



BUAP

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

Facultad de Ingeniería

Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado

**DISEÑO DE VIGAS DE ACERO MEDIANTE
GRÁFICAS Mn-Lb DE ACUERDO A MANUALES
AISC E IMCA**

TESIS

Que para obtener el grado de:

**MAESTRO EN INGENIERÍA
CON OPCIÓN TERMINAL EN ESTRUCTURAS**

Presenta:

ING. ANDRÉS ZETINA CASTILLO

Director de tesis:

M. I. MARTÍN CASTILLO FLORES

Co-Director:

M.I. MARÍA DOLORES CUÉLLAR JUÁREZ

Puebla, Pue.

Junio 2019



Oficio No. 1810/2018

C. Andrés Zetina Castillo
Pasante de la Maestría en Ingeniería
con opción terminal en Estructuras
Facultad de Ingeniería, BUAP.
Presente

Por medio del presente, el suscrito M.I. Fernando Daniel Lazcano Hernández, Director de la Facultad de Ingeniería, de acuerdo a su solicitud de aprobación de Tema de Tesis, le autoriza desarrollar el tema intitulado: **Diseño de vigas de acero mediante gráficas Mn-Lb de acuerdo a manuales AISC e IMCA**. Para obtener el grado de Maestro en Ingeniería con opción terminal en Estructuras. Asignándose como Director al M.I. Martín Castillo Flores y Codirector a la M.I. María Dolores Cuellar Juárez.

Sin otro particular de momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente
"Pensar bien, para vivir mejor"
H. Puebla de Zaragoza, junio 15 de 2018.


M.I. Fernando Daniel Lazcano Hernández
Director

C.c.p. M.I. Martín Castillo Flores y María Dolores Cuellar Juárez, Director y Codirector de tesis.

C.c.p. Archivo

ABH/MCF/sco*



Facultad
de Ingeniería

Bvd. Valsequillo y Av. San Claudio
s/n, edif. ING - 4, Col. San Manuel,
Ciudad Universitaria,
Puebla, Pue. C.P. 72570
01 (222) 229 55 00 Ext. 7610

H. Puebla de Zaragoza, a 12 de junio de 2019

M.I. FERNANDO DANIEL LAZCANO HERNÁNDEZ
DIRECTOR DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA
BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA
P R E S E N T E

Por medio de la presente informo que la tesis autorizada en el Oficio No. 1810/2018 con el tema titulado: "**Diseño de vigas de acero mediante gráficas Mn-Lb de acuerdo a manuales AISC e IMCA**", de la cual fui asignado como director, ha sido concluida, alcanzando y cumpliendo satisfactoriamente con los objetivos planteados inicialmente.

Por lo anterior no tengo inconveniente en que el **Ing. Andrés Zetina Castillo**, con Matrícula 217470312, prosiga con los trámites de titulación pertinentes para la obtención del grado de Maestría en Ingeniería con opción terminal en Estructuras.

Sin más por el momento, me despido reiterándole la seguridad de mi consideración distinguida.

Atentamente



M.I. Martín Castillo Flores
Coordinador de la Maestría en Ingeniería
con opción terminal en Estructuras.

DEDICATORIA

En memoria de un gran ser humano, un gran médico dedicado a su familia y a sus hijos, un buen padre, pero sobre todo un excelente amigo. Un ejemplo a seguir y un guía para mí. En memoria del Dr. Francisco Javier Zetina Lozano † (Q. D. E. P.).

ÍNDICE

RESUMEN Y ABSTRACT	VIII
INTRODUCCIÓN	IX
CAPÍTULO 1. PROTOCOLO DE INVESTIGACIÓN	11
1.1 Planteamiento del problema.....	11
1.1.1 Justificación.....	12
1.1.2 Pregunta de investigación	12
1.2 Hipótesis	12
1.2.1 Variables	13
1.2.1.1 Dependiente	13
1.2.1.2 Independiente.....	13
1.3 Objetivo general	13
1.3.1 Objetivos específicos	14
1.4 Metodología	14
1.4.1 Tipo de investigación.....	14
1.4.2 Población o universo de estudio.....	15
1.4.3 Selección de la muestra	15
1.4.4 Técnica e instrumentos de recolección de datos	15
1.4.5 Recursos humanos, materiales y financieros	16
CAPÍTULO 2. VIGAS DE ACERO	17
2.1 Secciones utilizadas	17
2.2 Diagrama de esfuerzos de flexión	18
2.3 Articulaciones plásticas	20
2.4 Momento de fluencia y momento plástico	22
2.5 Clasificación de las secciones.....	24
2.6 Diseño de vigas por momentos	27
2.6.1 Zona 1 (Plastificación).....	28

2.6.2 Zona 2 (Pandeo inelástico)	29
2.6.3 Zona 3 (Pandeo elástico)	29
CAPÍTULO 3. FUNDAMENTOS DE DISEÑO DE VIGAS A FLEXIÓN MEDIANTE LOS MÉTODOS LRFD Y ASD.....	31
3.1 Soporte lateral	32
3.2 Coeficiente C_b	35
3.3 Sección I.....	38
3.3.1 Simetría doble en secciones I compactas y canales.....	38
3.3.2 Simetría doble en secciones I con almas compactas y patines no compactos o esbeltos.....	42
3.3.3 Otras secciones I con almas compactas o no compactas.....	44
3.3.4 Simetría doble y simple en secciones I con almas esbeltas.....	50
CAPÍTULO 4. DISEÑO CONVENCIONAL DE VIGAS	54
4.1 Solución con la Especificación AISC 360-16.....	54
4.1.1 Ejemplo 1: Momento plástico (Zona 1) en viga simplemente apoyada.....	55
4.1.2 Ejemplo 2: Viga con patines no compactos (Zona 1)	58
4.1.3 Ejemplo 3: PLT Inelástico (Zona2) en viga simplemente apoyada.....	60
4.1.4 Ejemplo 4: PLT Inelástico (Zona 2) en viga simplemente apoyada con C_b	69
4.1.5 Ejemplo 5: PLT Elástico (Zona 3) en viga simplemente apoyada con C_b	74
4.1.6 Ejemplo 6: PLT Elástico (Zona 3) en viga continua con C_b	79
4.2 Solución con ayudas de diseño del Manual AISC	86
4.2.1 Ejemplo 1: Momento plástico (Zona 1) en viga simplemente apoyada.....	91

4.2.2 Ejemplo 2: Viga con patines no compactos (Zona 1)	94
4.2.3 Ejemplo 3: PLT Inelástico (Zona2) en viga simplemente apoyada.....	95
4.2.4 Ejemplo 4: PLT Inelástico (Zona 2) en viga simplemente apoyada con Cb	102
4.2.5 Ejemplo 5: PLT Elástico (Zona 3) en viga simplemente apoyada con Cb	105
4.2.6 Ejemplo 6: PLT Elástico (Zona 3) en viga continua con Cb	110
4.3 Solución con software comercial	119
4.3.1 Ejemplo 3: PLT Inelástico (Zona2) en viga simplemente apoyada.....	119
 CAPÍTULO 5. SOLUCIÓN MEDIANTE SOFTWARE INTERACTIVO.....	 122
5.1 Desarrollo del software	122
5.1.1 Descripción	123
5.1.2 Uso del software	127
5.1.3 Herramientas adicionales.....	145
5.2 Solución con Zteel Beams	147
5.2.1 Ejemplo 1: Momento plástico (Zona 1) en viga simplemente apoyada.....	148
5.2.2 Ejemplo 2: Viga con patines no compactos (Zona 1)	154
5.2.3 Ejemplo 3: PLT Inelástico (Zona2) en viga simplemente apoyada.....	158
5.2.4 Ejemplo 4: PLT Inelástico (Zona 2) en viga simplemente apoyada con Cb	165
5.2.5 Ejemplo 5: PLT Elástico (Zona 3) en viga simplemente apoyada con Cb	170
5.2.6 Ejemplo 6: PLT Elástico (Zona 3) en viga continua con Cb.....	174
5.3 Comparativa.....	178

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES.....	181
CAPÍTULO 7. RECOMENDACIONES	185
BIBLIOGRAFÍA	186
ANEXOS	188
1. Lista de cuadros.....	188
2. Lista de figuras.....	188

RESUMEN

El presente trabajo consiste en el desarrollo de un software práctico e intuitivo para el diseño de vigas por flexión de sección W (I) empleando el lenguaje de programación Visual Basic. Cuenta con un display interactivo para la construcción gráfica de la resistencia a momento contra la longitud no soportada lateralmente. El programa está basado en los criterios y procedimientos de las Especificaciones AISC 360-16 e IMCA 2015. Es una herramienta didáctica, que facilita el aprendizaje de los estudiantes de la licenciatura de Ingeniería Civil y de posgrado con especialidad en estructuras, y permite comprender el comportamiento estructural de las vigas. Su interfaz gráfica y la transparencia en la salida de datos facilita la enseñanza a los docentes, acorta el tiempo destinado al capítulo de flexión, lo cual da oportunidad de cubrir otros temas importantes, que en muchas ocasiones no se revisan por falta de tiempo. Su uso recurrente sensibiliza al ingeniero estructural sobre el diseño de vigas. El programa es de uso gratuito y está disponible para la comunidad universitaria que esté interesada en el estudio de dichos elementos.

ABSTRACT

The following work consists in the development of a innovative and practical software to be able to design section W (I) beams, by applying Visual Basic programming language. It counts with a interactive display for the graphic construction of the available moment against the unbraced length. This program is based on the criteria and procedures from specifications AISC 360-16 and IMCA 2015. This is a teaching tool which facilitates the learning of Civil Engineering undergraduate students and graduate students with concentration in structures. This program also allows the understanding of the structural behavior of the beams. The graphic interface and transparency in the data output enables the learning and shortens the time dedicated to bending chapter, which allows opportunity to cover other important subjects that often are not being revised due to lack of time. It's reoccurring use helps sensitize Structural Engineers in the beams design. This program is free of cost and is available to the college communities whom are interested in such elements.

INTRODUCCIÓN

La flexión está presente en la mayoría de los edificios y los elementos estructurales que principalmente trabajan a flexión son las vigas. Ahí reside la importancia para el ingeniero estructural de entender su comportamiento y tener un amplio panorama de su diseño. Existen distintos procedimientos para calcular su resistencia, desde el empleo de las fórmulas de una determinada especificación, hasta el uso de avanzados programas comerciales de cómputo especializados en el análisis y diseño estructural.

Las Especificaciones AISC e IMCA 2015 presentan las metodologías para calcular el momento resistente a flexión de secciones W (I), procedimientos que implican el empleo de una extensa cantidad de fórmulas. A esto hay que sumar, que el diseño estructural es un proceso iterativo y repetitivo. Esta situación hace tediosa la tarea, incrementando la probabilidad de error.

El AISC ofrece ayudas de diseño para diferentes tipos de solicitudes y diferentes elementos estructurales, las cuales agilizan el proceso de diseño. Éstas son para flexión, compresión, cortante, flexocompresión, etc. Las ayudas de diseño para flexión ofrecen los momentos resistentes para diferentes tipos de perfiles. Sobresalen la Tabla 3-2 “W-Shapes Selection by Z_x ” y la Tabla 3-10 “W-Shapes Available Moment vs Unbraced Length”. La Tabla 3-2 permite elegir secciones para resistir un determinado momento. La búsqueda se puede realizar mediante el módulo de sección plástico o mediante el momento de diseño o el momento permisible dependiendo del método que se use. La Tabla 3-10 permite obtener, mediante valores graficados, el perfil más económico dependiendo del momento requerido y de la longitud sin soporte lateral de la viga.

Resultan de gran utilidad ambas tablas, sin embargo, presentan algunas limitantes. La Tabla 3-2 sólo es aplicable para vigas ubicadas en las zonas 1 y 2. La Tabla 3-10 es la válida para las 3 zonas, sin embargo, sólo presenta gráficas para secciones con $F_y = 50$ ksi y $C_b = 1.0$. Para casos en los que C_b es mayor a 1 se requiere utilizar artificios, situación común en la práctica. El empleo de dichos artificios no es claro y se puede generar confusión y errores, debido a que se requiere verificar que $C_b M_n$

no supere M_p . Dicha revisión implica múltiples consultas entre las Tablas 3-2 y 3-10 hasta encontrar una sección que proporcione el momento de diseño y/o el momento permisible adecuado. Dichas tablas no están disponibles en la Especificación, sólo se encuentran en el Manual. La Especificación del AISC se descarga de forma gratuita en la página del AISC, no así el Manual cuyo costo es realmente elevado para el público en general. Su adquisición es difícil para pequeños despachos de cálculo, así como para estudiantes. Siendo ésta quizá, la razón principal por la que la mayoría desconoce la existencia de las tablas, y en caso de conocerlas, no sabe cómo usarlas.

Finalmente, otra alternativa son los programas especializados. El costo de la licencia de un software comercial es aún mayor que el del Manual. Además, para su uso son necesarios conocimientos y experiencia en el comportamiento estructural, por lo tanto, un estudiante en proceso de aprendizaje puede cometer graves errores con drásticas consecuencias.

Por todo lo mencionado anteriormente se desarrolló un software práctico e intuitivo para el diseño de vigas de acero por flexión, empleando el lenguaje Visual Basic. Es necesario facilitar el aprendizaje de los estudiantes sobre el comportamiento estructural de las vigas. Además de trabajar con una herramienta que cuente con una salida gráfica de datos, que optimice el tiempo invertido en la enseñanza de este tema, así como el tiempo que destina el Ingeniero estructural en la vida profesional para el diseño de las vigas.

A continuación se presentan las bases y la teoría básica de flexión. También se estudia la metodología y los procedimientos empleados para el diseño de vigas de acero. Se resuelven una serie de ejemplos utilizando los métodos convencionales de diseño de dichos elementos y finalmente se comparan los resultados con aquellos obtenidos mediante el software didáctico creado.

CAPÍTULO 1. PROTOCOLO DE INVESTIGACIÓN

1.1 Planteamiento del problema

El diseño estructural se define como el dimensionamiento y la elección del material de los diferentes miembros de una estructura, cuyo objetivo fundamental es proporcionar seguridad, buen servicio, estética y economía en las estructuras. Existen diferentes procedimientos para diseñar. Se pueden emplear las fórmulas de alguna especificación; sin embargo, su uso resulta en un proceso tedioso y extenso, requiere un mayor número de iteraciones y tiempo, además de que en muchos casos, se llega a un simple número, sin entender con certeza de dónde vino. No hay claridad de la zona en la que se encuentra ni del comportamiento estructural de la viga.

Las ayudas del Manual AISC agilizan el diseño, pero el costo para adquirirlas es elevado y son pocas las personas que saben utilizarlas. Algunas de ellas sólo son válidas para las zonas 1 y 2 y para $F_y = 50$ ksi. Cuando C_b es mayor a 1, se requiere emplear artificios confusos, además de múltiples consultas para verificar que no se sobrepase la meseta de M_p , lo que resulta en un proceso repetitivo sin garantía de encontrar al perfil más ligero.

Los programas comerciales requieren conocimientos y experiencia en el comportamiento estructural. No son transparentes, no comparten el procedimiento y sólo arrojan el resultado, además de que el costo de su licencia es muy alto.

Todo lo anterior dificulta el aprendizaje en los estudiantes generando una falta de comprensión del comportamiento estructural, la enseñanza de los docentes requiriendo una mayor inversión de tiempo para explicar el tema, y el trabajo de los ingenieros en la práctica orillándolos a múltiples iteraciones. Resulta de gran utilidad para todos ellos contar con programas que permitan reflexionar y entender el comportamiento de las vigas, además de que agilicen y optimicen el diseño de dichos elementos.

1.1.1 Justificación

El software producto del presente trabajo, pretende atender las limitaciones y necesidades mencionadas. Es un programa práctico e intuitivo para el diseño de vigas por flexión de sección W (I). Es una herramienta didáctica, que permite comprender el comportamiento estructural de las vigas facilitando el aprendizaje de los estudiantes. Cuenta con un display interactivo graficador que facilita la enseñanza a la docencia, acorta el tiempo destinado al tema de flexión. El programa diseña vigas en las 3 zonas. Permite puede navegar a través de las gráficas M_n-L_b , y así encontrar el perfil más económico que atienda satisfactoriamente la demanda estructural. Tiene la posibilidad de diseñar tanto con acero A36, como con aceros de alta resistencia. El coeficiente C_b está incluido en los alcances del programa, por lo que, el usuario puede hacer uso de él, sin tener que emplear artificios tediosos, lo que resulta en diseños eficientes, rápidos y sencillos.

Finalmente, el software es una herramienta mexicana, disponible para el apoyo de la sociedad mexicana, tanto en su ámbito educativo como profesional.

1.1.2 Pregunta de investigación

¿Por qué se debe de crear una herramienta didáctica para el estudio de vigas?

1.2 Hipótesis

Si se dispone de herramientas didácticas de cómputo, especializadas en vigas de acero; es posible facilitar el aprendizaje del diseño de dichos elementos, además de obtener soluciones de forma sencilla y rápida; por consiguiente, generar resultados óptimos.

1.2.2 Variables

1.2.1.1 Dependiente

Facilidad en el diseño: Se considera así, ya que esta variable no se manipula, sólo se mide.

1.2.1.2 Independiente

Desarrollo de software: Se considera así, ya que presenta más de un grado de manipulación.

La hipótesis de investigación del caso en estudio se puede considerar de tipo correlacional y es planteada así porque describe la estrecha relación que existe entre dos variables. Por un lado, el desarrollo de software especializado, y por el otro, las repercusiones que éste tiene en el diseño de vigas en acero. Dicha correlación es: Menor desarrollo de software Mayor dificultad de diseño y Mayor desarrollo de software Menor dificultad de diseño.

Para la prueba de hipótesis se tiene validez interna, ya que se identificaron numerosas publicaciones relacionadas al diseño de vigas en acero. Por otro lado, no se cuenta por el momento con información para la validez externa.

1.3 Objetivo general

Crear una herramienta didáctica que reduzca el tiempo de aprendizaje de los estudiantes facilitando la comprensión del comportamiento estructural de vigas.

1.3.1 Objetivos específicos

1. Construir un algoritmo en el lenguaje Visual Basic para el diseño de vigas de acero a flexión.
2. Comparar los resultados mediante ejemplos resueltos con diferentes procedimientos.
3. Comprobar la reducción de tiempo en el diseño.
4. Distinguir el comportamiento de la viga según la zona donde se ubique.
5. Demostrar la facilidad del empleo de C_b .

1.4 Metodología

El presente estudio es una investigación científica que basada en su perspectiva metodológica se clasifica como investigación cuantitativa. Se considera así, ya que a lo largo del trabajo se diseñarán vigas en acero y los resultados serán numéricos presentados de forma gráfica. La información obtenida con el software desarrollado será validada con el método tradicional de cálculo.

1.4.1 Tipo de investigación

La línea de investigación asociada del presente trabajo es el diseño en acero y la temática de estudio en particular es el diseño de vigas.

El diseño de la investigación es no experimental y se determina así por el empleo de algoritmos que trabajan con procedimientos de cálculo previamente definidos y con validez nacional e internacional.

Basado en el alcance o la profundidad del conocimiento que se produce se clasifica como investigación descriptiva y correlacional. Se considera descriptiva ya que se

describirá el método tradicional de cálculo de vigas, así como el empleo y el uso del software para obtener el diseño de dichos elementos. En lo que respecta a la investigación correlacional, ambos resultados se compararán y se validará el grado de precisión y la confiabilidad del software desarrollado.

1.4.2 Población o universo de estudio

La población objetivo o elementos a estudiar son las vigas en acero.

1.4.3 Selección de la muestra

La muestra del presente trabajo de investigación es el diseño estructural de vigas en acero. Actualmente existen diferentes tipos de secciones estructurales en acero, las cuales atienden en mayor o menor medida cierta demanda estructural o determinado elemento mecánico. Las unidades de análisis del presente trabajo obedecen a aquellas secciones con mayor uso en flexión. Se estudiaron 283 perfiles W (I).

1.4.4 Técnica e instrumentos de recolección de datos

La técnica del presente trabajo de investigación se puede clasificar como no probabilística, ya que únicamente se describen los métodos y procedimientos de diseño de vigas en acero presentados en la literatura y sus resultados optimizados en tiempo con ayuda del software. De igual forma, no es necesario considerar herramientas de análisis de datos por estadística descriptiva y correlacional, ya que para dar validez a la hipótesis, basta con corroborar que los resultados obtenidos tanto usando el software como trabajando con el método tradicional son iguales o muy cercanos.

En lo que se refiere al instrumento de recolección de datos, la recolección por cuestionarios o por medición no son necesarias, se reportarán en gráficas los datos de interés, los cuales son valores numéricos de la resistencia a momento de las vigas de acero a partir de las recomendaciones de los Manuales de Construcción en Acero del American Institute of Steel Construction y del Instituto Mexicano de Construcción en Acero.

1.4.5 Recursos humanos, materiales y financieros

Como en todo proyecto de investigación los recursos son necesarios. En el caso de los recursos humanos y financieros fueron proporcionados por parte del tesista. En lo que respecta a los recursos bibliográficos, fueron facilitados por el tesista, por la universidad y por Estructuras Metálicas de Puebla. Otros recursos materiales como la licencia de la paquetería Visual Studio, en la cual se encuentra el lenguaje Visual Basic, fue descargada gratuitamente de la página de Microsoft.

CAPÍTULO 2. VIGAS DE ACERO

Las vigas y las trabes son elementos estructurales que principalmente trabajan a flexión, se colocan generalmente en posición horizontal y soportan las cargas que en ellas se colocan. De acuerdo con Charles Salmon et al, 2009, una viga se define como un *“miembro en el que actúan cargas transversales, en la mayoría de los casos cargas de gravedad, es decir cargas muertas y vivas. El término de carga transversal incluye los momentos de extremo”*. Toda estructura tiene miembros trabajando a flexión, de aquí la importancia de entender su comportamiento y su diseño.

Existen numerosos tipos de vigas, algunos ejemplos son: viguetas, dinteles, vigas de fachada, largueros de puente y vigas de piso. De acuerdo con Jack McCormac y Stephen Csernak, 2012, una trabe se define como una *“viga grande a la que se conectan otras de menor tamaño”* y su función es básicamente como miembro de marco capaz de resistir y transmitir fuerzas laterales. El término viga usualmente se le asigna a elementos secundarios que en la mayoría de los casos están articulados.

En el presente capítulo se introducirá al estudio de vigas, se describirán brevemente las principales secciones que se emplean y se explicará cómo trabajan dichos elementos. Se estudiará el diagrama de esfuerzos, así como la formación de articulaciones plásticas. Finalmente, se comentará sobre el diseño de vigas por momentos. Se definirán las diferentes zonas de momento y se dará una breve explicación de cada una.

2.1 Secciones utilizadas

Actualmente existe un sinnúmero de secciones que se utilizan como vigas, algunos ejemplos son las secciones comerciales: W, S, C, HSS y Z, y también las secciones armadas de tres o cuatro placas. Los perfiles W son los más empleados en la práctica debido a su bajo peso, lo que resulta en economía. Su eficiencia trabajando

a flexión ha dado como resultado el desplazo casi por completo de los canales y de las secciones S. *“Los canales se usan a veces como largueros cuando las cargas son pequeñas y en lugares en donde se requieren patines estrechos”* (McCormac & Csernak, 2012). Su capacidad para resistir fuerzas laterales es limitada y generalmente requieren soporte lateral. Los perfiles W poseen mayor cantidad de acero en sus patines que los perfiles S, lo que resulta en mayores momentos de inercia y mayores capacidades para resistir momento para un mismo peso. Dichos perfiles son relativamente anchos y poseen una rigidez lateral apreciable. En contraste, los perfiles S se usan para situaciones especiales, como cuando se requieren anchos pequeños de patines o cuando las fuerzas cortantes no son importantes. La vigueta de acero de alma abierta es otro tipo común de viga y su uso principal es para soportar losas de piso y techo, resulta económica para los casos cuando se tienen grandes claros y cargas pequeñas. Es importante mencionar que dicha viga es en realidad una armadura ligera de cuerdas paralelas.

Las secciones “I” armadas de tres placas se utilizan cuando la demanda de momento resistente es alta y cuando los perfiles comerciales W más grandes son insuficientes. A pesar que en ocasiones se emplean como vigas secundarias, su uso común en realidad es en marcos en los cuales se requiere capacidad para restringir el giro. Se le puede encontrar en puentes y grandes edificios.

El empleo como viga de secciones HSS y secciones armadas de cuatro placas no es común, sus propiedades geométricas ciertamente se aprovechan más cuando se utilizan como columnas. Un ejemplo de uso como viga es en el sector industrial, la mayoría de las travesaños carril que soportan grúas viajeras utilizan secciones de cuatro placas.

2.2 Diagrama de esfuerzos de flexión

Para estudiar el esfuerzo de flexión, se analizará la viga de la figura 2.1, la cual se supondrá que posee soporte lateral continuo en su patín de compresión.

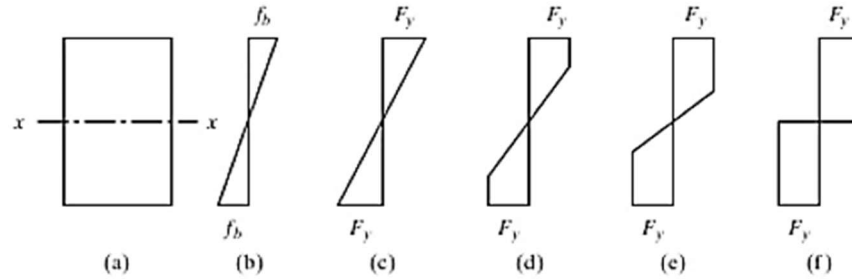


Figura 2.1. Diagrama de esfuerzo de una viga de sección rectangular. Fuente: McCormac, J. C., & Csernak, S. F. (2012). *Diseño de Estructuras de Acero (5° ed.)*. Ciudad de México: Alfaomega.

Cuando la viga está sujeta a momento de flexión, el esfuerzo en cualquier punto se determina con $f = Mc/I$. A esta expresión se le conoce como fórmula de la flexión o fórmula de la escuadría y es aplicable únicamente cuando el esfuerzo máximo calculado es menor que el límite elástico. La fórmula se basa en las hipótesis elásticas básicas: el esfuerzo es proporcional a la deformación unitaria (Ley de Hooke), una sección plana permanece plana después de la aplicación de la carga, etc. El módulo de sección (S) es igual al valor I/c y es una constante específica para cada sección. *“Para una sección transversal asimétrica, S tendrá dos valores: uno para la fibra extrema superior y uno para la inferior”* (Segui, 2007). En las tablas de dimensiones y propiedades del Manual del AISC se encuentra el valor de S de los perfiles rolados estándar. El módulo de sección se relaciona con el momento de fluencia, el cual se define como el momento con el cual inicia el esfuerzo de fluencia en las fibras más alejadas de la sección transversal. Dada la definición anterior, la fórmula de la flexión se puede reescribir como:

$$f = \frac{Mc}{I} = \frac{M}{S} \quad (2.1)$$

En un inicio, cuando el momento se aplica a la viga, el esfuerzo varía de forma lineal desde el eje neutro hasta las fibras extremas (figura 2.1 b). Si se incrementa el momento, la variación lineal del esfuerzo se mantendrá hasta alcanzar el esfuerzo de fluencia en las fibras más alejadas (figura 2.1 c).

Si nuevamente se incrementa el momento, pero ahora más allá del momento de fluencia, las fibras más alejadas seguirán bajo el esfuerzo de fluencia, pero en estado de fluencia y el momento resistente adicional requerido lo proporcionarán las fibras más cercanas al eje neutro. Este proceso continuará con más y más partes de la sección transversal de la viga, acercándose la fluencia más y más al eje neutro (figura 2.1 d y e), hasta que finalmente se alcanza la plastificación total de la sección (figura 2.1 f). Se comenta que la variación de la deformación del eje neutro hacia las fibras externas permanece lineal en todo momento. Cuando la distribución de esfuerzos ha alcanzado la plastificación total de la sección, se dice que se ha formado una articulación plástica, la cual ya no puede resistir ningún momento adicional. Cualquier momento extra ocasionaría una rotación en la viga con un incremento pequeño del esfuerzo.

“El momento plástico es el momento que producirá una plastificación completa en una sección transversal del miembro creándose ahí mismo una articulación plástica. La relación del momento plástico M_p al momento de fluencia M_y se denomina factor de forma” (McCormac & Csernak, 2012). Para secciones rectangulares el factor de forma es igual a 1.5 y para secciones laminadas su valor varía entre 1.10 y 1.20.

2.3 Articulaciones plásticas

En la figura 2.2 se muestra un caso típico de formación de una articulación plástica en una viga simplemente apoyada con una carga puntual P_u al centro del claro.

En un principio se aplica la carga P_u y ésta se incrementa hasta que se alcanza el momento de fluencia en las fibras extremas, las cuales están sometidas al esfuerzo de fluencia. Se continúa con el incremento de carga y dichas fibras extremas empiezan a fluir. Como se aprecia en la figura 2.2, la plastificación se extiende hacia las fibras contiguas fuera de la sección que experimenta el momento máximo. La longitud de plastificación hacia ambos lados de la sección en estudio varía en cada caso, y depende de la sección transversal y de las condiciones de carga. Para una

viga simplemente apoyada con una carga puntual al centro, como la de la figura 2.2, la fluencia en las fibras extremas se extenderá aproximadamente un octavo y un tercio del claro para un perfil W y para sección rectangular respectivamente.

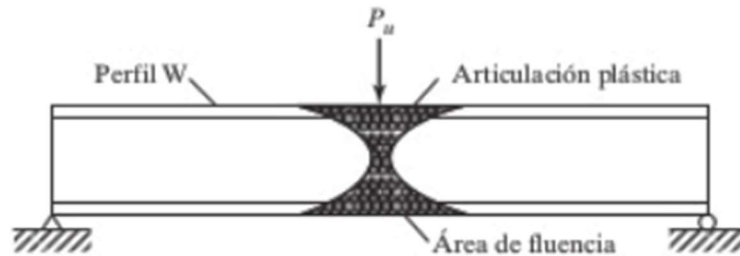


Figura 2.2. Formación de articulación plástica en una viga simplemente apoyada. Fuente: McCormac, J. C., & Csernak, S. F. (2012). Diseño de Estructuras de Acero (5° ed.). Ciudad de México: Alfaomega.

Como se explicó en la sección anterior, conforme la carga P_u aumenta las fibras interiores de la sección de momento máximo empiezan a fluir. Dicha fluencia se acercará gradualmente al eje neutro hasta que finalmente se plastifique la sección completa formándose así la articulación plástica. Al igual que en el caso de las fibras extremas, en las fibras internas la plastificación se extiende cierta longitud hacia las fibras contiguas. En la figura 2.2 se muestra la articulación plástica final y la extensión de la misma, sobre una determinada longitud de la viga. Se comenta que a pesar de que el comportamiento real es como el mostrado en dicha figura, la mayoría de la literatura, por facilidad en el análisis, considera que la articulación se encuentra concentrada en una sola sección.

La articulación plástica formada sumada a las articulaciones reales ubicadas en los extremos de la viga de la figura 2.2 constituyen un mecanismo de colapso. Dicho mecanismo se muestra en la figura 2.3. El análisis estructural basado en las consideraciones de los mecanismos de colapso recibe el nombre de análisis plástico.

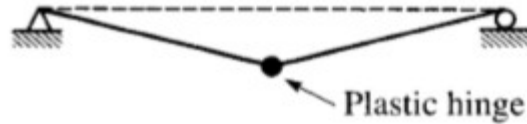


Figura 2.3. Mecanismo de colapso. Fuente: Segui, W. T. (2007). *Steel Design (Fourth ed.)*. United States: THOMSON.

La formación de la articulación plástica no ocurre en todos los casos, existen algunos requisitos indispensables que se deben cumplir para generar dicha articulación. Las vigas deben tener soporte lateral suficiente que impida el pandeo lateral, y sus secciones deben ser compactas. Una sección es compacta cuando sus espesores de patín y alma son suficientemente gruesos y robustos que le permiten desarrollar una distribución de esfuerzos totalmente plastificada antes de que experimente un pandeo local. Más adelante se verá la clasificación de las secciones.

Es importante mencionar que una viga, además de la flexión, puede presentar otros elementos mecánicos como cortante, torsión y carga axial, y la falla se puede originar debido a alguno de ellos antes de que se desarrolle la articulación plástica.

2.4 Momento de fluencia y momento plástico

Si bien en la sección 2.2 se dio la definición de estos conceptos, no se les asignó algún valor o expresión. El momento de fluencia M_y es igual al producto del esfuerzo de fluencia y el módulo de sección elástico:

$$M_y = F_y S \quad (2.2)$$

El momento resistente para la plasticidad total se puede determinar con ayuda de la figura 2.4. En dicha figura se muestra la distribución de esfuerzos de la sección plastificada, así como las resultantes tanto de los esfuerzos de tensión como de los

de compresión, donde A_c y A_t son las áreas de la sección transversal sujetas a compresión y a tensión respectivamente. La compresión interna total deber ser igual a la tensión interna total. Como se considera que todas las fibras presentan el esfuerzo F_y en la condición plástica, las áreas arriba y abajo del eje neutro plástico deben ser iguales. Esta situación no se presenta en secciones asimétricas en la condición elástica. Haciendo equilibrio de fuerzas:

$$C = T$$

$$A_c F_y = A_t F_y$$

$$A_c = A_t$$

Se corrobora que el eje neutro plástico divide a la sección transversal en dos áreas iguales. A menos que la sección sea simétrica, el eje neutro plástico no coincidirá con el eje neutro elástico. El momento plástico M_p , el cual también es el momento nominal de la sección M_n , es igual al par formado por las dos fuerzas iguales y con dirección opuesta:

$$M_p = (F_y A_c) a = (F_y A_t) a = F_y \left(\frac{A}{2} \right) a \quad (2.3)$$

Donde A es el área total de la sección transversal y a es la distancia entre los centroides de las dos medias áreas. El módulo de sección plástico (Z) se define como el momento estático de las áreas a tensión y compresión respecto al eje neutro plástico y es igual al valor $(A/2) \cdot a$. Dada la definición anterior, la expresión 2.3 se reescribe y se define el momento plástico como el producto del esfuerzo de fluencia y el módulo de sección plástico:

$$M_p = F_y Z \quad (2.4)$$

En las tablas de dimensiones y propiedades del Manual del AISC se encuentra el módulo de sección plástico Z de los distintos perfiles rolados.

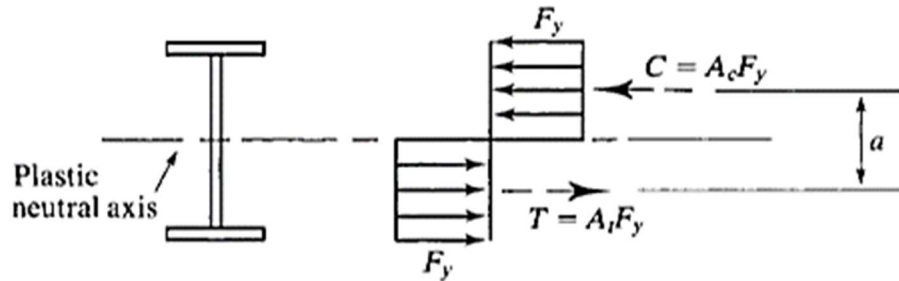


Figura 2.4. Momento plástico M_p . Fuente: Segui, W. T. (2007). *Steel Design (Fourth ed.)*. United States: THOMSON.

2.5 Clasificación de las secciones

De acuerdo con la relación ancho-espesor, la especificación AISC clasifica la sección transversal en compacta, no compacta y esbelta. Para secciones W (I), la relación para el patín (elemento no atiesado) es $b_f/2t_f$ y la relación para el alma (elemento atiesado) es h/t_w . La clasificación de las secciones se encuentra en la Tabla B4.1b de la Sección B4 de la especificación, la cual se muestra en el presente documento en las figuras 2.5-a y 2.5-b. De acuerdo con dicha tabla se tiene lo siguiente:

λ = Relación ancho-espesor

λ_p = Límite superior para secciones compactas

λ_r = Límite superior para secciones no compactas

La clasificación se realiza con los siguientes criterios:

Si $\lambda \leq \lambda_p$ y el patín está continuamente conectado con el alma, la sección es compacta

Si $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$, la sección es no compacta

Si $\lambda > \lambda_r$, la sección es esbelta

La categoría se basa en la peor relación ancho-espesor de la sección transversal. De acuerdo con S. Vinnakota, 2006, “una sección con alma compacta y patín no compacto se clasifica como no compacta. Si ahora el patín es esbelto, la sección se clasifica como esbelta”.

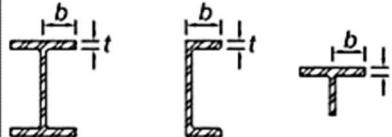
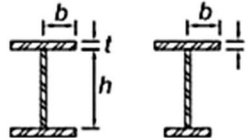
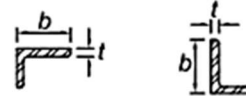
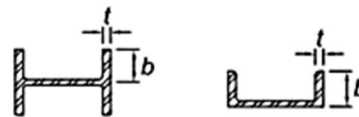
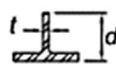
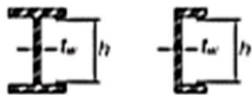
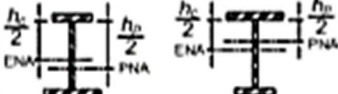

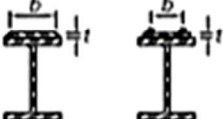
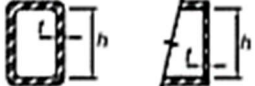


TABLE B4.1b						
Width-to-Thickness Ratios: Compression Elements						
Members Subject to Flexure						
Case	Description of Element	Width-to-Thickness Ratio	Limiting Width-to-Thickness Ratio		Examples	
			λ_p (compact/ noncompact)	λ_r (noncompact/ slender)		
Unstiffened Elements	10	Flanges of rolled I-shaped sections, channels, and tees	b/t	$0.38\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.0\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	11	Flanges of doubly and singly symmetric I-shaped built-up sections	b/t	$0.38\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$0.95\sqrt{\frac{k_c E}{F_L}}$ [a] [b]	
	12	Legs of single angles	b/t	$0.54\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$0.91\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	13	Flanges of all I-shaped sections and channels in flexure about the minor axis	b/t	$0.38\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.0\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	14	Stems of tees	d/t	$0.84\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.52\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	

Figura 2.5-a. Tabla B4.1b de la Especificación del AISC con la relación ancho-espesor: Miembros de elementos (no atesados) comprimidos sujetos a flexión. Fuente: American Institute of Steel Construction. (2017). Steel Construction Manual (15 ed.). Chicago: American Institute of Steel Construction.

TABLE B4.1b (continued) Width-to-Thickness Ratios: Compression Elements Members Subject to Flexure					
Case	Description of Element	Width-to-Thickness Ratio	Limiting Width-to-Thickness Ratio		Examples
			λ_p (compact/ noncompact)	λ_r (noncompact/ slender)	
15	Webs of doubly symmetric I-shaped sections and channels	h/t_w	$3.76 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$5.70 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
16	Webs of singly symmetric I-shaped sections	h_c/t_w	$\frac{k_c}{h_p} \sqrt{\frac{E}{F_y}} \leq \lambda_p$ $\left(\frac{0.54 M_p}{M_y} - 0.09 \right)^2$ $\leq \lambda_r$	$5.70 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
17	Flanges of rectangular HSS	b/t	$1.12 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.40 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
18	Flange cover plates and diaphragm plates between lines of fasteners or welds	b/t	$1.12 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.40 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
19	Webs of rectangular HSS and box sections	h/t	$2.42 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$5.70 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
20	Round HSS	D/t	$0.07 \frac{E}{F_y}$	$0.31 \frac{E}{F_y}$	
21	Flanges of box sections	b/t	$1.12 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.49 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	

$k_c = 4\sqrt{h/t_w}$, shall not be taken less than 0.35 nor greater than 0.76 for calculation purposes.
 $F_t = 0.7F_y$ for slender web I-shaped members and major-axis bending of compact and noncompact web built-up I-shaped members with $S_{xt}/S_{xc} \geq 0.7$; $F_t = F_y S_{xt}/S_{xc} \geq 0.5F_y$ for major-axis bending of compact and noncompact web built-up I-shaped members with $S_{xt}/S_{xc} < 0.7$, where S_{xc} , S_{xt} = elastic section modulus referred to compression and tension flanges, respectively, in.³ (mm³).
 M_y is the moment at yielding of the extreme fiber. $M_p = F_y Z_x$, plastic bending moment, kip-in. (N-mm), where Z_x = plastic section modulus taken about x-axis, in.³ (mm³).
 E = modulus of elasticity of steel = 29,000 ksi (200,000 MPa) ENA = elastic neutral axis
 F_y = specified minimum yield stress, ksi (MPa) PNA = plastic neutral axis

Figura 2.5-b. Tabla B4.1b de la Especificación del AISC con la relación ancho-espesor: Miembros de elementos (atiesados) comprimidos sujetos a flexión. Fuente: American Institute of Steel Construction. (2017). Steel Construction Manual (15 ed.). Chicago: American Institute of Steel Construction.

2.6 Diseño de vigas por momentos

La capacidad de una viga de acero para resistir momento depende del soporte lateral que ésta tiene en su patín de compresión, es decir, a mayor restricción lateral, la viga es capaz de desarrollar una gran capacidad resistente a momento, por el contrario, si dicha restricción es nula o escasa, la resistencia de la viga se ve seriamente reducida. Este fenómeno se debe a que parte de la viga se comporta como una columna cuando trabaja bajo esfuerzos de flexión, a continuación, se explica brevemente dicho comportamiento.

Supóngase una viga de gran longitud simplemente apoyada con una carga de gravedad uniformemente distribuida. El efecto de la carga es el de flexionar hacia abajo a la viga generando compresiones y tensiones en el lecho superior e inferior respectivamente. La parte superior sometida a compresión se comportará como una “columna” cuya sección transversal consistirá en la porción de la sección transversal de la viga arriba del eje neutro. Como ocurre en cualquier columna, esta “columna” parcial tiende a pandear alrededor de su eje con menor inercia. Imaginando a dicha “columna”, es fácil entender que su momento de inercia alrededor del eje y (eje vertical) es mucho menor que el momento de inercia respecto a su eje x . Si no existe algún arriostramiento lateral perpendicular al eje y , la viga pandeará lateralmente bajo una carga pequeña y no se alcanzará la carga que teóricamente produciría una falla vertical. Dicho pandeo no ocurriría si el patín de compresión se soporta lateralmente o si se impide el torcimiento de la viga a intervalos frecuentes.

En la figura 2.6 se observa que las vigas tienen tres intervalos o zonas de pandeo, dependiendo de sus condiciones de soporte lateral. Una viga se ubica en la zona 1 de pandeo si tiene un soporte lateral continuo o estrechamente espaciado de tal forma que pueda pandear plásticamente. Conforme se incrementa la separación entre los soportes laterales, la viga empezará a fallar inelásticamente bajo momentos menores y su ubicación ahora será en la zona 2. Finalmente, si se tienen longitudes aún mayores sin soporte lateral, la viga fallará elásticamente y se ubicará en la zona 3.

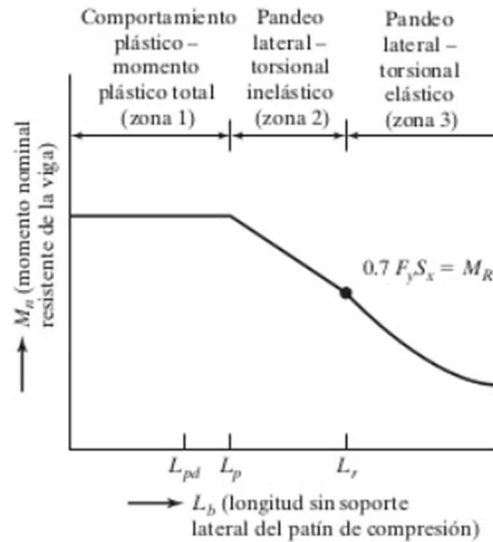


Figura 2.6. Curva típica con los momentos resistentes nominales o momentos de pandeo de una viga en función de la longitud no soportada lateralmente de su patín de compresión. Fuente: McCormac, J. C., & Csernak, S. F. (2012). *Diseño de Estructuras de Acero* (5° ed.). Ciudad de México: Alfaomega.

2.6.1 Zona 1 (Plastificación)

Cuando se tiene una viga con sección compacta y con soporte lateral continuo en su patín de compresión es posible aplicar carga e incrementar ésta hasta alcanzar la plastificación en uno o varios puntos de la viga. Una vez alcanzado este estado, la viga es incapaz de soportar más momento en las articulaciones plásticas formadas, por lo que una carga mayor producirá una redistribución de momentos. En otras palabras, en la zona 1, las vigas pueden alcanzar su momento plástico y desarrollar una capacidad de rotación suficiente que permita la redistribución de momentos.

Si la viga compacta, ahora tiene soporte lateral estrechamente espaciado en su patín de compresión, se encontrará que aún es posible cargarla hasta que se alcance el momento plástico y que desarrolle una redistribución de momentos. Para que esto ocurra, la separación entre soportes laterales no debe de exceder un valor

llamado L_p . “Dicho valor de L_p depende de las dimensiones de la sección transversal de la viga y de su esfuerzo de fluencia. La mayoría de las vigas fallan en la zona 1” (McCormac & Csernak, 2012).

2.6.2 Zona 2 (Pandeo inelástico)

Tomando la viga anterior, pero en este caso se incrementa aún más la distancia entre los soportes laterales o torsionales, la sección puede cargarse hasta que algunas (no todas) de las fibras comprimidas estén bajo el esfuerzo F_y . La capacidad de rotación de la sección será insuficiente como para que exista una redistribución total de momentos. En esta zona, la viga se puede flexionar hasta que se alcance la deformación de fluencia en algunas, pero no en todas, sus fibras comprimidas, antes de que ocurra el pandeo. Dicho pandeo recibe el nombre de pandeo inelástico.

Conforme se incrementa la longitud no soportada lateralmente, el momento que la sección resiste disminuye, hasta que finalmente la viga falla antes de que se alcance el esfuerzo de fluencia en cualquier punto en la sección transversal. La máxima longitud sin arriostamiento lateral con la que aún se puede alcanzar F_y en un punto es el extremo del intervalo inelástico. A dicho valor se le conoce como L_r y depende de las propiedades de la sección transversal, del esfuerzo de fluencia y de los esfuerzos residuales presentes en la viga. En este punto, si se presenta un momento que teóricamente produzca un esfuerzo de fluencia en cualquier parte de la viga, la sección pandeará. Es conveniente aclarar que el pandeo ocurrirá con un valor menor a F_y debido a la presencia de esfuerzos residuales.

2.6.3 Zona 3 (Pandeo elástico)

En la zona 3, la sección pandeará elásticamente antes de que alcance el esfuerzo de fluencia en cualquier punto, si la longitud entre soportes laterales es mayor que

L_r . Al aumentar esta longitud, el momento de pandeo se vuelve cada vez más pequeño.

En términos coloquiales, en la zona 3 la viga se pandea, se “sacude” lo que tiene encima y recupera su forma original.

Al incrementar el momento en una viga, ésta se deflexionará transversalmente más y más hasta que se alcance un valor crítico para el momento (M_{cr}). Al llegar a este punto, la sección transversal girará y el patín de compresión se moverá lateralmente. La resistencia torsional y la resistencia al alabeo de la viga proporcionan el momento M_{cr} .

CAPÍTULO 3. FUNDAMENTOS DE DISEÑO DE VIGAS A FLEXIÓN MEDIANTE LOS MÉTODOS LRFD Y ASD

La resistencia nominal a flexión M_n de un miembro corresponde a su resistencia teórica calculada y se obtiene a partir de las ecuaciones de la mecánica de sólidos.

Los procedimientos de cálculo más utilizados están basados y presentados en los métodos de Diseño por Factores de Carga y Resistencia (Load and Resistance Factor Design, LRFD) y Diseño por Resistencia Permisible (Allowable Strength Design, ASD). En la metodología LRFD, se requiere que la resistencia de diseño a flexión iguale o exceda a la resistencia requerida última calculada con los factores de carga correspondientes a una determinada combinación LRFD.

$$M_u \leq \phi_b M_n \quad (3.1)$$

Donde:

M_u = Momento último

ϕ_b = Factor reductor de resistencia para flexión en la metodología LRFD, 0.90

En la metodología ASD, la resistencia permisible a flexión debe igualar o exceder al momento requerido obtenido del análisis estructural bajo la combinación de cargas ASD.

$$M_a \leq \frac{M_n}{\Omega_b} \quad (3.2)$$

Donde:

M_a = Momento admisible

Ω_b = Factor reductor de resistencia para flexión en la metodología ASD, 1.67

El presente capítulo describirá las metodologías empleadas para el diseño por flexión de las secciones I. El trabajo está basado en las disposiciones de las

Especificaciones AISC 360-16 e IMCA 2015. A lo largo del capítulo, se presentarán las bases de diseño a flexión, así como fórmulas que ocupan las especificaciones empleadas. A la derecha de cada fórmula el lector encontrará dos numeraciones, una entre paréntesis () y otra entre corchetes [], las cuales indican la numeración propia del documento y la numeración de las fórmulas de la Especificación AISC. Se presenta de esta manera para facilitar la consulta en dicha especificación.

El estudio del presente capítulo aplica a miembros sujetos a flexión simple alrededor del eje principal x . Se considera que la carga de la viga se aplica en un plano paralelo al eje principal y que ésta pasa através del centro de cortante. Se supondrá que los puntos de soporte de la viga están restringidos contra rotaciones alrededor del eje longitudinal.

3.1 Soporte lateral

Como se expuso en el capítulo anterior, es ideal que los patines de compresión de las vigas estén restringidos contra el pandeo lateral; sin embargo, en la práctica, no siempre es posible lograr dicha condición. En edificios es común que los patines superiores de las vigas, que sustentan sistemas de entrepiso a base de losas de concreto, se cuelen con dichos pisos. Para situaciones de este tipo, la losa proporciona soporte lateral al patín superior y la viga se sitúa en la zona 1.

Como se estudió anteriormente, si el patín de compresión de una viga no tiene apoyo lateral en una cierta longitud, tendrá una condición de trabajo similar a la que se presenta en una columna. A medida que la longitud, y por ende, la esbeltez de una columna aumenta, la probabilidad de su pandeo crece para el mismo valor de la carga. Dicho pandeo se evita proporcionando soporte lateral.

Los factores que afectan el valor del esfuerzo que causa el pandeo son varios y algunos de ellos son: las propiedades del material, el tipo de apoyo lateral y su separación, los esfuerzos residuales, los apoyos extremos o restricciones en la viga, las cargas, etc.

Cuando una viga trabaja a flexión, un patín experimenta compresión y el otro tensión. Dicha tensión tiende a mantener recto el patín de compresión y restringe el pandeo, pero a medida que el momento de flexión aumenta, la tendencia al pandeo se incrementa lo suficiente como para vencer la restricción impuesta por la tensión. Cuando el patín a compresión empieza a pandearse, ocurre la torsión, y entre menor sea la resistencia torsional de la viga, la falla será más rápida. Las secciones I (W, S y sección armada de tres placas) y C no poseen mucha resistencia contra el pandeo lateral, ni a la torsión resultante. Las secciones en cajón (HSS y sección armada de cuatro placas) son menos vulnerables al pandeo, poseen mayor resistencia a la torsión que las secciones I y C. De acuerdo con pruebas experimentales, las secciones en cajón no presentarán pandeo lateral sino hasta que las deformaciones desarrolladas se ubiquen en el rango plástico.

Se ha hablado de apoyo y soporte lateral, pero si bien es cierto, existen dudas en el gremio de la ingeniería estructural sobre qué es lo que constituye y qué es lo que no constituye un apoyo lateral efectivo. Ingenieros principiantes y estudiantes en general constantemente se cuestionan ¿qué es un soporte lateral? y ¿cómo dar soporte lateral a una viga?. De acuerdo con los autores Jack McCormac y Stephen Csernak, 2012, *“es necesario utilizar el criterio”* para determinar si existe o no soporte lateral. Una viga de acero que está ahogada en concreto, o que tiene su patín a compresión embebido en una losa de concreto se puede considerar que tiene soporte lateral continuo. Cuando se tiene una losa de concreto que descansa sobre el patín superior de una viga, es recomendable estudiar la situación y evaluar si la fricción realmente proporciona apoyo lateral completo. Si las cargas en la losa son fijas en posición, su peso incrementa la fricción y es factible pensar en un apoyo lateral continuo. Si dichas cargas son dinámicas, es decir existe movimiento y/o vibración constante, la fricción se reduce y no sería adecuado considerar el soporte continuo. Este segundo caso, se puede encontrar en edificios con equipos que vibran y en puentes debido al tránsito de los vehículos.

En los casos en los que la losa de piso no proporciona soporte lateral, se debe proporcionar dicho soporte mediante vigas secundarias o miembros destinados

para tal fin. Se recomienda que dichos elementos se conecten directamente al patín de compresión, ya que si la conexión se realiza en el patín de tensión, el soporte lateral proporcionado al patín que lo requiere (compresión) será muy poco. Si el espaciamiento entre las vigas secundarias es pequeño, es muy probable que el soporte lateral suministrado sea continuo. Es importante determinar si dichas vigas no se mueven en conjunto antes de considerar que proporcionan soporte lateral.

En el caso de techos metálicos y de tableros de piso, la soldadura intermitente entre estos y los patines de compresión de las vigas propablemente proporcionará soporte lateral suficiente. Para las cubiertas metálicas a base de lámina corrugada, utilizadas en naves industriales y las cuales se fijan a largueros, la situación es discutible. Si la fijación se realiza mediante abrazaderas metálicas se podría considerar que el apoyo lateral es parcial. Si en lugar de ello, se emplean pijas estrechamente espaciadas, no sería incorrecto pensar en un apoyo lateral continuo. Un caso similar se presenta en los sistema de pisos de madera apoyados en vigas metálicas.

Como se observa, no siempre es posible tener soporte lateral continuo, y ahora entonces, la cuestión es ¿qué distancia se debe considerar entre los puntos de soporte lateral si se sabe que este es parcial?. De acuerdo con los autores Jack McCormac y Stephen Csernak, 2012, nuevamente *“debe de usarse el criterio propio, pero si existe duda acerca del grado de soporte lateral proporcionado, sería mejor que se suponga que no hay ninguno”*. Evidentemente, esta postura es sumamente conservadora, ya que es muy probable que la viga en estudio se ubique en la zona 3 y que el diseño resulte en un elemento robusto; sin embargo, ante la incertidumbre es la mejor decisión.

La Especificación AISC proporciona apoyo sobre arriostamiento de estabilidad de vigas y columnas. En su Apéndice 6 se proporcionan valores para calcular la resistencia y rigidez necesarias del arriostamiento, así como fórmulas de diseño para obtener dichos valores.

3.2 Coeficiente C_b

El coeficiente C_b es el factor de modificación de pandeo torsional lateral y se emplea en vigas que se encuentran en las zonas 2 y 3. Es un factor que aplica para diagramas de momento no uniformes, cuando ambos extremos del segmento sin soporte están arriostrados. Dicho factor es un coeficiente de momentos que se incluye en las fórmulas para tomar en cuenta el efecto de diferentes gradientes de momento sobre el pandeo de torsión lateral. Dicho en otros términos, el pandeo lateral puede verse afectado considerablemente por las restricciones en los extremos y las condiciones de carga del miembro.

Para entender lo anterior, se muestra la figura 3.1. Se aprecia en dicha figura que el momento en la viga sin soporte lateral de la parte (a) causa en el patín una peor condición de compresión que el momento en la viga sin soporte lateral en la parte (b). La explicación de esto es que el patín superior de la viga en la parte (a) trabaja a compresión en toda su longitud, mientras que en (b) la longitud de la “columna”, o sea la longitud del patín superior que trabaja a compresión, es mucho menor; por lo tanto, se tiene una “columna” mucho más corta.

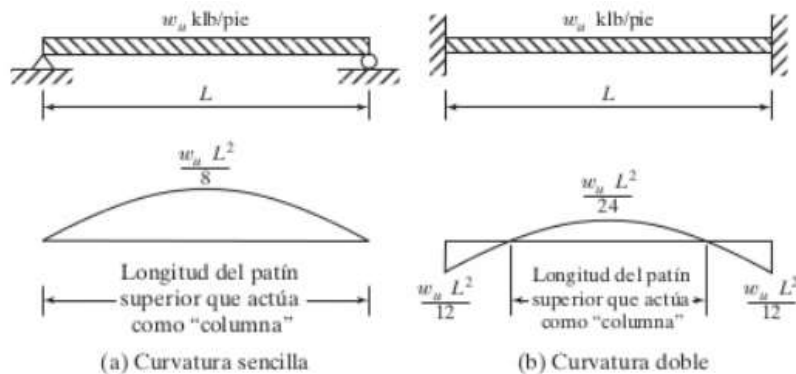


Figura 3.1. Vigas con curvatura sencilla y doble. Fuente: McCormac, J. C., & Csernak, S. F. (2012). *Diseño de Estructuras de Acero* (5° ed.). Ciudad de México: Alfaomega.

El factor correspondiente C_b para las vigas (a) y (b) es 1.14 y 2.38 respectivamente. Las ecuaciones básicas de capacidad de momento para las zonas 2 y 3 se dedujeron para vigas sin soporte lateral sujetas a curvatura simple con $C_b = 1$. Frecuentemente, las vigas no están flexionadas en curvatura simple, lo que significa que pueden resistir momentos mayores. Para tomar en cuenta esto, la

especificación del AISC proporciona coeficientes C_b o de momento mayores que 1 que deben multiplicarse por los valores calculados de M_n . El resultado así son mayores capacidades de momento. Es importante mencionar que la capacidad de una viga de resistir momento nunca será mayor al momento plástico M_p , es decir, la capacidad obtenida al multiplicar M_n por C_b , no puede ser mayor al M_n de la zona 1. La figura 3.2 ilustra esta situación:

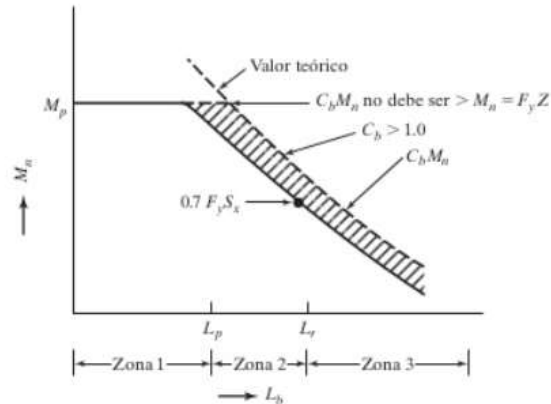


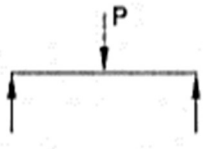
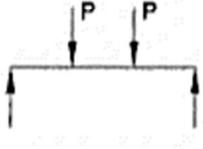
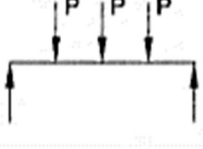
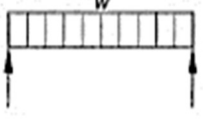
Figura 3.2. Efecto de C_b en la capacidad de momento. Fuente: McCormac, J. C., & Csernak, S. F. (2012). *Diseño de Estructuras de Acero* (5° ed.). Ciudad de México: Alfaomega.

El valor de C_b para miembros de simetría simple en curvatura sencilla y todos los miembros de simetría doble se determina con la siguiente expresión en la que $M_{máx}$ es el momento más grande en un segmento no soportado de una viga, en tanto que M_A , M_B y M_C son, respectivamente, los momentos en los puntos $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ y $\frac{3}{4}$ del segmento. La especificación del AISC calcula C_b con la siguiente expresión:

$$C_b = \frac{12.5M_{máx}}{2.5M_{máx} + 3M_A + 4M_B + 3M_C} \quad (3.3) \quad [F1 - 1]$$

En miembros de simetría simple sujetos a la flexión de curvatura doble, la resistencia de torsión lateral debe revisarse para ambos patines superior e inferior. En el Comentario F1, Disposiciones Generales del AISC, se presenta un análisis más detallado de C_b para miembros de simetría simple.

Para voladizos o ménsulas donde el extremo libre no está soportado lateralmente C_b es igual a 1. El Manual del AISC, en su Tabla 3-1, presenta algunos valores típicos de C_b calculados con la ecuación 3.1.

Table 3-1 Values of C_b for Simply Supported Beams		
Load	Lateral Bracing Along Span	C_b
	None Load at midpoint	1.32
	At load point	1.67
	None Loads at third points	1.14
	At load points Loads symmetrically placed	1.67
	None Loads at quarter points	1.14
	At load points Loads at quarter points	1.67
	None	1.14
	At midpoint	1.30
	At third points	1.45
	At quarter points	1.52
	At fifth points	1.56

Note: Lateral bracing must always be provided at points of support per AISC Specification Chapter F.

Figura 3.3. Tabla 3-1 del Manual del AISC con valores de C_b para vigas simplemente apoyadas.
Fuente: American Institute of Steel Construction. (2017). Steel Construction Manual (15 ed.).
Chicago: American Institute of Steel Construction.

3.3 Sección I

De acuerdo con las Especificaciones AISC e IMCA, la metodología de diseño de las secciones I y las secciones C es similar y se basa en el empleo de las mismas fórmulas. A continuación, se describen las distintas expresiones requeridas en el cálculo del momento resistente a flexión, se subdivide la metodología de acuerdo con la clasificación de las secciones según lo establecido en la sección 2.5.

3.3.1 Simetría doble en secciones I compactas y canales

Las disposiciones de esta sección aplican para secciones I con doble simetría y canales sujetos a flexión alrededor de su eje principal cuyos patines y almas sean compactos. Ambas secciones deben revisarse para los siguientes estados límite de falla:

- Fluencia
- Pandeo lateral torsional

El momento nominal a flexión M_n se tomará como el menor de los valores obtenidos de dichos estados límite.

Fluencia

El estado límite de fluencia se presentará siempre y cuando la sección presente soporte lateral continuo en su patín de compresión, es decir, cuando la viga se ubique en zona 1, así el momento nominal M_n será igual al momento plástico M_p :

$$M_n = M_p = F_y Z_x \quad (3.4) \quad [F2 - 1]$$

Donde:

F_y = Esfuerzo de fluencia mínimo especificado para tipo de acero usado, ksi

Z_x = Módulo de sección plástico alrededor del eje principal x , in³

Pandeo lateral torsional

El estado límite de falla de pandeo lateral torsional se presenta, como se describió anteriormente, cuando el soporte en el patín de compresión no es constante. A la distancia entre soportes se le conoce como L_b y la unidad empleada es la pulgada. Si $L_b \leq L_p$, no ocurrirá pandeo y el presente estado límite no aplica. Para el caso que $L_p < L_b \leq L_r$ (zona 2), el momento nominal se obtiene con la siguiente expresión:

$$M_n = C_b \left[M_p - (M_p - 0.7F_y S_x) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] \leq M_p \quad (3.5) \quad [F2 - 2]$$

Finalmente, si L_b es mayor que L_r (zona 3), el momento nominal se calcula con la siguiente fórmula:

$$M_n = F_{cr} S_x \leq M_p \quad (3.6) \quad [F2 - 3]$$

La expresión anterior aplica cuando la viga se ubica en la zona 3 y, como se expuso anteriormente, cuando un elemento tiene soporte lateral escaso, su patín de compresión tiende a comportarse como una columna. Esto se comprueba analizando la fórmula de momento nominal, la cual depende de un esfuerzo crítico F_{cr} . Dicho esfuerzo está basado en el esfuerzo de pandeo de Euler:

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_c}{r} \right)^2} \quad (3.7) \quad [E3 - 4]$$

Donde:

F_e = Esfuerzo de pandeo de Euler, ksi

$L_c = KL$ = Longitud efectiva, in

r = Radio de giro, in

$$F_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E}{\left(\frac{L_b}{r_{ts}}\right)^2} \sqrt{1 + 0.078 \frac{Jc}{S_x h_o} \left(\frac{L_b}{r_{ts}}\right)^2} \quad (3.8) \quad [F2 - 4]$$

Donde:

F_{cr} = Esfuerzo crítico, ksi

E = Módulo de rigidez (Para el acero es igual a 29,000 ksi)

J = Constante de torsión de Saint-Venant, in⁴

S_x = Módulo de sección elástico alrededor del eje principal x, in³

h_o = Distancia entre centroides de patines, in

Estudiando la expresión 3.8, el lector podrá identificar al esfuerzo de pandeo de Euler inmerso en ella. En esa misma expresión, es posible utilizar el valor de la unidad (1), en lugar del término de la raíz cuadrada. Esta forma de proceder es algo conservadora.

Los resultados de las ecuaciones 3.6 y 3.8 son idénticos a los de la siguiente expresión:

$$M_{cr} = C_b \frac{\pi}{L_b} \sqrt{EI_y GJ + \left(\frac{\pi E}{L_b}\right)^2 I_y C_w} \quad (3.9)$$

La ecuación 3.9 es una fórmula para el pandeo lateral torsional para secciones de simetría doble utilizada en ediciones pasadas de la Especificación AISC. La ventaja del empleo de las expresiones 3.6 y 3.8 es que éstas son muy similares a la fórmula de pandeo lateral torsional de secciones de simetría simple.

Es importante hacer énfasis en que el mayor momento resistente que puede desarrollar una viga de acero es cuando ésta se plastifica, es decir, el momento

plástico, de ahí que las expresiones limitan la resistencia a este valor. Dicha limitante aplica también para el coeficiente de variación de momento C_b , el incremento a la resistencia por parte de dicho coeficiente tiene como límite máximo el momento plástico.

Las expresiones para determinar la distancia límite sin soporte lateral para el alcanzar el estado límite de fluencia, L_p (in) y la distancia límite sin soporte lateral para desarrollar el pandeo lateral torsional inelástico, L_r (in) son:

$$L_p = 1.76r_y \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (3.10) \quad [F2 - 5]$$

$$L_r = 1.95r_{ts} \frac{E}{0.7F_y} \sqrt{\frac{Jc}{S_x h_o} + \sqrt{\left(\frac{Jc}{S_x h_o}\right)^2 + 6.76 \left(\frac{0.7F_y}{E}\right)^2}} \quad (3.11) \quad [F2 - 6]$$

Donde:

r_y = Radio de giro alrededor del eje y , in

$$r_{ts}^2 = \frac{\sqrt{I_y C_w}}{S_x} \quad (3.12) \quad [F2 - 7]$$

c es un coeficiente con valor igual a 1 para secciones I con simetría doble. Para canales dicho coeficiente se determina con la siguiente fórmula:

$$c = \frac{h_o}{2} \sqrt{\frac{I_y}{C_w}} \quad (3.13) \quad [F2 - 8b]$$

Donde:

I_y = Momento de inercia en el eje y , in⁴

Para secciones I con simetría doble con patines rectangulares (secciones armadas de 3 placas) C_w se obtiene con la siguiente ecuación:

$$C_w = \frac{I_y h_o^2}{4} \quad (3.14)$$

Por lo tanto, la expresión 3.12 se reescribe:

$$r_{ts}^2 = \frac{I_y h_o}{2S_x} \quad (3.15)$$

3.3.2 Simetría doble en secciones I con almas compactas y patines no compactos o esbeltos

Las disposiciones de esta sección aplican para secciones I con doble simetría sujetas a flexión alrededor de su eje principal con almas compactas y patines no compactos o esbeltos de acuerdo con lo establecido en la sección 2.5. Las secciones deben revisarse para los siguientes estados límite de falla:

- Pandeo lateral torsional
- Pandeo local en el patín de compresión

El momento nominal a flexión M_n se tomará como el menor de los valores obtenidos de dichos estados límite.

Pandeo lateral torsional

La revisión del estado límite de pandeo lateral torsional se realiza de acuerdo con la metodología expuesta en el apartado correspondiente de la sección 3.3.1.

Pandeo local en el patín de compresión

Cuando la sección no es compacta, alguno de sus miembros puede fallar por algún pandeo local. En este caso se revisa el patín de compresión. El momento nominal se determina con las ecuaciones 3.16 y 3.17 para secciones con patines no compactos y para secciones con patines esbeltos respectivamente:

$$M_n = M_p - (M_p - 0.7F_y S_x) \left(\frac{\lambda - \lambda_{pf}}{\lambda_{rf} - \lambda_{pf}} \right) \quad (3.16) \quad [F3 - 1]$$

$$M_n = \frac{0.9E k_c S_x}{\lambda^2} \quad (3.17) \quad [F3 - 2]$$

$$k_c = \frac{4}{\sqrt{\frac{h}{t_w}}} \quad (3.18)$$

$$\lambda = \frac{b_f}{2t_f} \quad (3.19)$$

Donde:

$$0.35 \leq k_c \leq 0.76$$

h = Distancia definida en la sección 2.5 (Tabla B4.1b de la Especificación AISC), in

b_f = Ancho del patín, in

t_f = Espesor del patín, in

$\lambda_{pf} = \lambda_p$ = Límite de esbeltez para un patín compacto (Tabla B4.1b de la Especificación AISC)

$\lambda_{rf} = \lambda_r$ = Límite de esbeltez para un patín no compacto (Tabla B4.1b de la Especificación AISC)

3.3.3 Otras secciones I con almas compactas o no compactas

Las disposiciones de esta sección aplican para secciones I con doble simetría sujetas a flexión alrededor de su eje principal con almas no compactas y para secciones I con simetría simple sujetas a flexión alrededor de su eje principal con almas compactas o no compactas de acuerdo con lo expuesto en la sección 2.5.

Las secciones deben revisarse para los siguientes estados límite de falla:

- Fluencia en el patín de compresión
- Pandeo lateral torsional
- Pandeo local en el patín de compresión
- Fluencia en el patín de tensión

El momento nominal a flexión M_n se tomará como el menor de los valores obtenidos de dichos estados límite.

Fluencia en el patín de compresión

El momento nominal se obtiene con la siguiente expresión:

$$M_n = R_{pc}M_{yc} \quad (3.20) \quad [F4 - 1]$$

Donde:

$M_{yc} = F_y S_{xc}$ = Momento de fluencia en el patín de compresión, kip-in

R_{pc} = Factor de plastificación del alma

S_{xc} = Módulo de sección elástico asociado al patín de compresión, in³

Pandeo lateral torsional

Al igual que en el caso de secciones compactas, el momento nominal dependerá del soporte lateral que tenga la viga, por lo tanto, de la zona donde se ubique. Para la zona 1 ($L_b \leq L_p$) el pandeo lateral torsional no aplica. Para la zona 2 ($L_p < L_b \leq L_r$) se utiliza la siguiente ecuación:

$$M_n = C_b \left[R_{pc} M_{yc} - (R_{pc} M_{yc} - F_L S_{xc}) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] \leq R_{pc} M_{yc} \quad (3.21) \quad [F4 - 2]$$

Finalmente, si $L_b > L_r$, es decir, si la viga se ubica en la zona 3:

$$M_n = F_{cr} S_{xc} \leq R_{pc} M_{yc} \quad (3.22) \quad [F4 - 3]$$

El esfuerzo crítico F_{cr} (ksi) se define:

$$F_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E}{\left(\frac{L_b}{r_t} \right)^2} \sqrt{1 + 0.078 \frac{J}{S_{xc} h_o} \left(\frac{L_b}{r_t} \right)^2} \quad (3.23) \quad [F4 - 5]$$

Si $I_{yc} / I_y \leq 0.23$, J se deberá tomar igual a cero.

Donde:

I_{yc} = Momento de inercia del patín de compresión en el eje y, in⁴

La Especificación AISC define F_L (ksi) como un esfuerzo nominal en el patín de compresión por encima del cual el estado límite de pandeo inelástico aplica y se determina con el siguiente criterio:

$$\text{Cuando } \frac{S_{xt}}{S_{xc}} \geq 0.7 \quad F_L = 0.7 F_y \quad (3.24) \quad [F4 - 6a]$$

$$\text{Cuando } \frac{S_{xt}}{S_{xc}} < 0.7 \quad F_L = F_y \frac{S_{xt}}{S_{xc}} \geq 0.5 F_y \quad (3.25) \quad [F4 - 6b]$$

Donde:

S_{xt} = Módulo de sección elástico asociado al patín de tensión, in³

Las distancias L_p (in) y L_r (in) se obtienen con las expresiones 3.26 y 3.27:

$$L_p = 1.1r_t \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (3.26) \quad [F4 - 7]$$

$$L_r = 1.95r_t \frac{E}{F_L} \sqrt{\frac{J}{S_{xc}h_o} + \sqrt{\left(\frac{J}{S_{xc}h_o}\right)^2 + 6.76\left(\frac{F_L}{E}\right)^2}} \quad (3.27) \quad [F4 - 8]$$

El factor de plastificación del alma R_{pc} se evalúa de la siguiente forma:

Cuando $I_{yc} / I_y > 0.23$

$$a) \text{ Si } \frac{h_c}{t_w} \leq \lambda_{pw} \quad R_{pc} = \frac{M_p}{M_{yc}} \quad (3.28) \quad [F4 - 9a]$$

$$b) \text{ Si } \frac{h_c}{t_w} > \lambda_{pw} \quad R_{pc} = \frac{M_p}{M_{yc}} - \left(\frac{M_p}{M_{yc}} - 1\right) \left(\frac{\lambda - \lambda_{pw}}{\lambda_{rw} - \lambda_{pw}}\right) \leq \frac{M_p}{M_{yc}} \quad (3.29) \quad [F4 - 9b]$$

Cuando $I_{yc} / I_y \leq 0.23$

$$R_{pc} = 1 \quad (3.30) \quad [F4 - 10]$$

Donde:

$$M_p = F_y Z_x \leq 1.6 F_y S_x$$

h_c = Dos veces la distancia del centroide a: paño interno del patín de compresión menos el filete o radio de curvatura, para secciones roladas; la línea más cercana de pasadores en el patín de compresión o los paños internos del patín de compresión cuando se utilice soldadura, para secciones armadas, in

$$\lambda = h_c / t_w$$

$\lambda_{pw} = \lambda_p =$ Límite de esbeltez para un alma compacta (Tabla B4.1b de la Especificación AISC)

$\lambda_{rw} = \lambda_r =$ Límite de esbeltez para un alma no compacta (Tabla B4.1b de la Especificación AISC)

El radio de giro efectivo r_t (in) para pandeo lateral torsional depende de las condiciones del patín de compresión. Para secciones I con patín de compresión rectangular, r_t se obtiene con:

$$r_t = \frac{b_{fc}}{\sqrt{12 \left(1 + \frac{1}{6} a_w\right)}} \quad (3.31) \quad [F4 - 11]$$

$$a_w = \frac{h_c t_w}{b_{fc} t_{fc}} \quad (3.32) \quad [F4 - 12]$$

Donde:

$b_{fc} =$ Ancho del patín de compresión, in

$t_{fc} =$ Espesor del patín de compresión, in

$t_w =$ Espesor del alma, in

Para secciones I con canales tapa o cubreplacas en el patín de compresión, r_t tomará el valor del radio de giro de los componentes del patín en compresión más un tercio del área del alma en compresión debido a la aplicación de un momento solo alrededor del eje principal.

Pandeo local en el patín de compresión

El pandeo local en el patín de compresión no se presenta en secciones con patín compacto. Para secciones con patín no compacto y esbelto, el momento nominal se obtiene con las ecuaciones 3.33 y 3.34 respectivamente:

$$M_n = R_{pc}M_{yc} - (R_{pc}M_{yc} - F_L S_{xc}) \left(\frac{\lambda - \lambda_{pf}}{\lambda_{rf} - \lambda_{pf}} \right) \quad (3.33) \quad [F4 - 13]$$

$$M_n = \frac{0.9Ek_c S_{xc}}{\lambda^2} \quad (3.34) \quad [F4 - 14]$$

$$k_c = \frac{4}{\sqrt{\frac{h}{t_w}}} \quad (3.18)$$

$$\lambda = \frac{b_{fc}}{2t_{fc}} \quad (3.35)$$

Donde:

$$0.35 \leq k_c \leq 0.76$$

$\lambda_{pf} = \lambda_p$ = Límite de esbeltez para un patín compacto (Tabla B4.1b de la Especificación AISC)

$\lambda_{rf} = \lambda_r$ = Límite de esbeltez para un patín no compacto (Tabla B4.1b de la Especificación AISC)

Fluencia en el patín de tensión

El momento nominal M_n depende de la relación entre los módulos de sección elástico asociados al patín de tensión y compresión. Cuando el primero es mayor o igual al segundo, el presente estado límite no aplica, en caso contrario, el momento nominal se obtiene con la siguiente expresión:

$$M_n = R_{pt}M_{yt} \quad (3.36) \quad [F4 - 15]$$

Donde:

$M_{yt} = F_y S_{xt}$ = Momento de fluencia en el patín de tensión, kip-in

R_{pt} = Factor de plastificación del alma correspondiente al estado límite de fluencia en el patín de tensión

El factor de plastificación del alma R_{pt} se evalúa de la siguiente forma:

Cuando $I_{yc} / I_y > 0.23$

$$a) \text{ Si } \frac{h_c}{t_w} \leq \lambda_{pw} \quad R_{pt} = \frac{M_p}{M_{yt}} \quad (3.37) \quad [F4 - 16a]$$

$$b) \text{ Si } \frac{h_c}{t_w} > \lambda_{pw} \quad R_{pt} = \frac{M_p}{M_{yt}} - \left(\frac{M_p}{M_{yt}} - 1 \right) \left(\frac{\lambda - \lambda_{pw}}{\lambda_{rw} - \lambda_{pw}} \right) \leq \frac{M_p}{M_{yt}} \quad (3.38) \quad [F4 - 16b]$$

Cuando $I_{yc} / I_y \leq 0.23$

$$R_{pt} = 1 \quad (3.39) \quad [F4 - 17]$$

Donde:

$$M_p = F_y Z_x \leq 1.6 F_y S_x$$

h_c = Dos veces la distancia del centroide a: paño interno del patín de compresión menos el filete o radio de curvatura, para secciones roladas; la línea más cercana de pasadores en el patín de compresión o los paños internos del patín de compresión cuando se utilice soldadura, para secciones armadas, in

$$\lambda = h_c / t_w$$

$\lambda_{pw} = \lambda_p =$ Límite de esbeltez para un alma compacta (Tabla B4.1b de la Especificación AISC)

$\lambda_{rw} = \lambda_r =$ Límite de esbeltez para un alma no compacta (Tabla B4.1b de la Especificación AISC)

3.3.4 Simetría doble y simple en secciones I con almas esbeltas

Las disposiciones de esta sección aplican para secciones I con doble y simple simetría sujetas a flexión alrededor de su eje principal con almas esbeltas. Las secciones deben revisarse para los siguientes estados límite de falla:

- Fluencia en el patín de compresión
- Pandeo lateral torsional
- Pandeo local en el patín de compresión
- Fluencia en el patín de tensión

El momento nominal a flexión M_n se tomará como el menor de los valores obtenidos de los estados límite anteriores.

Ciertas secciones I poseen características que aplican para las secciones 3.3.3 y 3.3.4, para estos casos, el diseño es válido utilizando cualquiera de las dos metodologías; sin embargo, resultan diseños más conservadores en la segunda.

Fluencia en el patín de compresión

El momento nominal se obtiene con la siguiente fórmula:

$$M_n = R_{pg} F_y S_{xc} \quad (3.40) \quad [F5 - 1]$$

Pandeo lateral torsional

El momento nominal debido al estado límite de pandeo lateral torsional se evalúa de la siguiente manera:

$$M_n = R_{pg} F_{cr} S_{xc} \quad (3.41) \quad [F5 - 2]$$

Dependiendo del soporte lateral que tenga la viga, el valor del esfuerzo crítico F_{cr} cambiará. Como ya se estudió, las vigas ubicadas en la zona 1 ($L_b \leq L_r$) no tienen problemas de pandeo. Para vigas en las zonas 2 ($L_p < L_b \leq L_r$) y 3 ($L_b > L_r$), F_{cr} se calcula con las expresiones 3.42 y 3.43 respectivamente:

$$F_{cr} = C_b \left[F_y - (0.3F_y) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] \leq F_y \quad (3.42) \quad [F5 - 3]$$

$$F_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E}{\left(\frac{L_b}{r_t} \right)^2} \leq F_y \quad (3.43) \quad [F5 - 4]$$

La longitud L_p es igual a la ecuación 3.26 y el radio de giro efectivo para pandeo lateral torsional r_t se define en la sección 3.3.3. La distancia L_r (in) se calcula de la siguiente forma:

$$L_r = \pi r_t \sqrt{\frac{E}{0.7F_y}} \quad (3.44) \quad [F5 - 5]$$

R_{pg} es un factor reductor de momento y se calcula con la ecuación 2.45:

$$R_{pg} = 1 - \frac{a_w}{1200 + 300a_w} \left(\frac{h_c}{t_w} - 5.7 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \right) \leq 1 \quad (3.45) \quad [F5 - 6]$$

El término a_w se define en la sección anterior en la ecuación 2.32 y no debe de exceder de 10.

Pandeo local en el patín de compresión

Al igual que en el estado límite de pandeo lateral torsional, en el pandeo local en el patín de compresión, el momento nominal M_n depende de un esfuerzo crítico F_{cr} que se define a continuación:

$$M_n = R_{pg} F_{cr} S_{xc} \quad (3.46) \quad [F5 - 7]$$

Las secciones con patín compacto no presentan problemas de pandeo local. Por el contrario, las secciones con patín no compacto y esbelto si lo presentan y el respectivo esfuerzo crítico F_{cr} se calcula con las siguientes expresiones:

Secciones con patines no compactos:

$$F_{cr} = F_y - (0.3F_y) \left(\frac{\lambda - \lambda_{pf}}{\lambda_{rf} - \lambda_{pf}} \right) \quad (3.47) \quad [F5 - 8]$$

Secciones con patines esbeltos:

$$F_{cr} = \frac{0.9Ek_c}{\left(\frac{b_f}{2t_f} \right)^2} \quad (3.48) \quad [F5 - 9]$$

$$k_c = \frac{4}{\sqrt{\frac{h}{t_w}}} \quad (3.18)$$

$$\lambda = \frac{b_{fc}}{2t_{fc}} \quad (3.35)$$

Donde:

$$0.35 \leq k_c \leq 0.76$$

$\lambda_{pf} = \lambda_p$ = Límite de esbeltez para un patín compacto (Tabla B4.1b de la Especificación AISC)

$\lambda_{rf} = \lambda_r =$ Límite de esbeltez para un patín no compacto (Tabla B4.1b de la Especificación AISC)

Fluencia en el patín de tensión

El momento nominal M_n depende de la relación entre los módulos de sección elástico asociados al patín de tensión y de compresión. Cuando $S_{xt} \geq S_{xc}$, no hay fluencia en el patín de tensión. Cuando $S_{xt} < S_{xc}$:

$$M_n = F_y S_{xt} \quad (3.49) \quad [F5 - 10]$$

CAPÍTULO 4. DISEÑO CONVENCIONAL DE VIGAS

En este capítulo se ilustra la técnica del dimensionamiento por medio de una serie de ejemplos sencillos que muestran los procedimientos de diseño descritos en el capítulo anterior. El capítulo se divide en tres partes: primero se resolverán los ejemplos de forma manual haciendo uso de la especificación AISC 360-16, posteriormente, se trabajará con apoyo de ayudas de diseño del Manual AISC, y finalmente, se expondrá un ejemplo resuelto con software comercial. La intención principal es presentar soluciones razonables que hagan comprender el proceso que se sigue al dimensionar vigas de acero bajo diferentes circunstancias de soporte lateral haciendo uso de las metodologías LRFD y ASD de las Especificaciones AISC 360-16 e IMCA 2015. Los resultados, en algunos casos, es proponer la sección más ligera, y en otros, es revisar un perfil dado bajo la acción de determinadas cargas. Se aclara que en ciertos textos se menciona el término *eficiencia*, pero en otros el de “ratio”, ambos se refieren al cociente del momento último entre el momento de diseño y/o al cociente del momento admisible entre el momento permisible para LRFD y ASD respectivamente. En el presente trabajo, se hace uso del segundo. Los ejemplos propuestos de ninguna manera deben tomarse como modelos rígidos de cálculo, debiéndose considerar más bien como guías para el estudio de los elementos estructurales ya mencionados.

4.1 Solución con la Especificación AISC 360-16

En esta sección se realizará una serie de ejemplos haciendo uso de los procedimientos y expresiones de la Especificación AISC 360-16. Dicha especificación es gratuita y su empleo es la forma más tradicional para resolver un problema de este tipo. Se mostrará el paso a paso en cada ejercicio. En los ejemplos siguientes se ilustra el diseño bajo diferentes contextos de soporte lateral en el patín de compresión de las vigas, es decir, se ilustra el dimensionamiento en las diferentes zonas (1, 2 y 3), así como bajo diferentes tipos de apoyos y cargas.

4.1.1 Ejemplo 1: Momento plástico (Zona 1) en viga simplemente apoyada

La losa de concreto reforzado de 5 in de espesor mostrada en la figura 4.1 va a colocarse sobre secciones W de acero con separación de 8 ft entre centros. Las vigas tienen un claro de 20 ft y se suponen simplemente apoyadas. Si la losa de concreto se diseñó para resistir una carga viva de 100 psi, determine mediante los procedimientos LRFD y ASD si el perfil W12x22 es capaz de soportar dicha losa. Se supone que el patín de compresión de la viga recibirá soporte lateral completo de la losa de concreto. El concreto pesa 0.15 k/ft^3 . Considere $F_y = 50 \text{ ksi}$.

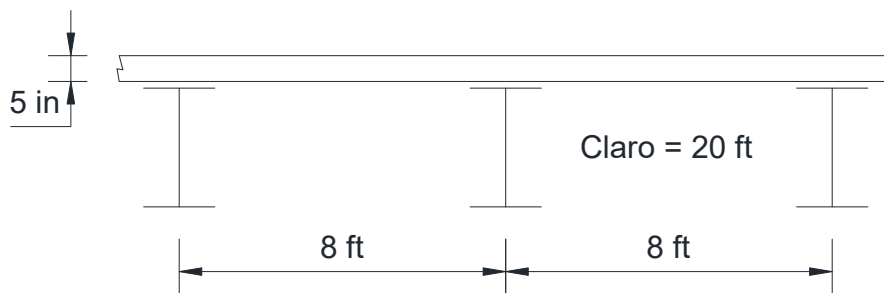


Figura 4.1. Sistema de entrepiso. Elaboración propia.

Se reúne la información del perfil W12x22: $d = 12.3 \text{ in}$, $t_w = 0.26 \text{ in}$, $b_f = 4.03 \text{ in}$, $t_f = 0.425 \text{ in}$, $b_f/2t_f = 4.74$, $h/t_w = 41.8$, $I_x = 156 \text{ in}^4$, $S_x = 25.4 \text{ in}^3$, $r_x = 4.91 \text{ in}$, $Z_x = 29.3 \text{ in}^3$, $r_y = 0.848 \text{ in}$, $r_{ts} = 1.04 \text{ in}$, $h_o = 11.9 \text{ in}$, $J = 0.293 \text{ in}^4$ y $C_w = 164 \text{ in}^6$, y del acero: $F_y = 50 \text{ ksi}$ y $E = 29,000 \text{ ksi}$.

- Determinar las cargas que deberá soportar cada una de las vigas:

$$\text{Peso perfil} = 0.022 \text{ k/ft}$$

$$\text{Peso losa} = (5 \text{ in})(0.15 \text{ k/ft}^3)(8 \text{ ft}) \left(\frac{1 \text{ ft}}{12 \text{ in}} \right) = 0.5 \text{ k/ft}$$

$$w_D = 0.022 \text{ k/ft} + 0.5 \text{ k/ft} = 0.522 \text{ k/ft}$$

$$w_L = (8 \text{ ft})(0.1 \text{ ksi}) = 0.8 \text{ k/ft}$$

LRFD:

$$w_u = 1.2w_D + 1.6w_L = 1.2(0.522 \text{ k/ft}) + 1.6(0.8 \text{ k/ft}) = 1.91 \text{ k/ft}$$

ASD:

$$w_a = w_D + w_L = 0.522 \text{ k/ft} + 0.8 \text{ k/ft} = 1.32 \text{ k/ft}$$

2. Calcular el momento último y el momento admisible.

LRFD:

$$M_u = \frac{w_u L^2}{8} = \frac{(1.91 \text{ k/ft})(20 \text{ ft})^2}{8} = 95.5 \text{ k-ft}$$

ASD:

$$M_a = \frac{w_a L^2}{8} = \frac{(1.32 \text{ k/ft})(20 \text{ ft})^2}{8} = 66 \text{ k-ft}$$

3. Revisar la relación ancho-espesor. De acuerdo con la Tabla B4.1b (figuras 2.5-a y 2.5-b), las expresiones son las siguientes:

Patín

$$\lambda_{\text{patín}} = \frac{b_f}{2t_f} = 4.74$$

$$\lambda_p = 0.38 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0.38 \sqrt{\frac{29,000 \text{ ksi}}{50 \text{ ksi}}} = 9.15$$

$$\lambda_r = 1.0 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1.0 \sqrt{\frac{29,000 \text{ ksi}}{50 \text{ ksi}}} = 24.08$$

El patín es compacto.

Alma

$$\lambda_{\text{alma}} = \frac{h}{t_w} = 41.8$$

$$\lambda_p = 3.76 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 3.76 \sqrt{\frac{29,000 \text{ ksi}}{50 \text{ ksi}}} = 90.55$$

$$\lambda_r = 5.70 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 5.70 \sqrt{\frac{29,000 \text{ ksi}}{50 \text{ ksi}}} = 137.27$$

El alma es compacta.

- Determinar la resistencia nominal. La viga, por parte de la losa, recibe soporte lateral completo en su patín de compresión, con lo cual se tiene un $L_b = 0$; por consiguiente, podrá alcanzar la meseta de momento plástico. Dado lo anterior, el estado límite de pandeo lateral torsional no aplica y se revisa exclusivamente fluencia.

Fluencia

$$M_n = M_p = F_y Z_x \quad (3.4) \quad [F2 - 1]$$

$$M_n = M_p = (50 \text{ ksi})(29.3 \text{ in}^3) \left(\frac{1 \text{ ft}}{12 \text{ in}} \right) = 122.08 \text{ k} - \text{ft}$$

- Calcular la resistencia de diseño y la resistencia permisible.

LRFD:

$$\Phi_b M_n = 0.9(122.08 \text{ k} - \text{ft}) = 109.87 \text{ k} - \text{ft}$$

ASD:

$$\frac{M_n}{\Omega_b} = \frac{122.08 \text{ k} - \text{ft}}{1.67} = 73.10 \text{ k} - \text{ft}$$

- Finalmente, se determina el “ratio” y el resultado del ejemplo.

LRFD:

$$\frac{M_u}{\Phi_b M_n} = \frac{95.5 \text{ k} - \text{ft}}{109.87 \text{ k} - \text{ft}} = 0.87 < 1$$

ASD:

$$\frac{M_a}{M_n/\Omega_b} = \frac{66 \text{ k} - ft}{73.10 \text{ k} - ft} = 0.90 < 1$$

El perfil W12x22 es adecuado para soportar la losa de concreto.

4.1.2 Ejemplo 2: Viga con patines no compactos (Zona 1)

El siguiente ejemplo fue tomando de McCormac y Csernak, 2012. Determine la resistencia de diseño a flexión LRFD y la resistencia permisible a flexión ASD para una sección W12x65 de 50 ksi que tiene soporte lateral completo.

Los datos del perfil W12x65 son: $d = 12.1$ in, $t_w = 0.39$ in, $b_f = 12$ in, $t_f = 0.605$ in, $b_f/2t_f = 9.92$, $h/t_w = 24.9$, $I_x = 533$ in⁴, $S_x = 87.9$ in³, $r_x = 5.28$ in, $Z_x = 96.8$ in³, $r_y = 3.02$ in, $r_{ts} = 3.38$ in, $h_o = 11.5$ in, $J = 2.18$ in⁴ y $C_w = 5,780$ in⁶. El módulo de rigidez del acero es $E = 29,000$ ksi.

1. Determinar la relación ancho-espesor de acuerdo con la Tabla B4.1b del Manual AISC.

Patín

$$\lambda_{patin} = \frac{b_f}{2t_f} = 9.92$$

$$\lambda_p = 0.38 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0.38 \sqrt{\frac{29,000 \text{ ksi}}{50 \text{ ksi}}} = 9.15$$

$$\lambda_r = 1.0 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1.0 \sqrt{\frac{29,000 \text{ ksi}}{50 \text{ ksi}}} = 24.08$$

El patín es no compacto.

Alma

$$\lambda_{alma} = \frac{h}{t_w} = 24.9$$

$$\lambda_p = 3.76 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 3.76 \sqrt{\frac{29,000 \text{ ksi}}{50 \text{ ksi}}} = 90.55$$

$$\lambda_r = 5.70 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 5.70 \sqrt{\frac{29,000 \text{ ksi}}{50 \text{ ksi}}} = 137.27$$

El alma es compacta.

2. Calcular la resistencia nominal. En esta ocasión la viga es no compacta, debido a que presenta patines no compactos y alma compacta, por lo que se seguirán las disposiciones de la sección F3 del capítulo F de la especificación (Secciones W (I) con doble simetría con almas compactas y patines no compactos o esbeltos). De acuerdo con dicha sección, los estados límites que se deben de revisar son pandeo lateral torsional y pandeo local en el patín de compresión; sin embargo, el ejemplo indica que la viga tiene soporte lateral completo en su patín de compresión, por que el primero no aplica ($L_b = 0$). Para revisar el pandeo local en el patín de compresión en secciones con patines no compactos se utiliza la siguiente expresión:

$$M_n = M_p - (M_p - 0.7F_y S_x) \left(\frac{\lambda - \lambda_{pf}}{\lambda_{rf} - \lambda_{pf}} \right) \quad (3.16) \quad [F3 - 1]$$

Un patín no compacto es susceptible al pandeo local del mismo, por lo cual, la ecuación 3.16 hace una reducción de la resistencia recortando la meseta de momento plástico M_p , lo que da lugar a una nueva meseta M'_p , dicha meseta se ilustra en la figura 4.2. Continuando con las operaciones, se tiene:

Pandeo local en el patín de compresión

$$M_p = F_y Z_x = (50 \text{ ksi})(96.8 \text{ in}^3) = 4,840 \text{ k} - \text{in}$$

$$M_n = (4,840 \text{ k} - \text{in}) - (4,840 - 0.7(50 \text{ ksi})(87.9 \text{ in}^3)) \left(\frac{9.92 - 9.15}{24.08 - 9.15} \right)$$

$$M_n = 4,749.05 \text{ k} - \text{in} = 395.75 \text{ k} - \text{ft}$$

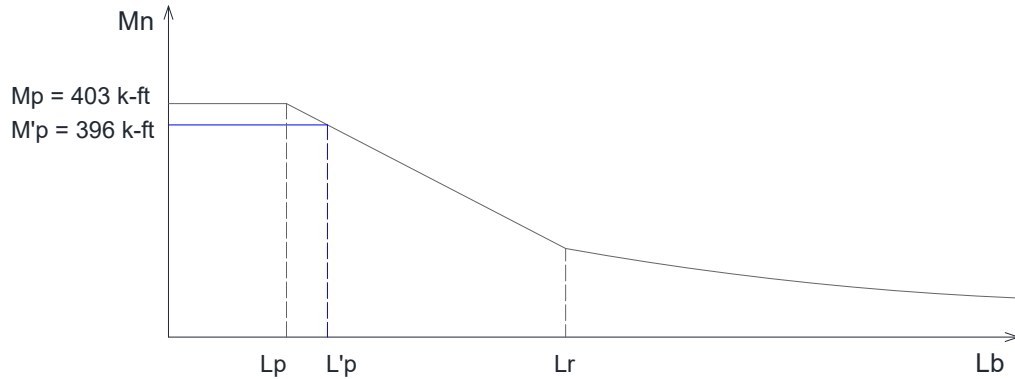


Figura 4.2. Gráfica típica de secciones I con patines no compactos y almas compactas.
Elaboración propia.

3. Calcular las resistencias de diseño y permisible.

LRFD:

$$\Phi_b M_n = 0.9(395.75 \text{ k} - \text{ft}) = 356.18 \text{ k} - \text{ft}$$

ASD:

$$\frac{M_n}{\Omega_b} = \frac{395.75 \text{ k} - \text{ft}}{1.67} = 236.98 \text{ k} - \text{ft}$$

Los autores reportan $\Phi_b M_n = 356 \text{ k-ft}$ y $M_n/\Omega_b = 237 \text{ k-ft}$ para LRFD y ASD respectivamente.

4.1.3 Ejemplo 3: PLT Inelástico (Zona 2) en viga simplemente apoyada

Al igual que el anterior, este ejemplo es tomado de McCormac y Csernak, 2012. Usando acero de 50 ksi, seleccione la sección más ligera disponible para la viga de la figura 4.3, que tiene soporte lateral en su patín de compresión sólo en sus extremos. Suponga $C_b = 1$ para este ejemplo (en realidad es 1.14). Use ambos métodos LRFD y ASD.

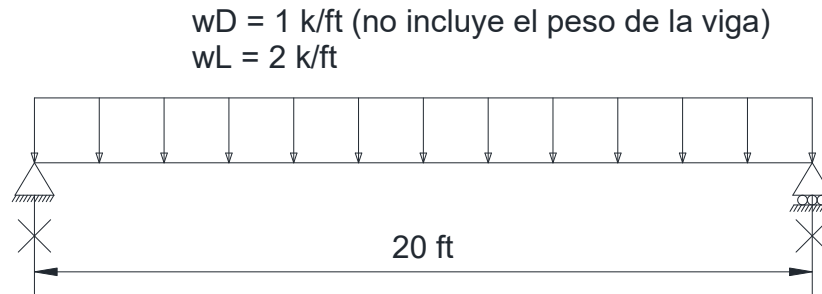


Figura 4.3. Viga simplemente apoyada con carga uniformemente distribuida. Elaboración propia.

1. Determinar las cargas sobre la viga.

Inicialmente se despreciará el peso de la viga. Dicho peso se revisará posteriormente una vez elegido el perfil.

LRFD:

$$w_u = 1.2w_D + 1.6w_L = 1.2(1 \text{ k/ft}) + 1.6(2 \text{ k/ft}) = 4.4 \text{ k/ft}$$

ASD:

$$w_a = w_D + w_L = 1 \text{ k/ft} + 2 \text{ k/ft} = 3 \text{ k/ft}$$

2. Calcular el momento último y el momento admisible.

LRFD:

$$M_u = \frac{w_u L^2}{8} = \frac{(4.4 \text{ k/ft})(20 \text{ ft})^2}{8} = 220 \text{ k-ft}$$

ASD:

$$M_a = \frac{w_a L^2}{8} = \frac{(3 \text{ k/ft})(20 \text{ ft})^2}{8} = 150 \text{ k-ft}$$

3. Elección de viga. El ejemplo solicita seleccionar el perfil más ligero, por lo que, es necesario trabajar con tanteos, es decir, elegir una sección y revisar

si tiene suficiente resistencia, y en caso que no la tenga, elegir otra sección y proceder de la misma forma. Encontrar un perfil que cumpla con resistencia, no significa que dicho perfil sea el menos pesado, por lo que, la forma de proceder será elegir un peralte y probar con su sección más ligera. La búsqueda continuará eligiendo el perfil inmediato superior hasta encontrar uno que tenga suficiente resistencia. La elección del peralte será en base a reglas de pre-dimensionamiento de vigas dependiendo del claro y del tipo de apoyo. Se reconoce que trabajar con tanteos es sumamente tedioso y no garantiza encontrar al perfil más ligero; sin embargo, dadas las condiciones del problema es el camino a seguir.

Utilizando un criterio de pre-dimensionamiento para viga simplemente apoyada se tiene:

$$\frac{L}{20} = \frac{20 \text{ ft}}{20} = \frac{240 \text{ in}}{20} = 12 \text{ in}$$

Dado que se pide el perfil más ligero, sería lógico que se proponga W12x14 como primera revisión; sin embargo, en el Ejemplo 4.1.1 se determinó $\Phi_b M_n = 109.87 \text{ k-ft}$ y $M_n/\Omega_b = 73.10 \text{ k-ft}$ para W12x22 en zona 1, con lo cual se tiene:

$$\frac{M_u}{\Phi_b M_n} = \frac{220 \text{ k-ft}}{109.87 \text{ k-ft}} = 2 > 1 \qquad \frac{M_a}{M_n/\Omega_b} = \frac{150 \text{ k-ft}}{73.10 \text{ k-ft}} = 2.05 > 1$$

Es evidente que se requiere una sección más grande. Puesto que los “ratios” son del orden de 2, se propondrá un perfil con el doble de Z_x . Se propone W12x45 ($d = 12.1 \text{ in}$, $t_w = 0.335 \text{ in}$, $b_f = 8.05 \text{ in}$, $t_f = 0.575 \text{ in}$, $b_f/2t_f = 7$, $h/t_w = 29.6$, $I_x = 348 \text{ in}^4$, $S_x = 57.7 \text{ in}^3$, $r_x = 5.15 \text{ in}$, $Z_x = 64.2 \text{ in}^3$, $r_y = 1.95 \text{ in}$, $r_{ts} = 2.23 \text{ in}$, $h_o = 11.5 \text{ in}$, $J = 1.26 \text{ in}^4$ y $C_w = 1,650 \text{ in}^6$) con $F_y = 50 \text{ ksi}$ y $E = 29,000 \text{ ksi}$.

4. Revisión de la relación ancho-espesor (Tabla B4.1b de la Especificación AISC).

Patín

$$\lambda_{patin} = \frac{b_f}{2t_f} = 7$$

$$\lambda_p = 0.38 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0.38 \sqrt{\frac{29,000 \text{ ksi}}{50 \text{ ksi}}} = 9.15$$

$$\lambda_r = 1.0 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1.0 \sqrt{\frac{29,000 \text{ ksi}}{50 \text{ ksi}}} = 24.08$$

El patín es compacto.

Alma

$$\lambda_{alma} = \frac{h}{t_w} = 29.6$$

$$\lambda_p = 3.76 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 3.76 \sqrt{\frac{29,000 \text{ ksi}}{50 \text{ ksi}}} = 90.55$$

$$\lambda_r = 5.70 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 5.70 \sqrt{\frac{29,000 \text{ ksi}}{50 \text{ ksi}}} = 137.27$$

El alma es compacta.

5. Determinar la resistencia nominal. La sección es compacta (sección F2 del capítulo F de la especificación), por lo que, los estados límites que se deben de revisar son fluencia y pandeo lateral torsional.

Fluencia

$$M_n = M_p = (50 \text{ ksi})(64.2 \text{ in}^3) \left(\frac{1 \text{ ft}}{12 \text{ in}} \right) = 267.5 \text{ k} - \text{ft}$$

Pandeo lateral torsional

En este ejemplo la viga tiene soporte lateral en su patín de compresión sólo en sus extremos, por lo tanto, $L_b = 20 \text{ ft} = 240 \text{ in}$. Se deben de determinar las distancias L_p y L_r para evaluar en qué zona se encuentra la viga.

$$L_p = 1.76r_y \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (3.10) \quad [F2 - 5]$$

$$L_p = 1.76(1.95 \text{ in}) \sqrt{\frac{29,000 \text{ ksi}}{50 \text{ ksi}}} = 82.65 \text{ in}$$

$$L_r = 1.95r_{ts} \frac{E}{0.7F_y} \sqrt{\frac{Jc}{S_x h_o} + \sqrt{\left(\frac{Jc}{S_x h_o}\right)^2 + 6.76 \left(\frac{0.7F_y}{E}\right)^2}} \quad (3.11) \quad [F2 - 6]$$

El coeficiente $c = 1$ para secciones W (I) con simetría doble.

$$L_r = 1.95(2.23) \frac{29,000}{0.7(50)} \sqrt{\frac{(1.26)(1)}{(57.7)(11.5)} + \sqrt{\left(\frac{(1.26)(1)}{(57.7)(11.5)}\right)^2 + 6.76 \left(\frac{0.7(50)}{29,000}\right)^2}}$$

$$L_r = 268.82 \text{ in}$$

Como $L_p < L_b < L_r$, la viga se encuentra en la zona 2. La resistencia nominal por pandeo lateral torsional se calcula con la ecuación 2.5:

$$M_n = C_b \left[M_p - (M_p - 0.7F_y S_x) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] \leq M_p \quad (3.5) \quad [F2 - 2]$$

$$M_n = 1 \left[3,210 - (3,210 - 0.7(50)(57.7)) \left(\frac{240 - 82.65}{268.82 - 82.65} \right) \right]$$

$$M_n = 2,203.8 \text{ k-in} = 183.65 \text{ k-ft}$$

Como $M_n = 183.65 \text{ k-ft} < M_p = 267.5 \text{ k-ft}$, rige el pandeo lateral torsional.

6. Determinar la resistencia de diseño y la resistencia permisible.

LRFD:

$$\Phi_b M_n = 0.9(183.65 k - ft) = 165.29 k - ft$$

$$\Phi_b M_n = 165.29 k - ft < M_u = 220 k - ft$$

$$\frac{M_u}{\Phi_b M_n} = \frac{220 k - ft}{165.29 k - ft} = 1.33 > 1 \quad \text{No se acepta.}$$

ASD:

$$\frac{M_n}{\Omega_b} = \frac{183.65 k - ft}{1.67} = 109.97 k - ft$$

$$\frac{M_n}{\Omega_b} = 109.97 k - ft < M_a = 150 k - ft$$

$$\frac{M_a}{M_n/\Omega_b} = \frac{150 k - ft}{109.97 k - ft} = 1.36 > 1 \quad \text{No se acepta.}$$

7. Se realiza una segunda revisión, en la cual se propone un perfil con el mismo peralte, pero más pesado (W12x50). Los resultados se muestran a continuación:

LRFD:

$$\Phi_b M_n = 191.40 k - ft < M_u = 220 k - ft$$

$$\frac{M_u}{\Phi_b M_n} = \frac{220 k - ft}{191.40 k - ft} = 1.15 > 1 \quad \text{No se acepta.}$$

ASD:

$$\frac{M_n}{\Omega_b} = 127.35 k - ft < M_a = 150 k - ft$$

$$\frac{M_a}{M_n/\Omega_b} = \frac{150 k - ft}{127.35 k - ft} = 1.18 > 1 \quad \text{No se acepta.}$$

8. Una tercera propuesta es W12x53. Sus propiedades geométricas son: $d = 12.1$ in, $t_w = 0.345$ in, $b_f = 10$ in, $t_f = 0.575$ in, $b_f/2t_f = 8.69$, $h/t_w = 28.1$, $I_x = 425$ in⁴, $S_x = 70.6$ in³, $r_x = 5.23$ in, $Z_x = 77.9$ in³, $r_y = 2.48$ in, $r_{ts} = 2.79$ in, $h_o = 11.5$ in, $J = 1.58$ in⁴ y $C_w = 3,160$ in⁶.
9. Se revisa la relación ancho-espesor de la sección.

Patín

$$\lambda_{patin} = 8.69 \quad \lambda_p = 9.15 \quad \lambda_r = 24.08$$

El patín es compacto

Alma

$$\lambda_{alma} = 28.1 \quad \lambda_p = 90.55 \quad \lambda_r = 137.27$$

El alma es compacta.

10. Cálculo de la resistencia nominal del perfil W12x53.

Fluencia

$$M_n = M_p = (50 \text{ ksi})(77.9 \text{ in}^3) \left(\frac{1 \text{ ft}}{12 \text{ in}} \right) = 324.58 \text{ k} - \text{ft}$$

Pandeo lateral torsional

$$L_p = 1.76(2.48 \text{ in}) \sqrt{\frac{29,000 \text{ ksi}}{50 \text{ ksi}}} = 105.12 \text{ in}$$

$$L_r = 1.95(2.79) \frac{29,000}{0.7(50)} \sqrt{\frac{(1.58)(1)}{(70.6)(11.5)} + \sqrt{\left(\frac{(1.58)(1)}{(70.6)(11.5)} \right)^2 + 6.76 \left(\frac{0.7(50)}{29,000} \right)^2}}$$

$$L_r = 338.49 \text{ in}$$

Como $L_p < L_b = 240 \text{ in} < L_r$, la viga se encuentra en la zona 2, así entonces, se procede como en el primer caso:

$$M_n = 1 \left[3,895 - (3,895 - 0.7(50)(70.6)) \left(\frac{240 - 105.12}{338.49 - 105.12} \right) \right]$$

$$M_n = 3,071.98 \text{ k} - \text{in} = 256 \text{ k} - \text{ft}$$

Como $M_n = 256 \text{ k-ft} < M_p = 324.58 \text{ k-ft}$, rige el pandeo lateral torsional.

11. Determinar la resistencia de diseño y la resistencia permisible.

LRFD:

$$\Phi_b M_n = 0.9(256 \text{ k} - \text{ft}) = 230.40 \text{ k} - \text{ft}$$

$$\Phi_b M_n > M_u = 220 \text{ k} - \text{ft}$$

ASD:

$$\frac{M_n}{\Omega_b} = \frac{256 \text{ k} - \text{ft}}{1.67} = 153.29 \text{ k} - \text{ft}$$

$$\frac{M_n}{\Omega_b} > M_a = 150 \text{ k} - \text{ft}$$

12. Como se expuso previamente en el cálculo de las cargas, es necesario revisar la sección incluyendo su peso propio, ya que la viga se tiene que cargar a si misma. Por lo tanto, se procede a calcular nuevamente las cargas y las acciones:

LRFD:

$$w_u = 1.2(1 \text{ k/ft} + 0.053 \text{ k/ft}) + 1.6(2 \text{ k/ft}) = 4.46 \text{ k/ft}$$

$$M_u = \frac{(4.46 \text{ k/ft})(20 \text{ ft})^2}{8} = 223 \text{ k} - \text{ft}$$

ASD:

$$w_a = (1k/ft + 0.053 k/ft) + (2 k/ft) = 3.05 k/ft$$

$$M_a = \frac{(3.05 k/ft)(20 ft)^2}{8} = 152.5 k - ft$$

En ambos métodos la sección es adecuada:

$$\Phi_b M_n = 230.40 k - ft > M_u = 223 k - ft$$

$$\frac{M_n}{\Omega_b} = 153.29 k - ft > M_a = 152.5 k - ft$$

13. Finalmente, se determinan las respectivas eficiencias o “ratios”:

LRFD:

$$\frac{M_u}{\Phi_b M_n} = 0.97 < 1$$

ASD:

$$\frac{M_a}{M_n/\Omega_b} = 0.99 < 1$$

La sección propuesta es W12x53. Como se vió, el procedimiento realizado es extenso y su resultado, más bien es una aproximación, ya que no se puede garantizar que dicha sección sea la más ligera.

4.1.4 Ejemplo 4: PLT Inelástico (Zona 2) en viga simplemente apoyada con C_b

La viga de la figura 4.4 es un perfil W21x93 de acero de 50 ksi y tiene soporte lateral en su patín de compresión en sus extremos y en el centro del claro. Determine con los métodos LRFD y ASD si la viga es capaz de soportar las siguientes cargas:

$$w_D = 1.1 \text{ k/ft}$$

$$w_L = 2.2 \text{ k/ft}$$

$$P_D = 5 \text{ k}$$

$$P_L = 10 \text{ k}$$

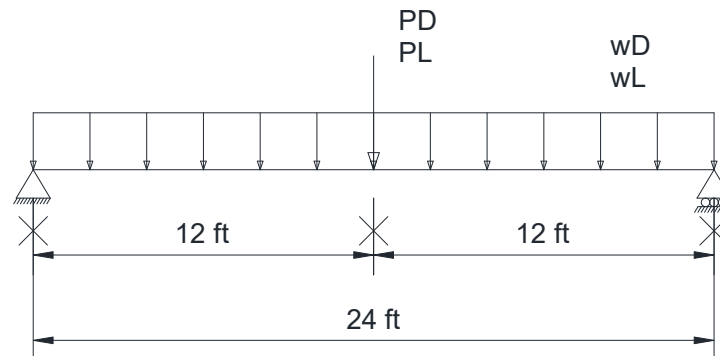


Figura 4.4. Viga simplemente apoyada con soporte lateral en su patín de compresión en sus extremos y en el centro del claro. Elaboración propia.

El acero empleado tiene un esfuerzo de fluencia $F_y = 50$ ksi y un módulo de rigidez $E = 29,000$ ksi.

Las propiedades geométricas del perfil W21x93 son: $d = 21.6$ in, $t_w = 0.58$ in, $b_f = 8.42$ in, $t_f = 0.93$ in, $b_f/2t_f = 4.53$, $h/t_w = 32.3$, $I_x = 2,070$ in⁴, $S_x = 192$ in³, $r_x = 8.7$ in, $Z_x = 221$ in³, $r_y = 1.84$ in, $r_{ts} = 2.24$ in, $h_o = 20.7$ in, $J = 6.03$ in⁴ y $C_w = 9,940$ in⁶. El peso de la sección es 0.093 k/ft.

1. Determinar las cargas últimas y admisibles que deberá soportar la viga. En este ejemplo dicha viga presenta cargas uniformemente distribuidas y cargas puntuales, la forma de proceder es la siguiente:

LRFD:

$$P_u = 1.2P_D + 1.6P_L = 1.2(5 k) + 1.6(10 k) = 22 k$$

$$w_u = 1.2(w_D + \text{Peso propio}) + 1.6w_L$$

$$w_u = 1.2(1.1 k/ft + 0.093 k/ft) + 1.6(2.2 k/ft) = 4.95 k/ft$$

ASD:

$$P_a = P_D + P_L = 5 k + 10 k = 15 k$$

$$w_a = (w_D + \text{Peso propio}) + w_L$$

$$w_a = (1.1 k/ft + 0.093 k/ft) + 2.2 k/ft = 3.39 k/ft$$

2. Calcular el momento último y el momento admisible para el método LRFD y ASD respectivamente.

LRFD:

$$M_u = \frac{P_u L}{4} + \frac{w_u L^2}{8}$$

$$M_u = \frac{(22 k)(24 ft)}{4} + \frac{(4.95 k/ft)(24 ft)^2}{8} = 488.52 k - ft$$

ASD:

$$M_a = \frac{P_a L}{4} + \frac{w_a L^2}{8}$$

$$M_a = \frac{(15 k)(24 ft)}{4} + \frac{(3.39 k/ft)(24 ft)^2}{8} = 334.3 k - ft$$

3. De acuerdo con la Tabla B4.1b (figuras 2.5-a y 2.5-b), la revisión ancho-espesor es la siguiente:

Patín

$$\lambda_{patin} = \frac{b_f}{2t_f} = 4.53$$

$$\lambda_p = 0.38 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0.38 \sqrt{\frac{29,000 \text{ ksi}}{50 \text{ ksi}}} = 9.15$$

$$\lambda_r = 1.0 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1.0 \sqrt{\frac{29,000 \text{ ksi}}{50 \text{ ksi}}} = 24.08$$

El patín es compacto.

Alma

$$\lambda_{alma} = \frac{h}{t_w} = 32.3$$

$$\lambda_p = 3.76 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 3.76 \sqrt{\frac{29,000 \text{ ksi}}{50 \text{ ksi}}} = 90.55$$

$$\lambda_r = 5.70 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 5.70 \sqrt{\frac{29,000 \text{ ksi}}{50 \text{ ksi}}} = 137.27$$

El alma es compacta.

4. Determinar la resistencia nominal. Se tiene una sección con patines compactos y alma compacta, por consiguiente, los estados límites que se deben de revisar es fluencia y pandeo lateral torsional.

Fluencia

El momento plástico es:

$$M_n = M_p = F_y Z_x \quad (3.4) \quad [F2 - 1]$$

$$M_n = M_p = (50 \text{ ksi})(221 \text{ in}^3) \left(\frac{1 \text{ ft}}{12 \text{ in}} \right) = 920.83 \text{ k} - \text{ft}$$

Pandeo lateral torsional

El soporte lateral en el patín de compresión de la viga se presenta en sus apoyos y en el centro del claro, por lo tanto, $L_b = 12 \text{ ft} = 144 \text{ in}$. Con las ecuaciones 3.10 y 3.11 se calculan L_p y L_r respectivamente para determinar si la viga está en la zona 1, 2 ó 3.

$$L_p = 1.76r_y \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (3.10) \quad [F2 - 5]$$

$$L_p = 1.76(1.84 \text{ in}) \sqrt{\frac{29,000 \text{ ksi}}{50 \text{ ksi}}} = 77.99 \text{ in}$$

$$L_r = 1.95r_{ts} \frac{E}{0.7F_y} \sqrt{\frac{Jc}{S_x h_o} + \sqrt{\left(\frac{Jc}{S_x h_o}\right)^2 + 6.76 \left(\frac{0.7F_y}{E}\right)^2}} \quad (3.11) \quad [F2 - 6]$$

Para secciones W (I) con simetría doble, $c = 1$.

$$L_r = 1.95(2.24) \frac{29,000}{0.7(50)} \sqrt{\frac{(6.03)(1)}{(192)(20.7)} + \sqrt{\left(\frac{(6.03)(1)}{(192)(20.7)}\right)^2 + 6.76 \left(\frac{0.7(50)}{29,000}\right)^2}}$$

$$L_r = 255.98 \text{ in}$$

La viga está en la zona 2 ($L_p < L_b < L_r$) y el estado límite de pandeo lateral torsional se determina con la siguiente expresión:

$$M_n = C_b \left[M_p - (M_p - 0.7F_y S_x) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] \leq M_p \quad (3.5) \quad [F2 - 2]$$

La ecuación 3.5 presenta un valor C_b , el cual, en el ejemplo anterior se consideró igual a la unidad. Proceder de esta forma es un tanto conservador, ya que se desaprovecha la resistencia adicional que pueda desarrollar la viga. El factor C_b depende de la variación del diagrama de momentos (figura

4.5) y se calcula con expresión 3.3. Al emplear C_b se debe de tener especial cuidado de no sobrepasar por error la meseta del momento plástico, ya que ésta última es la máxima resistencia que puede desarrollar una sección.

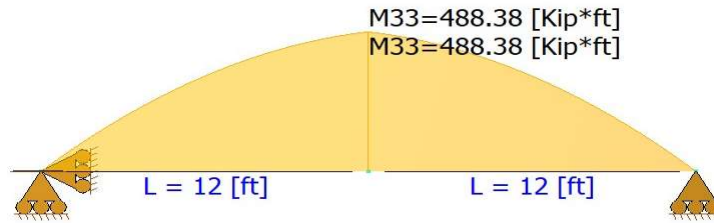


Figura 4.5. Diagrama de momentos de la viga del Ejemplo 4 (inciso 4.1.4). Elaboración propia.

Con apoyo del diagrama de momentos de la figura 4.5, se obtienen el momento a un cuarto de distancia, en el centro y a tres cuartos de distancia del segmento sin soporte, así como el momento máximo. El factor C_b tiene un valor de:

$$C_b = \frac{12.5M_{m\acute{a}x}}{2.5M_{m\acute{a}x} + 3M_A + 4M_B + 3M_C} \quad (3.3) \quad [F1 - 1]$$

$$C_b = \frac{12.5(488.38)}{2.5(488.38) + 3(189.01) + 4(333.45) + 3(433.33)}$$

$$C_b = 1.38$$

Calculado C_b , se procede a determinar el momento nominal por pandeo lateral torsional:

$$M_n = 1.38 \left[11,049.96 - (11,049.96 - 0.7(50)(192)) \left(\frac{144 - 77.99}{255.98 - 77.99} \right) \right] \left(\frac{1}{12} \right)$$

$$M_n = 1,090 \text{ k} - \text{ft}$$

Se supera la meseta, por lo tanto, se toma $M_p = 920.83 \text{ k} - \text{ft}$.

5. Calcular la resistencia de diseño y la resistencia permisible.

LRFD:

$$\Phi_b M_n = 0.9(920.83 \text{ k} - ft) = 828.75 \text{ k} - ft$$

ASD:

$$\frac{M_n}{\Omega_b} = \frac{920.83 \text{ k} - ft}{1.67} = 551.4 \text{ k} - ft$$

6. Determinar los "ratios".

LRFD:

$$\frac{M_u}{\Phi_b M_n} = \frac{488.52 \text{ k} - ft}{828.75 \text{ k} - ft} = 0.59 < 1$$

ASD:

$$\frac{M_a}{M_n/\Omega_b} = \frac{334.3 \text{ k} - ft}{551.4 \text{ k} - ft} = 0.61 < 1$$

La viga W21x93 es adecuada para soportar las cargas en ambos métodos.

4.1.5 Ejemplo 5: PLT Elástico (Zona 3) en viga simplemente apoyada con C_b

Si a la viga del Ejemplo 4 (inciso 4.1.4) se le retira el soporte lateral en su patín de compresión en el centro del claro, es decir, sólo presenta dicho soporte en los apoyos (figura 4.6), determine con los métodos LRFD y ASD si la viga es capaz de soportar las cargas de dicho ejemplo.

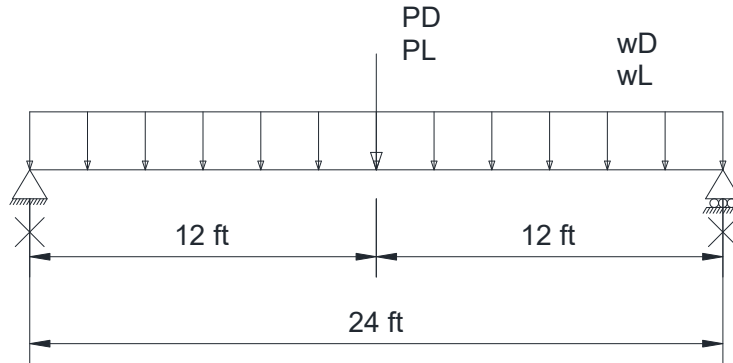


Figura 4.6. Viga simplemente apoyada con soporte lateral en su patín de compresión sólo en sus extremos. Elaboración propia.

Recapitulando, las cargas del ejemplo son:

$$w_D = 1.1 \text{ k/ft} \quad w_L = 2.2 \text{ k/ft} \quad P_D = 5 \text{ k} \quad P_L = 10 \text{ k}$$

El acero de la viga presenta: $F_y = 50 \text{ ksi}$ y $E = 29,000 \text{ ksi}$, y la sección usada es W21x93 ($d = 21.6 \text{ in}$, $t_w = 0.58 \text{ in}$, $b_f = 8.42 \text{ in}$, $t_f = 0.93 \text{ in}$, $b_f/2t_f = 4.53$, $h/t_w = 32.3$, $I_x = 2,070 \text{ in}^4$, $S_x = 192 \text{ in}^3$, $r_x = 8.7 \text{ in}$, $Z_x = 221 \text{ in}^3$, $r_y = 1.84 \text{ in}$, $r_{ts} = 2.24 \text{ in}$, $h_o = 20.7 \text{ in}$, $J = 6.03 \text{ in}^4$ y $C_w = 9,940 \text{ in}^6$).

1. Determinar las cargas y momentos últimos y admisibles. Dichos cálculos se realizaron en el Ejemplo 4 del inciso 3.1.4. Se toman los valores de ahí:

LRFD:

$$P_u = 22 \text{ k} \quad w_u = 4.95 \text{ k/ft} \quad M_u = 488.52 \text{ k-ft}$$

ASD:

$$P_a = 15 \text{ k} \quad w_a = 3.39 \text{ k/ft} \quad M_a = 334.3 \text{ k-ft}$$

2. De la revisión ancho-espesor, se tiene:

Patín

$$\lambda_{patin} = 4.53 \quad \lambda_p = 9.15 \quad \lambda_r = 24.08$$

El patín es compacto

Alma

$$\lambda_{alma} = 32.3 \quad \lambda_p = 90.55 \quad \lambda_r = 137.27$$

El alma es compacta.

3. Determinar la resistencia nominal. Los estados límites que se deben de revisar son fluencia y pandeo lateral torsional.

Fluencia

$$M_n = M_p = (50 \text{ ksi})(221 \text{ in}^3) \left(\frac{1 \text{ ft}}{12 \text{ in}} \right) = 920.83 \text{ k} - \text{ft}$$

Pandeo lateral torsional

Dado que la viga no cuenta con soporte lateral en su patín de compresión al centro del claro, la distancia sin soporte es toda su longitud, es decir, $L_b = 24 \text{ ft} = 288 \text{ in}$. A continuación se evalúan L_p y L_r para ubicar en qué zona se encuentra la viga.

$$L_p = 1.76(1.84 \text{ in}) \sqrt{\frac{29,000 \text{ ksi}}{50 \text{ ksi}}} = 77.99 \text{ in}$$

$$L_r = 1.95(2.24) \frac{29,000}{0.7(50)} \sqrt{\frac{(6.03)(1)}{(192)(20.7)} + \sqrt{\left(\frac{(6.03)(1)}{(192)(20.7)} \right)^2 + 6.76 \left(\frac{0.7(50)}{29,000} \right)^2}}$$

$$L_r = 255.98 \text{ in}$$

A diferencia del ejemplo anterior, en el cual la viga está en zona 2, en este caso, la viga está en la zona 3 debido a que $L_b > L_r$. La evaluación del momento nominal por pandeo lateral torsional se deberá de hacer con la expresión 3.6, la cual está en términos de un esfuerzo crítico F_{cr} (ecuación 2.8).

$$M_n = F_{cr} S_x \leq M_p \quad (3.6) \quad [F2 - 3]$$

$$F_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E}{\left(\frac{L_b}{r_{ts}}\right)^2} \sqrt{1 + 0.078 \frac{Jc}{S_x h_o} \left(\frac{L_b}{r_{ts}}\right)^2} \quad (3.8) \quad [F2 - 4]$$

Revisando la expresión 3.8, es posible constatar que la especificación permite incrementar la resistencia dependiendo de la variación del diagrama de momentos. A continuación, se determina ese incremento o factor C_b con ayuda de la figura 4.7.

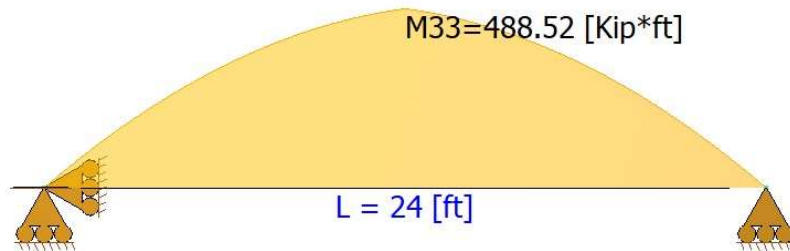


Figura 4.7. Diagrama de momentos de la viga del Ejemplo 5 (inciso 4.1.5). Elaboración propia.

$$C_b = \frac{12.5 M_{m\acute{a}x}}{2.5 M_{m\acute{a}x} + 3 M_A + 4 M_B + 3 M_C} \quad (3.3) \quad [F1 - 1]$$

$$C_b = \frac{12.5(488.52)}{2.5(488.52) + 3(333.39) + 4(488.52) + 3(333.39)}$$

$$C_b = 1.18$$

Sustituyendo los valores en las ecuaciones 3.6 y 3.8, se tiene:

$$F_{cr} = \frac{(1.18)\pi^2(29,000 \text{ ksi})}{\left(\frac{288 \text{ in}}{2.24 \text{ in}}\right)^2} \sqrt{1 + 0.078 \frac{(6.03 \text{ in}^4)(1)}{(192 \text{ in}^3)(20.7 \text{ in})} \left(\frac{288 \text{ in}}{2.24 \text{ in}}\right)^2}$$

$$F_{cr} = 35.13 \text{ ksi}$$

$$M_n = (35.13 \text{ ksi})(192 \text{ in}^3) \left(\frac{1 \text{ ft}}{12 \text{ in}}\right) = 562.06 \text{ k} - \text{ft}$$

En esta ocasión $M_n = 562.06 \text{ k-ft} < M_p = 920.83 \text{ k-ft}$, por lo tanto, la viga presentará pandeo lateral torsional antes de llegar a la plastificación o momento plástico. Comparando con el ejemplo anterior (zona 2), se observa que el estar en zona 3, implica un castigo importante en la resistencia de la viga.

- Determinar las resistencias de diseño y permisible.

LRFD:

$$\Phi_b M_n = 0.9(562.06 \text{ k} - \text{ft}) = 505.85 \text{ k} - \text{ft}$$

ASD:

$$\frac{M_n}{\Omega_b} = \frac{562.06 \text{ k} - \text{ft}}{1.67} = 336.56 \text{ k} - \text{ft}$$

- Finalmente, se calculan los "ratios".

LRFD:

$$\frac{M_u}{\Phi_b M_n} = \frac{488.52 \text{ k} - \text{ft}}{505.85 \text{ k} - \text{ft}} = 0.97 < 1$$

ASD:

$$\frac{M_a}{M_n/\Omega_b} = \frac{334.3 \text{ k-ft}}{336.56 \text{ k-ft}} = 0.99 < 1$$

Nuevamente la viga W21x93 es adecuada para soportar las cargas. Es importante comentar los resultados obtenidos en el Ejemplo 4 (inciso 4.1.4) y en este ejemplo. Es notoria la diferencia en la capacidad resistente a flexión de una viga cuando está en diferentes zonas, en este caso en particular, en zonas 2 y 3. El retirar el soporte lateral central implicó un incremento en los “ratios” de 0.59 a 0.97 y de 0.61 a 0.99 en los métodos LRFD y ASD respectivamente, es decir, hubo un incremento del 60% al casi 100% en el trabajo.

En este ejemplo no afectó tal incremento, ya que la viga pasa en ambos métodos; sin embargo, en casos reales, puede no tenerse la misma suerte y exceder el 100% de la capacidad de la viga, lo que implicaría cambiar la sección por una más pesada. Queda de manifiesto la importancia de colocar elementos secundarios que den soporte lateral, su empleo significa la posibilidad de utilizar secciones más ligeras y más económicas. Si bien, el uso de elementos secundarios implica un costo extra, dicho costo es pequeño en comparación con aquel generado al emplear una viga más pesada. En la práctica, se ha visto que al final del ejercicio económico existe un ahorro importante al utilizar vigas ligeras y elementos secundarios para dar soporte lateral a dichas vigas.

4.1.6 Ejemplo 6: PLT Elástico (Zona 3) en viga continua con C_b

El tramo intermedio de la viga continua de la figura 4.8 tiene el diagrama de momentos últimos que se muestra en la figura 4.9, usando acero de 50 ksi, seleccione la sección más ligera disponible para dicho tramo, el cual tiene soporte lateral en su patín de compresión en los apoyos. Del análisis estructural se sabe que M_u tiene un valor de 67.15 k-ft al centro del tramo y 16.28 k-ft a un cuarto y a

tres cuartos de distancia a partir del apoyo. Resuelva con el método LRFD y considere que el peso propio de la viga está incluido en el diagrama.

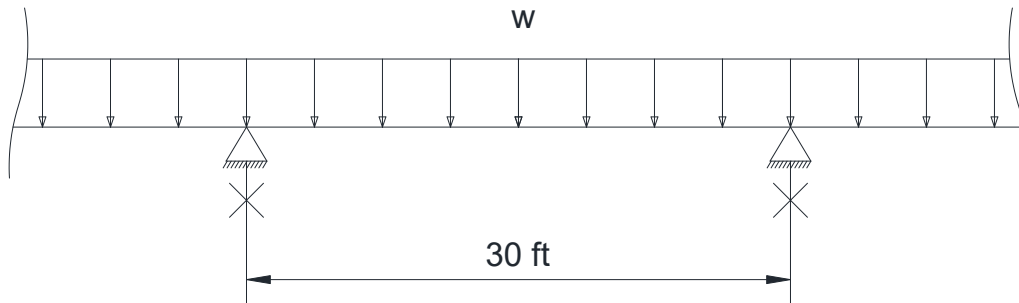


Figura 4.8. Tramo intermedio de una viga continua con soporte lateral en el patín de compresión en los apoyos. Elaboración propia.

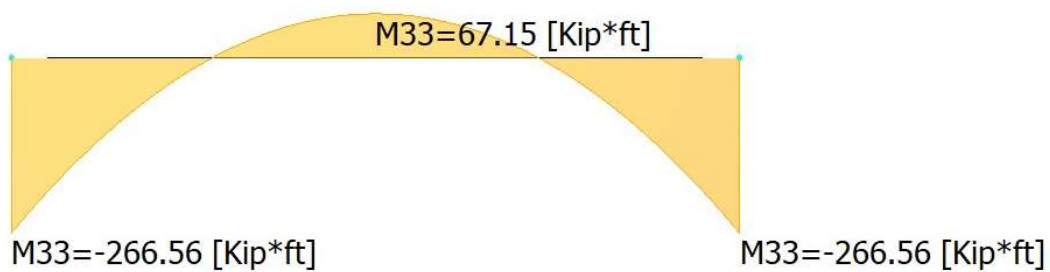


Figura 4.9. Diagrama de momentos del tramo intermedio de la viga continua. Elaboración propia.

1. Elección de la viga. Al igual que en el Ejemplo 3 (inciso 4.1.3) se requiere realizar tanteos, como se mencionó en dicho ejemplo, trabajar con tanteos es tedioso y es sólo una aproximación; sin embargo, dadas las condiciones del problema es un posible camino de solución.

Se procederá con el mismo criterio empleado en dicho ejemplo, se propondrá una sección para iniciar en base a un determinado peralte usando reglas clásicas de pre-dimensionamiento de vigas de acero. Posteriormente, se realizarán iteraciones con secciones del mismo peralte, pero con mayor peso. En esta ocasión, se utiliza el criterio de pre-dimensionamiento para vigas continuas:

$$\frac{L}{26} = \frac{30 \text{ ft}}{26} = \frac{360 \text{ in}}{26} = 13.85 \text{ in}$$

Dado que se busca una sección ligera, se propone W14x22.

2. Se reúne la información del perfil W14x22: $d = 13.7$ in, $t_w = 0.23$ in, $b_f = 5$ in, $t_f = 0.335$ in, $b_f/2t_f = 7.46$, $h/t_w = 53.3$, $I_x = 199$ in⁴, $S_x = 29$ in³, $r_x = 5.54$ in, $Z_x = 33.2$ in³, $I_y = 7$ in⁴, $S_y = 2.8$ in³, $r_y = 1.04$ in, $Z_y = 4.39$ in³, $r_{ts} = 1.27$ in, $h_o = 13.4$ in, $J = 0.208$ in⁴ y $C_w = 314$ in⁶.
3. Relación ancho-espesor. Como en todos los ejemplos, esta revisión se basa en la Tabla B4.1b del capítulo B de la especificación.

Patín

$$\lambda_{patin} = \frac{b_f}{2t_f} = 7.46$$

$$\lambda_p = 0.38 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0.38 \sqrt{\frac{29,000 \text{ ksi}}{50 \text{ ksi}}} = 9.15$$

$$\lambda_r = 1.0 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1.0 \sqrt{\frac{29,000 \text{ ksi}}{50 \text{ ksi}}} = 24.08$$

El patín es compacto.

Alma

$$\lambda_{alma} = \frac{h}{t_w} = 53.3$$

$$\lambda_p = 3.76 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 3.76 \sqrt{\frac{29,000 \text{ ksi}}{50 \text{ ksi}}} = 90.55$$

$$\lambda_r = 5.70 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 5.70 \sqrt{\frac{29,000 \text{ ksi}}{50 \text{ ksi}}} = 137.27$$

El alma es compacta.

4. Determinar la resistencia nominal. Para tal efecto, se utilizarán las disposiciones de la sección F2 del capítulo F de la especificación, la cual aplica para secciones W (I) con doble simetría con patines y almas compactas. La resistencia nominal será el menor de los valores obtenidos de los estados límite de fluencia y pandeo lateral torsional.

Fluencia

$$M_n = M_p = (50 \text{ ksi})(33.2 \text{ in}^3) \left(\frac{1 \text{ ft}}{12 \text{ in}} \right) = 138.33 \text{ k} - \text{ft}$$

Pandeo lateral torsional

El tramo de viga continua del ejemplo tiene un $L_b = 30 \text{ ft} = 360 \text{ in}$, debido a que sólo presenta soporte lateral en su patín de compresión en los apoyos. Se deberán determinar las distancias L_p y L_r para determinar en qué zona se encuentra la viga. Dichas distancias se obtienen con las expresiones 3.10 y 3.11.

$$L_p = 1.76(1.04 \text{ in}) \sqrt{\frac{29,000 \text{ ksi}}{50 \text{ ksi}}} = 44.08 \text{ in}$$

$$L_r = 1.95(1.27) \frac{29,000}{0.7(50)} \sqrt{\frac{(0.208)(1)}{(29)(13.4)} + \sqrt{\left(\frac{(0.208)(1)}{(29)(13.4)}\right)^2 + 6.76 \left(\frac{0.7(50)}{29,000}\right)^2}}$$

$$L_r = 125.13 \text{ in}$$

Como $L_b > L_r$, la viga se encuentra en la zona 3.

Siguiendo con el cálculo, se determina el factor C_b con apoyo de la ecuación 2.3:

$$C_b = \frac{12.5(266.56)}{2.5(266.56) + 3(16.28) + 4(67.15) + 3(16.28)}$$

$$C_b = 3.23$$

En la pasada edición 13 del Manual del AISC (2005) existe un valor límite de 3 para el factor C_b . En el manual actual dicha restricción se omitió, por lo que, en los cálculos subsecuentes el factor C_b se tomará igual a 3.23.

El esfuerzo crítico se determina empleando la expresión 3.8:

$$F_{cr} = \frac{(3.23)\pi^2(29,000 \text{ ksi})}{\left(\frac{360 \text{ in}}{1.27 \text{ in}}\right)^2} \sqrt{1 + 0.078 \frac{(0.208 \text{ in}^4)(1)}{(29 \text{ in}^3)(13.4 \text{ in})} \left(\frac{360 \text{ in}}{1.27 \text{ in}}\right)^2}$$

$$F_{cr} = 24.01 \text{ ksi}$$

Se recuerda que $c = 1$ para secciones W (I) con doble simetría. Sustituyendo los valores en la ecuación 3.6 se obtiene el momento nominal por pandeo lateral torsional:

$$M_n = (24.01 \text{ ksi})(29 \text{ in}^3) \left(\frac{1 \text{ ft}}{12 \text{ in}}\right) = 58.02 \text{ k} - \text{ft}$$

Como $M_n = 58.02 \text{ k-ft} < M_p = 138.33 \text{ k-ft}$, rige el pandeo lateral torsional.

5. Calcular la resistencia de diseño.

$$\Phi_b M_n = 0.9(58.02 \text{ k} - \text{ft}) = 52.22 \text{ k} - \text{ft}$$

$$\Phi_b M_n = 52.22 \text{ k} - \text{ft} < M_u = 266.56 \text{ k} - \text{ft}$$

$$\frac{M_u}{\Phi_b M_n} = \frac{266.56 \text{ k} - \text{ft}}{52.22 \text{ k} - \text{ft}} = 5.10 > 1 \quad \text{No se acepta.}$$

6. Se realizan una serie de tanteos con perfiles de 14 pulgadas y mayor peso. Los resultados son los siguientes:

W14x34:

$$\Phi_b M_n = 162.17 \text{ k} - \text{ft} < M_u = 266.56 \text{ k} - \text{ft}$$

$$\frac{M_u}{\Phi_b M_n} = \frac{266.56 \text{ k} - \text{ft}}{162.17 \text{ k} - \text{ft}} = 1.64 > 1 \quad \text{No se acepta.}$$

W14x38:

$$\Phi_b M_n = 200.17 k - ft < M_u = 266.56 k - ft$$
$$\frac{M_u}{\Phi_b M_n} = \frac{266.56 k - ft}{200.17 k - ft} = 1.33 > 1 \quad \text{No se acepta.}$$

W14x43:

$$\Phi_b M_n = 261 k - ft < M_u = 266.56 k - ft$$
$$\frac{M_u}{\Phi_b M_n} = \frac{266.56 k - ft}{261 k - ft} = 1.02 > 1 \quad \text{No se acepta.}$$

7. Se propone W14x48 como quinta revisión. Sus propiedades geométricas son: $d = 13.8$ in, $t_w = 0.34$ in, $b_f = 8.03$ in, $t_f = 0.595$ in, $b_f/2t_f = 6.75$, $h/t_w = 33.6$, $I_x = 484$ in⁴, $S_x = 70.2$ in³, $r_x = 5.85$ in, $Z_x = 78.4$ in³, $I_y = 51.4$ in⁴, $S_y = 12.8$ in³, $r_y = 1.91$ in, $Z_y = 19.6$ in³, $r_{ts} = 2.2$ in, $h_o = 13.2$ in, $J = 1.45$ in⁴ y $C_w = 2,240$ in⁶.

8. Se revisa la relación ancho-espesor de la sección.

Patín

$$\lambda_{patín} = 6.75 \quad \lambda_p = 9.15 \quad \lambda_r = 24.08$$

El patín es compacto

Alma

$$\lambda_{alma} = 33.6 \quad \lambda_p = 90.55 \quad \lambda_r = 137.27$$

El alma es compacta.

9. Determinar la resistencia nominal de la sección W14x48.

Fluencia

$$M_n = M_p = (50 \text{ ksi})(78.4 \text{ in}^3) \left(\frac{1 \text{ ft}}{12 \text{ in}} \right) = 326.67 k - ft$$

Pandeo lateral torsional

$$L_p = 1.76(1.91 \text{ in}) \sqrt{\frac{29,000 \text{ ksi}}{50 \text{ ksi}}} = 80.96 \text{ in}$$

$$L_r = 1.95(2.2) \frac{29,000}{0.7(50)} \sqrt{\frac{(1.45)(1)}{(70.2)(13.2)} + \sqrt{\left(\frac{(1.45)(1)}{(70.2)(13.2)}\right)^2 + 6.76 \left(\frac{0.7(50)}{29,000}\right)^2}}$$

$$L_r = 253.13 \text{ in}$$

Como $L_b > L_r$, la sección W14x48 se encuentra en la zona 3. El esfuerzo crítico y el momento nominal se calculan con las ecuaciones 3.6 y 3.8 respectivamente.

$$F_{cr} = \frac{(3.23)\pi^2(29,000 \text{ ksi})}{\left(\frac{360 \text{ in}}{2.2 \text{ in}}\right)^2} \sqrt{1 + 0.078 \frac{(1.45 \text{ in}^4)(1)}{(70.2 \text{ in}^3)(13.2 \text{ in})} \left(\frac{360 \text{ in}}{2.2 \text{ in}}\right)^2}$$

$$F_{cr} = 71.33 \text{ ksi}$$

$$M_n = (71.33 \text{ ksi})(70.2 \text{ in}^3) \left(\frac{1 \text{ ft}}{12 \text{ in}}\right) = 417.28 \text{ k-ft}$$

Como $M_n = 417.28 \text{ k-ft} > M_p = 326.67 \text{ k-ft}$, rige la meseta de momento plástico y M_n toma el valor de 326.67 k-ft.

10. Calcular la resistencia de diseño.

$$\Phi_b M_n = 0.9(326.67 \text{ k-ft}) = 294 \text{ k-ft}$$

$$\Phi_b M_n = 294 \text{ k-ft} > M_u = 266.56 \text{ k-ft}$$

11. El "ratio" de la sección W14x48 es:

$$\frac{M_u}{\Phi_b M_n} = 0.91 < 1$$

La sección propuesta es W14x48. Al igual que en el Ejemplo 3 (inciso 4.1.3), el procedimiento fue tedioso, en este caso, implicó repetir el ejercicio 5 veces sin tener completa certeza de haber elegido la sección más ligera, ya que lo que se hizo fue meramente una aproximación. En la vida cotidiana, ya sea académica o laboral, este tipo de procedimiento no es del todo viable por el tiempo que implica (realizar las 5 iteraciones tomó un tiempo aproximado de 1.5 horas).

4.2 Solución con ayudas de diseño del Manual AISC

En los ejercicios de la sección anterior, se mostró con detalle el procedimiento a seguir para resolver un problema de diseño de vigas por flexión de acuerdo con la Especificación AISC 360-16. El lector se habrá percatado que dichos procedimientos, no sólo son extensos, si no que implican una serie de iteraciones para poder llegar al resultado deseado, hecho que hace cansada la tarea del ingeniero estructural. Afortunadamente existen otras opciones, siendo una de ellas las ayudas de diseño del Manual AISC. Dichas ayudas son un conjunto de diseños tabulados o graficados, en donde sólo basta que el usuario tome lectura de valores, los cuales, en ocasiones son el resultado directo, pero en otras, son datos que deben ser evaluados en determinadas expresiones. Existen ayudas para flexión, compresión, flexocompresión, sección compuesta, etc.; sin embargo, las que atañen al presente trabajo son las primeras.

La especificación es gratuita; sin embargo no es el caso del Manual, documento donde se encuentran las ayudas. Desafortunadamente su costo es muy elevado para el público en general. De acuerdo con la página de internet de dicha institución, el precio del Manual edición 15 es de \$400 dólares más gastos de envío (Figura 4.10). Tomando el tipo de cambio interbancario del dólar del 10 de junio de 2019 (\$19.56), el precio del Manual es de \$8,000 pesos. Este costo resulta factible para

despachos grandes de cálculo; sin embargo, no es el caso de pequeños despachos ni de ingenieros calculistas que trabajan por su cuenta, y mucho menos, de estudiantes.

El no tan fácil acceso al Manual es, quizás, la razón principal por la que la mayoría tanto de estudiantes, como de catedráticos e ingenieros de la práctica desconoce la existencia de dichas ayudas, y en caso de conocerlas, desconoce cómo usarlas.

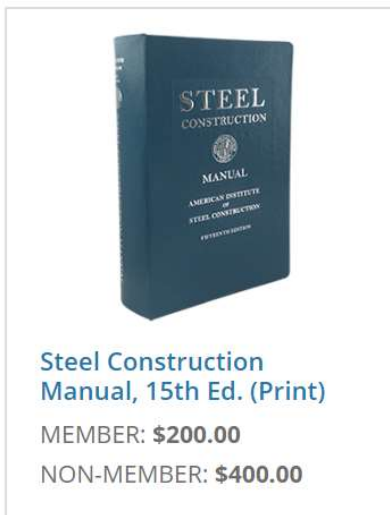


Figura 4.10. Precio del Manual AISC edición 15. Fuente: AISC. Recuperado el 10 de Junio de 2019, de <https://www.aisc.org/publications/>

En lo que respecta a las ayudas de diseño por flexión, sobresalen la Tabla 3-2 “W-Shapes Selection by Z_x ” y la Tabla 3-10 “W-Shapes Available Moment vs Unbraced Length”. En ellas se presentan la gran mayoría de los valores (momento de diseño o momento permisible) que resultan de evaluar las expresiones expuestas en el capítulo 3, de forma tabulada y de forma gráfica para la primera y segunda tabla respectivamente.

La Tabla 3-2 permite escoger perfiles de acero para resistir un determinado momento, la búsqueda se puede realizar mediante el módulo de sección plástico o mediante el momento de diseño o el momento permisible dependiendo del método que se use, ya sea LRFD o ASD (Figura 4.11).

Table 3-2 (continued)
W-Shapes
Selection by Z_x

$F_y = 50$ ksi

Z_x

Shape	Z_x	M_{px}/L_{2x}		$\phi_b M_{px}$		M_{py}/L_{2y}		$\phi_b M_{py}$		BF/L_{2y}	$\phi_b BF$	L_p	L_r	I_x	$\phi_b I_x$		$\phi_b M_{px}$	$\phi_b M_{py}$
		kip-ft	kip-ft	kip-ft	kip-ft	kip-ft	kip-ft	ASD	LRFD						ASD	LRFD		
	in. ³											ft	ft	in. ⁴			ASD	LRFD
W40x199	869	2170	3260	1340	2020	37.6	56.1	12.2	34.3	14900	503	755						
W14x426 ^b	869	2170	3260	1230	1850	6.16	9.23	15.3	168	6600	703	1050						
W33x221	857	2140	3210	1330	1900	31.8	47.8	12.7	38.2	12900	525	788						
W27x258	852	2130	3200	1300	1860	24.4	36.5	11.9	45.9	10800	568	853						
W30x235	847	2110	3180	1310	1860	28.0	42.7	12.4	41.0	11700	520	779						
W24x279 ^b	835	2080	3130	1250	1800	19.7	29.6	11.2	53.4	9600	619	929						
W36x210	833	2080	3120	1260	1890	42.3	63.4	9.11	28.5	13200	609	914						
W14x398 ^b	801	2000	3000	1150	1720	5.95	8.96	15.2	158	6000	648	972						
W40x183	774	1930	2900	1180	1770	44.1	66.5	8.80	25.8	13200	507	761						
W33x201	773	1930	2900	1200	1800	30.3	45.6	12.6	36.7	11600	482	723						
W27x235	772	1930	2900	1180	1780	24.1	36.0	11.8	42.9	9700	522	784						
W36x194	767	1910	2880	1160	1740	40.4	61.4	9.04	27.6	12100	598	838						
W18x311 ^b	754	1880	2830	1090	1640	11.2	16.8	10.4	81.1	6970	678	1020						
W30x211	751	1870	2820	1160	1750	26.9	40.5	12.3	38.7	10300	479	718						
W24x250	744	1860	2790	1120	1690	18.7	29.3	11.1	48.7	8490	547	821						
W14x370 ^b	736	1840	2780	1080	1590	5.87	8.80	15.1	148	5440	594	891						
W36x182	718	1790	2690	1090	1640	38.9	58.4	9.01	27.0	11300	526	790						
W27x217	711	1770	2670	1100	1650	23.0	35.1	11.7	40.8	8910	471	707						
W40x167	693	1730	2600	1090	1580	41.7	62.5	8.48	24.8	11600	502	753						
W18x283 ^b	676	1690	2540	987	1480	11.1	16.7	10.3	73.8	6170	613	920						
W30x191	675	1680	2530	1050	1530	25.6	39.6	12.2	36.8	9200	436	654						
W24x229	675	1680	2530	1030	1540	19.0	28.9	11.0	45.2	7650	499	749						
W14x342 ^b	672	1680	2520	975	1460	5.73	8.62	15.0	138	4900	539	809						
W36x170	668	1670	2510	1010	1530	37.8	56.1	8.94	26.4	10500	482	738						
W27x194	631	1570	2370	978	1470	22.3	33.8	11.6	38.2	7860	422	632						
W33x169	629	1570	2360	959	1440	34.2	51.5	8.83	26.7	9290	453	679						
W36x160	624	1560	2340	947	1420	36.1	54.2	8.83	25.8	9760	468	702						
W18x258 ^b	611	1520	2290	898	1350	10.9	16.5	10.2	67.3	5510	550	826						
W30x173	607	1510	2280	945	1420	24.1	36.8	12.1	35.5	8230	398	597						
W24x207	606	1510	2270	927	1390	18.9	28.6	10.9	41.7	6820	447	671						
W14x311 ^b	603	1500	2260	884	1330	5.59	8.44	14.8	125	4330	482	723						
W12x338 ^b	603	1500	2260	844	1270	4.76	7.19	12.3	150	4060	598	897						

ASD LRFD ^b Flange thickness greater than 2 in. Special requirements may apply per AISC Specification Section A3.1c.
 $\Omega_x = 1.67$ $\phi_b = 0.90$
 $\Omega_y = 1.50$ $\phi_y = 1.00$

Figura 4.11. Tabla 3-2 “W-Shapes Selection by Z_x ”. Fuente: American Institute of Steel Construction. (2017). Steel Construction Manual (15 ed.). Chicago: American Institute of Steel Construction.

Esta tabla es aplicable para vigas ubicadas en las zonas 1 y 2. En el caso de la primera, sólo basta que el usuario busque el perfil y tome lectura del momento plástico de diseño o del momento plástico permisible. En el caso de la zona 2, se busca el perfil y se toman ciertos parámetros, los cuales se deberán evaluar en las ecuaciones 4.1 y 4.2.

LRFD:

$$\Phi_b M_n = C_b [\Phi_b M_{px} - \Phi_b BF (L_b - L_p)] \leq \Phi_b M_{px} \quad (4.1) \quad [3 - 4a]$$

ASD:

$$\frac{M_n}{\Omega_b} = C_b \left[\frac{M_{px}}{\Omega_b} - \frac{BF}{\Omega_b} (L_b - L_p) \right] \leq \frac{M_{px}}{\Omega_b} \quad (4.2) \quad [3 - 4b]$$

La Tabla 3-10 es en realidad una serie de gráficas, de las cuales el usuario puede tomar lectura del momento de diseño o del momento permisible dependiendo de la longitud no soportada lateralmente de la viga (figura 4.12).

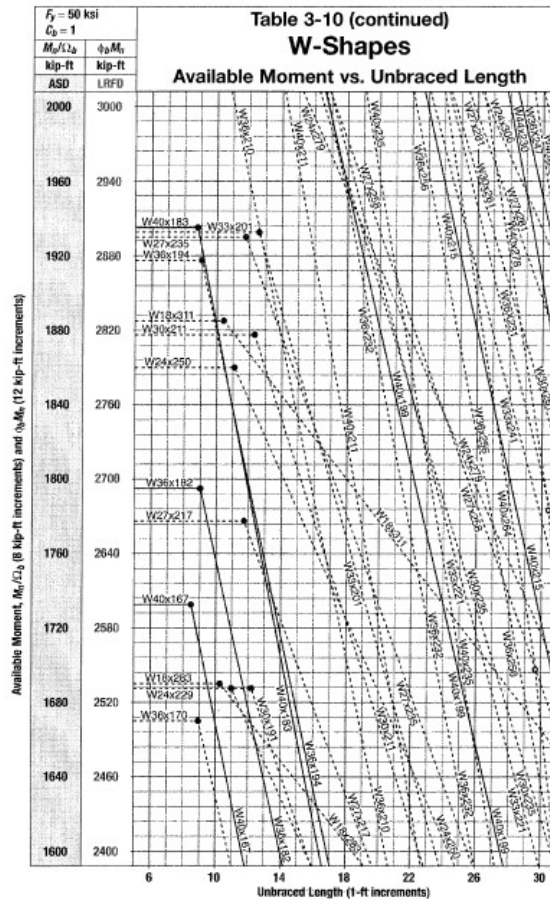


Figura 4.12. Tabla 3-10 “W-Shapes Available Moment vs Unbraced Length”. Fuente: American Institute of Steel Construction. (2017). Steel Construction Manual (15 ed.). Chicago: American Institute of Steel Construction.

Para obtener el valor de $\Phi_b M_n$ o M_n/Ω_b se elige desde la parte inferior del diagrama el L_b en cuestión, después se interseca verticalmente dicho L_b con la gráfica de un perfil. Posteriormente, dirigiéndose a la izquierda, con un trazo horizontal se toma

lectura del momento deseado en el eje vertical. La Tabla 3-10 es aplicable para las zonas 1, 2 y 3; sin embargo, sólo están graficadas las secciones para $F_y = 50$ ksi y $C_b = 1.0$. Esta situación obliga al usuario a utilizar artificios, como el momento efectivo ($M_{uefectivo} = M_u / C_b$, $M_{aefectivo} = M_a / C_b$), para casos en los que C_b es diferente de 1, situación común en la práctica profesional. Como ya se sabe, ninguna sección puede desarrollar una resistencia mayor a M_p , por ello, cuando se utilice el artificio de momento efectivo, es necesario corroborar que el resultado no sobrepase la meseta de momento plástico de la gráfica, para ello es válido consultar la Tabla 3-2 o seguir el trazo de la misma gráfica hasta la meseta en la Tabla 3-10.

Una ventaja de ambas tablas es que indican cuáles son las secciones más ligeras. En el caso de la Tabla 3-2, los perfiles ligeros están marcados en negritas, y sólo es válida su consulta cuando la viga está en zona 1. En el caso de la Tabla 3-10, las gráficas de las secciones económicas se distinguen por tener un trazo continuo y no intermitente. Los círculos en las gráficas indican la frontera entre las diferentes zonas (relleno para zonas 1 y 2, sin relleno para zonas 2 y 3).

Una ayuda adicional por parte del Manual es el indicar si las secciones son compactas o no compactas (no hay secciones W (I) esbeltas). En la tabla de propiedades geométricas, si el perfil tiene una f inmediatamente después de su nombre en la parte superior ($W14x90^f$), significa que excede el límite de sección compacta en flexión. Al emplear las Tablas 3-2 y 3-10 resulta un tanto irrelevante esta revisión, ya que dichas tablas consideran la relación ancho-espesor en sus resultados. Es importante aclarar que dicha ayuda (f) es aplicable para $F_y = 50$ ksi.

En esta sección se diseñarán y/o revisarán las vigas de los ejemplos estudiados previamente (resueltos haciendo uso de la especificación), pero en esta ocasión, haciendo uso de las Tablas 3-2 y 3-10. Se espera que el lector aprenda a utilizar dichas tablas, identificando tanto ventajas como desventajas de su uso.

4.2.1 Ejemplo 1: Momento plástico (Zona 1) en viga simplemente apoyada

La losa de concreto reforzado de 5 in de espesor mostrada en la figura 4.1 va a colocarse sobre secciones W (I) de acero con separación de 8 ft entre centros. Las vigas tienen un claro de 20 ft y se suponen simplemente apoyadas. Si la losa de concreto se diseñó para resistir una carga viva de 100 psi, determine mediante los procedimientos LRFD y ASD si el perfil W12x22 es capaz de soportar dicha losa. Se supone que el patín de compresión de la viga recibirá soporte lateral completo de la losa de concreto. El concreto pesa 0.15 k/ft^3 . Considere $F_y = 50 \text{ ksi}$ y $E = 29,000 \text{ ksi}$.

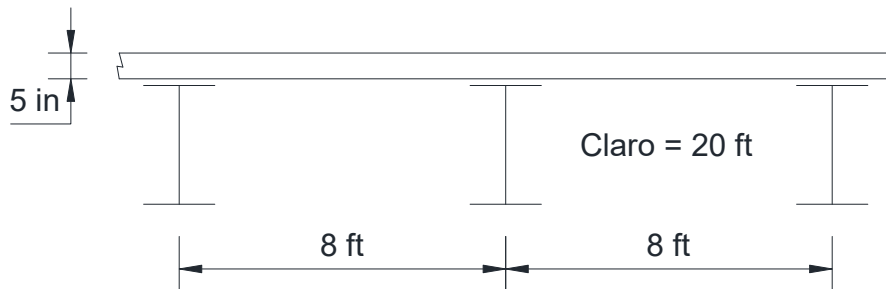


Figura 4.1. Sistema de entresaca. Elaboración propia.

1. Determinar las cargas que deberá soportar cada una de las vigas:

$$\text{Peso perfil} = 0.022 \text{ k/ft}$$

$$\text{Peso losa} = (5 \text{ in})(0.15 \text{ k/ft}^3)(8 \text{ ft}) \left(\frac{1 \text{ ft}}{12 \text{ in}} \right) = 0.5 \text{ k/ft}$$

$$w_D = 0.022 \text{ k/ft} + 0.5 \text{ k/ft} = 0.522 \text{ k/ft}$$

$$w_L = (8 \text{ ft})(0.1 \text{ ksi}) = 0.8 \text{ k/ft}$$

LRFD:

$$w_u = 1.2w_D + 1.6w_L = 1.2(0.522 \text{ k/ft}) + 1.6(0.8 \text{ k/ft}) = 1.91 \text{ k/ft}$$

ASD:

$$w_a = w_D + w_L = 0.522 \text{ k/ft} + 0.8 \text{ k/ft} = 1.32 \text{ k/ft}$$

2. Calcular el momento último y el momento admisible.

LRFD:

$$M_u = \frac{w_u L^2}{8} = \frac{(1.91 \text{ k/ft})(20 \text{ ft})^2}{8} = 95.5 \text{ k} - \text{ft}$$

ASD:

$$M_a = \frac{w_a L^2}{8} = \frac{(1.32 \text{ k/ft})(20 \text{ ft})^2}{8} = 66 \text{ k} - \text{ft}$$

3. No es necesario realizar la revisión de la relación ancho-espesor. Como el ejemplo indica que la losa aporta soporte lateral completo al patín de compresión de la viga, dicha viga tiene un $L_b = 0$ y está en zona 1; por lo que es válido utilizar la Tabla 3-2. Se busca el perfil y se toma lectura directa del momento plástico de diseño y del momento plástico permisible:

Shape	Z_x in. ³	M_{px}/Ω_b		$\Phi_b M_{px}$		M_{rx}/Ω_b		$\Phi_b M_{rx}$		BF/Ω_b		$\Phi_b BF$		L_p ft	L_r ft	I_x in. ⁴	V_{nx}/Ω_v		$\Phi_v V_{nx}$	
		kip-ft	kip-ft	kip-ft	kip-ft	kip-ft	kip-ft	kip-ft	kip-ft	kip-ft	kip-ft	kip-ft	kip-ft				kip-ft	kip-ft	kip-ft	
		ASD	LRFD	ASD	LRFD	ASD	LRFD	ASD	LRFD	ASD	LRFD	ASD	LRFD							
W18x35	66.5	166	249	101	151	8.14	12.3	4.31	12.3	510	106	159								
W12x45	64.2	160	241	101	151	3.80	5.80	6.89	22.4	348	81.1	122								
W16x36	64.0	160	240	98.7	148	6.24	9.36	5.37	15.2	448	93.8	141								
W14x38	61.5	153	231	95.4	143	5.37	8.20	5.47	16.2	386	87.4	131								
W10x49	60.4	151	227	95.4	143	2.46	3.71	8.97	31.6	272	68.0	102								
W8x58	59.8	149	224	90.8	137	1.70	2.55	7.42	41.6	228	89.3	134								
W12x40	57.0	142	214	89.9	135	3.66	5.54	6.85	21.1	307	70.2	105								
W10x45	54.9	137	206	85.8	129	2.59	3.89	7.10	26.9	248	70.7	106								
W14x34	54.6	136	205	84.9	128	5.01	7.55	5.40	15.6	340	79.8	120								
W16x31	54.0	135	203	82.4	124	6.86	10.3	4.13	11.8	375	87.5	131								
W12x35	51.2	128	192	79.6	120	4.34	6.45	5.44	16.6	285	75.0	113								
W8x48	49.0	122	184	75.4	113	1.67	2.55	7.35	35.2	184	68.0	102								
W14x30	47.3	118	177	73.4	110	4.63	6.95	5.26	14.9	291	74.5	112								
W10x39	46.8	117	176	73.5	111	2.53	3.78	6.99	24.2	209	62.5	93.7								
W16x26'	44.2	110	166	67.1	101	5.93	8.98	3.96	11.2	301	70.5	106								
W12x30	43.1	108	162	67.4	101	3.97	5.96	5.37	15.6	238	64.0	95.9								
W14x26	40.2	100	151	61.7	92.7	5.33	8.11	3.61	11.0	245	70.9	106								
W8x40	39.8	99.3	149	62.0	93.2	1.64	2.46	7.21	29.9	146	59.4	89.1								
W10x33	38.8	96.8	146	61.1	91.9	2.39	3.62	6.85	21.8	171	56.4	84.7								
W12x26	37.2	92.8	140	58.3	87.7	3.61	5.46	5.33	14.9	204	56.1	84.2								
W10x30	36.6	91.3	137	56.6	85.1	3.08	4.61	4.84	16.1	170	63.0	94.5								
W8x35	34.7	86.6	130	54.5	81.9	1.62	2.43	7.17	27.0	127	50.3	75.5								
W14x22	33.2	82.8	125	50.6	76.1	4.78	7.27	3.67	10.4	199	63.0	94.5								
W10x26	31.3	78.1	117	48.7	73.2	2.91	4.34	4.80	14.9	144	53.6	80.3								
W8x31'	30.4	75.8	114	48.0	72.2	1.58	2.37	7.18	24.8	110	45.6	68.4								
W12x22	29.3	73.1	110	44.4	66.7	4.68	7.06	3.00	9.13	156	64.0	95.9								

Figura 4.13. Consulta de la Tabla 3-2 para la viga del Ejemplo 1.

De acuerdo con la tabla, se tiene:

LRFD:

$$\Phi_b M_{px} = 110 \text{ k} - \text{ft}$$

ASD:

$$\frac{M_{px}}{\Omega_b} = 73.10 \text{ k} - \text{ft}$$

4. Finalmente, se determina el "ratio" y el resultado del ejemplo.

LRFD:

$$\frac{M_u}{\Phi_b M_n} = \frac{95.5 k - ft}{110 k - ft} = 0.87 < 1$$

ASD:

$$\frac{M_a}{M_n / \Omega_b} = \frac{66 k - ft}{73.10 k - ft} = 0.90 < 1$$

El perfil W12x22 soporta correctamente la losa de concreto.

4.2.2 Ejemplo 2: Viga con patines no compactos (Zona 1)

El siguiente ejemplo fue tomando de McCormac y Csernak, 2012. Determine la resistencia de diseño a flexión LRFD y la resistencia permisible a flexión ASD para una sección W12x65 de 50 ksi ($E = 29,000$ ksi) que tiene soporte lateral completo.

1. Cuando se resolvió este ejemplo haciendo uso de la especificación se identificó que W12x65 tiene patines no compactos; en esta ocasión se recuerda el hecho; sin embargo, no es tan importante, ya que, como se comentó, las Tablas 3-2 y 3-10 contemplan la revisión de la relación ancho-espesor en sus resultados. Se utilizará la Tabla 3-2 debido a que la viga presenta soporte lateral completo (zona 1).

Table 3-2 (continued)
W-Shapes
Selection by Z_x

$F_y = 50$ ksi

Z_x

Shape	Z_x in. ³	M_{px}/Ω_b		M_{rx}/Ω_b		BF/Ω_b		L_p ft	L_r ft	I_x in. ⁴	V_{nx}/Ω_v	
		kip-ft ASD	kip-ft LRFD	kip-ft ASD	kip-ft LRFD	kip-ft ASD	kip-ft LRFD				kip ASD	kip LRFD
W21×55	126	314	473	192	289	10.8	16.3	6.11	17.4	1140	156	234
W14×74	126	314	473	196	294	5.31	8.05	8.76	31.0	795	128	192
W18×60	123	307	461	189	284	9.62	14.4	5.93	18.2	984	151	227
W12×79	119	297	446	187	281	3.78	5.67	10.8	39.9	662	117	175
W14×68	115	287	431	180	270	5.19	7.81	8.69	29.3	722	116	174
W10×88	113	282	424	172	259	2.62	3.94	9.29	51.2	534	131	196
W18×55	112	279	420	172	258	9.15	13.8	5.90	17.6	890	141	212
W21×50	110	274	413	165	248	12.1	18.3	4.59	13.6	984	158	237
W12×72	108	269	405	170	256	3.69	5.56	10.7	37.5	597	106	159
W21×48 ^f	107	265	398	162	244	9.89	14.8	6.09	16.5	959	144	216
W16×57	105	262	394	161	242	7.98	12.0	5.65	18.3	758	141	212
W14×61	102	254	383	161	242	4.93	7.48	8.65	27.5	640	104	156
W18×50	101	252	379	155	233	8.76	13.2	5.83	16.9	800	128	192
W10×77	97.6	244	366	150	225	2.60	3.90	9.18	45.3	455	112	169
W12×65 ^f	96.8	237	356	154	231	3.58	5.39	11.9	35.1	533	94.4	142
W21×44	95.4	238	358	143	214	11.1	16.8	4.45	13.0	843	145	217
W16×50	92.0	230	345	141	213	7.69	11.4	5.62	17.2	659	124	186
W18×46	90.7	226	340	138	207	9.63	14.6	4.56	13.7	712	130	195
W14×53	87.1	217	327	136	204	5.22	7.93	6.78	22.3	541	103	154

Figura 4.14. Consulta de la Tabla 3-2 para la viga del Ejemplo 2.

Los momentos plásticos de diseño y permisible son:

LRFD:

$$\Phi_b M_{px} = 356 \text{ k} - \text{ft}$$

ASD:

$$\frac{M_{px}}{\Omega_b} = 237 \text{ k} - \text{ft}$$

4.2.3 Ejemplo 3: PLT Inelástico (Zona 2) en viga simplemente apoyada

Al igual que el anterior, este ejemplo es tomado de McCormac y Csernak, 2012. Usando acero de 50 ksi ($E = 29,000$ ksi), seleccione la sección más ligera disponible

para la viga de la figura 4.3, que tiene soporte lateral en su patín de compresión sólo en sus extremos. Suponga $C_b = 1$ para este ejemplo (en realidad es 1.14). Use ambos métodos LRFD y ASD.

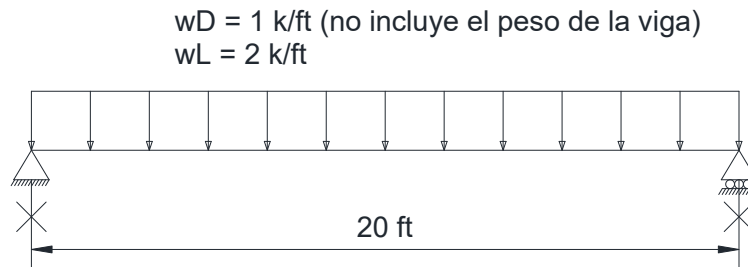


Figura 4.3. Viga simplemente apoyada con carga uniformemente distribuida. Elaboración propia.

1. Determinar las cargas sobre la viga.

Inicialmente se despreciará el peso de la viga. Dicho peso se revisará posteriormente una vez elegido el perfil.

LRFD:

$$w_u = 1.2w_D + 1.6w_L = 1.2(1 \text{ k/ft}) + 1.6(2 \text{ k/ft}) = 4.4 \text{ k/ft}$$

ASD:

$$w_a = w_D + w_L = 1 \text{ k/ft} + 2 \text{ k/ft} = 3 \text{ k/ft}$$

2. Calcular el momento último y el momento admisible.

LRFD:

$$M_u = \frac{w_u L^2}{8} = \frac{(4.4 \text{ k/ft})(20 \text{ ft})^2}{8} = 220 \text{ k-ft}$$

ASD:

$$M_a = \frac{w_a L^2}{8} = \frac{(3 \text{ k/ft})(20 \text{ ft})^2}{8} = 150 \text{ k-ft}$$

3. Elección de viga. Cuando se resolvió este ejemplo haciendo uso de la especificación se trabajó con tanteos buscando la sección más ligera, puesto que esa es la encomienda del ejemplo. El lector pudo haber notado que, a pesar de hacer uso de un criterio de búsqueda (determinar un peralte), el trabajar con tanteos fue trabajar con rumbo un tanto incierto.

Ahora se resolverá el ejemplo con apoyo de las ayudas del Manual. En este caso en particular, se debe de utilizar la Tabla 3-10, ya que las consultas del perfil más ligero en la Tabla 3-2 sólo son válidas cuando la viga está en la zona 1. Como se desconocen las distancias L_p y L_r y la viga no tiene soporte lateral completo, no se puede garantizar que se encuentra en la zona 1. Se aclara que la Tabla 3-2 cuenta con las distancias L_p y L_r tabuladas, con lo que una consulta en dicha tabla ayudaría para aclarar la incógnita. Dado que dicha consulta sería para corroborar si es válido usar o no la tabla, se opta mejor por emplear directamente la Tabla 3-10, la cual se sabe si aplica para el caso de este ejemplo.

Aclarado con qué tabla se trabajará, se realiza una consulta con $L_b = 20$ ft, y $M_u = 220$ k-ft y $M_a = 150$ k-ft para LRFD y ASD respectivamente (figura 3.15). La forma de proceder es ubicar $L_b = 20$ ft y de ahí con un trazo vertical intersectar la primera gráfica continua de un perfil. Dicha intersección debe de estar por encima de M_u y M_a . Se busca una gráfica continua, y no una intermitente, debido a que el ejemplo solicita proponer el perfil más ligero.

El perfil encontrado es W12x53 para ambos métodos. Existen casos donde el perfil que se intersecta es diferente para cada método, generando resultados diferentes. Igualmente, se puede apreciar que los resultados pueden variar entre usuario y usuario, puesto que la consulta es visual y es susceptible de la precisión de la escala.

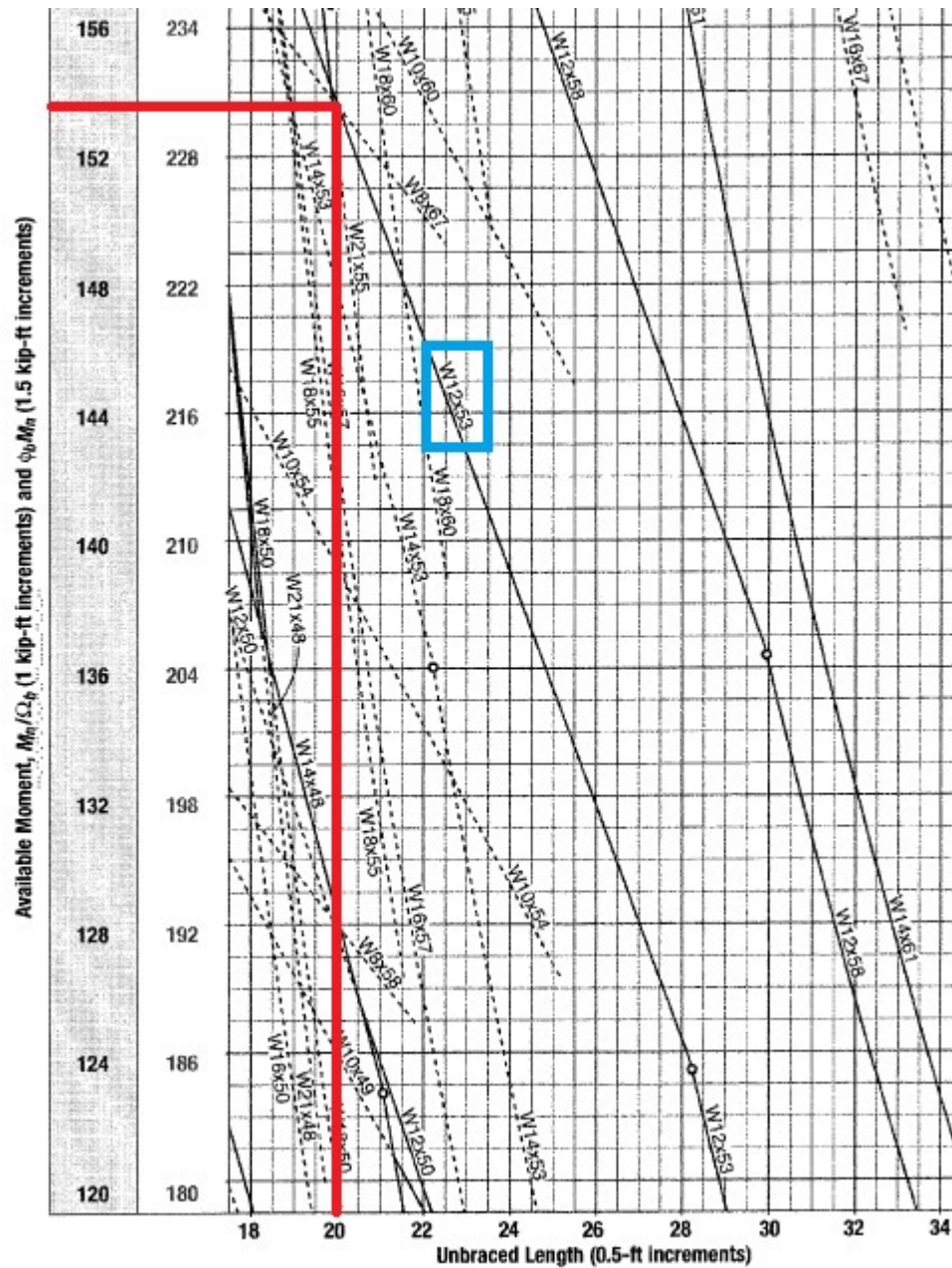


Figura 4.15. Consulta de la Tabla 3-10 para la viga del Ejemplo 3. Elaboración propia.

Las resistencias obtenidas son:

LRFD:

$$\phi_b M_n = 230.25 \text{ k} - \text{ft} > M_u = 220 \text{ k} - \text{ft}$$

ASD:

$$\frac{M_n}{\Omega_b} = 153.5 k - ft > M_a = 150 k - ft$$

4. Es necesario revisar la sección incluyendo su peso propio, ya que la viga se tiene que cargar a sí misma. Por lo tanto, se calculan nuevamente las acciones:

LRFD:

$$w_u = 1.2(1k/ft + 0.053 k/ft) + 1.6(2 k/ft) = 4.46 k/ft$$

$$M_u = \frac{(4.46 k/ft)(20 ft)^2}{8} = 223 k - ft$$

ASD:

$$w_a = (1k/ft + 0.053 k/ft) + (2 k/ft) = 3.05 k/ft$$

$$M_a = \frac{(3.05 k/ft)(20 ft)^2}{8} = 152.5 k - ft$$

5. Se consulta nuevamente la Tabla 3-10 con $L_b = 20$ ft y $M_u = 223$ k-ft, y $L_b = 20$ ft y $M_a = 152.5$ k-ft. Los resultados son:

LRFD:

$$\phi_b M_n = 230.25 k - ft > M_u = 223 k - ft$$

ASD:

$$\frac{M_n}{\Omega_b} = 153.5 k - ft > M_a = 152.5 k - ft$$

6. Finalmente, se determinan las respectivas eficiencias o “ratios”:

LRFD:

$$\frac{M_u}{\Phi_b M_n} = 0.97 < 1$$

ASD:

$$\frac{M_a}{M_n / \Omega_b} = 0.99 < 1$$

La sección propuesta es W12x53.

En este ejemplo se consideró un $C_b = 1$, cuando en realidad es de 1.14. La Tabla 3-10 es válida sólo para $C_b = 1$, para casos donde dicho factor es mayor a 1, se deberá de emplear el artificio de momento efectivo, el cual se verá más adelante.

Table 3-2 (continued)												
$F_y = 50$ ksi												
W-Shapes												
Selection by Z_x												
Shape	Z_x in. ³	M_{px}/Ω_b		M_{rx}/Ω_b		BF/Ω_b		L_p ft	L_r ft	I_x in. ⁴	V_{nx}/Ω_v	
		kip-ft	kip-ft	kip-ft	kip-ft	kips	kips				kips	kips
		ASD	LRFD	ASD	LRFD	ASD	LRFD				ASD	LRFD
W21x55	126	314	473	192	289	10.8	16.3	6.11	17.4	1140	156	234
W14x74	126	314	473	196	294	5.31	8.05	8.76	31.0	795	128	192
W18x60	123	307	461	189	284	9.62	14.4	5.93	18.2	984	151	227
W12x79	119	297	446	187	281	3.78	5.67	10.8	39.9	662	117	175
W14x68	115	287	431	180	270	5.19	7.81	8.69	29.3	722	116	174
W10x88	113	282	424	172	259	2.62	3.94	9.29	51.2	534	131	196
W18x55	112	279	420	172	258	9.15	13.8	5.90	17.6	890	141	212
W21x50	110	274	413	165	248	12.1	18.3	4.59	13.6	984	158	237
W12x72	108	269	405	170	256	3.69	5.56	10.7	37.5	597	106	159
W21x48'	107	265	398	162	244	9.89	14.8	6.09	16.5	959	144	216
W16x57	105	262	394	161	242	7.98	12.0	5.65	18.3	758	141	212
W14x61	102	254	383	161	242	4.93	7.48	8.65	27.5	640	104	156
W18x50	101	252	379	155	233	8.76	13.2	5.83	16.9	800	128	192
W10x77	97.6	244	366	150	225	2.60	3.90	9.18	45.3	455	112	169
W12x65'	96.8	237	356	154	231	3.58	5.39	11.9	35.1	533	94.4	142
W21x44	95.4	238	358	143	214	11.1	16.8	4.45	13.0	843	145	217
W16x50	92.0	230	345	141	213	7.69	11.4	5.62	17.2	659	124	186
W18x46	90.7	226	340	138	207	9.83	14.6	4.56	13.7	712	130	195
W14x53	87.1	217	327	136	204	5.22	7.93	6.78	22.3	541	103	154
W12x58	86.4	216	324	136	205	3.82	5.69	8.87	29.8	475	87.8	132
W10x68	85.3	213	320	132	199	2.58	3.85	9.15	40.6	394	97.8	147
W16x45	82.3	205	309	127	191	7.12	10.8	5.55	16.5	586	111	167
W18x40	78.4	196	294	119	180	8.94	13.2	4.49	13.1	612	113	169
W14x48	78.4	196	294	122	184	5.00	7.67	6.75	21.1	494	92.8	141
W12x53	77.9	194	292	123	185	3.65	5.50	8.76	28.2	425	83.5	125
W10x60	74.8	186	280	116	175	2.94	4.32	9.08	36.8	341	65.7	129

Figura 4.16. Consulta de la Tabla 3-2 para la viga del Ejemplo 3. Elaboración propia.

Como se comentó, la Tabla 3-2 no resulta útil para encontrar el perfil más ligero de este ejemplo; sin embargo, ya conociendo el resultado (W12x53), se evaluará la sección para encontrar las resistencias que arroja dicha tabla.

Al consultar la tabla, se verifica que la viga se encuentra en la zona 2 ($L_p = 8.76 \text{ ft} < L_b = 20 \text{ ft} < L_r = 28.2 \text{ ft}$), por lo que no se pueden tomar directamente los valores de $\Phi_b M_{px}$ y M_{px}/Ω_b , en vez de ello, se deben de emplear las ecuaciones 4.1 y 4.2, las cuales están términos de valores que se toman directamente de la tabla. Con dichos valores y resolviendo las ecuaciones mencionadas se tiene:

LRFD:

$$\Phi_b M_n = C_b [\Phi_b M_{px} - \Phi_b BF(L_b - L_p)] \leq \Phi_b M_{px} \quad (4.1) \quad [3 - 4a]$$

$$\Phi_b M_n = 1[(292 \text{ k} - ft) - 5.5 \text{ k}(20 \text{ ft} - 8.76 \text{ ft})] = 230.18 \text{ k} - ft$$

$$\Phi_b M_n = 230.18 \text{ k} - ft < \Phi_b M_{px} = 292 \text{ k} - ft$$

ASD:

$$\frac{M_n}{\Omega_b} = C_b \left[\frac{M_{px}}{\Omega_b} - \frac{BF}{\Omega_b} (L_b - L_p) \right] \leq \frac{M_{px}}{\Omega_b} \quad (4.2) \quad [3 - 4b]$$

$$\frac{M_n}{\Omega_b} = 1[(194 \text{ k} - ft) - 3.65 \text{ k}(20 \text{ ft} - 8.76 \text{ ft})] = 152.97 \text{ k} - ft$$

$$\frac{M_n}{\Omega_b} = 152.97 \text{ k} - ft < \frac{M_{px}}{\Omega_b} = 194 \text{ k} - ft$$

Comparando las resistencias obtenidas con las Tablas 3-2 y 3-10 se tiene:

Tabla 1. Comparativa de resultados entre Tabla 3-2 y Tabla 3-10. Elaboración propia.

Resistencia	Tabla 3-2 k-ft	Tabla 3-10 k-ft
$\Phi_b M_n$	230.18	230.25
M_n/Ω_b	152.97	153.5

Los resultados son consistentes entre ambas tablas.

Como se mencionó el perfil propuesto es W12x53, el cual coincide con aquel propuesto anteriormente en el ejemplo (Ejemplo 3 del inciso 4.1.3) que emplea las fórmulas de la especificación, la diferencia fue que en aquel ejemplo se realizaron 3 iteraciones, mientras que en éste bastó con una.

4.2.4 Ejemplo 4: PLT Inelástico (Zona 2) en viga simplemente apoyada con C_b

La viga de la figura 4.4 es un perfil W21x93 de acero de 50 ksi ($E = 29,000$ ksi) y tiene soporte lateral en su patín de compresión en sus extremos y en el centro del claro. Determine con los métodos LRFD y ASD si la viga es capaz de soportar las siguientes cargas:

$$w_D = 1.1 \text{ k/ft}$$

$$w_L = 2.2 \text{ k/ft}$$

$$P_D = 5 \text{ k}$$

$$P_L = 10 \text{ k}$$

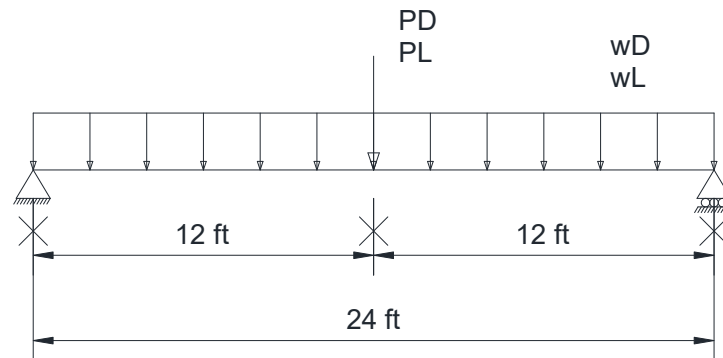


Figura 4.4. Viga simplemente apoyada con soporte lateral en su patín de compresión en sus extremos y en el centro del claro. Elaboración propia.

1. Determinar las cargas últimas y admisibles que deberá soportar la viga.

LRFD:

$$P_u = 1.2P_D + 1.6P_L = 1.2(5 \text{ k}) + 1.6(10 \text{ k}) = 22 \text{ k}$$

$$w_u = 1.2(w_D + \text{Peso propio}) + 1.6w_L$$

$$w_u = 1.2(1.1 \text{ k/ft} + 0.093 \text{ k/ft}) + 1.6(2.2 \text{ k/ft}) = 4.95 \text{ k/ft}$$

ASD:

$$P_a = P_D + P_L = 5 \text{ k} + 10 \text{ k} = 15 \text{ k}$$

$$w_a = (w_D + \text{Peso propio}) + w_L$$

$$w_a = (1.1 \text{ k/ft} + 0.093 \text{ k/ft}) + 2.2 \text{ k/ft} = 3.39 \text{ k/ft}$$

2. Calcular los momentos último y admisible.

LRFD:

$$M_u = \frac{P_u L}{4} + \frac{w_u L^2}{8}$$

$$M_u = \frac{(22 \text{ k})(24 \text{ ft})}{4} + \frac{(4.95 \text{ k/ft})(24 \text{ ft})^2}{8} = 488.52 \text{ k} - \text{ft}$$

ASD:

$$M_a = \frac{P_a L}{4} + \frac{w_a L^2}{8}$$

$$M_a = \frac{(15 \text{ k})(24 \text{ ft})}{4} + \frac{(3.39 \text{ k/ft})(24 \text{ ft})^2}{8} = 334.3 \text{ k} - \text{ft}$$

3. Cálculo del factor C_b . Con apoyo del diagrama de momentos de la figura 4.5 y de la ecuación 3.3 se determina dicho factor:

$$C_b = \frac{12.5M_{m\acute{a}x}}{2.5M_{m\acute{a}x} + 3M_A + 4M_B + 3M_C} \quad (3.3) \quad [F1 - 1]$$

$$C_b = \frac{12.5(488.38)}{2.5(488.38) + 3(189.01) + 4(333.45) + 3(433.33)}$$

$$C_b = 1.38$$

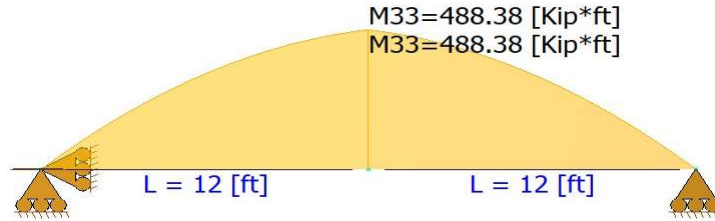


Figura 4.5. Diagrama de momentos de la viga del Ejemplo 4 (inciso 4.1.4). Elaboración propia.

4. Consultando la Tabla 3-2, se determina que la viga está en zona 2 ($L_p = 6.50$ ft $< L_b = 12$ ft $< L_r = 21.3$ ft), por lo tanto, con ayuda de las ecuaciones 4.1 y 4.2 se determina el momento de diseño y el momento admisible respectivamente.

Z_x		Table 3-2 (continued)								$F_y = 50$ ksi		
		W-Shapes										
Selection by Z_x												
Shape	Z_x	M_{px}/Ω_b	$\phi_b M_{px}$	M_{rx}/Ω_b	$\phi_b M_{rx}$	BF/Ω_b	$\phi_b BF$	L_p	L_r	I_x	V_{nx}/Ω_v	$\phi_v V_{nx}$
	in. ³	kip-ft	kip-ft	kip-ft	kip-ft	kips	kips	ft	ft	in. ⁴	kips	kips
		ASD	LRFD	ASD	LRFD	ASD	LRFD				ASD	LRFD
W24×84	224	559	840	342	515	16.2	24.2	6.89	20.3	2370	227	340
W21×93	221	551	829	335	504	14.6	22.0	6.50	21.3	2070	251	376
W12×136	214	534	803	325	488	4.02	6.06	11.2	63.2	1240	212	318
W14×120	212	529	795	332	499	5.09	7.65	13.2	51.9	1380	171	257
W18×97	211	526	791	328	494	9.41	14.1	9.36	30.4	1750	199	299
W24×76	200	499	750	307	462	15.1	22.6	6.78	19.5	2100	210	315

Figura 4.17. Consulta de la Tabla 3-2 para la viga del Ejemplo 4.

LRFD:

$$\Phi_b M_n = 1.38[(829 \text{ k} - ft) - 22 \text{ k}(12 \text{ ft} - 6.50 \text{ ft})] = 977.04 \text{ k} - ft$$

$$\Phi_b M_n = 977.04 \text{ k} - ft > \Phi_b M_{px} = 829 \text{ k} - ft$$

$$\text{Rige } \Phi_b M_{px} = 829 \text{ k} - ft$$

ASD:

$$\frac{M_n}{\Omega_b} = 1.38[(551 k - ft) - 14.6 k(12 ft - 6.50 ft)] = 649.57 k - ft$$

$$\frac{M_n}{\Omega_b} = 649.57 k - ft > \frac{M_{px}}{\Omega_b} = 551 k - ft$$

$$Rige \frac{M_{px}}{\Omega_b} = 551 k - ft$$

5. Determinar los “ratios”.

LRFD:

$$\frac{M_u}{\Phi_b M_n} = \frac{488.52 k - ft}{829 k - ft} = 0.59 < 1$$

ASD:

$$\frac{M_a}{M_n/\Omega_b} = \frac{334.3 k - ft}{551 k - ft} = 0.61 < 1$$

Utilizando la Tabla 3-2 se corrobora que la viga W21x93 es adecuada para soportar las cargas en ambos métodos.

4.2.5 Ejemplo 5: PLT Elástico (Zona 3) en viga simplemente apoyada con C_b

Si a la viga del Ejemplo 4 (inciso 4.2.4) se le retira el soporte lateral en su patín de compresión en el centro del claro, es decir, sólo presenta dicho soporte en los apoyos (figura 4.6), determine con los métodos LRFD y ASD si la viga es capaz de soportar las cargas de dicho ejemplo.

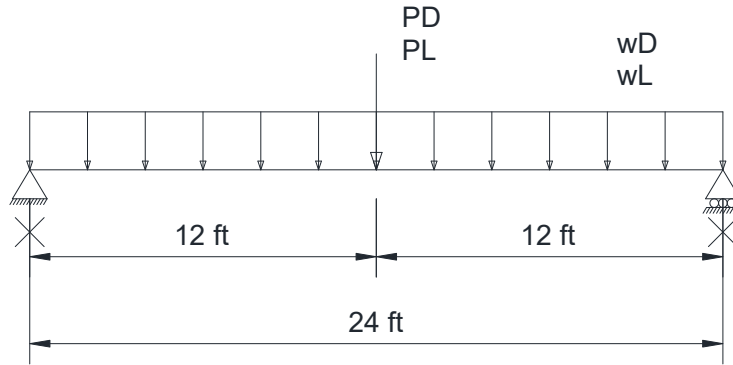


Figura 4.6. Viga simplemente apoyada con soporte lateral en su patín de compresión sólo en sus extremos. Elaboración propia.

1. Determinar las cargas y momentos últimos y admisibles. Dichos valores se toman del Ejemplo 4 del inciso 4.2.4:

LRFD:

$$P_u = 22k \quad w_u = 4.95 \text{ k/ft} \quad M_u = 488.52 \text{ k} - \text{ft}$$

ASD:

$$P_a = 15 \text{ k} \quad w_a = 3.39 \text{ k/ft} \quad M_a = 334.3 \text{ k} - \text{ft}$$

2. Calcular C_b . Con apoyo de la figura 4.7 y la ecuación 2.3 se tiene:

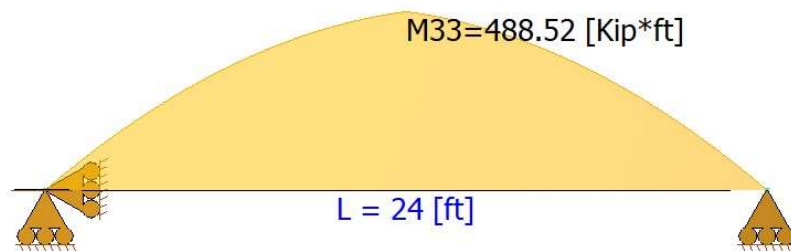


Figura 4.7. Diagrama de momentos de la viga del Ejemplo 5 (inciso 4.1.5). Elaboración propia.

$$C_b = \frac{12.5M_{m\acute{a}x}}{2.5M_{m\acute{a}x} + 3M_A + 4M_B + 3M_C} \quad (3.3) \quad [F1 - 1]$$

$$C_b = \frac{12.5(488.52)}{2.5(488.52) + 3(333.39) + 4(488.52) + 3(333.39)}$$

$$C_b = 1.18$$

3. Se desconoce en qué zona se encuentra la viga, por ello, se utilizará la Tabla 3-10, la cual aplica para las 3 zonas.

Como se comentó previamente, la Tabla 3-10 fue desarrollada con $C_b = 1$; sin embargo, en la mayoría de los casos C_b es mayor a 1. La resistencia de diseño y la resistencia admisible por momento de una sección pueden valer $\Phi_b C_b M_n$ y $C_b M_n / \Omega_b$ respectivamente si $C_b > 1$, pero bajo ninguna circunstancia se pueden exceder los valores $\Phi_b M_p$ y M_p / Ω_b respectivamente. Para resolver este problema, un método de solución es el uso de un momento efectivo ($M_{uefectivo} = M_u / C_b$ y $M_{aefectivo} = M_a / C_b$). Entonces ahora, la consulta en la Tabla 3-10 se realiza con L_b y con el momento efectivo para la selección de un perfil. Es importante asegurarse que, para el diseño LRFD, el M_u calculado no exceda a $\Phi_b M_n = \Phi_b F_y Z_x$ para la sección seleccionada. En forma similar, para el diseño ASD, el M_a calculado no debe exceder a $M_n / \Omega_b = F_y Z_x / \Omega_b$ para la sección seleccionada. En el caso de exceder, deben consultarse nuevamente las gráficas hasta encontrar una sección que proporcione los valores necesarios de $\Phi_b M_n$ y M_n / Ω_b .

Explicada la metodología del momento efectivo, se procede a su cálculo debido a que C_b tiene un valor de 1.18.

LRFD:

$$M_{uefectivo} = \frac{M_u}{C_b} = \frac{488.52 \text{ k} - ft}{1.18} = 414 \text{ k} - ft$$

ASD:

$$M_{aefectivo} = \frac{M_a}{C_b} = \frac{334.3 \text{ k-ft}}{1.18} = 283.31 \text{ k-ft}$$

Se realiza la consulta en las gráficas de la Tabla 3-10 con $L_b = 24$ ft y los respectivos momentos efectivos.

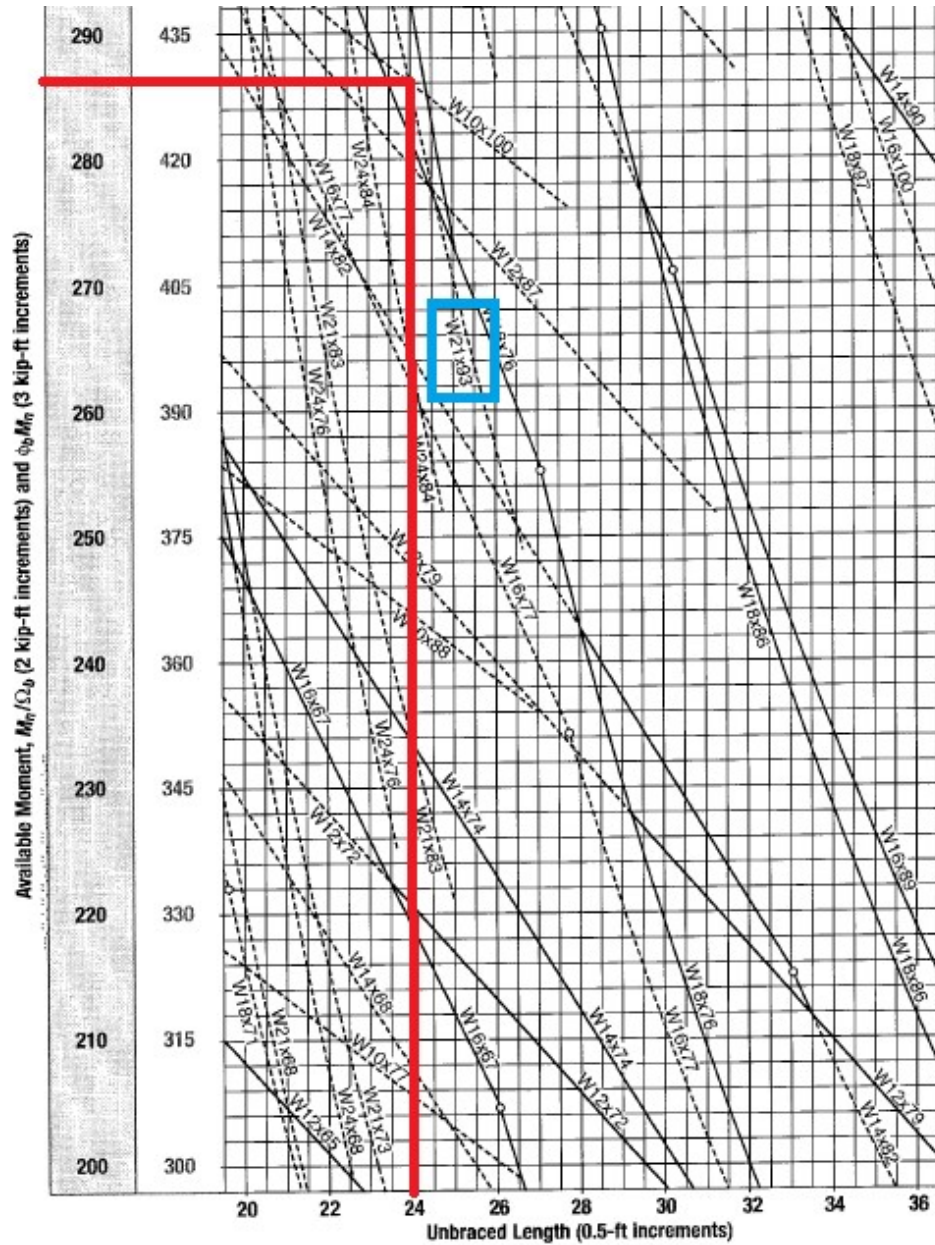


Figura 4.18. Consulta de la Tabla 3-10 para la viga del Ejemplo 5.

Las lecturas obtenidas son $\Phi_b M_n = 429 \text{ k-ft}$ y $M_n/\Omega_b = 286 \text{ k-ft}$. Dichos valores se deben de multiplicar por C_b para obtener las resistencias.

LRFD:

$$C_b \Phi_b M_n = 1.18(429 \text{ k-ft}) = 506.22 \text{ k-ft}$$

ASD:

$$C_b \frac{M_n}{\Omega_b} = 1.18(286 \text{ k-ft}) = 337.48 \text{ k-ft}$$

Como se expuso, cuando se utiliza el momento efectivo se debe de verificar que no se superen los valores $\Phi_b M_p$ y M_p/Ω_b . Dicha revisión se puede hacer consultando la Tabla 3-2 (figura 4.17), con lo cual se tiene:

LRFD:

$$C_b \Phi_b M_n = 506.22 \text{ k-ft} < \Phi_b M_p = 829 \text{ k-ft}$$

El momento de diseño es $C_b \Phi_b M_n = 506.22 \text{ k-ft}$

ASD:

$$C_b \frac{M_n}{\Omega_b} = 337.48 \text{ k-ft} < \frac{M_p}{\Omega_b} = 551 \text{ k-ft}$$

El momento permisible es $C_b \frac{M_n}{\Omega_b} = 337.48 \text{ k-ft}$

4. Determinar el "ratio" para cada método.

LRFD:

$$\frac{M_u}{\Phi_b M_n} = \frac{488.52 \text{ k-ft}}{506.22 \text{ k-ft}} = 0.97 < 1$$

ASD:

$$\frac{M_a}{M_n/\Omega_b} = \frac{334.3 \text{ k-ft}}{337.48 \text{ k-ft}} = 0.99 < 1$$

Con apoyo de las Tablas 3-2 y 3-10 se corrobora que la viga W21x93 es adecuada para resistir las cargas aún sin el soporte lateral central.

4.2.6 Ejemplo 6: PLT Elástico (Zona 3) en viga continua con C_b

El tramo intermedio de la viga continua de la figura 4.8 tiene el diagrama de momentos últimos que se muestra en la figura 4.9, usando acero de 50 ksi ($E = 29,000$ ksi), seleccione la sección más ligera disponible para dicho tramo, el cual tiene soporte lateral en su patín de compresión en los apoyos. Del análisis estructural se sabe que M_u tiene un valor de 67.15 k-ft al centro del tramo y 16.28 k-ft a un cuarto y a tres cuartos de distancia a partir del apoyo. Resuelva con el método LRFD y considere que el peso propio de la viga está incluido en el diagrama.

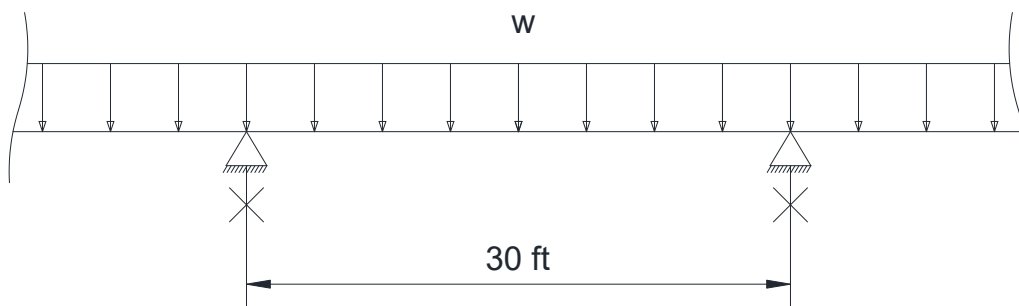


Figura 4.8. Tramo intermedio de una viga continua con soporte lateral en el patín de compresión en los apoyos. Elaboración propia.

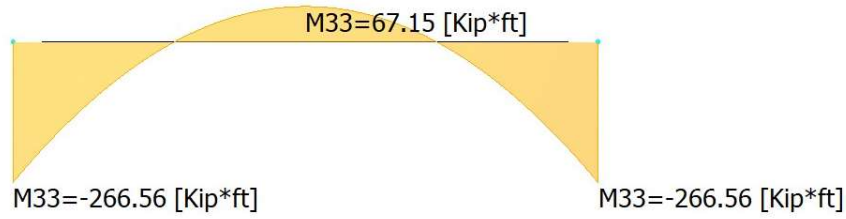


Figura 4.9. Diagrama de momentos del tramo intermedio de la viga continua. Elaboración propia.

1. Determinar factor C_b .

$$C_b = \frac{12.5(266.56)}{2.5(266.56) + 3(16.28) + 4(67.15) + 3(16.28)}$$

$$C_b = 3.23$$

2. Se calcula el momento efectivo.

$$M_{uefectivo} = \frac{M_u}{C_b} = \frac{266.56 \text{ k} - \text{ft}}{3.23} = 82.53 \text{ k} - \text{ft}$$

3. Intento 1. Se consulta la Tabla 3-10 con $L_b = 30 \text{ ft}$ y $M_{uefectivo} = 82.53 \text{ k-ft}$ (figura 4.19).

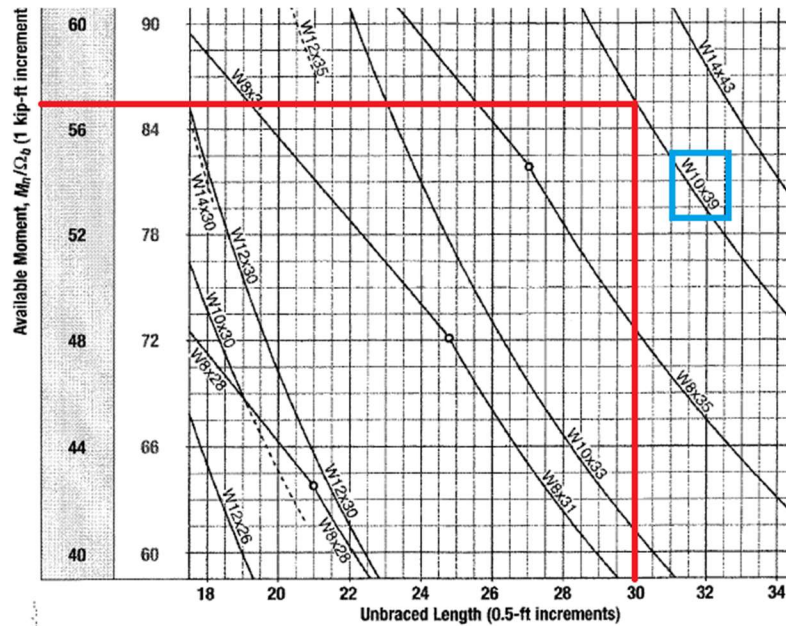


Figura 4.19. Primera consulta Tabla 3-10.

El perfil encontrado intersectando la primera línea continua es W10x39 y se tiene $\Phi_b M_n = 85.5 \text{ k-ft}$. Se debe de multiplicar el valor encontrado por C_b :

$$C_b \Phi_b M_n = 3.23(85.5 \text{ k-ft}) = 276.17 \text{ k-ft}$$

Se debe de verificar que no se supere el valor de $\Phi_b M_p$. Para ello se consulta la Tabla 3-2 (figura 4.20), con lo cual se tiene:

<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> <div style="font-size: 2em; font-weight: bold; margin-right: 20px;">Z_x</div> <div style="text-align: center;"> Table 3-2 (continued) W-Shapes Selection by Z_x </div> <div style="text-align: right; margin-right: 20px;">$F_y = 50 \text{ ksi}$</div> </div>												
Shape	Z_x	M_{px}/Ω_b		M_{rx}/Ω_b		BF/Ω_b		L_p	L_r	I_x	V_{nx}/Ω_v	
		kip-ft	kip-ft	kip-ft	kip-ft	kips	kips				kips	kips
	in. ³	ASD	LRFD	ASD	LRFD	ASD	LRFD	ft	ft	in. ⁴	ASD	LRFD
W18x35	66.5	166	249	101	151	8.14	12.3	4.31	12.3	510	106	159
W12x45	64.2	160	241	101	151	3.80	5.80	6.89	22.4	348	81.1	122
W16x36	64.0	160	240	98.7	148	6.24	9.36	5.37	15.2	448	93.8	141
W14x38	61.5	153	231	95.4	143	5.37	8.20	5.47	16.2	385	87.4	131
W10x49	60.4	151	227	95.4	143	2.46	3.71	8.97	31.6	272	68.0	102
W8x58	59.8	149	224	90.8	137	1.70	2.55	7.42	41.6	228	89.3	134
W12x40	57.0	142	214	89.9	135	3.66	5.54	6.85	21.1	307	70.2	105
W10x45	54.9	137	206	85.8	129	2.59	3.89	7.10	26.9	248	70.7	106
W14x34	54.6	136	205	84.9	128	5.01	7.55	5.40	15.6	340	79.8	120
W16x31	54.0	135	203	82.4	124	6.86	10.3	4.13	11.8	375	87.5	131
W12x35	51.2	128	192	79.6	120	4.34	6.45	5.44	16.6	285	75.0	113
W8x48	49.0	122	184	75.4	113	1.67	2.55	7.35	35.2	184	68.0	102
W14x30	47.3	118	177	73.4	110	4.63	6.95	5.26	14.9	291	74.5	112
W10x39	46.8	117	176	73.5	111	2.53	3.78	6.99	24.2	209	62.5	93.7
W16x26'	44.2	110	166	67.1	101	5.93	8.98	3.96	11.2	301	70.5	106

Figura 4.20. Primera consulta Tabla 3-2.

$$C_b \Phi_b M_n = 276.17 \text{ k-ft} > \Phi_b M_p = 176 \text{ k-ft}$$

$$\text{Rige } \Phi_b M_p = 176 \text{ k-ft}$$

$$\Phi_b M_p = 176 \text{ k-ft} < M_u = 266.56 \text{ k-ft}$$

$$\frac{M_u}{\Phi_b M_p} = \frac{266.56 \text{ k-ft}}{176 \text{ k-ft}} = 1.51 > 1 \quad \text{No se acepta.}$$

4. Intento 2. Se consulta nuevamente la Tabla 3-10 con los mismos datos de entrada, $L_b = 30 \text{ ft}$ y $M_{uefectivo} = 82.53 \text{ k-ft}$ (figura 4.21).

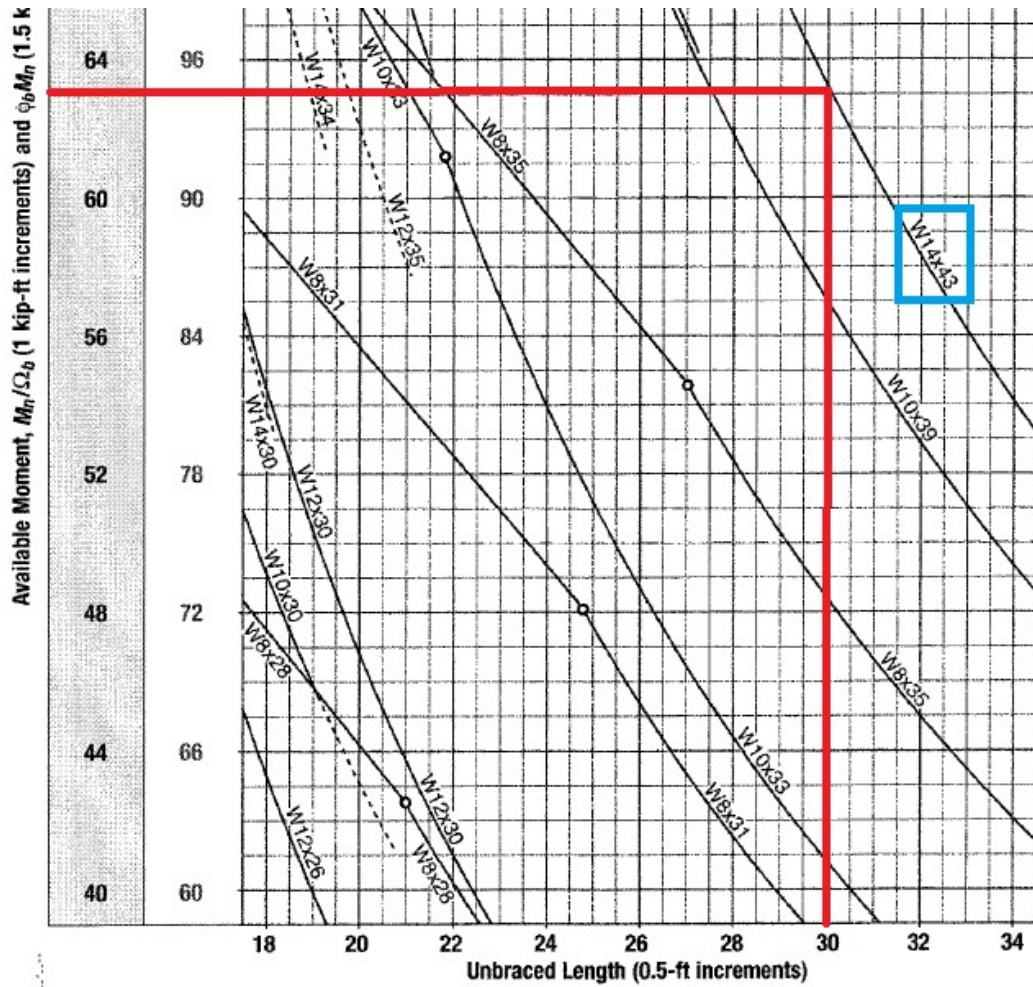


Figura 4.21. Segunda consulta Tabla 3-10.

Intersectando la siguiente línea continua se encuentra W14x43 y se tiene $\phi_b M_n = 94.5$ k-ft. Se multiplica por C_b :

$$C_b \phi_b M_n = 3.23(94.5 \text{ k} - \text{ft}) = 305.24 \text{ k} - \text{ft}$$

Se consulta la Tabla 3-2 (figura 4.22) para verificar que no se supere el valor de $\phi_b M_p$:

Table 3-2 (continued)
W-Shapes
Selection by Z_x

$F_y = 50$ ksi

Z_x

Shape	Z_x in. ³	M_{px}/Ω_b		M_{rx}/Ω_b		BF/Ω_b		L_p ft	L_r ft	I_x in. ⁴	V_{nx}/Ω_v	
		kip-ft	kip-ft	kip-ft	kip-ft	ASD	LRFD				ASD	LRFD
W21×55	126	314	473	192	289	10.8	16.3	6.11	17.4	1140	156	234
W14×74	126	314	473	196	294	5.31	8.05	8.76	31.0	795	128	192
W18×60	123	307	461	189	284	9.62	14.4	5.93	18.2	984	151	227
W12×79	119	297	446	187	281	3.78	5.67	10.8	39.9	662	117	175
W14×68	115	287	431	180	270	5.19	7.81	8.69	29.3	722	116	174
W10×88	113	282	424	172	259	2.62	3.94	9.29	51.2	534	131	196
W18×55	112	279	420	172	258	9.15	13.8	5.90	17.6	890	141	212
W21×50	110	274	413	165	248	12.1	18.3	4.59	13.6	984	158	237
W12×72	108	269	405	170	256	3.69	5.56	10.7	37.5	597	106	159
W21×48	107	265	398	162	244	9.89	14.8	6.09	16.5	959	144	216
W16×57	105	262	394	161	242	7.98	12.0	5.65	18.3	758	141	212
W14×61	102	254	383	161	242	4.93	7.48	8.65	27.5	640	104	156
W18×50	101	252	379	155	233	8.76	13.2	5.83	16.9	800	128	192
W10×77	97.6	244	366	150	225	2.60	3.90	9.18	45.3	455	112	169
W12×65	96.8	237	356	154	231	3.58	5.39	11.9	35.1	533	94.4	142
W21×44	95.4	238	358	143	214	11.1	16.8	4.45	13.0	843	145	217
W16×50	92.0	230	345	141	213	7.69	11.4	5.62	17.2	659	124	186
W18×46	90.7	226	340	138	207	9.63	14.6	4.56	13.7	712	130	195
W14×53	87.1	217	327	136	204	5.22	7.93	6.78	22.3	541	103	154
W12×58	86.4	216	324	136	205	3.82	5.69	8.87	29.8	475	87.8	132
W10×68	85.3	213	320	132	199	2.58	3.85	9.15	40.6	394	97.8	147
W16×45	82.3	205	309	127	191	7.12	10.8	5.55	16.5	586	111	167
W18×40	78.4	196	294	119	180	8.94	13.2	4.49	13.1	612	113	169
W14×48	78.4	196	294	123	184	5.09	7.67	6.75	21.1	484	93.8	141
W12×53	77.9	194	292	123	185	3.65	5.50	8.76	28.2	425	83.5	125
W10×60	74.6	186	280	116	175	2.54	3.82	9.08	36.6	341	85.7	129
W16×40	73.0	182	274	113	170	6.67	10.0	5.55	15.9	518	97.6	146
W12×50	71.9	179	270	112	169	3.97	5.98	6.92	23.8	391	90.3	135
W8×67	70.1	175	263	105	159	1.75	2.59	7.49	47.6	272	103	154
W14×43	69.6	174	261	109	164	4.88	7.28	6.68	20.0	428	83.6	125

Figura 4.22. Segunda consulta Tabla 3-2.

$$C_b \Phi_b M_n = 305.24 \text{ k} - \text{ft} > \Phi_b M_p = 261 \text{ k} - \text{ft}$$

$$\text{Rige } \Phi_b M_p = 261 \text{ k} - \text{ft}$$

$$\Phi_b M_p = 261 \text{ k} - \text{ft} < M_u = 266.56 \text{ k} - \text{ft}$$

$$\frac{M_u}{\Phi_b M_p} = \frac{266.56 \text{ k} - \text{ft}}{261 \text{ k} - \text{ft}} = 1.02 > 1 \quad \text{No se acepta.}$$

5. Intento 3. Se procede de la misma forma consultando la Tabla 3-10 (figura 4.23).

Shape	Z_x in. ³	M_{px}/Ω_b		M_{rx}/Ω_b		BF/Ω_b		L_p ft	L_r ft	I_x in. ⁴	V_{nx}/Ω_v	
		kip-ft		kip-ft		kips					kips	
		ASD	LRFD	ASD	LRFD	ASD	LRFD				ASD	LRFD
W18x35	66.5	166	249	101	151	8.14	12.3	4.31	12.3	510	106	159
W12x45	64.2	160	241	101	151	3.80	5.80	6.89	22.4	348	81.1	122
W16x36	64.0	160	240	98.7	148	6.24	9.36	5.37	15.2	448	93.8	141
W14x38	61.5	153	231	95.4	143	5.37	8.20	5.47	16.2	385	87.4	131
W10x49	60.4	151	227	95.4	143	2.46	3.71	8.97	31.6	272	68.0	102
W8x58	59.8	149	224	90.8	137	1.70	2.55	7.42	41.6	228	89.3	134
W12x40	57.0	142	214	89.9	135	3.66	5.54	6.85	21.1	307	70.2	105
W10x45	54.9	137	206	85.8	129	2.59	3.89	7.10	26.9	248	70.7	106

Figura 4.24. Tercera consulta Tabla 3-2.

$$C_b \Phi_b M_n = 482.08 \text{ k-ft} > \Phi_b M_p = 227 \text{ k-ft}$$

$$\text{Rige } \Phi_b M_p = 227 \text{ k-ft}$$

$$\Phi_b M_p = 227 \text{ k-ft} < M_u = 266.56 \text{ k-ft}$$

$$\frac{M_u}{\Phi_b M_p} = \frac{266.56 \text{ k-ft}}{227 \text{ k-ft}} = 1.17 > 1 \quad \text{No se acepta.}$$

6. Intento 4. Se consulta nuevamente la Tabla 3-10 (figura 4.25).

Se encuentra W12x53 ($\Phi_b M_n = 171 \text{ k-ft}$):

$$C_b \Phi_b M_n = 3.23(171 \text{ k-ft}) = 552.33 \text{ k-ft}$$

Se consulta la Tabla 3-2 (figura 4.26) y se tiene:

$$C_b \Phi_b M_n = 552.33 \text{ k-ft} > \Phi_b M_p = 292 \text{ k-ft}$$

$$\text{Rige } \Phi_b M_p = 292 \text{ k-ft}$$

$$\Phi_b M_p = 292 \text{ k-ft} > M_u = 266.56 \text{ k-ft}$$

$$\frac{M_u}{\Phi_b M_p} = \frac{266.56 \text{ k-ft}}{292 \text{ k-ft}} = 0.91 < 1 \quad \text{Se acepta.}$$

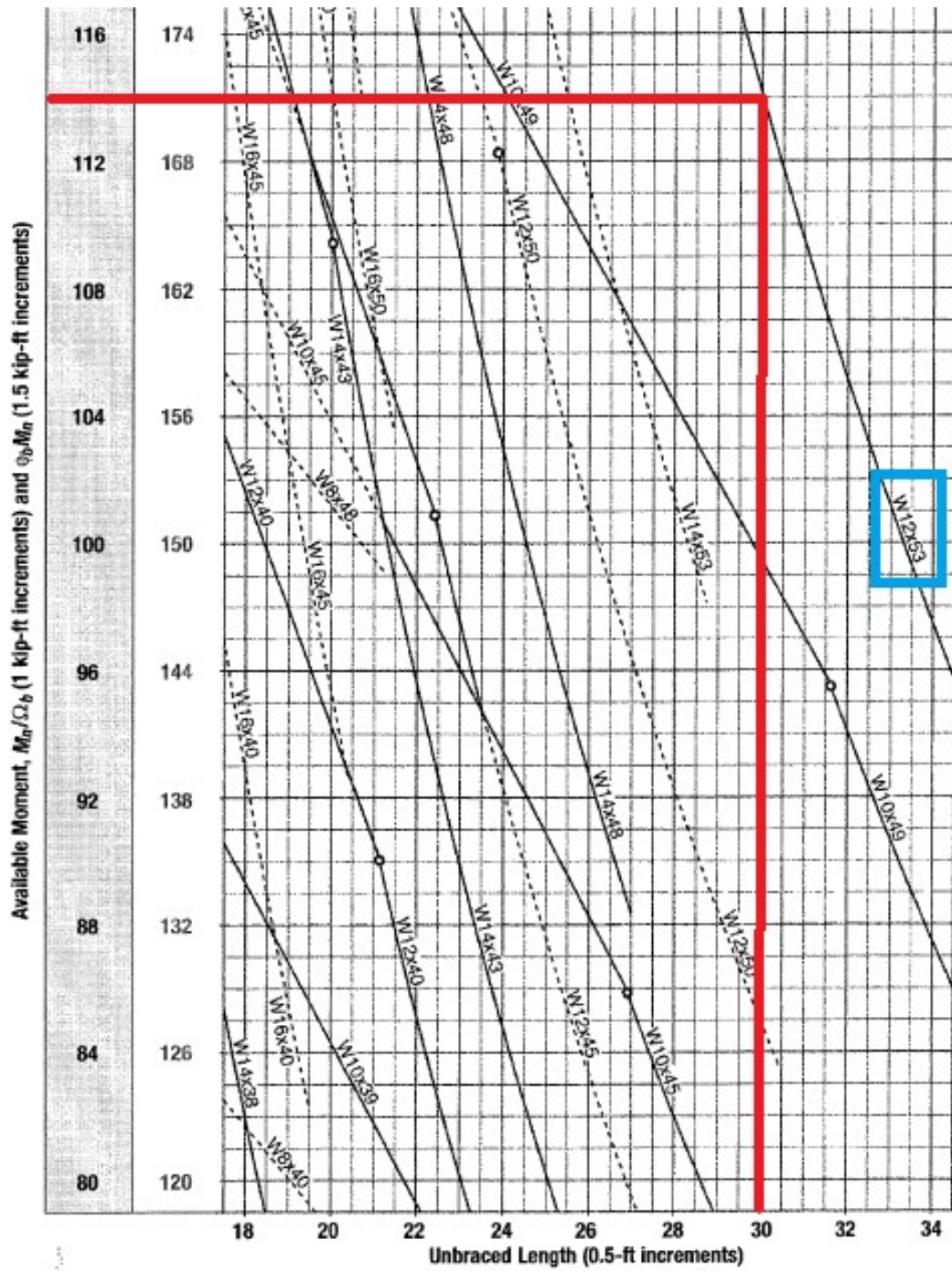


Figura 4.25. Cuarta consulta Tabla 3-10.

Table 3-2 (continued)
W-Shapes
Selection by Z_x

$F_y = 50$ ksi

Z_x

Shape	Z_x	M_{px}/Ω_b		M_{rx}/Ω_b		BF/Ω_b		L_p	L_r	I_x	V_{nx}/Ω_v	
		kip-ft	kip-ft	kip-ft	kip-ft	kips	kips				kips	kips
	in. ³	ASD	LRFD	ASD	LRFD	ASD	LRFD	ft	ft	in. ⁴	ASD	LRFD
W21×55	126	314	473	192	289	10.8	16.3	6.11	17.4	1140	156	234
W14×74	126	314	473	196	294	5.31	8.05	8.76	31.0	795	128	192
W18×60	123	307	461	189	284	9.62	14.4	5.93	18.2	984	151	227
W12×79	119	297	446	187	281	3.78	5.67	10.8	39.9	662	117	175
W14×68	115	287	431	180	270	5.19	7.81	8.69	29.3	722	116	174
W10×88	113	282	424	172	259	2.62	3.94	9.29	51.2	534	131	196
W18×55	112	279	420	172	258	9.15	13.8	5.90	17.6	890	141	212
W21×50	110	274	413	165	248	12.1	18.3	4.59	13.6	984	158	237
W12×72	108	269	405	170	256	3.69	5.56	10.7	37.5	597	106	159
W21×48'	107	265	398	162	244	9.89	14.8	6.09	16.5	959	144	216
W16×57	105	262	394	161	242	7.98	12.0	5.65	18.3	758	141	212
W14×61	102	254	383	161	242	4.93	7.48	8.65	27.5	640	104	156
W18×50	101	252	379	155	233	8.76	13.2	5.83	16.9	800	128	192
W10×77	97.6	244	366	150	225	2.60	3.90	9.18	45.3	455	112	169
W12×65'	96.8	237	356	154	231	3.58	5.39	11.9	35.1	533	94.4	142
W21×44	95.4	238	358	143	214	11.1	16.8	4.45	13.0	843	145	217
W16×50	92.0	230	345	141	213	7.69	11.4	5.62	17.2	659	124	186
W18×46	90.7	226	340	138	207	9.63	14.6	4.56	13.7	712	130	195
W14×53	87.1	217	327	136	204	5.22	7.93	6.78	22.3	541	103	154
W12×58	86.4	216	324	136	205	3.82	5.69	8.87	29.8	475	87.8	132
W10×68	85.3	213	320	132	199	2.58	3.85	9.15	40.6	394	97.8	147
W16×45	82.3	205	309	127	191	7.12	10.8	5.55	16.5	586	111	167
W18×40	78.4	196	294	119	180	8.94	13.2	4.49	13.1	612	113	169
W14×48	78.4	196	294	123	184	5.09	7.67	6.75	21.1	484	93.8	141
W12×53	77.9	194	292	123	185	3.65	5.50	8.76	28.2	425	83.5	125
W10×60	74.6	186	280	116	175	2.54	3.82	9.08	36.6	341	85.7	129

Figura 4.26. Cuarta consulta Tabla 3-2.

La sección propuesta haciendo uso de las Tablas 3-2 y 3-10 es W12x53. Llama la atención el resultado, ya que difiere con el resultado obtenido en el mismo ejemplo resuelto con la especificación, el cual es W14x48, y donde se aclaró es una aproximación. Se concluye que, en este ejemplo en particular, el resultado de las tablas no fue el perfil más ligero.

Si bien no fue tan tedioso el uso de las tablas comparado con las 5 repeticiones que se realizaron al emplear las fórmulas de la especificación (Ejemplo 6 inciso 4.1.6), en este ejemplo, fueron necesarios 4 intentos o consultas a dichas tablas. El lector se pudo percatar, que el empleo de la Tabla 3-10 con un C_b mayor a 1, implicó en numerosas ocasiones un ir y venir entre dicha tabla y la Tabla 3-2 para verificar que no se supere el valor de $\Phi_b M_p$. Sin lugar a duda, este ejemplo se resolvió más rápido que aquel hecho con la especificación; sin embargo, el ir y venir entre las tablas, fue un tanto tedioso. El ejemplo se resolvió en 20 minutos, en contraste con las 1.5 horas que fueron necesarias cuando se usó la especificación.

4.3 Solución con software comercial

Otra alternativa que existe es el empleo de programas comerciales de análisis y diseño estructural. Su uso presenta grandes ventajas en la precisión de los resultados y en el tiempo para generarlos. Es importante aclarar que el empleo de ese tipo de programas debe ser con el debido cuidado, se requieren conocimientos de ingeniería estructural, se debe tener claro qué datos ingresar y se debe de tener capacidad para interpretar los resultados, si se ingresa “basura”, regresa “basura”. Un resultado erróneo podría traer drásticas consecuencias en el comportamiento de un edificio.

A continuación se resuelve con el método LRFD el caso del Ejemplo 3, pero con apoyo de software comercial (RAM Advanse).

4.3.1 Ejemplo 3: PLT Inelástico (Zona 2) en viga simplemente apoyada

Usando acero de 50 ksi ($E = 29,000$ ksi), seleccione la sección más ligera disponible para la viga de la figura 4.3, que tiene soporte lateral en su patín de compresión sólo en sus extremos. Suponga $C_b = 1$ para este ejemplo (en realidad es 1.14).

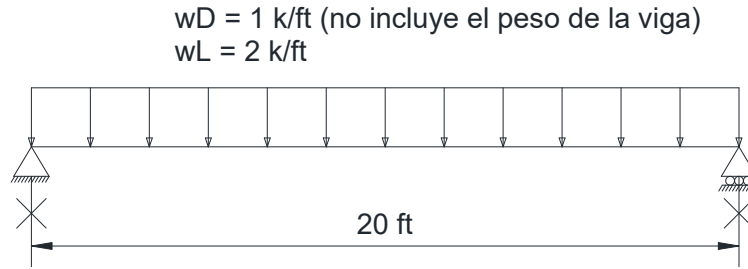


Figura 4.3. Viga simplemente apoyada con carga uniformemente distribuida. Elaboración propia.

1. Determinar el momento último. Para ello se realiza un análisis estructural, el cual incluye el peso de la sección. Para determinar una sección, se utilizaron las reglas de pre-dimensionamiento descritas, así el perfil propuesto es W12x14.

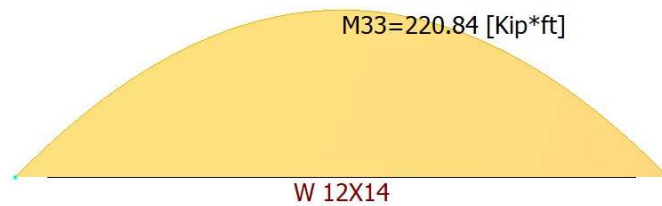


Figura 4.27. Análisis estructural de W12x14. Elaboración propia.

2. Diseño estructural con el método LRFD.

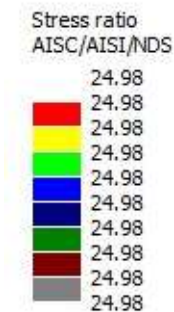


Figura 4.28. Diseño estructural de W12x14. Elaboración propia.

La sección no es aceptable, presenta un “ratio” de $24.98 > 1$.

3. Se realizan 4 iteraciones adicionales evaluando diferentes secciones. En la última se seleccionó W12x58. Su análisis (peso propio incluido) se presenta a continuación:

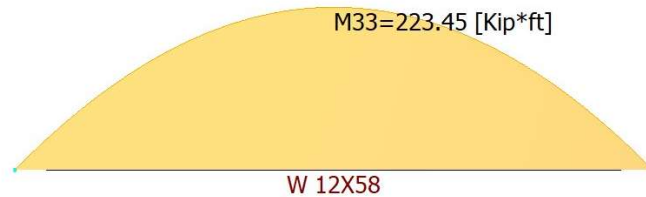


Figura 4.29. Análisis estructural de W12x58. Elaboración propia.

4. Diseño estructural de la sección W12x58.

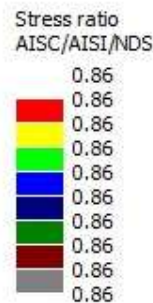


Figura 4.30. Diseño estructural de W12x58. Elaboración propia.

El ratio obtenido es de $0.86 > 1$. La sección se acepta.

La sección que se propone es W12x58. El resultado obtenido previamente en el ejemplo resuelto con la especificación fue W12x53. La práctica común del ingeniero estructural es basar su criterio en el "ratio", es decir, buscar un perfil cuyo ratio sea menor o igual que la unidad, descuidando en ocasiones el peso de la sección. En este ejemplo, el usuario del software intentó diferentes perfiles hasta que uno cumpliera con resistencia. Fue necesario probar 5 diferentes secciones para poder llegar al resultado. Si bien el modelado y las iteraciones fueron en poco tiempo (5 minutos), el resultado no fue la sección más ligera, y por ende, no fue la más económica. La práctica igual es proponer la sección más económica que cuente con suficiente resistencia.

CAPÍTULO 5. SOLUCIÓN MEDIANTE SOFTWARE INTERACTIVO

El Capítulo 5 está destinado a presentar el software motivo de este estudio y para tal fin, se divide en dos partes. En la primera de ellas, se describe su diseño, se explica cómo se realizó, el lenguaje empleado y la razón de ello, se menciona la estructura que sigue, así como algunos beneficios que proporciona y las razones que llevaron a su creación. Se da una breve guía al usuario de cómo utilizarlo, además de que se mencionan algunas herramientas con las que cuenta y que lo hacen más práctico y útil.

En la segunda parte se ilustra el empleo del programa por medio de una serie de ejemplos sencillos, dichos ejemplos corresponden a aquellos resueltos en el Capítulo 4. La intención principal es presentar las soluciones generadas con el software y compararlas con aquellas obtenidas en el capítulo anterior. Se hace énfasis en que los ejemplos propuestos de ninguna manera deben tomarse como modelos rígidos de cálculo, debiéndose considerar más bien como guías de estudio.

5.1 Desarrollo del software

Hoy en día, gran parte de las metodologías empleadas por los reglamentos de construcción para el dimensionamiento, no sólo de vigas, sino de un gran número de elementos estructurales, implican múltiples iteraciones para llegar a una solución óptima. Esta situación dificulta y hace extensa la tarea del diseñador estructural. De ello surge la necesidad de contar con herramientas de cómputo que agilicen y optimicen el trabajo. Si dichas herramientas cuentan con un enfoque educativo, es decir, con una salida gráfica interactiva de datos donde se aprecie plenamente el comportamiento estructural, facilitarán el aprendizaje de los estudiantes y la enseñanza de los docentes en temas relacionados con el diseño de vigas.

La importancia de la creación de programas de cómputo especializados en el área de estructuras, así como la razón por la cual se elaboró Zteel Beams, producto del

presente trabajo, se explican en las líneas anteriores. A continuación, se describirá el comportamiento y el diseño del mismo.

5.1.1 Descripción

Zteel Beams es un programa de cómputo sencillo, útil y práctico, realizado en un ambiente agradable, que diseña vigas de acero sujetas a flexión en su eje de mayor inercia. Tiene como objetivo la obtención del momento flexionante resistente en función de la longitud lateral no soportada del patín de compresión de acuerdo con los métodos LRFD y ASD de la especificación AISC 360-16 e IMCA 2015. Dicha resistencia es presentada tanto de forma numérica como de forma gráfica, siendo ésta última de gran ayuda para la comprensión del tema.

Para cumplir con dicho objetivo, Zteel Beams cuenta una interfaz gráfica simple e interactiva, la cual permite que cualquier persona con conocimientos básicos de flexión y de diseño en acero pueda utilizarlo.

Las características del programa son:

- Emplea la especificación más actualizada del AISC: AISC 360-16.
- Dada la compatibilidad de la especificación AISC y el Manual IMCA, el software permite trabajar bajo los criterios del segundo.
- Posee un convertidor de unidades, el cual permite el ingreso y salida de datos con diferentes unidades. Zteel Beams permite trabajar en los sistemas inglés, métrico e internacional.
- El software es versátil gracias a sus opciones de búsqueda avanzada. El usuario puede buscar un perfil en todo el catálogo o puede hacer búsquedas bajo criterios específicos: arquitectura, resistencia, rigidez y economía. Zteel Beams permite buscar perfiles ya sea por peralte, por módulo de sección plástico, por inercia o por peso.
- Determina el momento nominal.
- Obtiene la resistencia a flexión en los métodos LRFD y ASD.

- Posee una amplia biblioteca de perfiles W (I).
- Trabaja con diferentes grados de acero.
- Revisa la relación ancho-espesor del perfil y determina si la sección es compacta, no compacta o esbelta.
- Diseña vigas en cualquiera de las tres zonas (plastificación, PLT inelástico y PLT elástico).
- Determina las longitudes L_p y L_r . En el caso de las secciones con patín no compacto, determina L'_p y M'_p .
- Permite incluir los efectos del factor C_b en la resistencia a flexión.
- La salida de datos es gráfica y numérica.
- Posee un display que funciona como una potente pantalla interactiva en la cual el usuario puede navegar. Dicha pantalla tiene funciones de zoom, así como de identificación de perfiles.
- La salida numérica se presenta de forma tabulada con opciones para ordenar la información. Permite encontrar el perfil más ligero que cumpla con resistencia para determinadas acciones, el perfil más eficiente, el perfil con mayor inercia, la sección con mayor o menor ancho de patín, permite elegir el perfil más eficiente con determinado peralte, entre otros.
- Calcula el “ratio” y presenta los resultados en una escala de colores amigable para fácil interpretación para el usuario.
- Muestra las propiedades geométricas de los perfiles estudiados.
- Genera un reporte para impresión.

Algunos beneficios de Zteel Beams son la rapidez en la solución de problemas, así como la precisión en los resultados. El usuario puede modificar uno o varios datos de entrada y obtener múltiples soluciones de forma sencilla. De esta manera, la tarea de las iteraciones deja de ser un problema y se limita a un juego simple con el programa.

Zteel Beams fue realizado en el lenguaje Visual Basic de la plataforma Visual Studio 2017. La razón de ello fue principalmente por su fácil manejo. Si se cuenta con los conocimientos necesarios acerca de Visual Basic, la estructuración del código de

un programa puede llegar a ser bastante simple. Visual Basic es un lenguaje de programación completo y flexible que ofrece un entorno ameno y sencillo, el cual permite realizar desde programas simples hasta aquellos con un grado de complejidad importante. El ambiente de desarrollo de Visual Basic es completamente gráfico, lo cual facilita la programación aplicaciones; esto gracias a su constructor de interfaz gráfica, con el cual no es necesario escribir el código para la parte gráfica del programa, sino que se puede hacer de forma visual. De esta forma, Visual Basic genera de manera automática conectividad entre controles y datos, sólo basta con arrastrar y colocar los controles sobre los formularios. De igual forma, Visual Basic ofrece un gran número de métodos, los cuales son procedimientos predefinidos en el mismo lenguaje que realizan operaciones específicas sobre los objetos. Como se aprecia, este lenguaje de programación posee varios componentes desarrollados, de esta forma, el programador sólo se preocupa por implementarlos y no por su elaboración. Así, Visual Basic permite realizar programas o aplicaciones en muy poco tiempo. En otras palabras, permite un desarrollo eficaz y menor inversión de tiempo en comparación con otros lenguajes.

Otras ventajas de Visual Basic son su rápida curva de aprendizaje, de esta forma, personas ajenas a la programación pueden adquirir rápidamente las herramientas necesarias para realizar una aplicación, mientras que aquellos programadores avanzados pueden mejorar sus conocimientos; posee un gran número de bibliotecas que permiten usar con suma facilidad la plataforma de los sistemas Windows y la integración con otras aplicaciones; y además, el código fácilmente se puede exportar a otros lenguajes. Posee un depurador que corrige errores en el código para su correcta compilación y un compilador que traduce el código fuente a lenguaje de máquina.

De acuerdo con los puntos anteriores, Visual Basic es un lenguaje que ofrece múltiples beneficios, posee procedimientos previamente desarrollados, permite el acceso a bases de datos, facilita su aprendizaje y en general, su manejo es sencillo,

lo cual ahorra tiempo. De esta forma, se entiende la razón por la cual se eligió Visual Basic y no algún otro lenguaje.

El código de Zteel Beams está formado por cuatro formularios y un módulo, los cuales, a su vez, están integrados por conjuntos de subrutinas que realizan tareas específicas. Como se aprecia, la estructuración del código se dividió en dos partes, los cuatro formularios se encargan del diseño e implementación de la interfaz, mientras que el módulo contiene todos los algoritmos y procedimientos que dan cuerpo a la aplicación, el módulo es el alma de la aplicación.

De esta forma, el esqueleto de Zteel Beams cuenta con la siguiente disposición. Un formulario que contiene una ventana de presentación o portada; un segundo formulario, o formulario principal, que funciona como consola, la cual tiene el control global del software, tanto el ingreso como la salida de datos se realiza en él. Presenta opciones de visualización y búsqueda avanzada de resultados, opciones de elección del método de diseño (nominal, LRFD y ASD), tipos de aceros, ingreso de coeficiente C_b , longitud L_b y momento actuante, así como una interfaz, la cual funciona como pantalla para la salida gráfica de resultados, un tabulador para presentar los resultados de forma numérica y un visor que presenta la resistencia y el "ratio" de un perfil determinado que se estudie. Además del diseño y de la implementación del software, el segundo formulario presenta el algoritmo madre que controla la aplicación. Presenta diferentes líneas de código, las cuales llaman en tiempo de ejecución a las diferentes subrutinas localizadas en el módulo. Este formulario además se encarga de la validación de datos, cuenta con una serie de filtros, los cuales tienen la finalidad de orientar y guiar al usuario para que no cometan errores en la entrada de datos.

Un tercer formulario que tiene por función la conversión de unidades de diferentes sistemas de unidades, y el cuarto y último formulario, es empleado exclusivamente como medio de información, el usuario no puede hacer mayor manipulación sobre él.

El módulo contiene los algoritmos de lectura de la información de los perfiles de la base de datos, los algoritmos encargados de determinar la relación ancho-espesor, los algoritmos de diseño por flexión de las vigas, y todas las subrutinas para graficar, así como para tabular los resultados. De esta forma, se da por finalizada la estructuración de Zteel Beams.

5.1.2 Uso del software

En esta sección se muestra a detalle la forma de usar el software. Para empezar a trabajar con Zteel Beams, se debe de hacer doble clic en el ícono correspondiente al programa, el cual tiene su nombre. Al hacer esto, el software se ejecuta y se inicia mostrando la ventana de presentación que se ilustra en la figura 5.1.

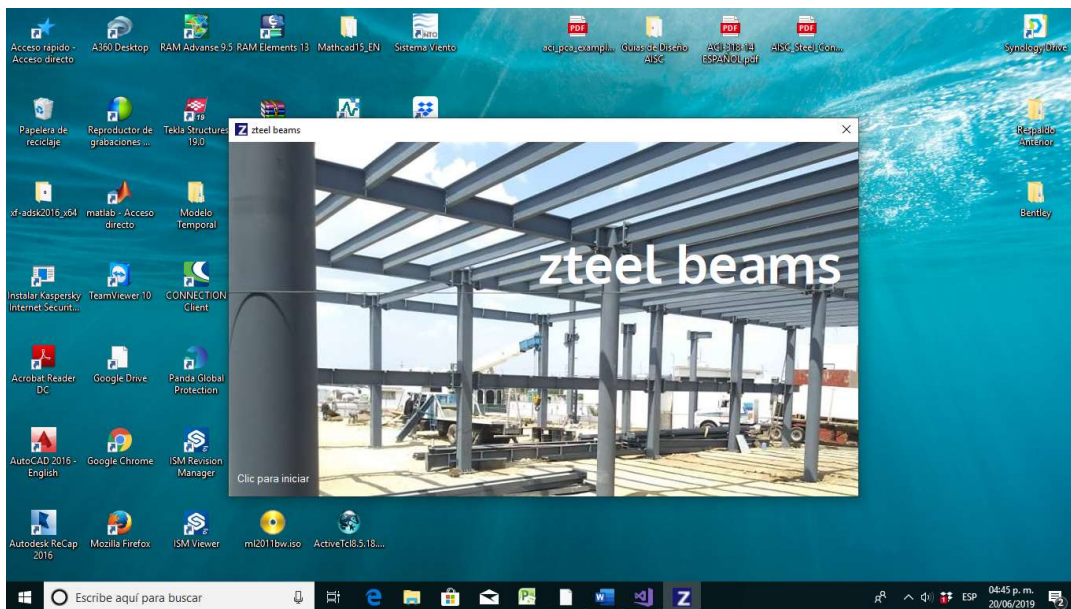


Figura 5.1. Ventana de presentación.

Una vez visualizada la carátula, basta con hacer un clic para dar inicio formal del software, como se indica en la figura 5.2.



Figura 5.2. Clic en la ventana de presentación.

Inmediatamente después, se despliega la ventana principal del software, la cual funciona como consola. Destaca su característica de ser intuitiva. Dicha consola tiene el control global del programa, en ella se realiza tanto la entrada como la salida de datos. Se decidió realizar de esta forma pensando en la comodidad del usuario. En una sola ventana tiene el control total de la aplicación, puede ver los datos que ingresó y los resultados que arroja el programa. Se evitó la molestia de estar navegando de ventana en ventana. Otra razón por lo cual se creó la consola, es por fines didácticos. Esta forma de presentar la información le facilita al académico la enseñanza y al alumno el aprendizaje del diseño de vigas de acero. En la figura 5.3 se ilustra dicha ventana principal.

La ventana consola consta básicamente de 4 partes: visualización, entrada de datos, salida de datos y menús.

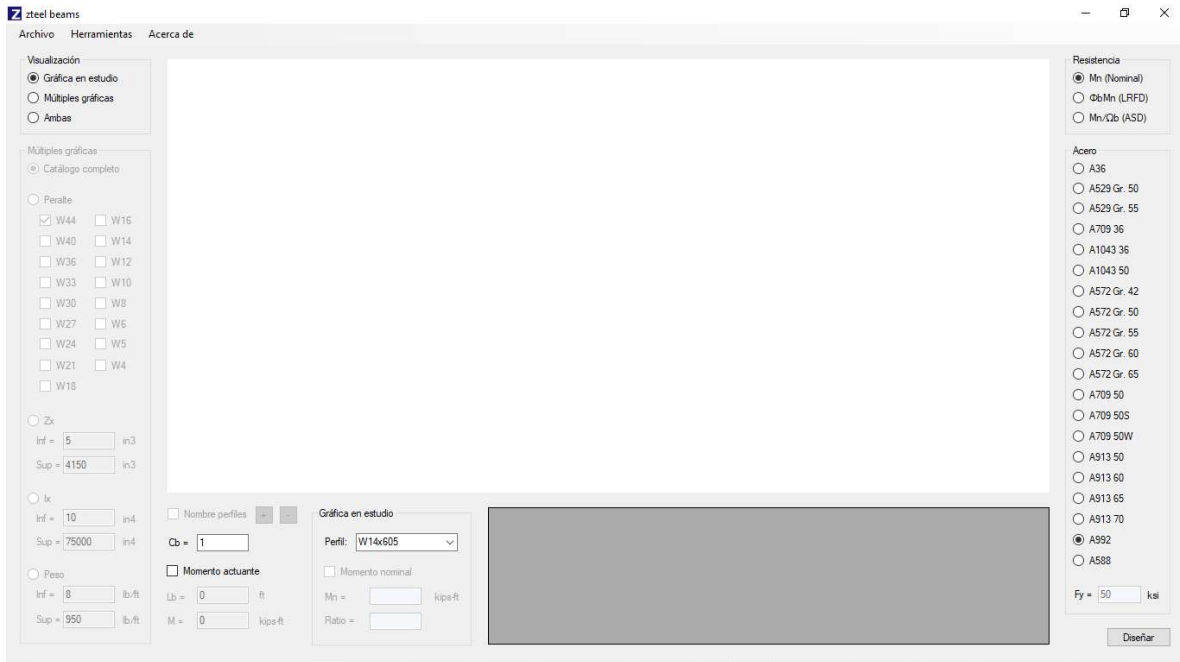


Figura 5.3. Ventana principal de Zteel Beams.

El control *Visualización* se encuentra en la parte superior izquierda de la pantalla. Zteel Beams es un programa que diseña por flexión secciones W (I) de acero en base a la longitud no soportada lateralmente del patín de compresión, y dicha tarea la realiza construyendo la gráfica M_n-L_b (momento nominal – longitud no soportada lateralmente) de dichas secciones. Zteel Beams permite visualizar la información de 3 formas: *Gráfica en estudio*, *Múltiples gráficas* o *Ambas*. Cuando se le indica al software la opción de *Gráfica en estudio*, el programa visualiza únicamente el perfil que el usuario elija. En el caso de *Múltiples gráficas*, Zteel Beams diseña y muestra todas o algunas de las secciones W (I) del catálogo del Manual AISC edición 15. Finalmente, la opción *Ambas* conjunta la función de las dos anteriores. En la figura 5.4, se ilustra el control de *Visualización*, el usuario debe dar clic en la opción con la que desea ver la información. Después del clic, Zteel Beams habilita los comandos de trabajo de cada opción.

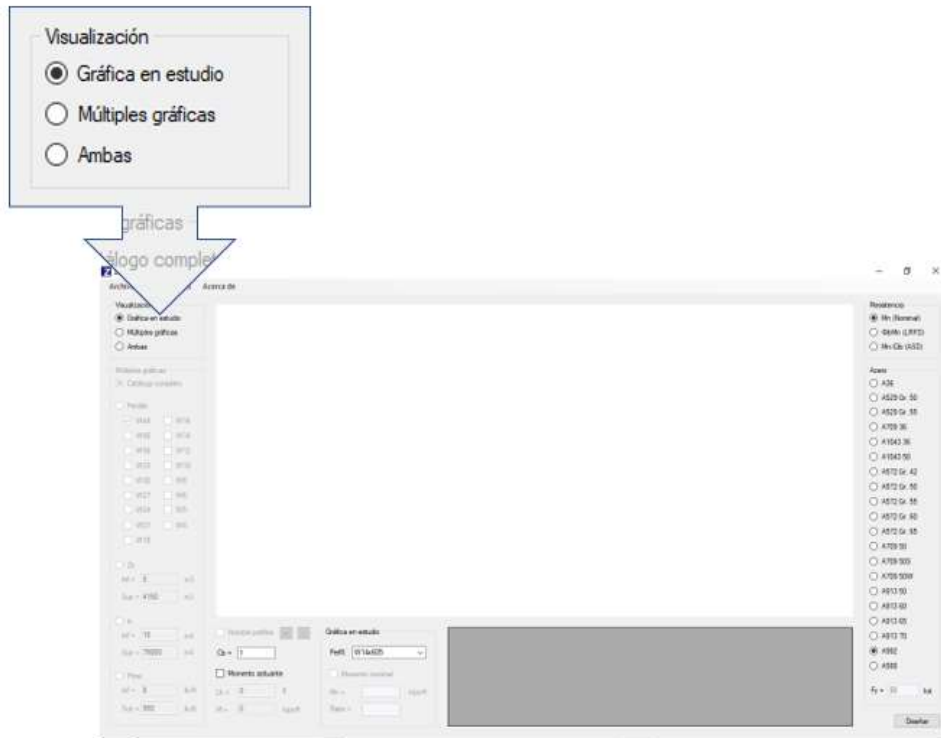


Figura 5.4. Control Visualización.

La entrada de datos está integrada por varias partes, las cuales son: control *Gráfica en estudio*, control *Múltiples gráficas*, control *Resistencia*, control *Acero*, campo coeficiente C_b y campos para el *Momento actuante*.

El control *Gráfica en estudio* se encuentra en la parte inferior central de la ventana, está formado por un listado con todos los perfiles, un “checkbox” para graficar la resistencia y un visor. En el listado de perfiles el usuario debe elegir uno de ellos, como se aprecia en la figura 5.5. El “checkbox” se habilita, después de que se habilite el botón de momento actuante, y permite visualizar el momento resistente en la gráfica. Esto ocurre así, porque al habilitarse el segundo, el programa permite ingresar la distancia L_b , la cual es indispensable para determinar dicho momento. Finalmente, si el usuario ingresa L_b , el visor muestra la resistencia y el “ratio” del perfil elegido.

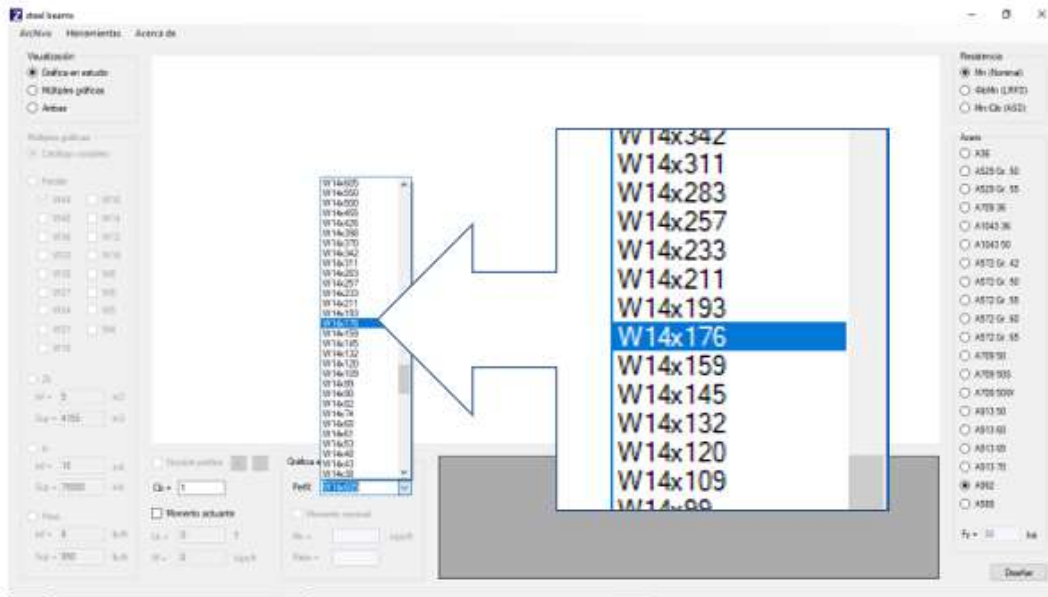


Figura 5.5. Elección de perfil en control Gráfica en estudio.

El control *Múltiples gráficas* se caracteriza por sus opciones de búsqueda avanzada y por permitir trabajar con varias secciones a la vez, se encuentra en la parte izquierda de la pantalla (figura 5.6). Si se revisa la imagen, se aprecian las 5 opciones con las que cuenta: *Catálogo completo*, *Peralte*, Z_x , I_x y *Peso*.

Cuando se elige la opción *Catálogo completo*, el software diseña y visualiza todas las secciones del catálogo del Manual AISC. Las otras cuatro opciones al ser elegidas habilitan campos de búsqueda. La opción *Peralte* permite elegir el o los peraltes de los perfiles que se desean revisar o diseñar, la opción Z_x da la posibilidad al usuario de trabajar con ciertos perfiles que estén dentro de un intervalo con límite inferior y límite superior de módulo de sección plástico. Esta opción funciona cuando la meta es analizar resistencia. La opción I_x trabaja de forma similar a la opción de Z_x , pero con la diferencia que en ésta, los criterios de búsqueda son de inercias. Cuando se estudian estados límites de servicio y deflexiones, se recomienda trabajar con esta alternativa. Finalmente, la opción de *Peso* es ideal cuando se desea trabajar con perfiles ligeros, opera con criterios de búsqueda de

límites de peso inferior y superior. Las opciones que presenta el control *Múltiples gráficas* atienden los temas de arquitectura, resistencia, rigidez y economía.

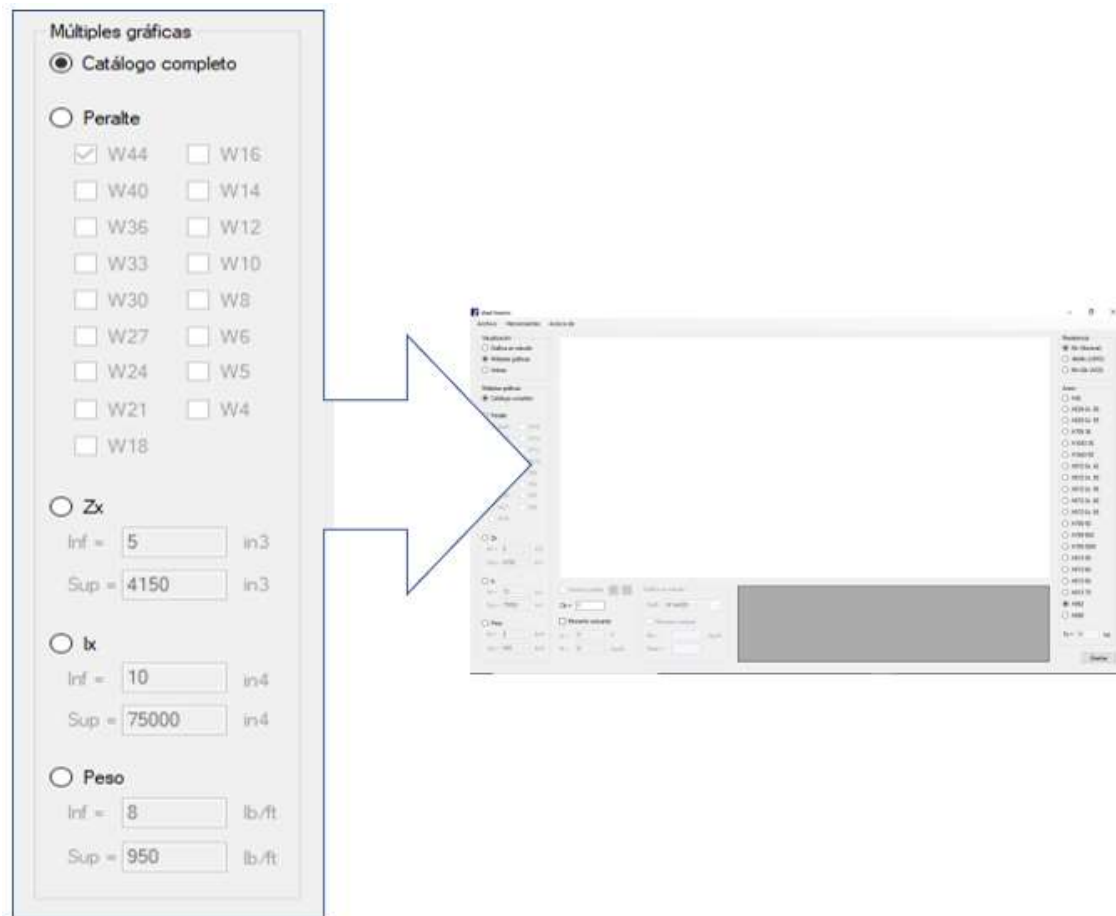


Figura 5.6. Control *Múltiples gráficas*.

Zteel Beams cuenta con el control *Resistencia* ubicado en la esquina superior derecha de la ventana, en el cual el usuario elige el método de diseño con el que desea trabajar. Puede diseñar con momento nominal M_n , momento de diseño $\Phi_b M_n$ o momento permisible M_n/Ω_b , es decir, tiene opción para trabajar con resistencia de laboratorio, resistencia LRFD o resistencia ASD respectivamente. En la figura 5.7 se aprecia la selección de los métodos de diseño comentados. Se debe de elegir el botón deseado, la opción por omisión del sistema es momento nominal.

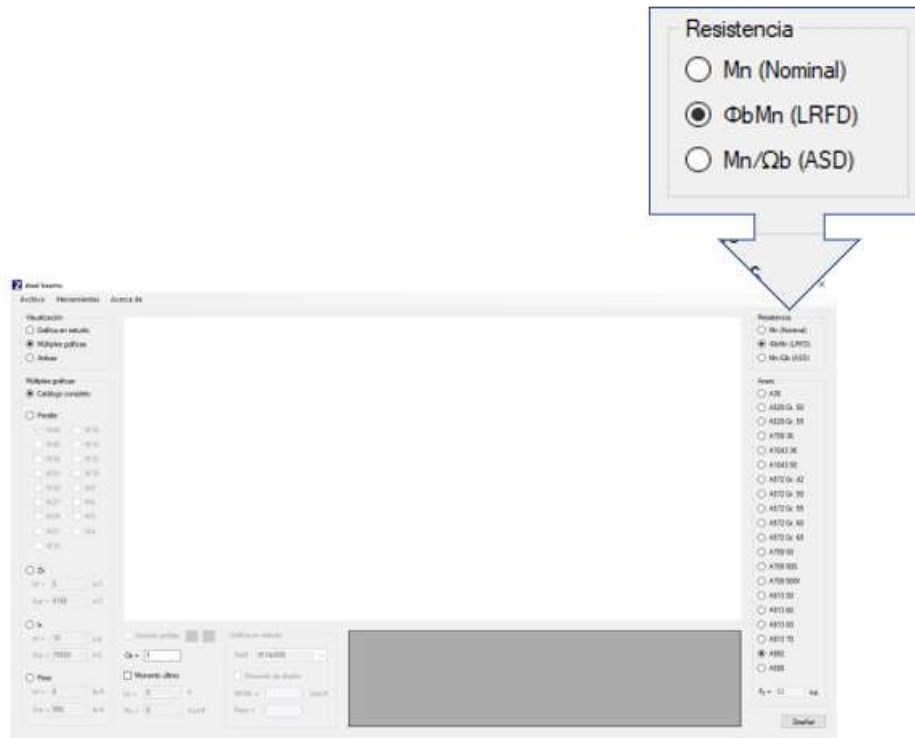


Figura 5.7. Elección del método de diseño (Control Resistencia).

Una variable muy importante en el diseño es el esfuerzo de fluencia F_y . ZeeL Beams permite trabajar con acero A36 y con aceros de alta resistencia. Posee todo el catálogo de grados de acero disponibles para secciones W (I) de acuerdo con la Especificación AISC 360-16, los cuales son:

- A36
- A529 Gr. 50
- A529 Gr. 55
- A709 36
- A1043 36
- A1043 50
- A572 Gr 42
- A572 Gr 50

- A572 Gr 55
- A572 Gr 60
- A572 Gr 65
- A709 50
- A709 50S
- A709 50W
- A913 50
- A913 60
- A913 65
- A913 70
- A992
- A588

El usuario debe dar clic en algunas de las opciones del control *Acero* para elegir el tipo o grado de acero como se aprecia en la figura 5.8. Dicho control cuenta con un visor en su parte inferior indicando el esfuerzo de fluencia en ksi del acero elegido. El control *Acero* se ubica en la parte derecha de la ventana.

Es importante aclarar que existen restricciones en el empleo de aceros de alta resistencia. Algunas normas sólo aplican para secciones con un espesor de patín menor o igual a 1.5 in, otras normas sólo aplican para espesor de patín menor o igual a 2 in, y finalmente, otras aplican para secciones con un ancho de patín mayor o igual a 6 in. Zteel Beams identifica cuando se trabaja con alguna de ellas y alerta al usuario con una ventana emergente como la de la figura 5.9.

Se aclara que *el software trabaja con el acero elegido*, el usuario debe tener precaución si aparece la ventana emergente. Se sugiere revisar la especificación y conocer dichos aceros.



Figura 5.8. Elección del tipo de acero (control Acero).

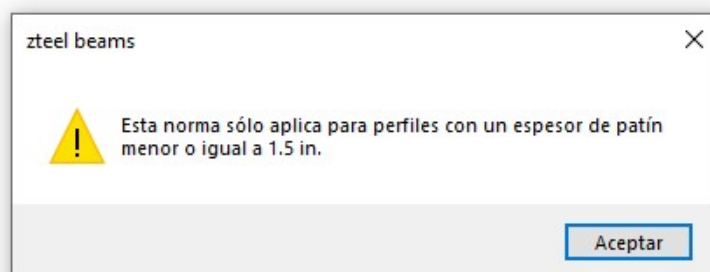


Figura 5.9. Ventana emergente cuando se utiliza un acero con restricción.

Una de las ventajas mencionadas de Zteel Beam es que permite ingresar el factor C_b para determinar la resistencia a flexión de las secciones. Para ello se debe ingresar dicho valor en el campo correspondiente (figura 5.10). Cuando se trabaja con la *Gráfica en estudio*, el software muestra el efecto de C_b generando dos gráficas, una con $C_b = 1$ y otra con el C_b ingresado. Dichas gráficas resultan de gran utilidad para sensibilizar al usuario sobre el efecto en el incremento de resistencia, le permite ver que tanto apoyo le puede proporcionar dicho factor, dependiendo si se encuentra cerca o lejos de la meseta de la gráfica (figura 5.11). Cuando se trabaja con *Múltiples Gráficas*, el software grafica los perfiles deseados considerando el factor, en esta modalidad no se grafica $C_b = 1$.

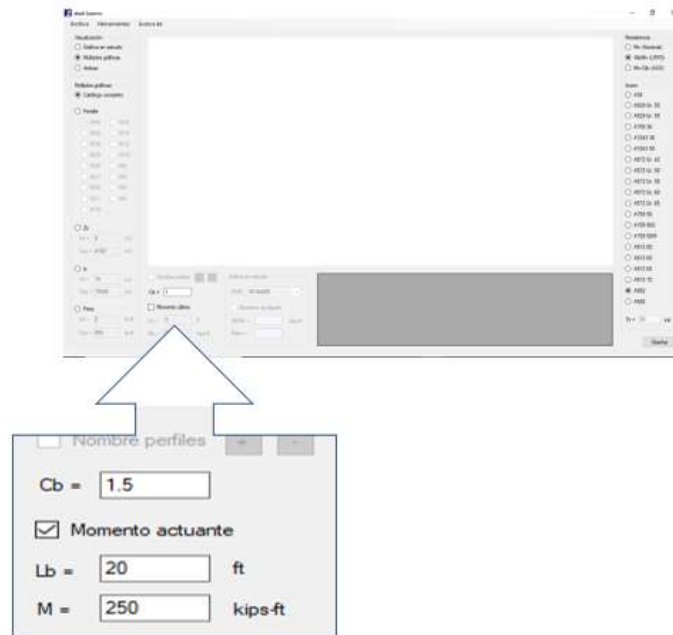


Figura 5.10. Momento actuante.

El programa permite tanto revisar resistencias como diseñar. Para el caso del diseño, es necesario ingresar el momento actuante, momento último o momento admisible si está trabajando con momento nominal, con LRFD o ASD respectivamente. Para ello se debe habilitar el “checkbox” que se muestra en la

figura 5.10, así como ingresar el momento actuante del que se trate y la distancia L_b .

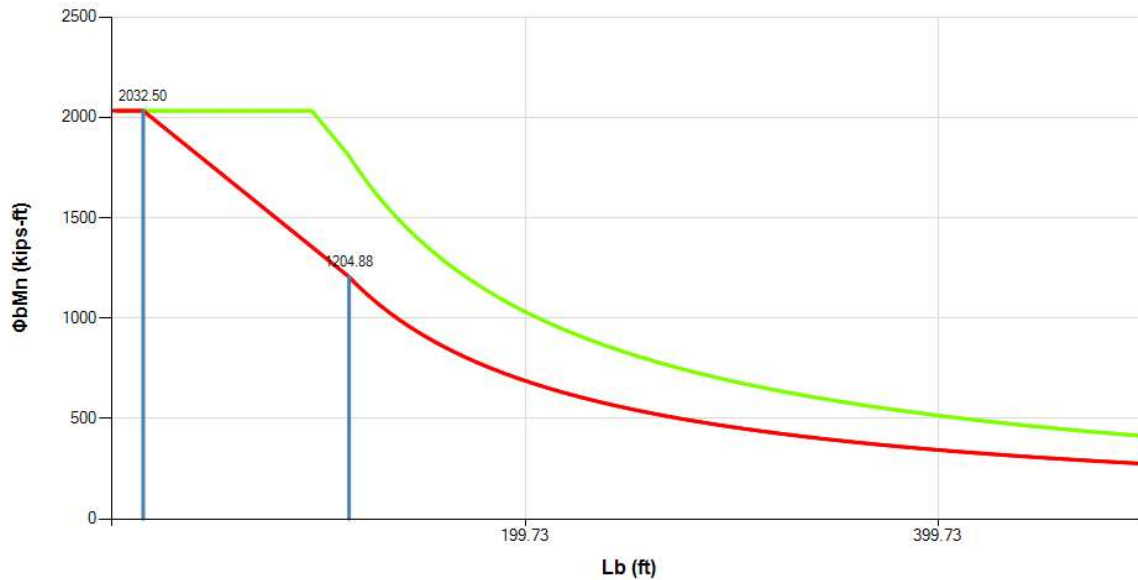


Figura 5.11. Efecto de C_b .

Una vez ingresada la información deseada, perfiles en estudio, método de diseño, tipo de acero, coeficiente C_b , momento actuante y distancia L_b , basta con dar clic en el botón *Diseñar* para que el programa realice los cálculos y presente resultados. Es importante que después de algún cambio, el usuario haga clic en el botón *Diseñar*, de esta forma, el sistema actualiza su base de datos y realiza los cálculos.

Zteel Beams presenta la salida de datos tanto de forma gráfica como de forma numérica, para ello cuenta con dos herramientas, un display y un tabulador.

El display funciona como una potente pantalla interactiva en la cual el usuario puede navegar (figura 5.12). En dicha pantalla se grafica la curva M_n-L_b del perfil o de los perfiles seleccionados bajo los criterios ingresados y el método de diseño empleado. En la figura 5.12 se pueden apreciar los límites L_p y L_r (líneas verticales), así como el momento nominal correspondiente a cada uno de ellos. El display es sensible al

paso del ratón, por lo que, si el usuario acerca el cursor, Zteel Beams le mostrará el valor que toma la gráfica en ese punto.

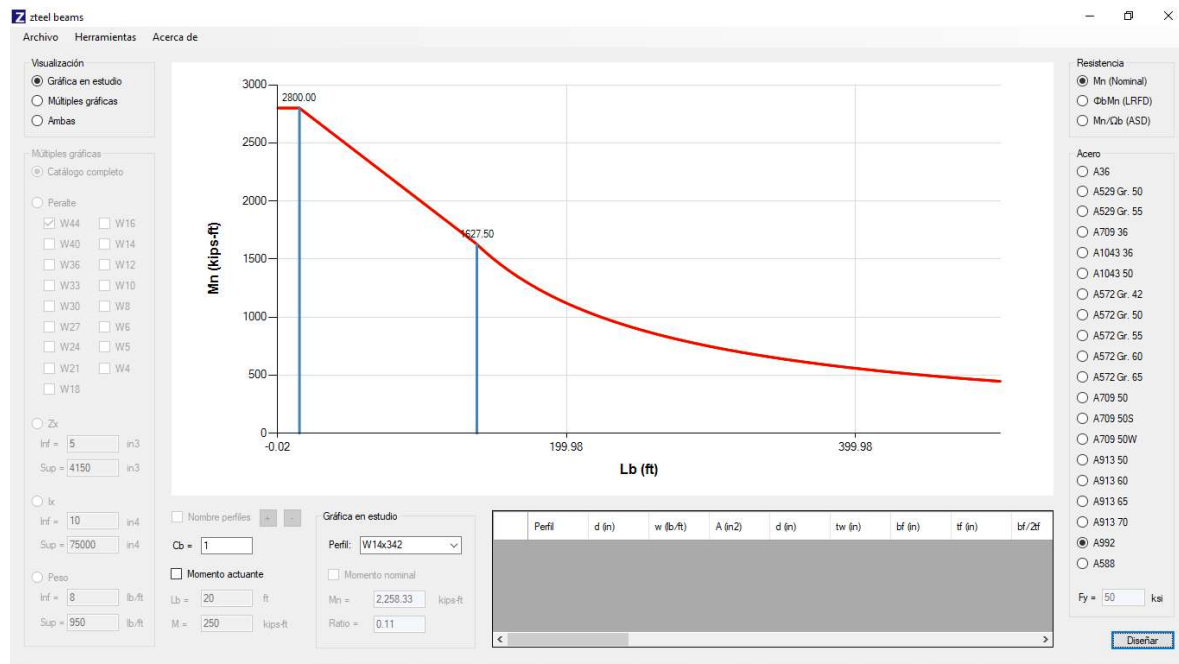


Figura 5.12. Display graficador.

Si el usuario hace clic en el “checkbox” Momento actuante, ingresa un momento y una distancia L_b , y finalmente, hace clic en el botón *Diseñar*, el display muestra con una marca negra el momento actuante, el momento último o el momento admisible si se trata de diseño nominal, diseño LRFD o diseño ASD respectivamente. En la figura 5.13 se aprecia dicha marca, al igual que el valor del momento.

El diseño de vigas mediante gráficas, como la mostrada en la figura 5.13, resulta ser muy útil para sensibilizar al usuario, estudiante o ingeniero de la práctica. En el instante que se observa la gráfica se sabe que la sección no resiste, y esto se concluye rápidamente al observar la marca del momento último por encima de la gráfica. La acción inmediata que haría una gran mayoría de diseñadores es cambiar el perfil por otro más aperaltado, y probablemente más pesado.

Nuevamente analizando la gráfica se aprecia que la viga se encuentra en la zona 3. Aprovechando esta situación, en la figura 5.14 se proporciona una solución al problema.

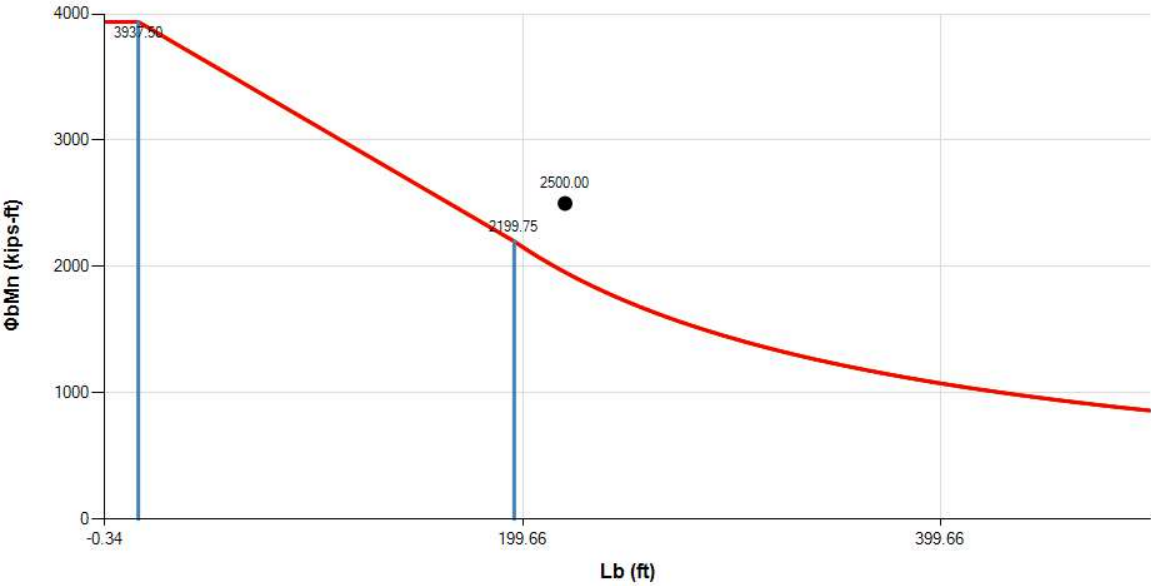


Figura 5.13. Marca con el momento último.

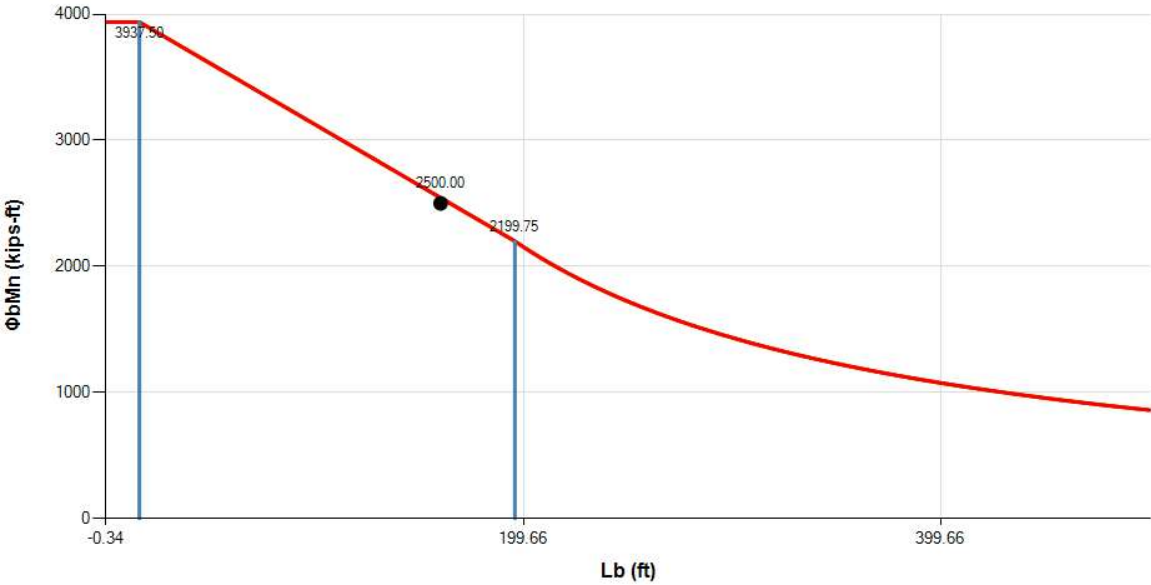


Figura 5.14. Reducción de L_b .

Dicha solución fue muy sencilla y se aprovechó la ventaja del software de mostrar a la sección en zona 3. Simplemente se redujo L_b llevando la viga a la zona 2 y ubicando la marca por debajo del trazo de la gráfica. Este tipo de beneficios no se encuentran en un software comercial.

Si el usuario hace clic en el “checkbox” para Graficar resistencia, el cual en este caso tiene el nombre de “Momento de diseño” debido a que se eligió trabajar con LRFD, y después clic en el botón *Diseñar*, el display de Zteel Beams muestra con una marca amarilla la resistencia (Momento de diseño) seguida con su valor (figura 5.15). En dicha imagen se aprecia que el programa también indica el “ratio”.

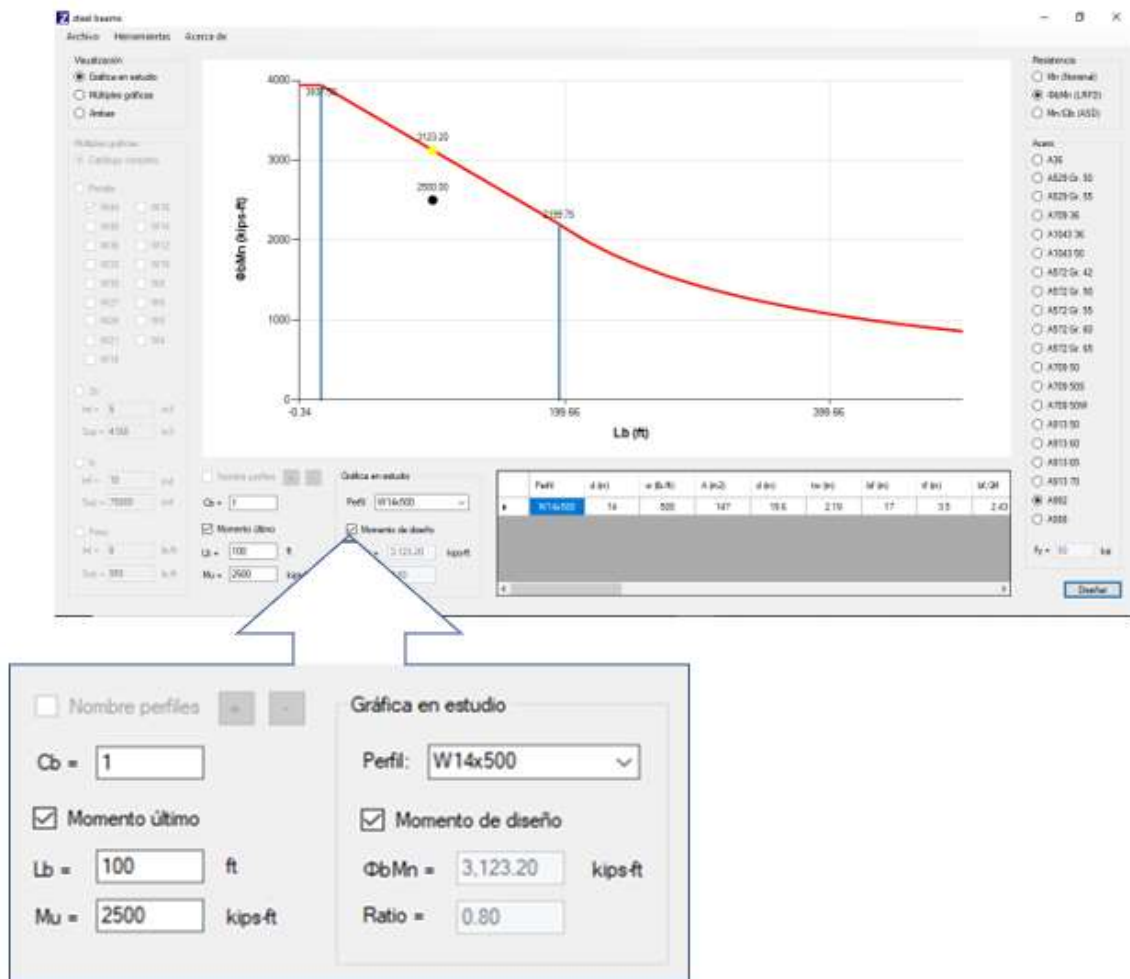


Figura 5.15. Marcas de momento último (negra) y momento de diseño (amarilla).

Otra de las herramientas del display, y la cual lo hace muy versátil, es su función de zoom. Dicha herramienta es de suma utilidad cuando se trabaja con la opción de *Múltiples gráficas* (figuras 5.16 y 5.17).

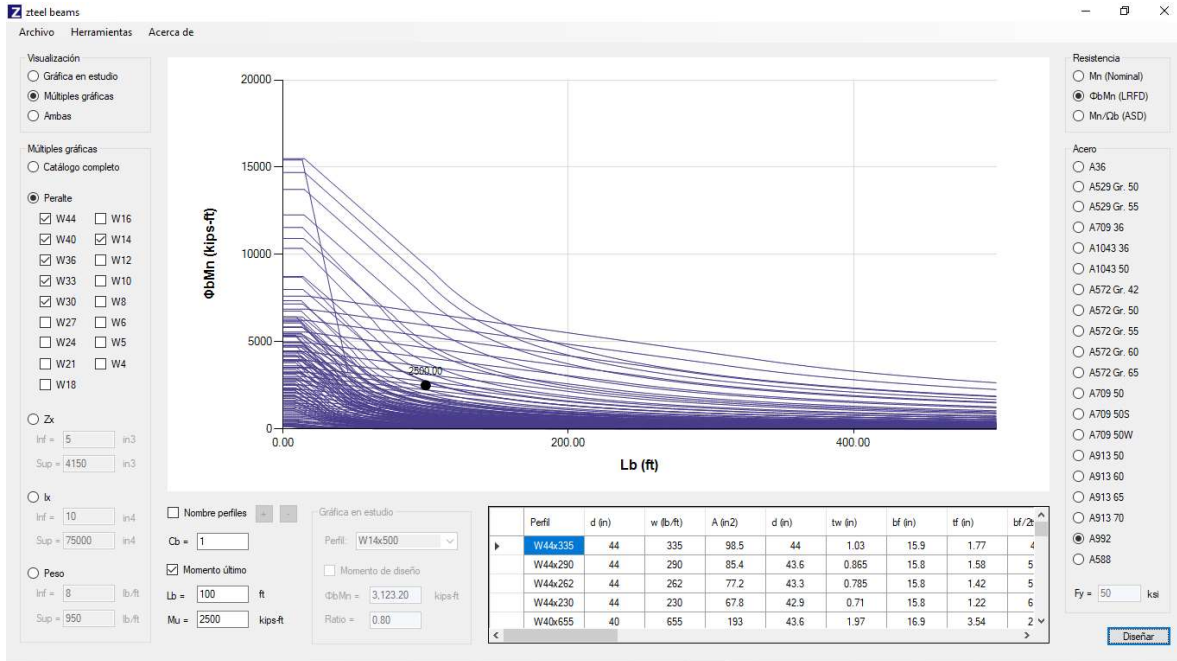


Figura 5.16. Display sin zoom.

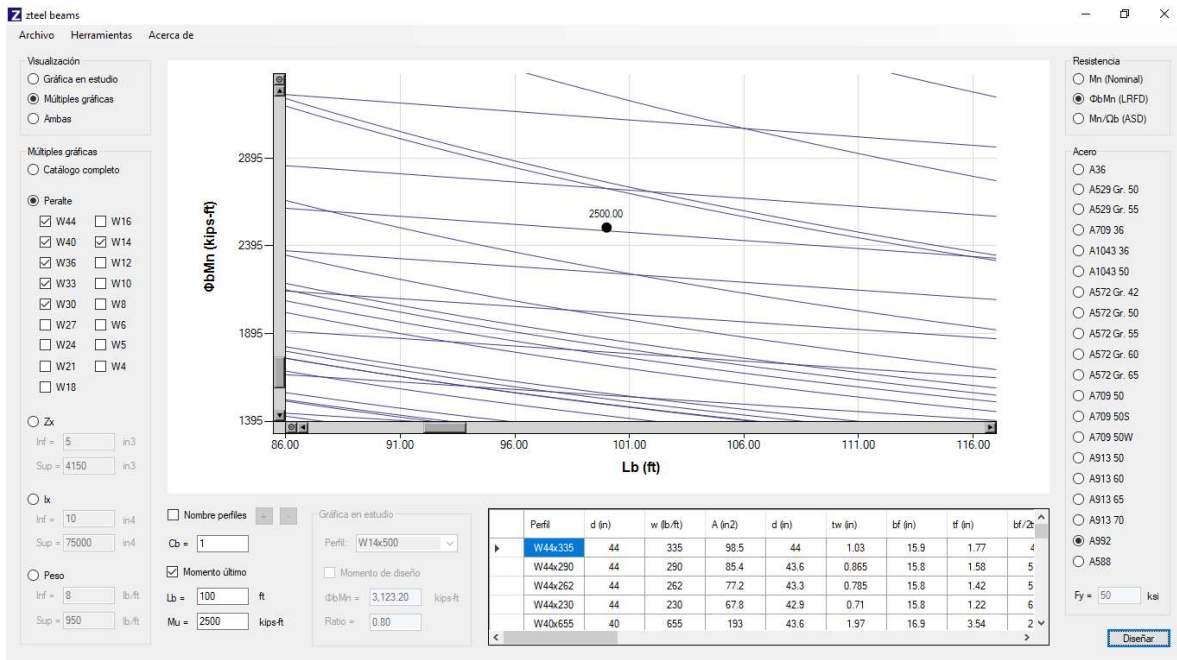


Figura 5.17. Display con zoom.

Para hacer “zoom in” sólo basta con hacer una selección en la zona de interés dentro del display. Inmediatamente Zteel Beams lleva al usuario a dicha zona. De forma contraria, el “zoom out” se logra haciendo uso de los botones que se encuentran en las barras de desplazamiento. En el caso de las abscisas, el botón se ubica en la parte izquierda de la barra. En el eje de las ordenadas, el botón se localiza en la parte superior. Dichas barras permiten navegar dentro las gráficas.

En la figura 5.17 se aprecia un acercamiento a las gráficas, sin embargo, difícilmente se pueden reconocer las secciones que se encuentran graficadas. Existe otra herramienta del display de gran utilidad, el identificador de perfiles. Para hacer uso de él, el usuario debe hacer clic en el “checkbox” Nombre perfiles, el cual se encuentra en la parte inferior izquierda del display. El resultado se ilustra en la figura 5.18.

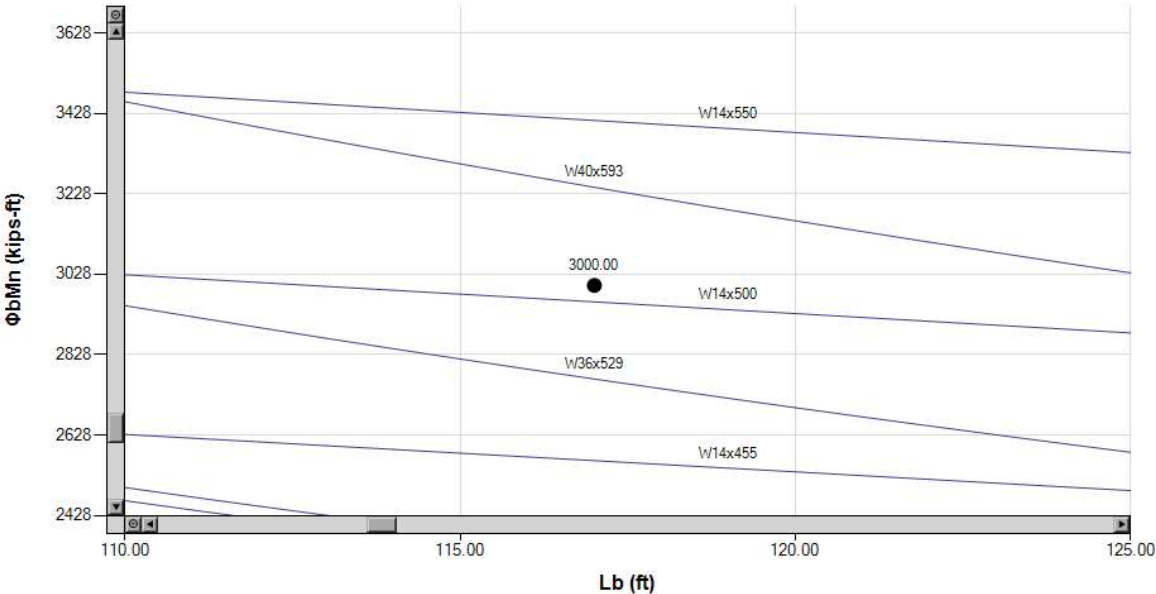


Figura 5.18. Identificador de perfiles.

Dicho identificador de perfiles cuenta con un botón + y un botón -. El usuario puede hacer uso de ellos para obtener un zoom del nombre de los perfiles.

La segunda herramienta para la salida de datos con la que cuenta Zteel Beams es el tabulador de resultados. Dicho tabulador presenta los resultados numéricos de forma ordenada y se activa cuando el usuario hace clic en el “checkbox” de Momento actuante. El tabulador se ubica en la parte inferior derecha de la ventana y se ilustra en la figura 5.19.

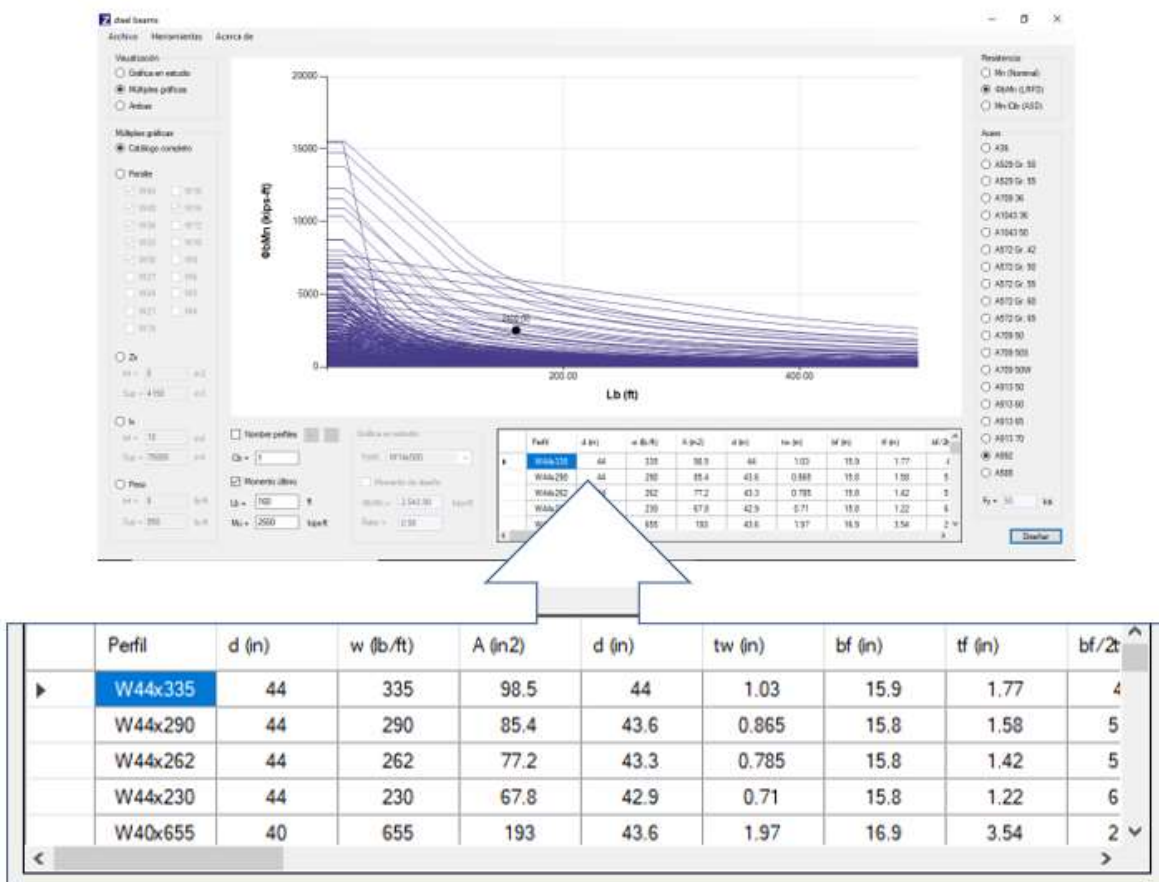


Figura 5.19. Tabulador de resultados.

Esta herramienta genera un reporte muy completo del perfil o de los perfiles en cuestión. Dicho reporte incluye:

- Peso
- Propiedades geométricas
- Relación ancho-espesor de patín, alma y sección

- Distancias L_p , L'_p y L_r
- Indica la zona donde se encuentra la sección (1, 2 y 3)
- M_p , $\Phi_b M_p$, M_p/Ω_b , M'_p , $\Phi_b M'_p$ y M'_p/Ω_b .
- M_r , $\Phi_b M_r$ y M_r/Ω_b
- M_n , $\Phi_b M_n$ y M_p/Ω_n
- “Ratio”
- Indicador de status (< 1 , $= 1$, > 1)
- Presenta una escala de colores amigable para facilitar la interpretación de los resultados

En la columna de momento plástico el tabulador indica sombreando la celda si un determinado perfil presenta una meseta recortada (M'_p) debido a patín No Compacto. En la figura 5.20 se aprecia que la sección W12x65 tiene una meseta de M'_p .

	Perfil	(ft)	Zona	$\Phi_b M_p$ (kips-ft)	$\Phi_b M_r$ (kips-ft)	$\Phi_b M_n$ (kips-ft)	Ratio = $M_u/\Phi_b M_n$	Status	Escala
	W12x79	19.87615	III	446.25	280.87499...	63.89152	39.12883	> 1	NG
	W12x72	17.48085	III	405	255.67499...	53.2238	46.97147	> 1	NG
	W12x65	15.14591	III	356.1937	230.73749...	43.47721	57.50138	> 1	NG
	W12x58	13.84853	III	324	204.74999...	33.16618	75.37798	> 1	NG
	W12x53	12.20766	III	292.125	185.32499...	27.32079	91.50542	> 1	NG

Figura 5.20. Meseta de M'_p .

En el caso del display, cuando un perfil es No Compacto, se muestra la distancia L'_p en verde.

Una gran herramienta con la que cuenta el tabulador de resultados es su función de ordenar, la cual le permite al usuario ordenar los perfiles de la tabla de forma ascendente o descendente tomando como base alguna de las columnas. Para lograr esto, sólo basta con hacer clic en el encabezado de la columna de interés. Un primer clic ordena de forma ascendente y un segundo clic lo hace de forma descendente. Cuando una columna está ordenada de forma ascendente, Zteel

Beams lo indica colocando una flecha con dirección hacia arriba en el encabezado de dicha columna. En el caso contrario, si el orden es descendente, Zteel Beams coloca una flecha con dirección hacia abajo. En la imagen 5.21 se ilustra esta función, en donde se ordenó de forma descendente tomando la columna de “ratio” como criterio para ordenar.

	Perfil	(ft)	Zona	Mp (kips-ft)	Mr (kips-ft)	Mn (kips-ft)	Ratio = M/Mn	Status	Escala	^
	W12x65	5.14591	I	395.7708	256.37500...	395.7708	0.5053431	< 1	OK	
	W21x44	12.992	I	397.5	237.99999...	397.5	0.5031447	< 1	OK	
	W10x77	5.26289	I	406.6667	250.54167...	406.6667	0.4918033	< 1	OK	
	W18x50	16.9456	I	420.8333	259.29167...	420.8333	0.4752475	< 1	OK	
	W14x61	7.50425	I	425	268.62499...	425	0.4705882	< 1	OK	v

Figura 5.21. Función de orden del tabulador de resultados.

Esta función permite encontrar al perfil más ligero que resista determinado momento actuante, el perfil más eficiente, el perfil que cumpla con resistencia con el menor peralte, el perfil con mayor inercia, la sección con mayor o menor ancho de patín, entre otros.

Zteel Beams cuenta con tres menús, menú *Archivo*, menú *Herramientas* y menú *Acerca de*. En el menú *Archivo* el usuario encuentra opciones para impresión y para salir del programa, en el menú *Herramientas* se encuentra un Convertidor de Unidades y en el menú *Acerca de* se puede consultar información acerca del software.

5.1.3 Herramientas adicionales

Zteel Beams cuenta con algunas herramientas adicionales, las cuales se mencionaron en la descripción de los menús, que hacen de él un programa más útil y práctico. Dichas herramientas son los comandos Imprimir y Conversión de

Unidades, además de una serie de filtros. A continuación, se comenta brevemente en qué consiste cada uno de ellos:

- **Comando Imprimir.** Se localiza en el menú *Archivo* y permite mandar a la impresora las gráficas generadas. En la figura 5.22 se muestra una vista preliminar para impresión.
- **Comando Conversión de Unidades.** Se ubica en el menú *Herramientas* y haciendo clic en él se abre la ventana del Convertidor de Unidades (figura 5.23). Esta herramienta convierte unidades en tres rubros: momento, distancia y peso. De esta forma, Zteel Beams permite el ingreso y la salida de datos con diferentes unidades, lo cual le da opción al usuario para trabajar con los sistemas inglés, métrico e internacional.
- **Serie de filtros.** Zteel Beams cuenta con varios filtros, los cuales tiene la tarea de delimitar el camino a seguir del usuario y evitar errores en lo que respecta a la entrada de datos.

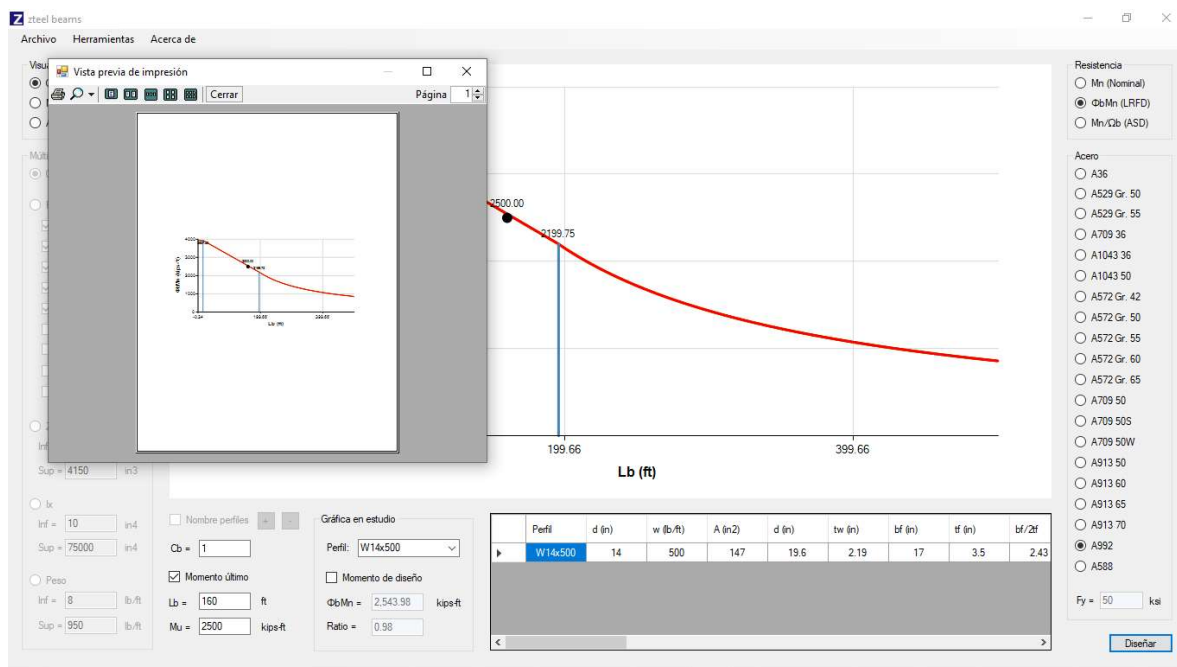


Figura 5.22. Vista preliminar para impresión.

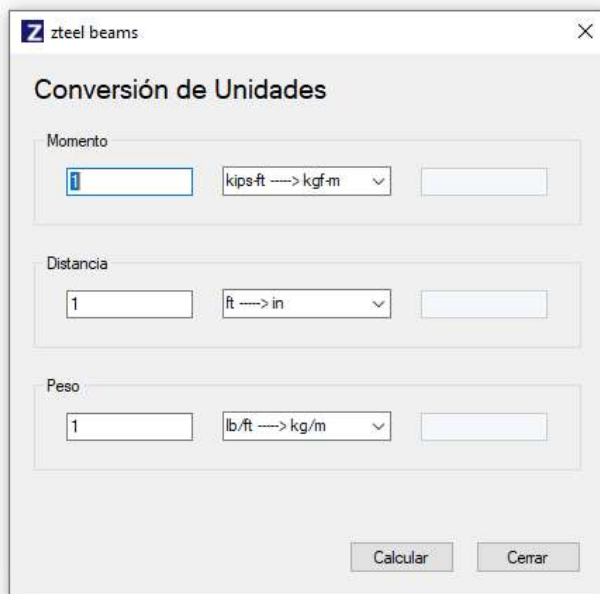


Figura 5.23. Convertidor de unidades.

5.2 Solución con Zteel Beams

En la sección 4.1 se estudiaron ejemplos de diseño de vigas por flexión empleando las fórmulas y los procedimientos de la Especificación AISC 360-16. Se pudo constatar que su empleo implican cálculos muy extensos, así como numerosas iteraciones, hecho que hace cansada la tarea del diseñador.

En la sección 4.2 se presentaron las ayudas de diseño del Manual AISC, las cuales, como se vió, no son difíciles de utilizar y permiten un ahorro significativo en tiempo en el diseño de vigas, sin embargo, para tener acceso a ellas se requiere comprar el Manual, el cual tiene un costo muy elevado.

Se estudiaron la Tabla 3-2 “W-Shapes Selection by Z_x ” y la Tabla 3-10 “W-Shapes Available Moment vs Unbraced Length” y se identificaron algunas limitantes. En el caso de la Tabla 3-2, su uso no es válido para secciones en zona 3. La Tabla 3-10 presenta secciones graficadas sólo con $F_y = 50$ ksi, con lo cual su aplicación se restringe a dicho grado de acero, ¿qué pasa si se trabaja con un grado diferente?

De igual forma la Tabla 3-10 se realizó con un $C_b = 1.0$, para el caso de valores mayores a la unidad se requieren artificios (momento efectivo), los cuales son susceptibles al error. Dicho artificio requiere un tedioso ir y venir entre las Tablas 3-2 y 3-10 para verificar que no se exceda Φ_b/M_p o M_p/Ω_b . Además, la Tabla 3-10 es susceptible a la aproximación de cada persona, debido a la precisión de su escala.

Se presentó un caso haciendo uso de software comercial, si bien el resultado se obtuvo en poco tiempo, implicó iteraciones y no se logró obtener el perfil más ligero.

En esta sección se resolverán nuevamente los ejemplos de las vigas estudiadas previamente (resueltos con la especificación y con las ayudas del Manual), valiéndose del programa Zteel Beams. Se espera que su uso le quede claro al lector y que lo utilice en un futuro. La interpretación de resultados es muy sencilla, en la parte gráfica, la marca de momento actuante, momento último o momento admisible debe estar por debajo del trazo de la gráfica. En la parte tabulada, el software directamente indica el resultado mostrando resistencias, “ratios”, status y una escala de colores.

5.2.1 Ejemplo 1: Momento plástico (Zona 1) en viga simplemente apoyada

La losa de concreto reforzado de 5 in de espesor mostrada en la figura 4.1 va a colocarse sobre secciones W de acero con separación de 8 ft entre centros. Las vigas tienen un claro de 20 ft y se suponen simplemente apoyadas. Si la losa de concreto se diseñó para resistir una carga viva de 100 psi, determine mediante los procedimientos LRFD y ASD si el perfil W12x22 es capaz de soportar dicha losa. Se supone que el patín de compresión de la viga recibirá soporte lateral completo de la losa de concreto. El concreto pesa 0.15 k/ft³. Considere $F_y = 50$ ksi y $E = 29,000$ ksi.

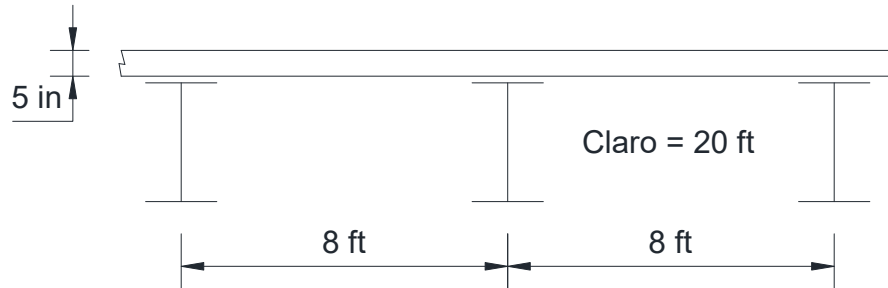


Figura 4.1. Sistema de entepiso. Elaboración propia.

1. Determinar las cargas que deberá soportar cada una de las vigas:

$$\text{Peso perfil} = 0.022 \text{ k/ft}$$

$$\text{Peso losa} = (5 \text{ in})(0.15 \text{ k/ft}^3)(8 \text{ ft}) \left(\frac{1 \text{ ft}}{12 \text{ in}} \right) = 0.5 \text{ k/ft}$$

$$w_D = 0.022 \text{ k/ft} + 0.5 \text{ k/ft} = 0.522 \text{ k/ft}$$

$$w_L = (8 \text{ ft})(0.1 \text{ ksi}) = 0.8 \text{ k/ft}$$

LRFD:

$$w_u = 1.2w_D + 1.6w_L = 1.2(0.522 \text{ k/ft}) + 1.6(0.8 \text{ k/ft}) = 1.91 \text{ k/ft}$$

ASD:

$$w_a = w_D + w_L = 0.522 \text{ k/ft} + 0.8 \text{ k/ft} = 1.32 \text{ k/ft}$$

2. Calcular el momento último y el momento admisible.

LRFD:

$$M_u = \frac{w_u L^2}{8} = \frac{(1.91 \text{ k/ft})(20 \text{ ft})^2}{8} = 95.5 \text{ k-ft}$$

ASD:

$$M_a = \frac{w_a L^2}{8} = \frac{(1.32 \text{ k/ft})(20 \text{ ft})^2}{8} = 66 \text{ k-ft}$$

3. Ingreso de datos en Zteel Beams.

LRFD:

En el control *Visualización*, no se modifica la opción y se deja *Gráfica en estudio*, la razón de ello es porque ya se conoce el perfil y sólo se desea revisarlo.

Se selecciona el método de diseño $\Phi_b M_n$ (LRFD), se habilita el “checkbox” Momento último, se ingresa $M_u = 95.5$ k-ft y $L_b = 0$, debido a que la viga recibe soporte lateral completo por parte de la losa. El factor C_b permanece igual a 1, ya que la viga se encuentra en zona 1, zona en la cual no aplica dicho factor. Zteel Beams reconoce esta situación, y si por error, el usuario ingresa un valor mayor a 1, el programa no permitirá que se supere la meseta. Del listado de perfiles, se elige W12x22 y se habilita el “checkbox” Momento de diseño. Finalmente, se deja el grado de acero seleccionado de inicio A992 ($F_y = 50$ ksi). Los “checkbox” se habilitan para graficar las marcas de momento último y momento de diseño. En la figura 5.24 se ilustra el ingreso de datos:

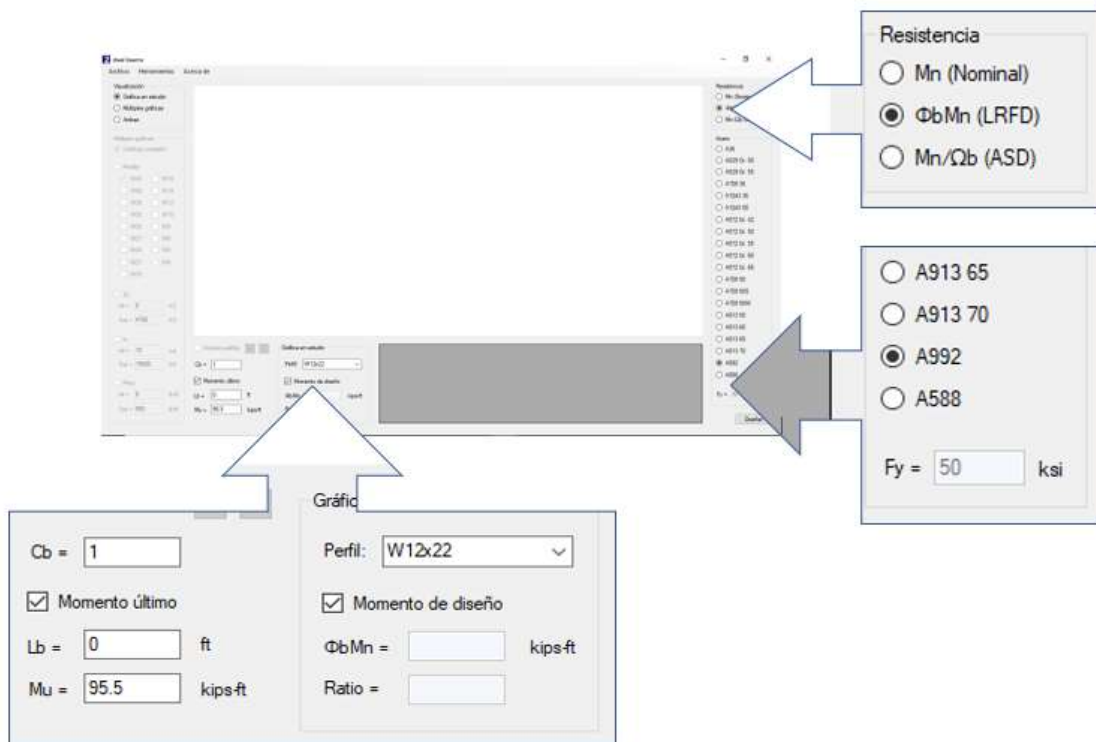


Figura 5.24. Ingreso de datos para diseño LRFD de la viga del Ejemplo 1.

ASD:

De forma similar, se procede en el ingreso de datos para el método ASD. Se selecciona el método de diseño M_n/Ω_b (ASD), se habilita el “checkbox” Momento admisible, se ingresa $M_a = 66$ k-ft y $L_b = 0$. Se elige W12x22 de la lista de perfiles y se habilita el “checkbox” Momento permisible. El grado de acero A992 ($F_y = 50$ ksi) permanece igual (figura 5.25).

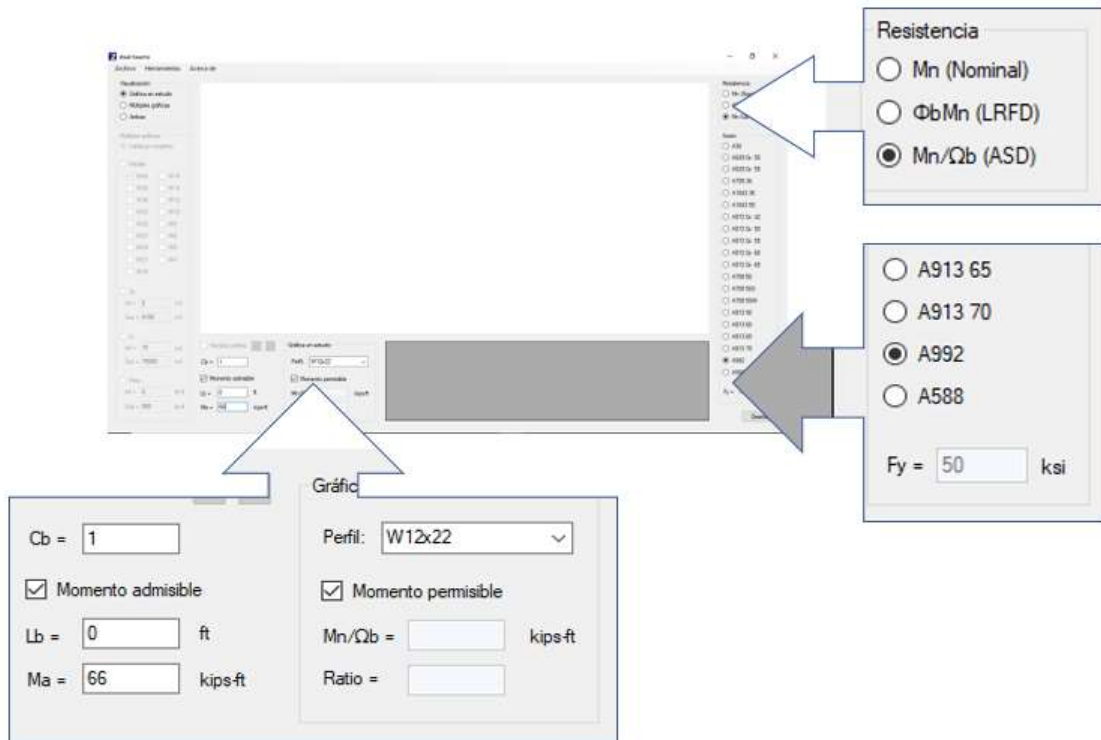


Figura 5.25. Ingreso de datos para diseño ASD de la viga del Ejemplo 1

4. Hacer clic en el botón *Diseñar*. Los resultados se muestran a continuación.

LRFD:

En la figura 5.26 se muestra la gráfica de la sección W12x22, la cual presenta un zoom en el display. Con simple inspección visual, se concluye que la sección es adecuada, debido a que la marca de M_u se ubica por debajo de

la gráfica. En dicha figura es fácil identificar que la sección está en zona 1. En la figura 5.27 se aprecian los resultados numéricos en el visor.

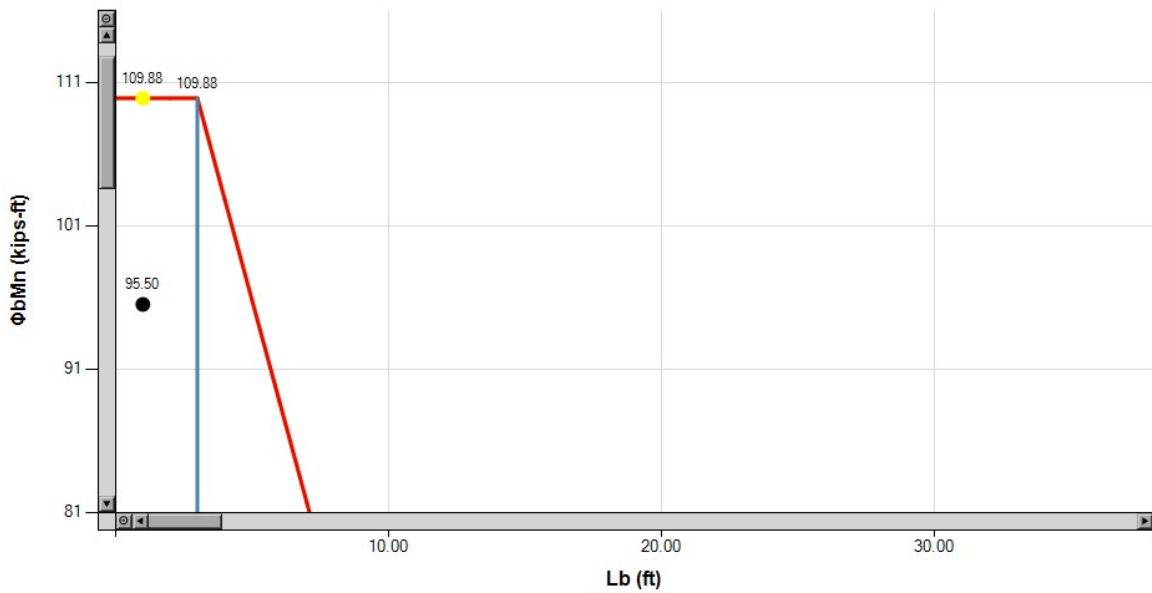


Figura 5.26. Gráfica $\Phi_b M_n - L_b$ de W12x22 (LRFD).

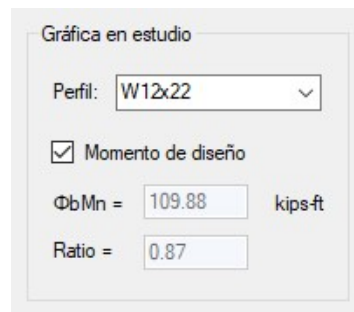


Figura 5.27. Momento de diseño y "ratio" de W12x22.

ASD:

En la figura 5.28 se muestra la gráfica con el método ASD. Al igual que en el caso de LRFD, por simple inspección visual se concluye que el perfil es adecuado. En la figura 5.29 se aprecia la salida de datos numérica.

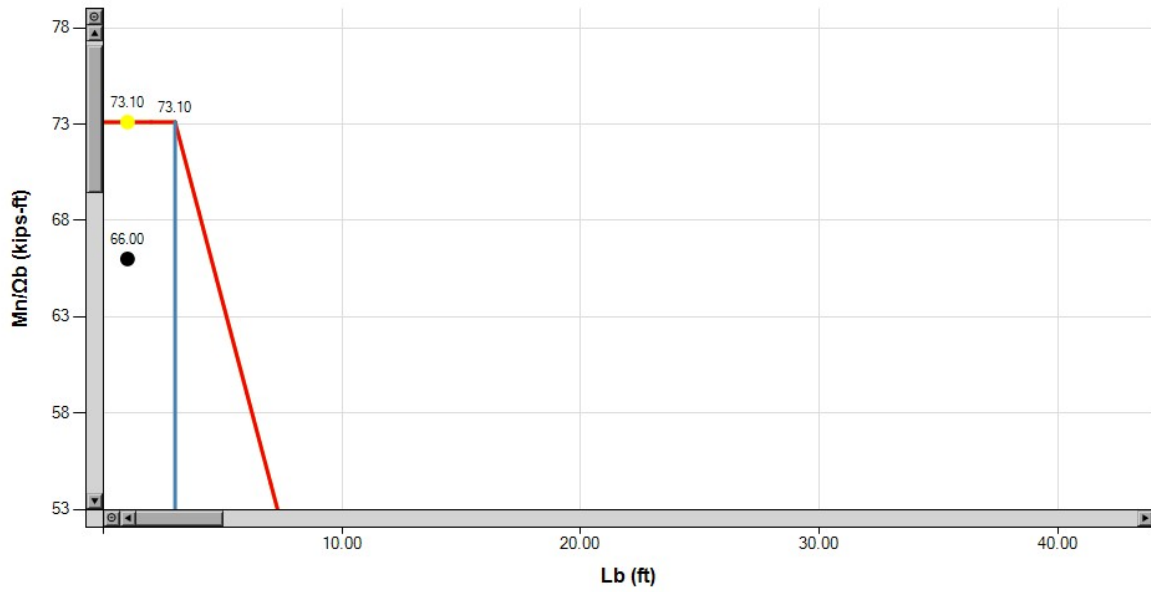


Figura 5.28. Gráfica M_n/Ω_b - L_b de W12x22 (ASD).

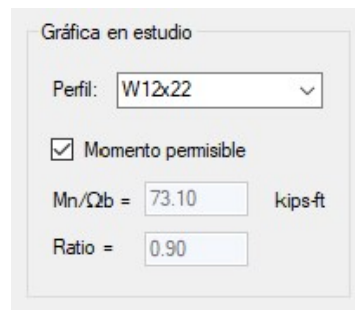


Figura 5.29. Momento permisible y "ratio" de W12x22.

De acuerdo con Zsteel Beams se tienen los siguientes resultados:

LRFD:

$$\Phi_b M_n = 109.88 \text{ k} - \text{ft}$$

$$\frac{M_u}{\Phi_b M_n} = \frac{95.5 \text{ k} - \text{ft}}{109.88 \text{ k} - \text{ft}} = 0.87 < 1$$

ASD:

$$\frac{M_n}{\Omega_b} = 73.10 \text{ k} - \text{ft}$$

$$\frac{M_a}{M_n/\Omega_b} = \frac{66 \text{ k} - ft}{73.10 \text{ k} - ft} = 0.90 < 1$$

El perfil W12x22 es adecuado para soportar la losa de concreto.

5.2.2 Ejemplo 2: Viga con patines no compactos (Zona 1)

Determine la resistencia de diseño a flexión LRFD y la resistencia permisible a flexión ASD para una sección W12x65 de 50 ksi ($E = 29,000$ ksi) que tiene soporte lateral completo.

1. Se inicia con el ingreso de datos.

LRFD:

Al igual que en el ejemplo anterior, se conoce el perfil, por lo que, en el control *Visualización* se trabaja con la opción *Gráfica en estudio*.

Se selecciona el método de diseño $\Phi_b M_n$ (LRFD) y se habilita el “checkbox” Momento último. En esta ocasión, el ejemplo solicita determinar la resistencia, por lo que, no hay necesidad de ingresar algún valor en el campo M_u , dicho campo se deja con cero. Como la viga presenta soporte lateral completo el valor de $L_b = 0$. El factor C_b no se modifica y permanece igual a 1. En el control *Gráfica en estudio* se elige W12x65 y se habilita el “checkbox” Momento de diseño para ver dicho valor en la gráfica. Finalmente, el grado de acero no se modifica y se deja la opción de inicio A992 ($F_y = 50$ ksi). En la figura 5.30 se ilustra el ingreso de datos:

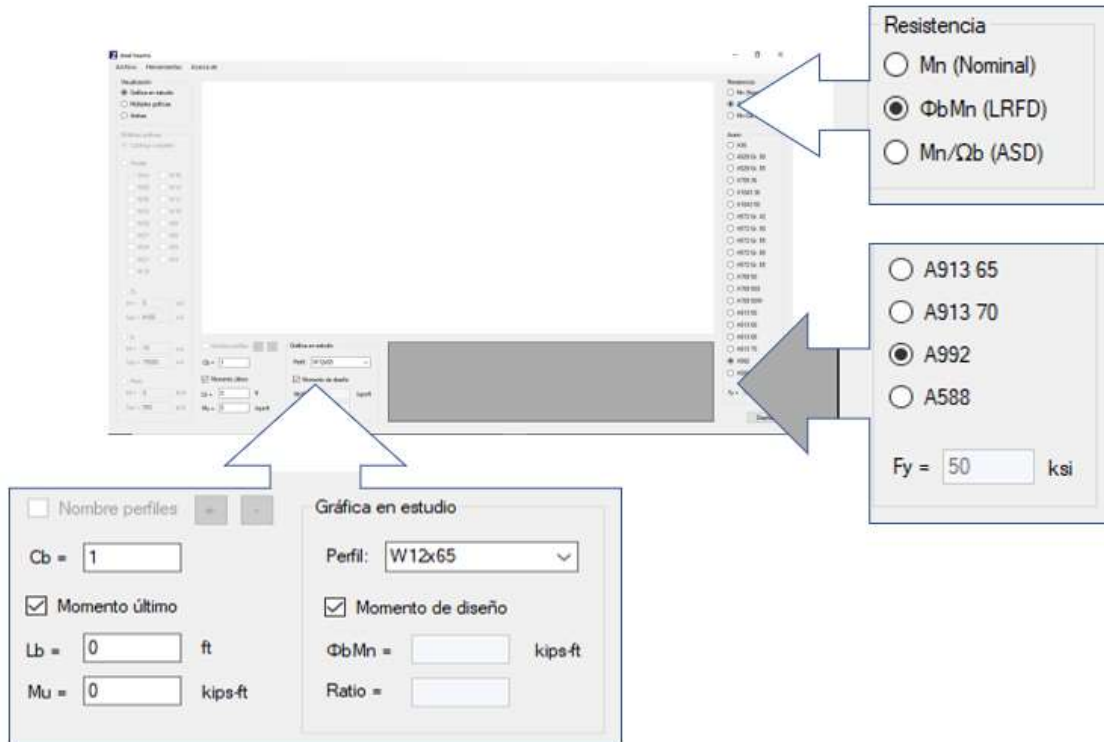


Figura 5.30. Ingreso de datos para diseño LRFD de la viga del Ejemplo 2.

ASD:

De forma similar, se ingresa la información para el método ASD. Se selecciona el método de diseño M_n/Ω_b (ASD), se habilita el “checkbox” Momento admisible y se deja el valor cero en los campos M_a y L_b . Se elige W12x65 y se habilita el “checkbox” Momento permisible. El grado de acero no se modifica y se deja la opción A992 ($F_y = 50$ ksi).

2. Se inicia el cálculo haciendo clic en el botón Diseñar y se obtiene lo siguiente.

LRFD:

La gráfica de la sección W12x65 se presenta en la figura 5.31. Observando dicha figura, se aprecia que Zteel Beams indica, mediante el trazo de L'_p en verde, que la sección presenta una meseta recortada. Esto concuerda

cuando se resolvió el ejemplo con la especificación, donde se determinó que W12x65 presenta patines no compactos.

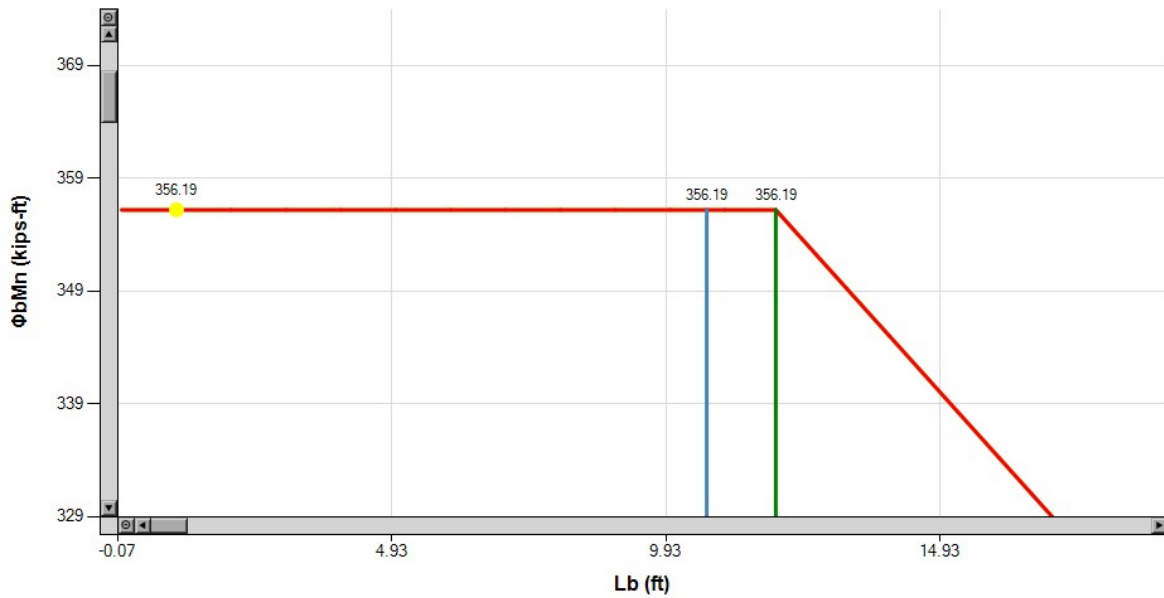


Figura 5.31. Gráfica $\Phi_b M_n - L_b$ de W12x65 (LRFD).

Directamente de la gráfica es posible obtener el valor solicitado, el cual es $M_u = 356.19$ k-ft (figura 5.32).

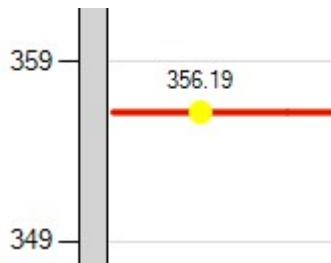


Figura 5.32. Lectura de M_u de la gráfica para W12x65 (LRFD).

ASD:

En la figura 5.33 se muestra la gráfica con el método ASD.

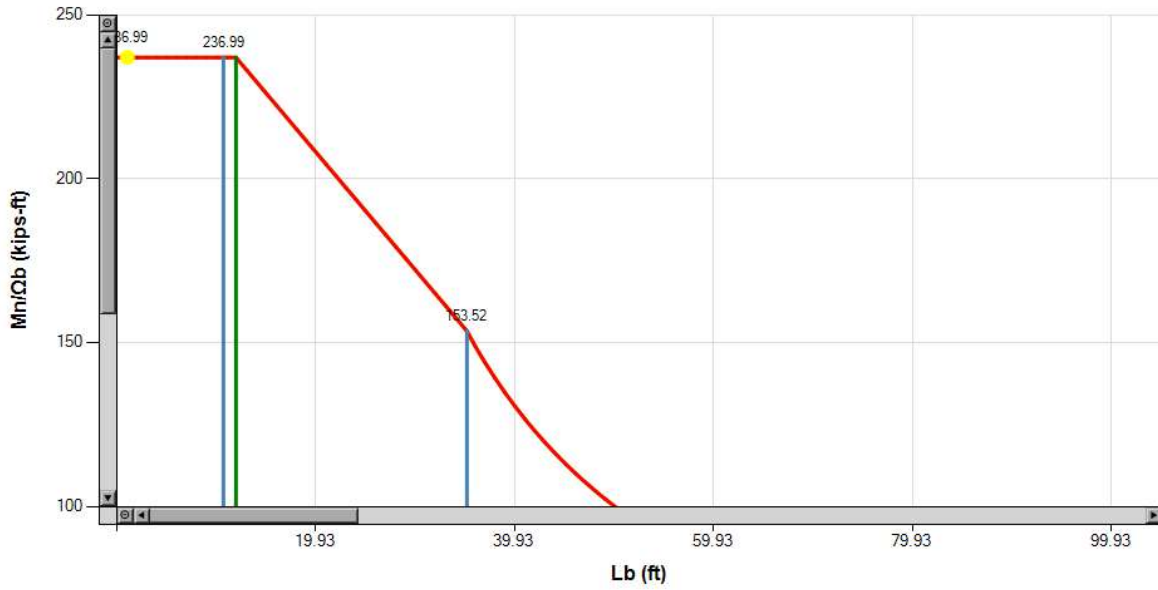


Figura 5.33. Gráfica M_r/Ω_b-L_b de W12x65 (ASD).

En la figura 5.34 se ilustra el control *Gráfica en estudio*, en el cual se encuentra el visor de resistencia. Dicho visor indica que $M_a = 236.99$ k-ft.

Gráfica en estudio

Perfil: W12x65 ▾

Momento permisible

Mn/Ωb = 236.99 kips-ft

Ratio = 0.00

Figura 5.34. Momento permisible de W12x65.

De acuerdo con Zsteel Beams se tienen las siguientes resistencias:

LRFD:

$$\Phi_b M_n = 356.19 \text{ k} - \text{ft}$$

ASD:

$$\frac{M_n}{\Omega_b} = 236.99 \text{ k} - \text{ft}$$

5.2.3 Ejemplo 3: PLT Inelástico (Zona 2) en viga simplemente apoyada

Usando acero de 50 ksi ($E = 29,000$ ksi), seleccione la sección más ligera disponible para la viga de la figura 4.3, que tiene soporte lateral en su patín de compresión sólo en sus extremos. Suponga $C_b = 1$ para este ejemplo (en realidad es 1.14). Use ambos métodos LRFD y ASD.

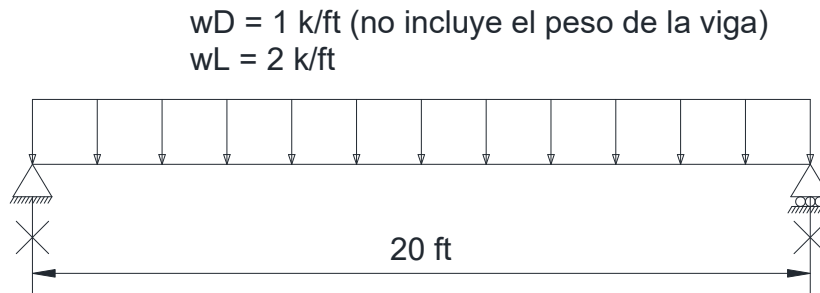


Figura 4.3. Viga simplemente apoyada con carga uniformemente distribuida. Elaboración propia.

1. Determinar las cargas sobre la viga.

Inicialmente se despreciará el peso de la viga. Dicho peso se revisará posteriormente una vez elegido el perfil.

LRFD:

$$w_u = 1.2w_D + 1.6w_L = 1.2(1 \text{ k/ft}) + 1.6(2 \text{ k/ft}) = 4.4 \text{ k/ft}$$

ASD:

$$w_a = w_D + w_L = 1 \text{ k/ft} + 2 \text{ k/ft} = 3 \text{ k/ft}$$

2. Calcular el momento último y el momento admisible.

LRFD:

$$M_u = \frac{w_u L^2}{8} = \frac{(4.4 \text{ k/ft})(20 \text{ ft})^2}{8} = 220 \text{ k-ft}$$

ASD:

$$M_a = \frac{w_a L^2}{8} = \frac{(3 \text{ k/ft})(20 \text{ ft})^2}{8} = 150 \text{ k-ft}$$

3. Ingreso de datos en Zsteel Beams.

LRFD:

En esta ocasión el ejemplo solicita proponer el perfil más ligero, por ello, se debe trabajar con el catálogo completo de secciones. En el control *Visualización* se debe de elegir la opción *Múltiples gráficas*. Hecho esto, se habilita el control *Múltiples gráficas*, en el cual se selecciona la opción *Catálogo completo*, la cual viene por omisión.

Posteriormente se debe de elegir el método de diseño $\Phi_b M_n$ (LRFD) y habilitar el “checkbox” Momento último, de esta forma, el sistema permite ingresar M_u y L_b . M_u se calculó previamente y tiene un valor de 220 k-ft. En el caso de L_b se debe de tomar la longitud total de la viga (20 ft), puesto que el ejemplo indica que el soporte lateral sólo está presente en los apoyos. Se ingresan dichos valores y se revisa que el grado del acero sea A992 ($F_y = 50$ ksi). En la figura 5.35 se ilustra el ingreso de datos para LRFD.

ASD:

Se procede de forma análoga para el método ASD. Se elige el método M_n/Ω_b (ASD) en el control *Resistencia*, se habilita el “checkbox” Momento admisible y se ingresa $M_a = 150$ k-ft en el campo correspondiente. Los demás datos son iguales a los empleados en el método LRFD.

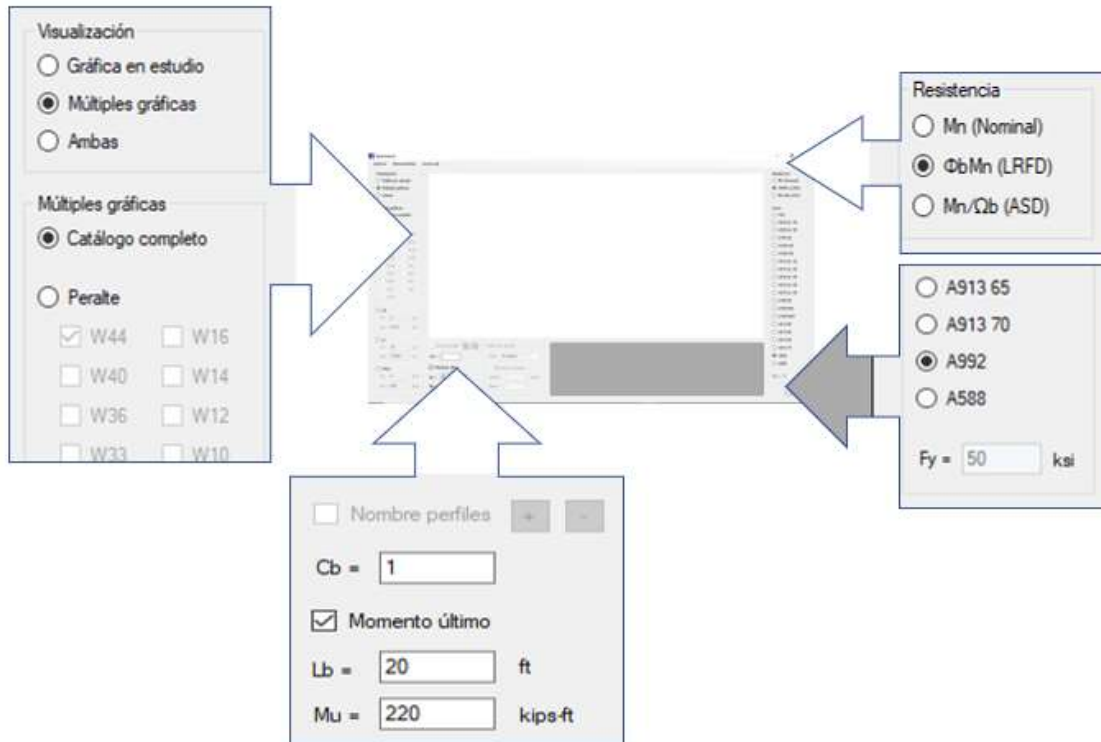


Figura 5.35. Ingreso de datos para diseño LRFD de la viga del Ejemplo 3.

4. Se da clic en el botón *Diseñar*.

LRFD:

Existen varias formas de encontrar el perfil más ligero, puede filtrarse la búsqueda de perfiles mediante la opción *Peso* del control *Múltiples gráficas* en base a la ubicación de la marca M_u . Se puede navegar en el display y localizar la gráfica del perfil más cercana a la marca M_u que se encuentre por encima de ésta. Finalmente, se puede utilizar la función de ordenar del tabulador de resultados. Se procede con la tercera.

Para elegir un perfil, se consulta el tabulador de resultados, en el cual se ordenan los datos en forma ascendente en base a la columna del peso, “w”. Para ello, se da un clic en el encabezado de dicha columna. Posteriormente, en la columna de “*Ratio*” se busca el primer perfil con un “ratio” menor o igual a la unidad. La sección más ligera es W14x53 (figura 5.36); sin embargo,

dicho perfil se encuentra con un “ratio” de 0.99, es muy probable que cuando se ajusten los momentos debido al peso propio, el perfil no pase.

	Perfil	(ft)	Zona	$\Phi_b M_p$ (kips-ft)	$\Phi_b M_r$ (kips-ft)	$\Phi_b M_n$ (kips-ft)	Ratio = $M_u/\Phi_b M_n$	Status	Escala	^
	W18x50	16.9456	III	378.75	233.36249...	179.9162	1.222791	> 1	NG	█
▶	W14x53	12.27159	II	326.625	204.22500...	222.1751	0.9902101	< 1	OK	█
	W12x53	18.20766	II	292.125	185.32499...	230.3984	0.9548679	< 1	OK	█
	W10x54	13.61885	II	249.75	157.49999...	208.6197	1.054551	> 1	NG	█
	W18x55	7.55101	III	420	258.03750...	211.5371	1.040007	> 1	NG	█

Figura 5.36. Consulta del tabulador de resultados (LRFD).

ASD:

En el caso del método ASD, a manera de ejemplo, se navega en el display. En la figura 5.37, se muestran las Gráficas M_n/Ω_b-L_b de todas las secciones del Manual de acuerdo con el método ASD.

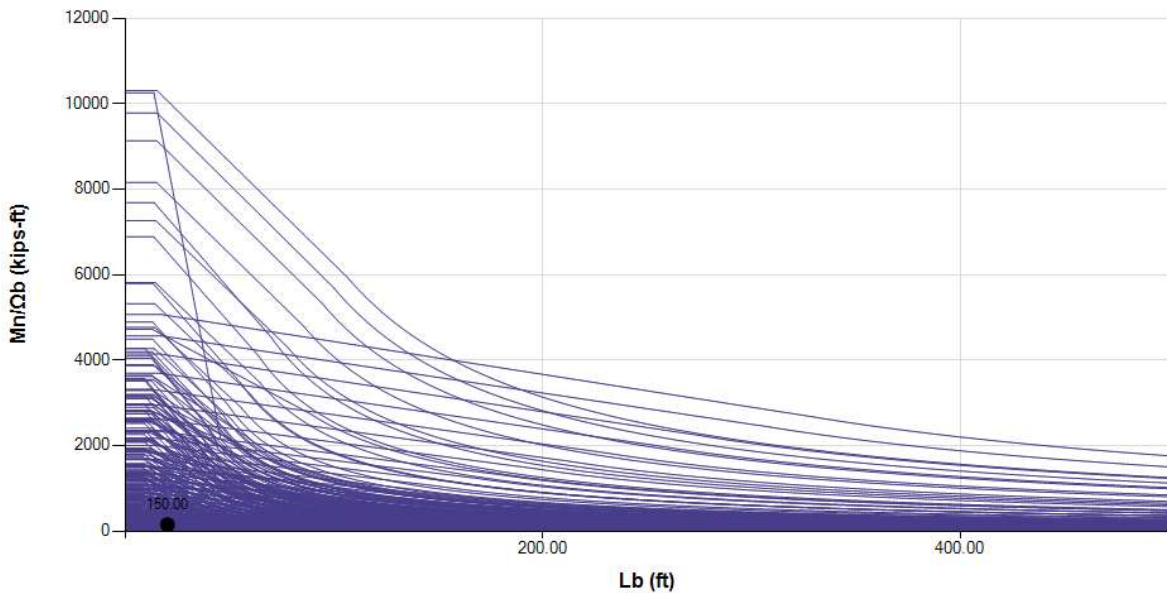


Figura 5.37. Gráficas M_n/Ω_b-L_b de todas las secciones del Manual (ASD).

Con apoyo del zoom del display y del indentificador de perfiles se ubica W12x53 (figura 5.38).

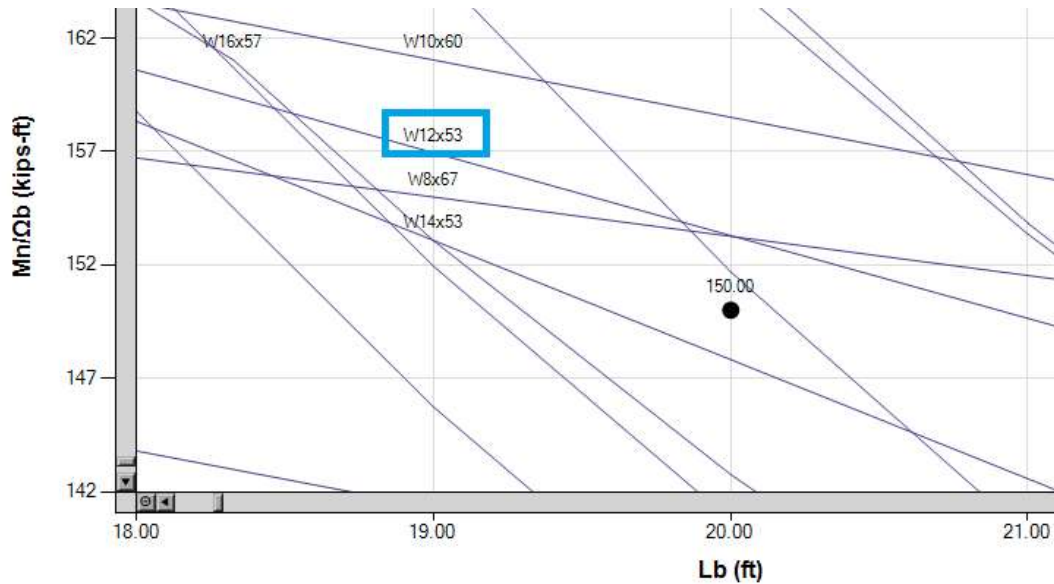


Figura 5.38. Zoom en el display.

Para corroborar la información, se realiza una consulta en el tabulador de resultados, en donde se corrobora que W12x53 es la sección más ligera de acuerdo con el ASD (figura 5.39).

	Perfil	(ft)	Zona	Mp/Qb (kips-ft)	Mr/Qb (kips-ft)	Mn/Qb (kips-ft)	Ratio = Ma/Mn/Qb	Status	Escala
	W14x53	2.27159	II	217.3154	135.87825...	147.8211	1.01474	> 1	NG
▶	W12x53	8.20766	II	194.3613	123.30339...	153.2923	0.9785225	< 1	OK
	W10x54	3.61885	II	166.1677	104.79042...	138.8022	1.080675	> 1	NG
	W18x55	7.55101	III	279.4411	171.68164...	140.7432	1.065771	> 1	NG
	W24x55	3.92955	III	334.3314	199.10180...	108.4077	1.383666	> 1	NG

Figura 5.39. Consulta del tabulador de resultados (ASD).

- Se recalculan las cargas y momentos incluyendo el peso propio.

LRFD:

$$w_u = 1.2(1k/ft + 0.053 k/ft) + 1.6(2 k/ft) = 4.46 k/ft$$

$$M_u = \frac{(4.46 k/ft)(20 ft)^2}{8} = 223 k - ft$$

ASD:

$$w_a = (1k/ft + 0.053 k/ft) + (2 k/ft) = 3.05 k/ft$$

$$M_a = \frac{(3.05 k/ft)(20 ft)^2}{8} = 152.5 k - ft$$

6. Se ingresan las nuevas acciones al software para verificar que las secciones propuestas soporten su peso propio.

LRFD:

Se ingresa $M_u = 223$ k-ft, se hace clic en el botón *Diseñar* y se consulta el tabulador de resultados (figura 5.40).

	Perfil	(ft)	Zona	$\Phi_b M_p$ (kips-ft)	$\Phi_b M_r$ (kips-ft)	$\Phi_b M_n$ (kips-ft)	Ratio = $M_u / \Phi_b M_n$	Status	Escala
	W12x50	13.82415	II	269.625	168.52498...	191.4006	1.165096	> 1	NG
	W18x50	16.9456	III	378.75	233.36249...	179.9162	1.239466	> 1	NG
	W14x53	12.27159	II	326.625	204.22500...	222.1751	1.003713	> 1	NG
▶	W12x53	18.20766	II	292.125	185.32499...	230.3984	0.9678888	< 1	OK
	W10x54	13.61885	II	249.75	157.49999...	208.6197	1.068931	> 1	NG

Figura 5.40. Consulta del tabulador de resultados (LRFD).

Como se había pronosticado, el perfil W14x53 supera la unidad debido al peso propio; sin embargo, ahora el perfil más ligero es W12x53, el cual tiene el mismo peso que W14x53, por lo que, no es necesario recalculer M_u y la solución o propuesta de perfil es W12x53 ($\Phi_b M_n = 230.40$ k-ft y “ratio” = 0.97).

ASD:

Se ingresa $M_a = 152.5$ k-ft y se verifica que W12x53 es la sección más ligera ($M_n / \Omega_b = 153.29$ k-ft y “ratio” = 0.99), en la figura 4.41 se ilustra esta situación.

	Perfil	(ft)	Zona	M_p/Ω_b (kips-ft)	M_r/Ω_b (kips-ft)	M_n/Ω_b (kips-ft)	Ratio = $M_a/M_n/\Omega_b$	Status	Escala
	W12x50	3.82415	II	179.3912	112.12574...	127.3457	1.197528	> 1	NG
	W18x50	16.9456	III	251.996	155.26447...	119.7048	1.273968	> 1	NG
	W14x53	2.27159	II	217.3154	135.87825...	147.8211	1.031653	> 1	NG
▶	W12x53	3.20766	II	194.3613	123.30339...	153.2923	0.9948313	< 1	OK
	W10x54	3.61885	II	166.1677	104.79042...	138.8022	1.098686	> 1	NG

Figura 5.41. Consulta del tabulador de resultados (ASD).

De acuerdo con Zteel Beams, los resultados son los siguientes:

LRFD:

W12x53

$$\phi_b M_n = 230.40 \text{ k} - ft > M_u = 223 \text{ k} - ft$$

$$\frac{M_u}{\phi_b M_n} = 0.97 < 1$$

ASD:

W12x53

$$\frac{M_n}{\Omega_b} = 153.29 \text{ k} - ft > M_a = 152.5 \text{ k} - ft$$

$$\frac{M_a}{M_n/\Omega_b} = 0.99 < 1$$

El perfil propuesto es W12x53 en LRFD y ASD. El resultado coincidió con los ejemplos donde se emplea la especificación (Ejemplo 3 del inciso 4.1.3) y donde se hace uso de la Tabla 3-10 de las ayudas de diseño del Manual (Ejemplo 3 del inciso 4.2.3). En el primer ejemplo se requirieron 3 iteraciones, cuando se empleó la Tabla 3-10 el tiempo se acortó considerablemente; sin embargo, en este ejemplo, con apoyo de Zteel Beams, bastaron 2 clics para llegar al resultado. Además, el

tabulador de resultados presenta un reporte amplio del perfil (relación ancho-espesor, zona, momento plástico, etc.).

5.2.4 Ejemplo 4: PLT Inelástico (Zona 2) en viga simplemente apoyada con C_b

La viga de la figura 4.4 es un perfil W21x93 de acero de 50 ksi ($E = 29,000$ ksi) y tiene soporte lateral en su patín de compresión en sus extremos y en el centro del claro. Determine con los métodos LRFD y ASD si la viga es capaz de soportar las siguientes cargas:

$$w_D = 1.1 \text{ k/ft}$$

$$w_L = 2.2 \text{ k/ft}$$

$$P_D = 5 \text{ k}$$

$$P_L = 10 \text{ k}$$

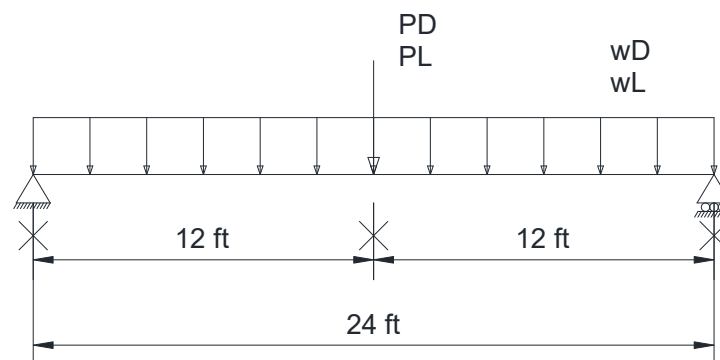


Figura 4.4. Viga simplemente apoyada con soporte lateral en su patín de compresión en sus extremos y en el centro del claro. Elaboración propia.

1. Determinar las cargas últimas y admisibles que debe soportar la viga.

LRFD:

$$P_u = 1.2P_D + 1.6P_L = 1.2(5 \text{ k}) + 1.6(10 \text{ k}) = 22 \text{ k}$$

$$w_u = 1.2(w_D + \text{Peso propio}) + 1.6w_L$$

$$w_u = 1.2(1.1 \text{ k/ft} + 0.093 \text{ k/ft}) + 1.6(2.2 \text{ k/ft}) = 4.95 \text{ k/ft}$$

ASD:

$$P_a = P_D + P_L = 5 k + 10 k = 15 k$$

$$w_a = (w_D + \text{Peso propio}) + w_L$$

$$w_a = (1.1 k/ft + 0.093 k/ft) + 2.2 k/ft = 3.39 k/ft$$

2. Determinar el momento último y el momento admisible.

LRFD:

$$M_u = \frac{P_u L}{4} + \frac{w_u L^2}{8}$$

$$M_u = \frac{(22 k)(24 ft)}{4} + \frac{(4.95 k/ft)(24 ft)^2}{8} = 488.52 k - ft$$

ASD:

$$M_a = \frac{P_a L}{4} + \frac{w_a L^2}{8}$$

$$M_a = \frac{(15 k)(24 ft)}{4} + \frac{(3.39 k/ft)(24 ft)^2}{8} = 334.3 k - ft$$

3. Calcular el coeficiente C_b .

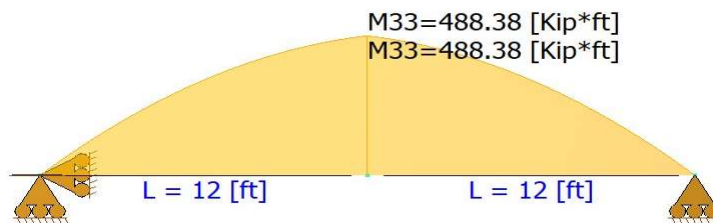


Figura 4.5. Diagrama de momentos de la viga del Ejemplo 4 (inciso 4.1.4). Elaboración propia.

Con apoyo del diagrama de momentos de la figura 4.5, se calcula C_b , el cual tiene un valor de:

$$C_b = \frac{12.5(488.38)}{2.5(488.38) + 3(189.01) + 4(333.45) + 3(433.33)}$$

$$C_b = 1.38$$

4. Ingresar datos de entrada a Zsteel Beams.

LRFD:

Como la sección es conocida, se debe de trabajar con el control *Gráfica en estudio*. El método de diseño es $\Phi_b M_n$ (LRFD), se ingresa $C_b = 1.38$, se habilita el “checkbox” Momento último, se ingresa $L_b = 12$ ft y $M_u = 488.52$ k-ft, se elige la sección W21x93, se habilita el “checkbox” Momento de diseño y se ingresa $F_y = 50$ ksi (figura 5.42).

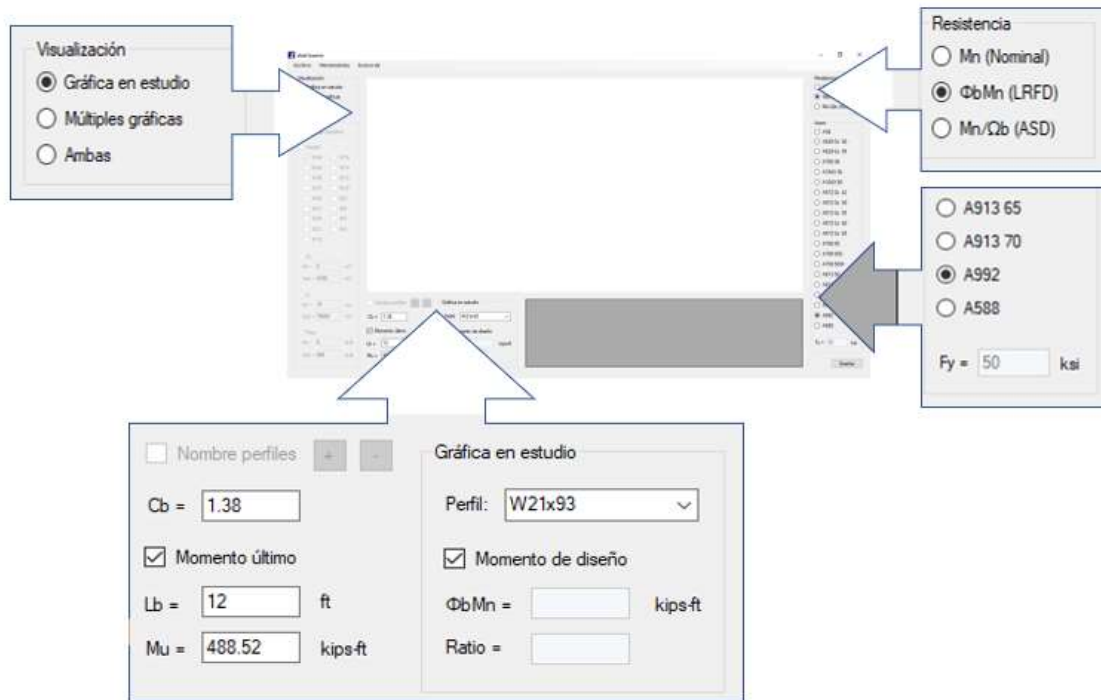


Figura 5.42. Ingreso de datos para diseño LRFD de la viga del Ejemplo 4.

ASD:

Se ingresan los mismos datos que fueron ingresados en el método LRFD con las siguientes variantes: método M_n/Ω_b (ASD), se habilitan los “checkbox” Momento admisible y Momento permisible, y $M_a = 334.3$ k-ft.

5. Clic en el botón *Diseñar*.

LRFD:

En la figura 5.43, se ilustra la gráfica del perfil. Por simple inspección visual, se sabe que el perfil es aceptable. Se aprecia en dicha figura el efecto del coeficiente C_b , el cual en este caso, incrementa la resistencia de la sección hasta el momento plástico; sin embargo, la sección sin dicho factor tiene suficiente capacidad para resistir el M_u .

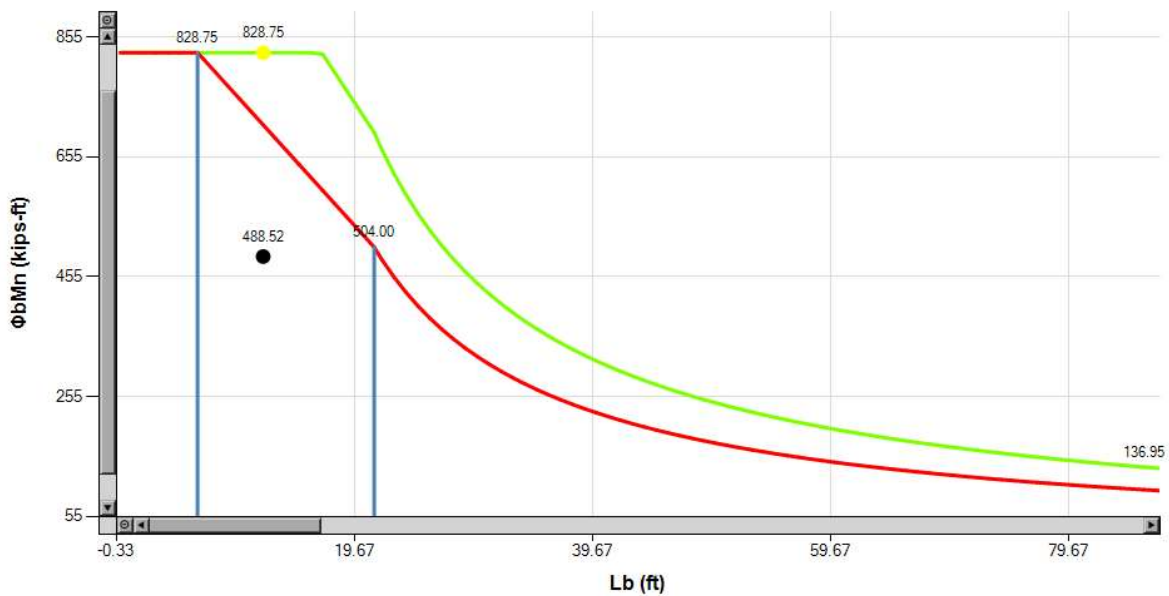


Figura 5.43. Gráfica $\Phi_b M_n - L_b$ de W21x93 (LRFD) con $L_b = 12$ ft.

De acuerdo con Zteel Beams, $\Phi_b M_n = 828.75$ k-ft y “ratio” = 0.59 (figura 5.44).

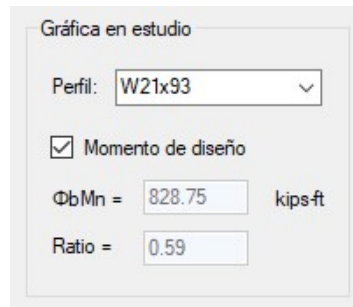


Figura 5.44. Momento de diseño y "ratio" de la sección del Ejemplo 4.

ASD:

Los resultados son $M_n/\Omega_b = 551.40$ k-ft y "ratio" = 0.61 (figuras 5.45 y 5.46).

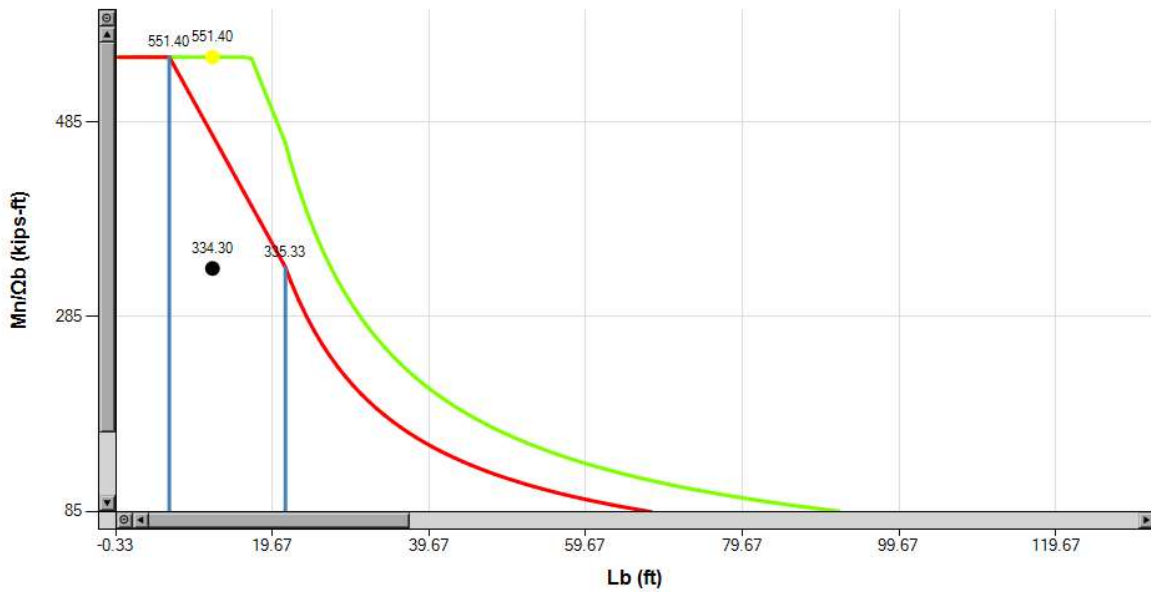


Figura 5.45. Gráfica M_n/Ω_b - L_b de W21x93 (ASD) con $L_b = 12$ ft.

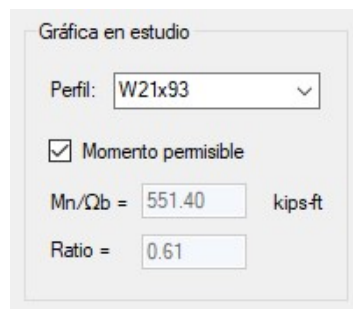


Figura 5.46. Momento permisible y "ratio" de la sección del Ejemplo 4.

Los resultados del software son:

LRFD:

$$\Phi_b M_n = 828.75 \text{ k} - \text{ft}$$

$$\frac{M_u}{\Phi_b M_n} = \frac{488.52 \text{ k} - \text{ft}}{828.75 \text{ k} - \text{ft}} = 0.59 < 1$$

ASD:

$$\frac{M_n}{\Omega_b} = 551.4 \text{ k} - \text{ft}$$

$$\frac{M_a}{M_n/\Omega_b} = \frac{334.3 \text{ k} - \text{ft}}{551.4 \text{ k} - \text{ft}} = 0.61 < 1$$

De acuerdo con la especificación, con la Tabla 3-2 y con Zsteel Beams, la sección W21x53 es aceptable en ambos métodos.

5.2.5 Ejemplo 5: PLT Elástico (Zona 3) en viga simplemente apoyada con C_b

Si a la viga del Ejemplo 4 (inciso 4.2.4) se le retira el soporte lateral en su patín de compresión en el centro del claro, es decir, sólo presenta dicho soporte en los apoyos (figura 4.6), determine con los métodos LRFD y ASD si la viga es capaz de soportar las cargas de dicho ejemplo.

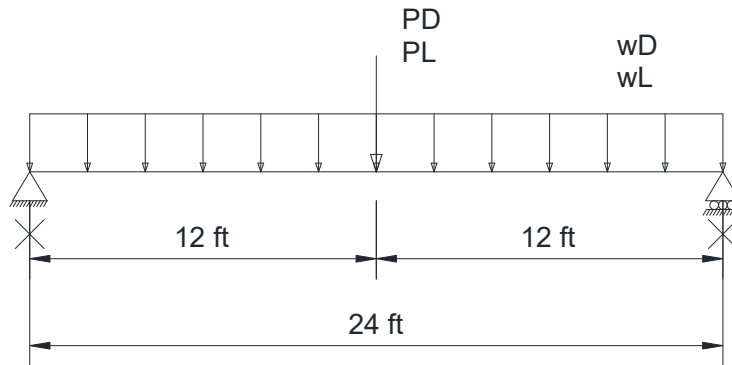


Figura 4.6. Viga simplemente apoyada con soporte lateral en su patín de compresión sólo en sus extremos. Elaboración propia.

1. Determinar los momentos últimos y admisibles. Dichos valores se toman del Ejemplo 4 del inciso 4.2.4:

LRFD:

$$M_u = 488.52 \text{ k} - \text{ft}$$

ASD:

$$M_a = 334.3 \text{ k} - \text{ft}$$

2. Calcular C_b . Con apoyo de la figura 4.7 y la ecuación 3.3 se tiene:

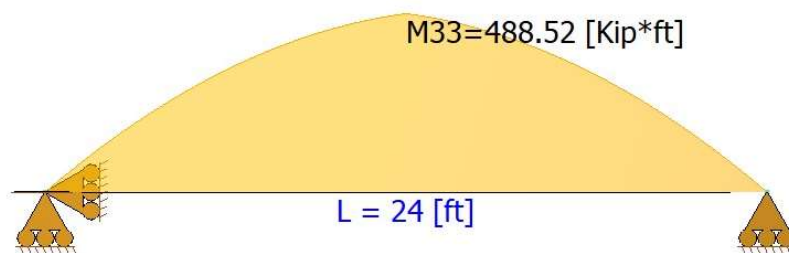


Figura 4.7. Diagrama de momentos de la viga del Ejemplo 5 (inciso 4.1.5). Elaboración propia.

$$C_b = \frac{12.5(488.52)}{2.5(488.52) + 3(333.39) + 4(488.52) + 3(333.39)}$$

$$C_b = 1.18$$

3. Los datos de entrada son idénticos a los del Ejemplo 4 (inciso 4.2.4), a excepción de $C_b = 1.18$ y $L_b = 24$ ft para ambos métodos.

4. Clic en el botón *Diseñar*.

LRFD:

En la figura 5.47 se muestra la gráfica de la sección.

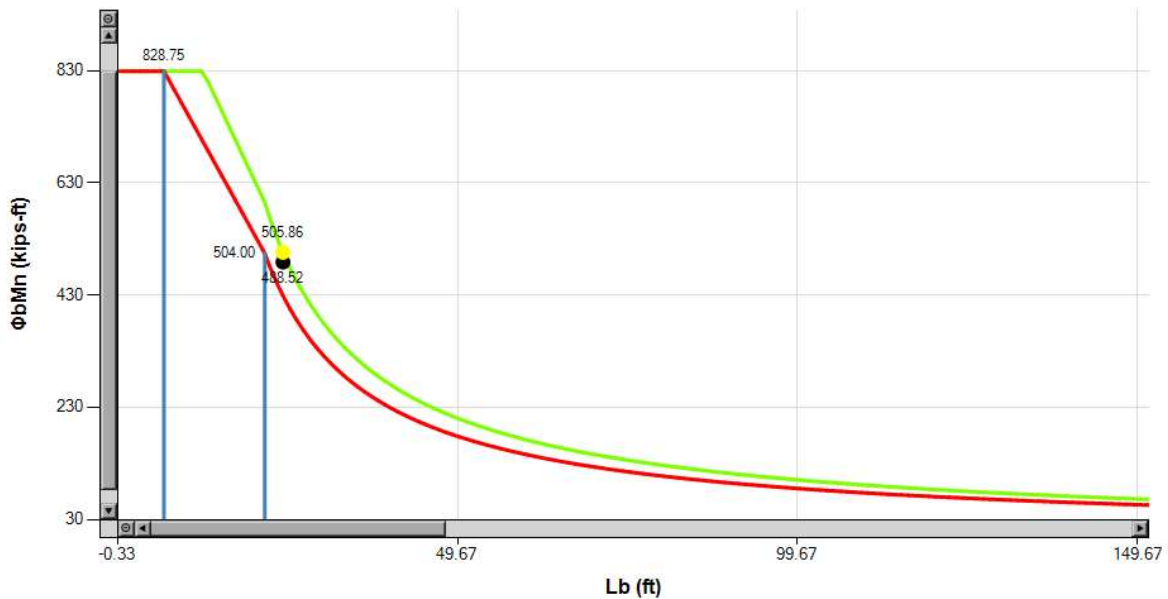


Figura 5.47. Gráfica $\Phi_b M_n - L_b$ de W21x93 (LRFD) con $L_b = 24$ ft.

La figura 5.47 permite fácilmente sensibilizar al lector sobre la variación en capacidad resistente a momento de una viga dependiendo de su L_b . El retirar el soporte lateral central llevó a la sección de zona 2 a zona 3 con una reducción drástica en resistencia. Si bien en el ejemplo anterior la viga no

necesitaba la aportación de C_b , en este ejemplo, es gracias a dicho factor que la viga se acepta, ya que sus capacidad resistente con $C_b = 1$ es superada por M_u . Los resultados son $\Phi_b M_n = 505.86$ k-ft y “ratio” = 0.97.

ASD:

Los resultados con el método ASD son $M_r/\Omega_b = 336.56$ k-ft y “ratio” = 0.99. La gráfica se muestra en la figura 5.48.

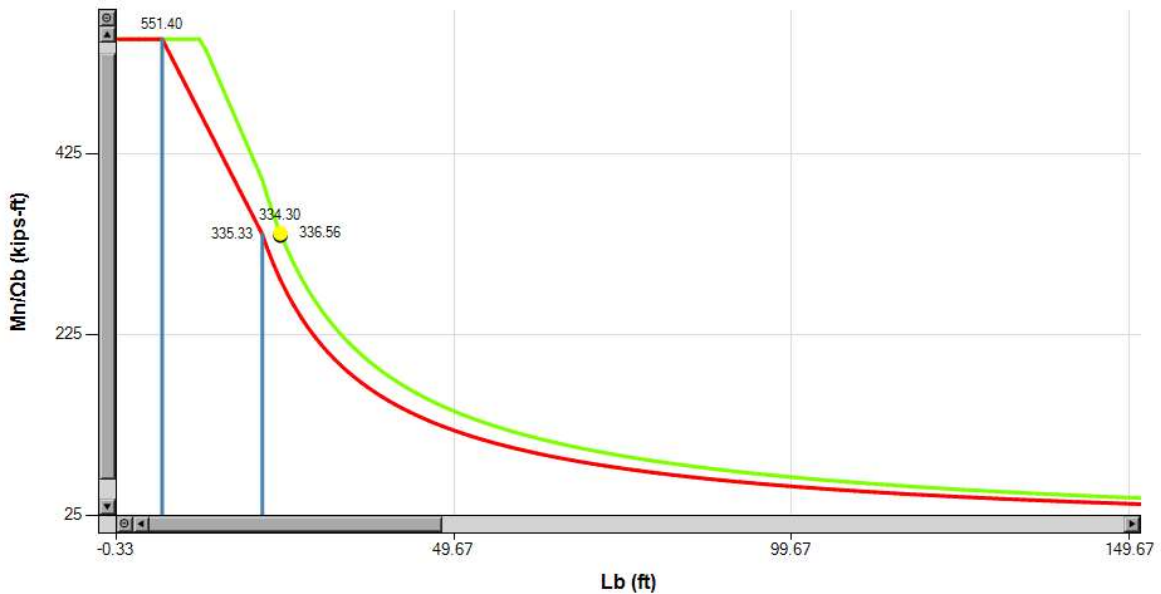


Figura 5.48. Gráfica $M_r/\Omega_b - L_b$ de W21x93 (ASD) con $L_b = 24$ ft.

Los resultados de Zsteel Beams se muestran a continuación.

LRFD:

$$\Phi_b M_n = 505.86 \text{ k} - \text{ft}$$

$$\frac{M_u}{\Phi_b M_n} = \frac{488.52 \text{ k} - \text{ft}}{505.86 \text{ k} - \text{ft}} = 0.97 < 1$$

ASD:

$$\frac{M_n}{\Omega_b} = 336.56 \text{ k} - \text{ft}$$

$$\frac{M_a}{M_n/\Omega_b} = \frac{334.3 \text{ k} - \text{ft}}{336.56 \text{ k} - \text{ft}} = 0.99 < 1$$

Previamente se había reflexionado sobre la notoria diferencia en la capacidad resistente a flexión de una viga cuando está en diferentes zonas. En los Ejemplos 4 (incisos 4.1.4 y 4.1.5), el retirar un soporte lateral al centro de la viga (una riostra por ejemplo) significó un incremento en los “ratios” de 0.59 a 0.97 y de 0.61 a 0.99 en los métodos LRFD y ASD respectivamente. La demanda subió del 60% al 100%.

Se retoma la conclusión para el caso de los Ejemplos 4 (incisos 4.2.4 y 4.2.5), haciendo mención además de la posibilidad de entendimiento que da Zteel Beams al presentar los resultados de forma gráfica (figuras 5.47 y 5.48). En los Ejemplos 4 anteriores (incisos 4.1.4, 4.1.5, 4.2.4 y 4.2.5) se llega a un resultado, a un número, el cual es correcto; sin embargo, no se entiende con claridad de dónde vino. Como se mencionó, Zteel Beams sensibiliza al usuario sobre el diseño, le permite entender el comportamiento de la viga, le indica donde está su resistencia y dónde están sus acciones, y por ende, le ayuda a una mejor toma de decisiones.

5.2.6 Ejemplo 6: PLT Elástico (Zona 3) en viga continua con C_b

El tramo intermedio de la viga continua de la figura 4.8 tiene el diagrama de momentos últimos que se muestra en la figura 4.9, usando acero de 50 ksi ($E = 29,000$ ksi), seleccione la sección más ligera disponible para dicho tramo, el cual tiene soporte lateral en su patín de compresión en los apoyos. Del análisis estructural se sabe que M_u tiene un valor de 67.15 k-ft al centro del tramo y 16.28 k-ft a un cuarto y a tres cuartos de distancia a partir del apoyo. Resuelva con el método LRFD y considere que el peso propio de la viga está incluido en el diagrama.

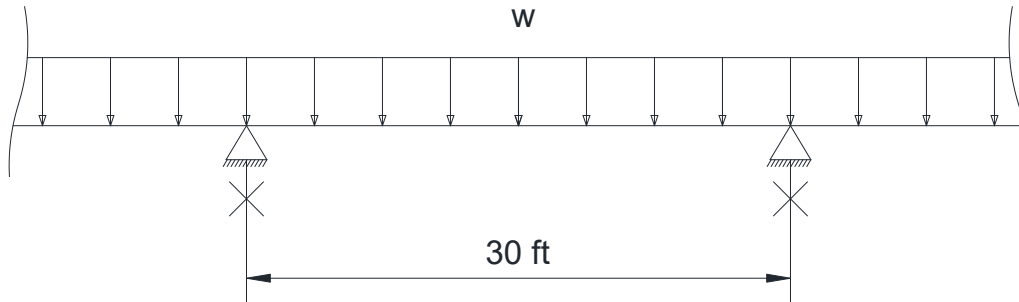


Figura 5.8. Tramo intermedio de una viga continua con soporte lateral en el patín de compresión en los apoyos. Elaboración propia.

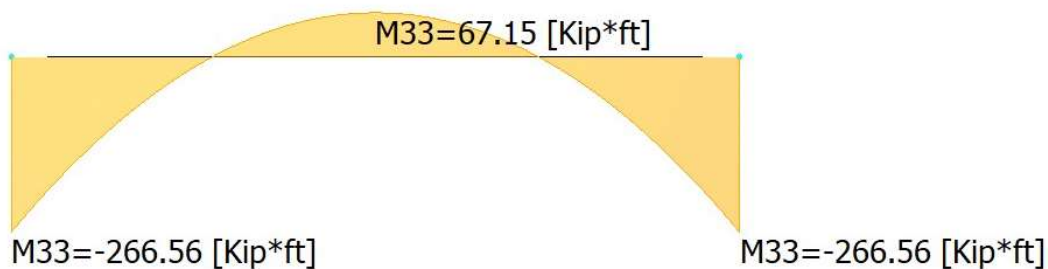


Figura 5.9. Diagrama de momentos del tramo intermedio de la viga continua. Elaboración propia.

1. Se determina el factor C_b con apoyo de la ecuación 2.3:

$$C_b = \frac{12.5(266.56)}{2.5(266.56) + 3(16.28) + 4(67.15) + 3(16.28)}$$

$$C_b = 3.23$$

2. Posteriormente, se deben de ingresar los datos de entrada al software. El ejemplo solicita seleccionar la sección más ligera, por ello, en el control *Visualización* de debe de elegir la opción *Múltiples gráficas*. Al seleccionar dicha opción, Zteel Beams habilita el control *Múltiples gráficas*, en el cual se requiere la opción que tiene el sistema por inicio (*Catálogo completo*).

En el control *Resistencia*, se elige la opción con el método requerido, el cual es $\Phi_b M_n$ (LRFD). Se ingresa el factor C_b , el cual se determinó previamente y tiene un valor de 3.23. Se debe dar clic y habilitar el “checkbox” Momento

último para que el sistema permita ingresar M_u y L_b . Dichos campos se ingresan con los valores de 266.56 k-ft y 30 ft respectivamente. El ingreso de datos termina verificando en el control *Acero* que la opción elegida sea A992. En la figura 5.49 se ilustra el ingreso de datos a Zteel Beams para este ejemplo.

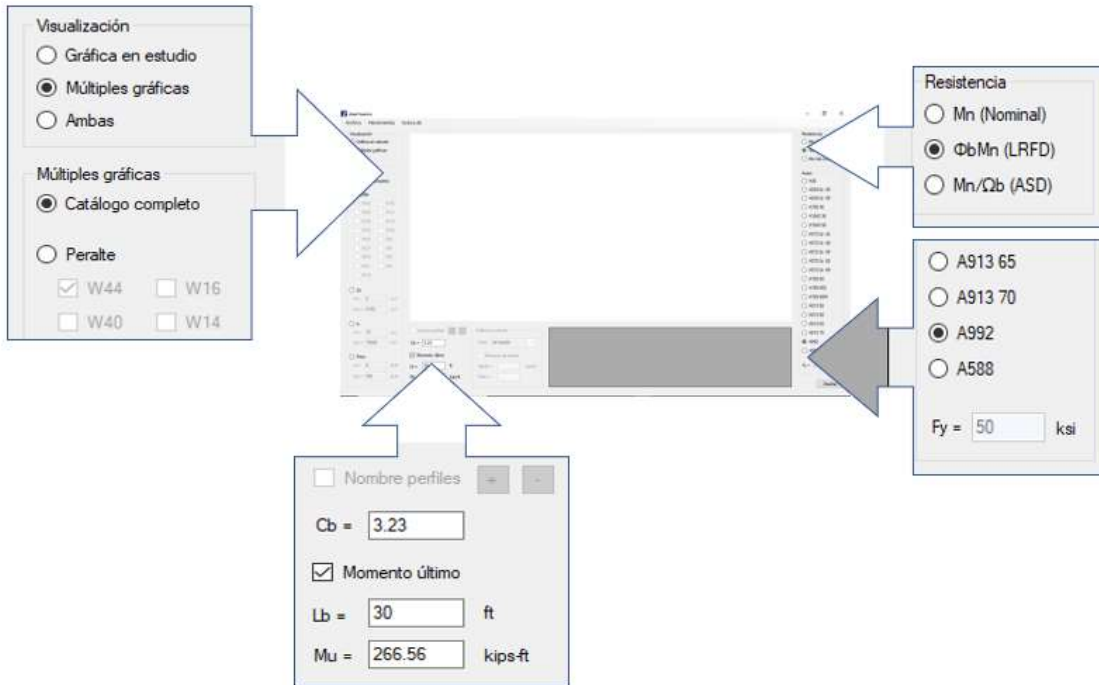


Figura 5.49. Ingreso de datos para diseño LRFD del tramo de viga continua del Ejemplo 6.

- Se da clic en botón *Diseñar* e inmediatamente después, Zteel Beams muestra las gráficas de todas las secciones del catálogo del Manual AISC de acuerdo con el método LRFD, las cuales se ilustran en la figura 5.50. En dicha figura se aprecia el incremento de resistencia en todas las gráficas debido al factor C_b . También se aprecia la marca de M_u , por simple inspección visual, el usuario de Zteel Beams sabe que su momento último es bajo comparado con la amplia gama de resistencias que tiene el catálogo en sus diferentes secciones.

Para elegir la sección más ligera, como se explicó anteriormente, existen varios caminos, en este ejemplo se procede a consultar el tabulador de resultados. En dicho tabulador se hace clic en el encabezado de la columna

del peso, “w”, con lo cual, Zteel Beams ordena las secciones de forma ascendente en función de su peso. Posteriormente, en la columna “Ratio” se busca la primera sección con un “ratio” menor o igual a 1, la sección encontrada es entonces la más ligera. En la figura 5.51 se muestra el tabulador de resultados.

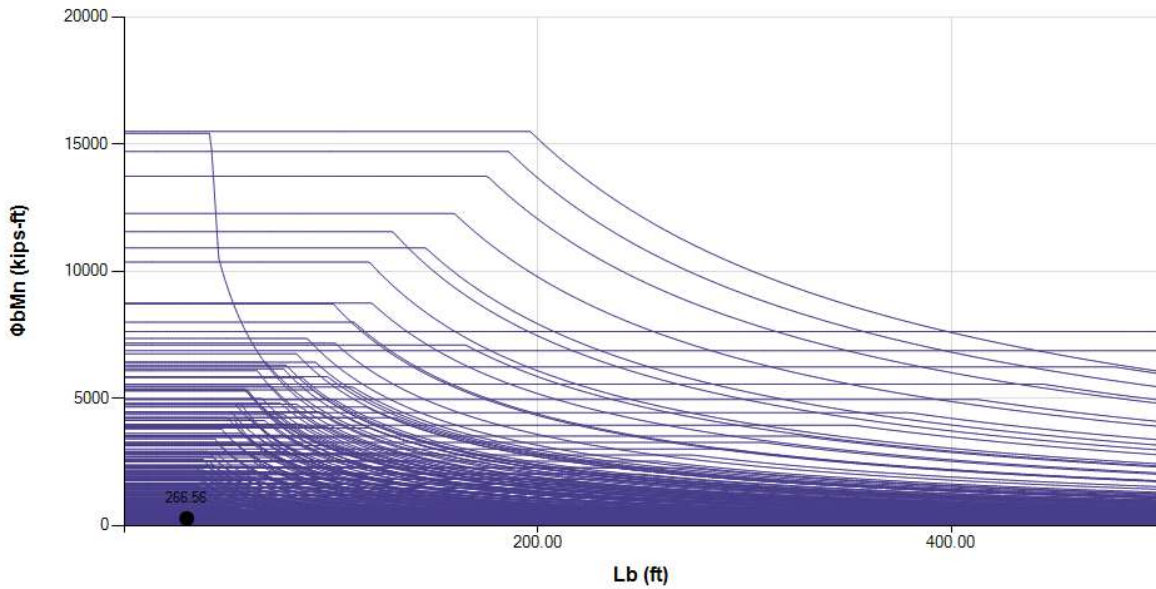


Figura 5.50. Gráficas $\Phi_b M_n - L_b$ de todas las secciones del Manual (LRFD).

	Perfil	(ft)	Zona	$\Phi_b M_p$ (kips-ft)	$\Phi_b M_r$ (kips-ft)	$\Phi_b M_n$ (kips-ft)	Ratio = $M_u / \Phi_b M_n$	Status	Escala
▶	W16x45	6.46039	III	308.625	190.83748...	266.7896	0.9991392	< 1	OK
	W12x45	2.40186	III	240.75	151.46249...	240.75	1.107207	> 1	NG
	W18x46	3.69622	III	340.125	206.85000...	225.2933	1.183169	> 1	NG
	W8x48	5.23101	II	183.75	113.39999...	183.75	1.450667	> 1	NG
	W14x48	1.09421	III	294	184.27498...	294	0.9066668	< 1	OK

Figura 5.51. Consulta en el tabulador de resultados (LRFD).

De acuerdo con Zteel Beams, la sección más ligera es W16x45:

$$\Phi_b M_n = 266.79 \text{ k} - \text{ft}$$

$$\frac{M_u}{\phi_b M_n} = \frac{266.56 \text{ k-ft}}{266.79 \text{ k-ft}} = 0.999 < 1$$

La sección propuesta por Zteel Beams es W16x45. Nuevamente llama la atención el resultado al diferir con aquel obtenido tanto haciendo uso de la especificación (Ejemplo 6 inciso 4.1.6) como aquel que emplea las Tablas 3-2 y 3-10 (Ejemplo 6 inciso 4.2.6), los cuales fueron W14x48 y W12x53 respectivamente. De los 3 procedimientos, Zteel Beams fue el que obtuvo la sección mas ligera.

En el caso del ejemplo resuelto con la especificación fueron necesarias 5 iteraciones, las cuales tomaron un tiempo aproximado de 1.5 horas. El ejemplo que hace uso de las ayudas, requirió 4 intentos o iteraciones, lo cual consumió un tiempo de 20 minutos. Finalmente, en Zteel Beams bastó un clic y menos de un minuto para llegar al resultado.

5.3 Comparativa

En secciones pasadas se presentaron ejemplos en donde se diseñaron o revisaron vigas por flexión ante diferentes tipos de cargas, así como diferentes longitudes de soporte lateral en su patín de compresión (zonas 1, 2 y 3). Dichos ejemplos se resolvieron con procedimientos distintos (fórmulas de la especificación, ayudas de diseño del Manual, software comercial y Zteel Beams) y los resultados se presentan en la Tabla 2 (las unidades son k-ft y la marca “-” indica que en el ejemplo respectivo no fue solicitado ese dato). A excepción del Ejemplo 6, se observa que las resistencias obtenidas con los diferentes procedimientos son prácticamente iguales; sin embargo, el camino para llegar a ellas fue completamente diferente.

Es interesante analizar el Ejemplo 6, en el cual se solicita seleccionar la sección más ligera. El procedimiento que emplea la especificación fue muy tedioso, ya que se trabajó con tanteos hasta aproximarse al resultado. Fueron necesarias 5

iteraciones, las cuales se realizaron en un tiempo aproximado de 1.5 horas. La sección encontrada con ese procedimiento fue un W14x48.

Tabla 2. Comparativa de resultados. Elaboración propia.

Procedimiento	Método	Resistencia	Ejemplo					
			1	2	3	4	5	6
Especificación	LRFD	$\Phi_b M_n$	109.87	356.18	230.40	828.75	505.85	294.00
		Perfil ligero	-	-	W12x53	-	-	W14x48
	ASD	M_n/Ω_b	73.10	236.98	153.29	551.40	336.56	-
		Perfil ligero	-	-	W12x53	-	-	-
Ayudas del Manual	LRFD	$\Phi_b M_n$	110.00	356.00	230.25	829.00	506.22	292.00
		Perfil ligero	-	-	W12x53	-	-	W12x53
	ASD	M_n/Ω_b	73.10	237.00	153.50	551.00	337.48	-
		Perfil ligero	-	-	W12x53	-	-	-
Software comercial	LRFD	$\Phi_b M_n$	-	-	-	-	-	-
		Perfil ligero	-	-	W12x58	-	-	-
	ASD	M_n/Ω_b	-	-	-	-	-	-
		Perfil ligero	-	-	W12x58	-	-	-
Zsteel Beams	LRFD	$\Phi_b M_n$	109.88	356.19	230.40	828.75	505.86	266.79
		Perfil ligero	-	-	W12x53	-	-	W16x45
	ASD	M_n/Ω_b	73.10	236.99	153.29	551.40	336.56	-
		Perfil ligero	-	-	W12x53	-	-	-

El empleo de las ayudas de diseño, si bien no fue tan tedioso comparado con las 5 iteraciones que se realizaron al trabajar con las fórmulas de la especificación, necesitó 4 iteraciones, en las cuales el uso de la Tabla 3-10 con un C_b mayor a 1 implicó un ir y venir entre dicha tabla y la Tabla 3-2 para verificar que no se supere el valor de $\Phi_b M_p$. Al final, dicha verificación hizo cansado el ejercicio. Fueron necesarios 20 minutos y la sección propuesta fue W12x53. Llama la atención dicho perfil, debido a que el procedimiento con fórmulas propone uno más ligero. En la Figura 4.52 se muestra la razón de ello. La gráfica del perfil W14x48 está incompleta y no cruza el L_b solicitado en la viga del ejemplo. Esta situación hizo que se pasara por alto este perfil y se buscara otro, con lo cual, se concluye que la Tabla 3-10 del Manual no siempre proporciona el perfil más ligero.

La sección propuesta por Zsteel Beams es un W16x45 y es la más ligera de las tres, encontrarla implicó menos de 1 minuto. Hoy en día, el ingeniero estructural tiene una gran exigencia en tiempo y debe contar con los recursos para realizar diseños rápidos. En la figura 5.53 se muestra la imagen del modelo de un edificio real que

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

A lo largo del presente trabajo se estudiaron vigas sección W (I), se presentaron las metodologías para calcular el momento resistente a flexión de acuerdo con la Especificación AISC 360-16 e IMCA 2015 y se ejemplificaron casos de diseño y/o revisión empleando diferentes procedimientos, con lo cual se concluye lo siguiente:

Método convencional (Especificaciones AISC e IMCA)

- La cantidad de fórmulas es extensa y su manejo se convierte en una tarea tediosa, sobre todo para las zonas 2 y 3, con posibilidad de error. A esto hay que sumar, que en la mayoría de los casos se requiere un trabajo iterativo.
- Un error común es no verificar la relación ancho-espesor, el criterio de sección compacta depende del grado del acero. Esta situación puede omitir la revisión de los patines no compactos cuando la viga se encuentra en zona 1 y, como se expuso, en estos casos se debe de reducir la meseta.
- El factor C_b resulta benéfico para el diseño; sin embargo, su uso debe medirse. A veces, hay un mal manejo de dicho factor y se rebasa por error M_p . Para evitar la posibilidad de dicho error, por falta de tiempo o conocimiento, el ingeniero estructural utiliza conservadoramente $C_b = 1$, situación que conlleva a diseños más costosos.
- La metodología es muy matemática, no genera una reflexión al ingeniero estructural sobre la zona en la que se encuentra. En ocasiones, se llega a un número correcto; sin embargo, no se entiende con claridad de dónde vino.
- Una mala práctica es despejar Z_x y buscar una sección con un Z_x mayor, concluyendo el diseño. Se debe determinar $\Phi_b M_n$ considerando el Z_x del perfil seleccionado, recalculando M_u con el peso propio y verificar que el “ratio” siga siendo menor o igual a 1. Este procedimiento, si bien cumple con el criterio básico del diseño estructural, no siempre proporciona el perfil más ligero. En la mayoría de los casos, el criterio que impera es cumplir con un ratio. La práctica ideal es proporcionar la sección más ligera con suficiente resistencia.

Ayudas de diseño del Manual AISC.

- La Especificación es gratuita, no así el Manual, donde se encuentran las ayudas. Su costo es elevado, lo cual lo hace inaccesible para estudiantes y para algunos profesionistas. Esto, quizá, es la razón principal por la que la mayoría desconoce la existencia de dichas ayudas, y en caso de conocerlas, no sabe cómo usarlas.
- Si bien el Manual indica cuáles son los perfiles con patín no compacto, se recomienda verificar el grado de acero con el que se está trabajando, ya que dicha indicación es válida sólo para acero $F_y = 50$ ksi.
- La Tabla 3-2 sólo es válida para $F_y = 50$ ksi, no cuenta con todos los perfiles del catálogo, es aplicable para zonas 1 y 2, y la ayuda que proporciona para elegir a la sección más ligera únicamente aplica para la zona 1.
- Los valores de la Tabla 3-10 sólo están graficados para $F_y = 50$ ksi y $C_b = 1.0$. Esta situación obliga a utilizar artificios (momento efectivo) para casos en los que C_b es diferente de 1. El empleo de dicho momento efectivo no es claro y se presta a confusión y errores.
- Después de usar la Tabla 3-10 con ayuda del momento efectivo es necesario revisar que $C_b M_n$ no supere a M_p , para ello es válido utilizar la Tabla 3-2 implicando un ir y venir entre ambas tablas. Una alternativa es seguir el trazo de la gráfica buscando su meseta en la Tabla 3-10, lo cual es tedioso. A veces su empleo lleva a un proceso iterativo. Las lecturas son susceptibles a poca aproximación, esto debido a la precisión de la escala.
- Se observó que hay gráficas incompletas en la Tabla 3-10 (W14x48). Se concluye que no siempre dicha tabla proporciona el perfil más ligero.

Software comercial

- Su empleo puede resultar en diseños por tanteos centrados en el “ratio” y desconociendo en qué zona se encuentra la viga, lo cual no siempre refleja el perfil más económico.

- Se requiere una licencia con alto costo, además de conocimientos sobre el comportamiento estructural. Un estudiante en proceso de aprendizaje puede cometer graves errores debido a la poca transparencia de los resultados.

Zteel Beams

- Es un software gratuito disponible para la comunidad universitaria, es didáctico, la gráfica da un buen panorama al estudiante en proceso de aprendizaje, además reduce el tiempo que destina el docente al capítulo de flexión, esto da oportunidad de abordar otros temas importantes.
- Gracias a la salida gráfica de resultados, el uso recurrente de Zteel Beams, sensibiliza sobre las zonas dónde se encuentra la viga y sobre su comportamiento estructural.
- Incluye el efecto de C_b , escala los valores de la gráfica y limita el valor de su meseta, evitando los errores comunes que se comenten al utilizar este factor.
- Zteel Beams cuenta con múltiples herramientas: verifica los límites ancho-espesor, trabaja con todos los grados de acero disponibles en la Especificación AISC para secciones W (I), cuenta con una escala de colores para una fácil interpretación del “ratio”, los resultados son exactos, diseña con los métodos Load Resistance and Factor Design (LRFD) y Allowable Strength Design (ASD), determina resistencias nominales para fines de investigación. Es un software práctico e intuitivo con una interfaz amigable. Cuenta con un display interactivo, en el cual el usuario puede navegar y fácilmente seleccionar una sección, esto gracias a sus funciones de zoom e identificación de perfiles.
- Destaca el tabulador de resultados, herramienta que permite ordenar la información, encontrando la sección más ligera. Se observó que, incluso, haciendo uso de las ayudas del Manual, es complicado y tardado elegir el perfil más ligero para las zonas 2 y 3.

Se concluye que Zteel Beams es una alternativa eficaz para el diseño de vigas por flexión. En el caso de estudiantes, facilita el aprendizaje y permite comprender

plenamente el comportamiento estructural de las vigas. Para el docente es una gran herramienta didáctica gracias a la transparencia en la salida de datos; su interfaz gráfica facilita la enseñanza. Finalmente, en el caso del ingeniero estructural, sensibiliza en el diseño, da una excelente percepción sobre el comportamiento de las vigas y permite encontrar rápidamente, no sólo, a la sección mas eficiente, sino también a la sección más económica con capacidad suficiente para resistir carga, dando como resultado una buena toma de decisiones.

CAPÍTULO 7. RECOMENDACIONES

Después del presente estudio de vigas y del desarrollo de Zteel Beams, se presentan las siguientes recomendaciones:

- Los ejemplos presentados de ninguna manera deben tomarse como modelos rígidos de cálculo, debiéndose considerar más bien como guías para el estudio.
- Zteel Beams diseña con los todos grados de acero disponibles para secciones W (I) de acuerdo con la Especificación AISC 360-16. Es importante recordar que existen restricciones en el empleo de aceros de alta resistencia. El programa identifica esta situación y alerta, pero no impide el diseño. Se recomienda revisar la especificación y conocer dichos aceros.
- La práctica común del ingeniero estructural es centrar su atención en la resistencia, es decir, busca que el “ratio” sea menor o igual a 1, sin embargo, la práctica ideal es elegir la sección más ligera con suficiente resistencia. Se debe de tener presente que no necesariamente una sección que trabaja con un “ratio” de 0.98 es más ligera que una sección que lo hace con 0.75.
- El presente trabajo se enfocó en el diseño por flexión de vigas alrededor del eje principal. Se recuerda al lector de la existencia del cortante y de la flexión alrededor del eje de menor inercia.
- Los estados límites de servicio no se encuentran dentro de los alcances de Zteel Beams. El usuario no puede dar por concluido el diseño una vez elegida una sección con suficiente resistencia, debe de verificar que la deflexión esté dentro del límite permitido.

BIBLIOGRAFÍA

Literaria

- American Institute of Steel Construction. (2017). *Steel Construction Manual* (15 ed.). Chicago: American Institute of Steel Construction.
- American Society of Civil Engineers. (2010). *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. United States of America.
- Arnold, C., & Reitherman, R. (1987). *Configuración y Diseño Sísmico de Edificios* (Primera ed.). México: Limusa.
- Bowles E., J. (1993). *Diseño de Acero Estructural* (Cuarta ed.). México: Limusa.
- Gobierno de la Ciudad de México. (15 de Diciembre de 2017). Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Acero. *Gaceta Oficial de la Ciudad de México*, págs. 107-372.
- Instituto Chileno del Acero S.A. (2000). *Manual de Diseño para Estructuras de Acero. Método de Factores de Carga y Resistencia* (Vol. I). Chile: ARZE, RECINE y ASOCIADOS.
- Instituto Mexicano de la Construcción en Acero. (2014). *Manual de Construcción en Acero* (5 ed.). México: Limusa S.A. de C.V.
- López, O. d. (s.f.). *Estructuras de Acero. Comportamiento y Diseño*. México : Limusa.
- MacCormac, J. C. (2002). *Diseño de Estructuras de Acero. Método LRFD* (Segunda ed.). México: Alfaomega.
- McCormac, J. C., & Csernak, S. F. (2012). *Diseño de Estructuras de Acero* (5° ed.). Ciudad de México: Alfaomega.
- Meli, R. (1985). *Diseño Estructural* (Primera ed.). México: Limusa.
- Morrison, M. L., Schweizer, D. Q., & Hassan, T. (2016). Seismic Enhancement of Welded Unreinforced Flange-Bolted Web Steel Moment Connections. *Journal of Structural Engineering*, 142(11), 016102-1-016102-14.
- Rodríguez Peña, D. (2011). *Diseño Práctico de Estructuras de Acero*. Ciudad de México: Trillas.
- Rosenblueth, E. (1982). *Diseño de estructuras resistentes a sismos* (Primera ed.). México: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto.
- Salmon, C. G., Johnson, J. E., & Malhas, F. A. (2009). *Steel Structures Design and Behavior* (5° ed.). Upper Saddle River, Nueva Jersey, Estado Unidos de América: Pearson - Prentice Hall.

Segui, W. T. (2007). *Steel Design* (Fourth ed.). United States: THOMSON.

Vinnakota, S. (2006). *Estructuras de acero: comportamiento y LRFD*. Ciudad de México: McGraw Hill.

Digital

Consejo de Acreditación de la Enseñanza de la Ingeniería A.C. (s.f.). *Consejo de Acreditación de la Enseñanza de la Ingeniería A.C.* Recuperado el 18 de Julio de 2017, de <http://cacei.org.mx/>

Gobierno del Distrito Federal . (2004). *Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras Metálicas del Reglamento de Construcción del Distrito Federal*. Recuperado el 19 de Julio de 2017, de <http://cgservicios.df.gob.mx/prontuario/vigente/746.htm>

ANEXOS

1. Lista de cuadros

Tabla 1. Comparativa de resultados entre Tabla 3-2 y Tabla 3-10.

Tabla 2. Comparativa de resultados

2. Lista de figuras

Figura 2.1. Diagrama de esfuerzo de una viga de sección rectangular.

Figura 2.2. Formación de articulación plástica en una viga simplemente apoyada.

Figura 2.3. Mecanismo de colapso.

Figura 2.4. Momento plástico M_p .

Figura 2.5-a. Tabla B4.1b de la Especificación del AISC con la relación ancho-espesor: Miembros de elementos (no atiesados) comprimidos sujetos a flexión.

Figura 2.5-b. Tabla B4.1b de la Especificación del AISC con la relación ancho-espesor: Miembros de elementos (atiesados) comprimidos sujetos a flexión.

Figura 2.6. Curva típica con los momentos resistentes nominales o momentos de pandeo de una viga en función de la longitud no soportada lateralmente de su patín de compresión.

Figura 3.1. Vigas con curvatura sencilla y doble.

Figura 3.2. Efecto de C_b en la capacidad de momento.

Figura 3.3. Tabla 3-1 del Manual del AISC con valores de C_b para vigas simplemente apoyadas.

Figura 4.1. Sistema de entrepiso.

Figura 4.2. Gráfica típica de secciones I con patines no compactos y almas compactas.

Figura 4.3. Viga simplemente apoyada con carga uniformemente distribuida.

Figura 4.4. Viga simplemente apoyada con soporte lateral en su patín de compresión en sus extremos y en el centro del claro.

Figura 4.5. Diagrama de momentos de la viga del Ejemplo 4 (inciso 4.1.4).

Figura 4.6. Viga simplemente apoyada con soporte lateral en su patín de compresión sólo en sus extremos.

Figura 4.7. Diagrama de momentos de la viga del Ejemplo 5 (inciso 4.1.5).

Figura 4.8. Tramo intermedio de una viga continua con soporte lateral en el patín de compresión en los apoyos.

Figura 4.9. Diagrama de momentos del tramo intermedio de la viga continua.

Figura 4.10. Precio del Manual AISC edición 15.

Figura 4.11. Tabla 3-2 "W-Shapes Selection by Z_x ".

Figura 4.12. Tabla 3-10 "W-Shapes Available Moment vs Unbraced Length".

Figura 4.13. Consulta de la Tabla 3-2 para la viga del Ejemplo 1.

Figura 4.14. Consulta de la Tabla 3-2 para la viga del Ejemplo 2.

Figura 4.15. Consulta de la Tabla 3-10 para la viga del Ejemplo 3.

Figura 4.16. Consulta de la Tabla 3-2 para la viga del Ejemplo 3.

Figura 4.17. Consulta de la Tabla 3-2 para la viga del Ejemplo 4.

Figura 4.18. Consulta de la Tabla 3-10 para la viga del Ejemplo 5.

Figura 4.19. Primera consulta Tabla 3-10.

Figura 4.20. Primera consulta Tabla 3-2.

Figura 4.21. Segunda consulta Tabla 3-10.

Figura 4.22. Segunda consulta Tabla 3-2.

Figura 4.23. Tercera consulta Tabla 3-10.

Figura 4.24. Tercera consulta Tabla 3-2.

Figura 4.25. Cuarta consulta Tabla 3-10.

Figura 4.26. Cuarta consulta Tabla 3-2.

Figura 4.27. Análisis estructural de W12x14.

Figura 4.28. Diseño estructural de W12x14.

Figura 4.29. Análisis estructural de W12x58.

Figura 4.30. Diseño estructural de W12x58.

Figura 5.1. Ventana de presentación.

Figura 5.2. Clic en la ventana de presentación.

Figura 5.3. Ventana principal de Zsteel Beams.

Figura 5.4. Control Visualización.

Figura 5.5. Elección de perfil en control Gráfica en estudio.

Figura 5.6. Control Múltiples gráficas.

Figura 5.7. Elección del método de diseño (Control Resistencia).

Figura 5.8. Elección del tipo de acero (control Acero).

Figura 5.9. Ventana emergente cuando se utiliza un acero con restricción.

Figura 5.10. Momento actuante.

Figura 5.11. Efecto de C_b .

Figura 5.12. Display graficador.

Figura 5.13. Marca con el momento último.

Figura 5.14. Reducción de L_b .

Figura 5.15. Marcas de momento último (negra) y momento de diseño (amarilla).

Figura 5.16. Display sin zoom.

Figura 5.17. Display con zoom.

Figura 5.18. Identificador de perfiles.

Figura 5.19. Tabulador de resultados.

Figura 5.20. Meseta de $M'p$.

Figura 5.21. Función de orden del tabulador de resultados.

Figura 5.22. Vista preliminar para impresión.

Figura 5.23. Convertidor de unidades.

Figura 5.24. Ingreso de datos para diseño LRFD de la viga del Ejemplo 1.

Figura 5.25. Ingreso de datos para diseño ASD de la viga del Ejemplo 1

Figura 5.26. Gráfica $\Phi_b M_n - L_b$ de W12x22 (LRFD).

Figura 5.27. Momento de diseño y "ratio" de W12x22.

Figura 5.28. Gráfica $M_n / \Omega_b - L_b$ de W12x22 (ASD).

Figura 5.29. Momento permisible y "ratio" de W12x22.

Figura 5.30. Ingreso de datos para diseño LRFD de la viga del Ejemplo 2.

Figura 5.31. Gráfica $\Phi_b M_n - L_b$ de W12x65 (LRFD).

Figura 5.32. Lectura de M_u de la gráfica para W12x65 (LRFD).

Figura 5.33. Gráfica $M_n / \Omega_b - L_b$ de W12x65 (ASD).

Figura 5.34. Momento permisible de W12x65.

Figura 5.35. Ingreso de datos para diseño LRFD de la viga del Ejemplo 3.

Figura 5.36. Consulta del tabulador de resultados (LRFD).

Figura 5.37. Gráficas $M_n / \Omega_b - L_b$ de todas las secciones del Manual (ASD).

Figura 5.38. Zoom en el display.

Figura 5.39. Consulta del tabulador de resultados (ASD).

Figura 5.40. Consulta del tabulador de resultados (LRFD).

Figura 5.41. Consulta del tabulador de resultados (ASD).

Figura 5.42. Ingreso de datos para diseño LRFD de la viga del Ejemplo 4.

Figura 5.43. Gráfica $\Phi_b M_n - L_b$ de W21x93 (LRFD) con $L_b = 12$ ft.

Figura 5.44. Momento de diseño y "ratio" de la sección del Ejemplo 4.

Figura 5.45. Gráfica $M_n / \Omega_b - L_b$ de W21x93 (ASD) con $L_b = 12$ ft.

Figura 5.46. Momento permisible y "ratio" de la sección del Ejemplo 4.

Figura 5.47. Gráfica $\Phi_b M_n - L_b$ de W21x93 (LRFD) con $L_b = 24$ ft.

Figura 5.48. Gráfica $M_n / \Omega_b - L_b$ de W21x93 (ASD) con $L_b = 24$ ft.

Figura 5.49. Ingreso de datos para diseño LRFD del tramo de viga continua del Ejemplo 6.

Figura 5.50. Gráficas $\Phi_b M_n - L_b$ de todas las secciones del Manual (LRFD).

Figura 5.51. Consulta en el tabulador de resultados (LRFD).

Figura 5.52. Gráfica incompleta de la sección W14x48.

Figura 5.53. Modelo de un edificio real.