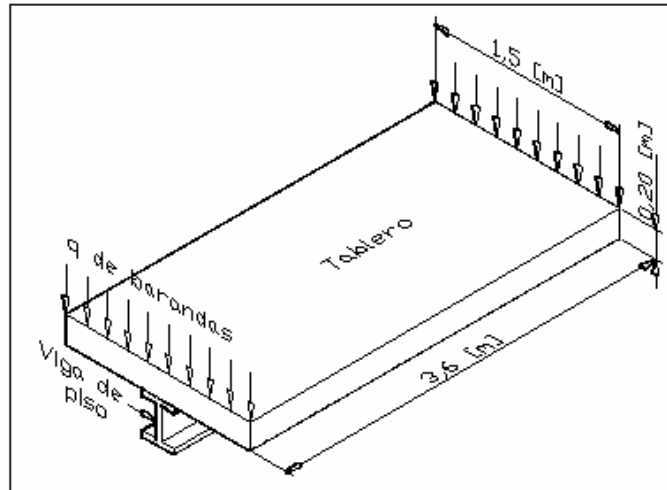


Figura 5.0. Detalle del tablero

A continuación obtenemos estas cargas, las mismas que serán determinadas para una longitud del tablero de 1.50 m:

$$q_{ca} := W_{ca} \cdot A_{cp}$$

$$q_{ca} = 0.066 \quad [\text{Ton/m}] \quad \text{Carga de la carpeta asfáltica}$$

$$q_h := W_h \cdot t_h \cdot A_{cp}$$

$$q_h = 0.72 \quad [\text{Ton/m}] \quad \text{Carga de la losa de hormigón}$$

$$q_{pm} := W_{pm} \cdot A_{cp}$$

$$q_{pm} = 0.063 \quad [\text{Ton/m}] \quad \text{Carga del piso metálico}$$

$$q_{pl} := W_{pp} \cdot A_{cp} \cdot \frac{1}{L_v}$$

$$q_{pl} = 0.021 \quad [\text{Ton/m}] \quad \text{Carga de las barandas}$$

$$q_{\text{tablero}} := q_{ca} + q_h + q_{pm} + q_{pl}$$

$$q_{\text{tablero}} = 0.87 \quad [\text{Ton/m}] \quad \text{Carga muerta total del tablero para una longitud de 1.50 m que actúa sobre las vigas de piso.}$$

Esta carga muerta obtenida se asignará a todas las vigas transversales o de piso, para el caso de las vigas de entrada y salida del puente se asignará la mitad de ese valor.

5.1.1.2. Carga viva (camión HS-20-44).

En un puente de 36 m de luz para que produzca los máximos efectos esta carga sobre la estructura se debe colocar el eje intermedio del camión HS-20-44 a una distancia de 18.71 m con respecto al apoyo izquierdo del puente.

Es importante determinar el incremento de la fuerza de cada eje del camión debido los factores de impacto y excentricidad como se indica a continuación:

$$F1 := P \cdot FI \cdot Fe$$

$$F1 = 26.39 \quad (\text{Ton}) \quad \text{Fuerza resultante del eje posterior}$$

$$F2 := P \cdot FI \cdot Fe$$

$$F2 = 26.39 \quad (\text{Ton}) \quad \text{Fuerza resultante del eje intermedio}$$

$$F3 := p \cdot FI \cdot Fe$$

$$F3 = 6.607 \quad (\text{Ton}) \quad \text{Fuerza resultante del eje frontal}$$

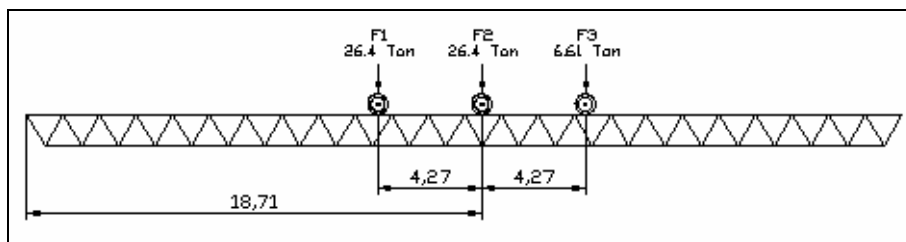


Figura 5.1. Carga viva sobre el puente

Como podemos observar en la grafica, los ejes del camión de diseño cuando estos se encuentran en la posición crítica del puente, no coinciden con la ubicación de las vigas de piso lo cual no permiten una adecuada asignación de su carga a las vigas transversales y a su vez transmitir eficientemente a toda la estructura el efecto que producen estas. Por esta razón se realiza la descomposición de estas cargas resultantes en cada una de las vigas transversales adyacentes a las mismas y de esa manera transmitir

correctamente las cargas a las armaduras principales del puente, dicho procedimiento se realiza a continuación:

La fuerza resultante correspondiente al eje posterior se encuentra ubicada entre las vigas transversales 10 y 11 respectivamente:

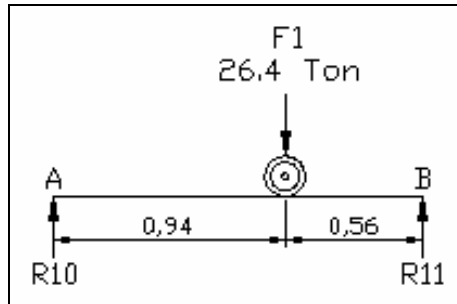


Figura 5.2. Eje posterior del camión estándar

$$\Sigma M_a = 0$$

$$\Sigma F_y = 0$$

$$R_{11} := \frac{0.94 \cdot F_1}{1.5}$$

$$R_{10} := F_1 - R_{11}$$

$$R_{11} = 16.538 \quad (\text{Ton})$$

$$R_{10} = 9.852 \quad (\text{Ton})$$

$$q_{10} := \frac{R_{10}}{L_v}$$

$$q_{10} = 2.737 \quad [\text{Ton/m}] \quad \text{Carga viva sobre la viga de piso 10}$$

$$q_{11} := \frac{R_{11}}{L_v}$$

$$q_{11} = 4.594 \quad [\text{Ton/m}] \quad \text{Carga viva sobre la viga de piso 11}$$

La fuerza resultante correspondiente al eje intermedio se encuentra ubicada entre las vigas transversales 13 y 14 respectivamente:

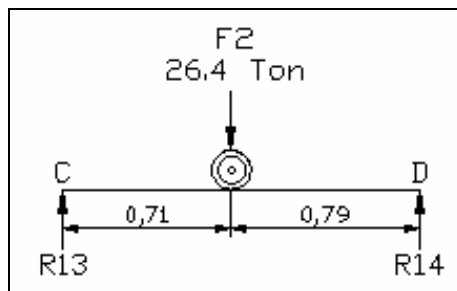


Figura 5.3. Eje intermedio del camión estándar

$$\Sigma M_c = 0$$

$$\Sigma F_y = 0$$

$$R_{14} := \frac{0.71 \cdot F_1}{1.5}$$

$$R_{13} := F_2 - R_{14}$$

$$R_{14} = 12.491 \quad (\text{Ton})$$

$$R_{13} = 13.899 \quad (\text{Ton})$$

$$q_{13} := \frac{R_{13}}{L_v}$$

$$q_{13} = 3.861 \quad [\text{Ton/m}] \quad \text{Carga viva sobre la viga de piso 13}$$

$$q_{14} := \frac{R_{14}}{L_v}$$

$$q_{14} = 3.47 \quad [\text{Ton/m}] \quad \text{Carga viva sobre la viga de piso 14}$$

La fuerza resultante correspondiente al eje frontal se encuentra ubicada entre las vigas transversales 16 y 17 respectivamente:

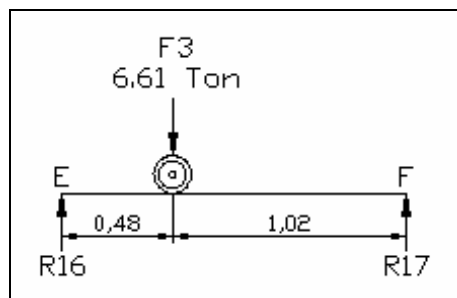


Figura 5.4. Eje frontal del camión estándar

$$\Sigma M_e = 0$$

$$\Sigma F_y = 0$$

$$R_{17} := \frac{0.48 \cdot F_3}{1.5}$$

$$R_{16} := F_3 - R_{17}$$

$$R_{17} = 2.114 \quad (\text{Ton})$$

$$R_{16} = 4.492 \quad (\text{Ton})$$

$$q_{16} := \frac{R_{16}}{L_v}$$

$$q_{16} = 1.248 \quad [\text{Ton/m}] \quad \text{Carga viva sobre la viga de piso 16}$$

$$q_{17} := \frac{R_{17}}{L_v}$$

$$q_{17} = 0.587 \quad [\text{Ton/m}] \quad \text{Carga viva sobre la viga de piso 17}$$

Nota: Este procedimiento de descomposición de cargas es general para los demás puentes en estudio.

5.1.2. Procedimiento de la simulación.

1. Ingresamos al programa Sap2000, seguidamente especificamos las unidades y seleccionamos la plantilla a emplear.
2. Definimos el tipo de material para la estructura, en nuestro caso utilizaremos un acero ASTM A588, con un esfuerzo a la fluencia mínimo de 50 klb/plg² y un esfuerzo de tensión mínimo de 70 klb/plg².

The screenshot shows the 'Material Property Data' dialog box. The 'Material Name' field contains 'A588'. The 'Display Color' section shows a yellow color swatch. The 'Type of Material' section has three radio buttons: 'Isotropic' (selected), 'Orthotropic', and 'Anisotropic'. The 'Type of Design' section has a dropdown menu set to 'Steel'. The 'Analysis Property Data' section has six input fields: 'Mass per unit Volume' (7.345E-07), 'Weight per unit Volume' (2.836E-04), 'Modulus of Elasticity' (29000), 'Poisson's Ratio' (0.3), 'Coeff of Thermal Expansion' (6.500E-06), and 'Shear Modulus' (11153.846). The 'Design Property Data (AISC-ASD01)' section has two input fields: 'Minimum Yield Stress, Fy' (50) and 'Minimum Tensile Stress, Fu' (70). The 'Advanced Material Property Data' section has three buttons: 'Time Dependent Properties...', 'Material Damping Properties...', and 'Stress-Strain Curve Definitions...'. At the bottom right are 'OK' and 'Cancel' buttons.

Figura 5.5. Asignación del material

3. Definimos las propiedades de las secciones de la estructura. Ingresamos las dimensiones de los perfiles a emplear tanto para los cordones como para las diagonales. Para el caso del ángulo L3x3x5/16 y el perfil W8x31 estas dimensiones vienen establecidas directamente por el programa.

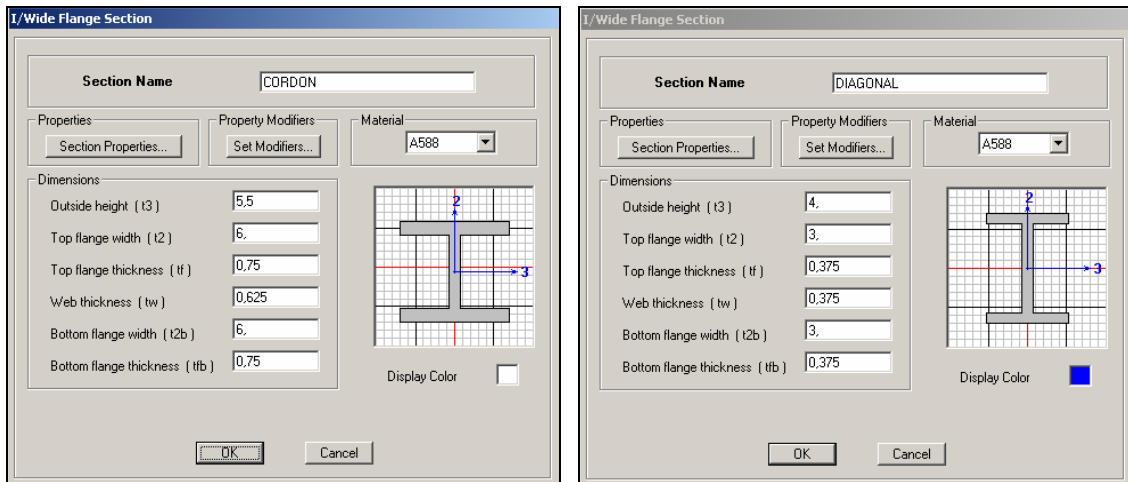


Figura 5.6. Propiedades de los perfiles

- Definimos los nombres y los tipos de carga que vamos a aplicar sobre el puente.

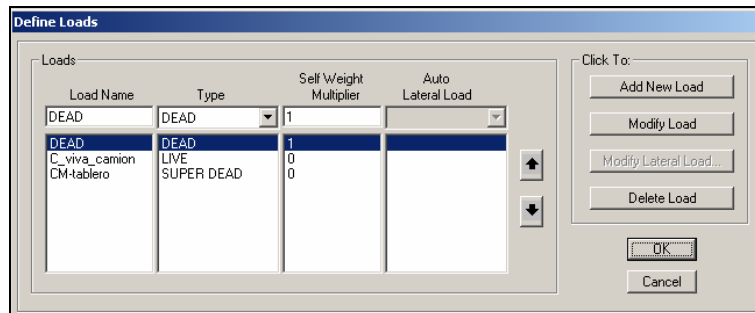


Figura 5.7. Definición de cargas

- Realizamos el levantamiento del modelo del puente en el programa utilizando los correspondientes comandos para este propósito.

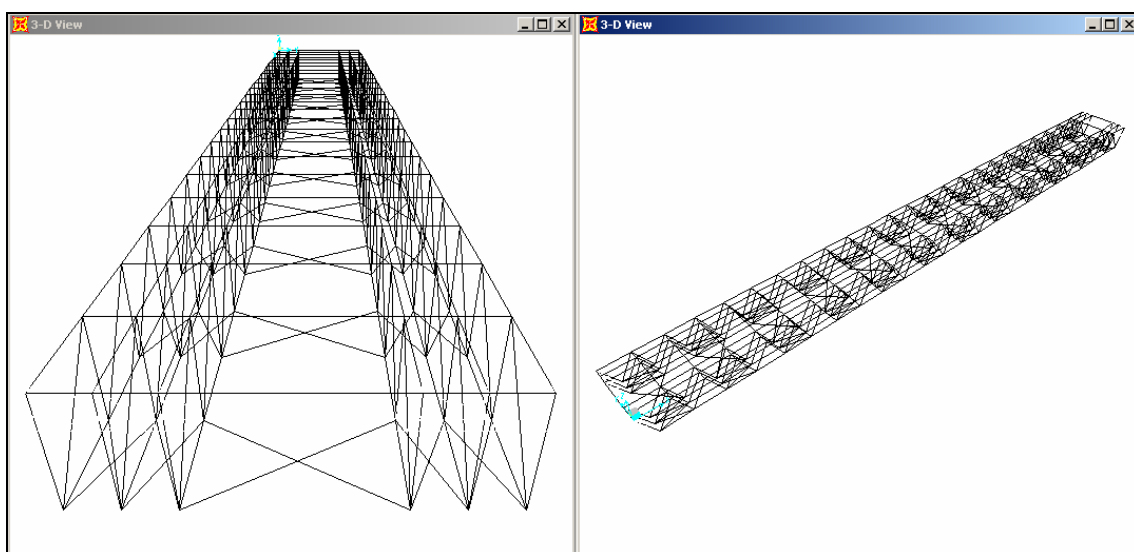


Figura 5.8. Levantamiento del modelo.

6. Asignamos los debidos apoyos a la estructura del puente.

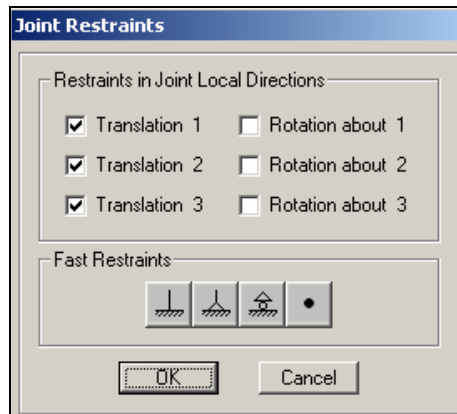


Figura 5.9. Asignación de apoyos

7. Asignamos a cada uno de los elementos de la estructura el respectivo perfil y rotamos sus ejes de ser necesario.

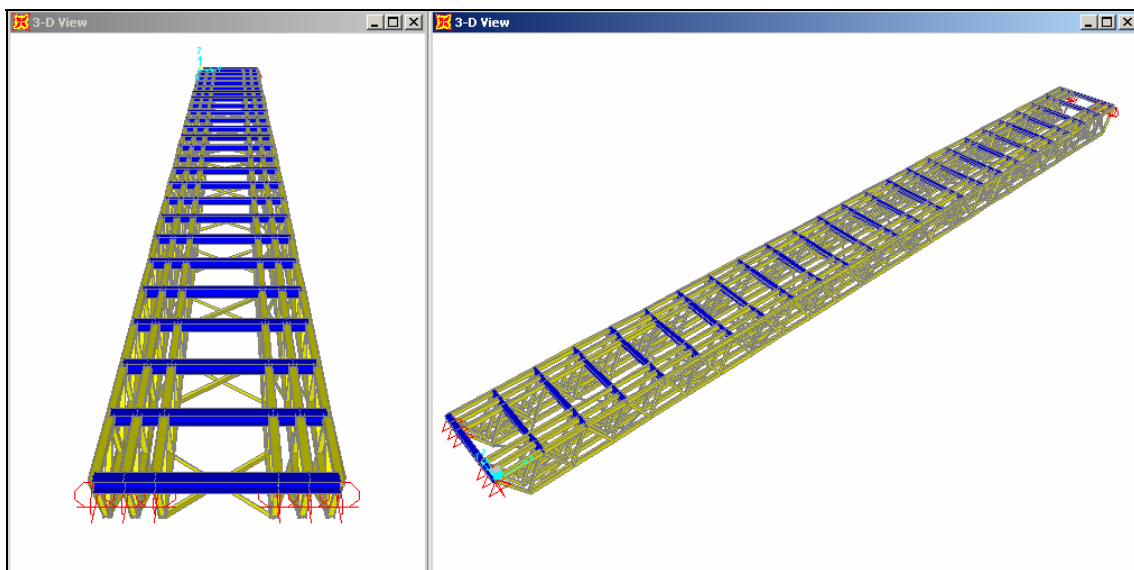


Figura 5.10. Vistas del puente de 36 m.

8. Seleccionamos cada una de las vigas transversales del puente y asignamos la carga muerta debido al peso del tablero de hormigón, la carpeta asfáltica, el piso metálico (Kubilosa) y las protecciones laterales que actúan sobre estas vigas. El valor de dicha carga distribuida es de 0,44 Ton/m en las vigas transversales de entrada y salida del puente, para el resto de las vigas su valor es de 0.87 Ton/m.

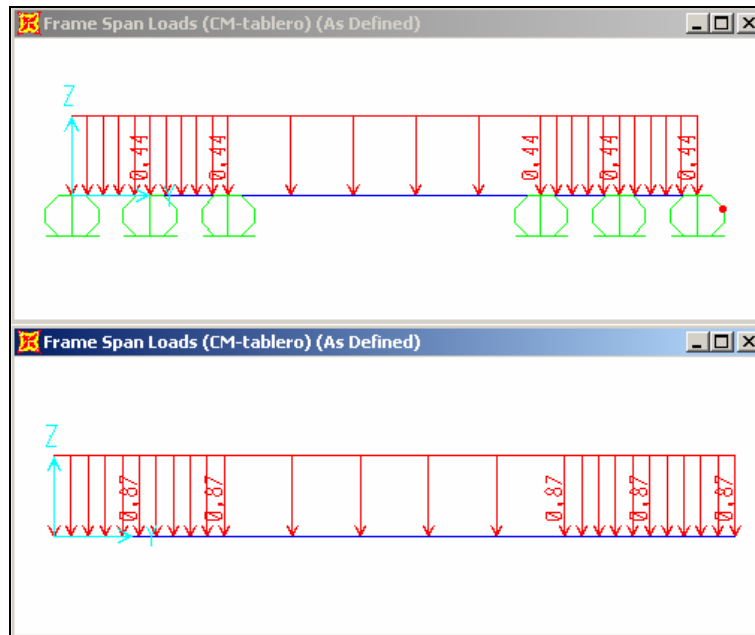


Figura 5.11. Cargas muertas en las vigas transversales

9. Asignamos la carga viva correspondiente al camión de diseño HS20-44, únicamente a las vigas transversales que se encuentren en las posiciones críticas del puente, en las cuales los efectos producidos por dicha carga son los máximos. Para el puente de 36 m de luz cargamos los valores correspondientes de la carga viva de 2.74, 4.6, 3.86, 3.5, 1.25 y 0.6 Ton/m en las vigas transversales 10, 11, 13, 14, 16 y 17 respectivamente.

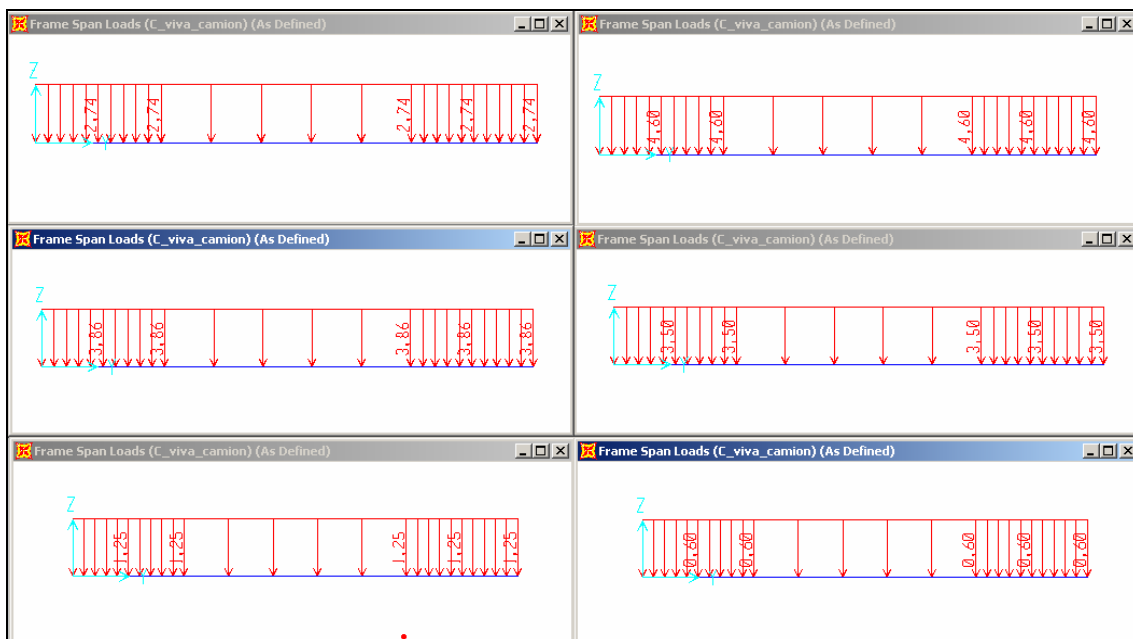


Figura 5.12. Cargas vivas en las vigas transversales

10. Definimos el código de diseño por el cual se verificarán cada uno de los elementos de la estructura metálica del puente.

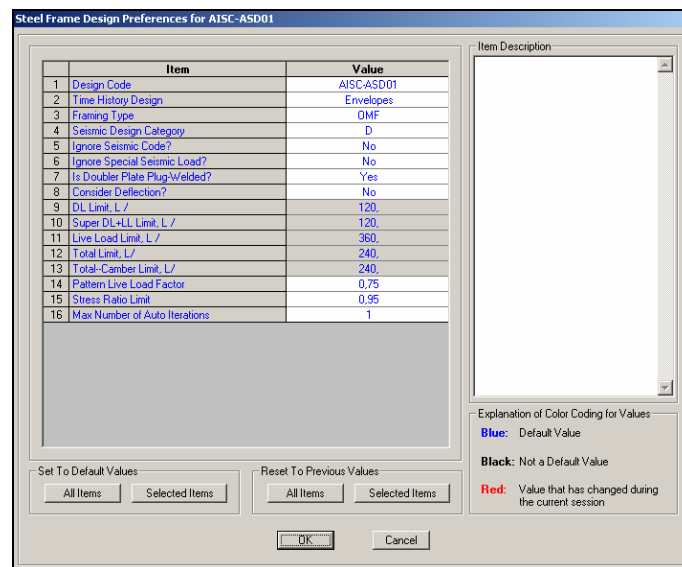


Figura 5.13. Selección del código de diseño.

11. Ejecutamos el programa.

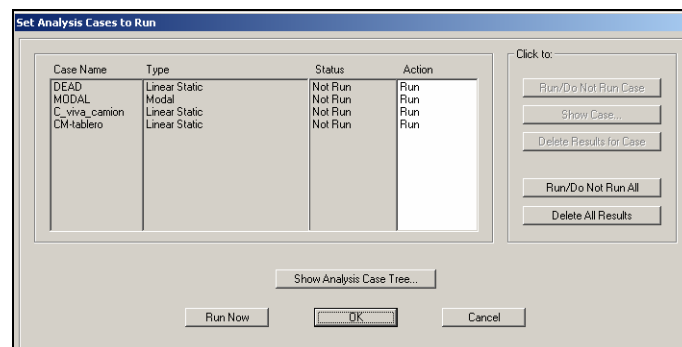


Figura 5.14. Corrida del programa

12. Procedemos a realizar el diseño, para lo cual ingresamos al menú Design / Steel frame design / Start design / check of structure, esto iniciará el diseño de la estructura. Una vez terminado el diseño mostrará la estructura con colores, en los elementos que presenten el color rojo son los más solicitados o están fallando, para ver mas detalles del diseño hacemos clic sobre estos elementos y presionamos Details.

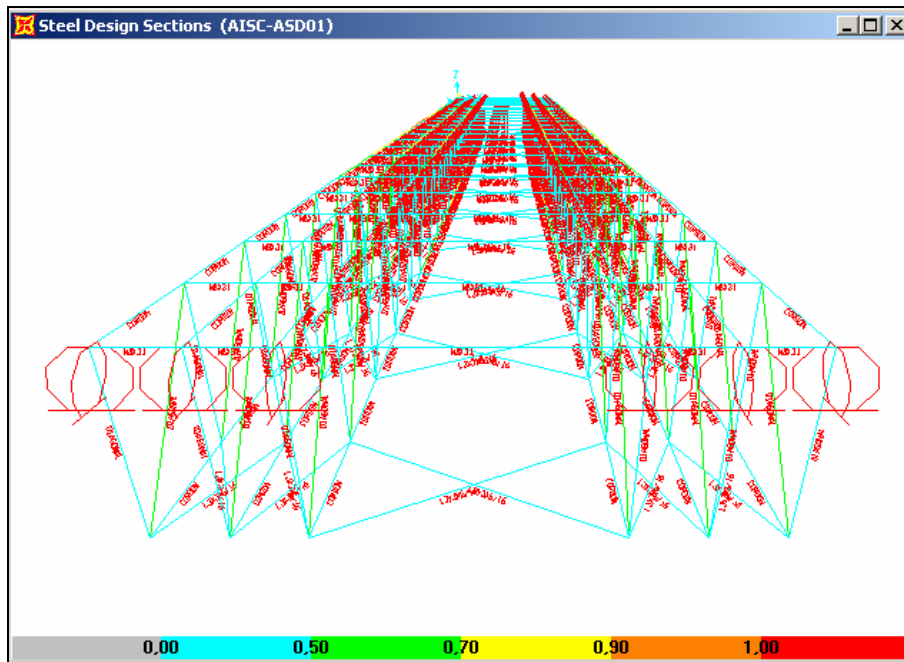


Figura 5.15. Verificación de elementos críticos.

13. Finalmente procedemos a visualizar e interpretar los resultados proporcionados por el programa.

Nota: Este procedimiento es general para las simulaciones de los demás puentes, en los cuales únicamente se variarán la longitud de los mismos mediante la disminución del número módulos.

5.1.3. Análisis de resultados.

En la simulación pudimos visualizar y determinar que todos los elementos de la estructura cumplen satisfactoriamente con las solicitaciones de carga muerta, carga viva y la combinación de estas, además nos permitió obtener de una manera rápida el elemento crítico del puente el cual se tomará como base para generalizar el diseño de la totalidad de los componentes del mismo.

Para observar una información más detallada del elemento crítico se puede presionar sobre este y dando un click el botón derecho del mouse, se muestra una lista de las combinaciones de carga empleadas para verificar la sección en varios puntos a lo largo del elemento. Una de las combinaciones de carga estará resaltada, esta es la combinación que controla el diseño del elemento.

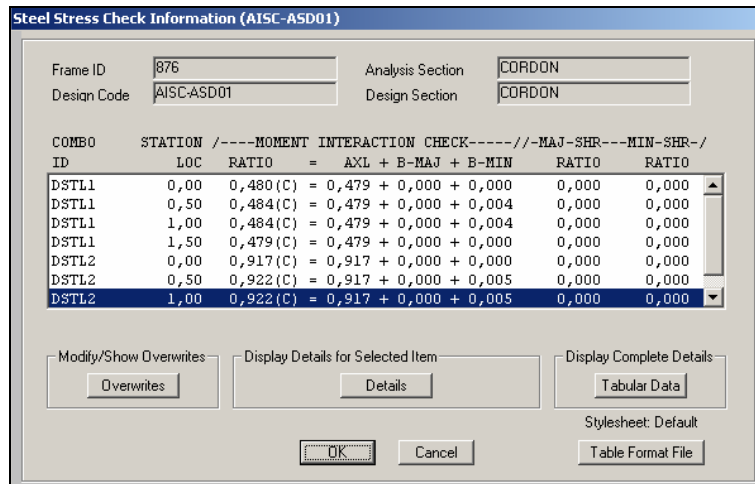


Figura 5.16. Información de esfuerzos.

El botón de Details nos muestra toda la información de los resultados del análisis para ese elemento de acuerdo al código empleado. A continuación tenemos el reporte de diseño del elemento considerado con el más crítico del puente:

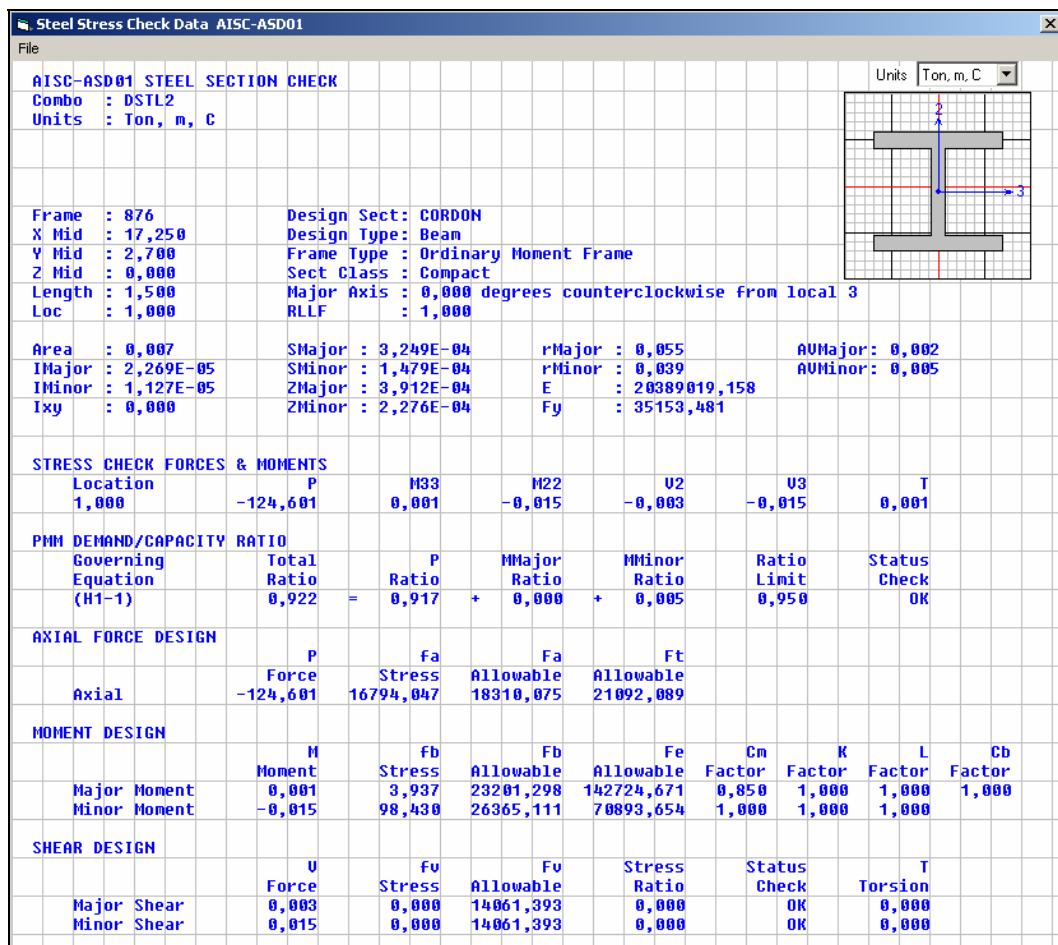


Figura 5.17. Reporte de diseño

De la simulación pudimos obtener los valores correspondientes de las deflexiones máximas de la estructura debidas al efecto de la carga muerta, posterior y viva como se indica a continuación:

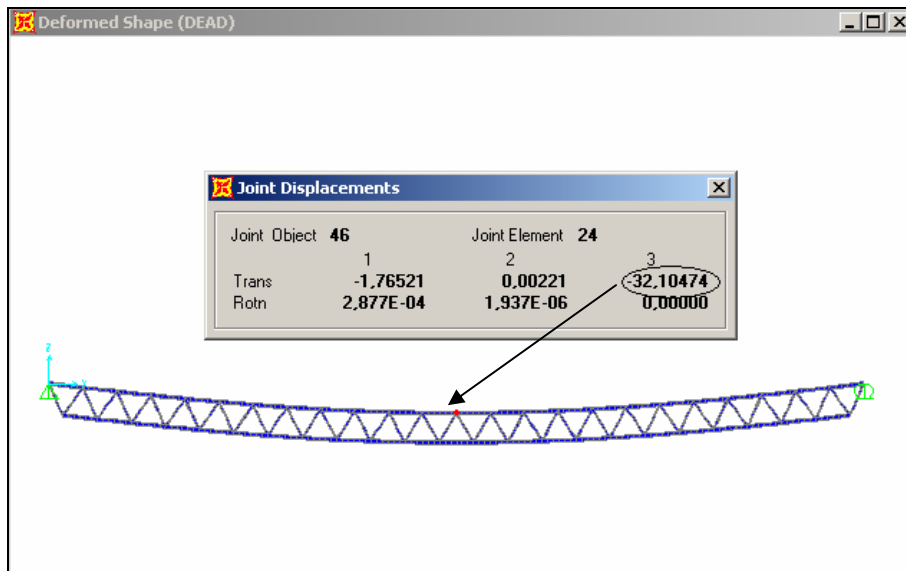


Figura 5.18. Deflexión máxima debido al peso de la estructura

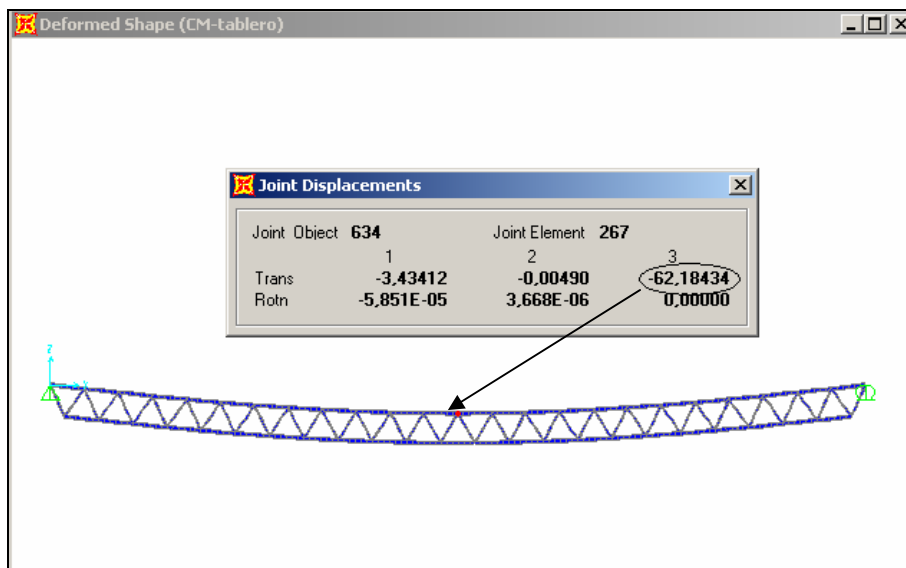


Figura 5.19. Deflexión máxima debido a la carga posterior.

En las dos figuras anteriores podemos observar los valores de 32,1 y 62,18 mm correspondientes a las deflexiones máximas en la mitad del puente debido a la carga muerta de la estructura metálica y a la carga posterior respectivamente. La suma de estos dos valores nos da la deflexión máxima del puente debido a la carga muerta total y su valor es de 94,28 mm.

En la siguiente figura observamos un valor de 41.9 mm correspondiente a la deflexión máxima del puente debido al efecto de la carga viva con el respectivo incremento del factor de impacto.

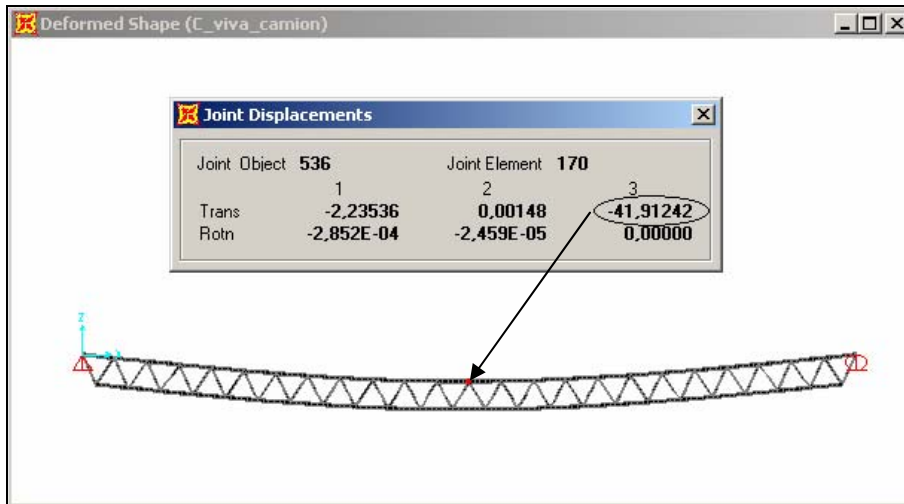


Figura 5.20. Deflexión máxima debido a la carga viva

5.2. Módulo.

5.2.1. Comportamiento estático en Sap 2000.

Para realizar el análisis del comportamiento estático de un módulo del puente, elaboramos el modelo en el programa y asignamos una carga viva de 16000 Lbs, correspondiente a la carga de un neumático del camión HS-20-44.

Para esta simulación consideramos que la carga mencionada se encuentra ubicada en la mitad de la distancia entre apoyos del módulo como se indica en la siguiente figura:

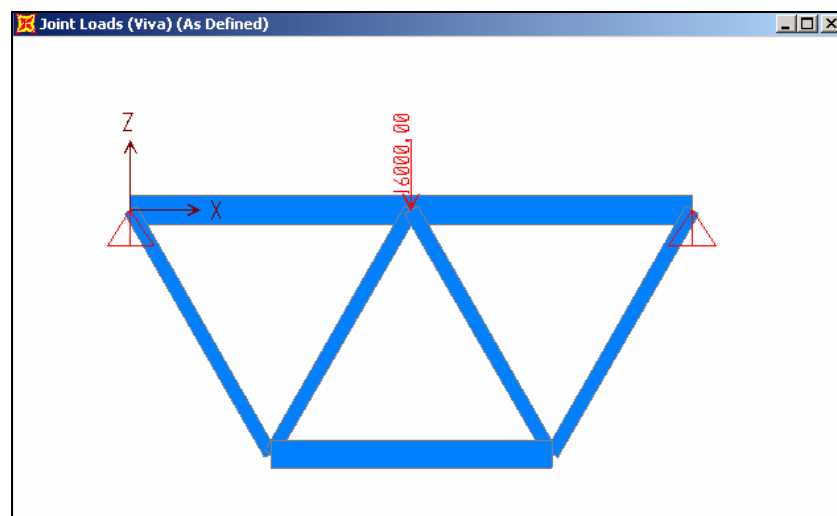


Figura 5.21. Modelo del módulo en Sap 2000

En el programa, una vez definidos el material, las secciones de los perfiles, las cargas procedemos a simular el modelo, el cual nos permitirá obtener los desplazamientos máximos del módulo debido a la carga aplicada sobre este.

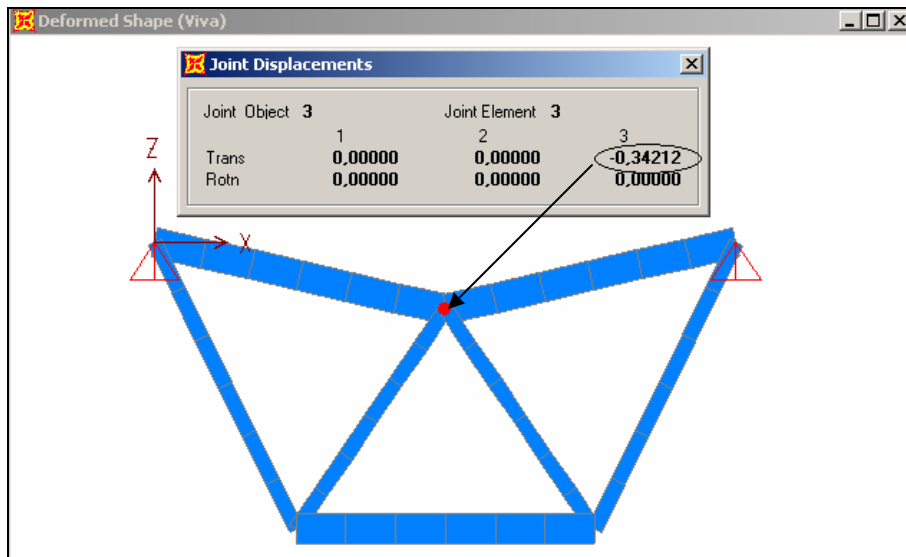


Figura 5.22. Desplazamiento máximo del módulo en Sap 2000.

5.2.2. Comportamiento estático en Cosmos Works.

Siguiendo un procedimiento similar al realizado para la simulación del módulo en el programa Sap 2000, efectuamos en el Cosmos Works el levantamiento del modelo y la asignación respectiva de la carga como podemos observar a continuación:

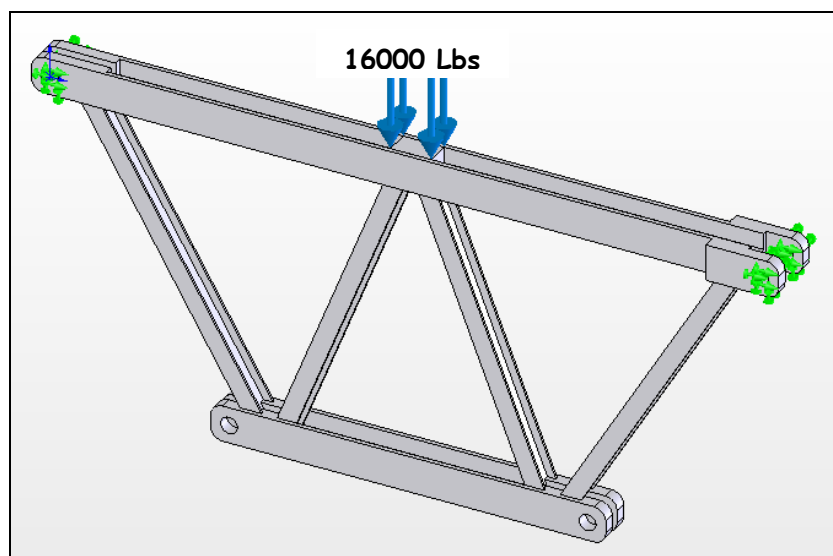


Figura 5.23. Modelo del módulo en Cosmos Works

Como resultado de la simulación obtenemos la siguiente grafica en la cual obtenemos el valor correspondiente al desplazamiento estático máximo del módulo:

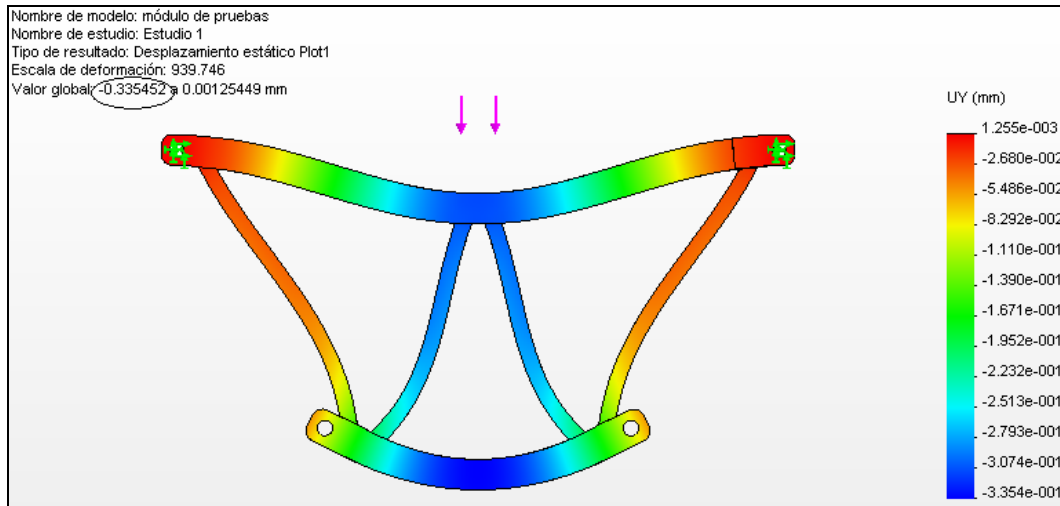


Figura 5.24. Desplazamiento máximo del módulo en Cosmos Works

5.2.3. Análisis comparativo de resultados.

Como podemos observar en los dos casos anteriores, tanto en la simulación en el Sap 2000 como en el Cosmos Works el módulo presenta una deformación característica debida a la carga aplicada sobre este, generando como resultado un desplazamiento vertical de 0.34 mm.

5.3. Conexión de los módulos.

5.3.1. Comportamiento estático.

El comportamiento estático de la conexión se lo determina en Cosmos Works, el mismo que es un complemento de diseño del programa SolidWords. En este programa se realiza el ensamble de la conexión, se define el tipo de análisis que se desea realizar, se asigna los respectivos materiales, cargas y restricciones y se ejecuta la simulación. Como resultados se obtiene los valores máximos y mínimos de los esfuerzos, las deformaciones unitarias, los desplazamientos, las deformaciones y factores de seguridad.

Para la modelación de la conexión del módulo de este proyecto, se establece que sobre este modelo actuará una fuerza de 94.5 Ton (208 Klb) como se indica en la siguiente figura:

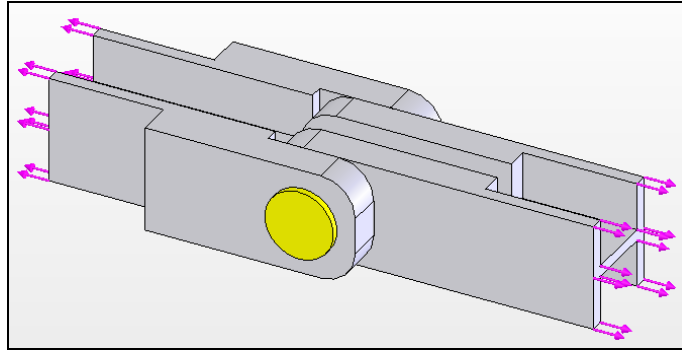


Figura 5.25 Conexión de los módulos.

A continuación se indican las distintas graficas de resultados que genera el programa para la interpretación del comportamiento estático de la conexión:

5.3.1.1. Resultados de esfuerzos.

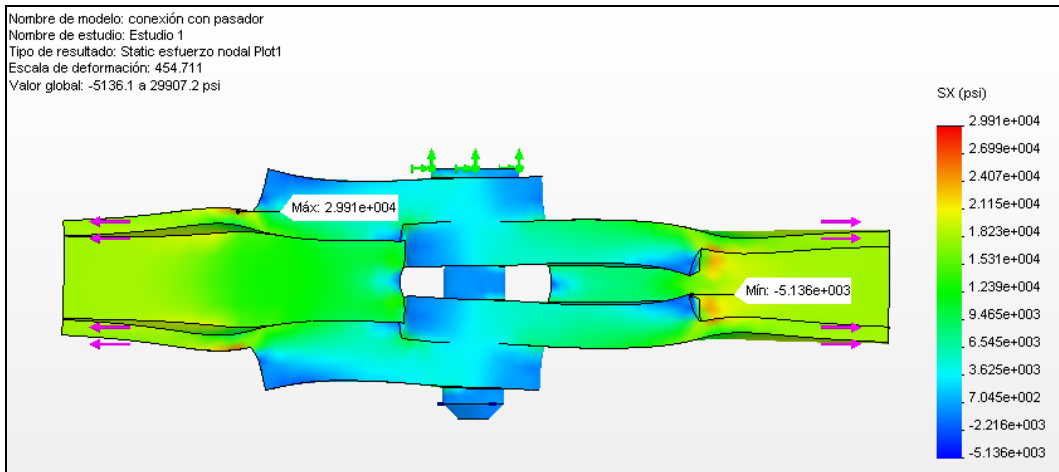


Figura 5.26. Resultados de esfuerzos.

5.3.1.2. Resultados de las deformaciones unitarias.

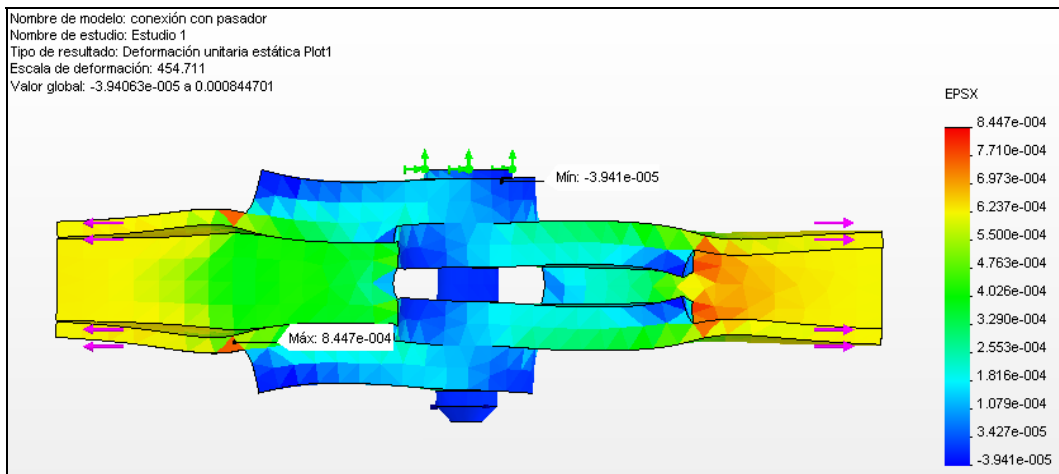


Figura 5.27. Resultados de las deformaciones unitarias.

5.3.1.3. Resultados de los desplazamientos.

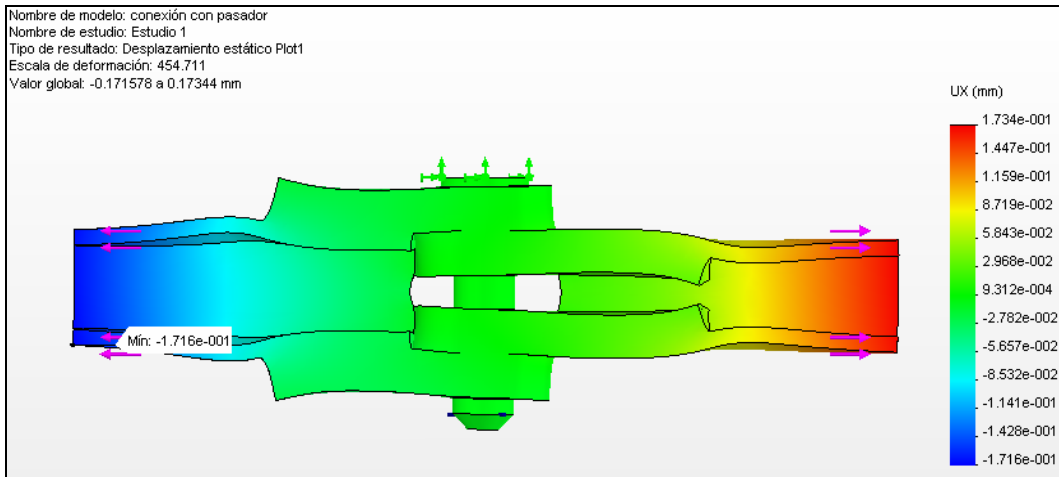


Figura 5.28. Resultados de los desplazamientos

5.3.1.4. Resultados de la Deformación.

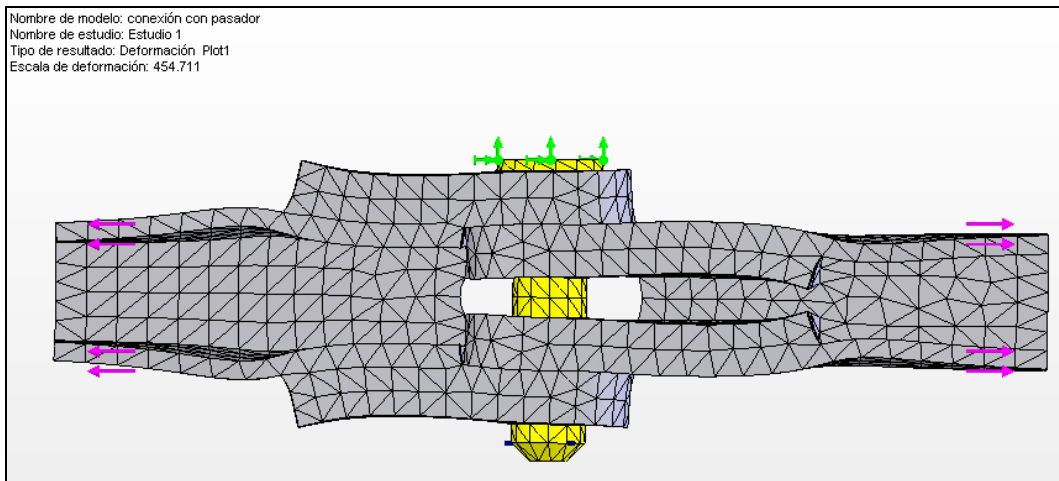


Figura 5.29. Resultados de las deformaciones unitarias

5.3.1.5. Resultados de la verificación de diseño.

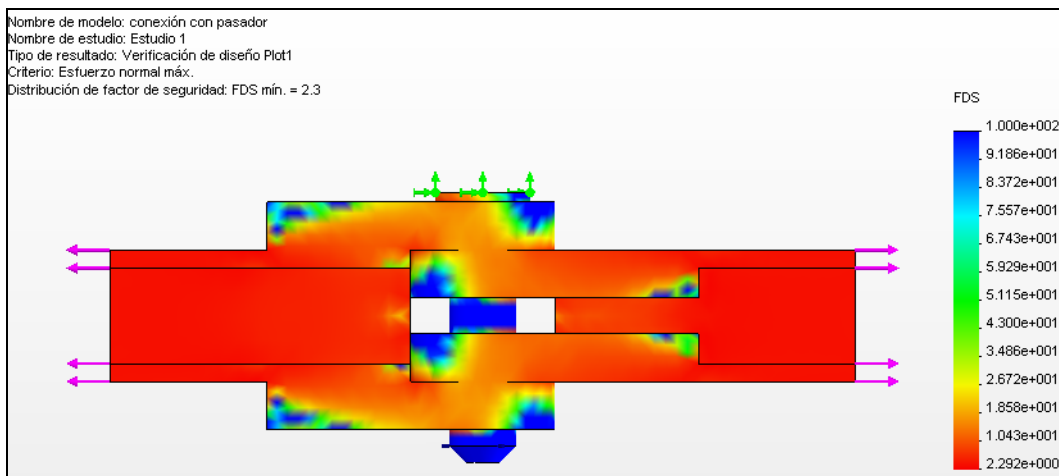


Figura 5.30. Factor de seguridad de la conexión para el esfuerzo normal máximo.

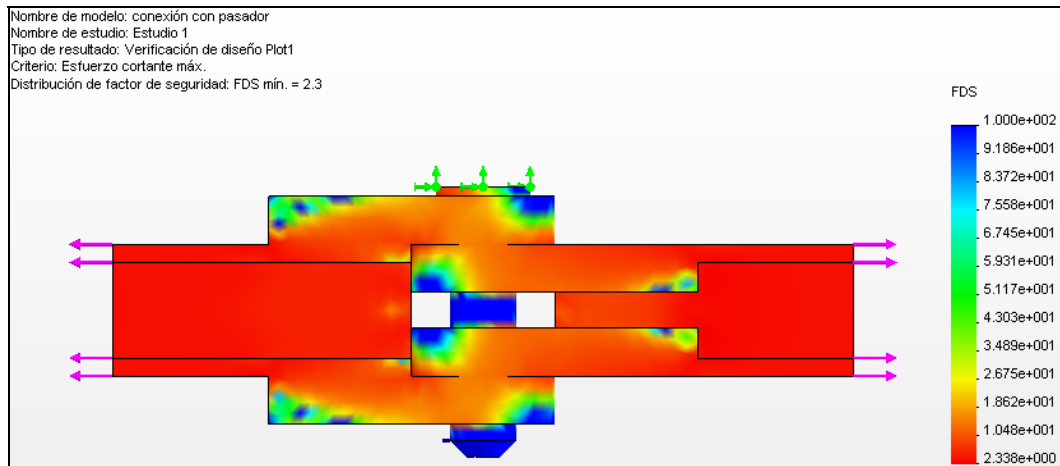


Figura 5.31. Factor de seguridad de la conexión para el esfuerzo cortante máximo.

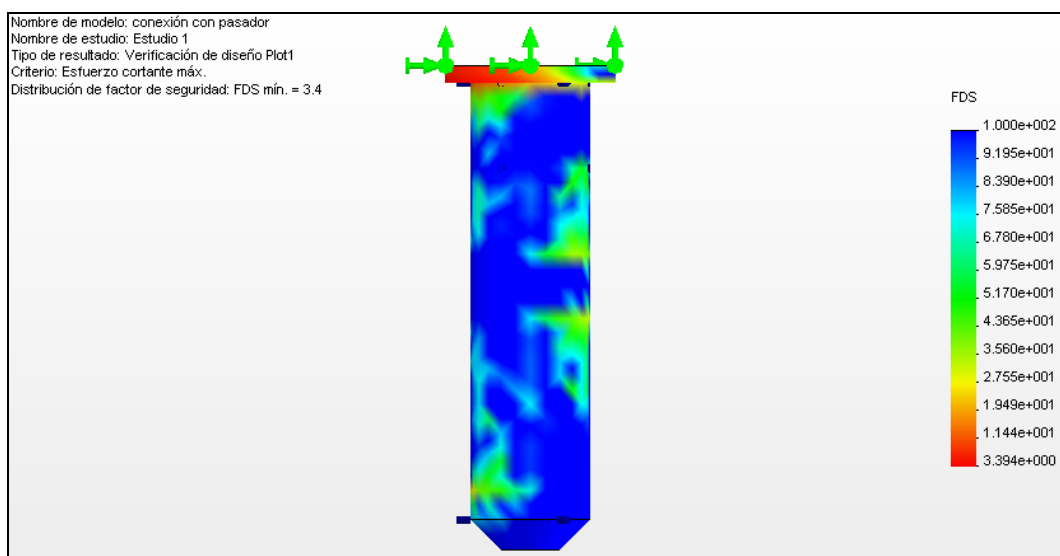


Figura 5.32. Factor de seguridad del pasador.

5.3.2. Análisis de resultados.

Como resultado de la simulación se determinó que la conexión del módulo presenta un esfuerzo normal máximo de 30 Ksi, y un mínimo de -5.14 Ksi, además su deformación unitaria normal máxima es de 0.000847 y la mínima es de 0.0000394. También, esta conexión presenta un desplazamiento máximo de 0.17344 mm y un desplazamiento mínimo de 0,171578.

Finalmente, la verificación del diseño realizada por el programa, generó un factor de seguridad en la conexión de 2.3 para evitar la falla debido a los efectos producidos tanto por el esfuerzo normal máximo, como el esfuerzo cortante máximo. El pasador tiene un factor de seguridad de 3.4 para evitar la falla debido al esfuerzo cortante máximo.