# UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

TESINA

***DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA EN VIGAS DE GRAN PERALTE***

PARA OBTENER EL TITULO DE

**INGENIERO CIVIL**

PRESENTA

P.I.C. MELISSA SARAI TAPIA BARRIGA

_____

**ASESORA:** BERTHA ALEJANDRA

OLMOS NAVARRETE

_____

M O R E L I A  M I C H O A C Á N | M A R Z O | 2 0 2 2

.....1
RESUMEN.....3
*ABSTRACT*.....3
OBJETIVO.....3
INTRODUCCIÓN.....3
ANTECEDENTES.....5
CRITERIOS DE DISEÑO.....7
1. PROCESO DE DISEÑO DE VIGAS DE GRAN PERALTE.....8
A) SELECCIÓN DE LA PLACA DEL ALMA DE LA TRABE.....8
*Altura*.....9
*Espesor*.....9
B) SELECCIÓN DE LOS PATINES DE LA TRABE.....10
*Selección preliminar del patín.*.....10
2. REVISIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN.....12
DETERMINACIÓN DEL MOMENTO FLEXIONANTE DE DISEÑO.....15
3. REVISIÓN DE LA RESISTENCIA A CORTANTE.....17
DISEÑO DE ATIESADORES.....20
I) ATIESADORES INTERMEDIOS.....20
II) ATIESADORES BAJO CARGAS CONCENTRADAS.....24
*Flujo plástico local del alma*.....24
*Abollamiento (crippling) local de almas*.....26
*Pandeo del alma con desplazamiento lateral*.....27
*Pandeo en compresión del alma*.....28
4. REVISIÓN DE LA RESISTENCIA A LA INTERACCIÓN FLEXIÓN – CORTANTE.....30
5. CASOS DE ESTUDIO.....30
CASO 1.....30
CASO 2.....42
CASO 3.....45
CONCLUSIONES.....56
REFERENCIAS.....57

**RESUMEN**

En el presente documento se habla del proceso de cálculo estructural para determinar la resistencia a flexión y cortante de vigas de acero de gran peralte de acuerdo a lo establecido en el Reglamento vigente de la ciudad de México del 2017. La finalidad del trabajo es diseminar la actualización de la normativa conforme a las modificaciones que se han presentado en la norma en respuesta a los requerimientos que van surgiendo por la acelerada transformación de la tecnología en estos tiempos. El objetivo del trabajo es explicar de manera muy simple el proceso de diseño estructural por medio de diagramas de flujo, donde se resumen los requerimientos establecidos en dichas normas, para que el lector capte de manera más inmediata el proceso. El uso de los diagramas de flujo se aplica a ejemplos simples que brindan mayor información sobre el cálculo de las trabes armadas y su utilización.

Cálculo, momento, cortante, atiesadores, trabes armadas.

***Abstract***

*This document discusses the strutcural design process to determine the flexural and shear strength of high depth steel beams in accordance with the provisions of the current Regulation of Mexico City of 2017. The purpose of the work is to disseminate the update of the regulations in accordance with the modifications that have been presented in the standard in response to the requirements that arise due to the accelerated transformation of technology in these times. The objective of the work is to explain in a very simple way the structural design process by means of flowcharts, where the requirements established in said standards are summarized, so that the reader understands the process more inmediately. The use of flowcharts is applied to simple examples that provide more infomration on the structural calculation of high depth steel beams and their uses.*

**OBJETIVO**

Desarrollar de diagramas de flujo para evaluar la capacidad de resistencia a flexión y cortante de trabes armadas de acuerdo con las especificaciones de las Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de la Ciudad de México.

**INTRODUCCIÓN.**

Una viga es un elemento estructural que soporta cargas transversales.

Una viga y una trabe es en esencia lo mismo solo que el Instituto Americano de la construcción con Acero (AISC por sus siglas en inglés) hace una diferencia entre

las vigas y las trabes armadas con base en la esbeltez de sus almas. Por lo tanto, en este documento abordaremos lo que son las trabes armadas

Una trabe es un elemento originalmente recto, donde generalmente las cargas actúan en dirección perpendicular a su eje longitudinal, de acuerdo a su relación longitud de claro a peralte de la trabe, esta trabajará a flexión, si la relación es menor o igual a cinco, o de lo contrario regirán los efectos de cortante en su comportamiento. Estos elementos, generalmente se fabrican rolados en frío.

Una trabe armada es aquel elemento estructural construido por tres placas, dos llamadas patines que se encuentran ubicadas de forma horizontal y que están unidas por la tercera placa en forma vertical llamada alma. Estas trabes se construyen con la finalidad de librar claros grandes y reducir su peso, ya que el alma puede ser muy delgada y con ello se reduce el costo en la construcción. Un ejemplo se presenta en la ilustración 1.

*Ilustración 1. Trabe Armada (Tomada de la revista Modern Steel Construction)*

Existen distintas formas de conectar a los patines con el alma, una de ellas es con tornillos, en la cual se conectan mediante ángulos (Figura. 1a), otras en las que se utiliza la soldadura (Figura. 1b) y en algunas ocasiones se utilizan perfiles T (Figura. 1c).

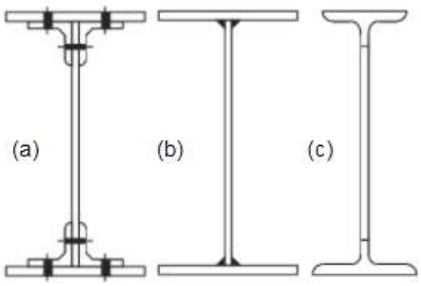



*Figura. 1. Ejemplos de trabes armadas*

Como es de esperarse, cualquier proceso constructivo se ve afectado por diversos factores que se generan al someter a los elementos estructurales a las acciones externas, los cuales son función de la geometría de la sección transversal y del material que este conformada, estos efectos se deben considerar tanto en el proceso de análisis y diseño estructural como en el proceso constructivo, esto con el fin de garantizar su buen comportamiento y resistencia a lo largo de su vida útil. En el caso de las trabes armadas, debido a la relación de esbeltez que suele tener el alma se debe tener cuidado de los efectos por pandeo local, la tensión diagonal y la resistencia a cortante, ya que son efectos críticos para estimar su resistencia y mecanismos de colapso, para mejorar la resistencia y buen comportamiento de trabes armadas se implementan atiesadores.

Para implementar trabes armadas en una obra civil, primeramente, se debe desarrollar el cálculo estructural de acuerdo a las especificaciones del reglamento de construcción de la zona donde se vaya a construir, en este trabajo se siguen las normas AISC y el reglamento de la ciudad de México.

**ANTECEDENTES**

Es un hecho que en la actualidad el uso de estructuras de acero nos facilita la solución de situaciones imprevistas que se pueden presentar en la industria de la construcción, pero sin lugar a dudas, fueron muchos esfuerzos y trabajos para llegar a lo que hoy conocemos como acero estructural, muchos intentos y fracasos constructivos en el pasado, lo que nos remonta al año 1755 cuando se construyó por primera vez un puente en Ródano, Francia, el cual se vio limitado por la imposibilidad de fabricar piezas estructurales con las dimensiones requeridas, ya que en esa época no se trataba del acero que utilizamos en la actualidad, sino se fabricaban las piezas estructurales con hierro fundido. 20 años después, en 1775 se construye el primer puente sobre el río Serven en Coalbrookedale, Shropshire, Inglaterra, llamado “The Iron bridge”, con longitud total de 60 m, mientras que la

estructura de acero se construyó de hierro fundido mediante dos medios arcos compuestos de 15 m cada uno, cubriendo un claro de 30 m, el concepto estructural del puente es más parecido a la madera que al acero. Hay que tener en cuenta que el hierro fundido en la construcción presenta una baja resistencia a la tensión, no es laminable ni soldable, por lo cual es indudablemente asombrosa la capacidad y el ingenio que se tuvo para llevar a cabo esta obra a partir de la implementación de este material, hoy en día se consideran varios factores para proyectar este tipo de construcciones. A partir de esta experiencia fue que inicio la construcción de los primeros edificios industriales (Francis Pfenniger, s.f.).

En México la implementación del hierro fundido tiene lugar a partir de la época de la conquista; sin embargo, en 1524 es cuando el cura Vasco de Quiroga logra que se enseñe el oficio a los indígenas, quienes lograron aprenderlo de forma magistral, y aunque en ese momento solo se utilizaba para lo que hoy conocemos como herrería, fue un parteaguas para llegar a su implementación en obras civiles. Gracias al conocimiento de esta nueva herramienta, en 1807 se cuenta con el Alto Horno en México, mediante la ferrería Guadalupe ubicada en Coalcomán Michoacán e instalada por el señor Andrés Manuel del Río, que a pesar de que la guerra de independencia daría fin a sus operaciones, años después surgirían otras industrias que continuarían con la labor gracias al camino ya marcado.

Fue hasta inicios del siglo XX que comienza un desarrollo más acelerado del material y donde las ferrerías quedan relevadas puesto que surgen las siderúrgicas. La más importante de ellas, que además logra cambiar a la industria en México, fue la Fundidora de Hierro y Acero en Monterrey (FUMOSA), siendo la empresa Campos Hermanos S.A. quien logra crear el primer puente de acero, el puente Nonoalco en 1939 y con ello se da inicio el uso del acero en construcciones cada vez más grandes (Felipe Díaz del Castillo Rodríguez y Enrique Cortés González, 2008).

En la actualidad, México ocupa el quinceavo lugar en la producción de Acero a Nivel Mundial, de acuerdo a la Cámara Nacional de la Industria del Hierro y del Acero (CANACERO), en 2019 se reporta una producción de 18.4 millones de toneladas de acero al año, con un consumo per cápita de 214 kg/ año, y generación de empleos de forma directa e indirecta de alrededor de 672 mil empleados, lo cual es una muestra de la importancia de la industria acerera en México (Radiografía de la Industria del acero, 2019).

Una vez establecida la importancia que tiene el acero estructural, podemos entender el rol que juega su implementación en las obras civiles para el desarrollo de un país, ya que para que un país tenga mejores oportunidades, este tiene que contar con una infraestructura adecuada, para lo cual se necesita de muchos profesionales en distintas áreas del conocimiento que permiten alcanzar esta meta.

Como ingenieros civiles somos encargados de hacer uso de estos materiales de forma eficiente y óptima para dar solución a diversos problemas que se presentan

en el proceso de la construcción de cualquier obra civil, por lo que nos enfocamos en conocer sus propiedades y comportamiento ante varios aspectos, que van desde las acciones naturales como el uso para el cual son destinadas, y en función de esto definir el material que nos permita librar situaciones de forma favorable sin poner en riesgo tanto a los usuarios como a los componentes de las estructuras.

Dentro de la ingeniería civil existen varias ramas y procesos que se utilizan en la industria de la construcción, primero se encuentra el proyectista, el cual da una idea gráfica de como lucirá el proyecto, una vez aprobado el proyecto se continúa con el cálculo estructural de los elementos a utilizar en dicho proyecto, aquí es donde se utiliza la gran mayoría de la ciencia conocida en el área, puesto que en esta etapa se deben considerar todos los factores internos y externos que pudieran afectar a la obra civil, es aquí donde precisamente en este trabajo se aborda una de la infinita cantidad de cuestiones a revisar, y que recibe el nombre de *trabes armadas*. Una vez desarrollado y revisado todos los aspectos a considerar en los procesos de análisis y diseño estructural es que se lleva a cabo el proceso constructivo, donde por lo regular si se tuvo un buen criterio de diseño, se podrá realizar con pocos contratiempos.

Una vez definido el proceso de diseño, si nos enfocándonos en la construcción con acero, podemos conocer los diferentes tipos de miembros estructurales que existen y que permiten subdividir una estructura en: columnas, trabes o vigas, tirantes, placas, apoyos, entre otros, donde cada uno tiene propiedades mecánicas que permiten soportar cualquier tipo de cargas a que pueda estar sujeta la estructura.

## CRITERIOS DE DISEÑO

Los criterios de diseño son aquellos requerimientos técnicos que están sustentados en diversas investigaciones y que nos ayudan a conseguir los objetivos deseados a la hora de realizar un análisis de diseño estructural.

De acuerdo a lo establecido en las Normas Técnicas Complementarias del reglamento de la ciudad de México, se presenta un estado límite cuando en una construcción se presenta una combinación de fuerzas, desplazamientos, niveles de fatiga, o varios de ellos, que representa el inicio o la ocurrencia de un modo de comportamiento inaceptable de dicha construcción. Estos estados límite se clasifican en dos grupos: estados límite de falla y estados límite de servicio, los primeros indican modos de comportamiento que ponen en peligro la estabilidad de la construcción o de una parte de ella, o su capacidad para resistir nuevas aplicaciones de carga. Los segundos implican la ocurrencia de daños económicos o la presentación de condiciones que impiden el desarrollo adecuado de las funciones para las que se haya proyectado la construcción.

Otro de los criterios de diseño son las resistencias de diseño, las cuales son la magnitud de una acción, o de una combinación de acciones, que provocaría la aparición de un estado límite de falla de la estructura o cualquiera de sus

componentes. En general, la resistencia se expresará en términos de la fuerza interna, o combinación de fuerzas internas, que corresponden a la capacidad máxima de las secciones críticas de la estructura. Se entenderá por fuerzas internas las fuerzas axiales y cortantes y los momentos de flexión y torsión que actúan en una sección de la estructura.

Una vez obtenida la resistencia, debe revisarse que las condiciones de diseño para las distintas combinaciones de acciones y para cualquier estado límite de falla posible generen una resistencia de obtenida que sea mayor o igual al efecto de las acciones que intervengan en la combinación de cargas en estudio, multiplicado por los factores de carga correspondientes.

Los factores de carga son aquellos factores que nos ayudan a incrementar la carga para así diseñar para una carga mayor y con ello tener un margen mayor para alguna modificación.

Para determinar el factor de carga se aplican las siguientes reglas:

Para combinaciones de acciones permanentes y variables se aplicará un factor de carga de 1.3 para las cargas permanentes y 1.5 para las variables.

Cuando se trate de edificaciones del Grupo A, los factores de carga para este tipo de combinación se tomarán iguales a 1.5 y 1.7, para cargas permanentes y variables, respectivamente.

Para combinaciones de acciones permanentes, variables y accidentales se tomará un factor de carga de 1.1 aplicado a los efectos de todas las acciones que intervengan en la combinación.

Para acciones o fuerzas internas cuyo efecto sea favorable a la resistencia o estabilidad de la estructura, el factor de carga se tomará igual a 0.9; además, se tomará como intensidad de la acción el valor mínimo probable de acuerdo con la sección 2.2; y

Para revisión de estados límite de servicio se tomará en todos los casos un factor de carga unitario.

## 1. PROCESO DE DISEÑO DE VIGAS DE GRAN PERALTE

### a) Selección de la placa del alma de la trabe.

Las características geométricas que se consideran para la selección de la placa que será el alma de la sección transversal consisten en:

- Escoger una altura
- Escoger el espesor mínimo

**Altura**

Para escoger una altura para la trabe es necesario tener en cuenta el claro que se desea cubrir, ya que por lo regular esta relación varía aproximadamente entre un vigésimo y un sexto de la longitud, dependiendo de los requisitos del claro y de la carga. Así que, si tuviéramos grandes cargas de servicio, el tamaño de la trabe sería proporcional a estas.

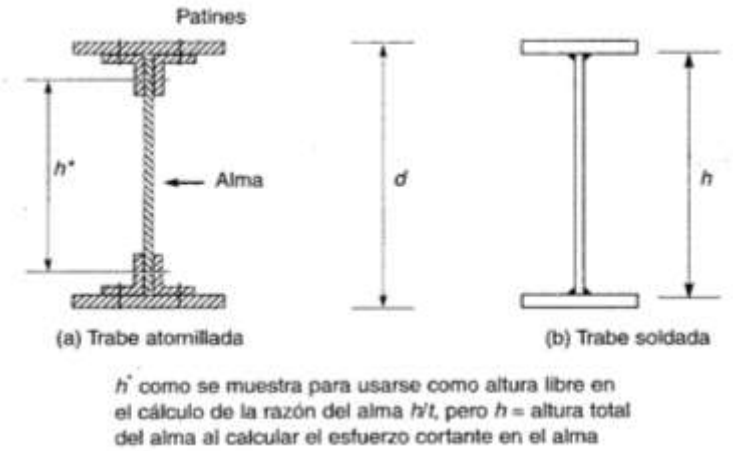



*Figura. 2. Altura de una trabe armada*

**Espesor**

La selección del espesor del alma se determina por la razón permisible peralte/espesor, ya que este parámetro nos permite asegurar que el alma no se vea afectada por efectos graves debidos al pandeo local, lo cual disminuye la resistencia estructural y puede ser la causa del colapso de la estructura; sin embargo, la viga puede diseñarse tomando en cuenta la resistencia del alma después del pandeo, lo que es factible, ya que después de pandearse la viga puede soportar una carga última ligeramente mayor a la carga última de pandeo, para que esto sea posible se debe proveer una longitud de soporte lateral del alma adecuada, así como utilizar atiesadores intermedios. Los atiesadores tienen la función de generar una acción de campo de tensión diagonal, la cual es responsable de que la trabe pueda soportar una carga última ligeramente mayor, ya que con esto se induce que el alma sea capaz de resistir tensión diagonal mediante la cual en el alma se generan fuerzas de compresión en los atiesadores intermedios, por lo tanto, es necesario que los atiesadores se diseñen para soportar estas acciones adicionales inducidas a causa de la acción de campo de tensión diagonal.

En el caso de que se opte por llevar a la viga al estado de resistencia posterior al pandeo, la relación peralte/espesor de la trabe se determina por las

consideraciones de pandeo, generados por la compresión vertical que se genera en los patines de manera desbalanceada.

Por lo que la resistencia al pandeo vertical del alma debe ser suficiente para que ésta resista la compresión inducida, lo anterior se logra si se cumple que la relación peralte/espesor este dentro del límite establecido en el reglamento de la Ciudad de México sección 6.13.1.2. Los valores límite de las dimensiones de miembros de sección I o H se definen por la ecuación (1), el valor resultante de esta relación no debe exceder de 260.

$$\frac{h}{t_a} \leq \frac{.48E}{\sqrt{F_y(F_y + 1150)}} \tag{1}$$

Cuando se cumple con las especificaciones anteriores y que se tiene considerado el uso de atiesadores transversales con separaciones no mayores a una y media veces el peralte del alma de la viga o trabe, la relación ancha/espesor puede aumentarse hasta el valor definido por la ecuación (2):

$$\frac{h}{t_a} \leq 11.7\sqrt{\frac{E}{F_y}} \tag{2}$$

**b) Selección de los patines de la trabe**

Una vez que se ha seleccionado las características de la placa del alma el siguiente paso es la selección de la geometría de las placas para los patines. Los pasos recomendados para ello son:

a. Hacer una selección preliminar del patín.
b. Cálculo de la resistencia a flexión.
c. Determinar la resistencia de diseño por flexión reducida en los patines.
d. Seleccionar patines de tamaño reducido para usarlos en las regiones alejadas del momento máximo y determinar la localización de las transiciones del área de los patines.

**Selección preliminar del patín.**

Para ello, se requiere proponer inicialmente las dimensiones del patín recordando que en una viga normal la resistencia en el límite elástico se define como función del módulo de sección elástico, el cual podemos tomar como base para asociarlo al momento que debe soportar; sin embargo, para trabes armadas, se considera que el alma no contribuye en la resistencia a flexión, por lo que se utiliza un patín

equivalente. De acuerdo con la definición del momento de fluencia tendríamos que el módulo de sección elástico requerido es:

$$(S_x)_{req} = \frac{M_x}{\emptyset F_y} \tag{3}$$

En una trabe armada la resistencia a flexión es igual a la suma de la contribución de las resistencias del alma y de los patines, de forma aproximada se tendría:

$$S_x = \frac{I_x}{d/2} \tag{4}$$

$$I_x = (I_x)_{alma} + (I_x)_{patines} \tag{5}$$

$$I_x \approx \frac{th^3}{12} + 2A_f\left(\frac{h}{2}\right)^2 \tag{6}$$

Donde:

$t =$ espesor del alma de la trabe

$h =$ altura del alma de la trabe

$d =$ altura de la trabe

$A_f =$ área del patín de la trabe

Por lo que el módulo de sección elástico de la trabe y considerando que h/d≈1 queda definido por la ecuación (7):

$$S_x = \frac{th^2}{6} + A_f h \tag{7}$$

Sustituyendo el valor de $S_x$ en la ecuación (3) y despejando el área del patín obtenemos:

$$A_f = \frac{M_x}{\emptyset F_y h} - \frac{th}{6} \tag{8}$$

La ecuación (15) nos permite tener una relación entre el momento de diseño, el esfuerzo de fluencia del acero y las dimensiones de la placa propuesta para el alma de la sección transversal, y así determinar el área de la placa de los patines de la sección transversal, para con base en este valor seleccionar el ancho y espesor del patín, con las dimensiones propuesta se debe revisar que la inercia sea adecuada.

Se puede limitar el área mínima del patín a partir de sustituir $\emptyset = 0.9$, factor de reducción de resistencia en acero trabajando a flexión.

Además de los límites indicados anteriormente, las trabes armadas deben cumplir con las siguientes especificaciones de acuerdo a la sección 6.13.1.2 del Reglamento de la Ciudad de México.

Los miembros de sección I o H con simetría simple deben satisfacer el límite siguiente:

$$0.1 \leq \frac{I_{yc}}{I_y} \leq 0.9 \tag{9}$$

Los miembros de sección I o H con almas esbeltas deben también satisfacer:

Cuando $a/h \leq 1.5$

$$\left(\frac{h}{t_a}\right)_{máx} \leq 12\sqrt{\frac{E}{F_y}} \tag{10}$$

Cuando $a/h > 1.5$

$$\left(\frac{h}{t_a}\right)_{máx} \leq \frac{0.40E}{F_y} \tag{11}$$

Donde:

$a = distancia\ libre\ entre\ atiesadores\ transversales$

$I_{yc} = momento\ de\ inercia\ del\ patín\ en\ compresión\ alrededor\ del\ eje\ Y$

$I_y = momento\ de\ inercia\ de\ la\ sección\ alrededor\ del\ eje\ Y$

$h =\ peralte\ del\ alma\ de\ la\ viga\ o\ trabe\ armada$

$t_a = grueso\ del\ alma\ de\ la\ viga\ o\ trabe\ armada$

## 2. REVISIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN

Una vez determinada el área tentativa para nuestro patín se procede a seleccionar las dimensiones de la placa que pueda brindar dicha área. Seleccionada ésta, se calcula el momento nominal de acuerdo con el reglamento de la ciudad de CDMX en la sección 6 de las normas técnicas complementarias de Acero.

El Diagrama 1 muestra el cálculo de la resistencia a flexión, donde se consideran los efectos del pandeo local de las placas que forman la sección transversal y el

posible pandeo lateral como efecto de la longitud de soporte lateral con que cuenta la viga.

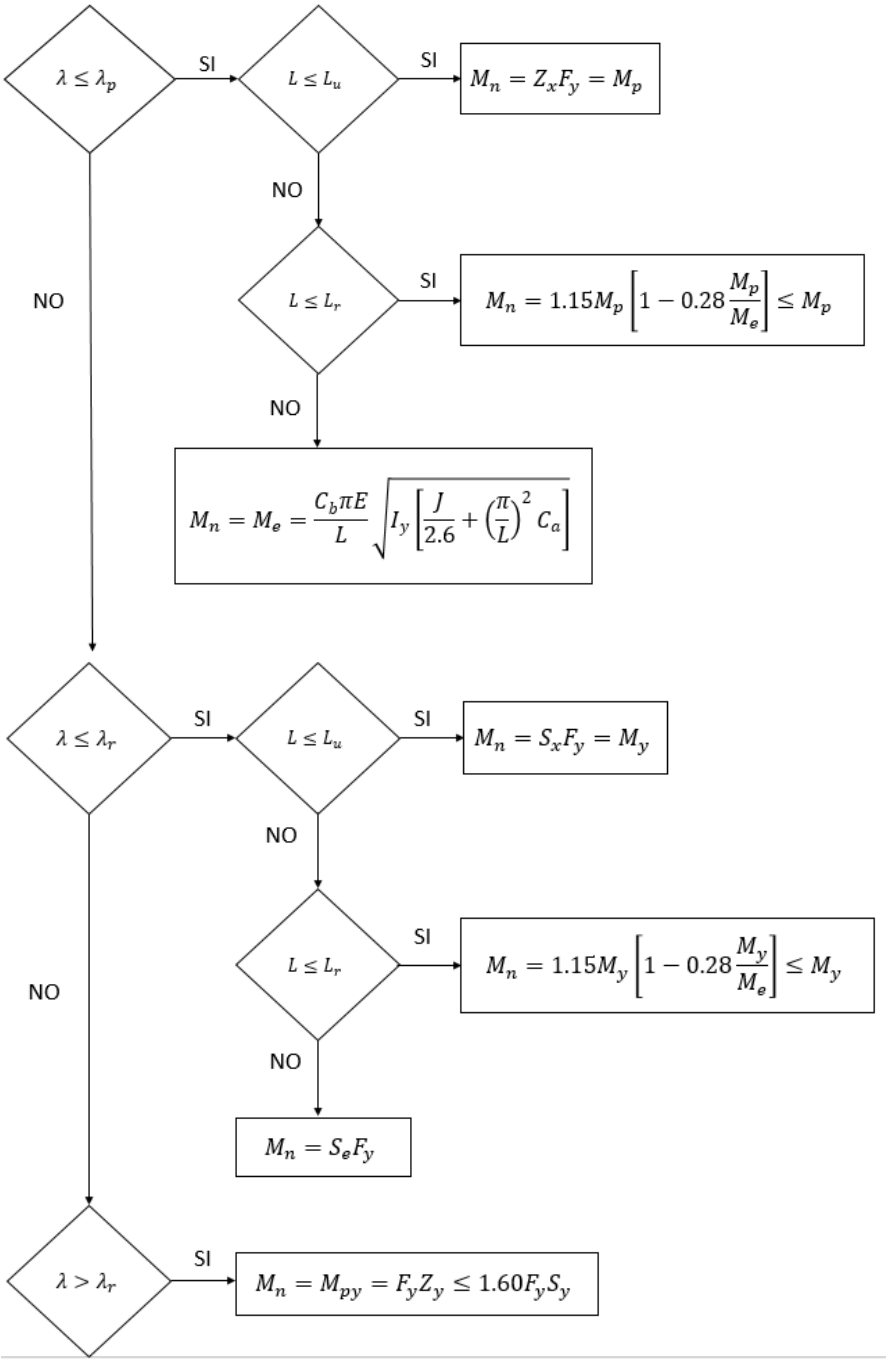



*Diagrama 1. Cálculo del momento nominal*

| PARA *PLT* | PARA *PLP* |
|---|---|
| $L = Longitud\ de\ arriostramiento$ | $\lambda = \frac{b}{t_p}$ |
| $L_u = \frac{\sqrt{2\pi}}{X_u}\sqrt{\frac{EC_a}{GJ}}\sqrt{1+\sqrt{1+{X_u}^2}}$ | $\lambda_p = 0.38\sqrt{\frac{E}{F_y}}$ |
| $L_r = \frac{\sqrt{2\pi}}{X_r}\sqrt{\frac{EC_a}{GJ}}\sqrt{1+\sqrt{1+{X_r}^2}}$ | $\lambda_r = 1.00\sqrt{\frac{E}{F_y}}$ |

Donde:

$b\ y\ t_p = ancho\ y\ espesor\ del\ patín\ respectivamente$

$X_u = 4.293\frac{Z_x F_y}{C_b GJ}\sqrt{\frac{C_a}{I_y}} = 3.22X_r$

$X_r = \frac{4}{3}\frac{Z_x F_y}{C_b GJ}\sqrt{\frac{C_a}{I_y}}$

$G = módulo\ de\ elasticidad\ al\ esfuerzo\ cortante\ del\ acero\ (77200\ MPa, 784000\ kg/cm^2)$

$J = constante\ de\ torsión\ de\ Saint\ Venant$

$Ca = constante\ de\ torsión\ por\ alabeo$

$M_e = \frac{C_b \pi E}{L}\sqrt{I_y\left[\frac{J}{2.6}+\left(\frac{\pi}{L}\right)^2 C_a\right]}$

$S_e = Módulo\ de\ sección\ elástico\ efectivo\ del\ elemento$

El módulo de sección elástico efectivo, se calcula con el ancho efectivo del patín comprimido en vez del ancho total.

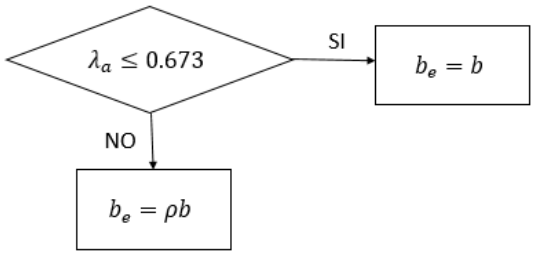



*Diagrama 2. Cálculo del ancho efectivo*

Donde:

$$\lambda_a = \frac{1.052}{\sqrt{k}}\left(\frac{b}{t}\right)\sqrt{\frac{f}{E}}$$

$$\rho = (1 - \frac{0.22}{\lambda_a})/\lambda_a$$

$b = ancho\ total\ del\ elemento\ plano$

$t = grueso\ del\ elemento\ plano$

$k = coeficiente\ de\ pandeo\ de\ placas\ igual\ a\ 4.0\ para\ elementos$ atiesados $soportados\ por\ un\ alma\ en\ cada\ borde\ longitudinal, en\ elementos\ planos\ no\ atiesados,$ $patines, comprimidos\ uniformemente\ \ k = 0.43$

Para placas que formen parte de miembros en compresión $f$ se toma igual al esfuerzo nominal en compresión $F_n$ de acuerdo a la sección 5.2 de las Normas Técnicas Complementarias (NTC-2017).

**Determinación del Momento Flexionante de Diseño**

El campo de tensión diagonal se origina cuando el alma se pandea y se comienzan a desbalancear los esfuerzos respecto al eje neutro como se muestra en la Figura. 3, lo que genera un momento mayor que es soportado por los atiesadores.

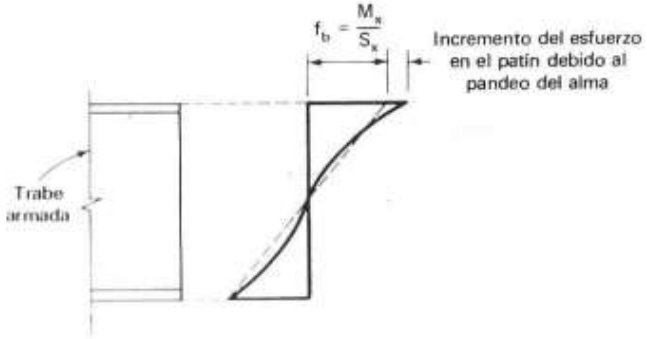



*Figura. 3. Distribución del esfuerzo respecto al eje neutro después del pandeo del alma*

Para diseñar trabes armadas que trabajen utilizando la resistencia adicional que se genera cuando se activa el campo de tensión diagonal, se requiere cumplir con las siguientes especificaciones del Reglamento de la Ciudad de México:

Cuando la razón altura/espesor del alma

$$\frac{h}{t} > 5.70\sqrt{\frac{E}{F_y}} \tag{12}$$

*El valor definido en la tabla 3.2.2 del Reglamento de la ciudad de México

La capacidad de diseño es $F_r M_n$ donde $F_r = 0.9$ y para una trabe armada I simétrica, no híbrida se calcula el Momento nominal de acuerdo con el

Diagrama 1. Cálculo del momento nominal.

Una vez que se determina el momento nominal, de acuerdo al Reglamento de la Ciudad de México, este debe multiplicarse por un factor de reducción que toma en cuenta la redistribución del esfuerzo del alma pandeada en el patín de compresión, el cual se define como:

$$1 - \frac{a_r}{1200 + 300a_r}\left(\frac{h}{t_a} - 5.60\sqrt{\frac{E}{F_y}}\right) \leq 1 \tag{13}$$

En donde:

$a_r =$ cociente de las áreas del alma y del patín comprimido $(a_r \leq 10)$

Otra consideración que debe tomarse en cuenta de acuerdo a la sección 6.13.1.1 del reglamento, es la reducción de la resistencia de miembros con agujeros en el patín de tensión, la cual nos indica que la resistencia en flexión $M_n$, debe quedar restringida por el estado límite de ruptura del patín en tensión, por consiguiente, se realiza la revisión que se define en el Diagrama 3. El diagrama muestra el valor límite que debe tomarse del momento nominal en la ubicación de las perforaciones del patín.

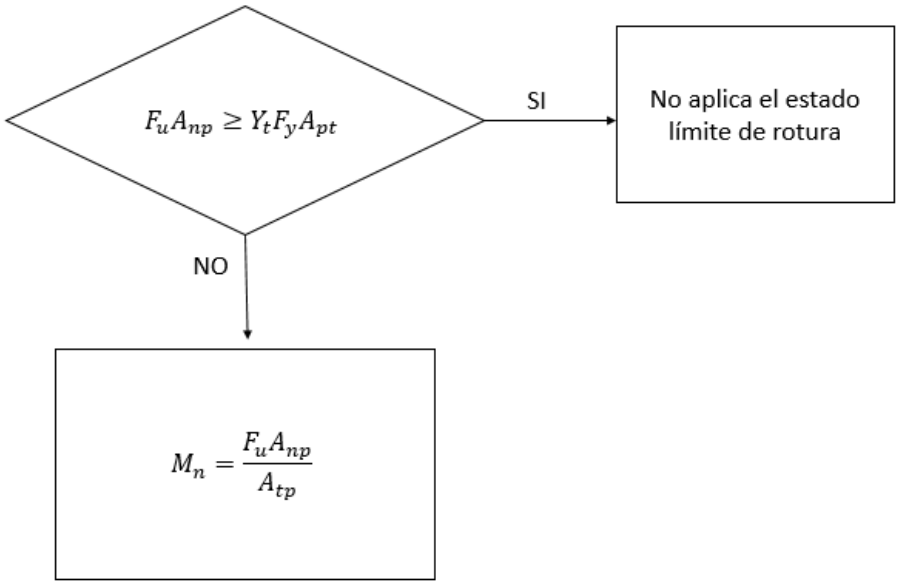



*Diagrama 3. Revisión del estado límite de rotura en tensión*

Donde:

$A_{pt} = área\ total\ del\ patín\ en\ tensión.$

$A_{np} = área\ neta\ del\ patín\ en\ tensión.$

$Y_t = 1.0\ para\ \frac{F_y}{F_u} \leq 0.8$

$Y_t = 1.1\ para\ \frac{F_y}{F_u} \geq 0.8$

$A_{pt}\ y\ A_{np}$ Se calculan de acuerdo a la sección 3.1 del reglamento de la Ciudad de México.

Una vez calculado el momento nominal con la sección propuesta se revisa este valor con respecto del valor estimado en el proceso de diseño.

## 3. REVISIÓN DE LA RESISTENCIA A CORTANTE

Teniendo presentes las consideraciones antes descritas, el tamaño de la placa del alma se determina como función de la fuerza cortante última $(V_u)$ máxima a que esté sujeta la viga, la cual debe ser afectada por los factores de amplificación de carga adecuados a cada combinación de acciones externas, posteriormente se estima el cortante resistente de la sección propuesta $(V_R)$, ecuación (14), el cual también debe ser afectado adecuadamente por los factores de reducción de resistencia especificados en el reglamento de construcciones. El desarrollo de los pasos

descritos permite determinar si la placa propuesta como alma de la trabe armada es adecuada para resistir las acciones a las que se espera estén sometida a lo largo de su vida útil, o si es necesario que se utilicen soportes de apoyo como atiesadores para incrementar la resistencia de la trabe armada propuesta.

$$V_R = F_R V_n \tag{14}$$

$F_R$ $Factor\ de\ resistencia, igual\ a\ 0.9$ .

$V_n$ $la\ resistencia\ nominal.$

Debe revisarse que se cumpla la condición:

$$V_R \geq V_u$$

Y de acuerdo con el Reglamento de la ciudad de México sección 6.13.7, el alma necesita refuerzo si no se cumple con la ecuación (15):

$$\frac{h}{t} \leq 2.45\sqrt{\frac{E}{F_y}} \tag{15}$$

En caso de que se cumplan estas condiciones el alma no necesitaría refuerzo, pero si la fuerza cortante que actúa en la trabe, fuera mayor que la resistente, entonces, se utilizaría la ecuación (16), donde el exceso debe cubrirse con placas adosadas en el alma o con atiesadores transversales y en diagonal.

$$V_n = 0.6 F_y A_a C_v \tag{16}$$

En el caso de que no se cumpla la relación expresada en la ecuación (17), es necesario reforzar el alma y utilizar atiesadores transversales.

$$\frac{h}{t} \leq 2.45\sqrt{\frac{E}{F_y}} \tag{17}$$

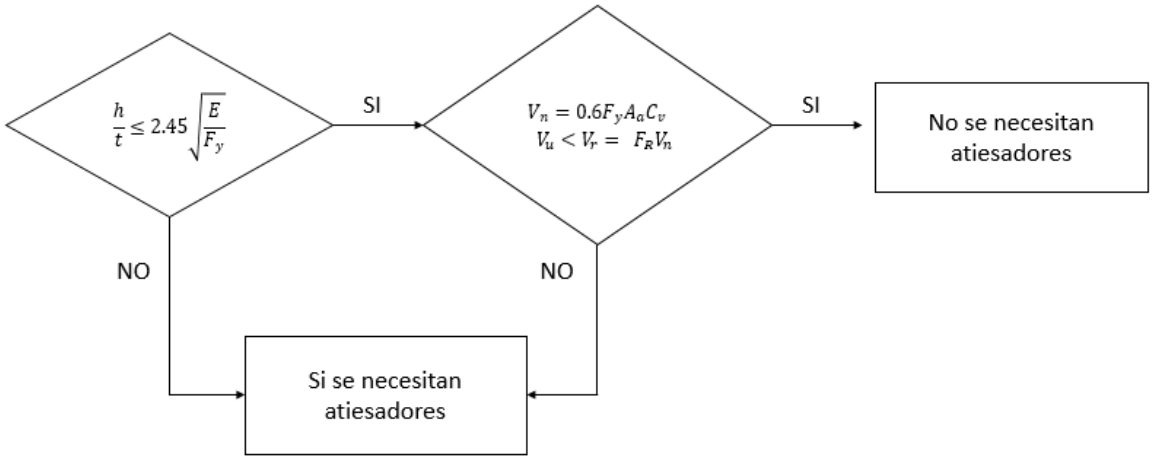



*Diagrama 4. Diagrama de flujo sobre las condiciones que se deben cumplir para el uso de atiesadores en el alma*

No se permite el empleo del campo de tensión diagonal en los casos siguientes

- En los tableros extremos de todos los miembros con atiesadores transversales
- Cuando $\frac{a}{h} > 3$ ó $\frac{a}{h} > \left(\frac{260}{\left(h/t_a\right)}\right)^2$
- Cuando $\frac{2A_a}{(A_{pc}+A_{pt})} > 2.5$
- Cuando $\frac{h}{b_{pc}}$ ó $\frac{h}{b_{pt}} > 6$

$A_{pc} = área\ del\ patín\ comprimido$

$A_{pt} = área\ del\ patín\ en\ tensión$

$b_{pc} = ancho\ del\ patín\ comprimido$

$b_{pt} = ancho\ del\ patín\ en\ tensión$

## Diseño de atiesadores

### i) Atiesadores intermedios

Como ya hemos visto antes, el proporcionar atiesadores intermedios incrementa la resistencia al cortante, la cual es igual a la suma de la resistencia de la placa pandeada del alma y de la componente vertical de la tensión diagonal que es inducida en el alma pandeada. Los atiesadores entonces tienen un doble papel, que es mejorar la resistencia al pandeo y actuar como puntales de compresión como si se tratara de una armadura.

Para saber si se requiere el uso de atiesadores se debe revisar el Diagrama 4.

Una vez revisado si es necesario su uso, se diseñan de la siguiente manera:

a. **Trazar un diagrama de la fuerza cortante máxima.**
b. **Localizar los primeros atiesadores a partir de cada extremo.**
c. **Localizar los atiesadores intermedios restantes.**
d. **Seleccionar el tamaño de los atiesadores intermedios.**
e. **Revisar la interacción entre la flexión y el cortante en el alma**.

**Trazar un diagrama de la fuerza cortante máxima.**

La fuerza cortante es la que rige la separación de los atiesadores, así como de la razón h/t. La capacidad factorizada por fuerza cortante es $\emptyset V_n$ donde $\emptyset = 0.9$ y $V_n$ es la resistencia al cortante nominal, que se define en toda la sección 7 del reglamento de la Ciudad de México de las Normas Técnicas Complementarias de Acero. En el Diagrama 5 y Diagrama 6 se encuentran las ecuaciones para el cálculo de la resistencia a cortante para trabes armadas de sección I.

El Diagrama 6 muestra en su ecuación inferior el cálculo de la resistencia al cortante posterior al pandeo o campo de tensión.

**Localizar los primeros atiesadores a partir de cada extremo.**

La acción de campo de tensión no puede utilizarse en los tableros extremos en trabes armadas, ni en los tableros de trabes híbridas o agujereadas. Por lo que regiría la resistencia a cortante de forma sencilla es decir $V_n = 0.6F_yA_a$.

**Localizar los atiesadores intermedios restantes.**

Para tableros interiores de la trabe armada, se permite la acción de campo de tensión si la trabe no es híbrida y si no está agujerada.

**Seleccionar el tamaño de los atiesadores intermedios.**

Los atiesadores intermedios tienen una doble función en el diseño de campo de tensión diagonal, pues deben ser suficientemente rígidos como para forzar un nodo

en la configuración deformada de pandeo por cortante, que es el requisito de momento de inercia y deben ser lo suficientemente resistentes para anclar la componente de la fuerza diagonal del campo de tensión en el alma, que es el requisito por la relación ancho/grueso de dichos atiesadores.

De acuerdo al Reglamento de la Ciudad de México los atiesadores que estén ubicados respecto a un eje ubicado en el centro del alma, ya sea colocados en pares, en la cara de contacto con el alma o cuando sean sencillos, deben tener un momento de inercia mayor que:

$$I_{at} = bt_a{}^3 j \tag{19}$$

$$j = \frac{2.5}{(a/h)^2} - 2 \geq 0.5 \tag{20}$$

Donde:

$a = distancia\ entre\ atiesadores \qquad b = la\ menor\ de\ las\ dimensiones\ a\ y\ h$

Para soportar el campo de tensión los atiesadores deben cumplir además con las limitaciones siguientes:

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{at} \leq 0.56\sqrt{\frac{E}{F_{yat}}} \tag{21}$$

$$I_{at} \geq I_{at1} + (I_{at2} - I_{at1})\left[\frac{V_r - V_{c1}}{V_{c2} - V_{c1}}\right] \tag{22}$$

Donde:

$\left(\frac{b}{t}\right)_{at} = la\ relación\ ancho/grueso\ de\ los\ atiesadores$

$F_{yat} = esfuerzo\ de\ fluencia\ mínimo\ especificado\ de\ los\ atiesadores$

$I_{at} = momento\ de\ inercia\ de\ \boldsymbol{un}\ atiesador\ transversal\ respecto\ a\ un\ eje\ en\ el\ centro\ del\ alma$

$I_{at1} = momento\ de\ inercia\ mínimo\ de\ los\ atiesadores\ transversales\ requerido\ para\ desarrollar\ la\ resistencia\ al\ pandeo\ por\ cortante\ del\ alma, definido\ en\ la\ ecuación\ 19$

$I_{at2} = momento\ de\ inercia\ mínimo\ de\ los\ atiesadores\ transversales\ requerido\ para$

$desarrollar\ la\ resistencia\ completa\ al\ pandeo\ por\ cortante\ del\ alma\ más\ la\ debida\ al\ campo\ de\ tensión.$

$$I_{at2} = \frac{h^4 \rho_{at}^{1.3}}{40}\left(\frac{F_{ya}}{E}\right)^{1.5} \quad (23)$$

$$\rho_{at} = \frac{F_{ya}}{F_{yat}} \geq 1.0 \quad (24)$$

$V_r = mayor\ de\ las\ resistencias\ en\ cortante\ requeridas\ en\ los\ paneles\ del\ alma$

$adyacentes\ al\ atiesador, correspondiente\ a\ las\ combinaciones\ de\ carga\ de\ diseño$

$V_{c1} = menor\ de\ las\ resistencias\ en\ cortante\ disponibles\ en\ los\ paneles\ del$

$alma\ adyacentes\ al\ atiesador;\ Vn\ se\ define\ en\ el\ diagrama\ 6.$

$V_{c2} = menor\ de\ las\ resistencias\ en\ cortante\ disponibles\ en\ los\ paneles\ del$

$alma\ adyacentes\ al\ atiesador\ considerando\ la\ acción\ del\ campo\ de\ tensión\ diagonal;$

$Vn\ se\ define\ en\ eldiagrama\ 6.$

$F_{yat} = resistencia\ de\ fluencia\ mínima\ especificada\ del\ material\ del\ alma$

Los atiesadores intermedios pueden recortarse antes de llegar al patín de tensión, siempre que no se requiera apoyo para transmitir una carga concentrada. Cerca del patín en tensión, las soldaduras por medio de las cuales los atiesadores intermedios se unen al alma, deberán terminarse no más cerca de cuatro veces el espesor del alma ni más lejos de seis veces, desde la punta más cercana de la soldadura del alma al patín. Cuando se utilicen atiesadores simples, deberán unirse al patín de compresión si este consiste en una placa rectangular, para resistir cualquier tendencia al levantamiento debido a la torsión del patín.

Si se emplean tornillos para unir los atiesadores al alma de la trabe su separación no excederá de 30 cm. Cuando la unión se hace con soldaduras de filete intermitentes, la distancia libre entre los cordones no debe ser mayor que 16 veces el espesor del alma, ni que 25 cm.

Los atiesadores diseñados para soportar la fuerza cortante deben conectarse al alma de manera que sean capaces de transmitir una fuerza por unidad de longitud, de cada atiesador o par de atiesadores, no menor que:

$$0.054 F_c h \sqrt{F_y^3 / E} \quad (25)$$

Donde:

$F_y = Esfuerzo\ de\ fluencia\ del\ alma$

$h = peralte\ del\ alma$

$F_c = Factor\ de\ carga\ que\ se\ utilice\ en\ el\ diseño$

La ecuación 25 arroja un resultado de kilogramos por centímetro lineal.

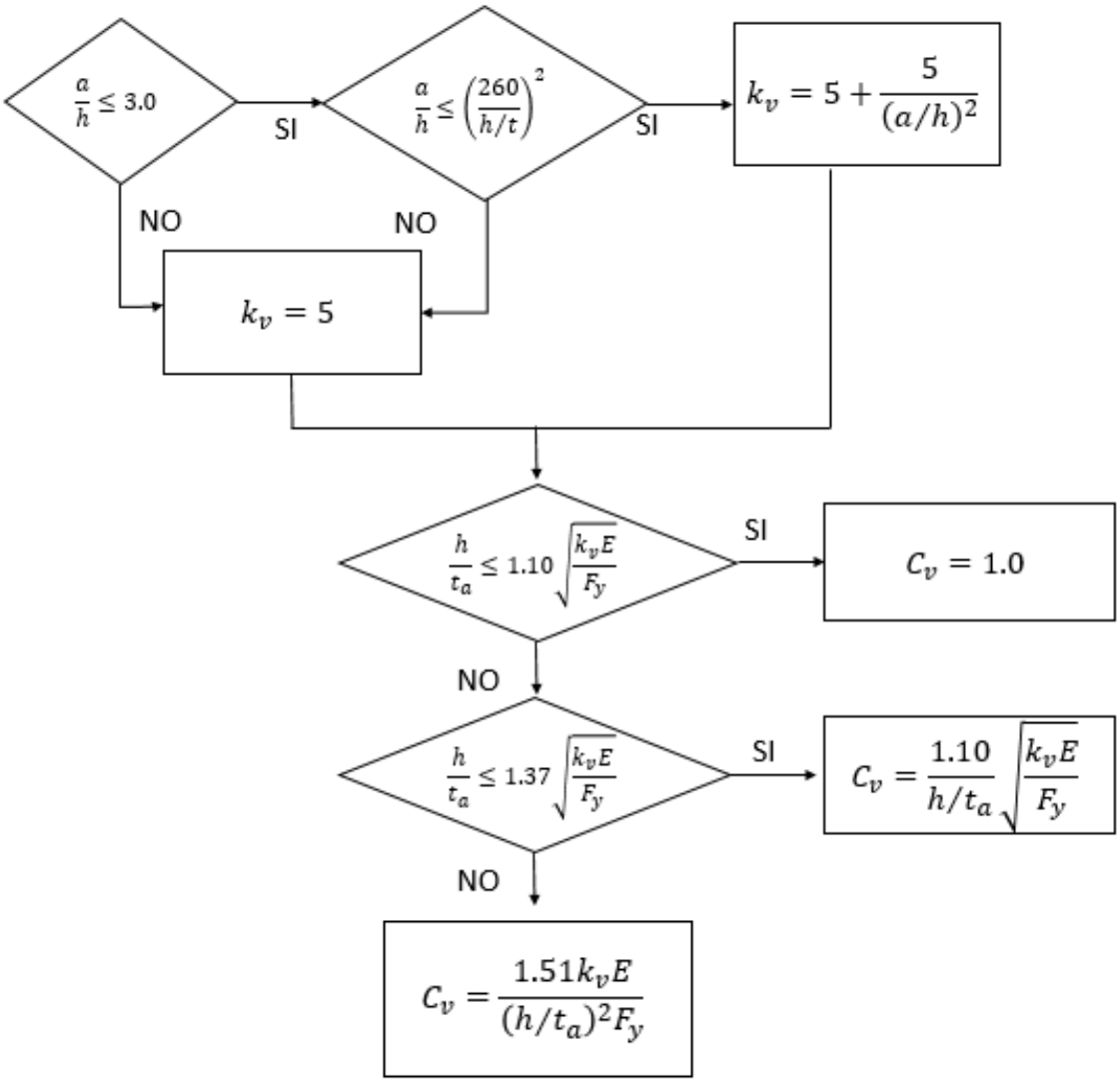



*Diagrama 5. Cálculo de Kv y Cv para el uso de atiesadores*

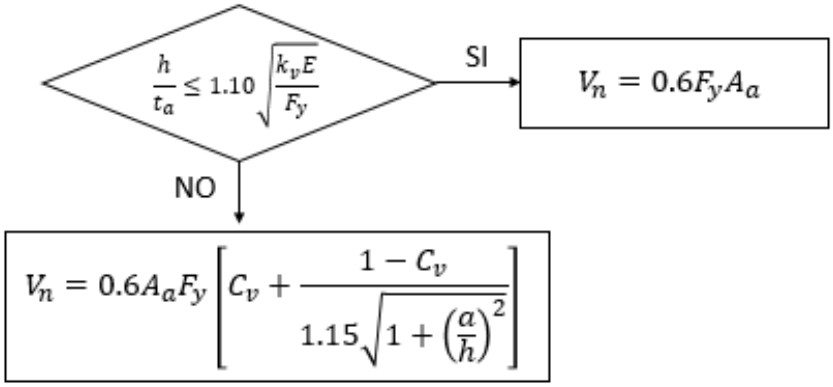



*Diagrama 6. Cálculo de la Resistencia a cortante con acción de campo de tensión.*

### ii) Atiesadores bajo cargas concentradas

Se colocarán pares de atiesadores en el alma de las trabes armada que tengan una sola alma en todos los puntos en que haya fuerzas concentradas, ya sean cargas o reacciones, excepto en los extremos de las trabes que estén conectadas a otros elementos de la estructura de manera que se evite la deformación de su sección transversal, y bajo cargas concentradas o reacciones si la fuerza de compresión en el alma excede la resistencia de diseño:

**Flujo plástico local del alma**

La región crítica en el caso de las trabes armadas corresponde a los bordes de las soldaduras de unión entre alma y patines.

La resistencia de diseño en la región crítica del alma de miembros de sección transversal H o I en los que actúan cargas concentradas que producen tensiones o compresiones en el alma es $F_R R_N$, donde $F_R$ se toma igual a 1.0 y $R_N$ se determina de la siguiente manera:

**a)** Cuando la fuerza que debe resistirse es una carga concentrada que produce tensión o compresión en el alma del elemento que la recibe, aplicada en un punto o a lo largo de una recta normal al alma de ese elemento, situada a una distancia del extremo del elemento no menor que su peralte.

**b)** Cuando la fuerza cumpla las condiciones anteriores sin embargo que este aplicada en el extremo del elemento que la recibe, o a una distancia menor que si peralte

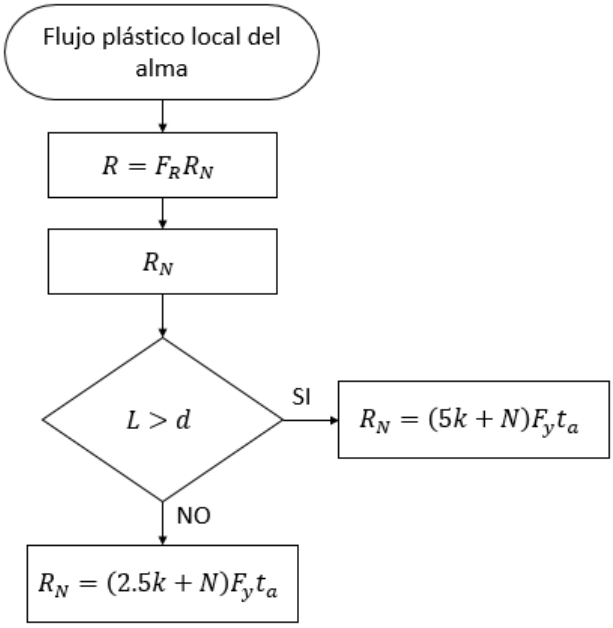



*Diagrama 7. Determinación de la resistencia de flujo plástico del alma*

Donde:

$F_y = Esfuerzo\ de\ fluencia\ especificado\ del\ acero\ del\ alma$

$N = Longitud\ del\ apoyo\ o\ grueso\ de\ la\ placa\ que\ aplica\ la\ fuerza\ lineal$

$k = Distancia\ de\ la\ cara\ exterior\ del\ patín\ a\ la\ región\ crítica\ del\ alma$

$t_a = Grueso\ del\ alma$

$d = h = Peralte\ del\ alma$

$L = Longitud\ a\ la\ cual\ está\ aplicada\ la\ carga$

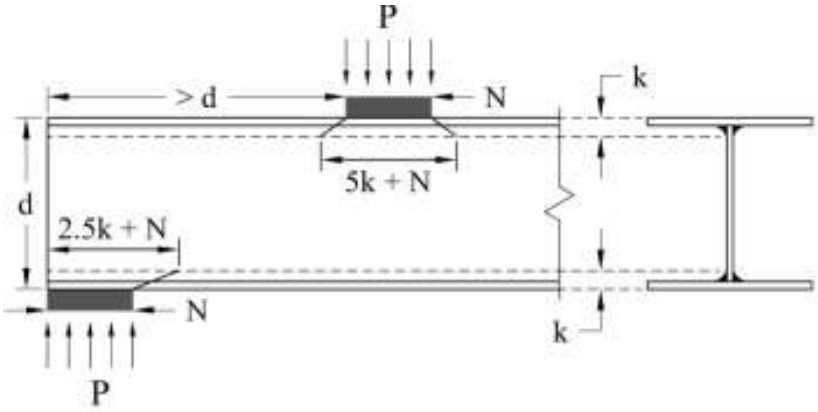



*Figura. 4. Longitud del tramo crítico (NTC-2017).*

Si la fuerza exterior de diseño excede la resistencia calculada en esta sección debe aumentarse la longitud de apoyo, repartir la carga en una zona más amplia, reforzar el alma con placas adosadas a ella o colocar atiesadores en pares.

**Abollamiento (crippling) local de almas**

La compresión producida en el alma por una carga concentrada aplicada a través de un patín, no debe ser mayor que $F_R R_N$, donde $F_R$ se tomará igual a 0.75, y $R_N$ se determina de la siguiente manera:

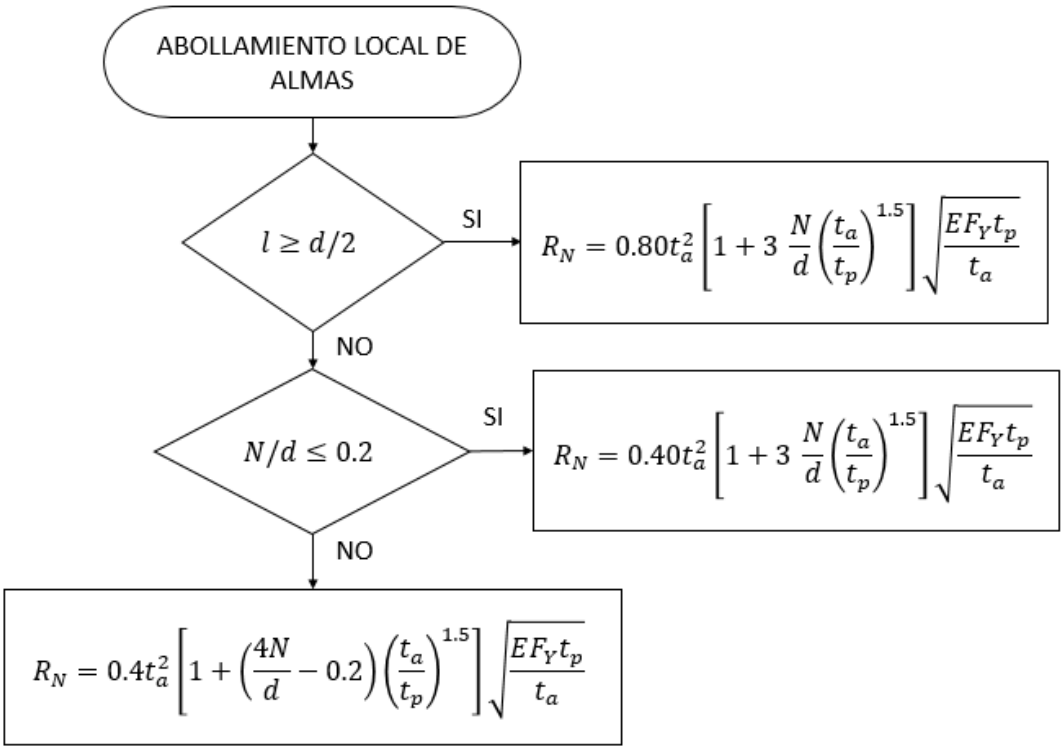



*Diagrama 8. Cálculo de la resistencia por Abollamiento.*

$l = distancia\ a\ la\ que\ está\ aplicada\ la\ fuerza\ del\ extremo\ del\ miembro$

$d = peralte\ total\ del\ miembro$

$t_p = grueso\ de\ sus\ patines$

$N = Longitud\ del\ apoyo\ o\ grueso\ de\ la\ placa\ que\ aplica\ la\ fuerza\ lineal$

$t_a = Grueso\ del\ alma$

Si no se cumplen con las condiciones anteriores, se colocarán un par de atiesadores o una placa adosada al alma. Los atiesadores estarán en contacto con el patín que recibe la carga, para resistirla por aplastamiento, o soldados a él; la soldadura que los conecta con el alma se dimensionará para transmitirle la fuerza en los atiesadores.

**Pandeo del alma con desplazamiento lateral**

Cuando el desplazamiento lateral relativo entre el patín cargado, en compresión, y el patín en tensión, no está restringido en el punto de aplicación de una carga concentrada, la resistencia del alma es $F_R R_N$ donde $F_R$ se toma igual a 0.85 y la resistencia nominal $R_N$ se determina de la siguiente manera:

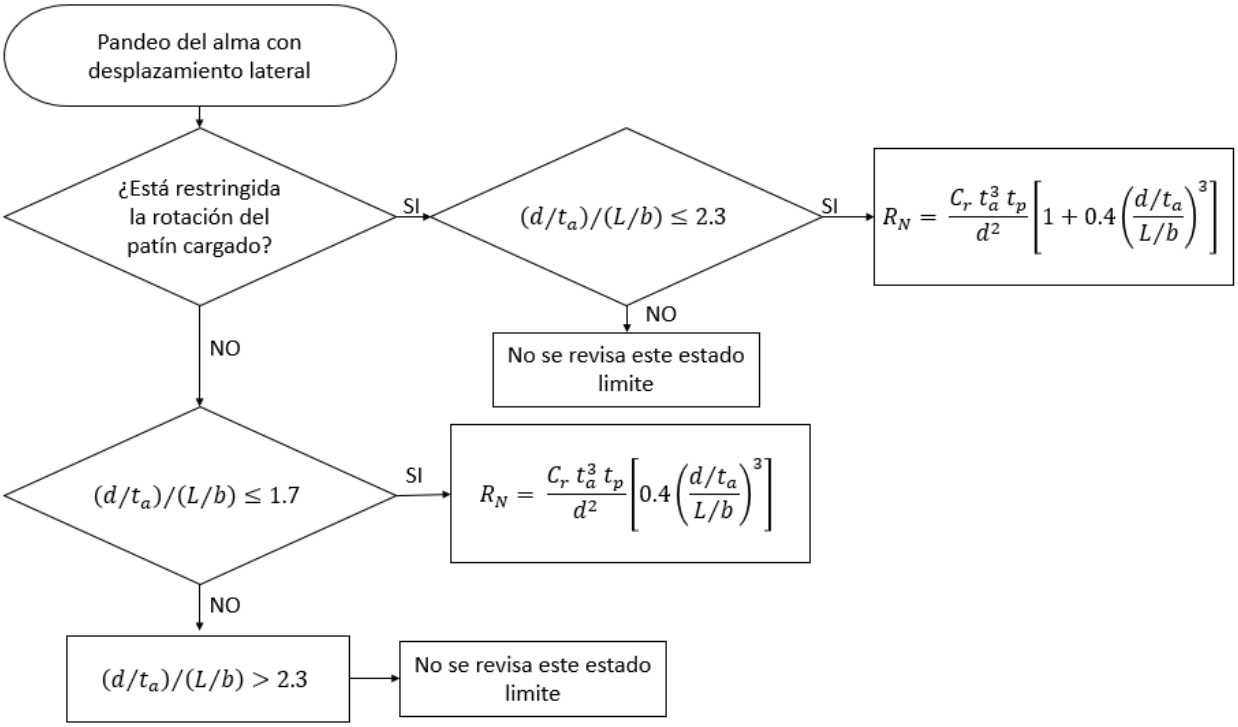



*Diagrama 9. Cálculo de la resistencia nominal para el evitar el pandeo en el alma*

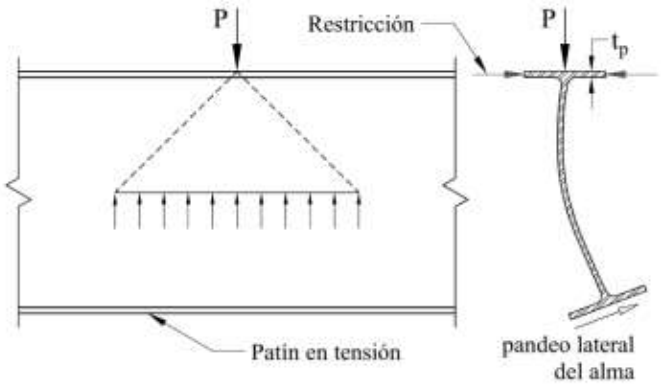



*Figura. 5. Pandeo del alma con desplazamiento lateral (tomada NTC-2017)*

Donde:

$L = longitud\ máxima\ no\ contraventeada\ lateralmente\ en\ la\ zona\ donde\ está\ aplicada\ la\ carga, medida\ a\ lo\ largo\ de\ cualquiera\ de\ los\ patines$

$b\ y\ t_p = ancho\ y\ grueso\ del\ patín$

$t_a = grueso\ del\ alma$

$d = peralte\ del\ alma\ entre\ las\ regiones\ críticas$

$C_r = Coeficiente\ para\ pandeo\ del\ alma$

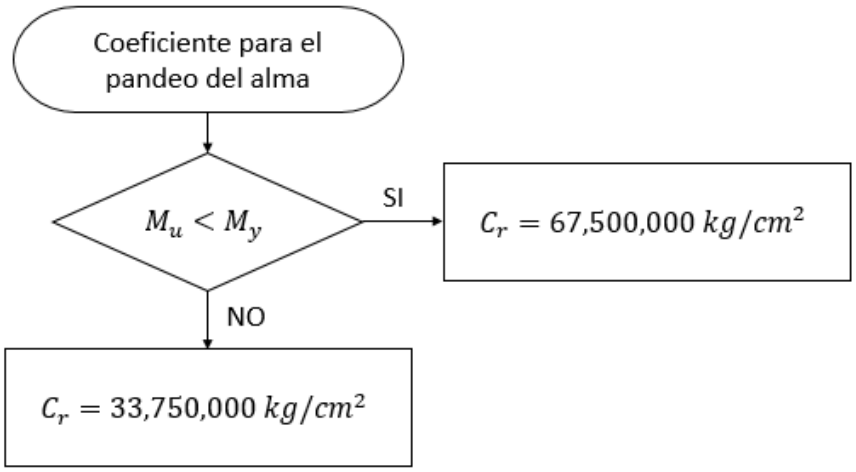



*Diagrama 10. Cálculo de Coeficiente para el pandeo del alma*

**Pandeo en compresión del alma**

La resistencia de diseño en compresión de porciones no atiesadas del alma de miembros en los que actúan cargas concentradas aplicadas en los dos patines es $F_R R_N$ donde $F_R$ se tomará igual a 0.90 y

$$R_N = \frac{24 t_a^3 \sqrt{E F_y}}{d} \qquad (26)$$

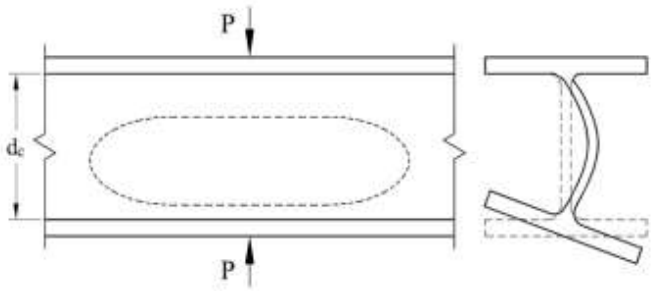



*Figura. 6. Falla del alma por pandeo (tomada de NTC-2017)*

“Los atiesadores deben ser simétricos respecto al alma y dar apoyo a los patines de la trabe hasta sus bordes exteriores, o lo más cerca de ellos que sea posible.

Al obtener la relación L/r para diseñar los atiesadores, el radio de giro, r, se toma alrededor del eje del alma de la trabe, y la longitud L se considera igual a tres cuartos de la longitud del atiesador.

Los bordes de los atiesadores en los que se apoya el patín de la trabe armada se dimensionan de manera que en el área de contacto no sobrepase la resistencia al aplastamiento, calculada multiplicando el área de contacto por $1.8F_yF_r$ donde $F_r$ se toma igual a 0.75. Además, debe colocarse el número adecuado de tornillos, o la cantidad necesaria de soldadura, para transmitir al alma de la trabe la totalidad de la reacción o de la carga concentrada.

Si se usan aceros diferentes en patín y atiesadores, la resistencia al aplastamiento se calcula con el esfuerzo de fluencia menor de los dos.

Los atiesadores pueden soldarse al patín en tensión o en compresión. En trabes sujetas a cargas dinámicas, deben revisarse las condiciones de fatiga en las uniones con el patín en tensión y con las porciones del alma en tensión. Pueden usarse soldaduras de filete transversales para unir los atiesadores con los patines.

En trabes atornilladas se colocarán las placas de relleno que sean necesarias para lograr un ajuste correcto con los ángulos de los patines y por ningún motivo se doblarán los atiesadores”. (NTC-2017).

## 4. REVISIÓN DE LA RESISTENCIA A LA INTERACCIÓN FLEXIÓN – CORTANTE

Una vez diseñada el alma para soportar el campo de tensión diagonal y por consiguiente son necesarios los atiesadores, se debe revisar que dicho diseño considere la resistencia de interacción entre la flexión y el cortante, de acuerdo con el Reglamento de la Ciudad de México en su sección 8.3 cuando $V_u$ y $M_u$ estén comprendidos entre los límites $0.6V_R \leq V_u \leq V_R$ y $0.75M_R \leq M_u \leq M_R$ debe cumplirse la siguiente condición:

$$0.727\frac{M_u}{M_R} + 0.455\frac{V_u}{V_R} \leq 1.0 \qquad (27)$$

Donde:

$M_R = resistencia\ de\ diseño\ en\ flexión$

$V_R = resistencia\ de\ diseño\ al\ cortante$

$M_u\ y\ V_u = Momento\ flexionante\ y\ fuerza\ cortante\ de\ diseño, respectivamente$

## 5. CASOS DE ESTUDIO

### CASO 1

La viga de gran peralte que se muestra en la figura soporta dos cargas concentradas (cada una consiste de 18,140.6 Kg de CV y 27,215.4 Kg de CM) y una carga muerta uniformemente repartida de 2,083.42 Kg/m y una carga viva uniforme de 2,232.23 Kg/m. El claro total de la viga es de 27.432 m. Se provee soporte lateral en los extremos de la viga y en la localización de cada carga soportada, el acero que se ha utilizado para todos los elementos es A913, $F_y$= 3515.

Solución

El primer paso es afectar las cargas por sus respectivos factores de carga.

| Datos | Carga total | unidades |
|---|---|---|
| P1= | 62.59542 | ton |
| P2= | 62.59542 | ton |
| W= | 6.056791 | T/cm |
| Rw= | 165.331567 | ton |

Una vez calculadas las fuerzas actuantes últimas, se procede a calcular los elementos mecánicos, como se muestran e la Figura E1a, de donde se obtiene:

| Elementos mecánicos | | unidades |
|---|---|---|
| VU= | 145,261.203 | kg |
| MU= | 114,126,000 | kg-cm |

Se asumen las siguientes propiedades del material, las cuales son importantes para el cálculo de las resistencias.

| Tipo de Acero | E (kg-cm$^2$) | Fy (kg/cm$^2$) |
|---|---|---|
| A913 | 2040000 | 3515 |

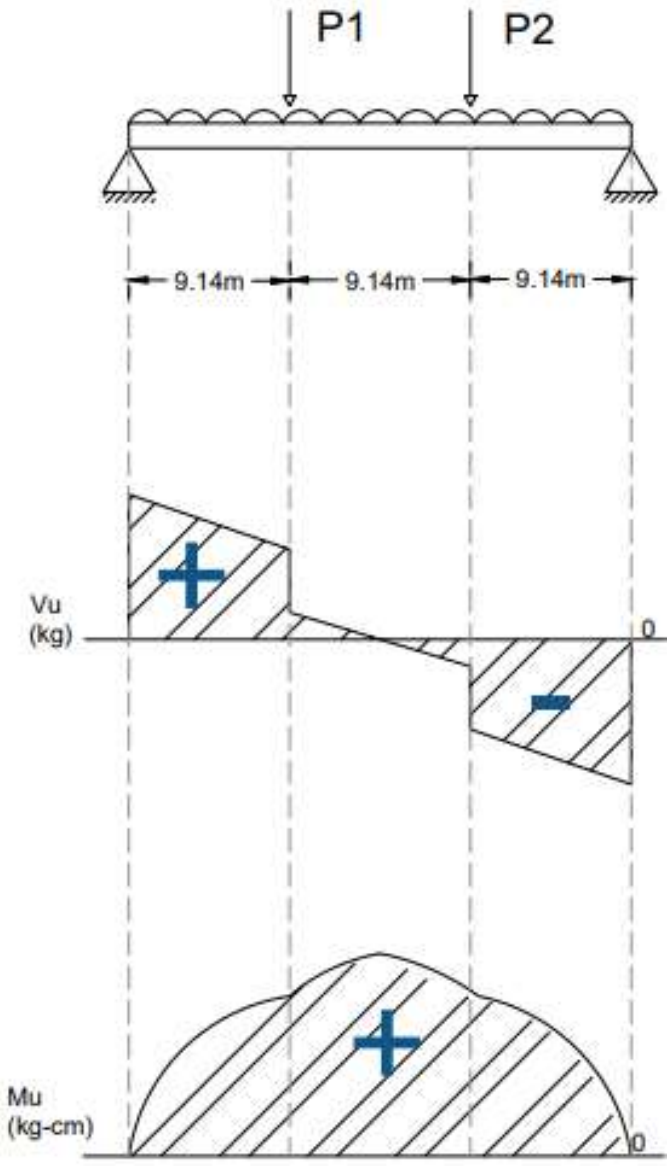
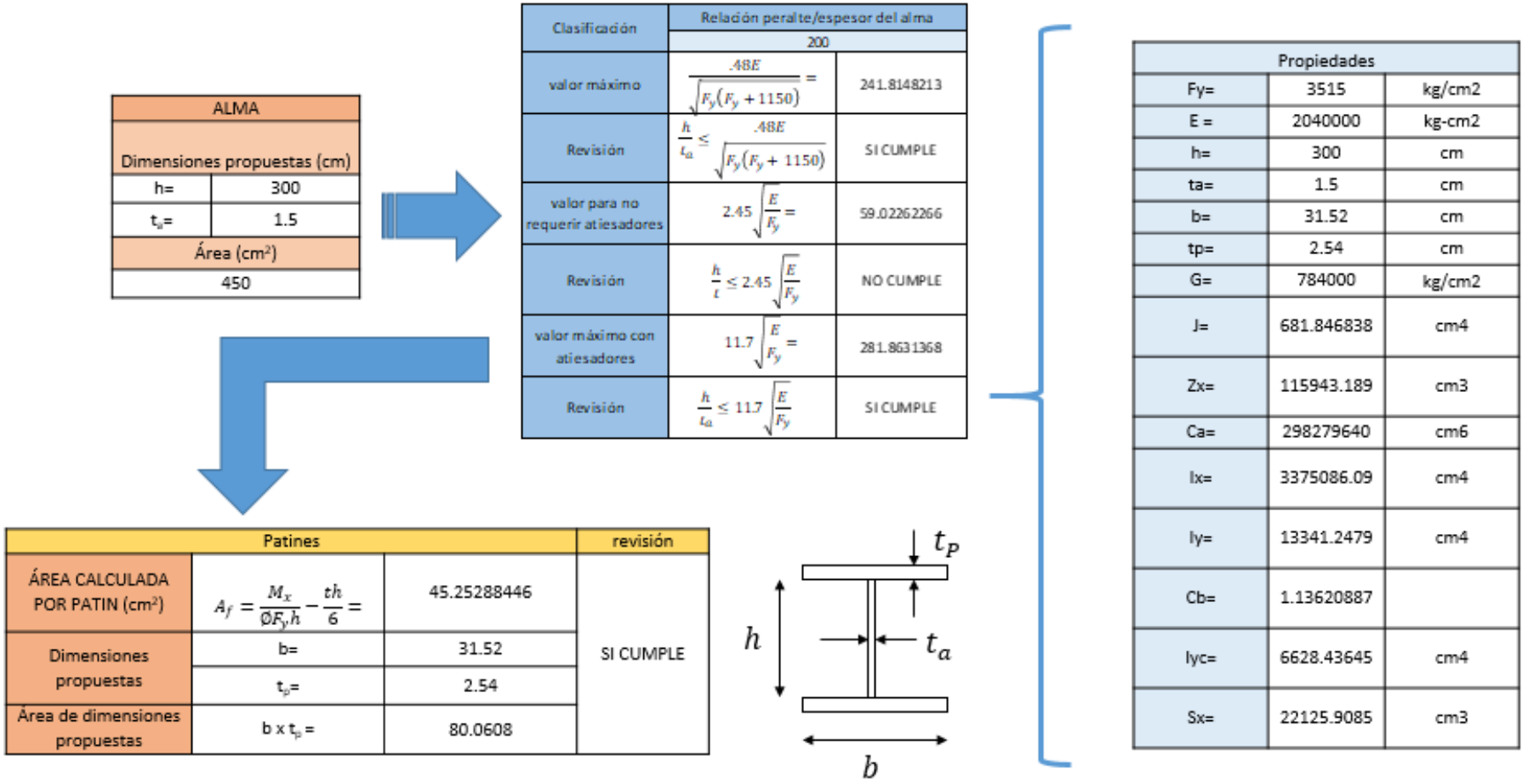



*Figura E 1. Elementos mecánicos*

## PRE-DISEÑO

Una vez calculadas las acciones, se definen las dimensiones de las placas que forman la trabe armada, tomado como base las recomendaciones reglamentarias, lo cual se describe en la Figura E2:



| ALMA | |
|---|---|
| Dimensiones propuestas (cm) | |
| h= | 300 |
| $t_a$= | 1.5 |
| Área ($cm^2$) | |
| 450 | |

| Clasificación | Relación peralte/espesor del alma | |
|---|---|---|
| | 200 | |
| valor máximo | $\frac{.48E}{\sqrt{F_y(F_y+1150)}}=$ | 241.8148213 |
| Revisión | $\frac{h}{t_a}\leq\frac{.48E}{\sqrt{F_y(F_y+1150)}}$ | SI CUMPLE |
| valor para no requerir atiesadores | $2.45\sqrt{\frac{E}{F_y}}=$ | 59.02262266 |
| Revisión | $\frac{h}{t}\leq 2.45\sqrt{\frac{E}{F_y}}$ | NO CUMPLE |
| valor máximo con atiesadores | $11.7\sqrt{\frac{E}{F_y}}=$ | 281.8631368 |
| Revisión | $\frac{h}{t_a}\leq 11.7\sqrt{\frac{E}{F_y}}$ | SI CUMPLE |

| Patines | | | revisión |
|---|---|---|---|
| ÁREA CALCULADA POR PATIN ($cm^2$) | $A_f=\frac{M_x}{\emptyset F_y h}-\frac{th}{6}=$ | 45.25288446 | SI CUMPLE |
| Dimensiones propuestas | b= | 31.52 | |
| | $t_p$= | 2.54 | |
| Área de dimensiones propuestas | b x $t_p$ = | 80.0608 | |

| Propiedades | | |
|---|---|---|
| Fy= | 3515 | kg/cm2 |
| E = | 2040000 | kg-cm2 |
| h= | 300 | cm |
| ta= | 1.5 | cm |
| b= | 31.52 | cm |
| tp= | 2.54 | cm |
| G= | 784000 | kg/cm2 |
| J= | 681.846838 | cm4 |
| Zx= | 115943.189 | cm3 |
| Ca= | 298279640 | cm6 |
| Ix= | 3375086.09 | cm4 |
| Iy= | 13341.2479 | cm4 |
| Cb= | 1.13620887 | |
| Iyc= | 6628.43645 | cm4 |
| Sx= | 22125.9085 | cm3 |

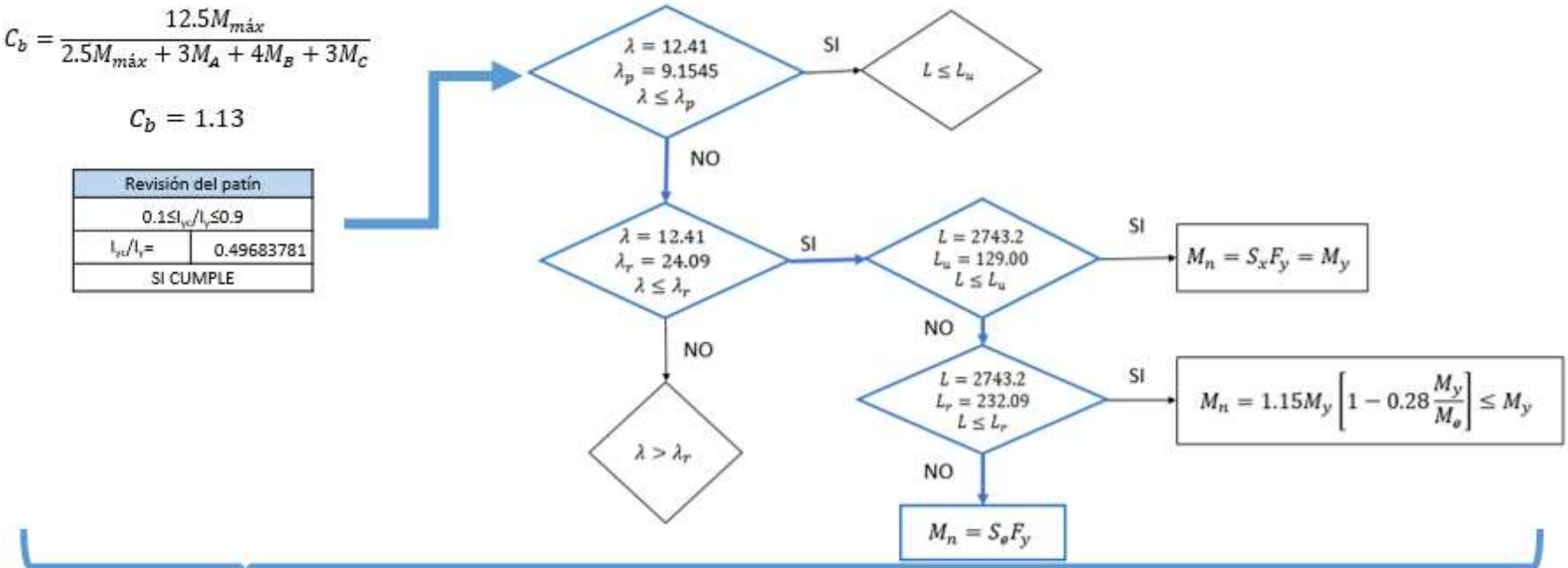
*Figura E 2. Dimensionamiento de trabe armada*

## REVISIÓN DE LA RESISTENCIA A FLEXIÓN

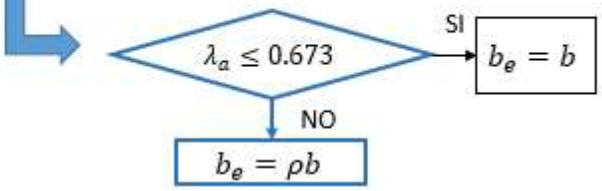
$$C_b = \frac{12.5M_{máx}}{2.5M_{máx} + 3M_A + 4M_B + 3M_C}$$

$$C_b = 1.13$$

| Revisión del patín | |
|---|---|
| $0.1 \le I_{yc}/I_y \le 0.9$ | |
| $I_{yc}/I_y =$ | 0.49683781 |
| SI CUMPLE | |




$$\lambda_a = \frac{1.052}{\sqrt{k}}\left(\frac{b}{t}\right)\sqrt{\frac{f}{E}} = \quad 0.796216008$$




$b_e =$ 28.6490

$$S_e = \frac{I_e}{y_{máx}} = 22125.85712$$

$\therefore$ $M_n = S_eF_y = 77772387.79$ kg–cm

Obtenido el momento nominal, se calcula el momento flexionante de diseño afectándolo por el factor de reducción de resistencia correspondiente a elementos trabajando en flexión:

$$M_r = F_r M_n$$

Sin embargo, el reglamento indica que debe considerar adicionalmente otro factor en caso de que el alma de la trabe sea esbelta, el cual se determina mediante la condición de la ecuación 12:

$$\frac{h}{t} > 5.70\sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

$$\therefore \frac{h}{t} = 200 > \ 5.70\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 137.3179$$

En este caso se cumple, así que el factor a considerar es el de la ecuación 13:

$$a_r = \frac{\text{Área alma}}{\text{Área patín comprimido}} = \quad 5.6207$$

$$R_{PG} = 1 - \frac{a_r}{1200 + 300a_r}\left(\frac{h}{t_a} - 5.60\sqrt{\frac{E}{F_y}}\right) = 0.8732$$

A continuación, calculamos el momento resiste:

$$M_r = F_r M_n R_{PG}$$
$$M_r = \ 61122500.83 \quad \text{Kg-cm}$$

Obtenemos $M_r = 61122500.83\ Kg - cm$, el cuál es la resistencia de diseño.

Revisamos

| | | |
|---|---|---|
| Mu= | 114,126,000 | kg-cm |
| Mr= | 61,122,500.83 | Kg-cm |

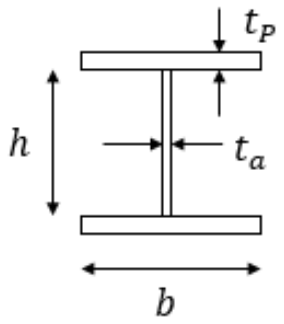
Como el momento resistente continúa siendo menor que el momento último, procedemos a hacer una segunda iteración.

## SEGUNDA ITERACIÓN

| ALMA | |
|---|---|
| Dimensiones propuestas (cm) | |
| h= | 287.02 |
| $t_a$= | 2.54 |
| Área ($cm^2$) | |
| 729.0308 | |

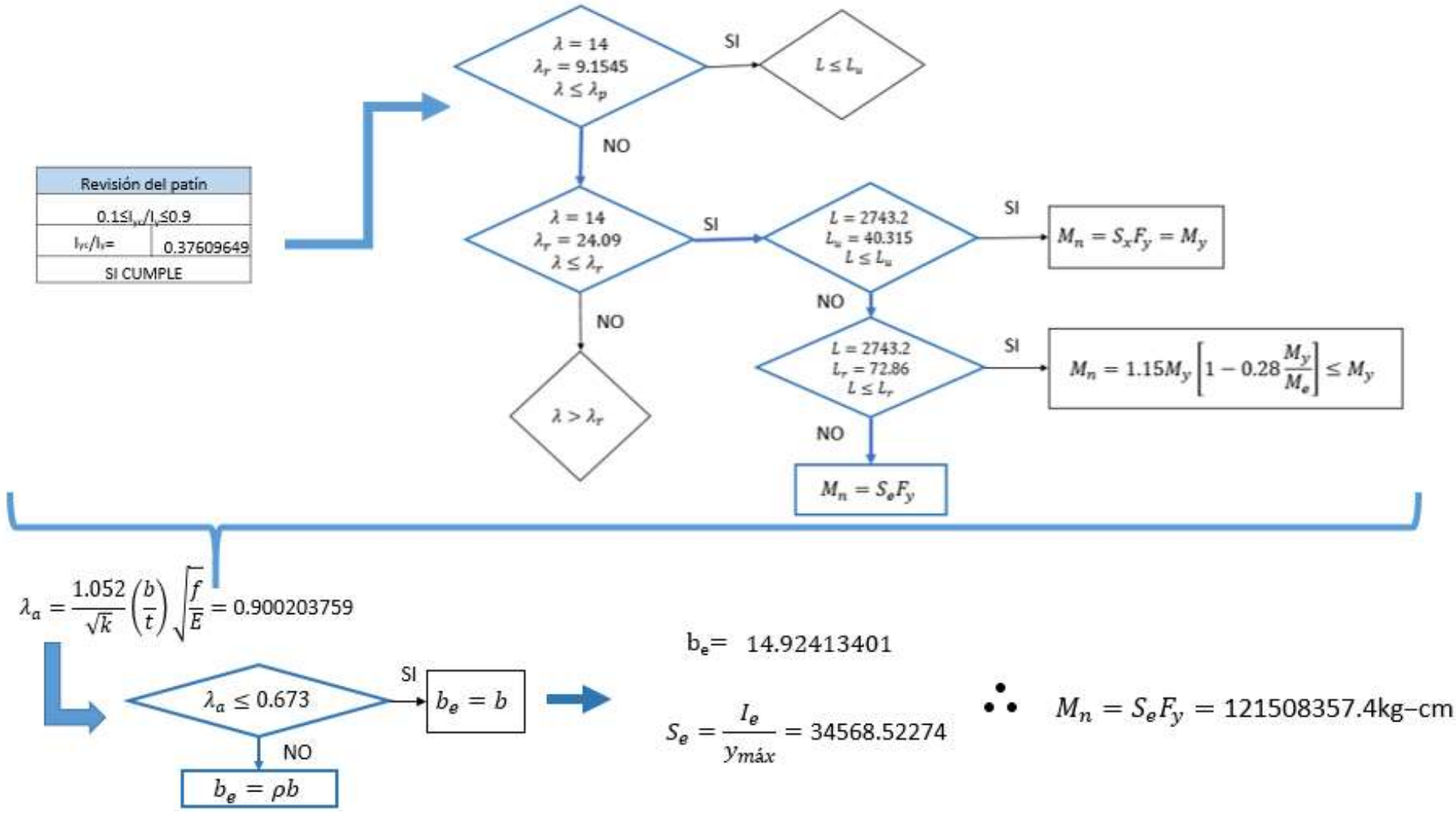
| Clasificación | Relación peralte/espesor del alma | |
|---|---|---|
| | 113 | |
| valor máximo | $\frac{.48E}{\sqrt{F_y(F_y+1150)}}=$ | 241.8148213 |
| Revisión | $\frac{h}{t_a}\leq\frac{.48E}{\sqrt{F_y(F_y+1150)}}$ | SI CUMPLE |
| valor para no requerir atiesadores | $2.45\sqrt{\frac{E}{F_y}}=$ | 59.02262266 |
| Revisión | $\frac{h}{t}\leq 2.45\sqrt{\frac{E}{F_y}}$ | NO CUMPLE |
| valor máximo con atiesadores | $11.7\sqrt{\frac{E}{F_y}}=$ | 281.8631368 |
| Revisión | $\frac{h}{t_a}\leq 11.7\sqrt{\frac{E}{F_y}}$ | SI CUMPLE |

| Patines | | | revisión |
|---|---|---|---|
| ÁREA CALCULADA POR PATIN ($cm^2$) | $A_f=\frac{M_x}{\emptyset F_y h}-\frac{th}{6}=$ | 4.185986934 | SI CUMPLE |
| Dimensiones propuestas | b= | 17.78 | |
| | $t_p$= | 1.27 | |
| Área de dimensiones propuestas | b x $t_p$= | 22.5806 | |




| Propiedades | | |
|---|---|---|
| Fy= | 3515 | kg/cm2 |
| E = | 2040000 | kg-cm2 |
| h= | 287.02 | cm |
| ta= | 2.54 | cm |
| b= | 17.78 | cm |
| tp= | 1.27 | cm |
| G= | 784000 | kg/cm2 |
| J= | 1592.0852 | cm4 |
| Zx= | 117642.732 | cm3 |
| Ca= | 24502594.3 | cm6 |
| Ix= | 5004831.7 | cm4 |
| Iy= | 1581.67942 | cm4 |
| Cb= | 1.13620887 | |
| Iyc= | 594.864079 | cm4 |
| Sx= | 34568.5295 | cm3 |

## REVISIÓN DE LA RESISTENCIA A FLEXIÓN



Se calcula el momento flexionante de diseño, con la fórmula:

$$M_r = F_r M_n$$

En caso del alma de nuestra trabe esbelta, se debe cumplir con la condición de la ecuación 12:

$$\frac{h}{t} > 5.70\sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

$$\frac{h}{t} = 113 < 5.70\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 137.317938$$

Como no cumple no es necesario utilizar el factor Rpg y el momento resistente se estima con:

$$M_r = F_r M_n$$

$$M_r = \text{ 109357521.7 Kg-cm}$$

Obtenemos $M_r = 109{,}357{,}521.7\ Kg - cm$, el cuál es la resistencia de diseño.

Revisamos

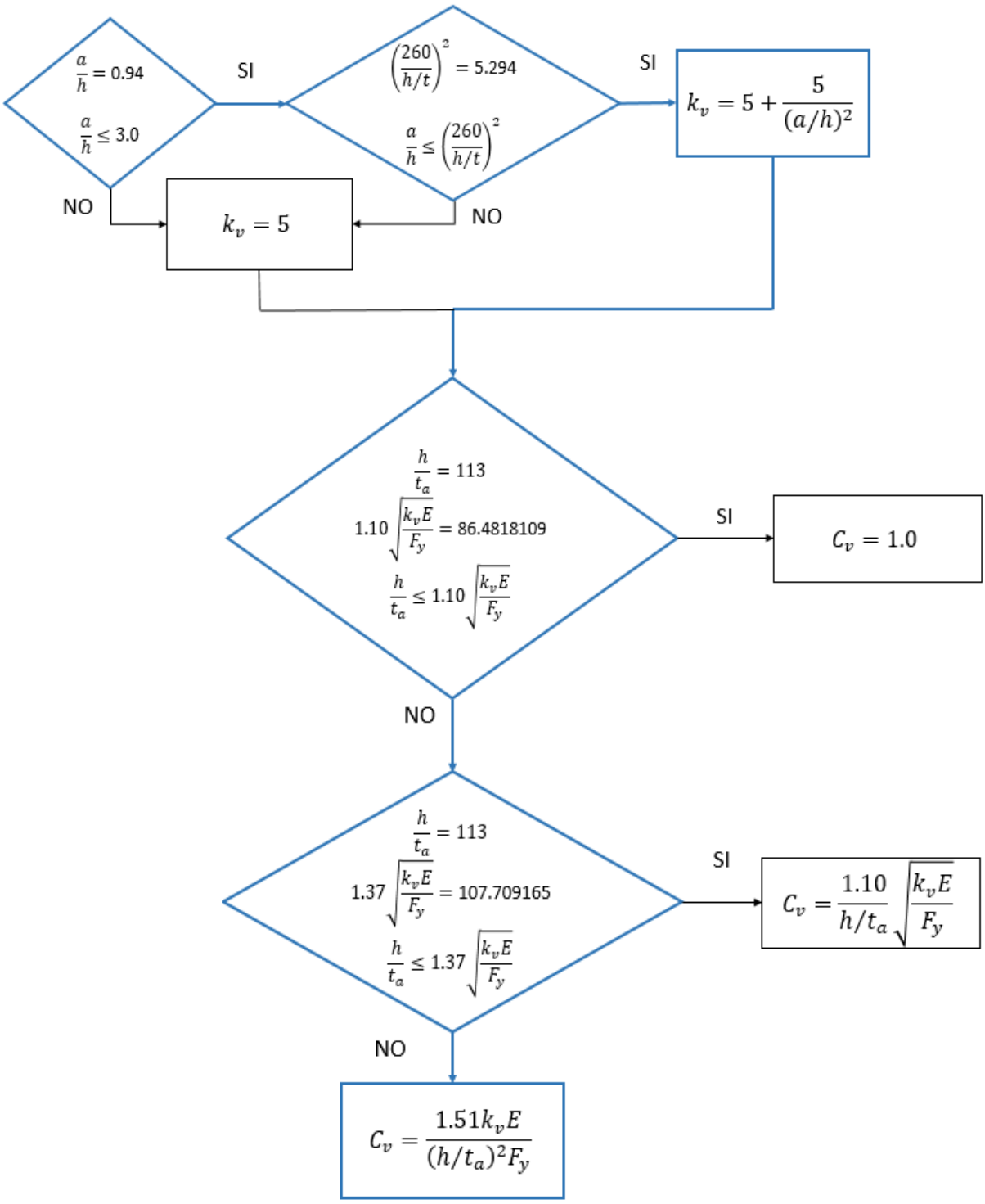
Mu= 114,126,000 kg-cm

Mr= 109,357,521.7 Kg-cm

$M_u > M_r \therefore se\ acepta\ el\ diseño\ ya\ que\ se\ encuentra\ dentro\ del\ 10\ \%\ de\ tolerancia$

## RESISTENCIA A CORTANTE

Cálculo de la resistencia a cortante. De acuerdo con lo establecido en el reglamento se determinó que el alma requiere de atiesadores, por lo tanto, el cálculo de la resistencia a cortante se determina de acuerdo con los Diagrama 5 y 6, esto con el objetivo de determinar si en este caso se puede considerar la contribución de la resistencia por acción del campo de tensión diagonal.




Por lo tanto, los valores de $K_v$ y $C_v$ son los siguientes:

$$K_v = 10.6502387 \; y \; C_v = 0.7309$$

Como $\frac{h}{t_a} > 1.10\sqrt{\frac{K_v E}{F_y}}$ se calcula la resistencia al cortante contemplando la acción de campo de tensión de acuerdo:

| Cortante con tensión diagonal | | |
|---|---|---|
| $V_n = 0.6 A_a F_y \left[ C_v + \frac{1 - C_v}{1.15\sqrt{1 + \left(\frac{a}{h}\right)^2}} \right] =$ | 1,385,857.41 | kg |

La resistencia al cortante se define como:

$$V_r = F_r V_n$$

$$V_R = 0.9 * 1{,}385{,}857.41\ kg$$

$$V_r = 1{,}247{,}271.67\ kg$$

$$V_u < V_r \therefore se\ acepta\ el\ diseño$$

Acorde con la resistencia obtenida, procedemos a hacer el cálculo de los atiesadores,

| Dimensiones propuestas de atiesadores | |
|---|---|
| b= | 4 |
| h= | 200 |
| t= | 4 |
| Propiedades | |
| E= | 2040000 |
| $F_y$= | 3515 |
| $\left(\frac{b}{t}\right)_{at} =$ | 1 |
| $0.56\sqrt{\frac{E}{F_{yat}}} =$ | 13.49088518 |

| Cálculo atiesadores para cortante | |
|---|---|
| $I_{at} = bt_a{}^3 j =$ | 3650.746594 |
| b= | 270 |
| ta= | 2.54 |
| $j = \frac{2.5}{\left(a/h\right)^2} - 2 =$ | 0.825119355 |
| $j \geq 0.5$ | cumple |

| Atiesadores para cortante con tensión diagonal | |
|---|---|
| $I_{at2} = \frac{h^4 \rho_{at}^{1.3}}{40}\left(\frac{F_{ya}}{E}\right)^{1.5} =$ | 2,860.900 |
| $\rho =$ | 1 |

| $I_{at1} + (I_{at2} - I_{at1})\left[\frac{V_r - V_{c1}}{V_{c2} - V_{c1}}\right]$ | |
|---|---|
| $V_{c1} =$ | 1,537,525.957 |
| $V_{c2} =$ | 1,385,857.406 |
| $V_r =$ | 1,247,271.666 |
| $I_{at} =$ | 2,666,666.667 |
| $I_{at1} + (I_{at2} - I_{at1})\left[\frac{V_r - V_{c1}}{V_{c2} - V_{c1}}\right] =$ | 2,139.185667 |

Ya que hemos comprobado que las dimensiones de los atiesadores y que además la separación propuesta cumple, se propone el arreglo de los atiesadores de acuerdo al diagrama de fuerza cortante a lo largo de la viga, finalmente, se verifica que las separaciones propuestas ofrezcan una resistencia al cortante mayor o igual que la resistencia de diseño.

Para los extremos:

| Cálculo de Kv (cm) | |
|---|---|
| $a =$ | 150.00 |
| $K_v =$ | 23.31 |
| $C_v =$ | 1.6 |
| $V_n =$ | 1,875,515.50 |
| $V_r =$ | 1,687,963.95 |

$$V_u < V_r \therefore se\ acepta\ el\ diseño$$

Para el centro de la viga:

| Cálculo de Kv (cm) | |
|---|---|
| $a =$ | 300.00 |
| $K_v =$ | 9.58 |
| $C_v =$ | 0.66 |
| $V_n =$ | 1,344,323.91 |
| $V_r =$ | 1,209,891.52 |

$$V_u < V_r \therefore se\ acepta\ el\ diseño$$

Por lo tanto, el diseño respecto a los atiesadores se muestra en la Figura E 3

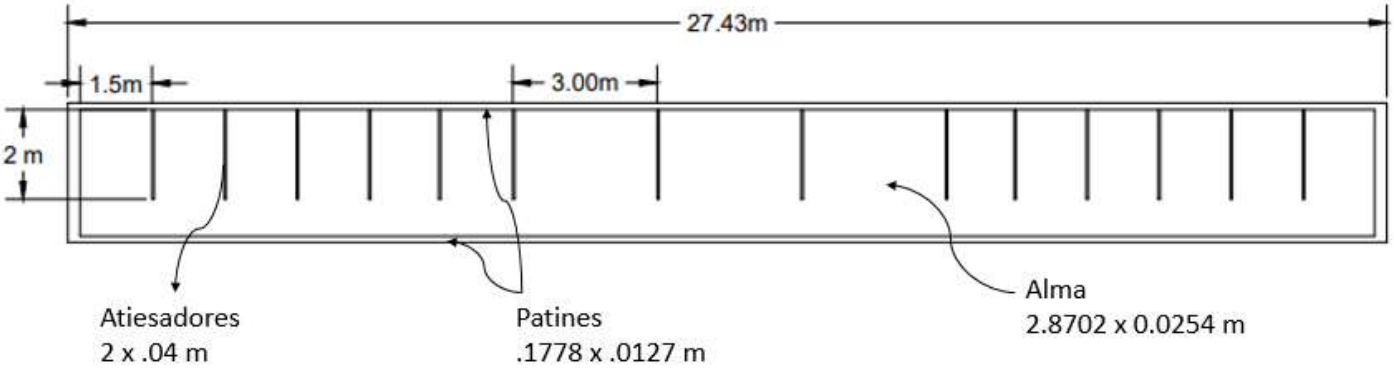


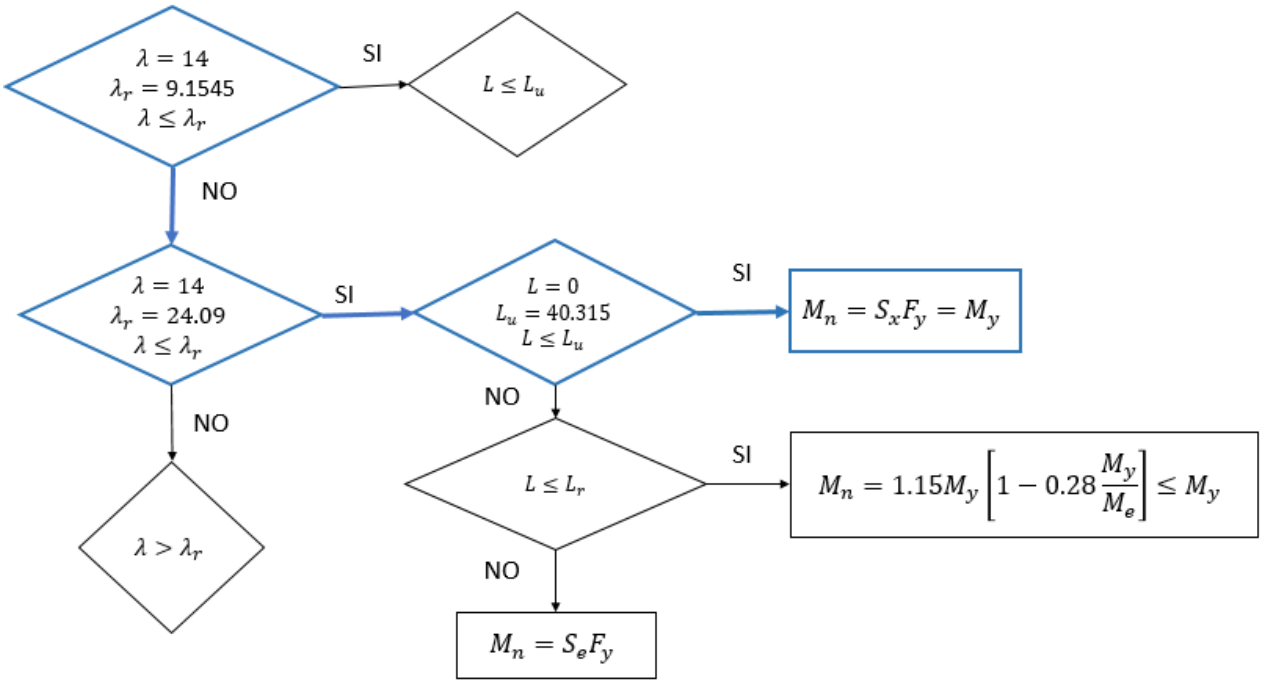

*Figura E 3. Acomodo de los atiesadores*

**CASO 2**

Utilizando los datos de la segunda iteración referente a el primer caso, pero ahora se propone una longitud no arriostrada igual que cero, puesto que se utilizará la viga de manera embebida. Entonces, en este caso el objetivo es calcular la resistencia a flexión y compararla contra el caso 1.

Solución.

Debido a que utilizaremos las mismas medidas de la trabe que en el ejercicio anterior procedemos solo a calcular la resistencia a Flexión:




$\therefore$

$$M_n = S_x F_y = 34568.5295 * 3515$$
$$M_n = 121{,}508{,}381.11\ kg - cm$$

Obtenemos $M_r = 109{,}357{,}543.0\ Kg - cm$, el cuál es la resistencia de diseño.

Comparando la resistencia obtenida en este ejercicio con la del ejercicio anterior

Ejercicio 1 $M_r = 109{,}357{,}521.0\ Kg - cm$

Ejercicio 2 $M_r = 109{,}357{,}543.0\ Kg - cm$

Se nota un aumento de 22 kg solamente ya que el módulo elástico (Sx) es muy parecido al módulo elástico equivalente (Se).

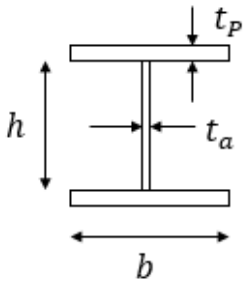
Sin embargo, si hacemos un ligero cambio en el espesor del patín, podemos ver el cambio en el incremento de la resistencia que con lleva el hecho de tener la viga embebida, ya que cambia a la zona plástica.

| ALMA | |
|---|---|
| Dimensiones propuestas (cm) | |
| h= | 287.02 |
| $t_a$= | 2.54 |
| Área ($cm^2$) | |
| 729.0308 | |

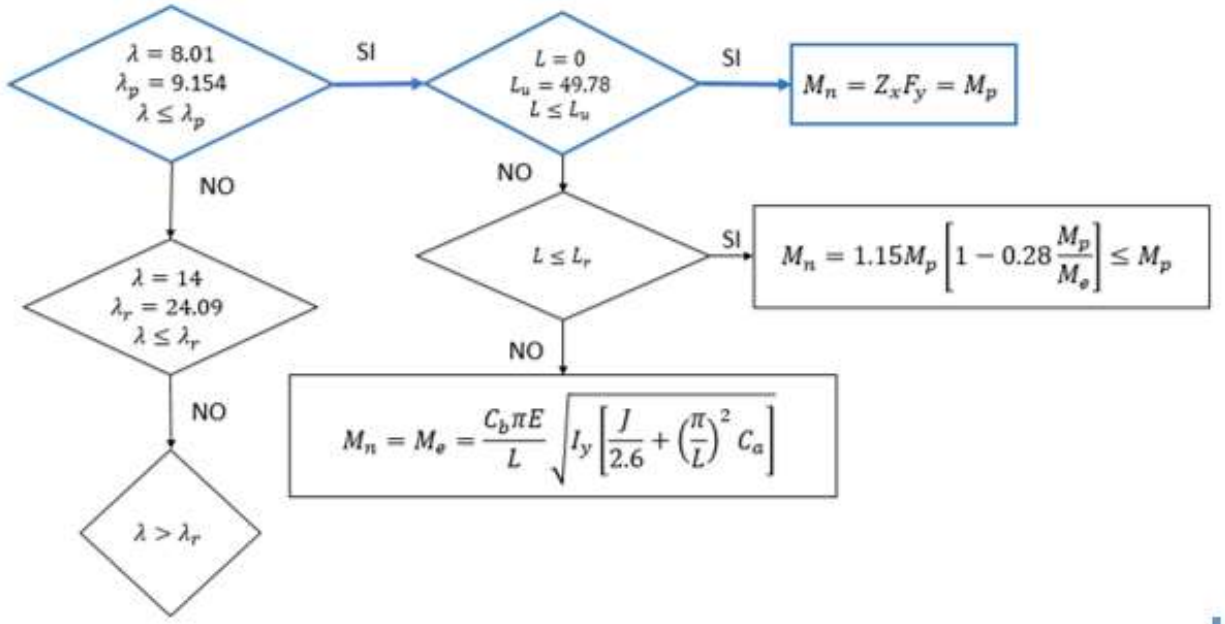
| Clasificación | Relación peralte/espesor del alma | |
|---|---|---|
| | 113 | |
| valor máximo | $\frac{.48E}{\sqrt{F_y(F_y+1150)}}=$ | 241.8148213 |
| Revisión | $\frac{h}{t_a}\leq\frac{.48E}{\sqrt{F_y(F_y+1150)}}$ | SI CUMPLE |
| valor para no requerir atiesadores | $2.45\sqrt{\frac{E}{F_y}}=$ | 59.02262266 |
| Revisión | $\frac{h}{t}\leq 2.45\sqrt{\frac{E}{F_y}}$ | NO CUMPLE |
| valor máximo con atiesadores | $11.7\sqrt{\frac{E}{F_y}}=$ | 281.8631368 |
| Revisión | $\frac{h}{t_a}\leq 11.7\sqrt{\frac{E}{F_y}}$ | SI CUMPLE |

| Propiedades | | |
|---|---|---|
| Fy= | 3,515.00 | $kg/cm^2$ |
| E = | 2,040,000.00 | $kg\text{-}cm^2$ |
| h= | 287.02 | cm |
| ta= | 2.54 | cm |
| b= | 17.78 | cm |
| tp= | 2.22 | cm |
| G= | 784,000.00 | $kg/cm^2$ |
| J= | 1,697.49 | $cm^4$ |
| Zx= | 127,456.74 | $cm^3$ |
| Ca= | 42,831,306.58 | $cm^6$ |
| Ix= | 5,004,858.05 | $cm^4$ |
| Iy= | 2,471.63 | $cm^4$ |
| Cb= | 1.14 | |
| Iyc= | 1,039.84 | $cm^4$ |
| Sx= | 34,343.36 | $cm^3$ |

| Patines | | | revisión |
|---|---|---|---|
| ÁREA CALCULADA POR PATIN ($cm^2$) | $A_f=\frac{M_x}{\emptyset F_y h}-\frac{th}{6}=$ | 4.185986934 | SI CUMPLE |
| Dimensiones propuestas | b= | 17.78 | |
| | $t_p$= | 2.22 | |
| Área de dimensiones propuestas | b x $t_p$ = | 39.4716 | |



| Revisión del patín | |
|---|---|
| $0.1 \leq I_{yc}/I_y \leq 0.9$ | |
| $I_{yc}/I_y =$ | 0.420710079 |
| SI CUMPLE | |




$$M_n = Z_x F_y = 127{,}456.74 * 3515$$

$$M_n = 448{,}010{,}445.59$$

$$M_r = 0.9 * 448{,}010{,}445.59$$

$$M_r = 403{,}209{,}401.03 \text{ kg} - \text{cm}$$

Comparando la resistencia obtenida en este ejercicio con la del ejercicio anterior

$$M_{r-Caso\,1} = 109{,}357{,}543.0\ Kg - cm$$

$$M_{r-Caso\,2} = 403{,}209{,}401.03\ Kg - cm$$

**CASO 3**

Diseñar una viga simplemente apoyada para cubrir un claro de 30.48 m de longitud, la carga muerta en la viga a soportar es de 1488.16 kg/m, en la cual no se incluye el peso propio de la viga y la carga viva es de 6,696.7 kg/m. El soporte lateral es provisto en los extremos de la viga a cada 6.1 m. Diseñar la viga para un peso mínimo.

Solución:

Considerando el peso propio de la viga de 446.45 kg/m y afectando las cargas por sus respectivos factores obtenemos:

| Datos | Carga total | unidades |
|---|---|---|
| W= | 12.560043 | T/m |
| Rw= | 382.830111 | ton |

De donde se estiman las cargas últimas con valores de:

| Elementos mecánicos | | unidades |
|---|---|---|
| Vu= | 191,415.06 | kg |
| Mu= | 145,858,272.15 | kg-cm |

Con acero tipo A572 y propiedades mecánicas iguales a:

| Tipo de Acero | E (kg-cm$^2$) | Fy (kg/cm$^2$) |
|---|---|---|
| A572 | 2,040,000 | 3,515 |

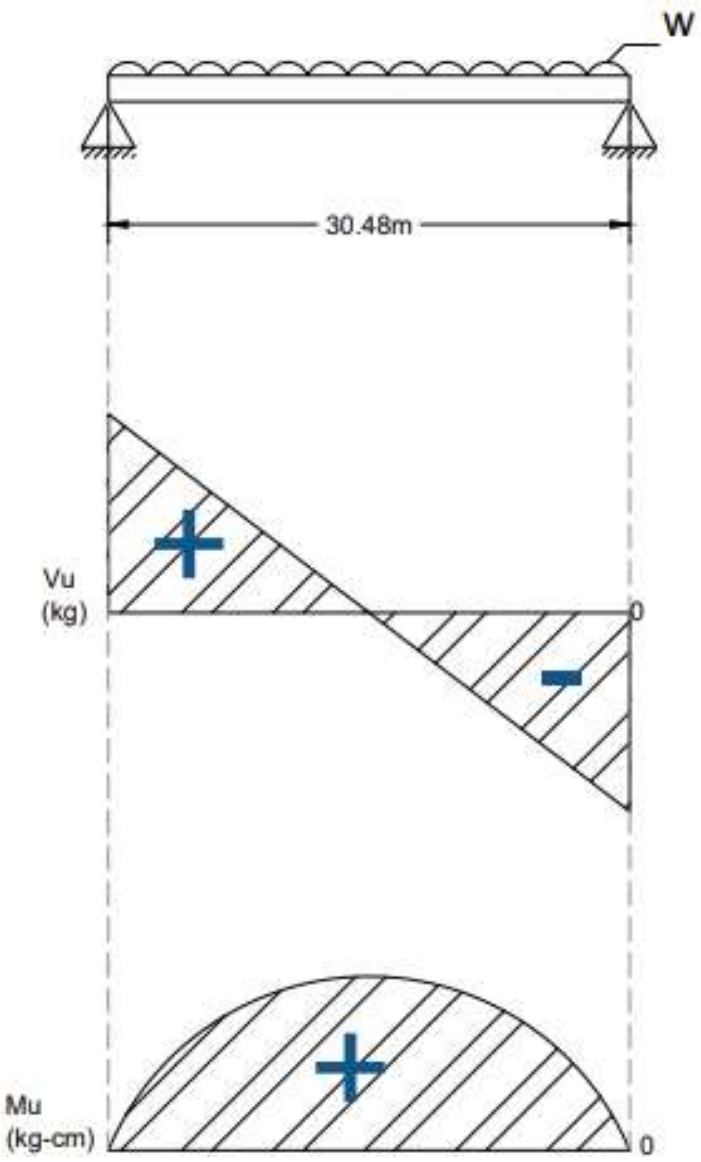



*Figura E 4 Elementos mecánicos.*

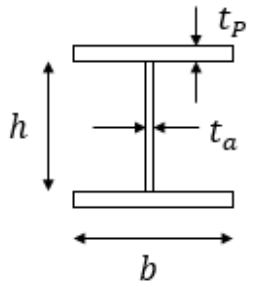
## PRE-DISEÑO

Una vez calculadas las acciones, se definen las dimensiones de las placas que forman la trabe armada, tomado como base las recomendaciones reglamentarias, lo cual se describe en la Figura E 5:

| ALMA | |
|---|---|
| Dimensiones propuestas (cm) | |
| h= | 342.9 |
| $t_a$= | 2.22 |
| Área ($cm^2$) | |
| 761.238 | |

| Clasificación | Relación peralte/espesor del alma | |
|---|---|---|
| | 154.4594595 | |
| valor máximo | $\frac{.48E}{\sqrt{F_y(F_y+1150)}}=$ | 241.8148213 |
| Revisión | $\frac{h}{t_a}\leq\frac{.48E}{\sqrt{F_y(F_y+1150)}}$ | SI CUMPLE |
| valor para no requerir atiesadores | $2.45\sqrt{\frac{E}{F_y}}=$ | 59.02262266 |
| Revisión | $\frac{h}{t}\leq 2.45\sqrt{\frac{E}{F_y}}$ | NO CUMPLE |
| valor máximo con atiesadores | $11.7\sqrt{\frac{E}{F_y}}=$ | 281.8631368 |
| Revisión | $\frac{h}{t_a}\leq 11.7\sqrt{\frac{E}{F_y}}$ | SI CUMPLE |

| Patines | | | revisión |
|---|---|---|---|
| ÁREA CALCULADA POR PATIN ($cm^2$) | $A_f=\frac{M_x}{\emptyset F_y h}-\frac{th}{6}=$ | 7.587815426 | SI CUMPLE |
| Dimensiones propuestas | b= | 17.72 | |
| | $t_p$= | 2.22 | |
| Área de dimensiones propuestas | b x $t_p$= | 39.3384 | |

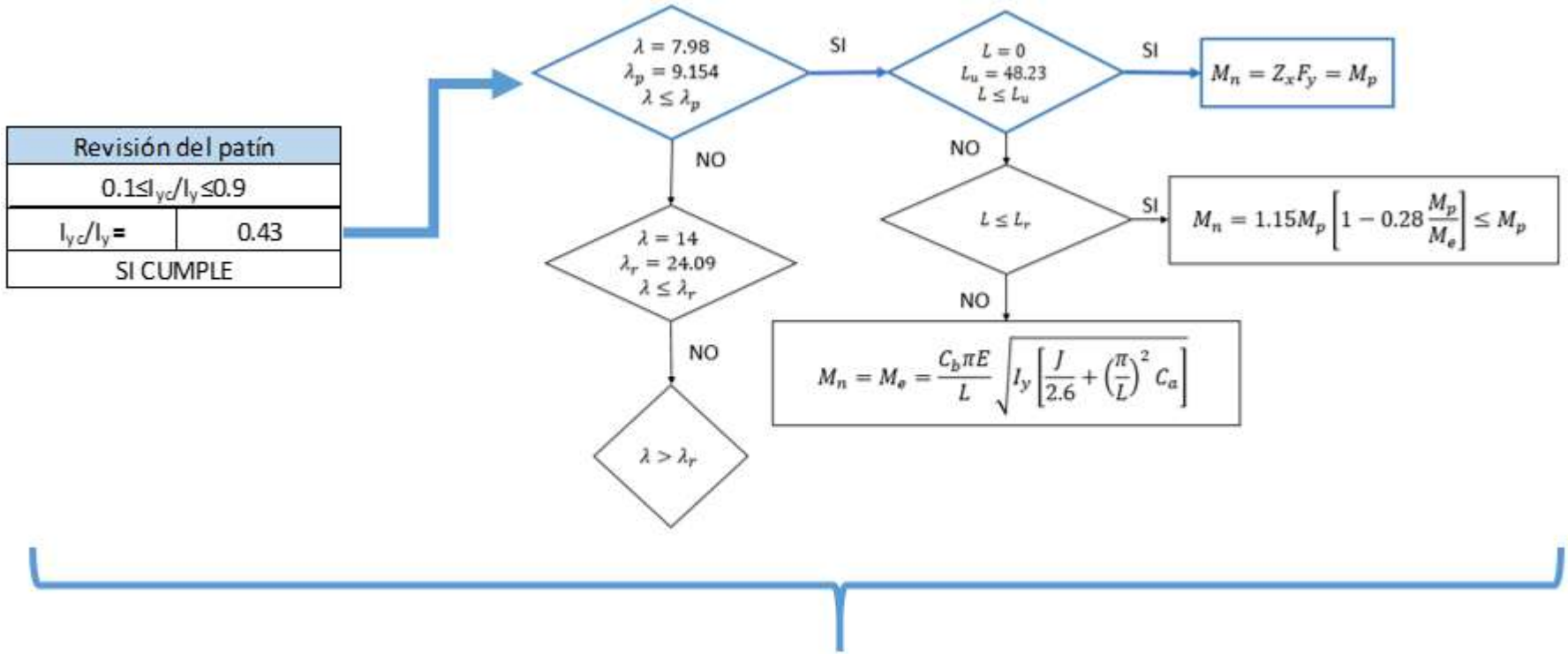



| Propiedades | | |
|---|---|---|
| Fy= | 3515 | $kg/cm^2$ |
| E = | 2040000 | $kg\text{-}cm^2$ |
| h= | 342.9 | cm |
| ta= | 2.22 | cm |
| b= | 17.72 | cm |
| tp= | 2.22 | cm |
| G= | 784000 | $kg/cm^2$ |
| J= | 1379.81203 | $cm^4$ |
| Zx= | 157667.192 | $cm^3$ |
| Ca= | 60515671.3 | $cm^6$ |
| Ix= | 7458921.99 | $cm^4$ |
| Iy= | 2371.33956 | $cm^4$ |
| Cb= | 1.1363636 | |
| Iyc= | 1029.34955 | $cm^4$ |
| Sx= | 42948.8224 | $cm^3$ |

*Figura E 5 Propiedades de la trabe armada*

**RESISTENCIA A LA FLEXIÓN**

Se ha considerado que la viga esta embebida.




$$M_n = Z_x F_y = 157{,}667.19 * 3515$$

$$M_n = 554{,}200{,}180.99$$

Se calcula el momento resistente con la siguiente formula

$$M_r = F_r M_n$$

Se revisa la relación de esbeltez:

$$\frac{h}{t} > 5.70\sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

$$\therefore \frac{h}{t} = 154.46 > \ 5.70\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 137.32$$

En este caso se cumple, así que el factor a considerar es el de la ecuación 13:

$$a_r = \frac{Área\ alma}{Área\ patín\ comprimido} = \quad 19.35$$

$$R_{PG} = 1 - \frac{a_r}{1200 + 300a_r}\left(\frac{h}{t_a} - 5.60\sqrt{\frac{E}{F_y}}\right) = 0.95$$

A continuación, calculamos el momento resiste:

$$M_r = F_r M_n R_{PG}$$

$$M_r = \ 471{,}843{,}352.56 \quad \text{Kg-cm}$$

Obtenemos $M_r = 471{,}843{,}352.56\ Kg - cm$, el cuál es la resistencia de diseño.

Revisamos

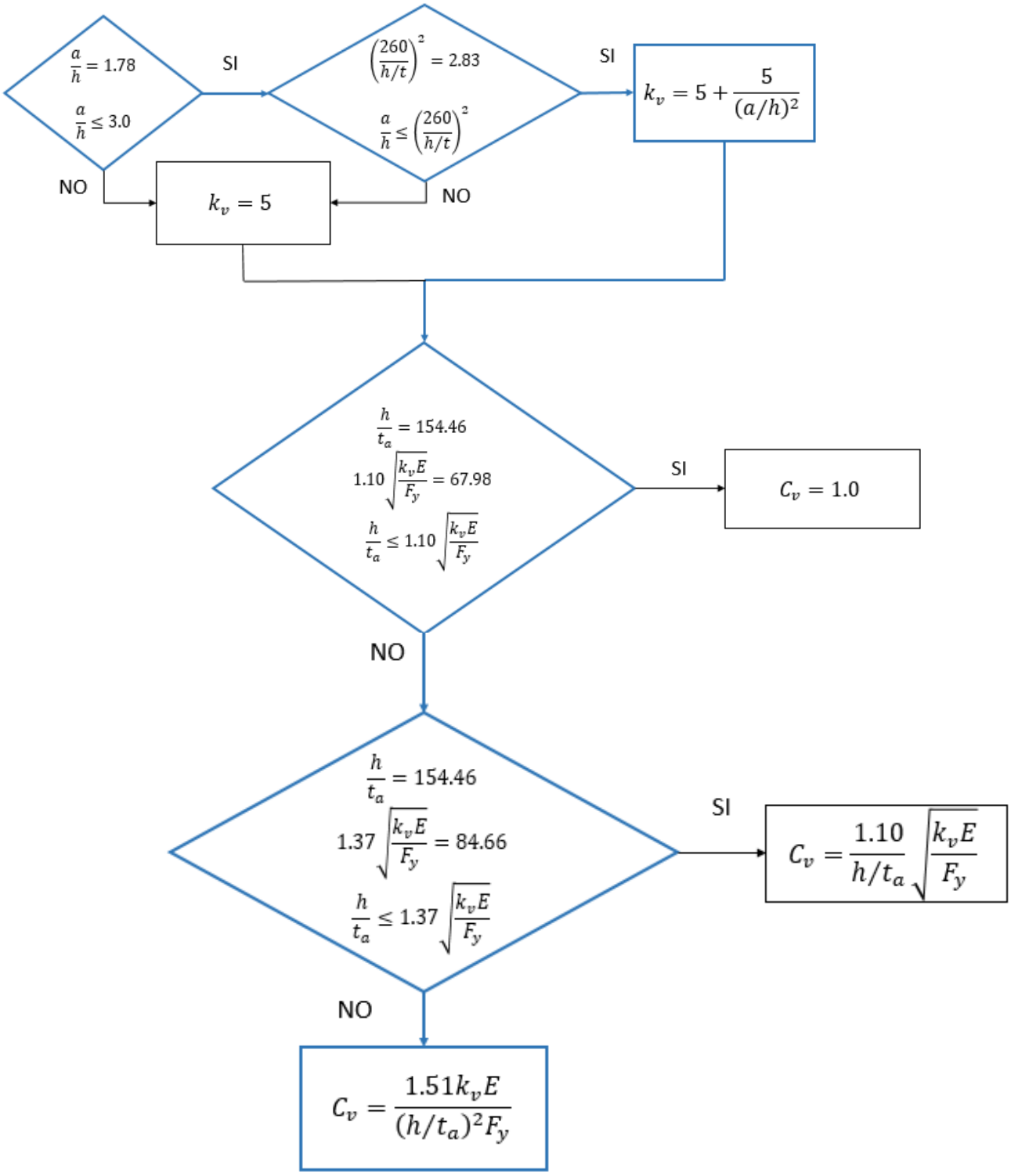
Mu= 145,858,272.15 kg-cm

Mr= 471,843,352.56 kg-cm

$M_u < M_r \therefore se\ acepta\ el\ diseño$

**RESISTENCIA A CORTANTE**

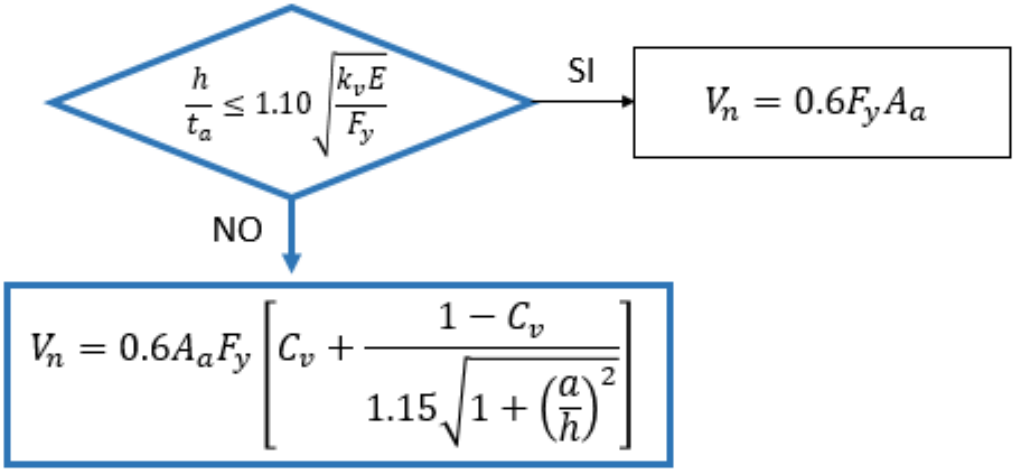
Procedemos a calcular la resistencia al cortante, donde $a = 610\ cm$




Por lo tanto, los valores de $K_v$ y $C_v$ son los siguientes:

$$K_v = 6.58 \; y \; C_v = 0.24$$

Calculamos la resistencia a cortante:




Por lo tanto:

$$V_n = 906{,}779.03\ kg$$

$$V_r = 816{,}101.12\ kg$$

Comparamos con la resistencia al cortante último:

$$V_u = 191{,}415.06\ kg$$

$$V_r = 816{,}101.12\ kg$$

$$V_u < V_r \therefore es\ correcto$$

Calculada la resistencia, se realiza el cálculo y la revisión de los atiesadores, para lo cual proponemos:

| Dimensiones propuestas de atiesadores (cm) | |
|---|---|
| b= | 10 |
| h= | 200 |
| t= | 5 |
| Propiedades | |
| E= | 2,040,000 |
| Fy= | 2,530 |

Revisión

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{at} < 0.56\sqrt{\frac{E}{F_{yat}}}$$

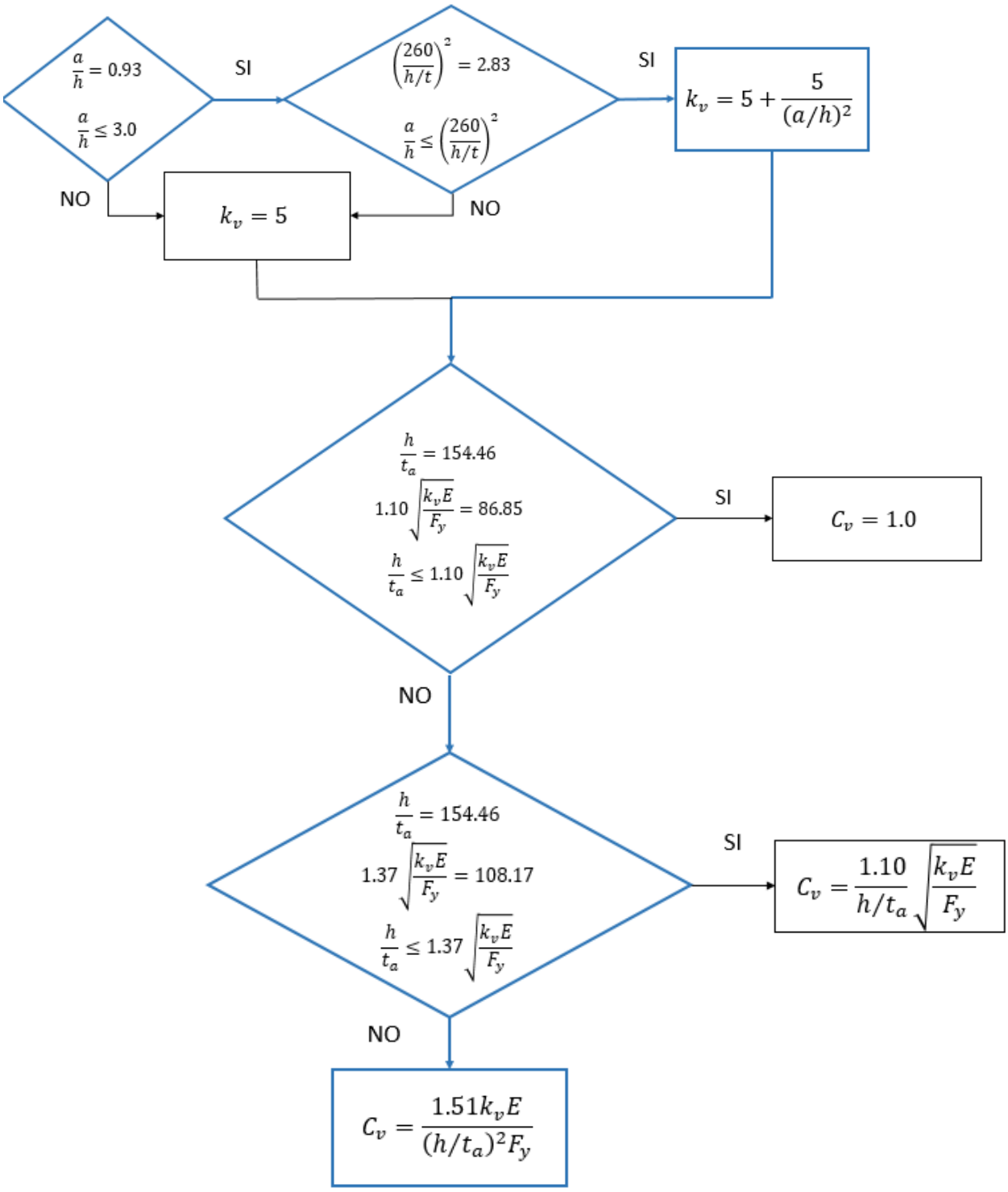
$$\left(\frac{b}{t}\right)_{at} = 2 \ < 0.56\sqrt{\frac{E}{F_{yat}}} = 15.90 \ \therefore se\ cumple$$

| Cálculo atiesadores para cortante | |
|---|---|
| $I_{at} = bt_a{}^3 j =$ | -4,539.62 |
| b= | 342.9 |
| ta= | 2.22 |
| $j = \frac{2.5}{\left(a/h\right)^2} - 2 =$ | -1.21 |
| $j \geq 0.5$ | no cumple |

Como los atiesadores para cortante no cumplen con la condición anterior, además, j está relacionada con la distancia entre atiesadores, por lo tanto, el siguiente paso es modificar esta distancia.

Por lo que nuestros diagramas quedan de la siguiente manera:

Proponiendo ahora $a = 320\ cm$




Por lo tanto, los valores de $K_v$ y $C_v$ son los siguientes:

$$K_v = 10.74 \; y \; C_v = 0.39$$

Cálculo de la resistencia:

$$V_n = 1{,}251{,}382.67\ kg$$

$$V_r = 1{,}126{,}244.41\ kg$$

Comparamos la resistencia vs. El cortante último.

$$V_u = 191{,}415.06\ kg$$

$$V_r = 1{,}126{,}244.41\ kg$$

$$V_u < V_r \therefore es\ correcto$$

Revisión de atiesadores:

| Dimensiones propuestas de atiesadores (cm) | |
|---|---|
| b= | 10 |
| h= | 200 |
| t= | 5 |
| Propiedades | |
| E= | 2,040,000 |
| Fy= | 2,530 |

Revisión:

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{at} < 0.56\sqrt{\frac{E}{F_{yat}}}$$

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{at} = 2 < 0.56\sqrt{\frac{E}{F_{yat}}} = 15.90 \therefore se\ cumple$$

| Cálculo atiesadores para cortante | |
|---|---|
| $I_{at} = bt_a{}^3 j =$ | 3,048.14 |
| b= | 320 |
| ta= | 2.22 |
| $j = \frac{2.5}{\left(a/h\right)^2} - 2 =$ | 0.87 |
| $j \geq 0.5$ | Cumple |

| Atiesadores para cortante con tensión diagonal | |
|---|---|
| $I_{at2} = \frac{h^4 \rho_{at}^{1.3}}{40}\left(\frac{F_{ya}}{E}\right)^{1.5} =$ | 2,678.81 |
| $\rho =$ | 1.389328063 |

| $I_{at} \geq I_{at1} + (I_{at2} - I_{at1})\left[\frac{V_r - V_{c1}}{V_{c2} - V_{c1}}\right]$ | |
|---|---|
| $V_{c1} =$ | 1,605,450.94 |
| $V_{c2} =$ | 1,251,382.67 |
| $V_r =$ | 1,126,244.41 |
| $I_{at} =$ | 6,666,666.67 |
| $I_{at1} + (I_{at2} - I_{at1})\left[\frac{V_r - V_{c1}}{V_{c2} - V_{c1}}\right] =$ | 2,548.28 |
| CUMPLE | |

Para los extremos:

| Cálculo de Kv (cm) | |
|---|---|
| $a =$ | 200.00 |
| $K_v =$ | 19.70 |
| $C_v =$ | 0.72 |
| $V_n =$ | 1,443,777.87 |
| $V_r =$ | 1,299,400.08 |

$$V_u = 191{,}415.06$$

$$V_u < V_r \therefore se\ acepta\ el\ diseño$$

Para el centro:

| Cálculo de Kv (cm) | |
|---|---|
| $a =$ | 320.00 |
| $K_v =$ | 10.74 |
| $C_v =$ | 0.39 |
| $V_n =$ | 1,251,382.67 |
| $V_r =$ | 1,126,244.41 |

$$V_u < V_r \therefore se\ acepta\ el\ diseño$$

Por lo tanto, el diseño se muestra en la siguiente figura.

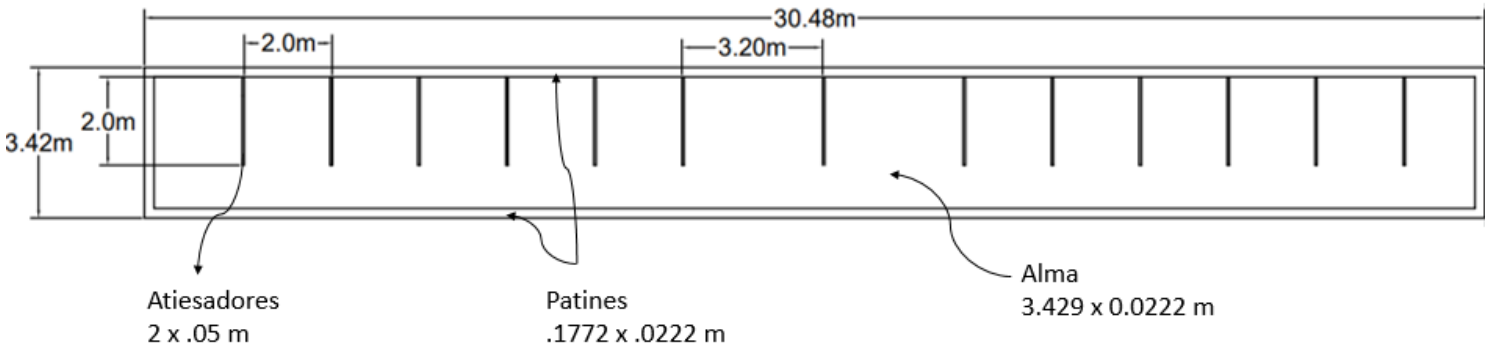



*Figura E 6 Acomodo de atiesadores*

## CONCLUSIONES

Después del desarrollo del presente trabajo podemos llegar a la conclusión de que el proceso para determinar la resistencia de una viga de gran peralte está bien delimitado para evitar las fallas de acuerdo con las necesidades que se requieran y se muestra que el proceso en sí no es difícil, pero si es necesario tener conocimientos sobre el comportamiento mecánico del material con el que estamos trabajando, para así poder hacer un mejor uso y diseños de manera más rápida y eficiente.

Algo que sin duda concluimos de este trabajo es la importancia que tienen las conexiones en el desarrollo de cualquier elemento estructural, como es el caso de una viga, tema que no se abordó ya que el objetivo del trabajo es desarrollar diagramas de flujo para facilitar el proceso de diseño estructural de vigas de gran peralte, ya que es un tema extenso a estudiar en gran detalle.

El estudio del tema de las vigas de gran peralte me ha mostrado, que sin duda, es un mundo muy extenso y relativamente nuevo, pero que no por eso ha sido menos estudiado, existe mucha información, aunque lamentablemente casi toda en inglés y las aplicaciones del acero son cada vez implementadas con mayor frecuencia en estructuras muy interesantes por los retos estructurales y constructivos a vencer, ya que nos brinda muchísimas bondades, desde crear nuevos edificios de manera más rápida, hasta hacer reparaciones y remodelaciones cada vez más eficientes y sin la necesidad de hacer todo en sitio, aunado a esto nos brinda propiedades de resistencia altas con espesores de las secciones transversales extremadamente pequeños, lo que nos permite hacer edificios cada vez más estéticos e impresionantes.

# REFERENCIAS


Ciudad de México. Normas Técnicas Complementarias para el diseño y construcción de Estructuras de acero, (NTC-2017). Reglamento de construcciones para el Distrito Federal, 15 de diciembre de 2017. Gaceta oficial de la ciudad de México.

Galambos Theodore V., Lin F.J. y Johnston Bruce G. Diseño de estructuras de acero con LRFD (páginas 183-213). Pearson Educación.

Brazil Aine M. (2017). Barging In. Modern Steel Construction. January 2017. https://www.aisc.org/modernsteel/archives/2017/january-2017/

**Páginas web**

Pfenniger. *El hierro y el acero en la historia de la arquitectura*. Aquitectura+acero http://www.arquitecturaenacero.org/historia/historia/el-hierro-y-el-acero-en-la-historia-de-la-arquitectura

Díaz del Castillo Rodríguez, Cortés González. (01-05 septiembre 2008). *La industria del acero en México, los últimos 100 años* http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m3/acero%20en%20mexico.pdf

(2019). *Radiografía de la Industria del Acero en México.* CANACERO. https://www.canacero.org.mx/aceroenmexico/descargas/Radiografia_de_la_Industria_del_Acero_en_Mexico_2020.pdf