



---

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

“MANUAL DE DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE ALUMINIO “

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERO CIVIL**

P R E S E N T A:

**CARLOS AMADOR MARMOLEJO CASTRO**

TUTOR:

**DR. A. GUSTAVO AYALA MILIÁN**

México D.F., mayo 2014





DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA  
COMITÉ DE TITULACIÓN  
FING/DICyG/SEAC/UTIT/44/2014

UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

Señor  
**CARLOS AMADOR MAMOLEJO CASTRO**  
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor DR. AMADO GUSTAVO AYALA MILIAN que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted conforme a la opción I. "Titulación mediante tesis o tesina y examen profesional", para obtener su título en INGENIERÍA CIVIL

"MANUAL DE DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE ALUMINIO "

**INTRODUCCIÓN**

- I. PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ALUMINIO
- II. ESFUERZOS EN LOS COMPONENTES ESTRUCTURALES
- III. CONEXIONES
- IV. EJEMPLOS DE APLICACIÓN
- V. CONCLUSIONES
- BIBLIOGRAFÍA
- APÉNDICES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU"  
Cd. Universitaria a 6 de Mayo de 2014  
**EL PRESIDENTE DEL COMITÉ**

M. EN JOSÉ LUIS TRIGOS SUÁREZ

JLTS/MFH

---

**A mi madre Alicia Castro por nunca perder la esperanza de poder terminar mi carrera, a mi padre Amador Marmolejo, por sus desvelos a la hora de estudiar conmigo e inculcarme el interés de estudiar una carrera de ingeniería, a mi hermana Sandra quien ha sido el sustento en estos últimos pasos de mi carrera, y a mi hermano Ricardo por los consejos de los cuales también he aprendido.**

---

## **Agradecimientos:**

Antes que nada quiero agradecer a dios por permitirme terminar esta etapa de mi vida.

Quiero agradecer a mi tía Avelina, a mi prima Gaby y a mi primo Rodrigo por el apoyo que me han dado a lo largo de toda mi carrera. Especialmente quiero agradecer a mi tío Guillermo quien me ha dado los consejos y facilidades para poder desarrollarme en mi carrera.

Agradezco a mi tía Leonila, a mi tío Jesús y a mi prima Valeria el apoyo mandado desde tan lejos y el estar siempre pendientes de mi bien estar.

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería por todos los conocimientos proporcionados para poder servir a la sociedad.

A mi tutor el Dr. Gustavo Ayala Milián quiero agradecerle la paciencia y todas las atenciones que tuvo conmigo.

A mis compañeros Marco, Herlindo, Saúl, José Barradas, Hugo, Mauro, José de Jesús y Otoniel, del área de mecánica aplicada que me brindaron asesoría en todo momento durante el desarrollo de este trabajo.

A mis amigos de generación Rocío, Esmeralda Nayhelli, Rubén, Alejandro, José Luis Daniel, Vladimir, Manuel, y Fernando con quienes compartí algunos de los mejores momentos que tuve durante mi paso por la facultad.

También quiero agradecer al Ing. Jesús Díaz y al Ing. González por el apoyo que me dieron durante una etapa difícil en mi vida.

---

# Contenido

---

<b>Resumen .....</b>	<b>1</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>1</b>
<b>1.0 Introducción .....</b>	<b>2</b>
1.1 Justificación .....	2
1.2 Antecedentes .....	3
1.3 Objetivos .....	5
1.4 Alcances .....	5
<b>2.0 Propiedades mecánicas del aluminio .....</b>	<b>6</b>
2.1 Introducción .....	6
2.2 Aleaciones del aluminio .....	6
2.3 Temples .....	10
2.4 Esfuerzos .....	14
2.5 Propiedades mecánicas del aluminio .....	16
2.6 Propiedades de fractura.....	17
2.7 El efecto de la soldadura en las propiedades mecánicas .....	18
2.8 El efecto de la temperatura en las propiedades del aluminio .....	18
2.9 Propiedades físicas .....	20
<b>3.0 Esfuerzos en los componentes estructurales.....</b>	<b>21</b>
3.1 Introducción .....	21
3.2 Elementos a tensión .....	22
3.2.1 Resistencia a tensión .....	22
3.2.2 Área neta.....	26
3.2.3 Área neta efectiva.....	26
3.2.4 Relación de esbeltez máxima en elementos a tensión.....	27

---

3.3 Elementos a compresión .....	28
3.3.1 Pandeo global (Columnas) .....	29
3.3.2 Pandeo local (Componentes de columnas) .....	38
3.4 Elementos a flexión .....	48
3.4.1 Fluencia y fractura por flexión .....	48
3.4.2 Pandeo por flexión .....	55
3.4.3 Cortante por flexión .....	70
3.5 Esfuerzos combinados .....	73
3.5.1 Flexión y compresión axial combinados .....	74
3.5.2 Flexión y tensión combinados .....	75
3.5.3 Compresión, flexión y cortante combinados .....	76
<b>4.0 Conexiones.....</b>	<b>77</b>
4.1 Introducción .....	77
4.2 Conexiones mecánicas .....	77
4.2.1 Tipos de sujetadores .....	79
4.2.2 Tipos de conexiones atornilladas .....	83
4.2.3 Agujeros .....	84
4.2.4 Modos de falla en conexiones mecánicas.....	85
4.2.5 Cargas de tensión en tornillos.....	87
4.2.6 Cargas de cortante en tornillos.....	87
4.2.7 Tensión y cortante combinados en tornillos .....	88
4.2.8 Resistencia al aplastamiento y distancia al borde .....	88
4.2.9 Ruptura de cortante .....	89
4.2.10 Distancia al borde y espaciamiento mínimo .....	90
4.2.11 Distancia al borde y espaciamiento máximo .....	91
4.2.12 Requisitos mínimos para una conexión .....	92
4.3 Conexiones soldadas.....	92
4.3.1 Procesos de soldadura en aluminio .....	92
4.3.2 Tipos de soldadura .....	94
4.3.3 Factores de resistencia para soldaduras de filete en aluminio y acero .....	97
4.3.4 Aseguramiento de calidad en soldaduras .....	97
<b>5.0 Ejemplos de aplicación.....</b>	<b>99</b>
Ejemplo I (área neta) .....	99

---

---

Ejemplo II (compresión) .....	101
Ejemplo III (flexión).....	104
Ejemplo IV .....	109
Ejemplo V .....	119
<b>Conclusiones.....</b>	<b>124</b>
<b>Referencias .....</b>	<b>126</b>
<b>Apéndice A .....</b>	<b>128</b>
<b>Apéndice B .....</b>	<b>131</b>
<b>Apéndice C .....</b>	<b>132</b>
<b>Apéndice D .....</b>	<b>135</b>
<b>Apéndice E .....</b>	<b>140</b>
<b>Apéndice F.....</b>	<b>145</b>
<b>Apéndice G .....</b>	<b>150</b>

---

# Resumen

---

En este documento se presentan los antecedentes que existen acerca del diseño con aluminio en el mundo, las características que tienen las diferentes aleaciones de aluminio que existen en el manual de diseño de aluminio (MDA), así como sus propiedades mecánicas. Además se exponen los temas de tensión, compresión, flexión y cortante, y el comportamiento del aluminio bajo estas condiciones. Se hacen algunas comparaciones de los requerimientos de diseño a tensión, compresión, flexión y cortante que existen en el MDA, con respecto a los requerimientos que existen en el manual de diseño de acero AISC y en el eurocódigo 09 para éstas mismas condiciones. Además se presentan algunos ejemplos de diseño bajo las condiciones antes mencionadas, y se explican brevemente los tipos de conexiones que pueden realizarse en aluminio, como son las conexiones por fricción, las conexiones por aplastamiento, y las conexiones soldadas, así como algunos fenómenos que pueden presentarse en este tipo de conexiones.

---

# Abstract

---

This paper presents the background that exist about the aluminum design in the world, the properties that are different aluminum alloys existing in the aluminum design manual (MDA), and it's mechanical properties. The topics of tension, compression, bending and shear, and aluminum behavior under these conditions are presented. Some comparisons are made of the design requirements for tension, compression, bending and shear that exist in the MDA with respect to the requirements that exist in the design manual AISC and Eurocode 09 for the same conditions. Further examples of design under the above conditions are presented, and briefly describe the types of connections that can be made of aluminum, as the friction connections, bearing connections and welded connections, as well as some phenomena that can occur in these types of connections.

# CAPÍTULO 1

---

## Introducción

---

### 1.1 Justificación

En la literatura existen diversos documentos de investigación respecto al diseño estructural, comportamiento sísmico, comportamiento de materiales, métodos de construcción o análisis no lineal de materiales como el concreto o el acero. Esto con el fin de optimizar el uso de las propiedades mecánicas de estos materiales y con ello el desempeño estructural. De entre las propiedades que se pueden mencionar se encuentran la resistencia a tensión o compresión, el modulo de elasticidad o módulo de cortante, los cuales pueden variar dependiendo del tipo de material del que se esté tratando, por ejemplo, el concreto es un material utilizado por su resistencia a compresión, sin embargo se reconoce su casi nula resistencia a tensión, por lo tanto es un material poco adecuado para soportar esfuerzos de flexión, por otro lado, el acero es un material cuyas propiedades lo hacen un material resistente a tensión. Esto nos da una idea del estudio que existe sobre estos dos materiales, sin embargo hay otros materiales que se están empezando a estudiar con el fin de encontrar mejores alternativas para el diseño de estructuras, este es el caso del aluminio, un material cuyas propiedades mecánicas, aplicaciones y métodos de diseño no son tan conocidos.

Aunque se podría pensar que el aluminio es un material con propiedades mecánicas muy bajas como para tener un desempeño estructural adecuado, existen algunas aleaciones de aluminio, cuya resistencia a la fluencia podría ser comparada con la aleación del acero A-36 y su peso puede ser de alrededor de la tercera parte de la de éste. Si bien las propiedades mecánicas son importantes desde el punto de vista del desempeño estructural, éstas no son las únicas a las que se debe prestar atención. Por ejemplo, el acero es un material que tiene una resistencia a la fluencia y un módulo de elasticidad alto, sin embargo es un material cuya resistencia a la corrosión no es muy buena debido a que es un material que por su contenido de hierro tiende a oxidarse al contacto con el medio ambiente, en cambio, el aluminio es un material cuya resistencia a la corrosión es mayor debido a que es un material

que en contacto con el ambiente desarrolla una capa instantánea de óxido, la cual es hermética y no permite que este material continúe con su oxidación. El acero tiene que ser protegido con una capa adicional de pintura u otro tipo de recubrimiento para dar el acabado final a la estructura, el aluminio no necesita de esto, y por lo tanto, necesita menos mantenimiento. Otra característica del aluminio es que es un material reciclabl, es decir, que cuando termina la vida útil de una estructura, cada componente puede ser retirado y transformado en otra pieza para su posterior uso en otra posible aplicación, por lo que lo hace un material sustentable.

En el presente trabajo se expondrán las características de algunas aleaciones, y algunas disposiciones para poder desarrollar un adecuado diseño estructural con este material, así como algunas recomendaciones que se pueden encontrar en el Eurocódigo 09 (CEN 2004) o en el Aluminium Design Manual (The aluminum association 2005).

## 1.2 Antecedentes

El aluminio es un material muy abundante en el planeta, sin embargo no fue hasta 1930 que empezó a utilizarse de manera estructural en Estados Unidos. Aunque cada fabricante desarrolló sus especificaciones de diseño y construcción de aluminio, no fue hasta 1933 que se desarrolló el primer documento de especificaciones de diseño para estructuras de aluminio y fue usado en el diseño de vigas de aluminio para el puente de la calle *Smithfield en Pittsburgh*. En 1967 la Asociación de Aluminio publicó las Especificaciones para Estructuras de Aluminio, una publicación que se basó en un trabajo previo de la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE). Posteriormente, esta publicación se convirtió en parte de un manual de construcción de cinco volúmenes que reemplazó todas las especificaciones previas hechas por la ASCE, resultando en las Especificaciones de Aluminio.

Este manual fue revisado en 1971, 1976, 1982, 1986 y 1994, esta última revisión con un cambio muy importante, integrando la mayoría del material de la serie del manual de construcción de aluminio en el Manual de Diseño de Aluminio, y por primera vez se incluyó la Especificación de Diseño por Factor de Carga y Resistencia (LRFD). Cabe comentar que esta especificación solo aplica para estructuras de edificios, si se requieren especificaciones para estructuras de puentes se tiene que acudir las especificaciones LRFD de la AASHTO. En el 2000 se hizo otra revisión de esta especificación, y se cambio el nombre de Especificaciones de Aluminio a Especificación de Aluminio, un cambio del plural al singular. La última revisión de estas especificaciones se realizó en el año 2010.

En Europa, se agregó en el año 2007 el EN 1999 Eurocódigo-09 Diseño de estructuras de aluminio como parte de una serie de 10 publicaciones de la Unión Europea para estandarizar las normas para el diseño de edificios, obras de ingeniería civil y productos de construcción. Cada publicación en el Eurocódigo, se compone de diferentes partes, en el caso del EN 1999 Eurocodigo -09 se compone de cinco partes:

- Parte 1-1 Reglas estructurales generales
- Parte 1-2 Diseño estructural por fuego
- Parte 1-3 Estructuras susceptibles a fatiga
- Parte 1-4 Lamina estructural formada en frío
- Parte 1-5 Estructuras cascarón

En México se cuenta con el Instituto Mexicano del Aluminio (IMEDAL) el cual cuenta con diversas normas para la fundición, propiedades mecánicas, extrusiones, láminas, tuberías y construcción, Las publicaciones correspondientes a las propiedades mecánicas son las siguientes:

- NOM-W-14-1979. Aluminio y sus Aleaciones - Determinación de la Dureza Brinell.
- NOM-W-47-1980. Aluminio y sus Aleaciones - Propiedades Mecánicas Determinación de la Resistencia a la Tracción.
- NOM-W-57-1977. Sistema de Clasificación y designación de los Temples y Tratamientos Térmicos para el Aluminio y sus Aleaciones.
- NOM-W-60-1978. Límite de las Propiedades Mecánica y Tolerancias en las Dimensiones, Rendimiento y Uniones del Papel Aluminio Puro y Convertido.
- NOM-W-61-1978. Especificaciones para las Propiedades Mecánicas de los Productos Laminados de Aluminio y sus Aleaciones.
- NOM-W-102-1982. Aluminio y sus Aleaciones - Tratamiento Mecánico Selección de Especímenes y piezas de Prueba.

Respecto a las normas de construcción existen:

- NOM-C-254-1986. Construcción - Aluminio y sus Aleaciones - Ventanas Corredizas, Denominadas Prefabricadas de Interés Social - Especificaciones.
- NOM-C-343-1988. Construcción - Ventanas de Aluminio - Clasificación.

El aluminio en México se utiliza en su mayor parte, desde el punto de vista no estructural, para cancelería de ventanas y puertas, sin embargo, cada vez es más común que este material se use en aplicaciones estructurales como pueden ser en las techumbres de naves

industriales, puentes, casas, etc. Por lo tanto, esto lleva a la necesidad de tener un manual de diseño de aluminio.

### **1.3 Objetivos**

Proporcionar los antecedentes necesarios al diseñador y analista, para poder desarrollar un adecuado diseño de estructuras de aluminio.

### **1.4 Alcances**

Este trabajo está dirigido a profesionales de la ingeniería que tengan conocimientos básicos de mecánica de materiales homogéneos, diseño de estructuras de acero, y además, se espera que el lector tenga un conocimiento previo sobre el análisis de este tipo de estructuras ya que no será tratado en este trabajo. De igual forma se describirán brevemente las propiedades mecánicas del aluminio. Para fines de diseño, se presentarán y explicarán los pasos necesarios para realizar un adecuado diseño de elementos estructurales de aluminio, sujetos a carga axial tanto en compresión y tensión, flexión, cortante, y sus combinaciones.

# CAPÍTULO 2

## Propiedades mecánicas del Aluminio

### 2.1 Introducción

Las propiedades mecánicas de los materiales son importantes, ya que de ellas depende el adecuado desempeño estructural, sin embargo, estas propiedades dependen a su vez de los componentes que contenga el material. En los metales estructurales se encuentran diversos conjuntos de aleaciones como el acero o el aluminio, que se ajustan a las necesidades del diseñador para determinado propósito en la estructura mediante la variación de los elementos químicos y las proporciones dentro de éstos, además de la resistencia obtenida por los elementos químicos en la aleación. Por ejemplo, si al hierro se le agrega una cantidad determinada de carbono junto con otros elementos químicos, la aleación que se obtendrá, será el acero A-36 cuyo esfuerzo de fluencia de  $2530 \text{ kg/cm}^2$ , por otro lado, el aluminio junto con otros elementos químicos puede formar la aleación 6061-T6, cuya resistencia de fluencia es de  $2446 \text{ kg/cm}^2$ , muy parecida a la del acero.

En este capítulo se hablará de las propiedades mecánicas que tienen algunas aleaciones de aluminio, de los factores que pueden afectar estas propiedades, la clasificación de las aleaciones de aluminio, y sus aplicaciones.

### 2.2 Aleaciones de Aluminio

Las aleaciones de aluminio están divididas en dos; las aleaciones forjadas las cuales son moldeadas por medio de golpes dentro de una cavidad o extruidas a través de un molde, y las aleaciones fundidas, las cuales son vaciadas en moldes para obtener su forma. Las aleaciones forjadas tienen propiedades más uniformes y mejor ductilidad a diferencia de las fundidas que tienen una mayor variación en sus propiedades y son menos dúctiles. Cabe mencionar que las ecuaciones tratadas en este documento para determinar las resistencias de elementos de aluminio solo sirven para aleaciones forjadas.

El sistema de clasificación de la Asociación de Aluminio utiliza un número de cuatro dígitos, ésta clasificación es reconocida en México. Para las aleaciones forjadas, el primer dígito indica el elemento primario de la aleación el cual genera un grupo de aleaciones de propiedades similares llamadas series. Los dos últimos dígitos son asignados en forma secuencial. El segundo dígito denota una variación en la aleación original. Por ejemplo, la aleación 3105 es una variación de la aleación 3005. A continuación se proporcionan la clasificación primaria de algunas aleaciones y algunas de sus propiedades:

**Serie 1XXX:** Las aleaciones de esta serie contienen al menos un 99% de aluminio, es por así decirlo la serie con mayor grado de pureza. Los usos de esta aleación son en los conductores eléctricos y almacenamiento o proceso de productos químicos debido a que tiene propiedades muy buenas de conducción eléctrica y térmica, resistencia a la corrosión, y propiedades mecánicas muy bajas, como el esfuerzo de fluencia que puede ser de solo 90 MPa [917 kg/cm<sup>2</sup>]. En esta serie los dos últimos dígitos de la clasificación son iguales a los dos últimos dígitos después del punto decimal de la cantidad en porcentaje que es aluminio. Por ejemplo la aleación 1060 es una aleación que es 99.60% aluminio.

**Serie 2XXX:** El primer elemento de esta aleación es el cobre, el cual le da una gran resistencia al aluminio pero disminuye considerablemente su resistencia a la corrosión. Originalmente llamada duraluminio pero demostró todo lo contrario. Si se le proporciona un adecuado tratamiento térmico por solución, su resistencia puede ser comparada con la de algunos aceros dulces. Las aleaciones de esta serie son muy difíciles de soldar y son usadas comúnmente en la aeronáutica.

**Serie 3XXX:** El manganeso es el principal elemento de las aleaciones esta serie, el cual no es térmicamente tratable. Algunas de sus aleaciones como la 3003, es ampliamente usada en aplicaciones donde la resistencia es moderada y la maleabilidad es necesaria. Las aleaciones de la serie 3XXX son muy usadas en productos arquitectónicos tales como canales pluviales en techos y paredes.

**Serie 4XXX:** El mayor elemento de aleación en esta serie se encuentra el silicio, el cual si es añadido en cantidades suficientes puede disminuir el punto de fusión sin producir fragilidad en las aleaciones resultantes. Las aleaciones de esta serie son usadas en alambre de soldadura.

**Serie 5XXX:** La serie 5XXX es producida añadiendo magnesio, el cual resulta ser un buen endurecedor incluso mejor que el manganeso. Las aleaciones de esta serie poseen buenas características de soldabilidad, alta resistencia y buena resistencia a la corrosión en atmósferas marinas, por lo que son usadas en cascos de barcos, tanques de almacenamiento y como alambre de soldadura. La resistencia de las aleaciones de esta serie es directamente

proporcional al contenido de magnesio, que llega a ser de hasta el 6%. Sin embargo las aleaciones que contienen un alto contenido de magnesio son susceptibles a la oxidación por exfoliación cuando se exponen altas temperaturas.

**Serie 6XXX:** Las aleaciones de este grupo contienen silicio y magnesio que en proporciones adecuadas generan siliciuro de magnesio, que la hacen térmicamente tratable. La aleación más importante de esta serie es la 6061, es la más versátil de las aleaciones térmicamente tratables, y es menos fuerte que las aleaciones de la serie 2XXX y 7XXX, pero posee una buena soldabilidad, resistencia a la corrosión, con una resistencia media. Las aleaciones de la serie 6XXX son fáciles de extruir por lo que constituyen la mayoría de las extrusiones producidas y son ampliamente utilizadas en edificios y otras aplicaciones estructurales.

**Serie 7XXX:** El elemento primario de esta aleación es el zinc y cuando es acompañado de una pequeña cantidad de magnesio se obtiene una aleación que es térmicamente tratable y de una resistencia muy alta, Por ejemplo la aleación 7178, cuya resistencia es de 580 MPa [5912 kg/cm<sup>2</sup>] en el temple T6. Puede ser combinada con cobre o cromo, aunque las aleaciones de la serie 7XXX tienen poca resistencia a la corrosión. Algunas de las aleaciones como la 7008 y la 7072 son usadas como recubrimiento para proteger catódicamente a las aleaciones que son menos resistentes a la corrosión.

**Serie 8XXX:** Las aleaciones de esta serie contienen elementos principales que no están contenidos en las series 2XXX a la 7XXX. En esta serie se pueden encontrar aleaciones con contenido de acero y nickel que son usados para aumentar la resistencia sin perder conductividad eléctrica, una aleación con estas características es la 8017. La aleación de aluminio-litio 8090, fue desarrollada para fines aeroespaciales.

**Serie 9XXX:** Esta serie actualmente no está en uso.

Las aleaciones de fundición tienen una clasificación diferente a la clasificación de aleaciones forjadas. Aunque las dos clasificaciones contienen cuatro dígitos, las aleaciones de fundición tienen los primeros tres dígitos separados por un punto decimal, así el primer dígito indica el elemento primario de la aleación, los siguientes dos dígitos de la aleación sirven para identificar las diferentes aleaciones dentro del mismo grupo, en el caso del aluminio comercialmente puro indican el grado de pureza. El último dígito denota la forma del producto; 1 o 2 para barras (dependiendo del nivel de impureza) y 0 para piezas de fundición. Para indicar una modificación en la aleación original se antepone una letra mayúscula A, B, C, etc. omitiendo la I, O, Q y X la cual esta reservada para aleaciones experimentales. Las series y sus elementos principales en la aleación son:

**Serie 1XX.X- Aluminio Comercialmente Puro:** Estas aleaciones tienen una baja resistencia, y por lo regular son usadas en rotores de motor fundidos.

**Serie 2XX.X- Cobre:** Estas son las aleaciones de fundición más resistentes y son usadas para la aeronáutica y piezas de maquinas. La aleación 203.0 tiene la resistencia más alta a elevadas temperaturas y es capaz de trabajar a temperaturas de hasta 200°C

**Serie 3XX.X- Silicio con Cobre y/o Magnesio:** Estas aleaciones tienen excelente fluidez y resistencia y son las aleaciones de aluminio fundido más ampliamente usadas. La aleación 356.0 y sus modificaciones son muy populares y son usadas en varias aplicaciones. Las aleaciones de alto contenido de silicio tienen buena resistencia al desgaste y son utilizados para bloques de motores de automóviles y pistones.

**Serie 4XX.X- Silicio:** El silicio proporciona excelente ductilidad al igual que con las aleaciones forjadas, por lo que estas aleaciones son muy adecuadas para la producción de piezas fundidas complicadas. Tienen buena resistencia a la corrosión

**Serie 5XX.X- Magnesio:** Las aleaciones de fundición con magnesio tienen una buena resistencia a la corrosión, especialmente en ambientes marinos, por ejemplo la 514.0; es buena para cuestiones de manufactura y tiene buenas características de acabado. Pero son más difíciles que las aleaciones fundidas de la serie 2XX, 3XX, 4XX.

#### **Serie 6XX.X- Esta serie no es usada**

**Serie 7XX.X- Zinc:** Esta serie es muy difícil de fundir y por lo tanto es usada en donde el acabado y la maquinabilidad son importantes. Estas aleaciones tienen moderadas o mejores resistencias y en general buena resistencia a la corrosión, pero no son adecuadas para elevadas temperaturas.

**Serie 8XX.X- Estaño:** Esta serie está aleada con alrededor de 6% de estaño y principalmente es usada para rodamientos, siendo superior a la mayoría de las aleaciones para este propósito. Estas aleaciones son usadas para varillas de conexión y cojinetes de cigüeñal para motores diesel.

**Serie 9XX.X- Otros:** Esta serie esta reservada para aleaciones cuyo principal elemento es diferente a los de las series 1XX.X a la 8XX.X

### 2.3 Temples

El temple es la alteración de las propiedades mecánicas de un metal por medio de algún tratamiento mecánico o térmico. El tratamiento mecánico, también conocido como endurecimiento por deformación, es el proceso mediante el cual el metal sufre una deformación mecánica a temperatura ambiente para aumentar su resistencia. Dentro del tratamiento térmico existen dos tipos; el tratamiento térmico por solución que consiste en calentar el metal tan rápido como sea posible hasta llegar a una elevada temperatura y después enfriarlo tan rápido como sea posible en una solución que puede ser agua o aire, el tratamiento térmico de precipitación es aquel consiste en elevar de nuevo el metal a cierta temperatura y dejarlo enfriar lentamente. Ambos tratamientos parten del estado llamado recocido el cual tiene como características, poca resistencia y mucha ductilidad. Cuando se aplican cualquiera de los dos métodos de temple, el material se hace más resistente pero menos dúctil.

Dentro de la descripción de las aleaciones, se mencionaron, las aleaciones que eran térmicamente tratables o y las que no. Esto se debe a que las aleaciones que no son térmicamente tratables, son endurecidas por medio de un tratamiento mecánico, y solo en algunos casos, si es necesario algunas aleaciones son térmicamente tratadas, por otro lado, las aleaciones que son térmicamente tratables son endurecidas tanto por medio de un tratamiento térmico, como por medio de un tratamiento mecánico.

El sistema de clasificación de templos utilizado por el MDA utiliza la misma nomenclatura para aleaciones forjadas tanto como para aleaciones de fundición, sin embargo las aleaciones de fundición únicamente son tratadas térmicamente con la excepción de la serie 85X.0 que puede ser endurecida por deformación. Esta clasificación se coloca después de la clasificación de la aleación y esta separada por un guión. La clasificación básica de los templos son letras, y la subdivisión esta indicada mediante números.

La clasificación básica de templos es la siguiente:

**F Como sale de Fábrica.** Aplica a los productos que no tienen un control especial en las condiciones térmicas o es empleado un endurecimiento por deformación. Para productos forjados, no existen límites en las propiedades mecánicas.

**O Recocido.** Aplica para productos forjados que son recocidos, para obtener la menor resistencia de temple, y para productos de fundición que son recocidos para mejorar la ductilidad y estabilidad dimensional. La “O” puede estar seguida de un número diferente de cero.

**H Endurecimiento por deformación.** (Solo productos forjados). Aplica a productos que tienen sus resistencias incrementadas mediante un endurecimiento por deformación, con o sin tratamientos térmicos suplementarios, para producir una reducción en la resistencia. La “H” siempre va seguida por dos o más números.

**W Tratamiento térmico por solución.** Un temple inestable que aplica únicamente para aleaciones que envejecen espontáneamente a temperatura ambiente después del tratamiento térmico por solución. Esta clasificación se especifica únicamente cuando se indica el periodo natural de envejecimiento, por ejemplo, W ½ horas.

**T Térmicamente tratado para producir templos estables diferentes al F, O ó H** Aplica únicamente a productos que están térmicamente tratados, con o sin endurecimiento por deformación, para producir templos estables. La “T” siempre está seguida por uno o más números.

**Subdivisión de los templos de endurecimiento por deformación** Para templos de endurecimiento por deformación, el primer dígito después de la “H” indica:

**H1 Únicamente endurecido por deformación.** Aplica a los productos que están endurecidos por deformación para obtener la resistencia deseada, sin tratamientos térmicos suplementarios. El número siguiente de esta clasificación indica el grado de endurecimiento por deformación, por ejemplo, 1100-H14.

**H2 Endurecido por deformación y parcialmente recocido.** Aplica a los productos que están endurecidos por deformación, mas que la cantidad final deseada y después se reduce la resistencia al nivel deseado por recocidos parciales. Para aleaciones que envejecen lentamente a temperatura ambiente, los templos H2 tienen la misma resistencia mínima a tensión, que los correspondientes a H3. Para otras aleaciones, los templos H2 tienen la misma resistencia última mínima a tensión que los correspondientes a los templos H1, y un alargamiento ligeramente mayor. El número que sigue en esta clasificación, indica el endurecimiento por deformación que queda después de que el producto ha sido parcialmente recocido.

**H3 Endurecido por deformación y estabilizado.** Aplica a los productos que son endurecidos por deformación y cuyas propiedades mecánicas son estables, ya sea por un tratamiento térmico a baja temperatura o como un resultado del calor introducido durante la fabricación.

**H4 Endurecido por deformación barnizado o pintado.** Aplica a los productos que son endurecidos por deformación y que están sujetos a alguna operación térmica durante la

subsecuente operación de barniz o pintura. El número siguiente a esta clasificación indica el grado de endurecimiento por deformación restante después de que el producto ha sido tratado térmicamente como parte de la operación de curado de pintura y barniz.

El segundo dígito después de la clasificación H1, H2, H3, H4 indica el grado de endurecimiento por deformación. Dentro de los grados de endurecimiento por deformación el numero 8 es la mayor resistencia última a tensión y algunas veces es llamado completamente duro. El número 4 es para los templos que se encuentran más o menos a la mitad de los templos O y el HX8 y por lo tanto a veces es llamado medianamente duro. El número 2 es para los templos cuya resistencia última esta aproximadamente a la mitad de los templos O y HX4 y por lo tanto es llamada como un cuarto de resistencia. Así el número 6 es para los templos cuya resistencia última esta aproximadamente a la mitad de los templos HX4 y HX8 y es llamada tres cuartos de dureza.

**Subdivisión de los templos por tratamiento térmico.** Para templos térmicamente tratados los números del 1 al 10 después de la T indican:

**T1 Enfriado desde una temperatura elevada en un proceso de formación y envejecido naturalmente hasta una condición substancialmente estable.** Aplica a los productos que no son trabajados en frío después del enfriamiento desde una elevada temperatura en un proceso de formación, o en los que el efecto del trabajo en frío del aplastamiento o enderezamiento no puede ser reconocido en los límites de las propiedades mecánicas.

**T2 Enfriado desde una elevada temperatura en un proceso de formación, trabajado en frío y envejecido naturalmente hasta una condición substancialmente estable.** Aplica a los productos que son trabajados en frío para mejorar la resistencia después del enfriamiento desde una elevada temperatura en un proceso de formación, o en los que el efecto del trabajo en frío del aplastamiento o enderezamiento es reconocido en los límites de las propiedades mecánicas.

**T3 Tratado térmicamente por solución, trabajado en frío y envejecido naturalmente hasta una condición substancialmente estable.** Aplica a los productos que son trabajados en frío para mejorar la resistencia después de un tratamiento térmico por solución, o en los que el efecto del trabajo en frío del aplastamiento o enderezamiento es reconocido en los límites de las propiedades mecánicas.

**T4 Tratado térmicamente por solución y envejecido naturalmente hasta una condición substancialmente estable.** Aplica a los productos que no son trabajados en frío después de un tratamiento térmico por solución, o en los que el efecto del trabajo en frío del

aplastamiento o enderezamiento no pueden ser reconocidos en los límites de las propiedades mecánicas.

**T5 Enfriado desde una temperatura elevada en un proceso de formación y después envejecido artificialmente.** Aplica a los productos que no son trabajados en frío después del enfriamiento desde una temperatura elevada en un proceso de formación, o en los que el efecto del trabajo en frío del aplastamiento o enderezamiento no puede ser reconocido en los límites de las propiedades mecánicas.

**T6 Tratado térmicamente por solución y después envejecido artificialmente.** Aplica a los productos que no son trabajados en frío después de un tratamiento térmico por solución, o en los que el efecto del trabajo en frío del aplastamiento o enderezamiento no puede ser reconocido en los límites de las propiedades mecánicas.

**T7 Tratado térmicamente por solución e híper-envejecido/estabilizado.** Aplica a los productos forjados que son envejecidos artificialmente después de un tratamiento térmico por solución para llevarlos más allá de un punto de resistencia máxima para proporcionar control de alguna característica importante. Aplica para productos de fundición que son envejecidos artificialmente después de un tratamiento térmico por solución para proporcionar estabilidad dimensional y estabilidad en la resistencia.

**T8 Tratado térmicamente por solución, trabajado en frío y después envejecido artificialmente.** Aplica a los productos que son trabajados en frío para mejorar la resistencia, o en los que el efecto del trabajo en frío del aplastamiento o enderezamiento esta reconocido en los límites de las propiedades mecánicas.

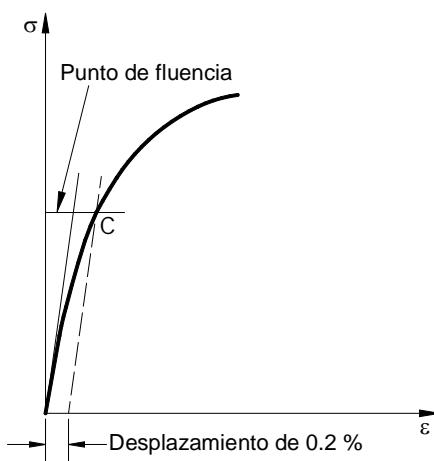
**T9 Tratado térmicamente por solución, envejecido por solución y después trabajado en frío.** Aplica a productos que son trabajados en frío para mejorar la resistencia.

**T10 Enfriado desde una temperatura elevada en un proceso de formación, trabajado en frío, y después envejecido artificialmente.** Aplica a los productos que son trabajados en frío para mejorar la resistencia, o en los que el efecto del trabajo en frío esta reconocido en los límites de las propiedades mecánicas.

Existen algunas variaciones en los templos que se acaban de mencionar sin embargo, estas variaciones se pueden consultar en el manual de diseño de aluminio. Algunas veces al igual que con las aleaciones se pueden encontrar algunas clasificaciones que no corresponden a las que se acaban de presentar, esto se debe a que a veces el productor genera su propia clasificación para nuevas aleaciones de aluminio, sin embargo, la clasificación usada en México es la misma usada en Estados Unidos y en la mayor parte del mundo.

## 2.4 Esfuerzos

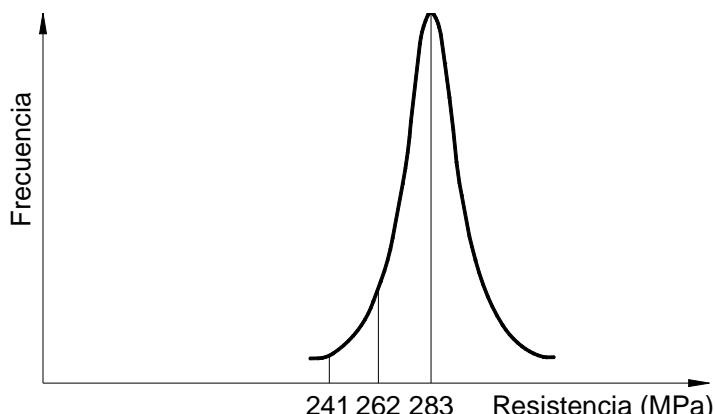
Una de las propiedades mecánicas que define a una aleación de aluminio, es el esfuerzo de fluencia, que a diferencia del acero, éste no está bien definido dentro la curva esfuerzo-deformación del aluminio, debido a que la parte elástica de la curva no es lineal, por lo tanto es necesario utilizar el *método del desplazamiento* (Popov, 1992), o del *0.2% de compensación* (Kissel, 2002); en donde para obtener el esfuerzo de fluencia se traza una línea recta paralela a la porción lineal definida de la curva, para interseccar a la curva real esfuerzo- deformación (Ver figura 2.1).



**Figura 2.1 Método del desplazamiento para determinar el punto de fluencia**

Al realizar pruebas experimentales a diferentes muestras de una misma aleación, se registran diferencias en el esfuerzo de fluencia, debido a las variaciones en la producción, es por eso que es necesario analizar la frecuencia con la que aparecen estos valores de esfuerzo, es decir el número de veces que aparecen estos valores en un conjunto de datos, con el fin de adaptarlos a una distribución estadística para después tomar una media respecto a ésta distribución (Ver figura 2.2). Este valor medio es conocido, en el Manual de Diseño de Aluminio de E.U. (MDA) como valor característico de la aleación (no confundir con el valor característico que se menciona en Eurocódigo-9), sin embargo, este valor no es de mucha utilidad para fines de diseño, debido a que no siempre se podrá obtener el valor promedio, algunas veces se tendrán valores menores o mayores a éste. Para evitar estos errores provocados por las variaciones en la dispersión, es necesario crear un valor mínimo de esfuerzo de la aleación, ya que es preferible subestimar siempre éste valor de esfuerzo (si el valor real es mayor que el valor mínimo) a sobreestimar el valor del esfuerzo, si es que se toma un valor de esfuerzo mayor al que realmente se tiene. Este valor podría ser arbitrario si se observa la figura 2.2, pero la industria del aluminio lo define como; el esfuerzo que será excedido por el 99% de las muestras el 95% de las veces. Una definición diferente a la que se utiliza para el acero. Estos esfuerzos mínimos son referidos tanto al

punto de fluencia como al de ruptura o último. Cabe aclarar que esta definición de valor mínimo de esfuerzo, aplica tanto a valores de esfuerzo de fluencia como de esfuerzo último, por lo tanto, se podrían llamar esfuerzos de fluencia y último mínimos, pero en este trabajo solo se llamarán esfuerzo de fluencia y esfuerzo último. Estos esfuerzos mínimos son los que siempre se utilizarán para fines de diseño.



**Figura 2.2 Distribución de la resistencia del material**

Los esfuerzos de fluencia y último se pueden producir debido a esfuerzos de tensión, compresión o cortante. La nomenclatura usada en el MDA para estos esfuerzos son los siguientes:

- $F_{ty}$  Esfuerzo de fluencia a tensión
- $F_{tu}$  Esfuerzo de fluencia último
- $F_{cy}$  Esfuerzo de fluencia a compresión
- $F_{sy}$  Esfuerzo de fluencia por cortante
- $F_{su}$  Esfuerzo último por cortante

Puesto que el aluminio es un material muy dúctil, la resistencia última a compresión no tiene significado; en una prueba de compresión, el metal se dilata pero no exhibe una falla frágil, por lo tanto el esfuerzo último a compresión no es una propiedad mecánica medida en las aleaciones de aluminio (Kissel, 2002). Por otro lado, los valores de los esfuerzos antes mencionados, se proporcionan para algunas aleaciones en el Apéndice A de este trabajo. Para los casos en los que se cuente únicamente con el esfuerzo de fluencia o el esfuerzo último, las relaciones aproximadas con otros esfuerzos son los siguientes:

$$F_{cy} = 0.9F_{ty} \text{ Para templos endurecidos por deformación (-H)}$$

$$F_{cy} = F_{ty} \text{ Para todos los templos}$$

$$F_{su} = 0.6F_{tu}$$

$$F_{sy} = 0.6F_{ty}$$

Los esfuerzos de fluencia en los materiales cuyo espesor es considerable tienden a ser menores que en los que tienen un espesor delgado, pero si se determinan para un material que originalmente tenía un espesor mayor al espesor terminado, se recomienda utilizar el valor del esfuerzo de fluencia que tenía originalmente el elemento.

## 2.5 Propiedades mecánicas del aluminio

**El módulo de elasticidad**, E (módulo de Young) es una medida de rigidez y resistencia al pandeo, y gráficamente se define como la pendiente de la porción elástica lineal en un diagrama esfuerzo deformación el cual tiene dimensiones de esfuerzo. En el aluminio, el módulo de elasticidad tiende a ser el mismo para cada una de las aleaciones en una serie dada, es decir, el temple no afecta considerablemente esta propiedad. Por ejemplo, para una aleación de la serie 6XXX el módulo de elasticidad será de 69000 MPa [ $0.7 \times 10^6$  kg/cm<sup>2</sup>], pero si se elige una aleación de la serie 5XXX el módulo de elasticidad será de 72000 MPa [ $0.73 \times 10^6$  kg/cm<sup>2</sup>]. Si se compara el módulo de elasticidad de una aleación de la serie 6XXX, o de la serie 5XXX, con el módulo de elasticidad del acero, que es de 200000 MPa, [ $2.1 \times 10^6$  kg/cm<sup>2</sup>] parecerá que el valor es alrededor de la tercera parte de éste. El Eurocódigo-09 solo maneja un valor del módulo de elasticidad que es de 70000 MPa [ $0.71 \times 10^6$  kg/cm<sup>2</sup>]. En el Apéndice A de éste trabajo se anexan los valores del módulo de elasticidad para algunas aleaciones. Dependerá del criterio del diseñador, el utilizar el valor que se da en estas tablas o utilizar el valor del Eurocódigo-09.

**La relación de Poisson** es el negativo de la relación que existe entre la deformación lateral y la deformación axial al aplicar una carga uniaxial en el rango elástico, el signo negativo es para tener en cuenta las contracciones del material en las direcciones transversales a la carga axial. Para aleaciones de aluminio, la relación de Poisson es aproximadamente igual a  $\frac{1}{3}$ , muy similar a la del acero. En el MDA, el valor que utilizan para la relación de Poisson es de 0.33 y el Eurocódigo-09 utiliza 0.3.

**El módulo de cortante** (módulo de rigidez) se obtiene de la relación existente entre el módulo de elasticidad (E) y la relación de Poisson ( $\nu$ ) y tiene las mismas unidades del módulo de elasticidad (E). La ecuación que los relaciona es la siguiente:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

El valor del módulo de cortante solo varía alrededor de 0.2% si se utiliza un valor de la relación de Poisson de 0.3. El Eurocódigo-9 utiliza un valor del módulo de cortante (G) de 27,000 MPa [275,229 kg/cm<sup>2</sup>], sin embargo el MDA no proporciona este valor, debido a que toma en cuenta los diferentes valores del módulo de elasticidad (E) que tiene cada aleación.

## 2.6 Propiedades de fractura

Algunos materiales tienen la propiedad de la ductilidad, la cual es la propiedad de los materiales a resistir la deformación antes de llegar a la ruptura. Los materiales que no son dúctiles se pueden fracturar antes de alcanzar su esfuerzo último mínimo, debido a que no son capaces de deformarse ante concentraciones de esfuerzo locales. Por otro lado la falla frágil se puede presentar en niveles de esfuerzo más altos, y puesto que esto es una falla prematura, es importante tener una medida de la ductilidad en las aleaciones de aluminio.

Existen diversas pruebas y parámetros para obtener una medida de la ductilidad de un material. Para medir la tenacidad de fractura, la cual es la resistencia de un material a la extensión de una grieta. Las pruebas Charpy y Izod (Kissel, 2002) son pruebas muy comunes para determinar esta propiedad en el acero, pero debido a las características del aluminio estas pruebas no son aplicables. Para el aluminio existen las pruebas de tenacidad de fractura de deformación plana ( $K_{lc}$ ) y la de tenacidad de fractura de deformación no plana ( $K_c$ ) realizadas bajo las especificaciones ASTM B645 y B646 respectivamente, pero los límites de tenacidad de fractura que proporcionan las Normas y Datos de Aluminio para diferentes aleaciones no aparecen en las Especificaciones de Aluminio. El alargamiento, que es el incremento en porcentaje de la distancia que existe entre dos marcas de calibración y cuyos valores se encuentran en el MDA, Parte V Tabla 6, depende de la longitud de calibración y las dimensiones de la muestra, así como de la temperatura a la que se esté realizando la prueba, sin embargo, el alargamiento por sí solo no dice nada, ya que un material que se pueda alargar tanto no indica que tenga buena ductilidad, ya que no se estaría tomando en cuenta la reducción del área transversal provocada por el estrangulamiento ocurrido por la fuerza de tensión.

Una medida más aproximada de la ductilidad podría ser la relación que hay entre el esfuerzo de tensión de una barra con muesca y el esfuerzo de fluencia de una muestra, pero si el esfuerzo de la muestra con muesca es menor al esfuerzo de fluencia del material, entonces el material no alcanzará la fluencia debido al agrietamiento. Esto quiere decir que el material es sensible al agrietamiento. De todas las aleaciones que aparecen en el MDA solo las aleaciones 2014-T6, 6066-T6 y la 6070-T6 son sensibles al agrietamiento.

## 2.7 Efecto de la soldadura en las propiedades mecánicas

Como se mencionó anteriormente, las aleaciones de aluminio son un conjunto de elementos químicos que se unen por medio de diferentes métodos para mejorar las características del material. Sin embargo, a veces es necesario aumentar la resistencia de estas aleaciones por medio del temple, el cual puede ser mediante tratamientos térmicos de precipitación o solución, o tratamientos de endurecimiento por deformación.

Estos tratamientos de temple pueden ser afectados por la aplicación de calor cuando se está aplicando soldadura, reduciendo su resistencia. Para las aleaciones cuyo tratamiento de temple es térmico por precipitación (series 2XXX, 6XXX, 7XXX), la aplicación de la soldadura puede reducir la resistencia en la zona afectada por el calor (HAZ, por sus siglas en inglés) a una resistencia de temple por solución (Temple 4, ver sección 2.9). Si el temple de las aleaciones se realiza por medio de endurecimiento por deformación (series 1XXX, 3XXX y 5XXX), la aplicación de soldadura reducirá la resistencia en la HAZ a una resistencia de material recocido. El efecto de la soldadura no genera una variación en el módulo de elasticidad.

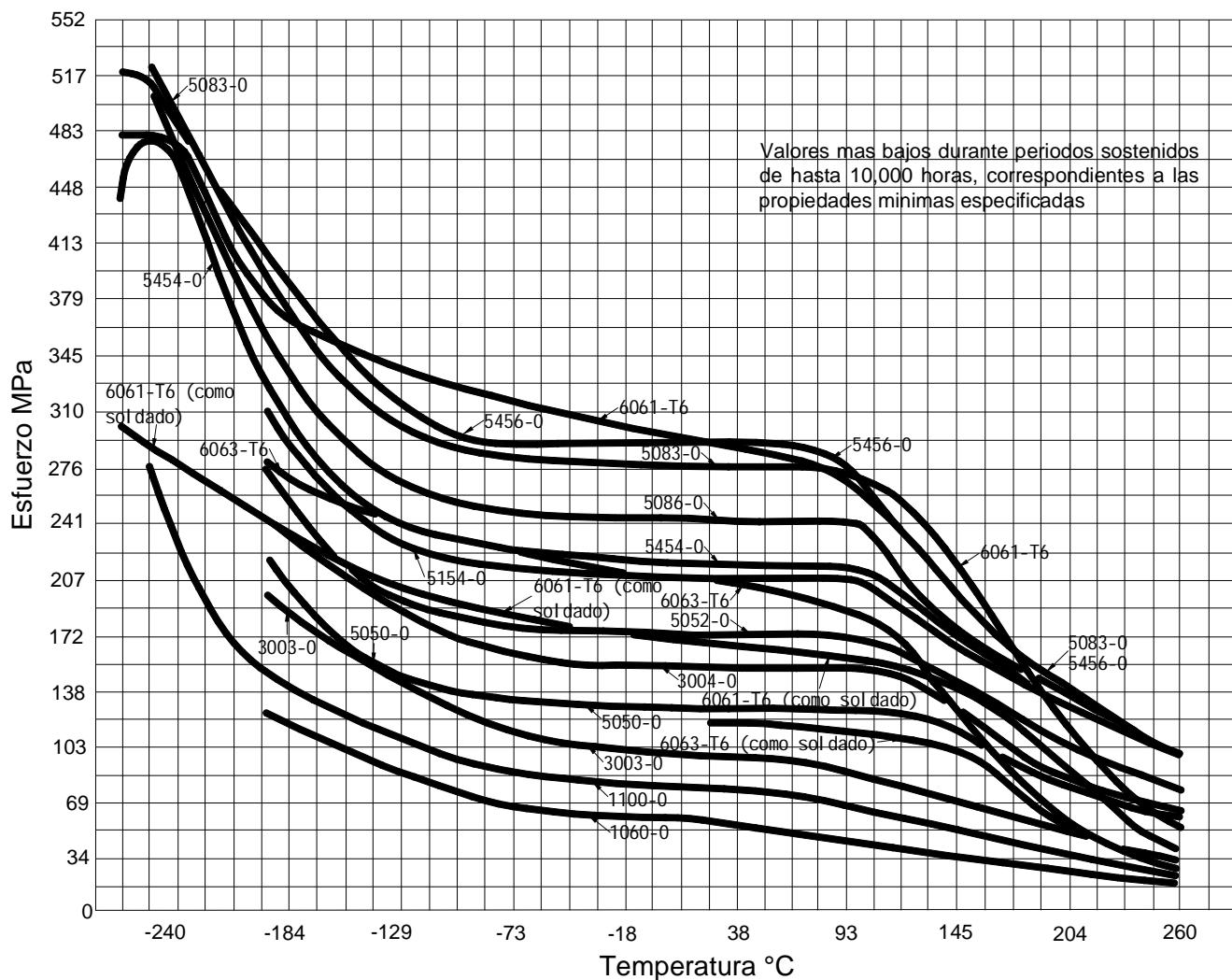
Aunque la aplicación de la soldadura puede reducir la resistencia en las aleaciones de aluminio, hay algunas aleaciones de la serie 5XXX que fueron diseñadas especialmente para poder ser soldadas y cuya afectación por el calor de la soldadura es mínima. Por ejemplo, la placa de aleación 5083-H116 con espesor de hasta 0.038 m tiene una resistencia última de 303 MPa [3093 kg/cm<sup>2</sup>]; y una resistencia última después de soldada de 275 MPa [2812 kg/cm<sup>2</sup>]. Por el contrario, existen aleaciones que son más difíciles de soldar y éstas pertenecen a las series 2XXX y 7XXX.

En el MDA, se presentan en tablas las resistencias soldadas mínimas, tomando en cuenta los diferentes factores que pueden afectar la resistencia del material como son el proceso de soldadura (soldadura GTAW o GMAW), el espesor de las piezas, la velocidad de soldadura y el precalentamiento. Estas resistencias tienen un subíndice *w*. El Eurocódigo-9 utiliza el subíndice HAZ, y los valores de las resistencias son mayores a los que utiliza el MDA (éste tema se tratará en el capítulo 4.3 conexiones soldadas).

## 2.8 Efecto de la temperatura en las propiedades del aluminio

El comportamiento de la resistencia en el aluminio varía dependiendo de la temperatura a la que esté sometido. El aluminio aumenta su resistencia a tensión y su alargamiento a medida que la temperatura disminuye, además, el aluminio no tiene una temperatura de transición en la cual exhiba una fractura frágil, esta propiedad lo hace una buena opción a bajas temperaturas. Por otro lado el aluminio tiene una temperatura de fusión mucho menor a la del acero (alrededor de 600°C) y disminuye su resistencia considerablemente a

temperaturas mayores a 95°C. En la figura 2.3 se muestra la variación de la resistencia última con respecto a la temperatura para diferentes aleaciones. Otro factor que influye junto con las altas temperaturas, es el tiempo. Una aleación disminuye su resistencia a medida que aumenta el tiempo de exposición de ésta a una temperatura elevada. En el MDA se proporcionan valores mínimos de las propiedades mecánicas para ser usadas a una temperatura de servicio de hasta 95°C, y de acuerdo con el MDA 2005, no cuenta con un apartado en el cual se proponga un método de diseño por fuego. Sin embargo, si se quiere profundizar en el tema de diseño por fuego, el Eurocódigo 09 cuenta con el apartado Parte 1-2 Diseño por Fuego.



**Figura 2.3 Esfuerzos de tensión últimos mínimos a diferentes temperaturas**

## 2.9 Propiedades físicas

Las propiedades físicas son todas aquellas propiedades que no son mecánicas, y de las más importantes para fines de diseño son la densidad y el coeficiente de expansión térmica. Estas propiedades varían dependiendo del tipo de aleación y se muestran en tablas del Apéndice B de este trabajo. Sin embargo, las variaciones en estos valores no son importantes para afectar significativamente en el cálculo estructural. El Eurocódigo 9 proporciona un solo valor para cada una de estas propiedades. La densidad promedio del aluminio que utiliza el Eurocódigo es de  $2,700 \text{ kg/m}^3$ , que si se compara con la del acero que es de  $7800 \text{ kg/cm}^3$  resulta ser cerca de la tercera parte de éste. De acuerdo con el MDA, se puede observar que las aleaciones más ligeras son las que pertenecen a la serie 5XXX y 6XXX, y de acuerdo con el tipo de aleación; si es forjada o fundida, el valor real estará muy cercano al valor nominal para la primera y de un 95% a un 100% del valor nominal para la segunda.

El coeficiente de expansión térmica es la relación de expansión que sufre el material con respecto al aumento de temperatura, es decir, que a medida que aumenta la temperatura, aumentan las dimensiones del material. Al igual que con la densidad, el coeficiente de expansión térmica depende de la aleación y se mencionan en el MDA. El Eurocódigo 9 muestra un solo valor promedio que es de  $23 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ . En la siguiente tabla se muestra el coeficiente de expansión térmica del aluminio y otros materiales comunes en ingeniería.

Material	Coeficiente de expansión térmica X $10^{-6}/^\circ\text{C}$
Cobre	32
Magnesio	27
Aluminio	23
Acero Inoxidable 304	17
Acero al carbón	12
Concreto	11

Tabla 2.1 Coeficientes de expansión térmica

# CAPÍTULO 3

## Esfuerzos en los componentes estructurales

### 3.1 Introducción

Antes de definir el diseño estructural empezaremos por definir lo que es una estructura; que es un sistema de elementos que trabajan de diferentes formas para cumplir con un fin dado. Los elementos de una estructura (también llamados elementos estructurales) son: las columnas, tráves, contraventos, etc. En el acero, estos elementos tienen diferentes secciones transversales, por ejemplo, las secciones T, C, Z, ángulos de lados iguales, ángulos de lados desiguales, tubos de sección cuadrada o rectangular, tubos de sección redonda y las comúnmente usadas secciones I, las cuales pueden ser estándar (IS) o de patín ancho (W). Estas secciones también se pueden encontrar en aluminio, sin embargo, existen diferencias entre las secciones de aluminio y las secciones de acero, la primera se encuentra en el proceso de fabricación, para el acero, algunas de estas secciones como son los perfiles IS y W se fabrican por medio de un proceso de laminación en caliente, mientras que para el aluminio estos mismos perfiles se fabrican por medio del proceso de extrusión. Este proceso de extrusión representa una ventaja del aluminio sobre el acero, ya que permite fabricar secciones más complejas con respecto a las de acero. La segunda diferencia se encuentra en las dimensiones de los componentes de una sección. Una sección de acero o de aluminio puede formarse por medio de la unión de dos o más placas planas o curvas llamadas componentes, por ejemplo, una sección I puede estar formada de cinco placas, cuatro para los patines y una para el alma. En secciones I de acero las dimensiones de estos componentes y la proporción que existe entre ellos permiten generar una distribución uniforme de esfuerzos de tal manera que se pueda alcanzar la fluencia en todos sus componentes antes de que el pandeo local se presente, estas secciones también se conocen

como secciones compactas. En secciones I de aluminio, las dimensiones de sus componentes no guardan ninguna proporción entre ellos, y por lo tanto las secciones compactas no están definidas. Esto no quiere decir que las secciones de aluminio sean fabricadas sin algún control en sus dimensiones, lo que se quiere decir es que el proceso de extrusión en el aluminio permite una gran variedad de secciones, que se requiere de mucho trabajo y tiempo para poder determinar esas proporciones. Esto hace que el diseño con secciones de aluminio sea diferente al diseño con secciones de acero.

El diseño estructural es un proceso iterativo que se basa en la experiencia, conocimientos científicos y técnicos del ingeniero para poder determinar la geometría y las dimensiones de una estructura, para que se comporte satisfactoriamente ante las demandas requeridas, cumpliendo las condiciones de seguridad, economía y procesos constructivos necesarios. Este capítulo se enfocará al diseño de elementos tomando en cuenta solo las condiciones de seguridad, las cuales están determinadas por los estados límite, los cuales se pueden definir como cualquier etapa de una estructura a partir de la cual su respuesta se considera inaceptable. Los estados límite se dividen en dos; los que se refieren a las resistencias requeridas para resistir cargas, tales como la de fluencia, fractura, pandeo e inestabilidad, llamados estados límite de falla, y las que se refieren a la habilidad de desarrollar la función planeada bajo condiciones normales de servicio, evitando deflexiones excesivas o la aparición de pandeo, llamadas estados límite de servicio. Estas condiciones solo se tomarán del MDA, y se harán algunas comparaciones con las del Manual de Diseño de Acero (AISC, 2006).

### 3.2 Elementos a tensión

De todos los esfuerzos resistentes mencionados en el capítulo anterior el más sencillo de calcular es el esfuerzo de tensión, sin embargo este esfuerzo puede ser tan grande que puede provocar una fractura, que es un modo de falla instantáneo, por otro lado, si las deformaciones ocasionadas por el esfuerzo de tensión son muy grandes, puede ocasionar una falla tal que la utilidad de la estructura se vea afectada. Estos comportamientos se pueden evitar siguiendo los requerimientos del MDA o del Eurocódigo 9.

#### 3.2.1 Resistencia a tensión

El MDA define dos estados límite para tensión axial, que son: la resistencia a la fluencia en el área total de la sección transversal, y la resistencia última en el área neta de la sección transversal. Cada una de estas resistencias está factorizada por su respectivo factor de resistencia (estas resistencias están factorizadas por un *factor de seguridad* en el diseño por esfuerzos permisibles, ASD) y siempre se tomará el mínimo de estos valores:

$$\phi F_L = \min \left( \phi_y F_{ty} A_g, \frac{\phi_u F_{tu} A_n}{k_t} \right) \quad (3.1)$$

dónde:

$A_g$ = área total del elemento

$A_n$ = área neta del elemento

$F_{ty}$ = esfuerzo de fluencia a tensión

$F_{tu}$ = esfuerzo último a tensión

$k_t$ = coeficiente para elementos a tensión

$\phi_y$ = factor de resistencia para la fluencia

$\phi_u$ = factor de resistencia para la falla

$F_L$  = esfuerzo en el estado límite

La expresión anterior se emplea para determinar los estados límite en elementos en tensión axial y elementos planos en tensión. Para los casos en los que se requiera calcular esfuerzos de tensión en elementos tipo tubo redondo u ovalado o se requiera determinar los esfuerzos de tensión en las fibras extremas debido a flexión, en la tabla 3.1 se muestran las expresiones necesarias para poder calcularlos.

**Tabla 3.1 Esfuerzos resistentes para los estados límite de fluencia y falla a tensión**

Perfil	Fluencia a tensión	Falla a tensión
<b>Perfiles estructurales flexionados alrededor su eje fuerte</b>	$\phi F_L = \phi_y F_{ty}$	$\phi F_L = \frac{\phi_u F_{tu}}{k_t}$
<b>Perfiles flexionados alrededor de su eje débil, placas rectangulares y barras sólidas</b>	$\phi F_L = 1.3\phi_y F_{ty}$	$\phi F_L = \frac{1.42\phi_u F_{tu}}{k_t}$
<b>Tubos rectangulares</b>	$\phi F_L = \phi_y F_{ty}$	$\phi F_L = \frac{\phi_u F_{tu}}{k_t}$
<b>Tubos ovalados o redondos</b>	$\phi F_L = 1.17\phi_y F_{ty}$	$\phi F_L = \frac{1.24\phi_u F_{tu}}{k_t}$

De acuerdo al MDA los factores de resistencia son: para el estado límite de fluencia  $\phi_y = 0.95$  y para el estado límite de falla  $\phi_u = 0.85$ . Sustituyendo estos valores en la expresión 3.1:

$$\phi F_L = \min\left(0.95F_{ty}A_g, \frac{0.85F_{tu}A_n}{k_t}\right) \quad (3.2)$$

Si lo que se quiere es comparar fuerzas, se tendrá que multiplicar los esfuerzos por sus respectivas áreas. Cabe mencionar que la fluencia en el área neta no se considera un estado límite, debido a que se considera que el área neta solo existe en una pequeña porción de la longitud total del elemento, por lo tanto, la fluencia en el área neta resultará en un alargamiento muy pequeño. Así, si el factor  $k_t = 1$  en la mayoría de los casos, el área total de la sección es igual o excede al área neta y  $f_{ty} = 0.85f_{tu}$ , la fractura es el estado límite que regirá la resistencia a tensión. Por ejemplo, para la aleación 6061-T6 con un  $f_{ty} = 240 \text{ MPa}$  y un  $f_{tu} = 260 \text{ MPa}$ :

El estado límite en la fluencia será  $= 0.95 (240 \text{ MPa}) = 228 \text{ MPa}$

El estado límite en la falla será  $= 0.85 \frac{(260 \text{ MPa})}{1} = 221 \text{ MPa}$

Dado que el esfuerzo en el área total es menor que el esfuerzo en al área neta y el estado límite de fluencia es mayor en el área total que el estado límite de fractura en el área neta, la resistencia a la fractura en el área neta siempre domina.

Con excepción de 10 aleaciones, el coeficiente  $k_t$  es 1.0 en todas las aleaciones mostradas en el MDA y en el presente trabajo. Esto se debe a que estas aleaciones son sensibles al agrietamiento. Sensible al agrietamiento significa que el esfuerzo último alcanzado en el área neta en pruebas estándar de una probeta con muesca es menor que el esfuerzo de fluencia a tensión especificado. A continuación se muestra la tabla 3.2 que muestra los valores del coeficiente  $k_t$  para todas las aleaciones que aparecen en el MDA.

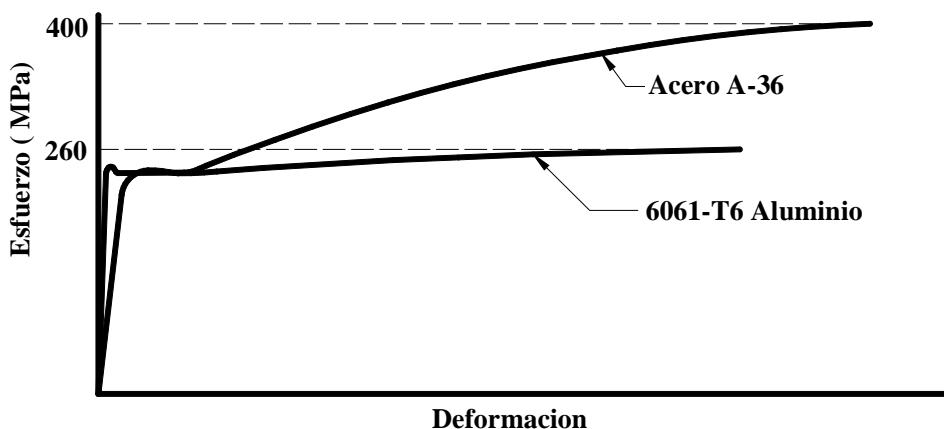
Las condiciones para el diseño por tensión en el LRFD del MDA y el Manual de diseño de Acero son muy parecidas. Las diferencias en los factores de resistencia son pequeñas ya que para el Manual de Diseño de Acero estos factores son: para el estado límite de fluencia 0.90 y para el estado límite de falla 0.75. Así las expresiones para determinar el estado límite en las secciones de acero son:

$$\phi F_L = \min(0.90F_{ty}A_g, 0.75 F_{tu}A_e) \quad (3.3)$$

**Tabla 3.2 Coeficiente  $k_t$  usado para diseño de esfuerzos en tensión**

Coeficiente $k_t$		
Aleación y Temple	No soldadas o Regiones más allá de los 0.025 m de una soldadura	Regiones dentro de los 0.025 m de una soldadura
2014-T6, -T651, -T6510, -T6511 Alclad 2014-T6, -T651	1.25	-
6066-T6, -T6510, -T651	1.1	-
6070-T6, -T62	1.1	-
Todos los demás enlistados en el apéndice A	1.0	1.0

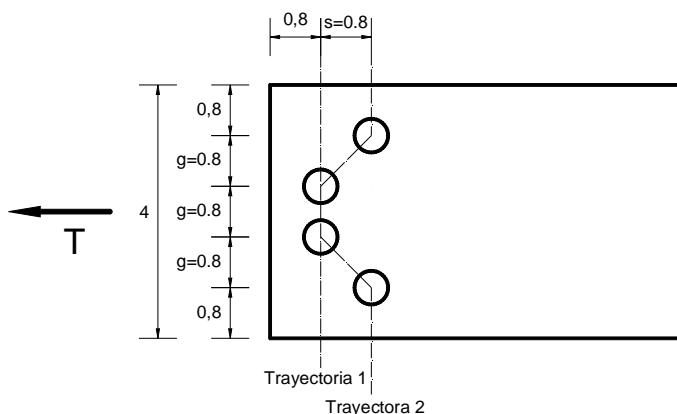
En la figura 3.1 se comparan los esfuerzos de fluencia y últimos de las aleaciones de aluminio con las del acero a temperatura ambiente, se podrá notar que las aleaciones de aluminio tienen un esfuerzo último muy cercano al esfuerzo de fluencia, a diferencia del acero A-36 que tiende a desarrollar un esfuerzo último mayor que su esfuerzo de fluencia. Se puede observar que el esfuerzo de fluencia del acero es de 248 MPa y falla a los 399 MPa mientras que su contraparte, la aleación 6061-T6 fluye a 241 MPa y falla a 261 MPa. Por lo tanto el estado límite que rige en elementos de aleación 6061-T6 es la falla frágil mientras que en el acero A-36 el estado límite que rige es la fluencia. En el apéndice C se muestra una tabla con los esfuerzos de diseño a tensión calculados para cada aleación y se resaltan las aleaciones que exhiben falla frágil.

**Figura 3.1 Comparación de las curvas esfuerzo deformación del Acero A-36 y el Aluminio 6061-T6**

### 3.2.2 Área neta

El área neta en elementos de aluminio se calcula de manera similar que en los elementos de acero. En el MDA el área neta se calcula multiplicando el espesor por el ancho neto mínimo. El ancho neto para cualquier cadena de agujeros, se obtiene del ancho total de la sección menos la suma de los diámetros de todos los agujeros, sumando la cantidad de  $s^2/4g$  por cada diagonal que se encuentre en la cadena. Donde  $s$  es el espacio de centro a centro de los agujeros en dirección paralela a la carga y  $g$  (conocido como gramil en el Manual de Diseño en Acero) es el espacio de centro a centro de los agujeros en dirección perpendicular a la carga. Estas características se pueden observar en la figura 3.2.

Además a cada agujero punzonado se le tendrá que sumar al diámetro nominal la cantidad de 0.0008 m [1/32 plg.] para fines de cálculo del área neta. El diámetro nominal del agujero, es el diámetro de fabricación, que es generalmente más grande que el diámetro de un tornillo. Con respecto a los agujeros barrenados, el diámetro que se considera para el cálculo del área neta es el diámetro nominal. Esto es lo que hace diferente al cálculo del área neta en elementos de aluminio con respecto a la de elementos de acero, ya que para el cálculo del área neta en elementos de acero, se suma la cantidad de 0.0016 m [1/16 plg.] al diámetro del agujero barrenado.



**Figura 3.2 Área neta para una cadena de agujeros**

### 3.2.3 Área neta efectiva

Cuando un elemento está conectado a lo largo de toda su sección transversal, es decir, tanto por sus patines como por su alma mediante tornillos se dice que el área neta es igual al área neta efectiva debido a que todos los tornillos están transmitiendo las cargas de tensión a la otra placa y que se está considerando que la tensión pasa por su centro de gravedad. Pero cuando un elemento está conectado mediante solo uno de sus patines el área neta puede no

ser efectiva a tensión, debido a que la tensión puede no pasar por el centro de gravedad, provocando una distribución de esfuerzos de tensión no uniforme en la conexión.

Por lo tanto el MDA obtiene el área neta efectiva reduciendo el área neta, usando la siguiente expresión:

$$A_e = A_n \left(1 - \frac{\bar{x}}{L}\right) \left(1 - \frac{\bar{y}}{L}\right) \quad (3.4)$$

dónde:

$A_e$  = Área neta efectiva

$A_n$  = Área neta

$L$  = Longitud de la conexión en dirección de la carga, medida de centro a centro de los tornillos o de extremo a extremo de la soldadura

$\bar{x}$  = Excentricidad de la conexión en la dirección de x

$\bar{y}$  = Excentricidad de la conexión en la dirección de y

Esta expresión es diferente a la utilizada en el Manual de Diseño de Acero, además de que también el MDA no ofrece todas las variaciones del Manual de Diseño de Acero.

### 3.2.4 Relación de esbeltez máxima en elementos a tensión

La relación de esbeltez en elementos estructurales a tensión no es un factor que afecte directamente la resistencia de dicho elemento. Esta relación de esbeltez solo se toma en cuenta para considerar las posibles acciones imprevistas, provocadas por maniobras de instalación, transportación o vibración a las que pueda estar sometido dicho elemento. El MDA no proporciona ningún requerimiento para tomar en cuenta estos efectos, sin embargo, el manual de diseño de acero del Instituto Mexicano de la Construcción en Acero (IMCA 2012) proporciona los siguientes requerimientos:

Para miembros principales  $l/r = 240$

Para miembros secundarios o armaduras excepto varillas  $l/r = 300$

dónde:

$l$  = longitud del elemento

$r$  = radio de giro

Estos requerimientos también pueden ser utilizados para elementos de aluminio sometidos a tensión, debido que estos fueron obtenidos de juicios basados en la experiencia de los investigadores. Estos requerimientos solo aseguran un grado de rigidez tal que el elemento a tensión sea lo suficientemente robusto, para evitar desplazamientos laterales no deseables.

### 3.3 Elementos a compresión

En la práctica los elementos estructurales pueden estar sometidos a compresión, la cual puede actuar sobre el eje axial de un elemento o tener una cierta excentricidad provocando un fenómeno de flexión (tema que se tocará más adelante). En esta sección solo nos ocuparemos de la compresión axial, y un fenómeno de inestabilidad que desafortunadamente se genera a partir de la compresión, llamado pandeo, el cual se presenta de manera instantánea y por lo tanto puede resultar en una falla muy peligrosa. El pandeo, depende de las dimensiones del elemento, el ancho de la sección transversal, su espesor, y la manera en que estén conectados sus componentes. El fenómeno de pandeo se puede presentar de dos maneras: como pandeo global, el cual se presenta a todo lo largo del eje axial, y como pandeo local, que se genera solo en una porción de un componente del elemento (figura 3.3). Estos fenómenos se tratarán con más detalle en las siguientes secciones.

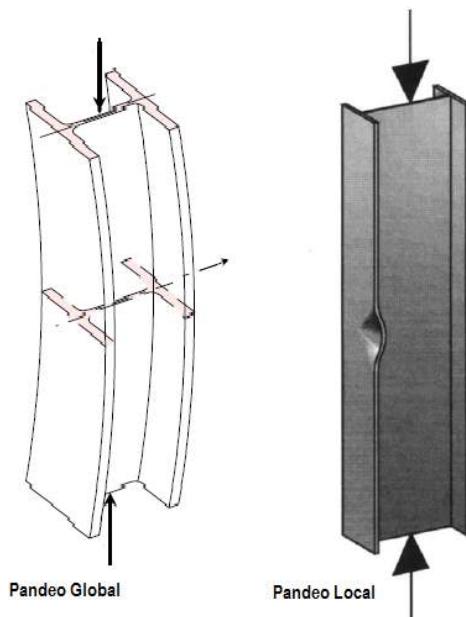


Figura 3.3 Pandeo local y Pandeo Global

Las secciones transversales de los elementos estructurales de acero por lo regular están diseñadas para que los componentes que las forman, tengan una proporción tal que el

pandeo global se produzca antes que el pandeo local, a estas secciones se les llama secciones compactas. Es por esto que el fenómeno de pandeo local no se trata con tanto detalle en estructuras de acero. En cambio, el aluminio es un material que debido a su facilidad de manufactura, se puede producir en una variedad tan amplia de secciones transversales, que no necesariamente son secciones compactas, por lo que el pandeo local se puede presentar mucho antes del pandeo global.

### 3.3.1 Pandeo global (columnas)

Los elementos sometidos a compresión axial, pueden fallar de manera global por tres formas: por fluencia, por pandeo inelástico y por pandeo elástico. El modo de falla estará regido por la relación de esbeltez del elemento. Si tomamos como referencia una columna de base rectangular y una altura igual al lado menor del rectángulo, el esfuerzo que soportará será considerablemente grande, debido a que la columna tiene una longitud corta, y la columna no se pandeará, pero si el esfuerzo es mayor que la fluencia del material, la columna exhibirá un acortamiento en sus extremos, y entonces se dirá que falló por fluencia o por aplastamiento. Ahora si se aumenta el largo de la columna, y se somete a una carga axial, hasta que la columna se pandee lateralmente, y la columna conserva su estado deformado, se dice que la columna se pandeó inelásticamente. Por último si se aumenta de longitud la columna del caso anterior de manera que la columna se haga muy esbelta, y se carga, esta se pandeará con una carga mucho menor a la carga con la que se pandeó inelásticamente y dado que no rebasó el esfuerzo de fluencia, la columna podrá regresar a su estado original y por lo tanto se dirá que ocurrió un pandeo elástico.

Para poder medir los esfuerzos que se presentan en estos modos de falla, el MDA proporciona diferentes ecuaciones. Para tratar estos esfuerzos, se empezará por discutir el esfuerzo de pandeo elástico, el cual se calcula mediante la ecuación de pandeo de Euler, quien logró resolver el problema de pandeo para determinadas condiciones de esbeltez en 1957. La ecuación de Euler (ecuación 3.5) no depende de los esfuerzos de fluencia o esfuerzos últimos del material, la única propiedad del material que aparece en la ecuación es el módulo de elasticidad. Si se considera que el pandeo de Euler solo es válido para el rango elástico del material, entonces el módulo de elasticidad en la ecuación es constante, además si el módulo de elasticidad no varía más que un 8.0 % entre las aleaciones que se encuentran en el MDA, entonces el pandeo elástico será el mismo para cualquier aleación del MDA. Así, la única variable que aparece en la ecuación es la relación de esbeltez representada por el cociente  $kl/r$ .

$$F_L = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{kl}{r}\right)^2} \quad (3.5)$$

dónde:

$E$  = módulo de elasticidad a compresión del aluminio

$k$  = factor de longitud efectiva

$l$  = longitud de la columna

$r$  = radio de giro

Esta relación de esbeltez  $kl/r$ , depende de un factor de longitud efectiva  $k$ , el cual depende de las condiciones de apoyo del elemento (tabla 3.3), de la longitud libre de arriostramiento  $l$ , y del radio de giro  $r$ . Para fines de diseño, el calculista tendrá que calcular la relación de esbeltez para cada eje, y utilizar el valor más grande, ya que éste le indicará cual es el eje sobre el cual, la columna se pandeará. Dado que esta relación de esbeltez es la única variable en la ecuación de Euler, se le representa con la letra  $\lambda$ , sin embargo en el MDA, esta relación de esbeltez tiene una ligera variación y está representada por la ecuación 3.6.

$$\lambda = \left(\frac{kl}{r}\right) \left(\frac{1}{\pi}\right) \sqrt{F_{cy}/E} \quad (3.6)$$

dónde:

$F_{cy}$  = resistencia de fluencia a compresión del aluminio

La razón por la que la relación de esbeltez en el MDA se represente de esta manera, obedece únicamente a que el esfuerzo de diseño para pandeo elástico en el MDA está definida por la ecuación 3.7, una ecuación que está en función de la resistencia del material. Sin embargo, si se sustituye la ecuación 3.6 en la ecuación 3.7 se obtendrá la ecuación de Euler (ecuación 3.5) para pandeo elástico. Una ecuación, que si se representa en un plano cuyo eje  $x$  sea la relación de esbeltez y el eje  $y$  el esfuerzo que resiste la columna, (Figura 3.4) se obtendrá una hipérbola. En esta hipérbola se puede observar que cuando la relación de esbeltez tiende a cero, la resistencia de la columna tenderá a infinito. Un comportamiento que se demostró no ser cierto, debido que se realizaron experimentos en los que las columnas se pandeaban pero no regresaban a su forma original. Estas columnas sufrían de un pandeo inelástico.

$$\phi F_L = \frac{\phi_{cc} F_{cy}}{\lambda^2} \quad (3.7)$$

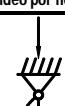
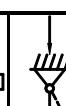
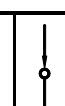
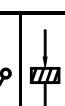
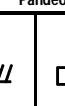
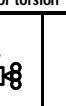
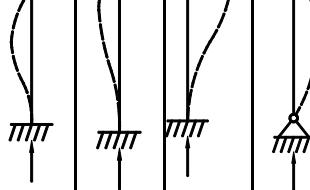
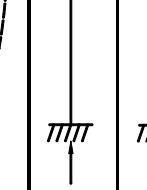
dónde:

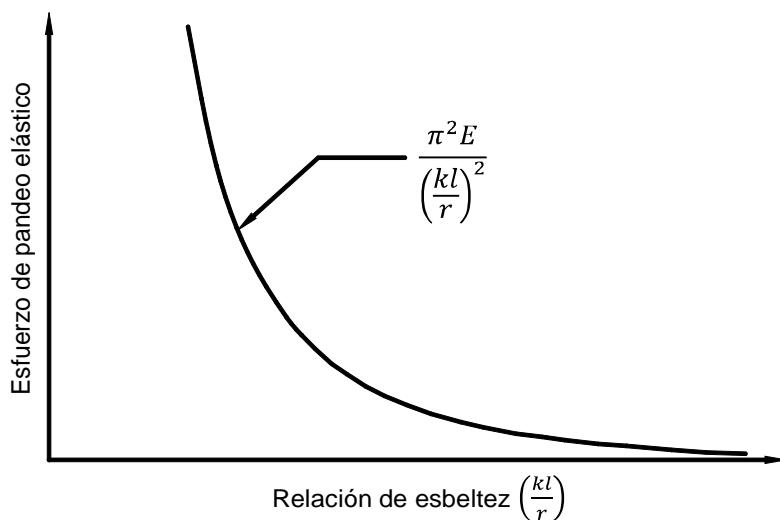
$\phi F_L$  = esfuerzo de diseño para pandeo elástico

$\phi_{cc}$  = factor de resistencia para columnas a compresión (se tratará más adelante)

$F_{cy}$  = esfuerzo de fluencia del aluminio

**Tabla 3.3 Coeficientes de longitud efectiva**

	Pandeo por flexión						Pandeo por torsión		
									
La forma pandeada de la columna está mostrada mediante la línea punteada									
Valor teórico de K	0.5	0.7	1.0	1.0	2.0	2.0	0.5	1.0	2.0
Valor recomendado de K cuando las condiciones ideales son aproximadas	0.65	0.80	1.2	1.0	2.10	2.0			
Código para condiciones de apoyo	 	Giro fijo. Traslación fija Giro libre. Traslación fija Giro fijo. Traslación libre Giro libre. Traslación libre						 	Apoyo fijo contra torsión, fijo contra torsión longitudinal Apoyo fijo contra torsión, libre de torcerse Apoyo libre de torsión



**Figura 3.4 Hipérbola de Euler**

En un principio, para resolver el problema de pandeo inelástico en una columna, se plantearon ecuaciones empíricas para poder determinar el comportamiento de estas columnas. Después se plantearon diferentes teorías para determinar los esfuerzos en el rango inelástico. Una de esas teorías la planteó Engesser (1889), la cual planteaba el uso de un módulo tangente, una relación del esfuerzo-deformación en el rango inelástico. Sin embargo la teoría que planteó fue rechazada por Jasinsky (1895) demostrando que la teoría no era correcta. Esto hizo a Engesser plantear una nueva teoría llamada la teoría del módulo reducido. Esta teoría comenzó a tener más aceptación pero resultó que para ciertas condiciones, la teoría del módulo tangente daba resultados más reales. No fue hasta 1947 que Shanley aclaró todas las controversias y demostró que es posible utilizar la ecuación de Euler, sustituyendo el módulo de elasticidad por un módulo tangente. (ecuación 3.8).

$$F_L = \frac{\pi^2 E_t}{\left(\frac{kl}{r}\right)^2} \quad (3.8)$$

Sin embargo, determinar el valor del módulo tangente en este intervalo es muy complicado. Por lo tanto el MDA desarrolló mediante diferentes investigaciones una ecuación de pandeo inelástico, en términos del factor  $\lambda$ , evitando así el cálculo del módulo tangente.

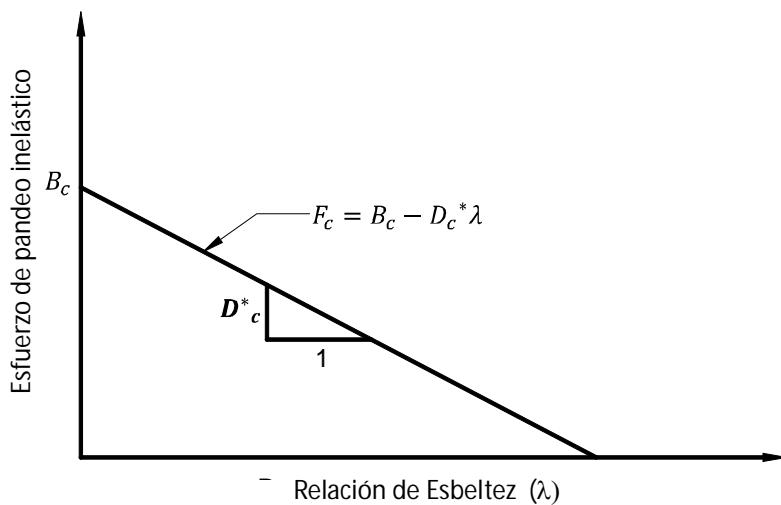
$$\phi_{cc} F_L = B_c - D_c^*(\lambda) \quad (3.9)$$

Esta ecuación es una ecuación lineal, donde  $B_c$  es la ordenada del esfuerzo de pandeo inelástico, y  $D_c^*$  es la pendiente de la recta del pandeo inelástico (figura 3.5). Estas constantes fueron desarrolladas por la Asociación de aluminio mediante varias pruebas a diferentes aleaciones de aluminio. La ecuación  $B_c$  es una función únicamente del esfuerzo de fluencia a compresión del aluminio ya que esta propiedad mecánica es la única que afecta a la resistencia de las columnas en el rango inelástico. El parámetro  $D_c^*$  está definido por la ecuación 3.10, la cual está definida en función de  $D_c$  que a su vez está en función del módulo de elasticidad  $E$ . La forma de la ecuación 3.10, está representada de esa manera ya que se debe multiplicar por el parámetro  $\lambda$ , pero realmente la ecuación de esfuerzo (ecuación 3.9) de diseño para pandeo inelástico se podría escribir solo en términos de  $D_c$  (tablas 3.4 y 3.5) si solo se utilizara la relación de esbeltez  $kl/r$ .

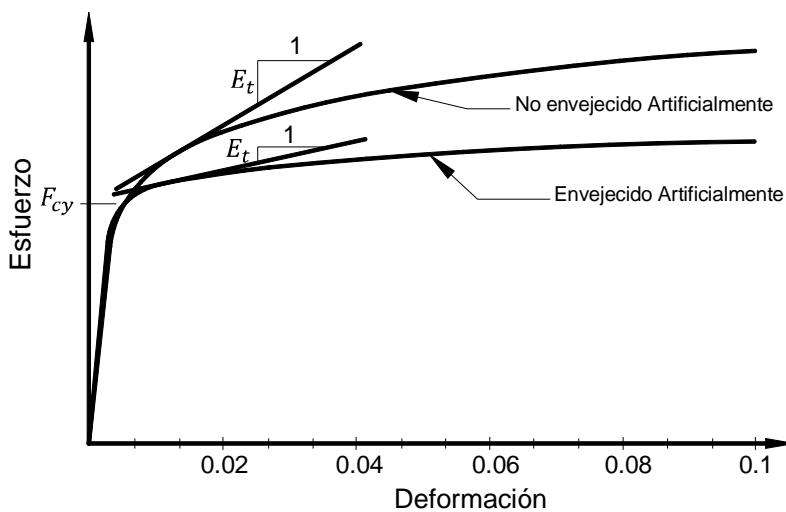
$$D_c^* = \pi D_c \sqrt{E/F_{cy}} \quad (3.10)$$

El MDA muestra para estas dos variables, dos ecuaciones dependiendo del tipo de temple que haya recibido la aleación (tablas 3.4 y 3.5). Esto se debe a que las curvas de esfuerzo

deformación son distintas para cada tipo de tratamiento. Si la aleación ha sido artificialmente envejecida (Temples T5 al T9), su curva esfuerzo deformación (figura 3.6) será más plana después de la fluencia. En cambio, las aleaciones que han sido naturalmente envejecidas (Temples O, H, T1 al T4), tendrán una curva con una pendiente mayor. Esto hace que el módulo de elasticidad de unas con respecto a otras sean diferentes y por lo tanto tengan dos ecuaciones diferentes. Debido a que estas constantes dependen de las propiedades del material, se hicieron los cálculos para cada uno de los fenómenos que aquí se tratan (compresión, flexión y cortante) de las aleaciones que aparecen en el MDA, y se presentan en el apéndice D



**Figura 3.5 Esfuerzo de Pandeo Inelástico en una Columna**



**Figura 3.6 Comparación de las curvas esfuerzo deformación de aleaciones de aluminio envejecidas artificialmente y no envejecidas artificialmente**

**Tabla 3.4 Tabla de constantes de pandeo inelástico para compresión en columnas y compresión en patines de vigas dependiendo del tratamiento [MPa]**

Tratamiento	Ordenada al origen	Pendiente	Intersección
<b>-O, -H, -T1, -T2, -T3 o -T4</b>	$B_c = F_{cy} \left[ 1 + \left( \frac{F_{cy}}{6900} \right)^{\frac{1}{2}} \right]$	$D_c = \frac{B_c}{20} \left( \frac{6B_c}{E} \right)^{\frac{1}{2}}$	$C_c = \frac{2B_c}{3D_c}$
<b>-T5, -T6, -T7, -T8 o -T9</b>	$B_c = F_{cy} \left[ 1 + \left( \frac{F_{cy}}{15510} \right)^{\frac{1}{2}} \right]$	$D_c = \frac{B_c}{10} \left( \frac{B_c}{E} \right)^{\frac{1}{2}}$	$C_c = 0.41 \frac{B_c}{D_c}$

**Tabla 3.5 Tabla de constantes de pandeo inelástico para compresión en columnas y compresión en patines de vigas dependiendo del tratamiento [kg/cm<sup>2</sup>]**

Tratamiento	Ordenada al origen	Pendiente	Intersección
<b>-O, -H, -T1, -T2, -T3 o -T4</b>	$B_c = F_{cy} \left[ 1 + \left( \frac{F_{cy}}{70336} \right)^{\frac{1}{2}} \right]$	$D_c = \frac{B_c}{20} \left( \frac{6B_c}{E} \right)^{\frac{1}{2}}$	$C_c = \frac{2B_c}{3D_c}$
<b>-T5, -T6, -T7, -T8 o -T9</b>	$B_c = F_{cy} \left[ 1 + \left( \frac{F_{cy}}{158104} \right)^{\frac{1}{2}} \right]$	$D_c = \frac{B_c}{10} \left( \frac{B_c}{E} \right)^{\frac{1}{2}}$	$C_c = 0.41 \frac{B_c}{D_c}$

En columnas de sección compacta, la condición que rige su comportamiento es el esfuerzo de fluencia, debido a que se considera que son lo suficientemente robustas, como para que el efecto de pandeo global se presente. Este esfuerzo es también conocido como carga de aplastamiento, y se calcula con la ecuación 3.11.

$$\phi_{cc} F_L = \phi_{cc} F_{cy} \quad (3.11)$$

Si se unen todas las ecuaciones para calcular los esfuerzos de diseño para los diferentes modos de falla antes referidos se obtendrá una gráfica como la mostrada en la figura 3.7. Pero ¿cuáles son los parámetros que distinguen un tipo falla de otra?. Estos son los parámetros  $S_1^*$  y  $S_2^*$ , los cuales están definidos por las ecuaciones 3.12 y 3.13 respectivamente.

$$S_1^* = \frac{B_c - F_{cy}}{D_c^*} \quad (3.12)$$

$$S_2^* = \frac{C_c}{\pi} \sqrt{F_{cy}/E} \quad (3.13)$$

El parámetro  $S_1^*$  representa el límite de la falla por aplastamiento y la falla por pandeo inelástico. Análogamente el parámetro  $S_2^*$  (en acero se conoce como  $C_c$ ) representa la intersección de las curvas de pandeo elástico e inelástico y representa tanto el límite de esbeltez, como el límite de aplicabilidad de la ecuación de Euler. Cada una de estas ecuaciones se obtiene resolviendo simultáneamente las ecuaciones para cada tipo de falla.

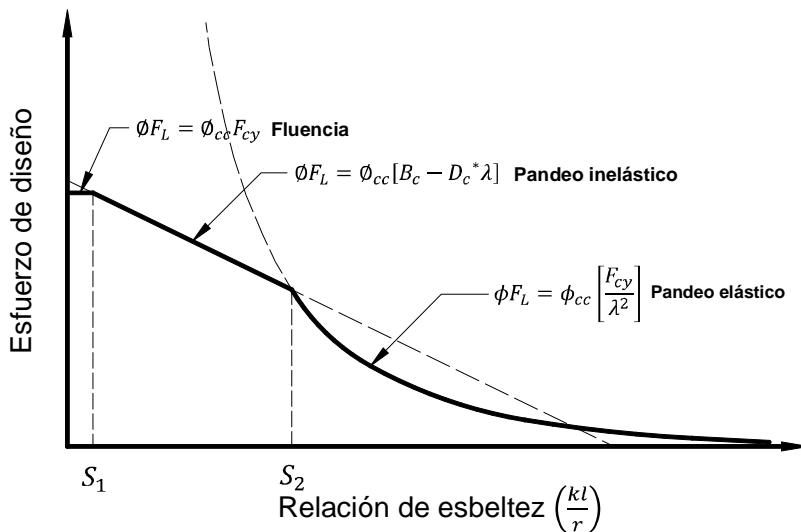


Figura 3.7 Modos de falla de una columna en sus tres regímenes de esbeltez

Ahora se hablará del factor de resistencia  $\phi_{cc}$ , el cual está en función del parámetro  $\lambda$  y fue obtenido a partir de métodos probabilísticos. En las expresiones 3.14 y 3.15 se observa que independientemente de la relación de esbeltez que se tenga, los valores de  $\phi_{cc}$  son menores o iguales a 0.95, que comparándolo con el factor de resistencia del acero que es de 0.9 resulta ser mayor.

Para  $\lambda \leq 1.2$

$$\phi_{cc} = 1 - 0.21\lambda \leq 0.95 \quad (3.14)$$

Para  $\lambda > 1.2$

$$\phi_{cc} = 0.14\lambda + 0.58 \leq 0.95 \quad (3.15)$$

Para el cálculo de estos factores de resistencia se tendrá que utilizar la relación de esbeltez que rija el eje de falla de la columna. Si el radio de giro respecto al eje  $x$  es menor que el

radio de giro del eje  $y$ , entonces la relación de esbeltez con respecto del eje  $x$  será mayor, por lo tanto, la columna sufrirá un pandeo con respecto a ese eje. En caso de que el radio de giro con respecto del eje  $y$  sea menor, entonces la relación de esbeltez será mayor con respecto al eje  $y$  y por lo tanto la columna se pandeará respecto a ese eje. Sin embargo existen otros dos tipos de pandeo que pueden aparecer cuando las secciones son abiertas y cuyas fallas se dan respecto al eje longitudinal de la columna. Estos son el pandeo torsional y el pandeo flexo-torsional. El pandeo torsional ocurre en columnas cuya sección transversal es doblemente simétrica, mientras que el pandeo flexo-torsional, ocurre cuando la sección transversal de la columna es simplemente simétrica. Por lo tanto, se tendrá que determinar la relación de esbeltez más grande para estos modos de falla y así poder determinar su respectivo factor de resistencia.

Para poder determinar el para la relación de esbeltez tanto para pandeo torsional como para pandeo flexo-torsional, el MDA proporciona una expresión para poder determinar una relación de esbeltez efectiva (ecuación 3.16). Esta relación de esbeltez efectiva es la que se utilizará en las ecuaciones de pandeo elástico y pandeo inelástico en caso de ser la relación más grande calculada.

$$\left(\frac{kl}{r}\right)_e = \pi \sqrt{\frac{E}{F_e}} \quad (3.16)$$

donde  $F_e$  es el esfuerzo crítico elástico y se define como sigue:

Para pandeo torsional

$$F_e = F_{et}$$

Para pandeo flexo-torsional

$$F_e = F_{ef} = \frac{1}{2\beta} [(F_{ex} + F_{et}) - \sqrt{(F_{ex} + F_{et})^2 - 4\beta F_{ex} F_{et}}]$$

Esta ecuación puede parecer muy compleja, sin embargo el MDA, propone una ecuación más sencilla para el cálculo del pandeo flexo-torsional.

$$F_e = F_{ef} = \frac{F_{ex} F_{et}}{F_{ex} + F_{et}}$$

donde para las anteriores ecuaciones:

Eje x es el eje centroidal de simetría

A= es el área de la sección transversal

$C_w$ = constante de pandeo torsional de la sección transversal

E= módulo de elasticidad a compresión

$$F_{ex} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{k_x L_b}{r_x}\right)^2}$$

$$F_{et} = \frac{1}{Ar_0^2} \left( GJ + \frac{\pi^2 E C_w}{(K_t L_t)^2} \right)$$

G= módulo de cortante

J= constante de torsión

$k_x$ = coeficiente de longitud efectiva para pandeo alrededor del eje x

$K_t$ = coeficiente de longitud efectiva para pandeo torsional.  $K_t$  será mayor o igual a la unidad a menos que un análisis racional justifique un valor menor.

$L_t$ = longitud arriostrada para torsión

$L_b$ = longitud arriostrada para flexión alrededor del eje x

$r_0 = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_0^2}$  radio polar de giro de la sección transversal alrededor del centro de cortante

$r_x, r_y$ = radios de giro de la sección transversal alrededor de los ejes principales centroidales

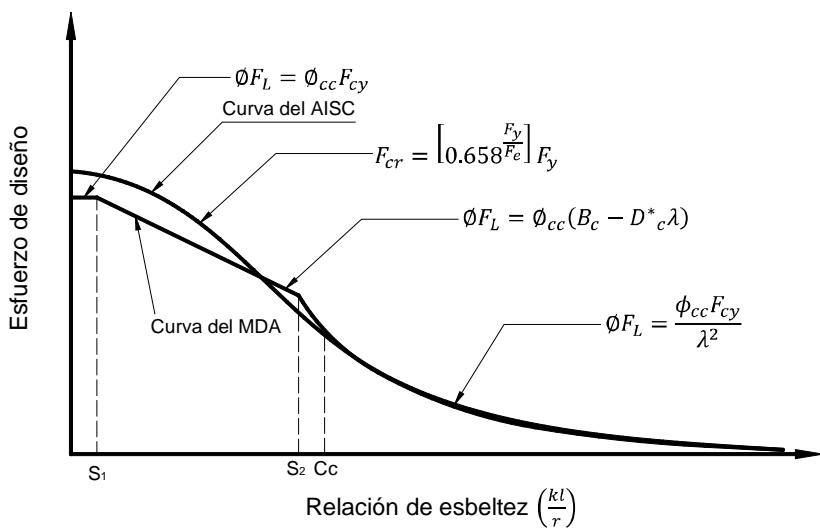
$x_0$  = coordenada x del centro de cortante

$$\beta = 1 - (x_0/y_0)^2$$

La constantes de torsión (J) y pandeo torsional ( $C_w$ ) para las diferentes secciones que aparecen en el MDA, se encuentran en la Parte VI del MDA o también se pueden usar las propiedades de sección que aparecen en la especificación de acero AISC ya que estas no dependen del material. La constante de longitud efectiva para pandeo torsional  $K_t$  se puede encontrar en la tabla 3.3.

Haciendo una comparación con el acero, el diseño de columnas de aluminio requiere de tres ecuaciones para describir el tipo de falla que tendrá la columna, mientras que el acero solo necesita de dos ecuaciones (figura 3.8). Para poder determinar el tipo de falla que tendrá una columna de aluminio se tendrá que calcular las relaciones de esbeltez  $S_1$  y  $S_2$ ; mientras que para el acero solo se tendrá que calcular solo una relación de esbeltez  $C_c$ . Esto quiere decir que en el diseño de columnas de acero solo se necesita una sola ecuación para describir tanto la falla por aplastamiento (fluencia) como la falla por pandeo inelástico. Otra comparación con respecto al diseño de acero, es la relación de esbeltez. Mientras que en el AISC la relación de esbeltez se restringe a 200, el MDA no pone ninguna restricción. Sin embargo se recomienda tomar este valor para columnas de aluminio para tomar en cuenta

las acciones imprevistas que se mencionaron en la sección 3.2.4. En el apéndice E se muestran las gráficas, en las que se comparan las resistencias de diseño para dos tipos de aleaciones de aluminio con el acero A-36, para secciones I estándar. En estas graficas (apéndice E)) se pueden apreciar cómo es que en las aleaciones de aluminio la resistencia es la misma, debido a que en el intervalo de pandeo elástico la resistencia depende únicamente del módulo de elasticidad. Y la diferencia que existe entre la resistencia del acero A-36 y la aleación de aluminio 6061-T6 que va desde un 14% a 31% en el régimen de pandeo inelástico, y de un 57% al 58% en el régimen de pandeo elástico, dependiendo de la sección.



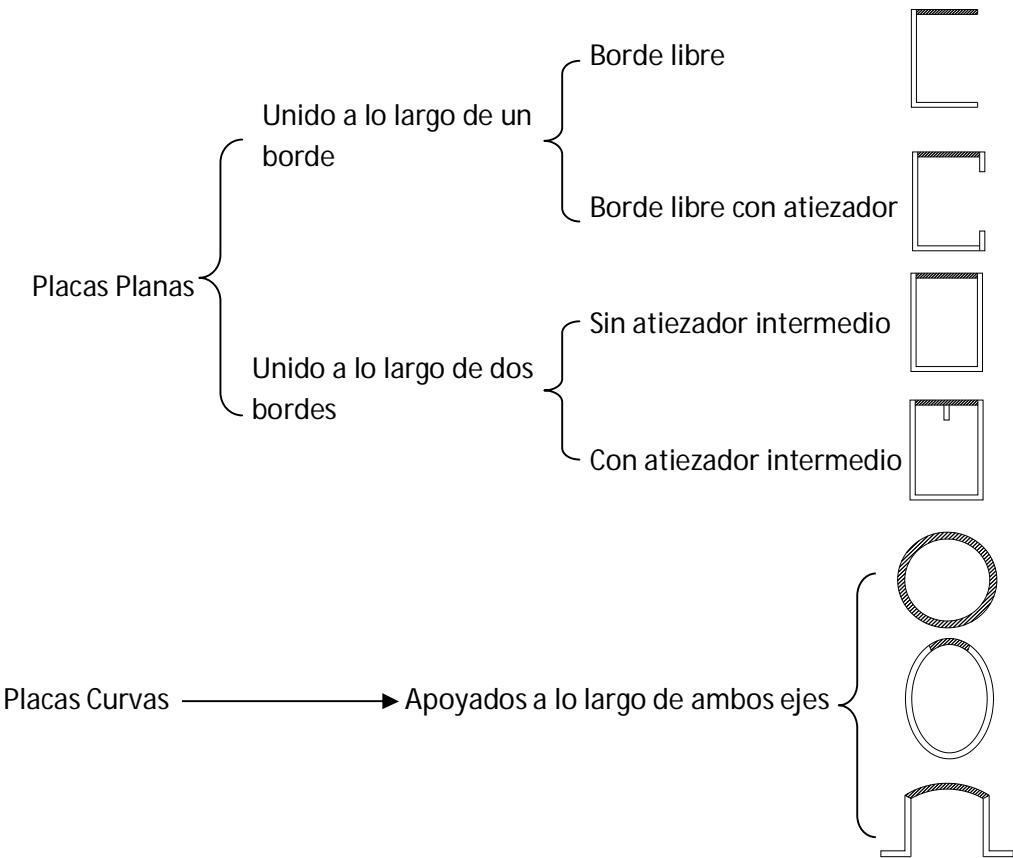
**Figura 3.8 Comparación de las ecuaciones de esfuerzo de pandeo de una columna para acero y aluminio**

### 3.3.2 Pandeo local (Componentes de Columnas)

En la sección anterior se trató el fenómeno de pandeo global y sus posibles variaciones. Sin embargo, para que este fenómeno se presente, todos los componentes (placas) de los elementos estructurales a compresión deben comportarse de manera adecuada. Es decir cada componente debe resistir los esfuerzos para los que fue diseñado. Si alguno de estos componentes no resiste el esfuerzo para la que fue diseñado, se puede decir que ha fallado. Uno de los tipos de falla que se puede presentar (y que trataremos en esta sección) en una placa, puede ser el pandeo local. Un fenómeno que puede producir una falla prematura de la columna, o al menos puede hacer que los esfuerzos se redistribuyan de manera no uniforme, y por lo tanto es importante tratar este tipo de falla.

Las placas en los elementos a compresión pueden ser planas o curvas, y pueden estar unidas a lo largo de solo uno de sus bordes, a lo largo de solo dos de sus bordes o a lo largo de sus

cuatro bordes. En esta sección solo trataremos las placas que solo están unidas a lo largo de uno o dos de sus bordes, y pueden contener atiezadores en sus bordes libres o atiezadores intermedios. Un atiezador se puede definir como un componente adicional a la placa para aumentar la capacidad de carga del elemento estructural a compresión. En realidad puede haber demasiadas combinaciones a la hora de unir placas, pero las que se muestran en la figura 3.9 son las combinaciones que se usan en el MDA.

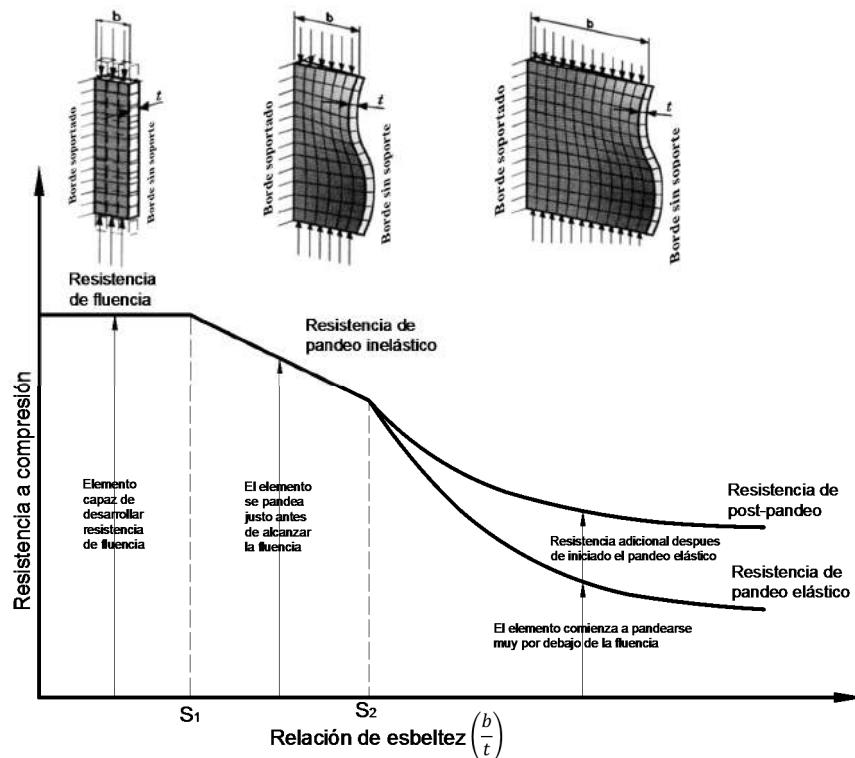


**Figura 3.9 Configuraciones de componentes en secciones de aluminio usadas en el MDA**

Para explicar el fenómeno de pandeo local tomaremos como referencia una placa simplemente apoyada a lo largo de un solo borde y similarmente que para el caso de pandeo global, empezaremos por imaginar una placa con un espesor ( $t$ ) un poco menor a su ancho ( $b$ ) y con una carga axial que se incrementa hasta llegar a la fluencia. En este caso la distribución de esfuerzos es uniforme y la placa presentará una pequeña reducción en su longitud, por lo que el pandeo local no se presentará. Después imaginemos que aumentamos el ancho de la placa y mantenemos constante el espesor de la placa, le colocamos una carga, que a medida que se va incrementando, va a desplazar solo uno de los

extremos de la placa, de manera que si retiramos la carga el desplazamiento permanece. A este fenómeno se le conoce como pandeo inelástico de la placa. Por último, aumentamos más el ancho de la placa manteniendo el espesor constante, y nuevamente aplicamos una carga, que provocará un pandeo en el extremo de la placa aun, cuando la carga no alcance todavía el esfuerzo de fluencia del material, por lo tanto, cuando se retire la carga el pandeo desaparecerá. A este fenómeno se le conoce como pandeo elástico.

Esto muestra que el comportamiento de una placa es similar al de una columna, sin embargo, el esfuerzo que puede resistir una placa depende de la relación entre el ancho y el espesor (también llamada relación de aspecto). Otra característica, se observa cuando se presenta el pandeo elástico en una placa, ya que la placa puede tener una resistencia ligeramente mayor una vez que esta pandeada (en una columna no). Esto se debe a que el esfuerzo que se presenta en la placa se comienza a redistribuir sobre su sección transversal, habiendo una menor concentración de esfuerzo en el extremo pandeado y una mayor concentración en la unión de la placa. A este esfuerzo se le conoce como resistencia de Post – Pandeo (figura 3.10) y se tratará más adelante pero primero veremos cuáles son las expresiones que proporciona el MDA para calcular las resistencias de fluencia, pandeo inelástico y elástico.



**Figura 3.10 Los tres modos de falla para componentes de columna.**

Para calcular la resistencia de las placas de los elementos en compresión, el MDA utiliza las mismas expresiones usadas para calcular la resistencia en columnas, solo que en vez de utilizar la relación  $\frac{kl}{r}$ , utiliza la relación  $\frac{b}{t}$  para componentes planos, y la relación  $\frac{R}{t}$  para componentes curvos, donde R es el radio hasta la mitad del espesor del componente. Como se explicó anteriormente, hay tres maneras en las que se puede comportar una placa, de manera en la que la falla sea por fluencia, que la falla sea por pandeo inelástico o por pandeo elástico. Al igual que en el pandeo global, la manera de saber en dónde se encuentra la placa es calculando los parámetros  $S_1$  y  $S_2$ , si la relación de aspecto es menor que  $S_1$  entonces la falla será por fluencia, si se encuentra entre  $S_1$  y  $S_2$ , la falla será por pandeo inelástico y si la relación de aspecto es mayor a  $S_2$ , la falla será por pandeo elástico.

Así, si la falla es por fluencia, es decir si la relación de aspecto es menor a  $S_1$  (placa robusta), la resistencia a la falla estará definida por la ecuación 3.17

$$\emptyset F_L = \emptyset_y F_{cy} \quad (3.17)$$

dónde

$\emptyset F_L$  = Esfuerzo de diseño por fluencia

$\emptyset_y$  = Factor de resistencia = 0.95

$F_{cy}$  = Esfuerzo de fluencia a compresión

Para la falla de pandeo inelástico de una placa plana (es decir si la relación de aspecto está entre  $S_1$  y  $S_2$ ) el MDA proporciona la siguiente expresión:

$$\emptyset F_L = \emptyset_c \left[ B_p - 5.1 D_p \frac{b}{t} \right] \quad (3.18)$$

dónde:

$\emptyset F_L$  = Esfuerzo de diseño para pandeo local inelástico

$\emptyset_c$  = Factor de resistencia = 0.85

$B_p$  = Constante de pandeo que representa el esfuerzo donde la línea de pandeo inelástico de una placa interseca al eje de ordenadas en una gráfica de esfuerzo contra relación b/t

$D_p$  = Constante de pandeo que representa la pendiente de la recta de esfuerzo de pandeo inelástico de una placa.

Las expresiones de  $B_p$  y  $D_p$  varían dependiendo del tipo de tratamiento que haya recibido la aleación de aluminio y las expresiones que definen estas variables se presentan en las tablas 3.6 y 3.7.

**Tabla 3.6 Tabla de constantes de pandeo inelástico para compresión en placas dependiendo del tratamiento [MPa]**

Tratamiento	Ordenada al origen	Pendiente	Intersección
<b>-O, -H, -T1, -T2, -T3 o -T4</b>	$B_p = F_{cy} \left[ 1 + \frac{(F_{cy})^{\frac{1}{3}}}{14.5} \right]$	$D_p = \frac{B_p}{20} \left( \frac{6B_p}{E} \right)^{\frac{1}{2}}$	$C_p = \frac{2B_p}{3D_p}$
<b>-T5, -T6, -T7, -T8 o -T9</b>	$B_p = F_{cy} \left[ 1 + \frac{(F_{cy})^{\frac{1}{3}}}{21.7} \right]$	$D_p = \frac{B_p}{10} \left( \frac{B_p}{E} \right)^{\frac{1}{2}}$	$C_p = 0.41 \frac{B_p}{D_p}$

**Tabla 3.7 Tabla de constantes de pandeo inelástico para compresión en placas dependiendo del tratamiento [kg/cm<sup>2</sup>]**

Tratamiento	Ordenada al origen	Pendiente	Intersección
<b>-O, -H, -T1, -T2, -T3 o -T4</b>	$B_p = F_{cy} \left[ 1 + \frac{(F_{cy})^{\frac{1}{3}}}{31.4} \right]$	$D_p = \frac{B_p}{20} \left( \frac{6B_p}{E} \right)^{\frac{1}{2}}$	$C_p = \frac{2B_p}{3D_p}$
<b>-T5, -T6, -T7, -T8 o -T9</b>	$B_p = F_{cy} \left[ 1 + \frac{(F_{cy})^{\frac{1}{3}}}{47.1} \right]$	$D_p = \frac{B_p}{10} \left( \frac{B_p}{E} \right)^{\frac{1}{2}}$	$C_p = 0.41 \frac{B_p}{D_p}$

Si la columna está en el régimen de pandeo elástico ( $b/t > S_2$ ) la expresión que se usa es la ecuación 3.19, una expresión similar a la ecuación de pandeo elástico de Euler, la forma general de la ecuación esta presentada en la ecuación 3.23.

$$\emptyset F_L = \frac{\emptyset_c \pi^2 E}{\left( 5.1 \frac{b}{t} \right)^2} \quad (3.19)$$

$\emptyset F_L$  = Es el esfuerzo de diseño por pandeo elástico

$\emptyset_c$  = Factor de resistencia = 0.85

Las expresiones para calcular las relaciones de aspecto  $S_1$  y  $S_2$  varían dependiendo del eje donde se presente el pandeo global de la columna, es decir, de si el pandeo se presenta con

respecto a un eje de simetría o con respecto a un eje no simétrico y de la manera en que están apoyadas las placas. Para placas que están apoyadas a lo largo de uno solo de sus bordes y el pandeo global se presenta con respecto a un eje que no es de simetría, las expresiones para las relaciones de aspecto  $S_1$  y  $S_2$  son:

$$S_1 = \frac{B_p - \frac{\phi_y}{\phi_c} F_{cy}}{5.1 D_p} \quad (3.20)$$

dónde:

$B_p$  = Constante de pandeo cuya expresión se puede obtener de la tabla 3.6 o 3.7

$\phi_y$  = Factor de resistencia = 0.95

$\phi_c$  = Factor de resistencia = 0.85

$F_{cy}$  = Esfuerzo de fluencia a compresión

$D_p$  = Constante de pandeo cuya expresión se puede obtener de la tabla 3.6 o 3.7

$$S_2 = \frac{C_p}{5.1} \quad (3.21)$$

dónde:

$C_p$  = Es la relación de aspecto donde se intersectan las curvas de pandeo inelástico y de pandeo elástico.

Si la placa está apoyada a lo largo de uno solo de sus bordes y el pandeo global se presenta con respecto a un eje de simetría solo varia la ecuación de  $S_2$ .

$$S_2 = \frac{k_1 B_p}{5.1 D_p} \quad (3.22)$$

**Resistencia de Post-Pandeo** La resistencia de post - pandeo se presenta principalmente en placas esbeltas que están unidas a otras que son más robustas, ya que la diferencia de rigideces hace que se presente una distribución de esfuerzos no uniforme. Es decir las placas que tienen mayor rigidez atraen mayor carga, contribuyendo a un aumento de resistencia. En las secciones compactas de los elementos de acero, los componentes poseen rigideces muy similares entre sí, de manera que la distribución de esfuerzos es más uniforme, evitando que se presente el fenómeno de pandeo local. En la figura 3.11 se muestran tres configuraciones para el armado de una columna I, si empezamos a cargar la columna (a) de la figura, la carga se empezará a distribuir uniformemente a lo largo de toda la sección transversal de la columna, si empezamos a incrementar la carga, los patines

empezaran a pandearse en el rango elástico del material, los patines que están pandeados empezaran a reducir el área efectiva que resiste la carga y la empezaran a transmitirla hacia la unión entre el patín y el alma, a medida que la carga se incrementa en la unión, el área de los patines sigue disminuyendo hasta que la sección falla. Esto permite que el alma de la columna pueda tener un comportamiento de pandeo elástico, un comportamiento que no podrían tener la viga (b) o la viga (c).

Del comportamiento anterior podemos concluir que la resistencia de post-pandeo, le permite a la columna tener una resistencia adicional, pero reduciendo el área efectiva de la sección. Esta condición puede requerir que las capacidades que fueron calculadas con las condiciones completas de la sección transversal sean recalculadas, como por ejemplo la resistencia de pandeo global de la columna o su deflexión.

De hecho, el MDA permite la resistencia de post-pandeo únicamente cuando el pandeo global de una columna se presenta con respecto a un eje de simetría. Esto se debe a que el MDA considera que la carga que actúa sobre la columna esta aplicada sobre el eje neutro de la sección y que la reducción del área debido al pandeo local del componente es la misma hacia cualquier lado del eje de pandeo global (figura 3.12). Por lo tanto en el caso de que se presente el pandeo global, el eje neutro no se moverá y no occasionará cargas adicionales sobre la sección debido al momento provocado por el pandeo global. Por lo tanto en secciones cuyo eje de pandeo sea un eje de simetría y tenga relación de aspecto mayor a  $S_2$ , se aceptara una resistencia de post-pandeo, cuya expresión de acuerdo al MDA es la siguiente.

Para placas apoyadas únicamente a lo largo de uno de sus bordes:

$$\emptyset F_L = \frac{\emptyset_c k_2 \sqrt{B_p E}}{\left(5.1 \frac{b}{t}\right)^2} \quad (3.23)$$

dónde:

$\emptyset F_L$  = Esfuerzo de diseño para régimen de post- pandeo

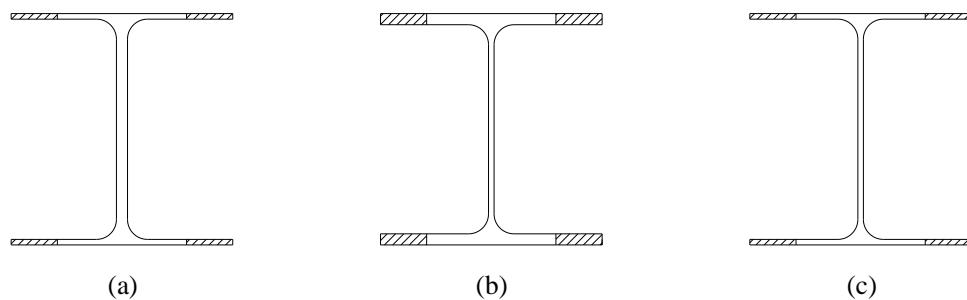
$\emptyset_c$  = Factor de resistencia = 0.85

$k_2$  = Coeficiente para determinar el esfuerzo de diseño a compresión

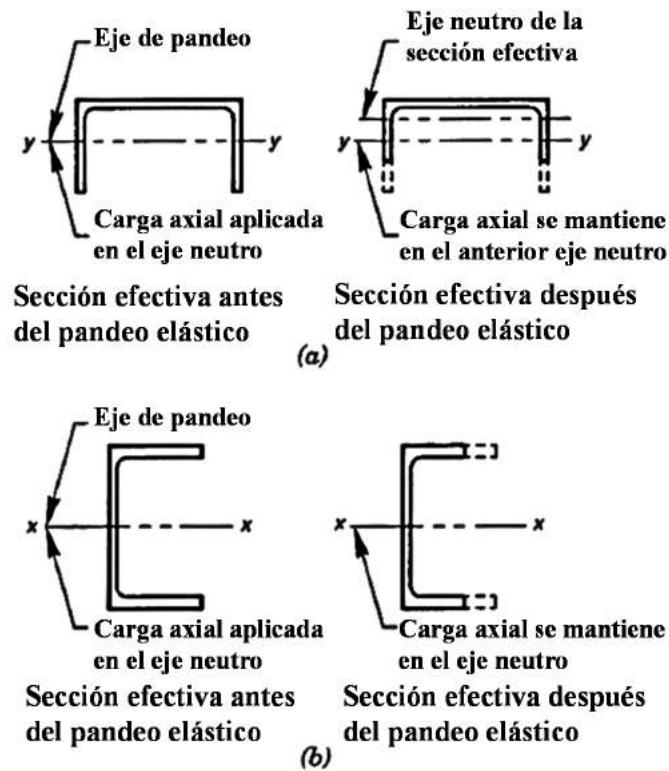
$B_p$  = Constante de pandeo cuya expresión se puede obtener de la tabla 3.6 o 3.7

$E$  = Módulo de elasticidad del Aluminio

$b/t$  = Relación de aspecto



**Figura 3.11 Perfiles con diferente configuración de componentes esbeltos en la condición de post-pandeo**



**Figura 3.12 (a) condición en la que la resistencia de post-pandeo no está permitida (b) la condición en la que sí está permitida**

De acuerdo con la solución del problema de inestabilidad por pandeo elástico de placas, la forma de la ecuación es la siguiente (de Buen, 1978):

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{12(1 - \nu^2) \left(\frac{b}{t}\right)^2 k} \quad (3.24)$$

dónde:

$E$  = módulo de elasticidad

$\nu$  = módulo de Poisson

$\frac{b}{t}$  = relación de aspecto de la placa

$k$  = factor de placa que depende de sus condiciones de apoyo.

Este factor de placa tiene el valor de  $k = 4$  cuando la placa tiene apoyos libres en dos de sus lados (almas) y  $k = 0.425$  cuando tiene un borde libre y otro apoyado libremente (patines). Si sustituimos el valor de  $k = 0.425$  en la ecuación 3.24 se obtendrá la ecuación 3.19 en la que se multiplica la relación de aspecto por 5.1. Ahora se estarán preguntando ¿si sustituyo el valor de  $k = 4$ ? obtendré la ecuación para obtener la resistencia de pandeo elástico del alma. Esto es cierto y se obtendría la ecuación 3.26, pero hay que recordar que el MDA permite la resistencia de post-pandeo, si el pandeo se genera alrededor de un eje de simetría, y dado que se supone que las cargas siempre pasan por el eje neutro (que coincide con cualquier eje de simetría), la ecuación de resistencia que proporciona el MDA es la ecuación de resistencia de post-pandeo. Estos factores  $k$  también afectan a los límites  $S_1$  y  $S_2$ , por lo tanto si se quieren obtener las ecuaciones, solo se necesita cambiar en las ecuaciones 3.20 y 3.22 el factor de 5.1 por el de 1.6

$$\emptyset F_L = \frac{\emptyset_c k_2 \sqrt{B_p E}}{1.6 \frac{b}{t}} \quad (3.25)$$

Esta resistencia de post-pandeo que es mayor a la resistencia de pandeo elástico, permite a la placa soportar más carga una vez que está pandeada, sin embargo, cuando esta deformación debida al pandeo no es permitida (debido a razones estéticas), el MDA solo permite que la placa alcance la resistencia de pandeo elástico de Euler. Así por ejemplo para una placa cuyo eje de pandeo global es simétrico y está apoyada en dos de sus bordes, tenga la posibilidad de alcanzar el esfuerzo de post-pandeo, si la deformación no está permitida, el esfuerzo estará definido por la siguiente ecuación:

$$\emptyset F_L = \frac{\emptyset_c \pi^2 E}{\left(1.6 \frac{b}{t}\right)^2} \quad (3.26)$$

Las ecuaciones 3.19 y 3.26 aparecen en la Tabla 4.7.1-1 del MDA y son usadas solo cuando se requiere utilizar el método del ancho efectivo para el cálculo de desplazamientos en secciones de perfil laminado, o cuando se requiera hacer el cálculo de la interacción entre el pandeo local y el pandeo global de una columna. Estos métodos se explicaran más adelante.

El MDA obliga a calcular la resistencia a compresión tanto en la sección total, como las de las placas que la conforman, y utilizar la menor de estas. Utilizando este criterio sería muy común que la mínima resistencia obtenida sea la de la placa, resultando en un diseño muy conservador. Por esta razón, el MDA ofrece una alternativa para el cálculo de la resistencia llamada el método ***esfuerzo de compresión axial promedio ponderado***. Este método determina el esfuerzo de diseño de pandeo local, como el esfuerzo de diseño promedio ponderado de cada componente de la sección, donde el esfuerzo de diseño de cada componente es ponderado con respecto a la relación del área del componente con el área total de la sección. Tal vez una manera de entender esto es considerando que este es un método mediante el cual, la resistencia de cada componente es calculado, y la resistencia de la sección es tomada como la suma de la resistencia de sus componentes.

La resistencia de diseño promedio ponderado se determina mediante la siguiente ecuación:

$$F_{ac} = \frac{F_{c1}A_1 + F_{c2}A_2 + \dots + F_{cn}A_n}{A} \quad (3.27)$$

donde:

$A_i$  = área del componente  $i$

$F_{ci}$  = esfuerzo de diseño del componente  $i$

$A$  = área de la sección total =  $(A_1 + A_2 + \dots + A_n)$

$F_{ca}$  = esfuerzo de diseño promedio ponderado

Este esfuerzo de diseño no debe ser mayor al esfuerzo de diseño obtenido a partir de las ecuaciones 3.7 y 3.9.

**Método de ancho efectivo** El método de ancho efectivo que propone el MDA, se usa únicamente para el cálculo de deflexiones de secciones con componentes muy esbeltas (como es el caso de las secciones laminadas en frío), y en condiciones de post-pandeo, es decir cuando la sección tiene una relación de aspecto mucho mayor a  $S_2$ . Cabe aclarar que cuando el componente tenga una relación de aspecto apenas por encima de  $S_2$ , se podrá utilizar un método convencional para el cálculo de la deflexión. Este método consiste en el cálculo de un ancho efectivo debido a la redistribución de esfuerzos cuando la sección ha sufrido un pandeo, el MDA proporciona la siguiente ecuación.

$$b_e = b\sqrt{F_{cr}/f_a} \quad (3.28)$$

dónde:

$b_e$  = ancho efectivo de un componente

$b$  = ancho del componente

$F_{cr}$  = esfuerzo de pandeo local por componente

$f_a$  = esfuerzo de compresión por componente debido a las cargas sin factorizar

Esta ecuación permitirá el cálculo de las propiedades de la sección, tales como el momento de inercia, y así poder calcular desplazamientos más exactos de los que se podrían calcular utilizando las propiedades de la sección completa. Si los desplazamientos se hicieran con las propiedades de la sección antes del pandeo, se obtendrían unos desplazamientos menores a los calculados con la sección reducida.

**Interacción entre el pandeo local y el pandeo global** Debido a la reducción de área que se genera durante a condición de post-pandeo, los esfuerzos se incrementan en las zonas de la sección transversal sin deformación, haciendo que la columna sea más susceptible al pandeo global. Por lo tanto es necesario revisar la interacción entre el pandeo local y el pandeo global, el cual se puede calcular usando la sección 4.7.4 del MDA.

### 3.4 Elementos a flexión

Así como en la práctica podemos encontrarnos elementos estructurales en los que actúan cargas axiales ya sean de tensión o de compresión (en cualquier variante que uno se imagine), también podemos encontrarnos elementos en los cuales pueden actuar cargas transversales a su eje longitudinal. Generalmente a estos elementos estructurales los conocemos como vigas, largueros, viguetas dinteles o trabes. Cabe aclarar que aunque hagamos referencia a vigas para tratar el tema de flexión, los fenómenos que aquí se expliquen son aplicables a cualquier elemento estructural que esté sometido a una carga transversal a su eje longitudinal.

En una viga, que está sometida a flexión, ésta producirá en su interior cuatro tipos de esfuerzo, estos son esfuerzos de compresión (de un lado del eje neutro), esfuerzos de tensión (del otro lado de su eje neutro), esfuerzos cortantes y esfuerzos de torsión. Podremos ver como los temas de tensión y compresión tratados en los subcapítulos anteriores, serán muy útiles en este subcapítulo.

#### 3.4.1 Fluencia y fractura por flexión.

La manera de revisar los esfuerzos por flexión en una viga en el LRFD de Aluminio es diferente el LRFD de acero, el LRFD de aluminio permite hacer el cálculo de los esfuerzos mediante cualquier método de análisis elástico aceptado, en cambio el LRFD de acero permite hacer el cálculo de esfuerzos mediante los métodos de análisis no lineal o plástico. El método elástico nos permite conocer los esfuerzos generados por los momentos actuantes, a través de la ya conocida ecuación de la escuadría (ecuación 3.29). Esta ecuación se basa en las hipótesis elásticas usuales: el esfuerzo es proporcional a la deformación unitaria, y una sección plana se mantiene plana después de la flexión. El

recíproco del cociente  $I/c$  es una constante para una sección específica, y se le denomina módulo de sección ( $S$ ).

$$f_b = \frac{M_u c}{I} = \frac{M_u}{S} \quad (3.29)$$

dónde:

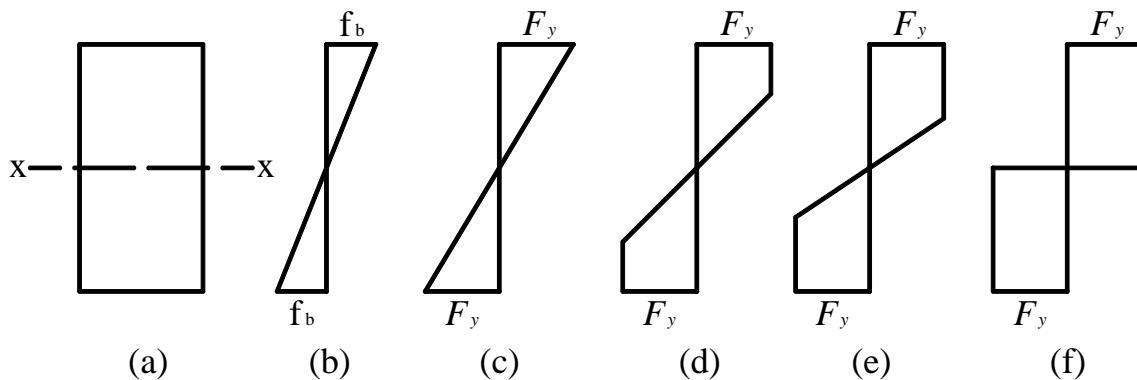
$f_b$  = es el esfuerzo debido a flexión en la fibra más alejada de la sección

$M_u$  = es el momento último actuando sobre la sección

$S_x$  = es el módulo de sección elástico alrededor del eje x

$c$  = es la distancia que hay del eje neutro a la fibra donde se desea conocer el esfuerzo.

$I$  = es el momento de inercia.



**Figura 3.13 Esfuerzos debidos al aumento del momento flexionante**

Si ponemos como ejemplo una viga de sección rectangular y a ésta le aplicamos un momento flexionante, éste provocará (de acuerdo a la hipótesis de secciones planas) una variación lineal de los esfuerzos, desde el eje neutro hasta la fibra más alejada. Este momento provocará inicialmente un esfuerzo en la fibra más alejada menor al esfuerzo de fluencia. Este efecto lo podremos observar en la figura 3.13 (b). Si aumentamos el momento hasta que la fibra más extrema llegue hasta el esfuerzo de fluencia, el diagrama de esfuerzos, se mantendrá con una distribución lineal (a este momento se le conoce como momento de fluencia) y las fibras más cercanas al eje neutro tendrán un esfuerzo menor al de fluencia (figura 3.13 (c)). Cuando aumentamos el momento flexionante más allá del momento de fluencia, las fibras que se encontraban con el esfuerzo de fluencia, mantendrán ese mismo estado y las fibras más cercanas al eje neutro empezarán a aumentar su esfuerzo hasta que alcancen el mismo esfuerzo de fluencia de la fibra extrema (figuras 3.13 (d) y (e)). Hay que tener muy en cuenta que la resistencia adicional para poder resistir el momento posterior al momento de fluencia la aportan las fibras más cercanas al eje neutro. Una vez que todas las fibras han alcanzado el esfuerzo de fluencia se obtendrá un diagrama

de esfuerzos como el de la figura 3.13 (f) y se podrá decir que se generó una articulación plástica en la sección y no se podrá resistir ningún momento adicional. Cualquier momento adicional que se aplique a la sección, causará una rotación en la viga con poco incremento de esfuerzo.

Para que se pueda formar una articulación plástica, las secciones deben de ser compactas (este es un término que se manejó en la sección de compresión), las cuales de acuerdo a las especificaciones de acero, deben de ser lo suficientemente robustas como para que desarrollen una distribución de esfuerzos totalmente plastificada antes de que se pandee localmente. Sin embargo, existen otras condiciones necesarias para que esta distribución de esfuerzos se pueda presentar, estas son: que la longitud entre dos puntos que impidan el pandeo lateral del elemento este dentro de ciertos límites, y que los esfuerzos adicionales que se puedan presentar (cortante, torsión y cargas axiales) no sean tan grandes, como para que lleven a la falla un elemento estructural antes que éste genere una articulación plástica. Una vez cumplidos estos requisitos el Manual de diseño de Acero del AISC, permite el uso de la ecuación 3.30, para determinar el momento de plastificación en una sección.

$$M_n = M_p = F_y Z \quad (3.30)$$

dónde:

$M_n$  = momento nominal

$M_p$  = momento plástico

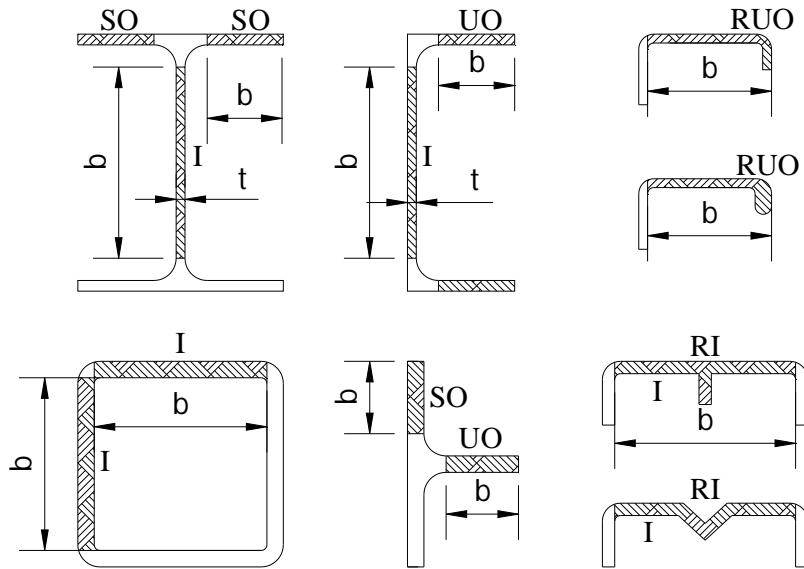
$F_y$  = esfuerzo de fluencia

Z = módulo de sección plástico

Aunque en el MDA existen secciones lo suficientemente robustas (debido a su proceso de extrusión) que pueden desarrollar articulaciones plásticas, el LRFD del MDA no proporciona un criterio para determinar las dimensiones de patines y almas de secciones compactas. Clark (1968) (p. 109, Sección 10-12) propone límites de relación de esbeltez para elementos de perfil I, canal, tubo y otros perfiles para flexión plástica que impediría el pandeo local, pero esto no ha sido incorporado en la Especificación de Aluminio (Kissell, 2002). El Eurocódigo 09 (p. 168) proporciona criterios para clasificar secciones capaces de formar una articulación plástica en su anexo G.

En este documento presentaremos los requisitos que propone el Eurocódigo 09, pero con una observación importante: ***no es aplicable con las disposiciones del MDA que mencionamos aquí.*** Debido a que el Eurocódigo presenta 48 aleaciones que no todas coinciden con todas las que aparecen en el MDA y que los factores de resistencia y carga tampoco son los mismos.

Para el Eurocódigo 09 las secciones de aluminio también se estudian por medio de placas, que de acuerdo a su posición dentro la sección, se clasifican en: simétricas externas (SO), asimétricas externas (UO), Internas (I), reforzadas internas (RI) y reforzadas asimétricas externas (RUO) (Figura 3.14). Estas placas tienen un factor de forma  $\beta$  que al igual que en secciones de acero, deben de cumplir con determinado valor para determinar si la sección es compacta o esbelta.



**Figura 3.14 Clasificación de las partes de una sección de acuerdo con el eurocódigo 09**

Las condiciones que el Eurocódigo 9 presenta para el factor de forma, dependen del tipo de placa y a la distribución de esfuerzo que actué sobre ella. En este documento solo presentamos las condiciones para placas sin atiesadores:

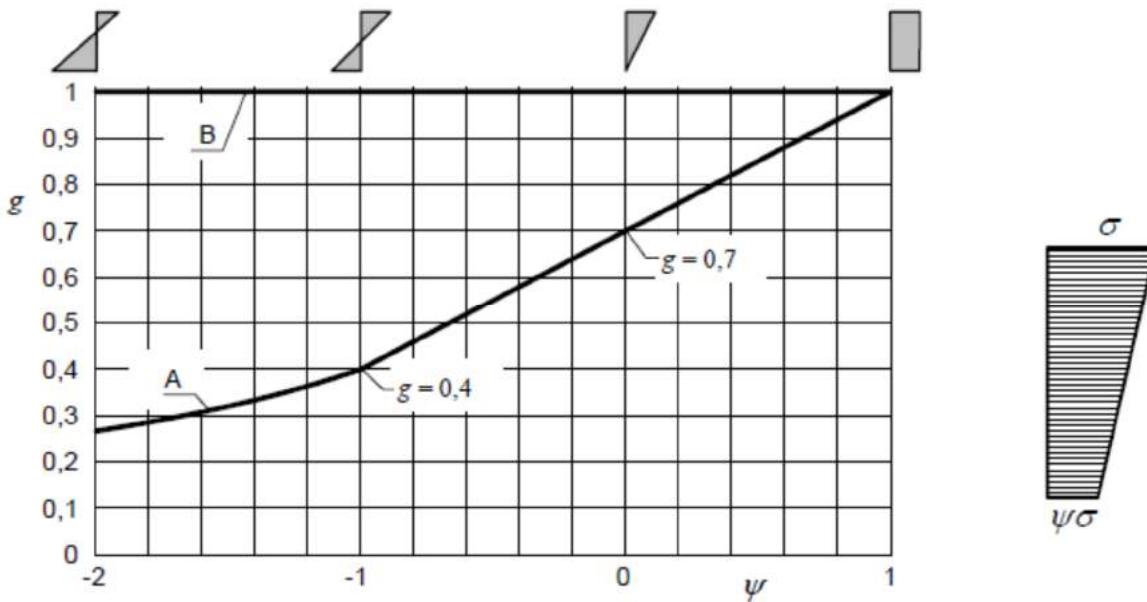
- Partes internas planas sin gradiente de esfuerzos o partes externas planas sin gradiente de esfuerzos o un máximo de compresión en la punta. Se calcula como  $\beta = b/t$
- Partes internas con un gradiente de esfuerzos cuyo eje neutro pase por el centro de la sección. Se calcula como  $\beta = 0.4b/t$
- Partes internas con gradiente de esfuerzos o partes externas con un máximo de compresión en la raíz. Se calcula como  $\beta = gb/t$

Los factores  $b$  y  $t$  son el ancho y el espesor respectivamente de la placa. El factor  $g$ , lo define el Eurocódigo 09 como un factor de gradiente de esfuerzo, que depende de  $\psi$  que es la relación que existe entre los esfuerzos en los bordes de la placa en consideración, con el esfuerzo máximo de compresión. Este factor  $g$  tiene un valor de 1 para partes externas con un máximo de compresión en la punta, y para partes internas o externas con un máximo de

compresión en la raíz,  $g$  está definido por las rectas que se presentan en las siguientes ecuaciones y en la figura 3.15:

$$g = 0.7 + 0.3 \psi \quad \text{para} \quad (1 > \psi > -1)$$

$$g = \frac{0.80}{(1-\psi)} \quad \text{para} \quad (\psi \leq -1)$$



**Figura 3.15 Valores de  $g$ , para partes internas planas con gradiente de esfuerzos**

Las relaciones de aspecto calculadas para cada placa que conforma la sección, serán comparadas con los valores de  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  y  $\beta_3$  de la tabla 3.8, de acuerdo con el tipo de parte de la sección y con el tipo de material. La clasificación del material se puede encontrar en la tabla 3.2 del Eurocódigo 09.

**Tabla 3.8 Parámetros de esbeltez  $\beta_1/\varepsilon$ ,  $\beta_2/\varepsilon$  y  $\beta_3/\varepsilon$**

Clasificación del Material	Parte interna			Parte externa		
	$\beta_1/\varepsilon$	$\beta_2/\varepsilon$	$\beta_3/\varepsilon$	$\beta_1/\varepsilon$	$\beta_2/\varepsilon$	$\beta_3/\varepsilon$
Clase A sin Soldadura	11	16	22	3	4.5	6
Clase A con Soldadura	9	13	18	2.5	4	5
Clase B sin Soldadura	13	16.5	18	3.5	4.5	5
Clase B con Soldadura	10	13.5	15	3	3.5	4
$\varepsilon = \sqrt{250/f_y}$ , $f_y$ en $N/mm^2$						

El criterio que utiliza el Eurocódigo 09 para clasificar las secciones de aluminio en vigas es el siguiente:

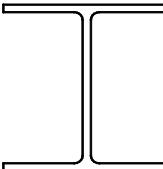
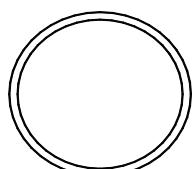
- 1) Si el factor de forma de todas las partes de la sección cumplen con la relación  $\beta \leq \beta_1$ , se clasifica como una sección clase 1 (sección dúctil). Esta sección puede formar articulaciones plásticas con una capacidad de rotación requerida para un análisis plástico sin reducción en la resistencia.
- 2) Si el factor de forma de todas las partes de la sección cumplen con la relación  $\beta_1 \leq \beta \leq \beta_2$ , se clasifica como clase 2 (sección compacta). Estas secciones pueden resistir un momento plástico pero tienen una capacidad de rotación limitada debido al pandeo local
- 3) Si el factor de forma de todas las partes de la sección cumplen con la relación  $\beta_2 \leq \beta \leq \beta_3$ , se clasifica como clase 3 (sección semi-compacta). En estas secciones las fibras extremas en compresión pueden alcanzar el esfuerzo de fluencia, pero el pandeo local es el responsable de evitar el desarrollo de una resistencia al momento plástico total.
- 4) Si el factor de forma de todas las partes de la sección cumplen con la relación  $\beta \geq \beta_3$ , se clasifica como clase 4 (sección esbelta). En estas secciones el pandeo local ocurrirá antes de que una o más partes alcancen el esfuerzo de fluencia.

Con esto vemos que si existe un criterio para que las secciones de aluminio puedan generar articulaciones plásticas. Sin embargo, una vez que la fluencia se presenta en todas las fibras, la fibra más alejada del eje neutro, será la primera en alcanzar el esfuerzo último iniciando el agrietamiento en la sección. Eventualmente las fibras más cercanas al eje neutro se irán agrietando hasta que toda la sección alcance la falla. Esto nos permite concluir: que la resistencia de una sección a flexión depende de cómo este distribuida la masa en una sección, por ejemplo, una sección I con patines extremadamente gruesos tendrá una resistencia mayor que una sección I común, pero una vez que alcance su estado de fluencia en el patín no tendrá una resistencia adicional a flexión. La segunda conclusión es que tanto la fluencia como la fractura son dos condiciones que limitan la resistencia a flexión.

La relación entre el momento plástico y el momento de fluencia se le conoce como factor de forma. Éste depende del perfil, del tipo de aleación, el temple y la condición de falla, y por lo tanto existe un factor de forma para la fluencia (definido anteriormente) y un factor de forma para la fractura el cual está definido por la relación entre el momento último que puede resistir la sección y el momento que provoca que la fibra extrema alcance primero el esfuerzo de fractura. Debido a que el tipo de aleación no tiene un efecto significativo en el factor de forma, el LRFD de Aluminio utiliza un pequeño conjunto de valores para cada perfil mostrados aquí en la tabla 3.9. Este factor de forma se multiplica por las resistencias de fluencia o tensión, para obtener una resistencia mayor en el comportamiento de una viga.

Tal vez ahora queda explicado el porqué de las constantes aplicadas a las ecuaciones en la tablas 3.1.

**Tabla 3.9 Tabla de factores de forma para vigas de aluminio**

Perfil	Factor para Fluencia	Factor para Fractura
	1.0	1.0
	1.17	1.24
	1.30	1.42

Estos factores de forma también son aplicados a los estados límite de fluencia a compresión. Estos se muestran a continuación en la tabla 3.10

**Tabla 3.10 Factores de forma aplicados a los estados límite de fluencia.**

Perfil	Perfiles estructurales flexionados alrededor su eje fuerte	Perfiles flexionados alrededor de su eje débil, placas rectangulares y barras sólidas	Tubos rectangulares	Tubos ovalados o redondos
Fluencia a compresión	$\phi F_L = \phi_y F_{cy}$	$\phi F_L = 1.3\phi_y F_{cy}$	$\phi F_L = \phi_y F_{cy}$	$\phi F_L = 1.17\phi_y F_{cy}$

Cuando el momento que está actuando en una sección de aluminio, no provoca un pandeo lateral. El MDA proporciona un método alternativo para poder determinar la resistencia de dicha sección de aluminio. Este método es el de Resistencia a Flexión Promedio Ponderada

### 3.4.2 Pandeo por Flexión

En la sección anterior se mencionaron los puntos necesarios para que una sección pueda desarrollar fluencia de manera uniforme en toda su área. Sin embargo, cuando no existen tales condiciones, la distribución de esfuerzos no es uniforme. Esto es causado principalmente por el esfuerzo de compresión debido a flexión, que como se explicó en la sección de compresión, la distribución del esfuerzo en un componente, está en función del tipo de apoyo y la relación de aspecto que ésta tenga. Para un componente sometido a compresión debido a flexión, el comportamiento es similar.

En un elemento sometido flexión que no puede desarrollar fluencia uniforme en su sección, se pueden presentar dos tipos de fenómenos. El primer fenómeno es cuando el esfuerzo de compresión provoca una redistribución de esfuerzos en la sección de manera que se genere fluencia en algunos pero no en todos los elementos de la sección. A este fenómeno se le conoce como pandeo inelástico (figura 3.16.a). El segundo fenómeno que se puede presentar, es cuando una sección lo suficientemente esbelta sometida a flexión, que alcanza determinado momento crítico ( $M_{cr}$ ), genera un esfuerzo de compresión, el cual provoca un efecto de pandeo lateral a lo largo de la longitud entre dos puntos de soporte lateral (figura 3.16.b). Este pandeo lateral se presentará, al mismo tiempo que las fibras de tensión tratarán de mantener recto el elemento. Estos dos comportamientos provocan un efecto de torsión. Por lo tanto a este fenómeno se le conoce como pandeo lateral o pandeo lateral torsionante.

Una vez que conocemos los tipos de falla que se puede presentar en una viga, tenemos que estudiar cuales son las condiciones en que se presentan estos fenómenos. Para empezar comenzaremos con el pandeo inelástico.

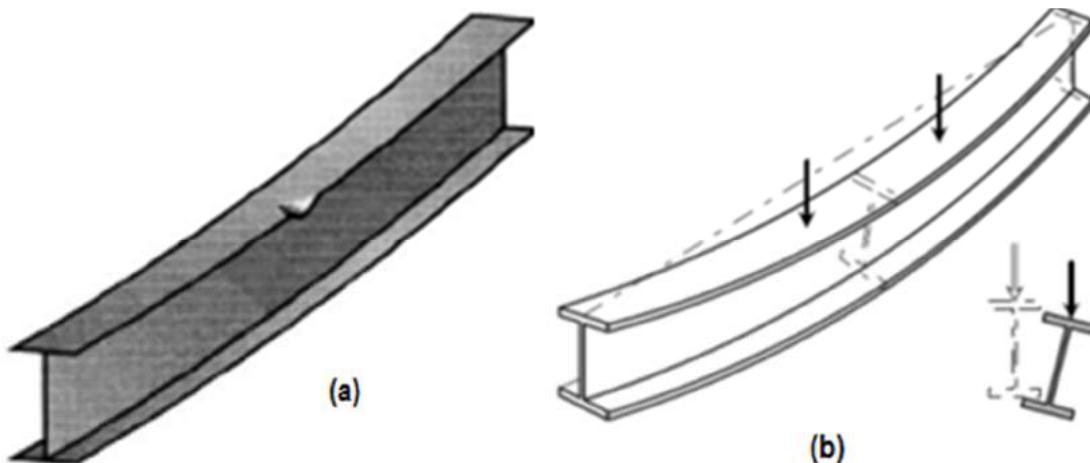
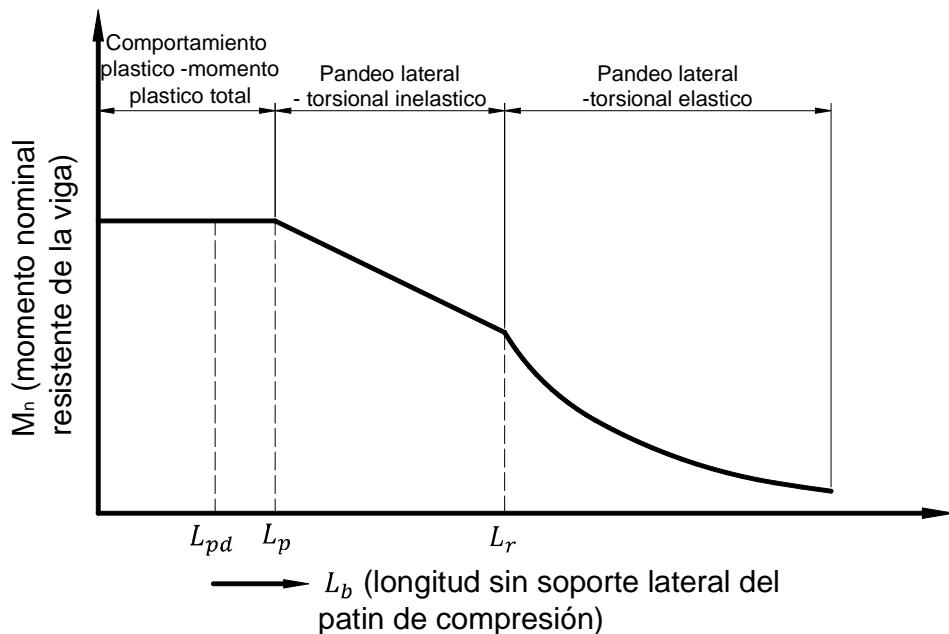


Figura 3.16 Tipos de falla de una viga

**Pandeo Inelástico** Al igual que como en columnas, donde el pandeo inelástico se presenta dependiendo de la longitud que tenga la columna, en una viga este fenómeno se presenta dependiendo de la longitud ( $L_b$ ) que exista entre los elementos de restricción lateral contra la torsión. El LRFD de acero, presenta tres límites en la longitud entre restricciones de una viga para poder determinar en qué tipo de comportamiento se encuentra una viga. En la figura 3.17 se presenta una gráfica mostrando el momento que resiste una viga en función de la longitud, esta grafica presenta tres límites, el primer límite es  $L_{pd}$  el cual marca la longitud máxima que puede tener una viga para poder presentar un comportamiento plástico (es decir, se genera una articulación plástica), éste límite se usa si se el diseño se va a realizar mediante un análisis plástico. El segundo límite que se presenta es  $L_p$  el cual también marca la longitud máxima que puede tener una viga para presentar un comportamiento plástico, sin embargo éste límite se usa cuando el diseño se va a realizar mediante un análisis elástico. El tercer límite es  $L_r$ , y si la longitud de libre de arriostramiento se encuentra entre  $L_p$  y  $L_r$ , la viga presentará un pandeo inelástico. Después de que la longitud ( $L_b$ ) sobrepasa el límite  $L_r$ , la viga tendrá un pandeo elástico.



**Figura 3.17 Momento nominal en función de la longitud no soportada lateralmente, del patín de compresión**

El AMD también presenta límites en la longitud ( $L_b$ ) para determinar el tipo de comportamiento de una viga. Estos límites son  $S_1$ , el cual representa la longitud máxima que puede tener una viga para que la fibra extrema en compresión presente fluencia. El otro límite es  $S_2$ , el cual junto con  $S_1$  generan un intervalo en el que se encuentran las longitudes

de una viga con un comportamiento de pandeo inelástico. Más allá del límite  $S_2$  se encuentran las vigas con comportamiento de pandeo elástico. Como en el tema de compresión,  $S_1$  y  $S_2$  dependen de unas constantes de pandeo inelástico  $B_c$ ,  $D_c$  y  $C_c$  (tablas 3.4 y 3.5), estas constantes corresponden para el caso de vigas con una sola alma y el caso de vigas de sección tubular. Para otros casos como el de flexión de vigas de sección rectangular y redonda sólidas, los límites  $S_1$  y  $S_2$  están en función de las constantes  $B_{br}$ ,  $D_{br}$  y  $C_{br}$ . Estas últimas constantes de pandeo inelástico, tienen las mismas expresiones para todos los templos y están en función de las propiedades del material  $F_{cy}$  y  $E$ , y las ecuaciones se muestran en las tablas 3.11 y 3.12. Los valores de estas constantes para cada aleación se encuentran en el apéndice D

**Tabla 3.11 Tabla de constantes de pandeo inelástico para compresión por flexión en placas [MPa]**

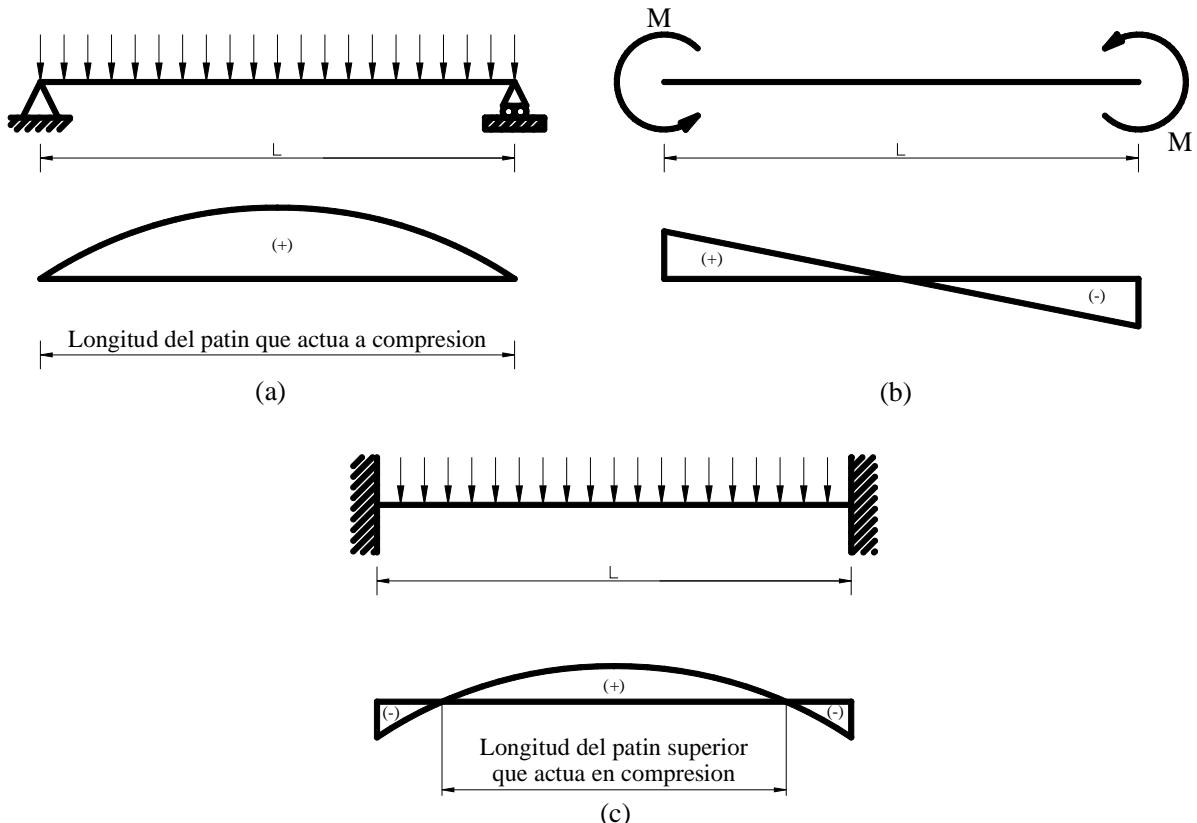
Tratamiento	Ordenada al origen	Pendiente	Intersección
-O, -H, -T1, -T2, -T3, -T4, -T5, -T6, -T7, -T8 o -T9	$B_{br} = 1.3F_{cy} \left[ 1 + \left( \frac{F_{cy}}{13.3} \right)^{\frac{1}{3}} \right]$	$D_{br} = \frac{B_{br}}{20} \left( \frac{6B_{br}}{E} \right)^{\frac{1}{2}}$	$C_{br} = \frac{2B_{br}}{3D_{br}}$

**Tabla 3.12 Tabla de constantes de pandeo inelástico para compresión por flexión en placas [kg/cm<sup>2</sup>]**

Tratamiento	Ordenada al origen	Pendiente	Intersección
-O, -H, -T1, -T2, -T3, -T4, -T5, -T6, -T7, -T8 o -T9	$B_{br} = 1.3F_{cy} \left[ 1 + \left( \frac{F_{cy}}{28.8} \right)^{\frac{1}{3}} \right]$	$D_{br} = \frac{B_{br}}{20} \left( \frac{6B_{br}}{E} \right)^{\frac{1}{2}}$	$C_{br} = \frac{2B_{br}}{3D_{br}}$

Otro aspecto que se debe tener en cuenta a la hora de diseñar, es la distribución del momento a lo largo de una viga, ya que la manera en que esté distribuido el momento en la viga, será la manera en que éste influirá en el pandeo inelástico o elástico. Por ejemplo, en una viga simplemente apoyada con una carga uniformemente repartida, el diagrama de momentos tendrá una mayor influencia en su pandeo inelástico o elástico, ya que este provocará esfuerzos de compresión a lo largo de toda su longitud (figura 3.18 a). En cambio, una viga con el mismo tipo de carga pero empotrada en ambos extremos, tendrá un diagrama de momentos con una longitud en compresión menor, por lo tanto el diagrama de momentos tendrá una menor influencia en el pandeo inelástico o elástico (figura 3.18 c). La

manera en que el MDA y el LRFD de acero, toman en cuenta la influencia de la forma del diagrama de momentos en la resistencia de una viga, es a través de un factor denominado factor de modificación de pandeo torsional-lateral ( $C_b$ ). Este factor lo utiliza el MDA para tomar en cuenta la reducción de la longitud del patín que está en compresión, debido a las condiciones de carga y apoyo. Esto lo podemos apreciar en la figura 3.18 b, en la que vemos una viga con una longitud de patín en compresión menor, que la longitud del patín en compresión de la viga de la figura 3.18 a.



**Figura 3.18 Longitud de afectación por compresión**

La expresión que utiliza el MDA para calcular el factor  $C_b$ , para el caso donde las secciones son doblemente simétricas, es la misma que utiliza el LRFD de acero en su decimotercera edición para secciones doblemente simétricas y secciones de simetría simple con un diagrama de momento con curvatura simple. Esta expresión se presenta aquí como la ecuación 3.31. Para otras condiciones el MDA proporciona valores  $C_b$  en las secciones 4.9.4.2, 4.9.4.3 y 4.9.4.4. Esta última proporciona valores de  $C_b$  para vigas en cantiliver con diferentes condiciones de carga.

$$C_b = \frac{12.5M_{max}}{2.5M_{max} + 3M_A + 4M_B + 3M_C} \quad (3.31)$$

dónde:

$M_{max}$  = Valor absoluto del momento máximo en el segmento sin arriostrar

$M_A$  = Valor absoluto del momento a una cuarta parte del segmento sin arriostrar

$M_B$  = Valor absoluto del momento a la mitad del segmento sin arriostrar

$M_C$  = Valor absoluto del momento a tres cuartas partes del segmento sin arriostrar

En la siguiente tabla se muestran los factores de esbeltez que usa el MDA dependiendo del tipo de elemento que se esté tratando.

**Tabla 3.13 Factor de esbeltez en columnas de acuerdo al tipo de elemento**

Tipo de esfuerzo	Tipo de componente	Factor de Esbeltez
Compresión en vigas, fibra extrema en la sección total	Vigas de una sola alma flexionadas alrededor de su eje fuerte	$\frac{L_b}{r_y \sqrt{C_b}}$
	Tubos redondos u ovalados	$\frac{R_b}{t}$
	Vigas de sección rectangular o redonda sólidas	$\frac{d}{t} \sqrt{\frac{L_b}{C_b d}}$
	Tubos rectangulares y secciones en caja	$\frac{L_b S_c}{C_b \sqrt{I_y J / 2}}$

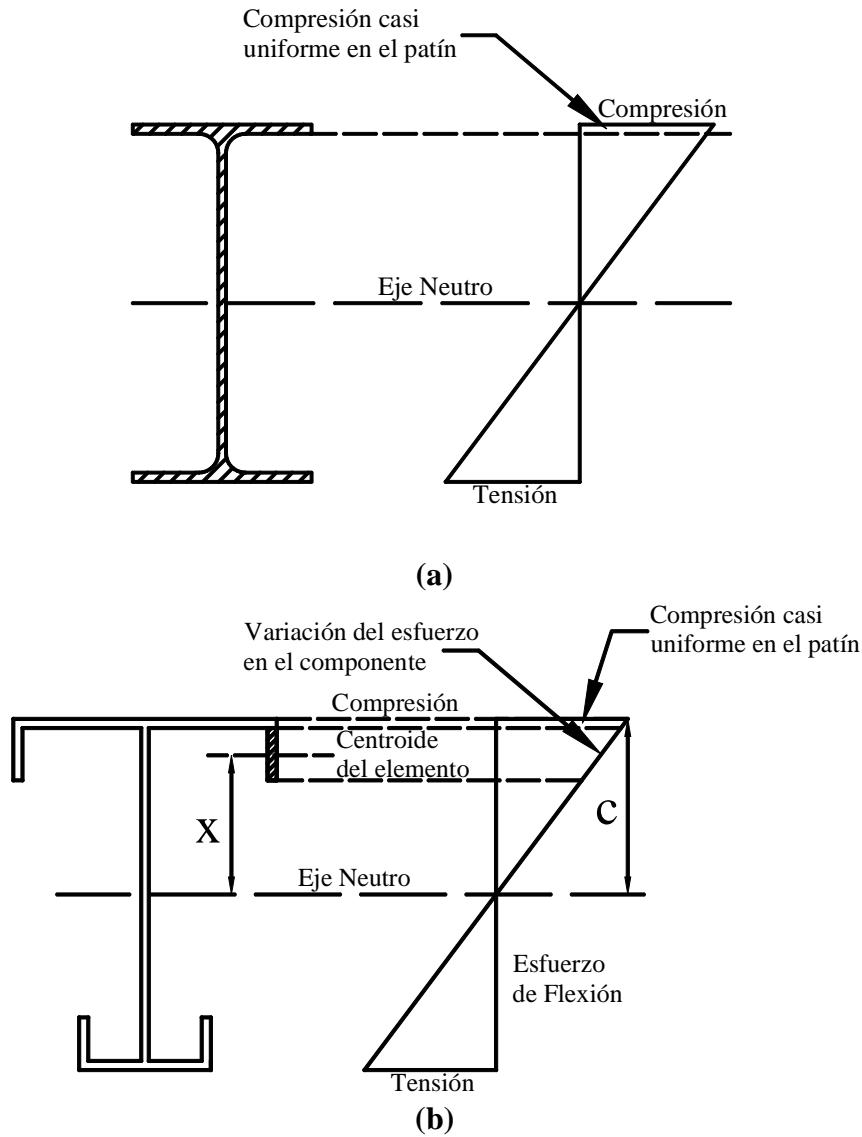
Cuando alguno de estos factores de esbeltez (correspondiente al tipo de componente de la tabla 3.14) está por debajo del límite  $S_1$ , el patín en compresión estará fluyendo, y la resistencia (esfuerzo de diseño  $\phi F_L$ ) estará dada por la ecuación que aparece en la columna que está a la izquierda de la columna *límite de esbeltez* ( $S_1$ ) de la tabla 3.14. Si el factor de esbeltez se encuentra entre los límites  $S_1$  y  $S_2$  el elemento tendrá un pandeo inelástico, y la resistencia estará definida por las ecuaciones correspondientes al tipo de componente que se encuentran en la columna anterior a la columna *límite de esbeltez* ( $S_2$ ) de la misma tabla. Cuando este factor esté por encima del límite  $S_2$  este tendrá un pandeo elástico (este último fenómeno lo explicaremos en la siguiente sección), la resistencia será calculada con las ecuaciones de la última columna.

**Tabla 3.14 Requerimientos generales de la especificación del MDA para pandeo de vigas**

Tipo de esfuerzo	Tipo de componente	Esfuerzo de Diseño $\phi F_L$	Límite de esbeltez ( $S_1$ )	Esfuerzo de Diseño $\phi F_L$	Límite de esbeltez ( $S_2$ )	Esfuerzo de Diseño $\phi F_L$
Compresión en vigas, fibra extrema en la sección total	vigas de una sola alma flexionadas alrededor de su eje fuerte	$\phi_y F_y$	$\frac{1.2 \left( B_c - \frac{\phi_y F_{cy}}{\phi_b} \right)}{D_c}$	$\phi_b \left[ B_c - \frac{D_c L_b}{1.2 r_y \sqrt{C_b}} \right]$	$1.2 C_c$	$\frac{\phi_b C_b \pi^2 E}{\left( \frac{L_b}{1.2 r_y} \right)^2}$
	Tubos redondos u ovalados	$1.17 \phi_y F_y$	$\left( \frac{B_{tb} - 1.17 F_{cy} \phi_y / \phi_b}{D_{tb}} \right)^2$	$\phi_b \left( B_{tb} - D_{tb} \sqrt{\frac{R_b}{t}} \right)$	$\left( \frac{B_{tb} - \frac{\phi_c}{\phi_b} B_t}{D_{tb} - \frac{\phi_c}{\phi_b} D_t} \right)^2$	$\frac{\phi_{cp} \pi^2 E}{16 \left( \frac{R_b}{t} \right) \left( 1 + \frac{\sqrt{R_b/t}}{35} \right)^2}$
	Vigas de sección rectangular o redonda sólidas	$1.3 \phi_y F_y$	$\frac{B_{br} - 1.3 \frac{\phi_y F_{cy}}{\phi_b}}{2.3 D_{br}}$	$\phi_b \left( B_{br} - 2.3 D_{br} \frac{d}{t} \sqrt{\frac{L_b}{C_b d}} \right)$	$\frac{C_{br}}{2.3}$	$\frac{\phi_b \pi^2 E C_b}{5.29 \left( \frac{d}{t} \right)^2 \frac{L_b}{d}}$
	tubos rectangulares y secciones en caja	$\phi_y F_y$	$\left( \frac{B_c - \frac{\phi_y F_{cy}}{\phi_b}}{1.6 D_c} \right)^2$	$\phi_b \left( B_c - 1.6 D_c \sqrt{\frac{L_b S_c}{C_b (\sqrt{I_y J/2})}} \right)$	$\left( \frac{C_c}{1.6} \right)^2$	$\frac{\phi_b \pi^2 E}{2.56 \left( \frac{L_b S_c}{C_b (\sqrt{I_y J/2})} \right)}$

Aunque con estas ecuaciones se puede determinar la resistencia que puede tener una viga, el MDA obliga a revisar los esfuerzos de diseño por componente sin importar el tipo de comportamiento que la viga tenga (fluencia, pandeo inelástico o pandeo elástico) y utilizar el menor de los esfuerzos de diseño (como en el caso de compresión simple). Sin embargo, existe una diferencia entre la compresión simple y la compresión por flexión, la cual consiste en la variación del esfuerzo a través de la sección. En compresión simple (columnas) el esfuerzo se puede considerar una compresión uniforme, el esfuerzo a través de una sección sometida a flexión varía de forma lineal. Por lo tanto, evaluar esfuerzos en secciones sometidas a flexión puede resultar en una tarea difícil. Para solucionar este problema el MDA presenta dos casos: aquel en el que los componentes de una sección a flexión, están sometidos a compresión uniforme y aquel en el que los componentes de la sección están sometidos a compresión debido a flexión en su propio plano. Para poder explicar esto proponemos una sección I sometida a flexión (figura 3.19a), en el que podemos ver que la variación del esfuerzo es lineal. En el patín en compresión podemos ver que la variación del esfuerzo a través de su espesor es mínima, por lo tanto podemos considerar que el esfuerzo a través del espesor es constante. Esta es una manera de simplificar el cálculo de los esfuerzos en elementos que están paralelos al eje neutro del elemento. Por otro lado, existen componentes perpendiculares al eje neutro con una variación de esfuerzo que no se puede considerar uniforme. Cuando la longitud de estos componentes es lo suficientemente grande, el componente se considera que está a flexión en su propio plano, la longitud es lo suficientemente corta el componente se puede considerar que tienen compresión uniforme. Pero entonces, ¿qué tan corto debe ser el componente para ser considerado bajo compresión uniforme? El MDA presenta en el Ejemplo 23 una “regla” que consiste primero en determinar la distancia desde el eje neutro al centroide del componente, y después multiplicar esa distancia por 1.3. Si el resultado es

igual o mayor a la distancia del eje neutro al borde apoyado del componente entonces, tratar al componente como en compresión uniforme, de lo contrario tratarlo como compresión por flexión en su propio plano (figura 3.19b).



**Figura 3.19 Suposición del esfuerzo de compresión en el patín de una viga I**

Las ecuaciones para determinar las resistencias en los componentes que conforman un elemento estructural sometido a compresión uniforme por flexión, son las mismas para componentes que conforman elementos estructurales bajo compresión uniforme. La única diferencia que se encuentra, es en el punto 3.4.16.1, que tiene que ver con elementos curvos apoyados en ambos ejes. Ya que para compresión uniforme de vigas, cuando la falla es por fluencia, la resistencia esta multiplicada por  $1.17\phi$ , mientras que para compresión uniforme

en columnas la resistencia solo está afectado por su factor de resistencia  $\emptyset$ , esto se debe a que la resistencia por flexión debe estar afectado por un factor de forma. Estas resistencias dependen únicamente de la relación de aspecto  $b/t$ , estén bajo compresión uniforme o compresión por flexión en el mismo plano.

**Tabla 3.15 Requerimientos para determinar el esfuerzo de diseño de componentes de vigas**

Tipo de esfuerzo	Tipo de componente	Esfuerzo de Diseño $\phi F_L$	Límite de esbeltez ( $S_1$ )	Esfuerzo de Diseño $\phi F_L$	Límite de esbeltez ( $S_2$ )	Esfuerzo de Diseño $\phi F_L$
Compresión uniforme, en componentes de viga	Componentes planos apoyados en un borde	$\emptyset_y F_{cy}$	$\frac{B_p - \frac{\emptyset_y F_{cy}}{\emptyset_b}}{5.1 D_p}$	$\emptyset_b \left[ B_p - 5.1 D_p \frac{b}{t} \right]$	$\frac{k_1 B_p}{5.1 D_p}$	$\frac{\emptyset_b k_2 \sqrt{B_p E}}{5.1 b/t}$
	Componentes planos apoyados en ambos bordes	$\emptyset_y F_{cy}$	$\frac{B_p - \frac{\emptyset_y F_{cy}}{\emptyset_b}}{1.6 D_p}$	$\emptyset_b \left[ B_p - 1.6 D_p \frac{b}{t} \right]$	$\frac{k_1 B_p}{1.6 D_p}$	$\frac{\emptyset_b k_2 \sqrt{B_p E}}{1.6 b/t}$
	Componentes curvos apoyados en ambos bordes	$1.17 \emptyset_y F_{cy}$	$\left( \frac{B_t - 1.17 \frac{F_{cy} \emptyset_y}{\emptyset_b}}{D_t} \right)^2$	$\emptyset_b \left( B_t - D_t \sqrt{\frac{R_b}{t}} \right)$	$C_t$	$\frac{\emptyset_{cp} \pi^2 E}{16 \left( \frac{R_b}{t} \right) \left( 1 + \frac{\sqrt{R_b/t}}{35} \right)^2}$
Compresión en componentes de vigas (flexión en su propio plano)	Componentes planos apoyados en el borde de tensión y el borde de compresión libre	$1.3 \emptyset_y F_{cy}$	$\frac{B_{br} - 1.3 F_{cy} \emptyset_y}{3.5 D_{br}}$	$\emptyset_b \left[ B_{br} - 3.5 D_{br} \frac{b}{t} \right]$	$\frac{C_{br}}{3.5}$	$\frac{\emptyset_b \pi^2 E}{3.5 (b/t)^2}$
	Componentes planos apoyados en ambos bordes	$1.3 \emptyset_y F_{cy}$	$\frac{B_{br} - 1.3 F_{cy} \emptyset_y}{m D_{br}}$	$\emptyset_b \left[ B_{br} - m D_{br} \frac{h}{t} \right]$	$\frac{k_1 B_{br}}{m D_{br}}$	$\frac{\emptyset_b k_2 \sqrt{B_{br} E}}{m h/t}$

Nota 1:  $C_t$  se determinará mediante la elaboración de las gráficas de esfuerzo de diseño para valores de  $R_b/t$  menores y mayores a  $S_2$  o mediante una solución por prueba y error

Nota 2:  $m = 1.15 + C_o/2C_c$  para  $-1 < C_o/C_c < 1$ ;  $m = 1.3/(1 - C_o/C_c)$  para  $C_o/C_c \leq -1$  donde  $C_c$ = distancia desde el eje neutro a la fibra extrema del componente con el esfuerzo de compresión más grande,  $C_o$ = distancia desde el eje neutro a la otra fibra extrema del componente

Usar el esfuerzo de diseño de un componente como el esfuerzo de diseño de toda la sección puede resultar algo conservador. Por lo tanto el MDA permite utilizar el método de resistencia de flexión promedio ponderado para poder determinar la resistencia de toda la sección. Este método consiste en ponderar el esfuerzo de cada componente de la sección por su respectivo módulo de sección. Con este método se producen esfuerzos de diseño mayores, que los obtenidos si solo ocupamos el menor de los esfuerzos de diseño de los componentes de la sección.

A diferencia del método de resistencia de compresión promedio ponderado, donde los esfuerzos de diseño de los componentes se ponderan por la relación del área del componente con el área total de la sección, el método de resistencia a flexión promedio ponderado, pondrá los esfuerzos de los componentes a compresión por su respectivo módulo de sección, obteniendo un momento de diseño por compresión (ecuación 3.32), y lo

compara con el momento de diseño a tensión (ecuación 3.33) obtenido de ponderar los esfuerzos de los componentes a tensión por su respectivo módulo de sección. El menor de estos momentos, será tomado como la resistencia de flexión promedio ponderado, para el caso de vigas que no están sujetas a pandeo lateral. Si las vigas están sujetas a pandeo lateral, estos momentos serán comparados con el momento obtenido a partir el esfuerzo de diseño a compresión de la sección completa (ecuaciones de tabla 3.14) y el módulo de sección de todo el perfil.

$$M_{ac} = \frac{F_{cf}I_f}{c_{cf}} + \frac{F_{cw}I_w}{c_{cw}} \quad (3.32)$$

dónde:

$M_{ac}$  = Momento de diseño a compresión

$F_{cf}$  = Esfuerzo de diseño a compresión para componentes planos en compresión uniforme

$F_{cw}$  = Esfuerzo de diseño a compresión para componentes planos en flexión sobre su propio plano.

$I_f$  = Momento de inercia del grupo de patín alrededor del eje neutro de toda la sección. El grupo de patín se conforma de los elementos planos en compresión uniforme y los elementos planos en tensión uniforme y sus atiezadores de borde y transversales.

$I_w$  = Momento de inercia del grupo de alma alrededor del eje neutro de toda la sección. El grupo de alma se conforma de los elementos planos en flexión en el mismo plano y sus atiezadores intermedios.

$c_{cf}$  = Distancia del centro de línea del patín de compresión al eje neutro de la sección completa.

$c_{cw}$  = Distancia de la fibra extrema en compresión del grupo de alma al eje neutro de la sección completa.

$$M_{at} = \frac{F_{tf}I_f}{c_{tf}} + \frac{F_{tw}I_w}{c_{tw}} \quad (3.33)$$

donde:

$F_{tf}$  = esfuerzo de diseño a tensión para elementos planos en tensión uniforme

$F_{tw}$  = esfuerzo de diseño a tensión para elementos planos en flexión en su propio plano

$c_{tf}$  = distancia de la fibra extrema en tensión al eje neutro de la sección transversal completa

$c_{tw}$  = distancia de la fibra extrema en tensión del grupo de alma al eje neutro de la sección transversal completa.

**Pandeo Elástico** Este tipo de pandeo al igual que en las secciones de acero, depende de la longitud de la viga, en el caso del acero si la longitud sin arriostramiento  $L_b$  es mayor al parámetro  $L_r$  se presentará este fenómeno, en el caso del aluminio se presentará si  $L_b$  es mayor a  $S_2$ . Sin embargo existen otras condiciones para que este fenómeno se presente, por ejemplo, este fenómeno se presentará solo en el caso de secciones cuyo momento de inercia con respecto a un eje sea mayor con respecto a otro eje perpendicular, es decir si  $I_x > I_y$ , y la sección esta flexionada con respecto a su eje mayor momento de inercia. Por lo tanto cuando una sección tiene un momento de inercia igual en ambos ejes el pandeo elástico no se presentará, como en el caso de las secciones tubulares cuadradas y circulares o cuando una sección de cajón rectangular esta flexionada con respecto a su eje de menor momento de inercia. Por lo anterior solo las secciones con  $I_x > I_y$  y flexionadas con respecto a su eje de mayor momento de inercia son las que se tratarán en esta sección.

Para determinar la resistencia a compresión de una sección sometida a flexión el MDA propone la ecuación 3.34 (Mostrada también en la tabla 3.14)

$$\phi F_L = \frac{\phi_b C_b \pi^2 E}{\left(\frac{L_b}{1.2r_y}\right)^2} \quad (3.34)$$

Esta es una ecuación simplificada, en la que por medio del factor de modificación de pandeo torsional-lateral  $C_b$ , se toma en cuenta la forma en que está distribuido el momento a lo largo de toda la viga, y con el factor  $1.2r_y$  se remplaza el uso de una ecuación más exacta y más compleja que toma en cuenta la resistencia a la torsión lateral. Sin embargo, si se requiere hacer un cálculo más exacto se puede sustituir  $r_y$  por un radio de giro efectivo con respecto al eje menor  $r_{ye}$  el cual toma en cuenta la resistencia a la rotación y a la deformación, las cuales están en función de las condiciones de apoyo y del tipo de carga. Este radio de giro  $r_{ye}$  define para secciones doblemente simétricas y secciones simétricas alrededor del eje de flexión, dos casos:

- 1.- Para revisar secciones en las restricciones o puntos de apoyo, o entre restricciones o puntos de apoyo, sujetas únicamente a cargas transversales aplicadas sobre el eje neutro o únicamente sujetas a momentos en los extremos

$$r_{ye} = \frac{1}{1.7} \sqrt{\frac{I_y d}{S_c} \sqrt{1 + 0.152 \frac{J}{I_y} \left( \frac{k_y L_b}{d} \right)^2}} \quad (3.35)$$

2.- Para revisar claros de vigas entre restricciones o puntos de apoyo, sujetas a cargas transversales aplicadas en al patín superior o inferior (donde la carga está libre de movimiento lateral con la viga cuando la viga se ha pandeado)

$$r_{ye} = \frac{1}{1.7} \sqrt{\frac{I_y d}{S_c} \left( \pm 0.5 + \sqrt{1.25 + 0.152 \frac{J}{I_y} \left( \frac{k_y L_b}{d} \right)^2} \right)} \quad (3.36)$$

dónde:

$r_{ye}$  = radio de giro efectivo usado en la Sección 3.4.11 de la Especificación en lugar de  $r_y$

$C_b$  = coeficiente de momento de flexión (discutido anteriormente)

$I_y$  = momento de inercia del eje menor de la viga

$S_c$  = modulo de sección del lado de la compresión de la viga para flexión del eje mayor.

$J$  = constante de torsión de la sección transversal

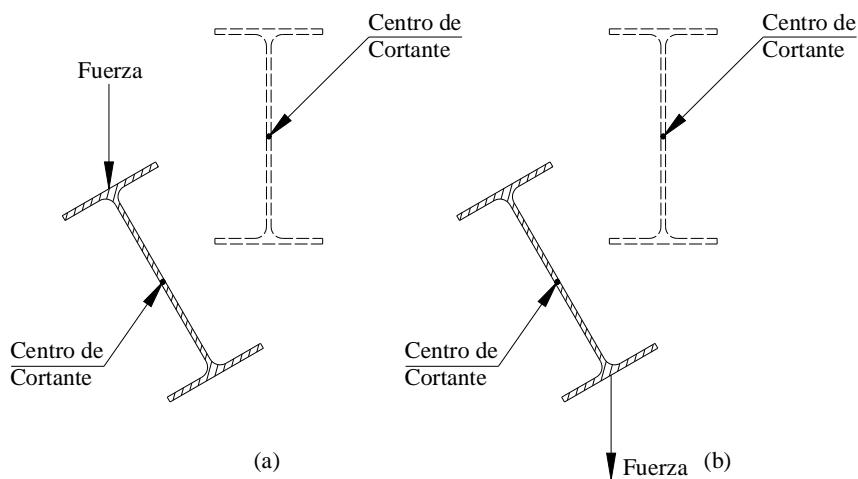
$k_y$  = coeficiente de longitud efectiva para el patín de compresión alrededor del eje menor

$L_b$  = longitud de la viga entre puntos de arriostramiento o entre un punto de arriostramiento y un extremo libre de una viga en cantiléver: Los puntos de arriostramiento son los puntos en los que el patín de compresión está restringido contra el movimiento lateral o torsión.

$d$  = profundidad de la viga.

En las ecuaciones anteriores, la longitud sin arriostrar esta multiplicada por un factor de longitud efectiva  $k_y$ , el cual depende de la restricción contra la rotación respecto al eje menor en los extremos de la longitud sin arriostrar. Cuando los extremos están articulados  $k_y = 1$ , si los extremos están restringidos contra la rotación  $k_y = 0.5$ . Sin embargo, en la práctica es muy difícil de lograr, por lo tanto el MDA restringe el valor de  $k_y = 1$ .

Como se mencionó anteriormente el otro aspecto que influye en la rotación de una sección, es la manera en que se aplica una fuerza. Por ejemplo, en la figura 3.20a se muestra una sección con una fuerza en el patín superior, esta sección será más susceptible a generar torsión debido que la fuerza ayudará a la torsión, en cambio en la figura 3.20b presenta una sección con una fuerza en el patín inferior, esta fuerza ayudará a enderezar la sección. Por lo tanto, para determinar la influencia que tiene la aplicación de una fuerza en la rotación de una sección, la ecuación 3.36 presenta los signos  $\pm$  en frente de 0.5 dentro del primer radical. Si la fuerza actúa en dirección al centro de cortante, se usa el signo menos en la ecuación 3.36. Si la fuerza actúa “alejándose” del centro de cortante, se usa el signo positivo.



**Figura 3.20 Influencia de la aplicación de las cargas en la torsión de una viga**

Al igual que en compresión, la resistencia de pandeo elástico que tienen los elementos a flexión depende del módulo de elasticidad y de la longitud del elemento. En este documento se presentan en el apéndice F las gráficas donde se comparan las resistencias que se pueden obtener en vigas de aluminio y acero con la misma sección transversal y para diferentes longitudes. En ellas se puede observar que debido a que el módulo de elasticidad es del orden de un tercio de la del acero la resistencia a flexión en elementos de aluminio es mucho menor que en acero. Como se observó en elementos a compresión mientras más cortos sean los elementos a flexión tenderán a acercarse a la resistencia del acero debido a que la resistencia depende de la resistencia de fluencia  $F_{cy}$ .

**Iteración entre el pandeo local y el pandeo lateral** Al igual que en las columnas, donde la resistencia de pandeo lateral tiene que ser reducida por los efectos del pandeo local. En las vigas su resistencia también tiene que ser reducida por los efectos de pandeo local de sus elementos de compresión. Sin embargo, existen diferencias a la hora de revisar este efecto, ya que en columnas, este es una consecuencia del uso de la resistencia de post-pandeo de sus elementos (como pueden ser los patines), en el caso de vigas este efecto solo se tiene que revisar en vigas de alma simple, y cuando se cumple la relación:

$$\phi_y F_{cr} < \phi F_L$$

dónde:

$\phi_y$  = factor de resistencia para fluencia = 0.95

$F_{cr}$  = esfuerzo de pandeo local dado en la sección 4.7.1 del MDA

$F_L$  = esfuerzo de diseño de una viga dado en la sección 3.4.11 o 4.9 del MDA

Cuando esta relación se cumple, la resistencia de diseño no podrá ser mayor a:

$$\phi F_{rb} = \phi_y (F_{eb})^{1/3} (F_{cr})^{2/3} \quad (3.37)$$

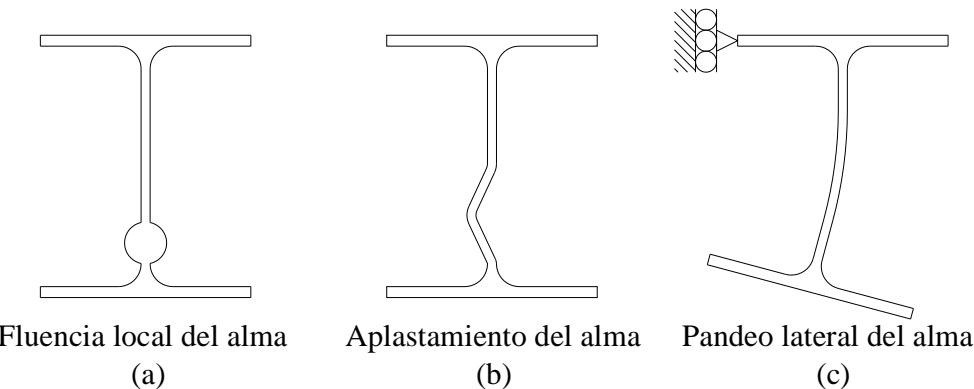
dónde:

$F_{eb}$  = esfuerzo de pandeo lateral elástico de la viga calculada con la ecuación:

$$F_{eb} = \frac{\phi_b C_b \pi^2 E}{\left(\frac{L_b}{1.2 r_y}\right)^2} \quad (3.38)$$

Usando  $\phi_b=1$  o usando el radio de giro efectivo (ecuaciones 3.35 y 3.36).

**Inestabilidad del alma** En la práctica, las vigas están sometidas a esfuerzos de flexión y cortante simultáneamente, sin embargo para fines prácticos de diseño se supone que el alma está sometida a la acción de la mayor de las solicitudes flexión o cortante, ignorando el efecto de la otra. Pero cuando las acciones de flexión o cortante tienen intensidades elevadas en una misma zona, (por ejemplo, cuando se tienen cargas concentradas cerca de los apoyos de una viga) se pueden originar fallas en el alma. Esto origina que se revisen las posibles fallas que pueda tener el alma de una viga bajo cargas concentradas. Para el LRFD de acero las fallas que trata son las siguientes: la fluencia local del alma (figura 3.21a), el aplastamiento del alma (figura 3.21b) y el pandeo lateral del alma (figura 3.21c).



**Figura 3.21 Fallas por inestabilidad en el alma**

En el MDA solo se trata el fenómeno de aplastamiento local del alma, ya que los otros fenómenos se revisan (aunque no con el mismo nombre) cuando se determina la resistencia por componente de la sección. Para este tipo de falla, el MDA no permite que las fuerzas cortantes interiores del alma sean mayores al valor establecido por la siguiente ecuación:

$$\phi P_L = \frac{\phi_w C_{wa}(N + C_{w1})}{C_{wb}} \quad (3.39)$$

Y para reacciones en los extremos y cargas concentradas la fuerza máxima que permite el MDA es:

$$\phi P_L = \frac{1.2\phi_w C_{wa}(N + C_{w2})}{C_{wb}} \quad (3.40)$$

dónde:

$$C_{wa} = t^2 \operatorname{sen}\theta (0.46F_{cy} + 0.02\sqrt{EF_{cy}})$$

$$C_{wb} = C_{w3} + R_i(1 - \cos\theta)$$

$$C_{w1} = 14 \text{ cm}$$

$$C_{w2} = 3.3 \text{ cm}$$

$$C_{w3} = 1.0 \text{ cm}$$

E = módulo de elasticidad a compresión del alma

$F_{cy}$  = resistencia de fluencia a compresión

$\phi P_L$  = fuerza de diseño transversal por alma para almas planas

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

$R_i$ : Para perfiles hechos por doblez,  $R_i$  = radio de la curva en la unión del patín y el alma medido en el interior de la curva; para perfiles extruidos,  $R_i = 0$

t = espesor del alma

$\theta$  = ángulo entre el plano del alma y el plano de la superficie del apoyo ( $\theta \leq 90^\circ$ )

$$\phi_w = 0.90$$

Cuando las reacciones en los apoyos son mayores a lo permitido por las anteriores expresiones, es necesario reforzar el alma con atiezadores. Estos deberán cumplir con lo establecido en la sección 4.6.2 del MDA que proporciona el momento de inercia necesario del atiezador para resistir la fuerza cortante.

$$I_b = I_s + \frac{1.95P_{bs}h^2}{\pi^2 E} \quad (3.41)$$

dónde:

E = módulo de elasticidad a compresión

h = altura libre del alma entre patines

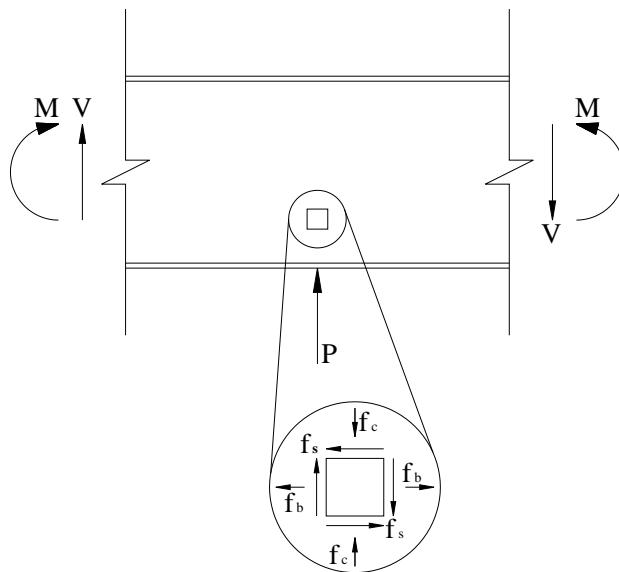
$I_b$  = momento de inercia requerido del atiezador en el apoyo

$I_s$  = momento de inercia requerido para resistir el pandeo por cortante

$P_{bs}$  = carga concentrada en el atiezador

Esta ecuación requiere que la resistencia al pandeo elástico del atiezador tratado como columna de altura  $h$  sea adecuada para resistir la carga concentrada. No se toma en cuenta para ningún refuerzo al unirse el atiezador y el alma, y se supone que el atiezador se padea elásticamente. El estado límite de fluencia también debe ser revisado, y el esfuerzo en el apoyo entre el atiezador y el patín no deberá exceder lo dispuesto en la sección 3.4.6 del MDA.

En la práctica, cuando las vigas están conectadas a momento a las columnas, se produce en ellas unos esfuerzos generados por el momento de flexión en el apoyo que si se suma a la carga concentrada en el apoyo puede generar un estado de esfuerzos como el mostrado en la figura 3.22. Este estado de esfuerzos resulta ser crítico, debido a que los esfuerzos generados por el par contribuyen a la inestabilidad del alma generada por la carga concentrada. Por lo tanto es necesario revisar cual es la contribución de ese par a la inestabilidad que origina la carga concentrada, para eso el MDA proporciona la siguiente relación.



**Figura 3.22 Estado de esfuerzos en el alma de una viga con carga concentrada y esfuerzos de flexión**

$$\left(\frac{M}{\phi M_a}\right)^{1.5} + \left(\frac{P}{\phi P_L}\right)^{1.5} \leq 1.0 \quad (3.42)$$

dónde:

$M$  = momento de flexión debido a las cargas factorizadas aplicadas al elemento

$\phi M_a$  = momento flexionante de diseño del elemento si el momento flexionante es únicamente aplicado al elemento

$P$  = reacción interior aplicada o carga concentrada debido cargas aplicadas por alma o almas planas

$\phi P_L$  = reacción interior de diseño o carga concentrada por alma o almas planas de acuerdo a la sección 4.7.7 del MDA (ecuaciones 3.39 y 3.40 de este documento)

### 3.4.3 Cortante por Flexión

Cuando una viga es sometida a flexión, y la distribución del momento no es uniforme (o constante), en ella se producirán fuerzas cortantes que equilibren el sistema de fuerzas. Esto lo podemos ver en la figura 3.23 en la que una pequeña sección de la viga está sometida por un lado a un momento menor (lado derecho) y en el otro un momento mayor (lado izquierdo), para poder equilibrar este sistema de fuerzas, es necesario aplicar una fuerza horizontal adicional al momento de la izquierda para poder igualar a las fuerzas cortantes provocadas por el momento de la derecha. Esta fuerza adicional, si la analizamos en un elemento diferencial, tendrá que generar una fuerza igual pero aplicada a un plano perpendicular para poder generar equilibrio. Si a lo largo de una viga se encuentran cargas concentradas, entonces la sumatoria de estas pequeñas fuerzas tendrán que ser igualadas a la fuerza externa aplicada en la viga. Esta fuerza vertical dividida entre el área transversal del elemento diferencial, generará un esfuerzo cortante y podrá ser calculado por la expresión 3.43.

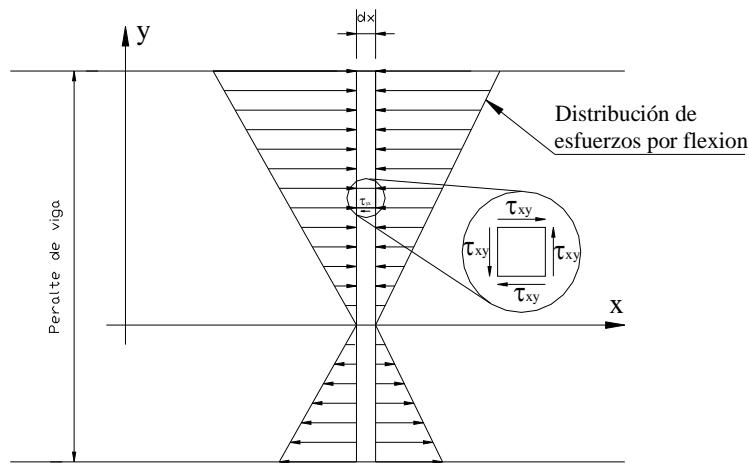


Figura 3.23 Deducción de los esfuerzos cortantes en una viga

$$f_s = \frac{VQ}{It} \quad (3.43)$$

dónde:

$V$  = es la fuerza cortante externa

$Q$  = es el momento estático (o primer momento) del área con respecto al eje neutro.

$I$  = es el momento de inercia de la sección

$t$  = espesor de la sección en el punto en el que el esfuerzo de cortante es calculado

Esta ecuación permite conocer como es la distribución de esfuerzos a lo largo de una sección, que en el caso de una viga de sección rectangular, la distribución del esfuerzo cortante, es una parábola (Figura 3.24). Esta figura también nos muestra cómo es que cuando el valor del cortante es máximo, el valor del momento es mínimo y viceversa. Esta relación del cortante con respecto al momento también aplica a lo largo de la longitud de una viga. Por lo tanto es necesario revisar este elemento mecánico en los puntos donde su valor es máximo, lo que puede suceder donde existen cargas concentradas o en los apoyos de la viga.

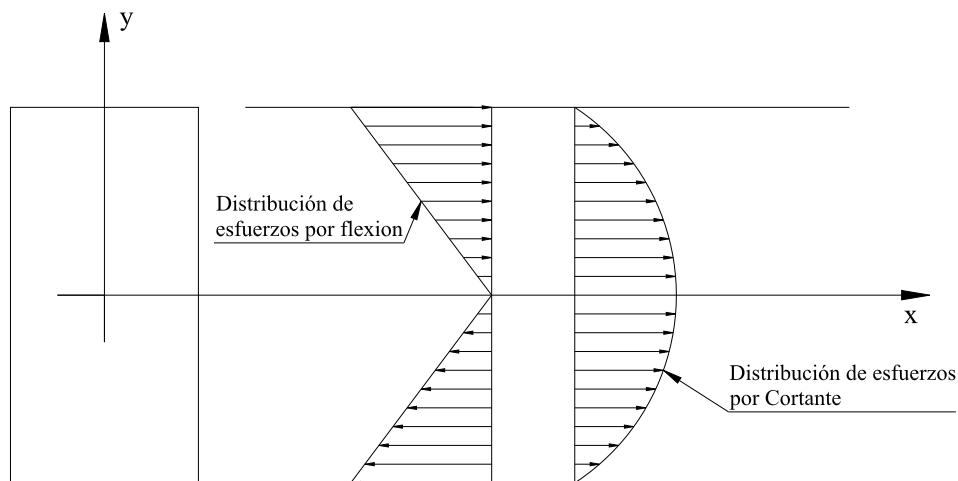


Figura 3.24 Distribución del esfuerzo cortante en una sección transversal

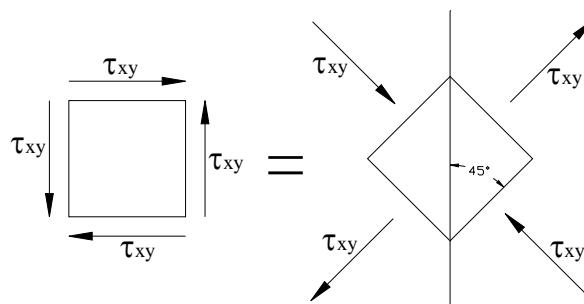
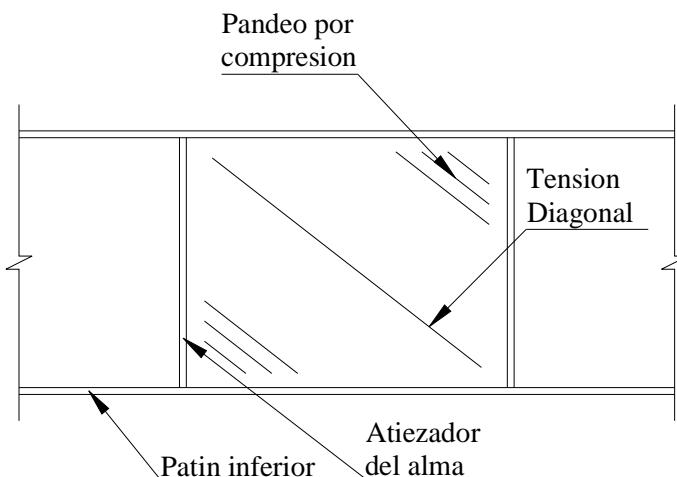


Figura 3.25 Transformación de esfuerzos de acuerdo al círculo de Mohr

Otro aspecto que debemos tener en cuenta es que cuando tenemos un estado de esfuerzos como el que se presenta en la figura 3.25, se pueden generar esfuerzos de tensión y compresión en un plano a  $45^\circ$ , que de acuerdo al círculo de Mohr, son generados a partir de los esfuerzos cortantes.

Por lo tanto, los esfuerzos de cortante también contribuyen a la inestabilidad del alma y por consiguiente se pueden presentar algunas de las fallas mostradas en la figura 3.21. Como se mencionó previamente, si el alma no puede resistir el cortante por sí solo, se tendrá que reforzar el alma colocando placas de refuerzo a ambos lados del alma o colocando atiezadores transversales a ambos lados del alma, sin embargo al colocar atiezadores transversales a cada intervalo a lo largo de la viga se provocará la aparición de ondas de pandeo por compresión y ondas de tensión diagonal (figura 3.26). Esto provocará un cambio en el comportamiento de la viga cuando el alma haya fallado, ya que la viga se comportará como una armadura donde la sección pandeada por compresión puede ser ignorada, los patines actúan como las cuerdas superior e inferior de la armadura, los atiezadores pueden ser tratados como los elementos verticales y la zona que está en tensión diagonal puede ser tratado como las diagonales de la armadura. Este comportamiento el LRFD de acero lo llama **acción del campo de tensión** o resistencia de post-pandeo, donde se reconoce que la viga tiene una resistencia adicional, después del pandeo del alma originado por los esfuerzos de compresión por cortante.



**Figura 3.26 Tensión diagonal en el alma provocada por uso de atiezadores**

Para poder evaluar la resistencia de cortante, el LRFD en acero cuenta con dos secciones: la sección G2 Miembros con almas atiezadas o sin atiezar, donde no se toma en cuenta la resistencia de post-pandeo, y la sección G3 Tension field action donde se mencionan las condiciones para poder tomar en cuenta la resistencia de post-pandeo. Por otro lado, el MDA también contiene dos secciones para poder evaluar la resistencia a cortante de un

componente. En la sección 3.4.20 se tratan los componentes planos sin atiesar apoyados en dos bordes (como el alma de una viga I), y en la sección 3.4.21 se tratan los componentes atieizados planos apoyados en dos bordes. Esta última sección toma en cuenta la resistencia de post-pandeo indirectamente, debido a que la resistencia en este punto se multiplica por un factor de 1.375 (Kissell, 2002). Esta diferencia se puede ver en la tabla 3.16 en los esfuerzos de diseño  $\phi F_L$  entre los intervalos  $S_1$  y  $S_2$ , los esfuerzos de diseño para relaciones de esbeltez mayores a  $S_2$ . En el apéndice G se muestra una tabla comparativa de las resistencias de cortante para almas de acero y aluminio, de las secciones que se usaron para calcular las resistencias de flexión.

**Tabla 3.16 Requerimientos generales del MDA para resistencia a cortante**

Tipo de esfuerzo	Tipo de componente	Esfuerzo de Diseño $\phi F_L$	Límite de esbeltez ( $S_1$ )	Esfuerzo de Diseño $\phi F_L$	Límite de esbeltez ( $S_2$ )	Esfuerzo de Diseño $\phi F_L$
Cortante en Almas	Almas planas sin atiezar	$\frac{\phi_y F_{ty}}{\sqrt{3}}$	$B_s - F_{ty}\phi_y / (\phi_{vp}\sqrt{3})$ 1.25D <sub>s</sub>	$\phi_{vp} \left[ B_s - 1.25D_s \frac{h}{t} \right]$	Intersección entre las ecuaciones de pandeo elástico e inelástico	$\frac{\phi_v \pi^2 E}{(1.25 h/t)^2}$
	Almas planas atiezadas	$\frac{\phi_y F_{ty}}{\sqrt{3}}$	$B_s - \frac{\phi_y F_{ty}}{1.375\phi_{vp}\sqrt{3}}$ 1.25D <sub>s</sub>	$1.375\phi_{vp} \left[ B_s - 1.25D_s \frac{a_e}{t} \right]$	Intersección entre las ecuaciones de pandeo elástico e inelástico	$\frac{1.375\phi_v \pi^2 E}{(1.25 a_e/t)^2}$

Como en el tema de flexión y compresión, en cortante, el esfuerzo de diseño  $\phi F_L$  que se encuentra en el intervalo inelástico depende de unas constantes inelásticas que a su vez dependen de las propiedades del material. Estas propiedades del material dependen del tipo de temple que se le dé al material, por lo tanto se presentan las ecuaciones para los diferentes tipos de tratamiento en las tablas 3.17 y 3.18. Los valores de estas constantes fueron obtenidas para cada aleación y se encuentran en el apéndice D

**Tabla 3.17 Tabla de constantes de pandeo inelástico para compresión en columnas y compresión en patines de vigas dependiendo del tratamiento [MPa]**

Tratamiento	Ordenada al origen	Pendiente	Intersección
-O, -H, -T1, -T2, -T3 o -T4	$B_s = \frac{F_{ty}}{\sqrt{3}} \left[ 1 + \frac{(F_{ty}/\sqrt{3})^{1/3}}{11.8} \right]$	$D_s = \frac{B_s}{20} \left( \frac{6B_s}{E} \right)^{\frac{1}{2}}$	$C_s = \frac{2B_s}{3D_s}$
-T5, -T6, -T7, -T8 o -T9	$B_s = \frac{F_{ty}}{\sqrt{3}} \left[ 1 + \frac{(F_{ty}/\sqrt{3})^{1/3}}{17.7} \right]$	$D_s = \frac{B_s}{10} \left( \frac{B_s}{E} \right)^{\frac{1}{2}}$	$C_s = 0.41 \frac{B_s}{D_s}$

### 3.5 Esfuerzos combinados

El efecto de los esfuerzos estando en combinación con otros esfuerzos puede ser mayor que la suma de su efecto individual. Es por eso que el MDA proporciona ecuaciones de interacción para evitar fallas debidas a la combinación de esfuerzos.

**Tabla 3.18 Tabla de constantes de pandeo inelástico para compresión en columnas y compresión en patines de vigas dependiendo del tratamiento [kg/cm<sup>2</sup>]**

Tratamiento	Ordenada al origen	Pendiente	Intersección
-O, -H, -T1, -T2, -T3 o -T4	$B_s = \frac{F_{ty}}{\sqrt{3}} \left[ 1 + \frac{(F_{ty}/\sqrt{3})^{1/3}}{25.6} \right]$	$D_s = \frac{B_s}{20} \left( \frac{6B_s}{E} \right)^{\frac{1}{2}}$	$C_s = \frac{2B_s}{3D_s}$
-T5, -T6, -T7, -T8 o -T9	$B_c = \frac{F_{ty}}{\sqrt{3}} \left[ 1 + \frac{(F_{ty}/\sqrt{3})^{1/3}}{38.4} \right]$	$D_s = \frac{B_s}{10} \left( \frac{B_s}{E} \right)^{\frac{1}{2}}$	$C_s = 0.41 \frac{B_s}{D_s}$

La realización de la revisión de la combinación de unos esfuerzos no exime la realización de otros. Por ejemplo las columnas de un edificio que están sometidas a esfuerzos de tensión, flexión y cortante. Se deben de revisar para la condición de esfuerzos axiales con esfuerzos de flexión (sección 4.1 del MDA), y para la condición de esfuerzo axial con esfuerzo de flexión y esfuerzos cortantes (sección 4.4 del MDA).

### 3.5.1 Flexión y compresión axial combinados.

Debido a que la superposición de la carga axial en los esfuerzos de flexión pueden incrementar la tendencia de pandeo en una columna, el MDA proporciona las siguientes ecuaciones de interacción (en su sección 4.1.1) para cuantificar este efecto. Ambas de las siguientes ecuaciones deben ser satisfechas:

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{C_{mx}f_{bx}}{F_{bx}(1-f_a/F_{ex})} + \frac{C_{my}f_{by}}{F_{by}(1-f_a/F_{ey})} \leq 1.0 \quad (3.44)$$

y

$$\frac{f_a}{F_{a0}} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0 \quad (3.45)$$

Cuando el esfuerzo axial de compresión es menor o igual al 15% del esfuerzo de diseño de compresión, el MDA permite despreciar el pequeño efecto de amplificación de la flexión sobre el pandeo de la columna y solo se utiliza la ecuación.

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0 \quad (3.46)$$

donde:

$f_a$  = esfuerzo de compresión debido a una carga de compresión axial

$f_b$  = esfuerzo de compresión en la fibra extrema debido a flexión

$F_a$  = esfuerzo de diseño a compresión  $\phi F_L$  para un elemento considerado como columna cargada axialmente

$F_b$  = esfuerzo de diseño a compresión  $\phi F_L$  para un elemento considerado como una viga

$C_m = 0.6 - 0.4(M_1/M_2)$  para elementos cuyos extremos están restringidos contra el desplazamiento lateral.

$C_m = 0.85$  para elementos cuyos extremos no están restringidos contra el desplazamiento lateral.

$M_1/M_2$  = relación de los momentos extremos, donde  $M_2$  es el mayor de los dos momentos extremos y  $M_1/M_2$  es positivo cuando el elemento esta flexionado en doble curvatura, negativo cuando esta flexionado en curvatura simple.

$F_{ao}$  = esfuerzo de diseño a compresión  $\phi F_L$  de un elemento cargado axialmente considerado como una columna corta calculado por medio del método de esfuerzo de compresión promedio ponderado.

$$F_e = \text{esfuerzo de pandeo elástico de diseño} = \frac{\phi \pi^2 E}{\left(\frac{kl}{r}\right)^2}$$

$k$  = factor de longitud efectiva en el plano de flexión

$l$  = longitud libre en el plano de flexión

$r$  = radio de giro alrededor del eje de flexión

De todos los factores que aparecen en estas ecuaciones, el nuevo factor que aparece es  $C_m$ , el cual tiene la función de reducir los efectos del esfuerzo de flexión aplicado hasta en un 80% dependiendo de la curvatura de flexión. Mientras que el término  $(1 - f_a/F_e)$  los amplifica tanto como el esfuerzo de compresión se aproxime al esfuerzo de pandeo elástico.

Estas ecuaciones son diferentes a las que propone la especificación de acero AISC, pero los fundamentos sobre los que fueron desarrollados son los mismos que los utilizados para el aluminio.

### 3.5.2 Flexión y tensión combinados.

El MDA establece que un elemento sujeto a carga axial de tensión y flexión deberá cumplir con la siguiente ecuación de interacción.

$$\frac{f_a}{F_t} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0 \quad (3.47)$$

donde:

$f_a$  = esfuerzo de tensión debido a una carga de tensión axial

$f_b$  = esfuerzo de tensión en la fibra extrema debido a flexión

$F_t$  = esfuerzo de diseño a tensión  $\phi F_L$  para un elemento únicamente cargado axialmente

$F_b$  = esfuerzo de diseño a tensión  $\emptyset F_L$  para un elemento considerado como una viga.

La fuerza de tensión axial induce un momento secundario (igual a la fuerza axial por la deflexión de la flexión) que se opone al efecto del momento de flexión primario en la viga. En otras palabras, mientras el momento actúa para flexionar el elemento hasta tomar una forma curva, la fuerza de tensión actúa para tratar de enderezarla. Por lo tanto, no hay un efecto de amplificación como en la combinación de compresión axial y flexión.

### 3.5.3 Compresión, Flexión y cortante combinados.

La manera en que el MDA y la especificación de acero AISC, abordan la interacción entre los esfuerzos cortantes, flexión y carga axial es diferente, ya que en las especificaciones de acero también incluyen los esfuerzos de torsión.

Para almas de perfiles armados de componentes rectangulares, por ejemplo vigas I, o canales, el MDA proporciona la siguiente ecuación de interacción.

$$\frac{f_a}{F_a} + \left(\frac{f_b}{F_b}\right)^2 + \left(\frac{f_s}{F_s}\right)^2 \leq 1.0 \quad (3.48)$$

Para perfiles armados con elementos curvos, tales como tubos redondos:

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{f_b}{F_b} + \left(\frac{f_s}{F_s}\right)^2 \leq 1.0 \quad (3.49)$$

donde:

$f_a$  = esfuerzo de compresión debido a una carga de compresión axial

$F_a$  = esfuerzo de diseño a compresión para elementos sujetos a compresión únicamente

$f_b$  = esfuerzo de compresión en la fibra extrema debido a flexión

$F_b$  = esfuerzo de diseño a compresión para elementos sujetos únicamente a flexión

$f_s$  = esfuerzo de cortante causado por cargas factorizadas transversales de cortante o torsión

$F_s$  = esfuerzo de diseño a cortante para elementos sujetos únicamente a torsión o cortante

La combinación de cortante flexión y compresión regirá el diseño únicamente si los elementos estructurales están sujetos a grandes esfuerzos cortantes, como por ejemplo las vigas de gran peralte. Hay que recordar que las ecuaciones de interacción 3.44 y 3.45 (combinación de flexión y compresión axial) deben ser satisfechas aunque no esté presente el esfuerzo cortante.

# CAPÍTULO 4

---

## Conexiones

---

### 4.1 Introducción

En el capítulo anterior se trató el comportamiento de componentes estructurales debido a la aplicación de determinados esfuerzos y los estados límite para poder diseñar los elementos a tensión, compresión (columnas), flexión (vigas) y cortante. Sin embargo, en la práctica estos elementos deben trabajar en conjunto, y esto se logra por medio de conexiones. Estas conexiones deben ser diseñadas de manera que los esfuerzos se puedan transmitir de manera adecuada de un elemento a otro. En la práctica, existen dos tipos conexiones: las conexiones mecánicas y las conexiones soldadas. Cada tipo de conexión tiene su función dentro de la estructura y de acuerdo a su función se tiene algún tipo de falla, por lo tanto es necesario explicar cómo es su funcionamiento y las especificaciones necesarias para un adecuado diseño de estas. En este capítulo explicaremos el funcionamiento de cada tipo de conexión así como algunas recomendaciones que proporcione el MDA para hacer un adecuado diseño de estas conexiones.

### 4.2 Conexiones mecánicas

En el acero, generalmente no se le da importancia al material del sujetador, los sujetadores solo son seleccionados por su resistencia, pero en el aluminio la elección es menos obvia. Esto se debe a que en estructuras de aluminio existen más opciones, y a que las estructuras de aluminio se ubican en ambientes corrosivos sin ningún recubrimiento adicional. La corrosión de un sujetador es de gran importancia debido a que los sujetadores son pequeños en comparación con los elementos que unen. La corrosión en un sujetador reduce drásticamente su resistencia, que la misma cantidad de corrosión en un elemento estructural.

En aluminio, las conexiones mecánicas son la manera más confiable de unir elementos estructurales, estas conexiones se pueden hacer por medio de remaches, pernos o tornillos. Este tipo de conexiones se deben someter a las especificaciones de la sección 5 del MDA si se usan las ecuaciones mencionadas en este documento, o las especificaciones de la sección 6 del Eurocódigo 09. La razón principal por la que las conexiones mecánicas son usadas de manera más frecuente en elementos de aluminio que en elementos de acero, se debe a que el uso de soldadura en componentes de aluminio reduce significativamente la resistencia de éstos. Por ejemplo, para la aleación 6061-T6 el MDA proporciona un esfuerzo de tensión  $F_{ty} = 2446 \text{ kg/cm}^2$ , pero para zonas afectadas por calor (HAZ), el esfuerzo de fluencia en tensión es de  $F_{ty} = 1054.6 \text{ kg/cm}^2$ , esto representa una reducción de alrededor del 40%. Otra razón es que existen pocos soldadores de aluminio calificados, y por último, la inspección y la reparación puede ser difícil y costosa.

Cuando se usan diferentes materiales para sujetadores y para elementos estructurales se puede producir un fenómeno de corrosión galvánica (también llamada bimetálica). Diferentes materiales, incluso diferentes aleaciones de aluminio tienen diferente potencial eléctrico, y en presencia de un electrolito, tal como la atmósfera húmeda industrial, fluye una corriente eléctrica de un material a otro. Esta corriente tiende a corroer al ánodo y proteger al cátodo (es el principio de protección catódica). Entre más diferencia de potencial eléctrico, más severa es la corrosión, por lo tanto, se puede evitar la corrosión galvánica, usando sujetadores con un potencial eléctrico similar al del metal base. La corrosión galvánica también puede evitarse si el área relativa de superficie del ánodo es más grande que la del cátodo, que es el caso cuando el sujetador es el cátodo. Además la resistencia a la corrosión del sujetador por si solo también es una propiedad que se debe tener en cuenta. Es por eso que a continuación se mencionan los materiales para sujetadores más usados en estructuras de aluminio.

En la práctica se pueden encontrar sujetadores de aluminio en aleaciones 2024 y 7075 que aunque son aleaciones poco resistentes a la corrosión en comparación con una aleación 6061, se pueden utilizar cuando se requiere una gran resistencia en el sujetador. Para evitar la corrosión de estos sujetadores, la sección 5.2.1 del MDA especifica un tratamiento de anodizado cuando estén expuestos a la humedad. Debido a que la diferencia de potencial eléctrico entre aleaciones de aluminio es mínima, los tornillos de aluminio no sufren una corrosión galvánica importante cuando se usan en estructuras de aluminio. Con respecto a los sujetadores hechos de acero inoxidable, existen tres categorías en aleaciones de acero inoxidable, que de acuerdo a su resistencia a la corrosión de menor a mayor son: martensítico, ferrítico y austenítico. Los aceros inoxidables martensíticos, no son muy resistentes a la corrosión pero su resistencia es muy grande, un ejemplo de esta categoría son los del tipo 410. Los aceros inoxidables ferríticos tienen una resistencia media a la

corrosión y su resistencia también es media, el más popular en esta categoría son los del tipo 430. Los aceros inoxidables austeníticos son los más resistentes a la corrosión pero también son los menos resistentes, las aleaciones que entran dentro de esta categoría son las de las series 200 y 300, ejemplo de estas aleaciones son la 303, 304 y 316, esta última utilizada en ambientes marinos. Por último los sujetadores hechos de acero al carbón galvanizado pueden ser utilizados en condiciones menos corrosivas, las aleaciones A307 y A325 pueden ser usadas en estructuras de aluminio, el MDA prohíbe el uso de las aleaciones A490 debido a que cuando se galvanizan se hacen frágiles. El uso de acero al carbón en remaches está prohibido en estructuras de aluminio a menos que la corrosión no sea de gran importancia o cuando sea necesario unir aluminio con acero, por los que entonces el acero deberá tener un recubrimiento que lo proteja de la corrosión, este recubrimiento deberá cumplir con lo especificado en la sección 6.7.1 del MDA.

#### 4.2.1 Tipos de sujetadores

Existen cuatro tipos de sujetadores que se usan con regularidad en estructuras de aluminio, y son: (1) remaches, (2) tornillos, (3) chavetas y (4) pijas. En remaches, los comúnmente usados, son los remaches tipo pop. Estos remaches tienen la ventaja de poder ser colocados desde un solo lado sin tener necesidad de acceso al otro lado. Para poder instalarlos se necesita de una herramienta llamada remachadora, la cual tiene la función de jalar un vástago a través del remache, deformando el cuerpo del remache de tal manera que del otro lado del remache se forma una cabeza que sirve para unir dos placas o láminas (Figura 4.1). Uno de los parámetros necesarios para poder seleccionar el tamaño de un remache es el espesor de las placas. Para estructuras de aluminio, se deben usar remaches de aluminio o de acero inoxidable.

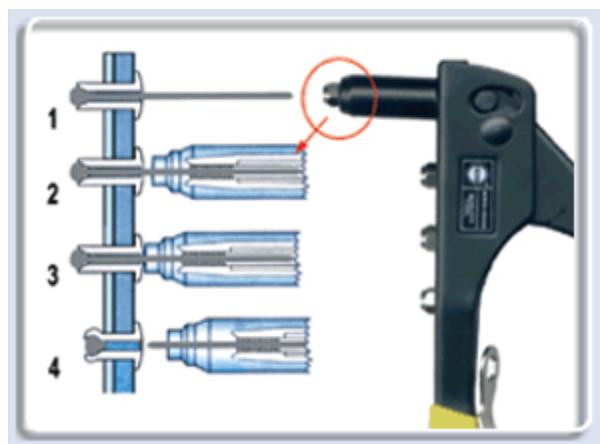
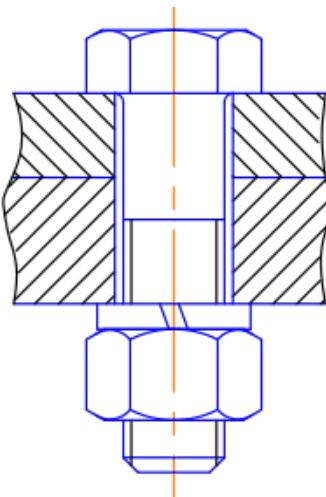


Figura 4.1 Instalación de un remache tipo pop

Normalmente, todos los sujetadores son resistentes a esfuerzos cortantes, sin embargo, determinar la resistencia a cortante de un remache resulta ser complicado, debido a que el material del vástago y el material del cuerpo del remache son de diferentes materiales. La razón de que estén compuestos de diferentes materiales, se debe a que cada elemento está diseñado para diferente tarea. El cuerpo del remache debe ser lo suficientemente dúctil para deformarse y formar la cabeza, y el vástago lo suficientemente rígido para poder deformar el cuerpo. Por lo tanto para determinar la resistencia a cortante de un remache es necesario realizar pruebas. Cabe mencionar que los remaches no resisten esfuerzos de tensión.

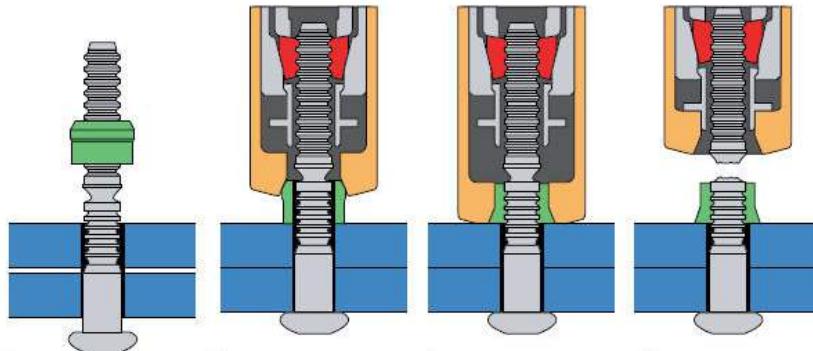
Los tornillos pueden ser de cabeza hexagonal o cuadrada y usan tuercas hexagonales o cuadradas respectivamente (figura 4.2). Comúnmente se usan pernos de aluminio de aleaciones 2024-T4, 6061-T6, y 7075-T73 (la aleación de aluminio 6262-T9 se usa únicamente para tuercas). Sin embargo este tipo de sujetador se puede utilizar en estructuras de aluminio, usando otro tipo de material, como acero inoxidable de la serie 300, y acero al carbón galvanizado, los cuales están permitidos por el MDA en su Sección 5.2. Este tipo de sujetadores puede trabajar a cortante o a tensión.



**Figura 4.2 Corte de una placa unida por un tornillo con tuerca**

Dentro los tornillos podemos ubicar un tipo de sujetador llamado “lockbolt”, el cual combina las propiedades de los remaches y pernos. Una unión Lockbolt incluye una perno (análogo a una chaveta) y un collar (análogo a la tuerca) (Figura 4.3). El collar es colocado dentro del perno, tensionando el perno y creando una fuerza de engrapamiento entre las partes conectadas. La instalación requiere acceso a ambas lados de la junta, pero se procede rápidamente y con una confiable fuerza de engrapamiento, no se necesita controlar el torque como en los sujetadores convencionales de cuerda, ya que la parte con menos sección del perno (llamado cuello) truenca a determinada fuerza de tensión. Los “lockbolts”

están disponibles en acero al carbón, acero inoxidable y aluminio (aleaciones 2024-T4, 6061-T6 y 7075-T73). Aunque requieren de herramienta especial para su instalación, son sujetadores eficientes y económicos para estructuras de aluminio.



**Figura 4.3 Proceso de colocación de un lockbolt**

Las chavetas están compuestas de una barra redonda con un agujero en cada extremo, que recibe un pasador. Las chavetas también están disponibles con una cabeza en un extremo. Este tipo de sujetador es igual que los remaches solo pueden soportar esfuerzos de cortante y no de tensión. Debido a que las chavetas no soportan esfuerzos de tensión, no pueden “engrapar” las partes conectadas, por lo que deben ser usadas en juntas donde se usen pernos en otras partes de las juntas para soportar esfuerzos diferentes a los de cortante que pueda soportar la chaveta. Estos sujetadores también pueden ser usados para generar articulaciones.

Las pijas son usadas comúnmente en estructuras de aluminio para unir el recubrimiento a la estructura, como por ejemplo la lámina acanalada para techumbre. El MDA no establece requerimientos para pijas, pero las aleaciones 7075-T73, o la serie 300 de acero inoxidable son durables. Las pijas se usan para techumbres o recubrimientos debido a que al instalarse generan su propia cuerda y una vez instalados tapan su propio agujero. Las pijas están disponibles en acero inoxidable y en aluminio, pero se debe tener cuidado a la hora de escoger las características de una pija debido a que algunas solo son capaces de perforar su propio agujero en espesores de hasta 3mm. Las pijas de acero templado pueden generar sus propios agujeros en cualquier condición pero son más propensas a la corrosión si se exponen al medio ambiente. Esto puede contribuir a disminuir la resistencia de la pija, y posteriormente generar una falla, en las pijas de aluminio esto no sucede. Sin importar el material, la distancia desde el punto de perforación de la pija hasta el inicio de sus cuerdas, debe ser mayor al espesor del material que va a ser perforado.

Una vez escogido el material a usar en las conexiones es necesario saber cuál es su resistencia a cortante y última para poder diseñar la conexión. Si el material escogido es aluminio, el MDA proporciona tablas de resistencia para dos de los cuatro tipos de sujetadores antes mencionados (remaches y tornillos). Esas tablas se presentan a continuación como tabla 4.1 y 4.2.

**Tabla 4.1 Esfuerzo de diseño para tornillos**

Aleación y temple	Esfuerzo de cortante mínima última <sup>1</sup> $F_{su}$ [MPa]	Esfuerzo de cortante mínima última <sup>1</sup> $F_{su}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	Esfuerzo cortante de diseño en el área efectiva <sup>2</sup> [MPa]	Esfuerzo cortante de diseño en el área efectiva <sup>2</sup> [kg/cm <sup>2</sup> ]	Esfuerzo de tensión mínima <sup>1</sup> $F_{tu}$ [MPa]	Esfuerzo de tensión mínima <sup>1</sup> $F_{tu}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	Esfuerzo de tensión de diseño en el área raíz <sup>2</sup> [MPa]	Esfuerzo de tensión de diseño en el área raíz <sup>2</sup> [kg/cm <sup>2</sup> ]
2024-T4	255	2599	165	1682	425	4332	275	2803
60601-T6	170	1733	110	1121	290	2956	190	1937
7075-T73	280	2854	180	1835	470	4791	305	3109

1.- De la ASTM B316/B316M

2.-  $\emptyset = 0.650$

**Tabla 4.2 Esfuerzo de diseño para remaches**

Designación antes de la instalación	Esfuerzo de cortante último mínimo <sup>1</sup> $F_{su}$ [MPa]	Esfuerzo de cortante de diseño en el área efectiva <sup>2</sup> [MPa]	Esfuerzo de cortante último mínimo <sup>1</sup> $F_{su}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	Esfuerzo de cortante de diseño en el área efectiva <sup>2</sup> [kg/cm <sup>2</sup> ]
<b>2017-T4</b>	225	145	2294	1478
2024-T42	255	165	2599	1682
<b>2117-T4</b>	180	115	1835	1172
<b>2219-T6</b>	205	135	2090	1376
<b>6053-T61</b>	135	90	1376	917
<b>6061-T6</b>	170	110	1733	1121
<b>7050-T7</b>	270	175	2752	1784
<b>7075-T6</b>	290	190	2956	1937
<b>7075-T73</b>	280	180	2854	1835
<b>7178-T6</b>	315	205	3211	2090

1.- De la ASTM B316/B316M para aleaciones térmicamente tratadas

2.-  $\emptyset = 0.65$

Las propiedades mecánicas de sujetadores hechos con acero inoxidable, están conforme a las normas ASTM F593. La resistencia de tensión varía con la aleación, tipo de tratamiento en el temple (trabajado en frío o endurecido por deformación), y el diámetro. Los tornillos que cumplen con la ASTM F593 son fácilmente identificables, debido a que cada tornillo tiene marcado en su cabeza “F593”, seguido de una letra que determina su condición

**Tabla 4.3 Resistencias mínimas de tensión y cortante de sujetadores de acero inoxidable, aleaciones 303, 304 y 316**

<b>Condición ASTM F593</b>		<b>Diámetro Nominal D [in]</b>	<b>Resistencia de tensión [kg/cm<sup>2</sup>]</b>	<b>Resistencia de Cortante [kg/cm<sup>2</sup>]</b>
A	<b>Recocido</b>	1/4 a 1 1/2	5273	3164
CW1	<b>Trabajado en frío</b>	1/4 a 5/8	7031	4218
CW2	<b>Trabajado en frío</b>	3/4 a 1 1/2	5976	3586
SH1	<b>Endurecido por deformación</b>	1/4 a 5/8	8437	5062
SH2	<b>Endurecido por deformación</b>	3/4 a 1	7734	4640

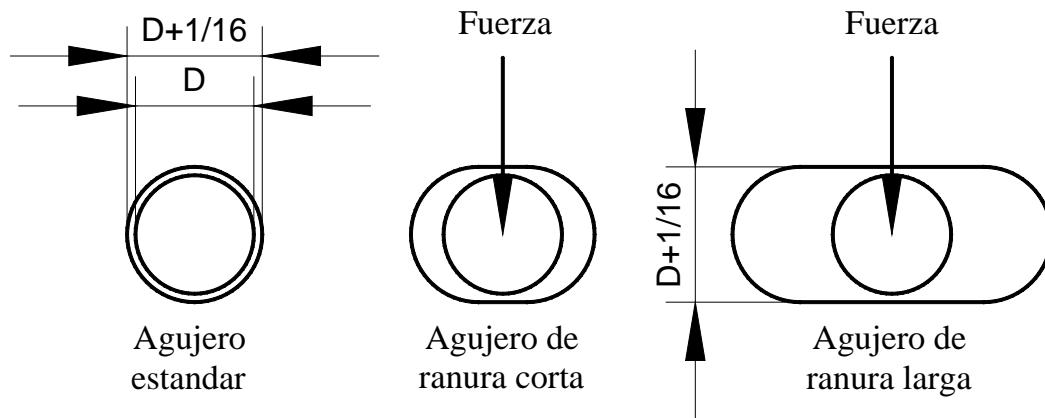
Las resistencias que requiere el MDA deben ser las resistencias de acero al carbón galvanizado que cumplan con las normas ASTM A153 o ASTM B633.

#### 4.2.2 Tipos de conexiones atornilladas

Inicialmente, se usaron remaches como sujetadores que solo trabajan a cortante y su resistencia tensión es casi nula, posteriormente se introdujeron los tornillos, que podían resistir cargas de tensión debido a que las tuercas se podían apretar, pero se observó que bajo cargas cíclicas (sismo) estas se podían aflojar e introducir otro comportamiento a la estructura, sin embargo, cuando se desarrollaron los tornillos de alta resistencia, este problema se evitó debido a que las tuercas se podían apretar con la suficiente fuerza como para evitar que las tuercas se aflojen. Además, estos tornillos generan una presión tal en las placas, que las fuerzas de fricción entre ellas ayudan a la resistencia de la conexión, evitando que las placas se deslicen una con respecto de otra. En el manual de acero, a las conexiones que no permiten deslizamiento se les denomina conexiones de fricción (slip-critical).

En el MDA, las conexiones de fricción están permitidas y deben cumplir con lo mencionado en la sección 5.2.8. Las placas que están en contacto deben tener un proceso de chorro de arena con escoria de carbón, para producir un perfil de anclaje de 0.5 mm [2.0 mils] para generar un coeficiente de fricción de 0.5. Estas superficies de aluminio, pueden estar en contacto con superficies de aluminio con un tratamiento similar, o con superficies de acero con una capa de pintura de 0.1 mm [4 mils]. Únicamente se pueden usar tornillos A325 con recubrimiento de zinc, para prevenir la corrosión galvánica entre el tornillo de acero y las partes de aluminio (Kissell 2002). Las placas de aluminio que van a ser conectadas deben tener una resistencia de fluencia mínima a tensión de 105 MPa [1054 kg/cm<sup>2</sup>] para evitar que el tornillo dañe al aluminio. Debido a estas limitaciones, las conexiones de fricción solo se usan en estructuras con aleaciones de aluminio muy resistentes.

Existe otro tipo de conexión que es más comúnmente usada en aluminio, este tipo de conexión se le conoce como conexión por aplastamiento. Este tipo de conexiones, se diseñan bajo la suposición de que las partes conectadas se pueden deslizar una con respecto de otra, y además el tornillo puede aplastar un lado del agujero bajo cargas de diseño. La principal ventaja de las conexiones de deslizamiento crítico es que permiten una mayor resistencia a la fatiga, además de que permiten un mayor sobredimensionamiento del agujero. Tanto en estructuras de acero como estructuras de aluminio, el sobre dimensionamiento de agujeros se debe a dos factores, el primero se debe a que los agujeros deben ser 1.6 mm [1/16 plg.] para que el tornillo pueda entrar con facilidad, el otro factor se debe a que los agujeros con ranura (figura 4.4) a veces facilita la instalación de los elementos estructurales. En estructuras de acero y de aluminio las conexiones de fricción permiten colocar las ranuras del agujero paralelas o perpendiculares a la dirección de la carga, debido a que se supone que la fricción entre las placas son las que toman la resistencia de la conexión. En conexiones por aplastamiento solo se permiten los agujeros estándar, y si se utilizan agujeros con ranura estos deben orientarse de manera que la carga sea perpendicular a la ranura. Por lo tanto la fabricación de los elementos debe ser exacta, o los agujeros deben ser hechos cuando la pieza este bien alineada.



**Figura 4.4 Opciones de agujero para tornillos de acero**

### 4.2.3 Agujeros

Los agujeros en elementos estructurales de aluminio no deben ser mayores al diámetro nominal del tornillo más 1.6 mm [1/16 plg.] (Sección 5.2.2 del MDA) por las razones antes discutidas. Para remaches tipo “pop” los agujeros deben de cumplir con las especificaciones que del productor.

Existen dos métodos para hacer agujeros, el primero es el de punzonamiento, el cual produce agujeros de manera muy rápida, sin embargo, el MDA no permite este método en aleaciones hechas por fundición o cuando el espesor del metal es mayor al diámetro del agujero. Esto se debe a que en estos casos el agujero que se genera es irregular y más grande de lo que se necesita. Por lo que se puede usar el método de taladrado, o también se puede hacer un punzonado menor al necesario y luego escarrear para llegar al diámetro final. Para propósitos del cálculo del área neta, el diámetro de los agujeros punzados se debe tomar como 0.8 mm [1/32 plg.] mayor al diámetro existente para tomar en cuenta el efecto de desgarramiento en la parte posterior del agujero. En estructuras de acero se debe tomar en cuenta 1.6 mm [1/16 plg.] más que el diámetro existente para el cálculo del área neta.

Algunas veces los agujeros se hacen en el lugar equivocado, y los fabricantes quieren soldar el agujero para taparlo, esto no es muy recomendable debido a que la soldadura puede afectar las propiedades mecánicas del material, por lo tanto es preferible que el agujero se quede en el lugar en vez de rellenarlo.

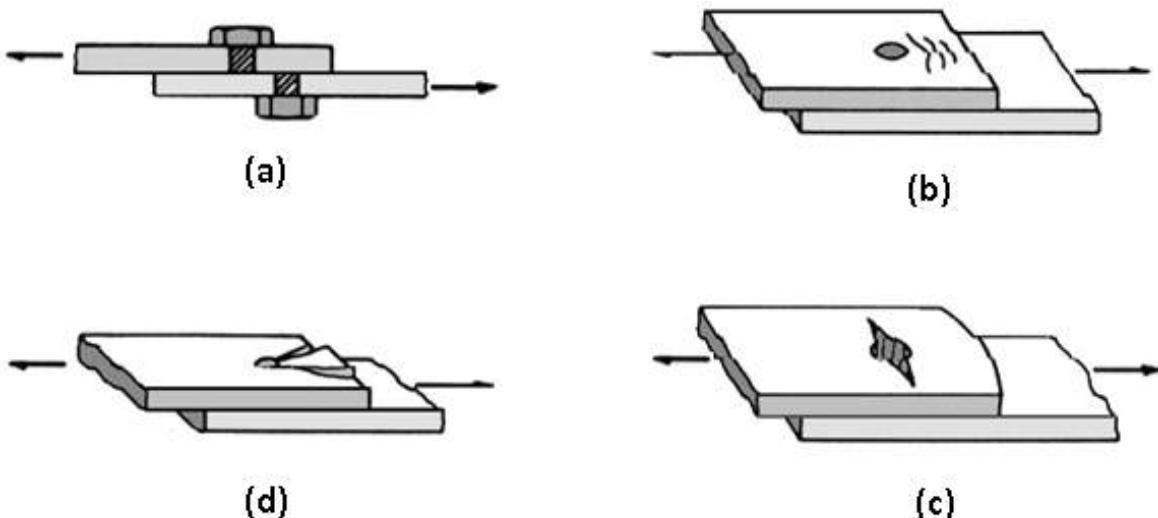
#### 4.2.4 Modos de falla de conexiones mecánicas

Para diseñar conexiones mecánicas, se debe tener en cuenta los modos de fallas que se puedan presentar para poder diseñarla de manera adecuada. Por ejemplo, cuando los tornillos se aprietan se someten a cargas de tensión que pueden provocar que estos superen su esfuerzo último, y por lo tanto lleguen a la fractura. Los modos de falla en conexiones atornilladas o remachadas sometidas a cortante son las siguientes: a) falla por cortante en el tornillo en el plano entre los placas, b) falla por aplastamiento de las placas, c) falla por tensión de las placas conectadas, d) falla por desgarramiento de una de las placas (también llamado bloque de cortante), estos tipos de falla están en la figura 4.5. Cuando se presentan conexiones como la mostrada en la figura 4.5a, las fuerzas que actúan en las placas de la conexión generan un par que causan una flexión en la conexión, por lo tanto la resistencia de la conexión debe ser reducida. En la sección 5.1.6 del MDA se menciona que la resistencia nominal del tornillo debe ser dividida entre  $[1/2 + G_f/9D]$  cuando la relación entre el agarre ( $G_f$ ) y el diámetro del tronillo (D) sea mayor a 4.5. Se usa un método similar para cuando son conexiones de acero.

A continuación se dan los estados límites de resistencia para sujetadores dependiendo del material del que estén hechos.

**Aluminio.-** De acuerdo al MDA, para tornillos y remaches la resistencia de diseño en tensión es  $0.65F_{tu}$  y para cortante  $0.65F_{su}$  (solo hay que recordar que no se permite tensión

en los remaches). Para pijas, la sección 5.4.2 proporciona los estados límite de tensión y cortante dependiendo de las condiciones de falla de los elementos conectados.



**Figura 4.5 Modos de falla en conexiones mecánicas**

**Acero inoxidable.-** La especificación para el diseño de elementos estructurales de acero inoxidable formados en frío ASCE 8-02, rige el diseño de sujetadores de acero inoxidable usados en estructuras de aluminio. Esta especificación establece que la resistencia de diseño a cortante es  $0.65F_{nv}$  y el esfuerzo de diseño a tensión es  $0.75F_{nt}$ . Donde  $F_{nv}$  y  $F_{nt}$  son las resistencias nominales de cortante y tensión respectivos para tornillos. Como podemos ver la especificación de acero inoxidable no usa esfuerzos mínimos de cortante en sus expresiones (como se hace en el aluminio) por lo que relaciona la resistencia nominal de cortante como el 60% de la resistencia mínima a tensión del tornillo. (Ver la sección 5.3.4 de la especificación ASCE 8-02).

**Acero al carbón.-** La especificación del AISC para edificios de acero estructural rige el diseño de tornillos de acero al carbón en edificios. Las resistencias para el diseño pueden tomarse de la especificación de acero tabla J3.2, y únicamente se pueden usar las conexiones por aplastamiento a menos que las superficies de contacto cumplan con los requisitos que se mencionan en la sección 5.2.8 del MDA para realizar conexiones por fricción. Como se mencionó anteriormente las conexiones por aplastamiento tienen mayores resistencias de diseño que las conexiones de deslizamiento crítico, por lo que desde el punto de vista de resistencia, esto no es una desventaja.

#### 4.2.5 Cargas de tensión en tornillos

La resistencia que un tornillo puede soportar a tensión se obtiene dividiendo su esfuerzo de diseño a tensión ( $0.65F_{tu}$ ) entre el área en el que está actuando. Para el caso de aluminio el área que se debe tomar en cuenta es el área de la raíz del tornillo, es decir, el área sin tomar en cuenta en el diámetro la cuerda. Para poder determinar esta área el MDA proporciona la siguiente ecuación:

$$A_r = \frac{\pi}{4} \left[ D - \frac{1.191}{n} \right]^2 \quad (4.1)$$

donde:

$A_r$ = área de la raíz

$D$ = diámetro nominal del tornillo en pulgadas

$n$ = número de hilos por pulgada

Para el caso de acero, la resistencia que un tornillo puede soportar a tensión se obtiene dividiendo su esfuerzo nominal de tensión ( $F_{nt}$ ) entre el área del cuerpo del tornillo sin cuerdas. Para calcular el área sin cuerdas del tornillo la especificación de acero (AISC) proporciona la ecuación 4.2 pero las áreas netas de tensión para tornillos también pueden ser consultadas en la tabla 7-18 de la especificación.

$$A_s = 0.7854 \left[ d_b - \frac{0.9743}{n} \right]^2 \quad (4.2)$$

Comparando las ecuaciones para  $A_r$  y  $A_s$  podemos ver que el área usada para calcular la resistencia de tensión de un tornillo de aluminio es menor que el área usada para calcular la resistencia de tensión de un tornillo de acero. No hay diferencia física en el tamaño de los tornillos de ambos materiales; sus definiciones de área de tensión efectiva son simplemente diferentes (Kissell, 2002).

#### 4.2.6 Cargas de cortante en tornillos

El MDA y la especificación de acero (AISC) también difieren en la manera de calcular la resistencia de cortante en los tornillos. La especificación de acero basa todos los cálculos de resistencia de cortante en el área nominal del sujetador y la multiplica por los esfuerzos nominales encontrados en la tabla J3.2. Los esfuerzos nominales incluidos en esta tabla varían dependiendo de si las cuerdas del tornillo están incluidas o no en el plano de corte.

Si las cuerdas están incluidas en el plano de corte los esfuerzos nominales serán menores a aquellos que excluyan las cuerdas del plano de corte.

En el caso del MDA, se tienen dos maneras de calcular el esfuerzo cortante en tornillos: cuando las cuerdas están en el plano de corte, el área que se debe usar es el área raíz, si las cuerdas no están contenidas en el plano el área que se debe usar es el área nominal del tornillo. Dependiendo del caso estas áreas se multiplicaran por la resistencia a cortante de diseño ( $0.65 F_{su}$ ). Estas resistencias las puedes encontrar en la tabla 4.1 en este documento.

#### 4.2.7 Tensión y cortante combinados en tornillos

El MDA no contiene disposiciones para determinar, la resistencia a tensión y cortante combinados en tornillos. Sin embargo, las especificaciones de acero y acero inoxidables si contienen estas disposiciones. Estas disposiciones pueden ser usadas cuando se usen sujetadores de estos materiales en estructuras de aluminio. En la especificación de acero (AISC) se pueden encontrar en la sección J3.7 y J3.8, en la especificación de acero inoxidable ASCE 8-02 se pueden encontrar en la sección 5.3.4. Por otro lado, el Eurocódigo 09 si contiene una expresión para determinar la resistencia del tornillo bajo la combinación de estos esfuerzos. La expresión 4.3 no debe usarse en combinación con las disposiciones aquí mostradas para el cálculo de la resistencia a tensión y cortante de tornillos.

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1.4 F_{t,Rd}} \leq 1.0 \quad (4.3)$$

donde:

$F_{v,Ed}$ = fuerza de cortante de diseño por tornillo para el estado límite ultimo

$F_{v,Rd}$ = resistencia de cortante de diseño por tornillo

$F_{t,Ed}$ = fuerza de tensión de diseño por tornillo para el estado límite de diseño

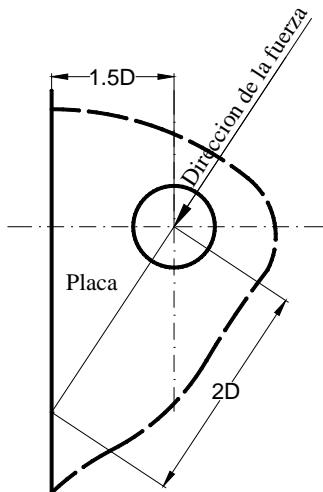
$F_{t,Rd}$ = resistencia de tensión de diseño por tornillo

#### 4.2.8 Resistencia al aplastamiento y distancia al borde

El área usada para calcular el esfuerzo de aplastamiento es la longitud aplastada por el diámetro del agujero para remaches o en caso de usar tornillos se usa el diámetro nominal, incluso si las cuerdas se encuentran en el área de aplastamiento. Para remaches o tornillo avellanados, se descontará la mitad de la profundidad del avellanado del espesor del material.

El esfuerzo de aplastamiento de diseño aplicado por un tornillo o remache, está dado por la sección 3.4.5 como  $2\phi_u F_{tu}$  donde  $\phi_u = 0.85$  y  $F_{tu}$  es el esfuerzo de tensión último. Este esfuerzo de diseño se aplicará cuando la distancia del borde de la placa en dirección de la fuerza aplicada sea igual o mayor a dos veces el diámetro. Limitar el esfuerzo a  $2F_{tu}$ , limita la deformación del agujero a un tercio del diámetro del tornillo (o menos cuando el material alrededor del agujero está confinado por tornillo suficientemente apretados) (Kissell 2002). La distancia mínima al borde de acuerdo al MDA debe ser al menos 1.5 veces el diámetro, y también especifica que si la distancia es menor a 2 veces el diámetro en dirección de la fuerza aplicada, el esfuerzo de aplastamiento de diseño de reducirse multiplicando este esfuerzo por la relación de la distancia al borde entre 2 veces el diámetro (ver figura 4.6). Por lo tanto la máxima reducción del esfuerzo es del 25%.

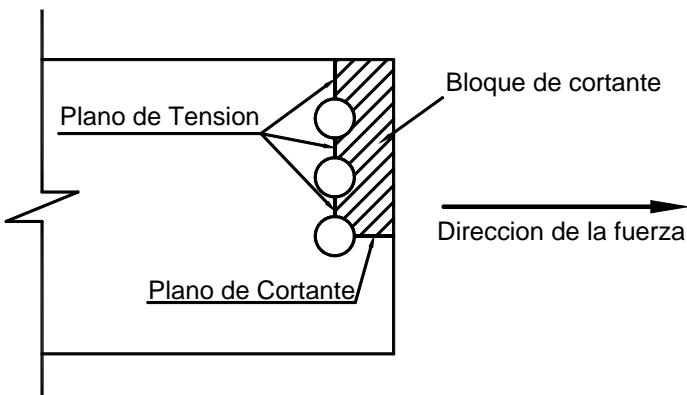
El esfuerzo de aplastamiento de diseño para una chaveta o un tornillo en una ranura está limitado por la sección de 3.4.6 del MDA que establece que el esfuerzo de diseño será  $2\phi_u F_{tu}/1.5$ , que resulta ser una reducción de 66% del esfuerzo de aplastamiento de diseño para tornillos y remaches antes mencionado.



**Figura 4.6 Distancia al borde de un agujero de tornillo**

#### 4.2.9 Ruptura de cortante

Como se mencionó en el punto 4.2.4 existe la posibilidad de que la conexión falle por medio del desgarre de una de las placas. Esto ocurre cuando los esfuerzos de tensión provocan una línea de fractura, al mismo tiempo que los esfuerzos cortantes provocan otra en un plano perpendicular al de tensión. El término que usa el MDA y la especificación de acero AISC para este fenómeno es el de bloque de cortante (figura 4.7).



**Figura 4.7 Bloque de cortante**

Cuando se incrementa la carga de tensión como la mostrada en la figura 4.7 se producirá un esfuerzo de tensión en el plano perpendicular a la carga de manera que se produzca la fractura en ese plano, sin embargo debido a que el plano de cortante paralelo a la carga es más grande, el plano de tensión no fallará hasta que el plano de cortante se fracture. El MDA como en la especificación de acero del AISC consideran que es lógico que cuando el plano de cortante alcanza su esfuerzo de ruptura el plano de tensión habrá alcanzado su esfuerzo de fluencia. Esto se trata de determinar cuál es el plano que ofrece mayor resistencia a la fractura, y en base a ese plano determinar cuál es la resistencia de fluencia del plano perpendicular, ya que habrá ocasiones que el área de tensión sea mayor que el área de corte. Así en el MDA como la especificación de acero AISC establecen que la resistencia de diseño del bloque de corte se determina 1) calculando la resistencia por fractura a tensión en el área neta en una dirección y sumando la resistencia por fluencia a corte en el área total de corte de la sección perpendicular y 2) calculando la resistencia por fractura a corte en el área neta de corte y sumando la resistencia por fluencia a tensión en el área total a tensión.

#### 4.2.10 Distancia al borde y espaciamiento mínimo

Para las distancias al borde y espaciamiento entre tornillos, todas las distancias están medidas desde el centro del agujero en el MDA. El MDA permite un espaciamiento mínimo entre tornillos de 2.5 veces el diámetro nominal del tornillo y para remaches 3.0 veces el diámetro nominal del remache. Por otro lado la especificación de acero AISC especifica que en tornillos el espaciamiento no será menor a  $2\frac{2}{3}$  veces el diámetro nominal y es preferible una distancia de 3.0 veces el diámetro nominal. Los resultados de pruebas han demostrado claramente que las resistencias por aplastamiento son directamente proporcionales a la separación centro a centro de tornillo de acero teniendo un máximo de 3 veces el diámetro (McCormac 2013). El MDA no incluye directamente los factores de espaciamiento y distancia al borde directamente, pero como se mencionó anteriormente con

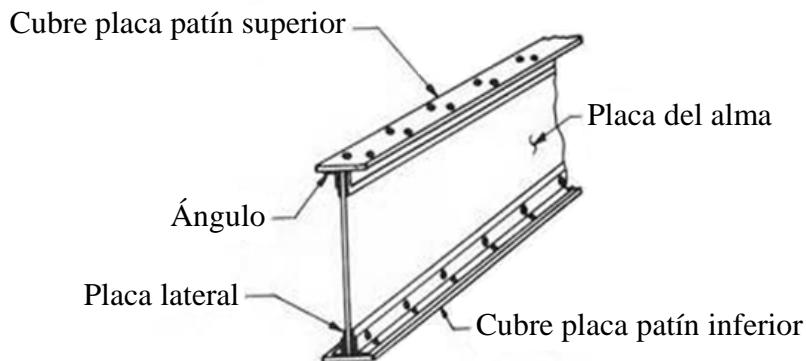
respecto a la resistencia por aplastamiento, la distancia mínima al borde para el aluminio es de 2 veces el diámetro, y si la distancia es menor (hasta 1.5 veces el diámetro), se debe reducir la resistencia de aplastamiento.

#### 4.2.11 Distancia al borde y espaciamiento máximo

En elementos a compresión armados, el MDA especifica un espaciamiento máximo en sujetadores para prevenir el pandeo entre sujetadores (ver figura 4.8). El material entre sujetadores deberá ser tratado como una placa plana doblemente apoyada. Esto nos permite revisar la placa por pandeo local usando la sección 3.4.9 del MDA o lo mencionado en el punto 3.3.2 de este documento. Si se requiere revisar el pandeo global se puede usar la sección 3.4.7 del MDA o el punto 3.3.1 de este documento. Para el cálculo del esfuerzo de pandeo local (sección 3.4.9 del MDA) el MDA establece en la sección 5.1.2 que se debe usar como  $b$  el 80% del gramil, esta distancia se usa si  $b$  es perpendicular a la aplicación de la fuerza. Para el cálculo del esfuerzo de pandeo global se debe usar como  $k_l$  (longitud efectiva) la mitad del valor del espaciamiento.

En elementos a tensión el MDA restringe el espaciamiento de tornillos en elementos construidos a tensión a un valor de  $75+20t$  [mm] donde  $t$  es el espesor de la capa externa.

Para conexiones herméticas o que no permitan la filtración de humedad entre las placas (como es el caso del acero) el MDA no especifica distancias máximas de separación entre tornillos, debido que la corrosión en el aluminio no es de gran importancia (excepto las aleaciones de la serie 2XXX). La especificación de acero AISC establece que la separación máxima de los tornillos debe ser de 12 veces el espesor de la parte conectada en consideración pero no excederá los 150 mm.



**Figura 4.8 Viga construida a base de placas**

#### 4.2.12 Requisitos mínimos para una conexión

Debido a que el MDA cubre una gran variedad de estructuras, algunas de las cuales pueden ser diseñadas únicamente para cargas pequeñas, no se requieren resistencias de conexión mínima. Sin embargo, cuando se diseñan estructuras tipo edificio con aluminio es necesario considerar ciertas dimensiones mínimas de conexión, incluso si en el cálculo se obtienen dimensiones de tornillo pequeñas. En la práctica, entre más pequeños y menos número de tornillos, más serias son las consecuencias cuando un tornillo es omitido o instalado inapropiadamente. Por último, las cargas imprevistas que se producen durante la trasportación o la construcción pueden sobrecargar una conexión diseñada estrictamente para las cargas especificadas.

En la especificación de acero AISC, en los comentarios del capítulo J (diseño de conexiones) se especifica que la carga mínima de diseño de una conexión debe ser de 44 kN [4485 kgf].

### 4.3 Conexiones soldadas

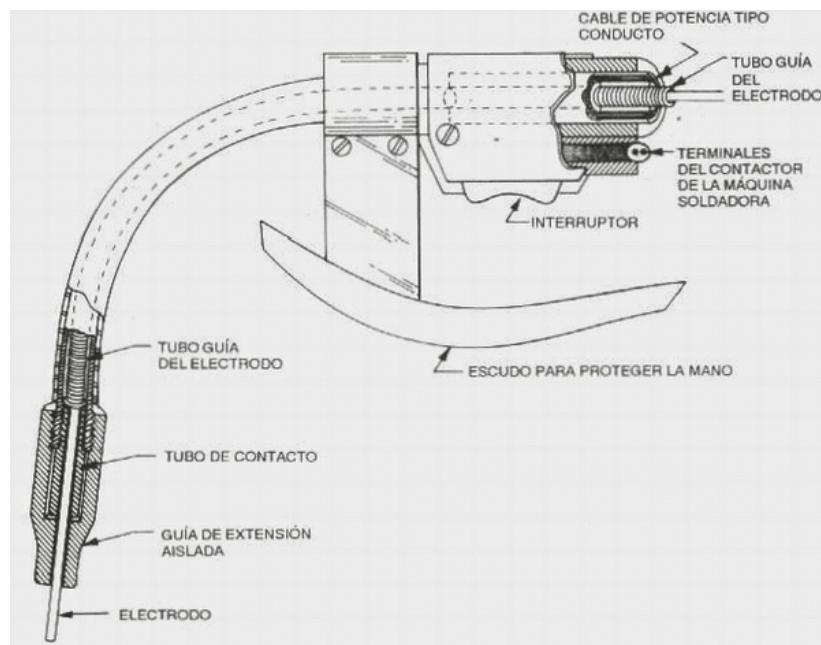
En estructuras de acero es muy común usar en la práctica conexiones soldadas debido a que resulta ser más económico y que también puede usarse para conectar cualquier tipo de elemento. En el aluminio en cambio, no resulta tan fácil poder aplicar soldadura a elementos estructurales debido a que no hay tanto personal capacitado. Esta sección no pretende cubrir todos los aspectos relacionados con el diseño de la soldadura, si no de dar algunos antecedentes de las especificaciones de conexiones soldadas de aluminio.

#### 4.3.1 Procesos de soldadura en aluminio

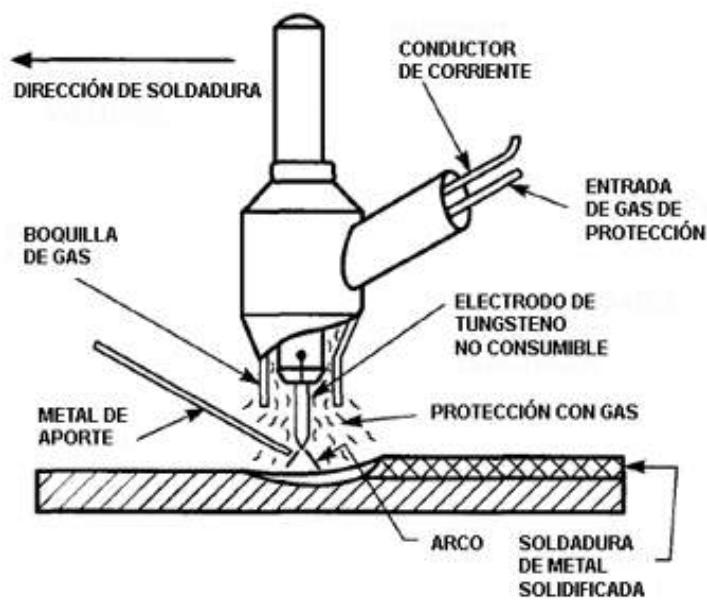
La soldadura es el proceso de unión de piezas mediante el calentamiento de sus superficies a un estado plástico o fluido, permitiendo que las piezas se unan (con o sin la adición de otro metal fundido). Existen diferentes procesos de soldadura como la soldadura de arco metálico protegido (SMAW por sus siglas en inglés) o la soldadura de arco metálico con gas (GMAW por sus siglas en inglés). El proceso SMAW es el más utilizado cuando se aplica la soldadura en acero y es un proceso manual, mientras que el proceso GMAW es un proceso semiautomático. En el MDA los procesos usados para fines constructivos son la soldadura de arco metálico con gas (GMAW) comúnmente llamado MIG (“metal inert gas”) y la soldadura de arco de gas tungsteno (GTAW), también llamado TIG (“tungsten inert gas”). Estos son los procesos para los cuales el MDA proporciona las propiedades mecánicas mínimas soldadas para aleaciones de aluminio en su Tabla 3.3-2.

La soldadura MIG usa un arco eléctrico con un recubrimiento de gas inerte entre el metal base y el electrodo. El electrodo es jalado desde un carrete mediante un mecanismo de alimentación de alambre y que llega al arco por medio de una pistola (figura 4.9). En la

soldadura TIG, el metal base y, si se usa, un metal de relleno son fundidos mediante un arco entre el metal base y un no consumible electrodo de tungsteno en un soporte (figura 4.10). El gas inerte que fluye desde la boquilla en el soporte protege el metal soldado y al electrodo.



**Figura 4.9 Proceso de soldadura MIG**



**Figura 4.10 Proceso de soldadura TIG**

### 4.3.2 Tipos de soldadura

Para identificar soldaduras, se usan los símbolos de soldadura estándar de la AWS tanto para aluminio como para acero. Las clases de soldadura más usadas para elementos estructurales son: las soldaduras a tope y las soldaduras de filete. Otras clases de soldaduras usadas pero con menos frecuencia son las soldaduras de tapón y las soldaduras de muesca.

**Soldaduras a tope** Las soldaduras a tope son usadas en juntas a tope donde la orilla de una placa se empareja con otra placa. En la figura 4.11 se muestran ejemplos de algunos tipos de soldadura a tope, como las cuadradas, las V, las biseladas, U y J. Las resistencias a tensión ultimas y de fluencia a través de una soldadura a tope están dadas en el MDA en la Tabla 3.3-2, cuando el metal base y la aleación de relleno se unen se usa la tabla 7.1-1.

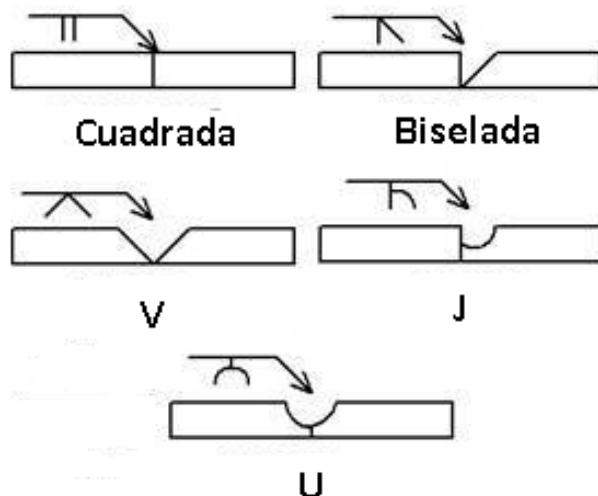


Figura 4.11 Ejemplos de soldadura a tope

El esfuerzo en una soldadura a tope es calculado con su área efectiva, que es el producto de su profundidad por su longitud efectiva. La longitud efectiva es el ancho de la placa menos ancha de la unión, perpendicular a la dirección del esfuerzo. La profundidad de una soldadura a tope depende de si es una junta de penetración completa (CJP por sus siglas en inglés) o si es una junta de penetración parcial (PJP por sus siglas en inglés). Para soldaduras de penetración completa, la profundidad de la soldadura es el espesor de la placa más delgada en la unión. En soldaduras de penetración parcial, la profundidad de la soldadura es usualmente el espesor de la preparación de la junta, es decir la profundidad de la V, el bisel, U o J, también depende del ángulo incluido, tipo de preparación, método de soldadura, y posición de la soldadura (ver las AWS D1.2).

El MDA especifica un factor de resistencia de  $\emptyset = 0.85$  en la resistencia última a tensión de una soldadura a tope. Además de este factor de resistencia Kissel (2002) menciona que

se debe de reducir la resistencia última de tensión que aparece en la tabla de 3.3-2 del MDA para tomar en cuenta los defectos que la inspección visual no toma en cuenta.

**Soldaduras de filete** La soldadura de filete se muestra en la figura 4.12. Las soldaduras de filete son de sección transversal triangular y su medida está definida por la dimensión de sus piernas ya que se supone que son iguales en ambos lados a menos que se especifique de otra manera. En aluminio, tanto como en acero, el esfuerzo en la soldadura se calcula como el esfuerzo cortante en el área efectiva de la soldadura, que es el producto de la longitud efectiva y la garganta efectiva. La garganta efectiva es la distancia más corta desde la raíz hasta la cara de la soldadura. Para soldaduras con longitudes de pierna iguales, esta distancia es la longitud de la pierna por 0.7071 (que es igual al cos 45°). La longitud efectiva es la longitud total de toda la soldadura, incluyendo remates. La longitud efectiva en soldadura de filete intermitente debe ser al menos de 40 mm.

Debido a que la resistencia de filete es proporcional al tamaño de la soldadura, es preferible tener un tamaño pequeño de soldadura ya que se reducen las distorsiones ocasionadas por los esfuerzos residuales inducidos por ella misma. Esto lleva a tener un control en la medida máxima que puede tener una soldadura de filete, en las especificaciones de la AWS D1.2 se establece esta medida máxima en función del espesor de la placa que se está soldando. Por otro lado, las soldaduras que son más pequeñas que el espesor del metal unido induce un mayor esfuerzo residuales. Esto se debe a que la cantidad de calor necesaria para poner un pequeño cordón de soldadura es insuficiente para expandir el metal base. Al enfriarse el metal de la soldadura, se restringe contra la contracción por el ya frio metal base. Por esta razón la especificación AWS D1.2 proporciona una medida mínima en la soldadura de filete.

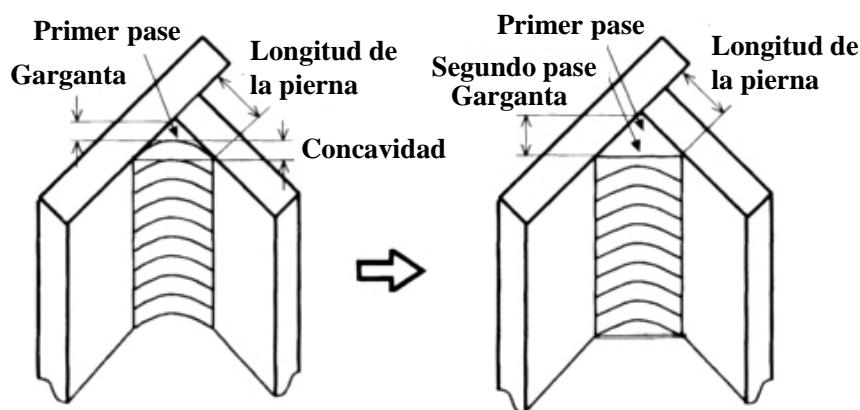
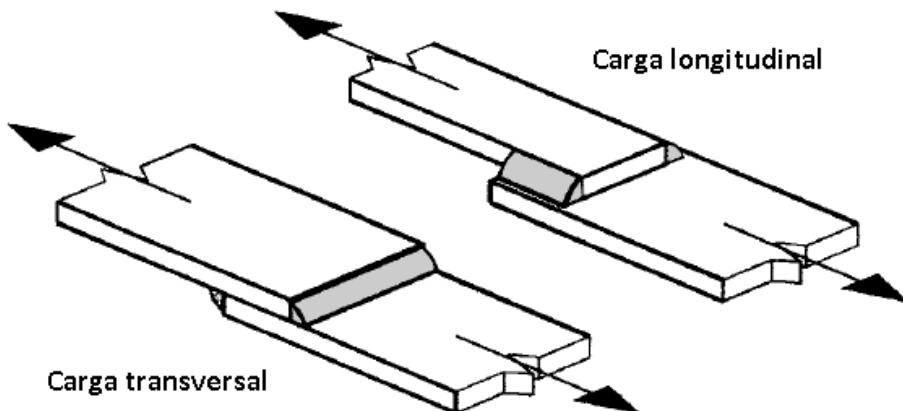


Figura 4.12 Soldadura de filete

Tanto en aluminio como en acero, las soldaduras de filete son más resistentes cuando se les aplica una carga transversal que cuando se les aplica una carga longitudinal (figura 4.13). Se puede entender esto si vemos una falla transversal como una falla a tensión y una falla longitudinal como una falla a cortante. El MDA usa la más baja de las resistencias longitudinales a cortante para prevenir complicaciones en el diseño debido a que en una misma conexión, algunas de las soldaduras pueden estar cargadas transversalmente u otras longitudinalmente. Además, para propósitos de diseño, la resistencia que se toma de la aleación de relleno es la resistencia de cortante sin importar la dirección de la carga. Esto es conservativo debido a que la resistencia a cortante de un metal de soldadura es menor que su resistencia de tensión.



**Figura 4.13 Cargas longitudinales y transversales en soldaduras de filete**

Una soldadura de filete puede fallar de dos maneras: la primera es una por cortante o tensión a través de la parte más estrecha del filete, llamado garganta; y la segunda es una falla por cortante o tensión del metal base subyacente afectado por la soldadura. A diferencia del acero, en el aluminio tanto el metal base como la aleación de relleno se suponen como fuentes potenciales de falla en la conexión, usando resistencias reducidas para el metal base afectada por la soldadura. Cuando se usan dos aleaciones diferentes como metal base, por ejemplo si se une una placa de aleación 6061 a una de aleación 6063, la resistencia de material soldado (tabla 3.3-2 del MDA) que se debe usar es el menor de los dos.

El MDA especifica un factor de resistencia para la resistencia última a cortante en soldaduras de filete de 0.80. Como en las conexiones mecánicas, el MDA no requiere de revisar la fluencia en una conexión soldada debido a que no se considera un estado límite. El desplazamiento es tan pequeño en la resistencia de fluencia de la soldadura que es insignificante comparado con la longitud del elemento soldado.

**Soldaduras de tapón y de muesca** Las soldaduras de tapón y de muesca son usadas para transmitir cortante entre placas superpuestas y son hechas mediante la fabricación de un agujero o una muesca en la placa superior y rellenando el agujero con una aleación de relleno. Un ejemplo se usa cuando se une un cubre placas a al patín de una viga. El área efectiva de una soldadura de tapón o de muesca es el área nominal del tapón o la muesca en el plano de las superficies de contacto. Las dimensiones mínimas para soldaduras de tapón o de muesca están en función del espesor del material y se encuentran en la especificación AWS D1.2.

#### 4.3.3 Factores de resistencia para soldadura de filete en aluminio y acero

El diseño de soldaduras de aluminio es diferente al de soldaduras de acero en la manera en la que el esfuerzo cortante de diseño del alambre de relleno es determinado. En la especificación de acero del AISC, el 60% resistencia de tensión de la aleación de relleno es multiplicada por un factor de resistencia de  $\phi = 0.75$ , considerando que la resistencia a cortante en el acero el 60% de la resistencia a tensión, esto genera un factor de seguridad de 0.80. En el aluminio la resistencia última de cortante de la aleación de relleno esta multiplicado por un factor de resistencia  $\phi = 0.80$ . La diferencia entre los dos es que en el acero se trabaja con la resistencia de fluencia y en el aluminio se trabaja con la resistencia última.

#### 4.3.4 Aseguramiento de calidad en soldaduras

Debido a las variaciones que puede haber en el proceso de soldadura es necesario tener un control de calidad durante y al final de la fabricación. Los perfiles de aluminio y acero hechos en taller generalmente superan los requisitos mínimos de resistencia de manera consistente. Uno de los métodos para poder evaluar una soldadura, es el método de inspección visual, este método que aunque es muy útil es muy limitado para detectar ciertos tipos de defectos.

Cuando la inspección visual no es suficiente como para determinar si la soldadura cumple con los estándares de calidad, es necesario realizar alguno de los siguientes tipos de inspección: pruebas no destructivas (NDT por sus siglas en inglés) y las pruebas destructivas (también llamadas pruebas mecánicas).

Las pruebas destructivas incluyen:

- 1) **Inspección visual** Detecta las formas y medidas incorrectas de soldadura, por ejemplo la excesiva concavidad de las soldaduras de filete, penetración inadecuada en soldaduras a tope; socavación, traslapes; y grietas superficiales en la soldadura u el metal base.

- 2) **Inspección Radiográfica** Se limita a soldaduras de ranura en juntas a tope, debido a que es necesario aplicarse en superficies de espesor constante. De manera que las soldaduras de filete no se ajustan a los aparatos de radiografía. La radiografía puede detectar defectos como grietas internas, porosidad, penetración inadecuada o inclusiones.
- 3) **Inspección por líquidos penetrantes** Pueden ser aplicados a cualquier tipo de soldadura y juntas. Consiste en aplicar un líquido penetrante, esperar de 5 a 10 minutos, y después limpiar la superficie. Despues se aplica un revelador, y se revisa la soldadura para ver si hay discontinuidades en las que el líquido penetrante haya entrado. Este método solo muestra las discontinuidades que hayan alcanzado la superficie. Se tiene que remover el líquido penetrante antes de reparar la soldadura.
- 4) **Inspección Ultrasónica** Utiliza ondas de sonido de alta frecuencia para detectar defectos similares, pero es más cara y requiere de personal entrenado para interpretar los resultados. Se usa solo para soldaduras de ranura y la especificación AWS D1.2 no incluye métodos de inspección ultrasónica o criterios de aceptación.

Las pruebas de destrucción tales como las pruebas de flexión, pruebas de tensión y pruebas de fractura se usan por lo regular cunado se califica a un soldador o el procedimiento de soldadura.

# CAPÍTULO 5

## Ejemplos de aplicación

**Ejemplo I** Calcular la fuerza de tensión que puede resistir una placa de aluminio 6351-T6 de 1/4 in x 4 in mostrado en la figura 3.2. Los agujeros para los tornillos son de 1/2 in barrenados con 1/32 in de más.

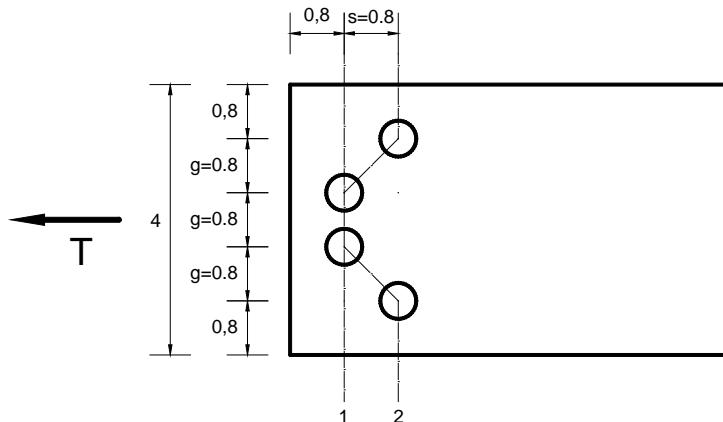


Figura 3.2 Área neta para una cadena de agujeros

Del apéndice A, el estado límite último a tensión para esa aleación es  $F_{tu} = 2956 \text{ kg/cm}^2$  y el esfuerzo de fluencia  $F_{ty} = 2599 \text{ kg/cm}^2$ .

De la tabla 3.2  $k_t = 1.0$

El área total del elemento es:

$$A_g = 0.0127 \text{ m} \times (0.1016 \text{ m}) = 0.00129 \text{ m}^2$$

Para calcular el área neta primero hay que calcular el ancho neto

El ancho neto siguiendo el camino de falla 1 es:

$$w_n = (0.1016 m - 2(0.0127 m + 0.00079 m)) = 0.07462 m$$

El área neta es:

$$A_n = w_n t$$

donde:

$A_n$  = Área neta

$w_n$  = Ancho neto

$t$  = Espesor

Sustituyendo

$$A_n = 0.07462 m (0.00635 m) = 0.000473 m^2$$

Calculando el ancho neto para el camino de falla 2

$$w_n = \left( 0.1016 m - 4(0.0127 m + 0.00079 m) + \frac{0.02032^2(2)}{4(0.02032 m)} \right) = 0.0578 m$$

Entonces el área neta es:

$$A_n = 0.0578 m (0.00635 m) = 0.000367 m^2$$

Usando la menor de las áreas netas se obtienen los siguientes estados límite:

El estado límite en la fluencia es

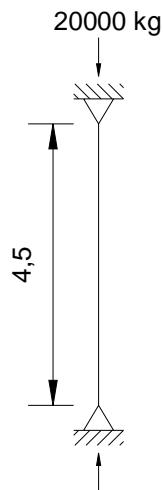
$$\emptyset F_L = 0.95 F_{ty} A_g = 0.95 (2599 kg/cm^2)(12.9 cm^2) = 31,850.7 kg [31.85 Ton]$$

El estado límite en la falla es

$$\emptyset F_L = 0.85 \frac{F_{tu} A_n}{k_t} = 0.85 (2956 kg/cm^2)(3.67 cm^2) = 9,221.2 kg [9.22 Ton]$$

Así que el estado límite que domina es el de fractura y es de 9,221.2 kg [9.22 Ton]

**Ejemplo II** Obtener la sección I mínima requerida para soportar una carga concéntrica que actúa sobre la siguiente columna. Considere un aluminio de aleación 6061-T6



Considerando que

$$\sigma = \frac{F}{A};$$

$$A = \frac{F}{\sigma} = \frac{20000 \text{ kg}}{2446 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}} = 8.17 \text{ cm}^2.$$

De la tabla 8 Parte VI del MDA se escoge la sección I 4X2.31 como primer intento

De la ecuación 3.6

$$\lambda = \left(\frac{kl}{r}\right) \left(\frac{1}{\pi}\right) \sqrt{F_{cy}/E} = \left(\frac{450}{1.847}\right) \left(\frac{1}{\pi}\right) \sqrt{\frac{2446}{709480}} = 4.6$$

Calculando los límites  $S_1^*$  y  $S_2^*$  ecuaciones 3.12 y 3.13 respectivamente

$$S_1^* = \frac{B_c - F_{cy}}{D_c^*} = \frac{2750.81 - 2446}{916.48} = 0.33$$

Considerando  $D_c^* = \pi D_c \sqrt{\frac{E}{F_{cy}}} = \pi(17.129) \sqrt{\frac{709480}{2446}} = 916.48$  y que las constantes de pandeo inelástico se obtuvieron del apéndice D

$$S_2^* = \frac{C_c}{\pi} \sqrt{\frac{F_{cy}}{E}} = \frac{65.845}{\pi} \sqrt{\frac{2446}{709480}} = 1.23$$

Por lo tanto  $\lambda > S_2^*$  y la resistencia está determinada por la ecuación 3.7

$$\emptyset F_L = \frac{\emptyset_{cc} F_{cy}}{\lambda^2} = \frac{0.95(2446)}{4.6^2} = 109.82 \frac{kg}{cm^2}$$

Considerando que  $\emptyset_{cc} = 0.14\lambda + 0.58 = 0.14(4.6) + 0.58 = 1.2$ , pero el factor de resistencia debe ser menor de 0.95

Si el esfuerzo actuante es  $f_c = \frac{20000}{12.645} = 1581.6 \frac{kg}{cm^2}$

Como  $f_c > \emptyset F_L$  se aumenta la sección a una I 6X4.03

$$\lambda = \left(\frac{kl}{r}\right)\left(\frac{1}{\pi}\right)\sqrt{F_{cy}/E} = \left(\frac{450}{2.416}\right)\left(\frac{1}{\pi}\right)\sqrt{\frac{2446}{709480}} = 3.48$$

Como  $S_1^*$  y  $S_2^*$  dependen del material, no cambian y la relación de esbeltez  $\lambda$  es mayor  $S_2^*$  y la resistencia es:

$$\emptyset F_L = \frac{\emptyset_{cc} F_{cy}}{\lambda^2} = \frac{0.95(2446)}{3.48^2} = 191.87 \frac{kg}{cm^2}$$

El esfuerzo actuante es  $f_c = \frac{20000}{22.129} = 903.79 \frac{kg}{cm^2}$  y por lo tanto la sección no pasa

Suponiendo una sección I 8X6.18

$$\lambda = \left(\frac{kl}{r}\right)\left(\frac{1}{\pi}\right)\sqrt{F_{cy}/E} = \left(\frac{450}{2.997}\right)\left(\frac{1}{\pi}\right)\sqrt{\frac{2446}{709480}} = 2.81$$

La resistencia es de

$$\emptyset F_L = \frac{\emptyset_{cc} F_{cy}}{\lambda^2} = \frac{0.95(2446)}{2.81^2} = 294.28 \frac{kg}{cm^2}$$

El esfuerzo actuante es  $f_c = \frac{20000}{33.935} = 589.36 \frac{kg}{cm^2}$  y por lo tanto la sección no pasa

Suponiendo una sección I 9X8.36

$$\lambda = \left(\frac{kl}{r}\right)\left(\frac{1}{\pi}\right)\sqrt{F_{cy}/E} = \left(\frac{450}{3.327}\right)\left(\frac{1}{\pi}\right)\sqrt{\frac{2446}{709480}} = 2.53$$

La resistencia es de

$$\emptyset F_L = \frac{\emptyset_{cc} F_{cy}}{\lambda^2} = \frac{0.95(2446)}{2.53^2} = 363.03 \frac{kg}{cm^2}$$

El esfuerzo actuante es  $f_c = \frac{20000}{45.871} = 436 \frac{kg}{cm^2}$  y por lo tanto la sección no pasa

Suponiendo una sección I 10X10.3

$$\lambda = \left(\frac{kl}{r}\right) \left(\frac{1}{\pi}\right) \sqrt{F_{cy}/E} = \left(\frac{450}{3.658}\right) \left(\frac{1}{\pi}\right) \sqrt{\frac{2446}{709480}} = 2.29$$

La resistencia es de

$$\emptyset F_L = \frac{\emptyset_{cc} F_{cy}}{\lambda^2} = \frac{0.95(2446)}{2.29^2} = 439.26 \frac{kg}{cm^2}$$

El esfuerzo actuante es  $f_c = \frac{20000}{56.45} = 354.29 \frac{kg}{cm^2}$  y por lo tanto la sección se acepta parcialmente. Primero hay que revisar cada componente de la sección.

### **Resistencia del patín**

Si la sección es I 10X10.3, la relación de esbeltez es  $\frac{b}{t} = \frac{6.24}{1.27} = 4.91$

Calculando los límites  $S_1$  y  $S_2$  (ecuaciones 3.20 y 3.22 respectivamente)

$$S_1 = \frac{B_p - \frac{\emptyset_y}{\emptyset_c} F_{cy}}{5.1D_p} = \frac{3146.382 - \frac{0.95}{0.85} 2446}{5.1(20.953)} = 3.86$$

y

$$S_2 = \frac{k_1 B_p}{5.1 D_p} = \frac{0.5(3146.382)}{5.1(20.953)} = 14.72$$

Como  $\frac{b}{t}$  esta entre  $S_1$  y  $S_2$  y el pandeo ocurre respecto a un eje de simetría la resistencia se calcula con la ecuación 3.18

$$\emptyset F_L = \emptyset_c \left[ B_p - 5.1 D_p \frac{b}{t} \right] = 0.85 [3146.382 - (5.1(20.953)(4.91))] = 2228.44 \frac{kg}{cm^2}$$

### **Resistencia del alma**

La relación de aspecto  $\frac{b}{t} = \frac{20.74}{0.737} = 28.14$

Calculando  $S_1$  y  $S_2$  para placas apoyadas en dos bordes (ecuaciones 3.20 y 3.22 pero con 1.6 en lugar de 5.1)

$$S_1 = \frac{B_p - \frac{\phi_y}{\phi_c} F_{cy}}{1.6 D_p} = \frac{3146.382 - \frac{0.95}{0.85} 2446}{1.6(20.953)} = 12.31$$

y

$$S_2 = \frac{k_1 B_p}{1.6 D_p} = \frac{0.5(3146.382)}{1.6(20.953)} = 46.92$$

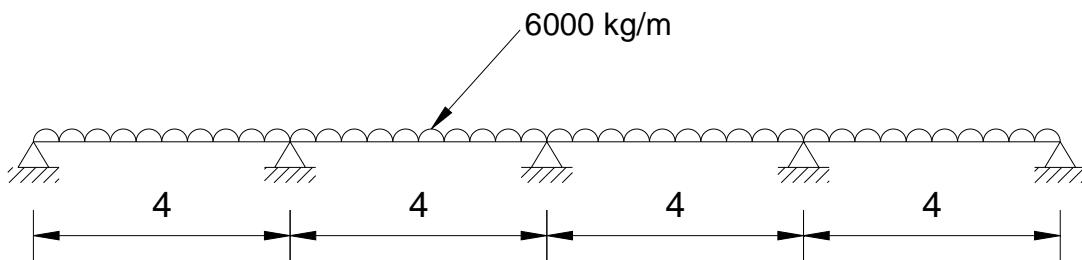
Como  $\frac{b}{t}$  esta entre  $S_1$  y  $S_2$  la resistencia se calcula con la ecuación 3.18 (Cambiando 5.1 por 1.6)

$$\phi F_L = \phi_c \left[ B_p - 1.6 D_p \frac{b}{t} \right] = 0.85 \left[ 3146.382 - (1.6(20.953)(4.91)) \right] = 2534.5 \frac{kg}{cm^2}$$

Por lo tanto la resistencia que rige es  $439.26 \frac{kg}{cm^2}$  y la sección I 10X10.3 se acepta

Haciendo un cálculo para acero A-36 se obtiene una sección IR 10X22

**Ejemplo III** Obtener la sección I mínima requerida para soportar una carga uniformemente repartida de sobre la siguiente viga. Considere un aluminio de aleación 6351-T6



### Diseño por momento

Del análisis estructural, el momento máximo que se presenta en la estructura es de:

$$M = \frac{168 wl^2}{1568} = \frac{168(6000kg/m)(4m)^2}{1568} = 1285.71 kg - m$$

Este momento se presenta en el primer apoyo interior de la viga generando tensión en las fibras extremas.

De acuerdo con el MDA y lo visto en este documento, como la viga está sujeta a pandeo lateral se debe de revisar el la resistencia en toda la sección y también revisarla por componentes.

Una primera aproximación:

$$\sigma = \frac{M}{S}; S = \frac{M}{\sigma} = \frac{128571 \text{ kg-cm}}{2599 \text{ kg/cm}^2} = 395 \text{ cm}^3$$

Considerando las secciones I estándar de la asociación americana de aluminio se requiere una sección I 10X8.65 (Tabla 8 de la Parte VI del MDA)

Así, de acuerdo con la tabla 3.14 de este documento, y usando las ecuaciones para vigas de alma simple flexionadas alrededor de su eje fuerte:

$$\frac{L_b}{r_y \sqrt{C_b}} = \frac{400 \text{ cm}}{3.61 \sqrt{1.13}} = 104.23$$

Considerando

$$S_1 = \frac{1.2 \left( B_c - \frac{\emptyset_y F_{cy}}{\emptyset_b} \right)}{D_c} = \frac{1.2 \left( 2932.7 - \frac{0.95(2599)}{0.85} \right)}{18.86} = 1.77$$

Se consideró  $\emptyset_y = 0.95$ ,  $\emptyset_b = 0.85$ , y las constantes de pandeo elástico  $B_c$  y  $D_c$  de tomaron del apéndice D

$$S_2 = 1.2C_c = 1.2(63.8) = 76.6$$

Por lo tanto la resistencia se calcula con la ecuación

$$\emptyset F_L = \frac{\emptyset_b C_b \pi^2 E}{\left( \frac{L_b}{1.2 r_y} \right)^2} = \frac{0.85(1.13)\pi^2 709480}{\left( \frac{400}{1.2(3.61)} \right)^2} = 788.84 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Considerando que el esfuerzo actuante en la fibra de compresión es:

$$f_c = \frac{M}{S} = \frac{128571 \text{ kg-cm}}{432.62 \text{ cm}^3} = 2377 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Como  $f_c > \emptyset F_L$  la sección no pasa y por lo tanto se propone una sección mayor. En este caso se selecciona la sección I 12X11.7

$$\frac{L_b}{r_y \sqrt{C_b}} = \frac{400 \text{ cm}}{4.191 \sqrt{1.13}} = 89.7$$

Como los límites  $S_1$  y  $S_2$  dependen únicamente de las propiedades del material no cambian, y se calcula de nuevo

$$\emptyset F_L = \frac{\emptyset_b C_b \pi^2 E}{\left(\frac{L_b}{1.2 r_y}\right)^2} = \frac{0.85(1.13)\pi^2 709480}{\left(\frac{400}{1.2(4.191)}\right)^2} = 1063.2 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

El esfuerzo actuante es

$$f_c = \frac{M}{S} = \frac{128571 \text{ kg} - \text{cm}}{698.089 \text{ cm}^3} = 1473.41 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Como  $f_c > \emptyset F_L$  la sección no pasa y por lo tanto se propone una sección mayor. En este caso se selecciona la sección I 14X16

$$\frac{L_b}{r_y \sqrt{C_b}} = \frac{400 \text{ cm}}{4.928 \sqrt{1.13}} = 76.35$$

Como los límites  $S_1$  y  $S_2$  dependen únicamente de las propiedades del material no cambian, por lo tanto  $76.36 < 76.6$  y la resistencia se calcula como

$$\emptyset F_L = \emptyset_b \left[ B_c - \frac{D_c L_b}{1.2 r_y \sqrt{C_b}} \right] = 0.85 \left[ 2932.7 - \frac{18.85(400)}{1.2(4.928)\sqrt{1.13}} \right] = 1473.26 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

El esfuerzo actuante es

$$f_c = \frac{M}{S} = \frac{128571 \text{ kg} - \text{cm}}{1145.5 \text{ cm}^3} = 897.9 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Como  $f_c < \emptyset F_L$  la sección pasa y se acepta la sección I 14X16

**Ahora se tiene que revisar la resistencia de cada componente y seleccionar la menor resistencia.**

### Revisando la resistencia del patín

Considerando  $\frac{b}{t} = \frac{8.763}{1.524} = 5.75$  y calculando  $S_1$  y  $S_2$  con las ecuaciones de la tabla 3.15

$$S_1 = \frac{B_p - \frac{\phi_y F_{cy}}{\phi_b}}{5.1 D_p} = \frac{3358.212 - \frac{0.95(2599)}{0.85}}{5.1(23.104)} = 3.84$$

Y

$$S_2 = \frac{k_1 B_p}{5.1 D_p} = \frac{0.5(3358.212)}{5.1(23.104)} = 14.25$$

Como  $\frac{b}{t}$  se encuentra entre  $S_1$  y  $S_2$  la resistencia se calcula con la siguiente ecuación (Tabla 3.15)

$$\emptyset F_L = \emptyset_b \left[ B_p - 5.1 D_p \frac{b}{t} \right] = 0.85 [3358.212 - (5.1(23.104)(5.75))] = 2278.58 \frac{kg}{cm^2}$$

### **Revisando la resistencia del alma**

Considerando  $\frac{h}{t} = \frac{30.48}{0.762} = 40$  y calculando  $S_1$  y  $S_2$  con las ecuaciones de la tabla 3.15

$$S_1 = \frac{B_{br} - \frac{\phi_y}{\phi_b} 1.3 F_{cy}}{m D_{br}} = \frac{4992.495 - \frac{0.95}{0.85} 1.3(2599)}{1.65(51.292)} = 14.37$$

Considerando  $m = 1.15 + C_0/2C_c$  (ecuación que aparece en la sección 3.4.18 del MDA)

$$S_2 = \frac{k_1 B_{br}}{m D_{br}} = \frac{0.5(4992.495)}{1.65(51.292)} = 29.5$$

Como  $\frac{h}{t}$  es mayor a  $S_2$  la resistencia del alma se calcula como

$$\emptyset F_L = \frac{\emptyset_b k_2 \sqrt{B_{br} E}}{\frac{mh}{t}} = \frac{0.85(2.04) \sqrt{(4992.495)(709480)}}{\frac{1.65(30.48)}{0.762}} = 1563.63 \frac{kg}{cm^2}$$

Por lo tanto la menor resistencia que rige es  $\emptyset F_L = 1558.6 \frac{kg}{cm^2}$  y la sección que se acepta es I 14X16 en 6351-T6

## Diseño por cortante

Del análisis estructural se obtiene que el cortante máximo es:

$$V = \frac{17wl}{28} = \frac{17(6000)(4)}{28} = 14571.4 \text{ kg}$$

Obteniendo  $\frac{h}{t} = \frac{30.48}{0.762} = 40$  y calculando  $S_1$  y  $S_2$  con las ecuaciones de la tabla 3.16

$$S_1 = \frac{B_s - \frac{\phi_y F_{ty}}{\phi_{vp}\sqrt{3}}}{1.25D_s} = \frac{2373.5 - \frac{0.95(2599)}{0.9\sqrt{3}}}{1.25(13.728)} = 46.01$$

Como  $\frac{h}{t} < S_1$  la resistencia se calcula con la siguiente ecuación (tabla 3.16)

$$\phi F_L = \frac{\phi_y F_{ty}}{\sqrt{3}} = \frac{0.95(2599)}{\sqrt{3}} = 1425.5 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

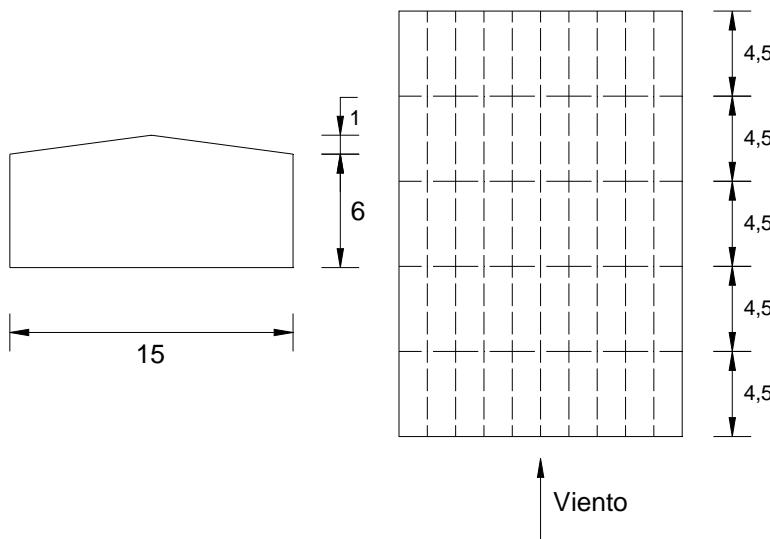
Si el esfuerzo de cortante a través del alma es

$$f_v = \frac{V}{A_w} = \frac{14571.4 \text{ kg}}{(0.762)30.48} = 627.3 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Por lo tanto  $627.3 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} < 1425.5 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$  y se acepta la sección I 14X16

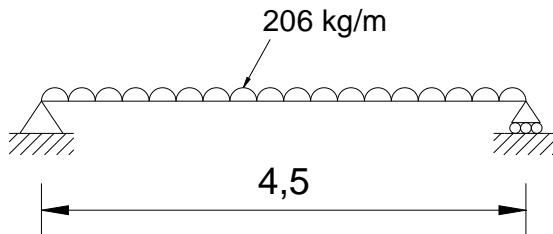
Si se hace un cálculo rápido de la sección necesaria en acero A- 36 se obtiene una sección IR 12X22. Una sección con menos peralte pero más pesada.

**Ejemplo IV** Diseñar la siguiente nave industrial considerando la dirección del viento mostrada en la figura, que la nave es abierta, y está localizada en la delegación Gustavo A. Madero.



En este ejemplo solo se ilustran las cargas que se ejercen sobre cada elemento estructural y no se muestra el procedimiento para obtenerlas, ya que no es el objetivo de este documento.

Diseñando las viguetas que unen a las armaduras.



Calculando el momento actuante

$$M = \frac{wl^2}{8} = \frac{206 \text{ kg/m}(4.5\text{m})^2}{8} = 521 \text{ kg-m} = 52143 \text{ kg-cm}$$

Diseñando con una aleación 6061-T6

Dado que  $\sigma = \frac{M}{S}$ ; el modulo requerido  $S = \frac{M}{\sigma} = \frac{52143 \text{ kg-cm}}{2446 \text{ kg/cm}^2} = 21.32 \text{ cm}^3$ , usando una sección canal, se propone una sección americana estándar C 4X1.85

Revisando la sección completa

$$\frac{L_b}{r_y \sqrt{C_b}} = \frac{450}{1.143(1)} = 393.7$$

Calculando los límites  $S_1$  y  $S_2$

$$S_1 = \frac{1.2 \left( B_c - \frac{\phi_y F_{cy}}{\phi_b} \right)}{D_c} = \frac{1.2 \left( 2750.81 - \frac{0.95(2446)}{0.85} \right)}{17.129} = 1.91$$

Y

$$S_2 = 1.2 C_c = 1.2(65.845) = 79.014$$

Como la longitud efectiva de la viga es mayor a  $S_2$ , la resistencia se calcula como

$$\phi F_L = \frac{\phi_b C_b \pi^2 E}{\left( \frac{L_b}{1.2 r_y} \right)^2} = \frac{0.85(1) \pi^2 709480}{\left( \frac{450}{1.2(1.143)} \right)^2} = 55.29 \text{ kg/cm}^2$$

El esfuerzo actuante es

$$f_b = \frac{M}{S} = \frac{52143 \text{ kg - cm}}{31.463} = 1657.27 \text{ kg/cm}^2$$

Como  $f_b > \phi F_L$  la sección no pasa y se aumenta de sección C 12X7.41

$$\frac{L_b}{r_y \sqrt{C_b}} = \frac{450}{2.032(1)} = 221.45$$

La longitud efectiva de la viga sigue siendo mayor a  $S_2$ , y la resistencia se calcula como

$$\phi F_L = \frac{\phi_b C_b \pi^2 E}{\left( \frac{L_b}{1.2 r_y} \right)^2} = \frac{0.85(1) \pi^2 709480}{\left( \frac{450}{1.2(2.032)} \right)^2} = 174.76 \text{ kg/cm}^2$$

El esfuerzo actuante es

$$f_b = \frac{M}{S} = \frac{52143 \text{ kg - cm}}{360.515 \text{ cm}^3} = 144.63 \text{ kg/cm}^2$$

Como  $f_b < \phi F_L$  la sección C 12X7.41 se acepta

### Revisando la resistencia del patín

Considerando  $\frac{b}{t} = \frac{5.79}{1.28} = 4.52$  y calculando  $S_1$  y  $S_2$  con las ecuaciones de la tabla 3.15

$$S_1 = \frac{B_p - \frac{\phi_y F_{cy}}{\phi_b}}{5.1 D_p} = \frac{3146.382 - \frac{0.95(2446)}{0.85}}{5.1(20.953)} = 3.86$$

y

$$S_2 = \frac{k_1 B_p}{5.1 D_p} = \frac{0.5(3146.382)}{5.1(20.953)} = 14.72$$

Como  $\frac{b}{t}$  se encuentra entre  $S_1$  y  $S_2$  la resistencia se calcula con la siguiente ecuación (Tabla 3.15)

$$\emptyset F_L = \emptyset_b \left[ B_p - 5.1 D_p \frac{b}{t} \right] = 0.85 \left[ 3146.382 - (5.1(20.953)(4.52)) \right] = 2263.87 \frac{kg}{cm^2}$$

### Revisando la resistencia del alma

Considerando  $\frac{h}{t} = \frac{25.98}{0.76} = 34.18$  y calculando  $S_1$  y  $S_2$  con las ecuaciones de la tabla 3.15

$$S_1 = \frac{B_{br} - \frac{\phi_y}{\phi_b} 1.3 F_{cy}}{m D_{br}} = \frac{4668.443 - \frac{0.95}{0.85} 1.3(2446)}{1.65(46.38)} = 14.56$$

Considerando  $m = 1.15 + C_0/2C_c$  (ecuación que aparece en la sección 3.4.18 del MDA)

$$S_2 = \frac{k_1 B_{br}}{m D_{br}} = \frac{0.5(4668.443)}{1.65(46.38)} = 30.5$$

Como  $\frac{h}{t}$  es mayor a  $S_2$  la resistencia del alma se calcula como

$$\emptyset F_L = \frac{\emptyset_b k_2 \sqrt{B_{br} E}}{\frac{mh}{t}} = \frac{0.85(2.04) \sqrt{(4668.443)(709480)}}{1.65(25.98) / 0.76} = 1769.27 \frac{kg}{cm^2}$$

Por lo tanto la menor resistencia que rige es  $\phi F_L = 174.76 \frac{kg}{cm^2}$  y la sección que se acepta es C 12X7.41 en 6061-T6

### Diseño por cortante

Del análisis estructural se obtiene que el cortante máximo es:

$$V = \frac{wl}{2} = \frac{(206)(4.5)}{2} = 463.5 \text{ kg}$$

Obteniendo  $\frac{h}{t} = \frac{25.98}{0.76} = 34.18$  y calculando  $S_1$  y  $S_2$  con las ecuaciones de la tabla 3.16

$$S_1 = \frac{B_s - \frac{\phi_y F_{ty}}{\phi_{vp}\sqrt{3}}}{1.25D_s} = \frac{2223.18 - \frac{0.95(2446)}{0.9\sqrt{3}}}{1.25(12.44)} = 47.11$$

Como  $\frac{h}{t} < S_1$  la resistencia se calcula con la siguiente ecuación (tabla 3.16)

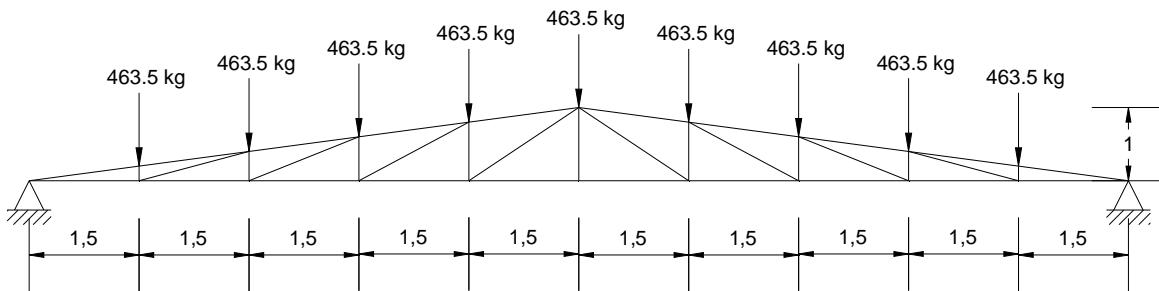
$$\phi F_L = \frac{\phi_y F_{ty}}{\sqrt{3}} = \frac{0.95(2446)}{\sqrt{3}} = 1341.58 \frac{kg}{cm^2}$$

Si el esfuerzo de cortante a través del alma es

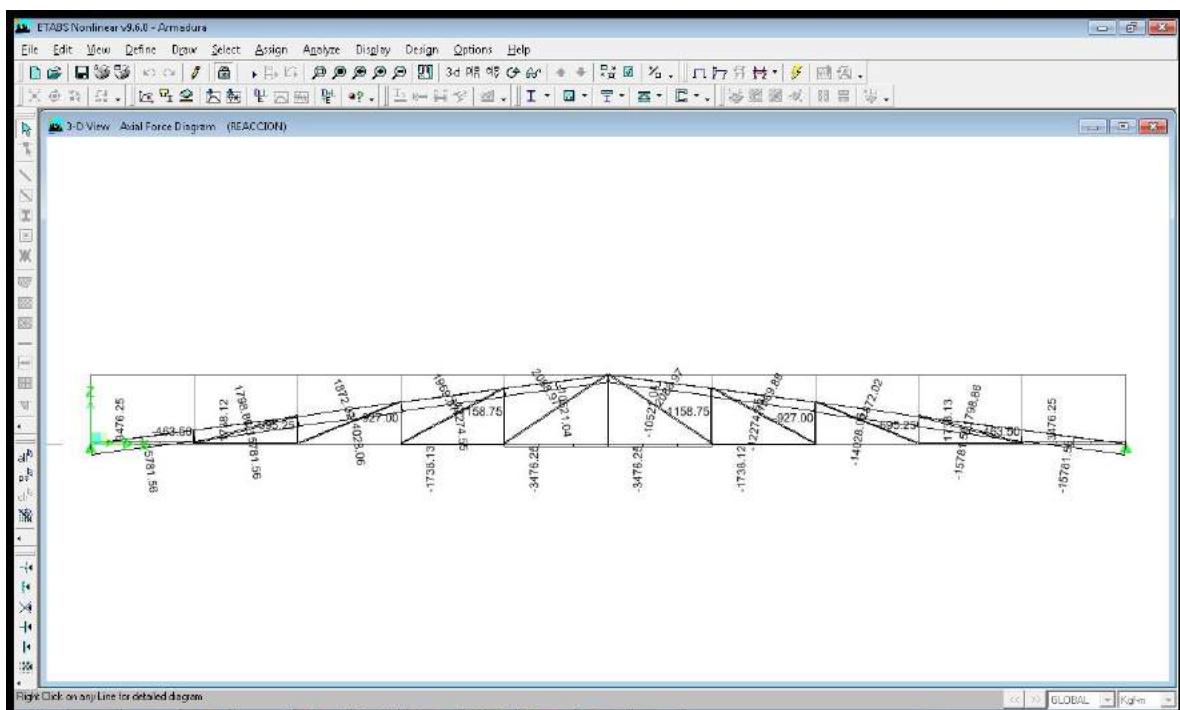
$$f_v = \frac{V}{A_w} = \frac{463.5 \text{ kg}}{(0.76)25.98} = 23.47 \frac{kg}{cm^2}$$

Por lo tanto  $23.47 \frac{kg}{cm^2} < 1341.58 \frac{kg}{cm^2}$  y se acepta la sección C 12X7.41

Suponiendo que los esfuerzos cortantes se transmiten sin torsión a la armadura mostrada y suponiendo que la armadura está totalmente articulada, se obtienen los siguientes esfuerzos.



Del programa ETABS se obtiene el siguiente diagrama de cargas axiales



Y la mayor carga axial que se obtiene es de 15781.56 kg en compresión

Diseñando para esta carga el elemento de 1.51 m se obtiene que:

$$\sigma = \frac{F}{A},$$

$$A = \frac{F}{\sigma} = \frac{15781.56 \text{ kg}}{2446 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}} = 6.45 \text{ cm}^2.$$

De tabla 23 Parte VI del MDA se escoge la sección RT 3X3X0.125 como primer intento

De la ecuación 3.6

$$\lambda = \left(\frac{kl}{r}\right) \left(\frac{1}{\pi}\right) \sqrt{\frac{F_{cy}}{E}} = \left(\frac{151}{2.972}\right) \left(\frac{1}{\pi}\right) \sqrt{\frac{2446}{709480}} = 0.949$$

Calculando los límites  $S_1^*$  y  $S_2^*$  ecuaciones 3.12 y 3.13 respectivamente

$$S_1^* = \frac{B_c - F_{cy}}{D_c^*} = \frac{2750.81 - 2446}{916.48} = 0.33$$

Considerando  $D_c^* = \pi D_c \sqrt{\frac{E}{F_{cy}}} = \pi(17.129) \sqrt{\frac{709480}{2446}} = 916.48$  y que las constantes de pandeo inelástico se obtuvieron del apéndice D

$$S_2^* = \frac{C_c}{\pi} \sqrt{\frac{F_{cy}}{E}} = \frac{65.845}{\pi} \sqrt{\frac{2446}{709480}} = 1.23$$

Por lo tanto  $S_1^* < \lambda < S_2^*$  y la resistencia está determinada por la ecuación 3.9

$$\phi F_L = \phi_{cc}(B_c - D_c^* \lambda) = 0.8 (2750.81 - (916.48(0.949))) = 1504.85 \text{ kg/cm}^2$$

Considerando que  $\phi_{cc} = 1 - 0.21\lambda = 1 - 0.21(0.949) = 0.8$  (siempre tomando en cuenta que el factor de resistencia debe ser menor de 0.95)

Si el esfuerzo actuante es  $f_c = \frac{15781.56}{9.29} = 1698.76 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$

Como  $f_c > \phi F_L$  se aumenta la sección a una RT 3X3X0.188

$$\lambda = \left(\frac{kl}{r}\right) \left(\frac{1}{\pi}\right) \sqrt{\frac{F_{cy}}{E}} = \left(\frac{151}{2.921}\right) \left(\frac{1}{\pi}\right) \sqrt{\frac{2446}{709480}} = 0.966$$

Como  $S_1^*$  y  $S_2^*$  dependen del material, no cambian y la relación de esbeltez  $\lambda$  se encuentra entre  $S_1^*$  y  $S_2^*$ , por lo tanto la resistencia es:

$$\phi F_L = \phi_{cc}(B_c - D_c^* \lambda) = 0.8 (2750.81 - (916.48(0.966))) = 1492.39 \text{ kg/cm}^2$$

El esfuerzo actuante es  $f_c = \frac{15781.56}{13.613} = 1159.3 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$  y por lo tanto la sección se acepta parcialmente. Primero hay que revisar cada componente de la sección.

### **Resistencia del patín**

Si la sección es RT 3X3X0.188, la relación de esbeltez es  $\frac{b}{t} = \frac{6.66}{0.478} = 13.93$

Calculando los límites  $S_1$  y  $S_2$  (ecuaciones 3.20 y 3.22 cambiando el factor 5.1 por 1.6 respectivamente)

$$S_1 = \frac{B_p - \frac{\phi_y}{\phi_c} F_{cy}}{1.6D_p} = \frac{3146.382 - \frac{0.95}{0.85} 2446}{1.6(20.953)} = 12.3$$

Y

$$S_2 = \frac{k_1 B_p}{1.6D_p} = \frac{0.5(3146.382)}{1.6(20.953)} = 42.93$$

Como  $\frac{b}{t}$  esta entre  $S_1$  y  $S_2$  y el pandeo ocurre respecto a un eje de simetría la resistencia se calcula con la ecuación 3.18 modificada para placas doblemente apoyadas

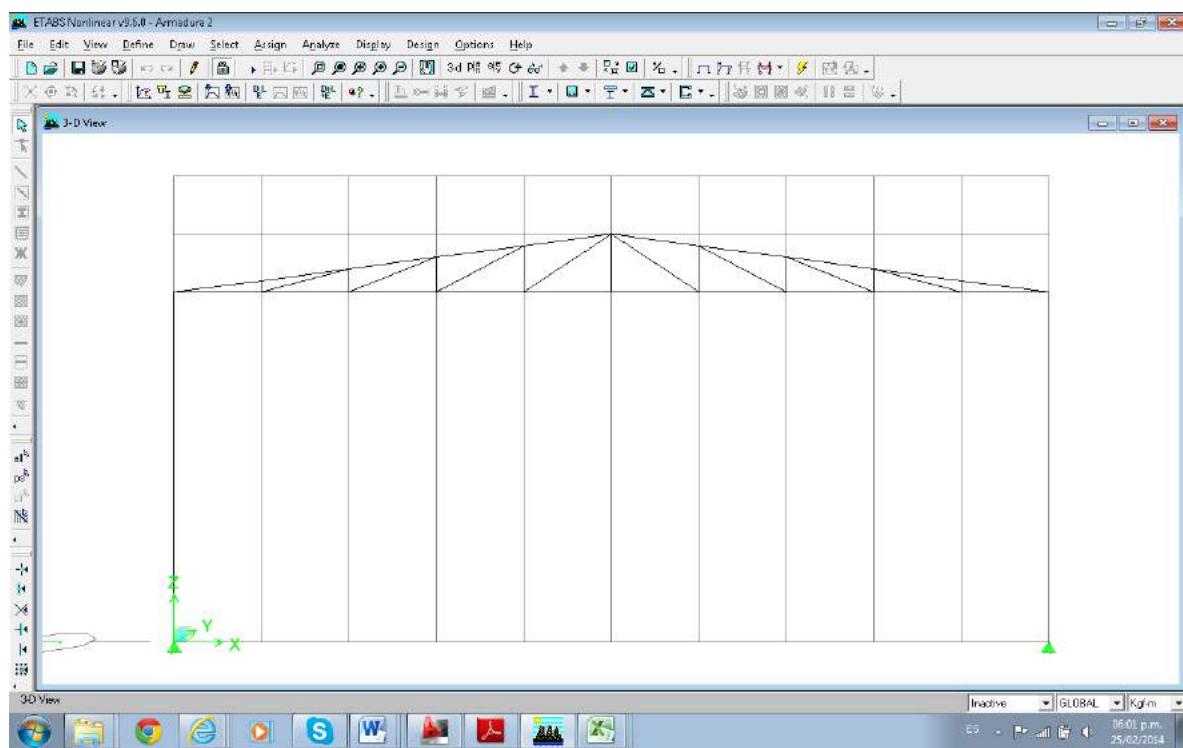
$$\phi F_L = \phi_c \left[ B_p - 1.6D_p \frac{b}{t} \right] = 0.85 [3146.382 - (1.6(20.953)(13.93))] = 2277.47 \frac{kg}{cm^2}$$

### **Resistencia del alma**

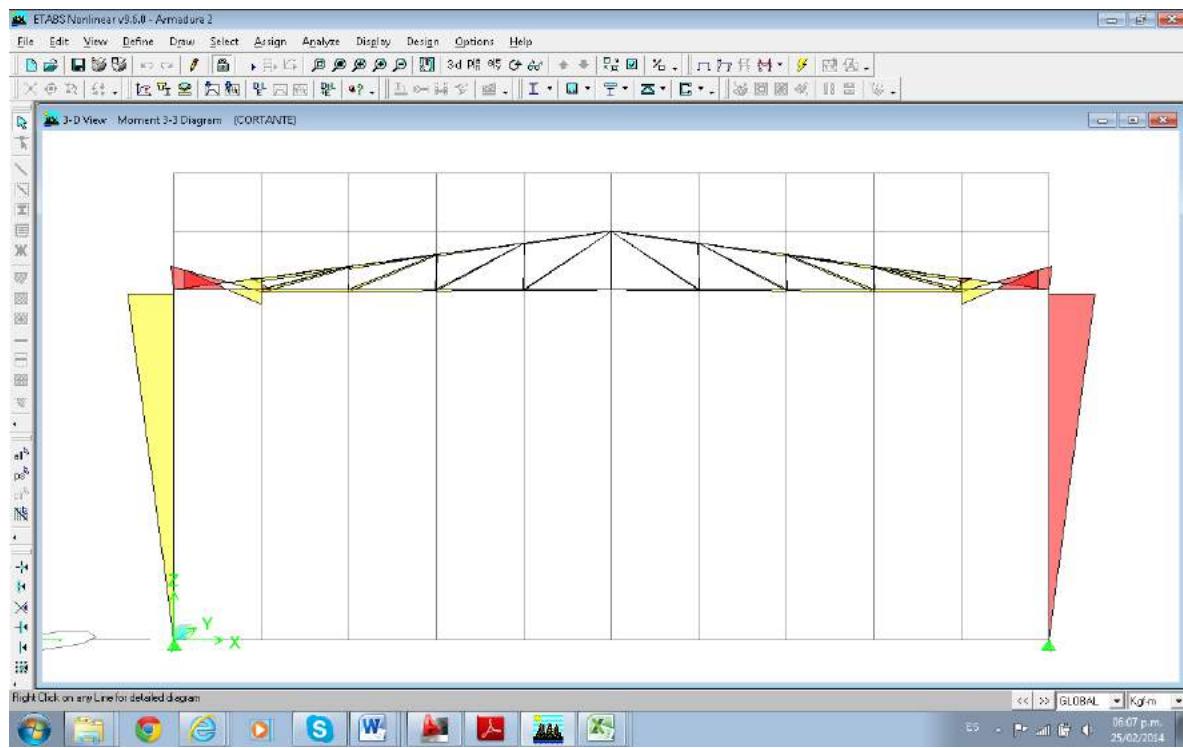
Como la sección es simétrica en ambos ejes la resistencia es la misma  $2277.47 \text{ kg/cm}^2$

Por lo tanto la mínima resistencia es  $1492.39 \text{ kg/cm}^2$  y la sección RT 3X3X0.188 se acepta

Originalmente se planteó diseñar las columnas utilizando las reacciones de los apoyos de la armadura anterior, pero se obtenían momentos demasiados altos como para obtener una sección razonable en columnas. Por lo tanto se usó la sección RT 3X3X0.188 y se introdujo en un modelo donde la armadura no estuviera articulada, de forma tal que los momentos en las columnas se redujeran también. Por lo que se obtuvo el siguiente modelo con los siguientes resultados.



El diagrama de momentos que se obtuvo fue el siguiente



Revisando los elementos mecánicos de la columna, se obtienen los siguientes elementos mecánicos

$$M=1339.091 \text{ kg-m}, P=2088 \text{ kg}, V=226.05 \text{ kg}$$

### Diseño la columna

Revisando la flexión debida al momento flexionante para la sección I 14X16 en toda la sección.

Calculando la longitud efectiva considerando que haya arriostramientos laterales en la columna a cada 2 m

$$\frac{L_b}{r_y\sqrt{C_b}} = \frac{200 \text{ cm}}{4.928\sqrt{1.15}} = 37.85$$

$$\text{Donde } C_b = \frac{12.5M_{MAX}}{2.5M_{MAX}+3M_A+4M_B+3M_C} = \frac{12.5(133909)}{(2.5(133909))+3(100431.75)+4(111590.83)+3(122749.92)} = 1.15$$

Calculando los límites

$$S_1 = \frac{1.2 \left( B_c - \frac{\phi_y F_{cy}}{\phi_b} \right)}{D_c} = \frac{1.2 \left( 2750.81 - \frac{0.95(2446)}{0.85} \right)}{17.129} = 1.19$$

Se consideró  $\phi_y = 0.95$ ,  $\phi_b = 0.85$ , y las constantes de pandeo elástico  $B_c$  y  $D_c$  se tomaron del apéndice D

$$S_2 = 1.2C_c = 1.2(65.85) = 79.02$$

Por lo tanto la resistencia se calcula con la ecuación

$$\phi F_L = \phi_b \left[ B_c - \frac{D_c L_b}{1.2 r_y \sqrt{C_b}} \right] = 0.85 \left[ 2750.81 - \frac{17.129(200)}{1.2(4.928)\sqrt{1.15}} \right] = 1879.01 \text{ kg/cm}^2$$

Calculando el esfuerzo actuante

$$f_b = \frac{M}{S} = \frac{133909 \text{ kg - cm}}{1145.45 \text{ cm}^3} = 116.9 \text{ kg/cm}^2$$

Como  $f_b < \phi F_L$  la sección pasa por flexión

Revisando la sección por compresión

De la ecuación 3.6

$$\lambda = \left(\frac{kl}{r}\right)\left(\frac{1}{\pi}\right)\sqrt{F_{cy}/E} = \left(\frac{2(600)}{4.928}\right)\left(\frac{1}{\pi}\right)\sqrt{\frac{2446}{709480}} = 4.6$$

Calculando los límites  $S_1^*$  y  $S_2^*$  ecuaciones 3.12 y 3.13 respectivamente

$$S_1^* = \frac{B_c - F_{cy}}{D_c^*} = \frac{2750.81 - 2446}{916.48} = 0.33$$

Considerando  $D_c^* = \pi D_c \sqrt{\frac{E}{F_{cy}}} = \pi(17.129) \sqrt{\frac{709480}{2446}} = 916.48$  y que las constantes de pandeo inelástico se obtuvieron del apéndice D

$$S_2^* = \frac{C_c}{\pi} \sqrt{\frac{F_{cy}}{E}} = \frac{65.845}{\pi} \sqrt{\frac{2446}{709480}} = 1.23$$

Por lo tanto  $\lambda > S_2^*$  y la resistencia está determinada por la ecuación 3.7

$$\phi F_L = \frac{\phi_{cc} F_{cy}}{\lambda^2} = \frac{0.95(2446)}{4.6^2} = 109.82 \frac{kg}{cm^2}$$

Considerando que  $\phi_{cc} = 0.14\lambda + 0.58 = 0.14(4.6) + 0.58 = 1.2$ , pero el factor de resistencia debe ser menor de 0.95

Si el esfuerzo actuante es  $f_a = \frac{2088}{91.613} = 22.79 \frac{kg}{cm^2}$

Por lo tanto la sección se acepta para compresión

Revisando por cortante

Obteniendo  $\frac{h}{t} = \frac{30.48}{0.762} = 40$  y calculando  $S_1$  y  $S_2$  con las ecuaciones de la tabla 3.16

$$S_1 = \frac{B_s - \frac{\phi_y F_{ty}}{\phi_{vp}\sqrt{3}}}{1.25 D_s} = \frac{2223.18 - \frac{0.95(2446)}{0.9\sqrt{3}}}{1.25(12.44)} = 47.11$$

Como  $\frac{h}{t} < S_1$  la resistencia se calcula con la siguiente ecuación (tabla 3.16)

$$\phi F_L = \frac{\phi_y F_{ty}}{\sqrt{3}} = \frac{0.95(2446)}{\sqrt{3}} = 1341.58 \frac{kg}{cm^2}$$

Si el esfuerzo de cortante a través del alma es

$$f_s = \frac{V}{A_w} = \frac{226.05 \text{ kg}}{(0.762)30.48} = 9.73 \frac{kg}{cm^2}$$

Por lo tanto  $9.73 \frac{kg}{cm^2} < 1341.58 \frac{kg}{cm^2}$  y se acepta la sección I 14X16

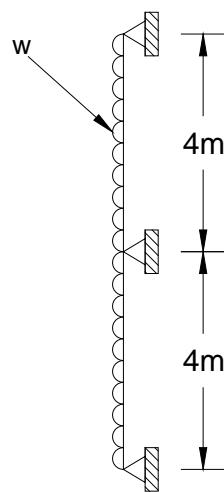
Revisando la combinación de esfuerzos

$$\frac{f_a}{F_a} + \left(\frac{f_b}{F_b}\right)^2 + \left(\frac{f_s}{F_s}\right)^2 \leq 1.0$$

$$\frac{22.79}{109.82} + \left(\frac{116.9}{1879.01}\right)^2 + \left(\frac{9.73}{1341.58}\right)^2 = 0.21 \leq 1.0$$

Por lo tanto pasa la sección I 14X16

**Ejemplo V** Diseñar la siguiente viga, que pertenece a la fachada de un edificio de manera que pueda soportar la presión de viento  $P = 150 \text{ kg/m}^2$  y considerando que las vigas están separadas a cada 3 m. Usar una aleación 6061-T6 (La manera en cómo se distribuyen las cargas en una fachada y su funcionamiento se tratan en la tesis Fachadas Integrales de aluminio (Muñoz, 1976))



## Obteniendo la carga w

$$w = (150 \text{ kg/m}^2)(3\text{m}) = 450\text{kg/m}$$

### Diseño por momento

Del análisis estructural, el momento máximo a compresión que se presenta en la viga es de:

$$M_{max-} = \frac{wl^2}{8} = \frac{(450\text{kg/m})(4\text{m})^2}{8} = 900 \text{ kg-m}$$

Este momento se presenta en apoyo interior de la viga generando tensión en las fibras extremas.

El momento máximo de tensión es:

$$M_{max+} = \frac{9wl^2}{128} = \frac{9(450\text{kg/m})(4\text{m})^2}{128} = 506.25 \text{ kg-m}$$

De acuerdo con el MDA y lo visto en este documento, como la viga está sujeta a pandeo lateral se debe de revisar el la resistencia en toda la sección y también revisarla por componentes.

### Revisando la compresión

Una primera aproximación:

$$\sigma = \frac{M}{S}; S = \frac{M}{\sigma} = \frac{90000 \text{ kg-cm}}{2446 \text{ kg/cm}^2} = 36.79 \text{ cm}^3$$

Considerando las secciones de tubo cuadrado de aluminio se requiere una sección RT 3X3X0.250 (Tabla 23 de la Parte VI del MDA)

Así, de acuerdo con la tabla 3.13 de este documento (factor de esbeltez para tubos rectangulares), y usando conservadoramente  $C_b = 1$

$$\frac{L_b S_c}{C_b \sqrt{I_y J}/2} = \frac{400 \text{ cm}(38.18\text{cm}^3)}{\sqrt{(145.265\text{cm}^4)(216.440\text{cm}^4)}/2} = 172.26$$

De tabla 3.14

$$S_1 = \frac{\left(B_c - \frac{\phi_y F_{cy}}{\phi_b}\right)^2}{1.6 D_c} = \frac{\left(2750.81 - \frac{0.95(2446)}{0.85}\right)^2}{1.6(17.129)} = 10.6$$

Se consideró  $\phi_y = 0.95$ ,  $\phi_b = 0.85$ , y las constantes de pandeo elástico  $B_c$  y  $D_c$  de tomaron del apéndice D

$$S_2 = \left( \frac{C_c}{1.6} \right)^2 = \left( \frac{65.845}{1.6} \right)^2 = 1693.57$$

Por lo tanto la resistencia se calcula con la ecuación

$$\begin{aligned} \phi F_L &= \phi_b \left( B_c - 1.6D_c \sqrt{\frac{L_b S_c}{C_b \left( \frac{\sqrt{I_y J}}{2} \right)}} \right) \\ &= 0.85 \left( 2750.81 - 1.6(17.129) \sqrt{\frac{400(38.18)}{\left( \frac{\sqrt{(145.265)(216.440)}}{2} \right)}} \right) \\ &= 2032.44 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

Considerando que el esfuerzo actuante en la fibra de compresión es:

$$f_c = \frac{M}{S} = \frac{90000 \text{ kg} - \text{cm}}{38.18 \text{ cm}^3} = 2357 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Como  $f_c > \phi F_L$  la sección no pasa y por lo tanto se propone una sección mayor. En este caso se selecciona la sección RT 3.5X3.5X0.250

$$\frac{L_b S_c}{C_b \sqrt{I_y J} / 2} = \frac{400 \text{ cm} (53.913 \text{ cm}^3)}{\sqrt{(239.75 \text{ cm}^4)(357.127 \text{ cm}^4)} / 2} = 147.39$$

Como los límites  $S_1$  y  $S_2$  dependen únicamente de las propiedades del material no cambian, y se calcula de nuevo

$$\phi F_L = \phi_b \left( B_c - 1.6D_c \sqrt{\frac{L_b S_c}{C_b \left( \frac{\sqrt{I_y J}}{2} \right)}} \right)$$

$$\emptyset F_L = 0.85 \left( 2750.81 - 1.6(17.129) \sqrt{\frac{400(53.913)}{\left(\frac{\sqrt{(239.75)357.127}}{2}\right)}} \right) = 2055.36 kg/cm^2$$

El esfuerzo actuante es

$$f_c = \frac{M}{S} = \frac{90000 kg - cm}{53.913 cm^3} = 1669.35 \frac{kg}{cm^2}$$

Como  $f_c < \emptyset F_L$  la sección RT 3.5X 3.5X0.250 se acepta

**Ahora se tiene que revisar la resistencia de cada componente y seleccionar la menor resistencia.**

### Revisando la resistencia del patín

Considerando  $\frac{b}{t} = \frac{7.62}{0.635} = 12$  y calculando  $S_1$  y  $S_2$  con las ecuaciones de la tabla 3.15 (compresión uniforme en componentes planos apoyados en ambos bordes)

$$S_1 = \frac{B_p - \frac{\emptyset_y F_{cy}}{\emptyset_b}}{1.6D_p} = \frac{3146.382 - \frac{0.95(2446)}{0.85}}{1.6(20.953)} = 12.3$$

Y

$$S_2 = \frac{k_1 B_p}{1.6D_p} = \frac{0.5(3146.382)}{1.6(20.953)} = 46.92$$

Como  $\frac{b}{t}$  es menor a  $S_1$  la resistencia se calcula con la siguiente ecuación (Tabla 3.15)

$$\emptyset F_L = \emptyset_y F_{cy} = 0.95(2446) = 2323.7 kg/cm^2$$

### Revisando la resistencia del alma por flexión

Considerando  $\frac{h}{t} = \frac{7.62}{0.635} = 12$  y calculando  $S_1$  y  $S_2$  con las ecuaciones de la tabla 3.15

$$S_1 = \frac{B_{br} - \frac{\emptyset_y}{\emptyset_b} 1.3F_{cy}}{mD_{br}} = \frac{4668.443 - \frac{0.95}{0.85} 1.3(2446)}{1.57(46.38)} = 15.30$$

Considerando  $m = 1.15 + C_0/2C_c$  (ecuación que aparece en la sección 3.4.18 del MDA)

$$S_2 = \frac{k_1 B_{br}}{m D_{br}} = \frac{0.5(4668.443)}{1.57(46.38)} = 32.06$$

Como  $\frac{h}{t}$  es menor a  $S_1$  la resistencia del alma se calcula como

$$\phi F_L = 1.3\phi_y F_{cy} = 1.3(0.95)(2446) = 3020.81 kg/cm^2$$

Por lo tanto la menor resistencia que rige es  $\phi F_L = 2055.36 \frac{kg}{cm^2}$  y la sección que se acepta es RT 3.5X3.5X0.250

### Diseño por cortante

Del análisis estructural se obtiene que el cortante máximo es:

$$V = \frac{5wl}{4} = \frac{5(450)(4)}{4} = 2250. kg$$

Obteniendo  $\frac{h}{t} = \frac{7.62}{0.635} = 12$  y calculando  $S_1$  y  $S_2$  con las ecuaciones de la tabla 3.16

$$S_1 = \frac{B_s - \frac{\phi_y F_{ty}}{\phi_{vp}\sqrt{3}}}{1.25D_s} = \frac{2223.128 - \frac{0.95(2446)}{0.9\sqrt{3}}}{1.25(12.44)} = 47.10$$

Como  $\frac{h}{t} < S_1$  la resistencia se calcula con la siguiente ecuación (tabla 3.16)

$$\phi F_L = \frac{\phi_y F_{ty}}{\sqrt{3}} = \frac{0.95(2446)}{\sqrt{3}} = 1341.58 \frac{kg}{cm^2}$$

Si el esfuerzo de cortante a través del alma es

$$f_v = \frac{V}{A_w} = \frac{2250 \text{ kg}}{(0.635)7.62} = 465 \frac{kg}{cm^2}$$

Por lo tanto  $465 \frac{kg}{cm^2} < 1341.58 \frac{kg}{cm^2}$  y se acepta la sección RT 3.5X3.5X0.250

---

# Conclusiones

---

En este manual se presentaron las disposiciones que existen en el MDA y el Eurocódigo 09 para poder desarrollar el adecuado diseño de elementos de aluminio bajo las demandas de tensión, compresión, flexión, cortante y sus combinaciones. Sin embargo, comparando el MDA y el Eurocódigo 09 con el manual de acero se puede observar que estos manuales no están tan desarrollados como el manual de acero del AISC. El manual de acero del AISC presenta la manera de determinar las resistencias de un elemento para todas las condiciones que se puedan presentar en la práctica, mientras que el MDA deja al criterio del diseñador estas condiciones. Con respecto a los esfuerzos de tensión en un elemento, el MDA y el manual del AISC presentan las mismas disposiciones (aunque el manual del AISC proporciona una relación máxima de esbeltez y el MDA no), pero con respecto a los demás esfuerzos existen varios temas por desarrollar. En compresión, el AISC proporciona las requerimientos necesarios para poder diseñar las placas base que van conectadas a las columnas, el MDA no. En flexión, como se mencionó antes, el manual del AISC tiene secciones compactas, y permite el análisis plástico para la generación de articulaciones plásticas. El MDA no cuenta con el criterio para poder determinar secciones compactas aunque el Eurocódigo 09 si contiene estos requerimientos. Con respecto al esfuerzo cortante, el AISC proporciona los criterios necesarios para poder determinar la resistencia a cortante del alma bajo cargas concentradas y para cada tipo de falla de este fenómeno. El manual del AISC presenta tres tipos de falla en el alma debido a concentraciones locales del cortante que son: la fluencia local del alma (web yielding), el aplastamiento del alma (web crippling) y el pandeo lateral del alma (web sidesway) y para cada uno proporciona las ecuaciones necesarias para poder calcular la resistencia debido a esos tipos de falla. En el MDA solo se proporcionan las ecuaciones necesarias para poder prevenir la falla de aplastamiento del alma.

También se trató el tema de conexiones atornilladas y soldadas en elementos de aluminio. En conexiones atornilladas de aluminio, el MDA contiene requerimientos más detallados acerca de lo que se debe tomar en cuenta para poder diseñar una adecuada conexión mecánica, ya que como se mencionó en el presente trabajo, las conexiones mecánicas son

más factibles de realizar en campo. Por otro lado, los requerimientos para realizar conexiones soldadas en aluminio no son tan amplios como los que se encuentran el manual de acero del AISC. En el MDA solo se permiten soldaduras tipo TIG (TGAW) o MIG (MGAW), de este tipo de soldaduras solo se puede aplicar en campo la tipo TIG la otra es soldadura de taller, en acero el tipo de soldadura más común es la SMAW la cual se puede aplicar en campo, haciendo más rápido la unión de elementos estructurales. Además, en el manual de acero del AISC se proporcionan tablas de ayuda de diseño para las conexiones más usadas en estructuras de acero e incluso con variantes en la aplicación de la carga. Esto no sucede en el MDA, debido a que existen diferentes aleaciones para combinar con los materiales base a unir.

Existen otros temas de importancia que se necesitan explicar con mayor detalle en el MDA, como son los temas de diseño por fatiga y diseño por fuego. Aunque no se explicaron en este trabajo, el Eurocódigo 09 en sus partes 2 y 3 se proporcionan los requerimientos para poder diseñar elementos de aluminio bajo estas condiciones.

Para poder incluir un apartado de diseño estructuras de aluminio en las normas técnicas complementarias, será necesario plantear el enfoque que se va usar para poder desarrollarlo. Se puede usar el enfoque del MDA, donde las secciones compactas no existen, permitiendo el uso de cualquier sección transversal de aluminio, o el enfoque del Eurocódigo 09, el cual proporciona el criterio para secciones compactas, restringiendo la variedad de secciones transversales en el uso estructural. Si se opta por el enfoque del MDA, el único tipo de análisis permitido para una estructura de aluminio será el elástico, ya que como las secciones no necesariamente son compactas, será difícil alcanzar la fluencia en toda la sección. Sin embargo si se opta por el enfoque del Eurocódigo, el análisis de las estructuras de aluminio podrá ser elástico o inelástico. También será necesario revisar la factibilidad de usar soldadura SMAW en aluminio, ya que actualmente existen electrodos para poder desarrollar este tipo de soldadura en el aluminio.

---

# REFERENCIAS

---

Popov Egor P. (1992), Introducción a la Mecánica de Sólidos, Limusa, México D.F.

Kissel J. Randolph y Ferry Robert L. (2002), Aluminum Structures, John Wiley & Sons Nueva York, N.Y.

The Aluminum Association (2005), Aluminum Design Manual, 1525 Wilson Boulevard, Suite 600, Arlington VA.

CEN (2004), Eurocode 9 Design of Aluminum Structures, Comité Européen de Normalisation, Bruselas, Belgica

AISC (2006), Steel Construction Manual 13<sup>th</sup> ed., American Institute of Steel Construction, Chicago IL.

McCormac Jack C. y Csernak Stephen F. (2013), Diseño de Estructuras de Acero, Alfaomega, México D.F.

ASCE (2002) Specification for the design of cold-formed stainless steel structural members, American Society of Civil Engineers, Nueva York NY.

Meli P. (2007) Diseño Estructural, Limusa, México D.F.

De Buen López de Heredia Oscar (1970), Estructuras de acero comportamiento y diseño, Limusa, México D.F.

Clark John W. y Rolf Richard L. (1964) Design of Aluminum Tubular Members, ASCE journal of the structural division, Nueva York NY.

Muñoz Cano Cardoso Manuel Rubén (1976) Fachadas Integrales de Aluminio Tesis Universidad Nacional Autónoma de México

IMCA (2012) Manual de Construcción en Acero – DEP, Instituto mexicano de la construcción en acero, Limusa, México D.F.

# Apéndice A

## Propiedades mecánicas para aleaciones de aluminio

Aleación y Temples	Producto	Rango de Espesor (cm)	$F_{tu}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$F_{ty}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$F_{cy}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$F_{su}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Módulo de Elasticidad a Compresión <sup>2</sup> E(kg/cm <sup>2</sup> )
1100-H12 -H14	Lámina, placa, tubo estirado, varilla rolada y barra	Todos todos	968 1121	765 968	714 917	632 714	709480 709480
2014-T6 -T651 -T6, T6510, T6511 -T6, T651	Lámina Placa Extrusiones Barra y Varilla terminada en frio, Tubo estirado	0.10 a 0.630 0.630 a 5.0 Todos Todos	4638 4689 4230 4587	4077 4128 3721 3874	4128 4077 3670 3721	2803 2803 2446 2650	766565 766565 766565 766565
Alclad							
2014-T6 -T6 -T651	Lámina Lámina Placa	0.0630 a 0.10 0.10 a 0.630 0.630 a 1.250	4434 4485 4485	3874 4027 4027	3925 4077 3925	2650 2752 2752	759429 759429 759429
3003-H12 -H14 -H16 -H18 -H12 -H14 -H16 -H18	Lámina y placa Lámina y placa Lámina Lámina Tubo estirado Tubo estirado Tubo estirado Tubo estirado	0.040 a 5.0 0.020 a 2.50 0.0150 a 0.40 0.0150 a 0.320 Todos Todos Todos Todos	1223 1427 1682 1886 1223 1427 1682 1886	866 1172 1478 1682 866 1172 1478 1682	714 968 1274 1427 765 1121 1325 1478	765 866 968 1070 765 866 968 1070	709480 709480 709480 709480 709480 709480 709480 709480
Alclad							
3003-H12 -H14 -H16 -H18 -H14 -H18	Lámina y placa Lámina y placa Lámina Lámina Tubo estirado Tubo estirado	0.040 a 5.0 0.020 a 2.50 0.0150 a 0.40 0.0150 a 0.320 0.0630 a 0.630 0.0250 a 1.250	1172 1376 1631 1835 1376 1835	815 1121 1427 1631 1121 1631	632 917 1172 1325 1070 1427	714 866 968 1070 866 1070	709480 709480 709480 709480 709480 709480
3004-H32 -H34 -H36 -H38 -H34 -H36	Lámina y placa Lámina y placa Lámina Lámina Tubo estirado Tubo estirado	0.040 a 5.0 0.020 a 2.50 0.0150 a 0.40 0.0150 a 0.320 0.0450 a 1.150 0.0450 a 1.150	1937 2243 2446 2650 2243 2446	1478 1733 1937 2192 1733 1937	1274 1529 1733 2039 1682 1886	1172 1325 1427 1478 1325 1427	709480 709480 709480 709480 709480 709480

Aleación y Temples	Producto	Rango de Espesor (cm)	$F_{tu}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$F_{ty}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$F_{cy}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$F_{su}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Módulo de Elasticidad a Compresión <sup>2</sup> E(kg/cm <sup>2</sup> )
<b>Alclad</b>							
3004-H32	Lámina	0.040 a 0.630	1886	1427	1172	1121	709480
-H34	Lámina	0.020 a 0.630	2192	1682	1478	1274	709480
-H36	Lámina	0.0150 a 0.40	2396	1886	1682	1325	709480
-H38	Lámina	0.0150 a 0.320	2599	2090	1988	1478	709480
-H131, H241, H341	Lámina	0.060 a 0.120	2192	1835	1529	1274	709480
-H151, H261, H361	Lámina	0.060 a 0.120	2396	2090	1988	1325	709480
3005-H25	Lámina	0.0320 a 0.120	1835	1529	1427	1070	709480
-H28	Lámina	0.0150 a 0.20	2192	1886	1733	1172	709480
3105-H25	Lámina	0.0320 a 0.20	1631	1325	1172	968	709480
5005-H12	Lámina y placa	0.040 a 5.0	1274	968	917	765	709480
-H14	Lámina y placa	0.020 a 2.50	1478	1172	1070	866	709480
-H16	Lámina	0.0150 a 0.40	1682	1376	1274	968	709480
-H32	Lámina y placa	0.040 a 5.0	1223	866	765	765	709480
-H34	Lámina y placa	0.020 a 2.50	1427	1070	968	866	709480
-H36	Lámina	0.0150 a 0.40	1631	1274	1121	917	709480
5050-H32	Lámina	0.040 a 0.630	1529	1121	968	968	709480
-H34	Lámina	0.020 a 0.630	1733	1427	1274	1070	709480
-H32	Varilla y Barra acabados en frio, Tubo estirado	Todos	1529	1121	1070	917	709480
-H34	Varilla y Barra acabados en frio, Tubo estirado	Todos	1733	1427	1325	1070	709480
5052-O	Lámina y placa	0.0150 a 8.0	1733	663	673	1121	716,616
-H32	Lámina y Placa Barra y Varilla	Todos	2192	1631	1478	1325	716,616
-H34	acabados en frio	Todos	2396	1835	1682	1427	716,616
-H36	Lámina	0.0150 a 4.0	2599	2039	1835	1529	716,616
5083-O	Extrusiones	hasta 1.30	2752	1121	1121	1682	730,887
-H111	Extrusiones	hasta 1.270	2803	1682	1478	1682	730,887
-H111	Extrusiones	1.270 a 1.30	2803	1682	1478	1631	730,887
-O	Lámina y placa	0.120 a 0.630	2803	1274	1274	1733	730,887
-H116	Lámina y placa	0.40 a 4.0	3109	2192	1835	1835	730,887
-H32, -H321	Lámina y placa	0.40 a 4.0	3109	2192	1835	1835	730,887
-H116	Placa	4.0 a 8.0	2905	2039	1682	1682	730,887
-H32, -H321	Placa	4.0 a 8.0	2905	2039	1682	1682	730,887
5086-O	Extrusiones	hasta 13.0	2446	968	968	1478	730,887
-H111	Extrusiones	hasta 1.270	2548	1478	1274	1478	730,887
-H111	Extrusiones	1.270 a 13.0	2548	1478	1274	1478	730,887
-O	Lámina y placa	0.050 a 5.0	2446	968	968	1478	730,887
-H112	Lámina y placa	0.40 a 1.250	2548	1274	1172	1529	730,887
-H112	Placa	1.250 a 4.0	2446	1070	1121	1478	730,887
-H112	Placa	4.0 a 8.0	2396	968	1070	1478	730,887
-H116	Lámina y placa	0.160 a 5.0	2803	1988	1835	1682	730,887
-H32	Lámina y placa	Todos	2803	1988	1835	1682	730,887
	Tubo Estirado						
-H34	Lámina y placa	Todos	3058	2396	2243	1835	730,887
	Tubo Estirado						
5154-H38	Lámina	0.0150 a 0.320	3160	2446	2345	1682	730,887

Aleación y Temples	Producto	Rango de Espesor (cm)	$F_{tu}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$F_{ty}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$F_{cy}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$F_{su}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Módulo de Elasticidad a Compresión <sup>2</sup> E(kg/cm <sup>2</sup> )
5454-O	Extrusiones	hasta 13.0	2192	866	866	1325	730,887
-H111	Extrusiones	hasta 1.270	2345	1325	1121	1427	730,887
-H111	Extrusiones	1.270 a 13.0	2345	1325	1121	1325	730,887
-H112	Extrusiones	hasta 13.0	2192	866	917	1325	730,887
-O	Lámina y placa	0.050 a 8.0	2192	866	866	1325	730,887
-H32	Lámina y placa	0.050 a 5.0	2548	1835	1682	1478	730,887
-H34	Lámina y placa	0.050 a 2.50	2752	2039	1886	1631	730,887
5456-O	Lámina y placa	0.120 a 0.630	2956	1325	1325	1835	730,887
-H116	Lámina y placa	0.40 a 1.250	3211	2345	1886	1886	730,887
-H32, -H321	Lámina y placa	0.40 a 1.250	3211	2345	1886	1886	730,887
-H116	Placa	1.250 a 4.0	3109	2192	1733	1733	730,887
-H32, -H321	Placa	1.250 a 4.0	3109	2192	1733	1733	730,887
-H116	Placa	4.0 a 8.0	2905	2039	1733	1733	730,887
-H32, -H321	Placa	4.0 a 8.0	2905	2039	1733	1733	730,887
6005-T5	Extrusiones	hasta 2.50	2650	2446	2446	1682	709,480
6061-T6, T651	Lámina y placa	0.0250 a 10.0	2956	2446	2446	1886	709,480
-T6, T6510,T6511	Extrusiones	Todos	2650	2446	2446	1682	709,480
-T6, T651	Barra y Varilla acabados en frio	hasta 20.0	2956	2446	2446	1733	709,480
-T6	Tubo Estirado	0.0630 a 1.250	2956	2446	2446	1886	709,480
-T6	Tubería	Todos	2650	2446	2446	1682	709,480
6063-T5	Extrusiones	hasta 1.250	1529	1121	1121	917	709,480
-T52	Extrusiones	hasta 2.50	1529	1121	1121	917	709,480
-T5	Extrusiones	1.250 a 2.50	1478	1070	1070	866	709,480
-T6	Extrusiones y tuberías	Todos	2090	1733	1733	1325	709,480
6066-T6, T6510, T6511	Extrusiones	Todos	3517	3160	3160	1886	709,480
6070-T6, T62	Extrusiones	hasta 8.0	3364	3160	3160	2039	709,480
6105-T5	Extrusiones	hasta 1.250	2650	2446	2446	1682	709,480
6351-T5	Extrusiones	hasta 2.50	2650	2446	2446	1682	709,480
6351-T6	Extrusiones	hasta 2.0	2956	2599	2599	1886	709,480
6463-T6	Extrusiones	hasta 1.250	2090	1733	1733	1325	709,480
7005-T53	Extrusiones	hasta 2.0	3517	3109	3007	1988	738,022

1.- $F_{tu}$  y  $F_{ty}$  son los valores mínimos especificados (excepto el  $F_{ty}$  para la aleación 1100-H12, H14 en Barra y Varilla con acabado en frio y tubo estirado, Alclad 3003-H18 en lámina y 5050-H32, H34 en Barra y Varilla con acabado en frio cuyos valores son los mínimos esperados);

Las otras propiedades de resistencia corresponden a valores mínimos esperados.

2.- Valores característicos. Para cálculos de deflexión se usa un módulo de elasticidad promedio; este es 700 Mpa mas bajo que los

valores en esta columna

---

# Apéndice B

---

## Densidades para aleaciones de aluminio

Aleación	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]
1100	2,710
2014	2,800
2024	2,780
3003	2,730
3004	2,720
3005	2,730
3105	2,720
4043	2,690
5005	2,700
5050	2,690
5052	2,680
5083	2,660
5086	2,660
5154	2,660
5183	2,660
5356	2,640
5454	2,690
5456	2,660
5554	2,690
5556	2,660
5654	2,660
6005	2,700
6061	2,700
6063	2,700
6066	2,720
6070	2,710
6105	2,690
6351	2,710
6463	2,690
7075	2,810

# Apéndice C

## Esfuerzos de diseño a tensión para aleaciones de aluminio del MDA

Aleación	Producto	$F_u$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$F_y$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$k_t$	Esfuerzo de diseño en el área total	Esfuerzo de diseño en el área neta efectiva	Rige
					(kg/cm <sup>2</sup> )	(kg/cm <sup>2</sup> )	
1100-H12	Lámina, placa, tubo estirado,	968	765	1.00	726	823	Fluencia
-H14	varilla rolada y barra	1121	968	1.00	920	953	Fluencia
2014-T6	Lámina	4638	4077	1.25	3874	3154	Fractura
-T651	Placa	4689	4128	1.25	3922	3189	Fractura
-T6, T6510, T6511	Extrusiones	4230	3721	1.25	3535	2877	Fractura
-T6, T651	Barra y Varilla terminada en frío, Tubo estirado	4587	3874	1.25	3680	3119	Fractura
Alclad							
2014-T6	Lámina	4434	3874	1.25	3680	3015	Fractura
-T6	Lámina	4485	4027	1.25	3825	3050	Fractura
-T651	Placa	4485	4027	1.25	3825	3050	Fractura
3003-H12	Lámina y placa	1223	866	1.00	823	1040	Fluencia
-H14	Lámina y placa	1427	1172	1.00	1114	1213	Fluencia
-H16	Lámina	1682	1478	1.00	1404	1430	Fluencia
-H18	Lámina	1886	1682	1.00	1598	1603	Fluencia
-H12	Tubo estirado	1223	866	1.00	823	1040	Fluencia
-H14	Tubo estirado	1427	1172	1.00	1114	1213	Fluencia
-H16	Tubo estirado	1682	1478	1.00	1404	1430	Fluencia
-H18	Tubo estirado	1886	1682	1.00	1598	1603	Fluencia
Alclad							
3003-H12	Lámina y placa	1172	815	1.00	775	996	Fluencia
-H14	Lámina y placa	1376	1121	1.00	1065	1170	Fluencia
-H16	Lámina	1631	1427	1.00	1356	1386	Fluencia
-H18	Lámina	1835	1631	1.00	1549	1560	Fluencia
-H14	Tubo estirado	1376	1121	1.00	1065	1170	Fluencia
-H18	Tubo estirado	1835	1631	1.00	1549	1560	Fluencia
3004-H32	Lámina y placa	1937	1478	1.00	1404	1646	Fluencia
-H34	Lámina y placa	2243	1733	1.00	1646	1906	Fluencia
-H36	Lámina	2446	1937	1.00	1840	2080	Fluencia
-H38	Lámina	2650	2192	1.00	2082	2253	Fluencia
-H34	Tubo estirado	2243	1733	1.00	1646	1906	Fluencia
-H36	Tubo estirado	2446	1937	1.00	1840	2080	Fluencia

Aleación	Producto	$F_{lu}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$F_{ly}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$k_t$	Esfuerzo de diseño en el área total	Esfuerzo de diseño en el área neta efectiva	Rige
					(kg/cm <sup>2</sup> )	(kg/cm <sup>2</sup> )	
<b>Alclad</b>							
3004-H32	Lámina	1886	1427	1.00	1356	1603	Fluencia
-H34	Lámina	2192	1682	1.00	1598	1863	Fluencia
-H36	Lámina	2396	1886	1.00	1792	2036	Fluencia
-H38	Lámina	2599	2090	1.00	1985	2209	Fluencia
-H131, H241, H341	Lámina	2192	1835	1.00	1743	1863	Fluencia
-H151, H261, H361	Lámina	2396	2090	1.00	1985	2036	Fluencia
3005-H25	Lámina	1835	1529	1.00	1453	1560	Fluencia
-H28	Lámina	2192	1886	1.00	1792	1863	Fluencia
3105-H25	Lámina	1631	1325	1.00	1259	1386	Fluencia
5005-H12	Lámina y placa	1274	968	1.00	920	1083	Fluencia
-H14	Lámina y placa	1478	1172	1.00	1114	1256	Fluencia
-H16	Lámina	1682	1376	1.00	1307	1430	Fluencia
-H32	Lámina y placa	1223	866	1.00	823	1040	Fluencia
-H34	Lámina y placa	1427	1070	1.00	1017	1213	Fluencia
-H36	Lámina	1631	1274	1.00	1210	1386	Fluencia
5050-H32	Lámina	1529	1121	1.00	1065	1300	Fluencia
-H34	Lámina	1733	1427	1.00	1356	1473	Fluencia
-H32	Varilla y Barra acabados en frio, Tubo estirado	1529	1121	1.00	1065	1300	Fluencia
-H34	Varilla y Barra acabados en frio, Tubo estirado	1733	1427	1.00	1356	1473	Fluencia
5052-O	Lámina y placa	1733	663	1.00	629	1473	Fluencia
-H32	Lamina y Placa Barra y Varilla	2192	1631	1.00	1549	1863	Fluencia
-H34	acabados en frio	2396	1835	1.00	1743	2036	Fluencia
-H36	Lámina	2599	2039	1.00	1937	2209	Fluencia
5083-O	Extrusiones	2752	1121	1.00	1065	2339	Fluencia
-H111	Extrusiones	2803	1682	1.00	1598	2383	Fluencia
-H111	Extrusiones	2803	1682	1.00	1598	2383	Fluencia
-O	Lámina y placa	2803	1274	1.00	1210	2383	Fluencia
-H116	Lámina y placa	3109	2192	1.00	2082	2643	Fluencia
-H32, -H321	Lámina y placa	3109	2192	1.00	2082	2643	Fluencia
-H116	Placa	2905	2039	1.00	1937	2469	Fluencia
-H32, -H321	Placa	2905	2039	1.00	1937	2469	Fluencia
5086-O	Extrusiones	2446	968	1.00	920	2080	Fluencia
-H111	Extrusiones	2548	1478	1.00	1404	2166	Fluencia
-H111	Extrusiones	2548	1478	1.00	1404	2166	Fluencia
-O	Lámina y placa	2446	968	1.00	920	2080	Fluencia
-H112	Lámina y placa	2548	1274	1.00	1210	2166	Fluencia
-H112	Placa	2446	1070	1.00	1017	2080	Fluencia
-H112	Placa	2396	968	1.00	920	2036	Fluencia
-H116	Lámina y placa	2803	1988	1.00	1888	2383	Fluencia
-H32	Lámina y placa	2803	1988	1.00	1888	2383	Fluencia
	Tubo Estirado						
-H34	Lámina y placa	3058	2396	1.00	2276	2599	Fluencia
	Tubo Estirado						
5154-H38	Lámina	3160	2446	1.00	2324	2686	Fluencia

Aleación	Producto	$F_{u}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$F_y$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$k_t$	Esfuerzo de diseño en el área total	Esfuerzo de diseño en el área neta efectiva	Rige
					(kg/cm <sup>2</sup> )	(kg/cm <sup>2</sup> )	
5454-O	Extrusiones	2192	866	1.00	823	1863	Fluencia
	-H111	2345	1325	1.00	1259	1993	Fluencia
	-H111	2345	1325	1.00	1259	1993	Fluencia
	-H112	2192	866	1.00	823	1863	Fluencia
	-O	2192	866	1.00	823	1863	Fluencia
	-H32	2548	1835	1.00	1743	2166	Fluencia
	-H34	2752	2039	1.00	1937	2339	Fluencia
5456-O	Lámina y placa	2956	1325	1.00	1259	2513	Fluencia
	-H116	3211	2345	1.00	2227	2729	Fluencia
	-H32, -H321	3211	2345	1.00	2227	2729	Fluencia
	-H116	3109	2192	1.00	2082	2643	Fluencia
	-H32, -H321	3109	2192	1.00	2082	2643	Fluencia
	-H116	2905	2039	1.00	1937	2469	Fluencia
	-H32, -H321	2905	2039	1.00	1937	2469	Fluencia
6005-T5	Extrusiones	2650	2446	1.00	2324	2253	Fractura
6061-T6, T651	Lámina y placa	2956	2446	1.00	2324	2513	Fluencia
	-T6, T6510, T6511	2650	2446	1.00	2324	2253	Fractura
	Barra y Varilla acabados en frio	2956	2446	1.00	2324	2513	Fluencia
	-T6, T651	2956	2446	1.00	2324	2513	Fluencia
-T6	Tubo Estirado	2956	2446	1.00	2324	2513	Fluencia
	-T6	2650	2446	1.00	2324	2253	Fractura
6063-T5	Extrusiones	1529	1121	1.00	1065	1300	Fluencia
	-T52	1529	1121	1.00	1065	1300	Fluencia
	-T5	1478	1070	1.00	1017	1256	Fluencia
	-T6	2090	1733	1.00	1646	1776	Fluencia
6066-T6, T6510, T6511	Extrusiones	3517	3160	1.1	3002	2718	Fractura
6070-T6, T62	Extrusiones	3364	3160	1.1	3002	2599	Fractura
6105-T5	Extrusiones	2650	2446	1.00	2324	2253	Fractura
6351-T5	Extrusiones	2650	2446	1.00	2324	2253	Fractura
6351-T6	Extrusiones	2956	2599	1.00	2469	2513	Fluencia
6463-T6	Extrusiones	2090	1733	1.00	1646	1776	Fluencia
7005-T53	Extrusiones	3517	3109	1.00	2954	2989	Fluencia

# Apéndice D

## Constantes de pandeo inelástico para compresión en columnas y compresión en placas

Aleación	Producto	Bc [kg/cm <sup>2</sup> ]	Dc [kg/cm <sup>2</sup> ]	Cc	Bp [kg/cm <sup>2</sup> ]	Dp [kg/cm <sup>2</sup> ]	Cp
1100-H12	Lámina, placa, tubo estirado,	785.429	3.201	163.599	916.626	4.035	151.439
-H14	varilla rolada y barra	1022.210	4.752	143.405	1201.333	6.054	132.282
3003-H12	Lámina y placa	785.429	3.201	163.599	916.626	4.035	151.439
-H14	Lámina y placa	1082.030	5.175	139.384	1273.524	6.608	128.478
-H16	Lámina	1445.713	7.993	120.585	1714.148	10.319	110.741
-H18	Lámina	1630.398	9.572	113.550	1938.816	12.413	104.127
-H12	Tubo estirado	844.234	3.567	157.798	987.161	4.510	145.928
-H14	Tubo estirado	1262.883	6.526	129.018	1492.300	8.382	118.688
-H16	Tubo estirado	1507.074	8.507	118.104	1788.735	11.000	108.408
-H18	Tubo estirado	1692.353	10.123	111.452	2014.295	13.145	102.158
Alclad							
3003-H12	Lámina y placa	691.918	2.646	174.303	804.738	3.319	161.624
-H14	Lámina y placa	1022.210	4.752	143.405	1201.333	6.054	132.282
-H16	Lámina	1323.613	7.002	126.024	1565.922	9.010	115.864
-H18	Lámina	1507.074	8.507	118.104	1788.735	11.000	108.408
-H14	Tubo estirado	1202.372	6.062	132.225	1419.019	7.772	121.714
-H18	Tubo estirado	1630.398	9.572	113.550	1938.816	12.413	104.127
3004-H32	Lámina y placa	1445.713	7.993	120.585	1714.148	10.319	110.741
-H34	Lámina y placa	1754.499	10.686	109.460	2090.057	13.894	100.289
-H36	Lámina	2004.933	13.053	102.396	2395.819	17.051	93.671
-H38	Lámina	2385.834	16.945	93.867	2862.024	22.263	85.703
-H34	Tubo estirado	1942.053	12.444	104.041	2318.983	16.238	95.210
-H36	Tubo estirado	2194.622	14.949	97.871	2627.837	19.587	89.440
Alclad							
3004-H32	Lámina	1323.613	7.002	126.024	1565.922	9.010	115.864
-H34	Lámina	1692.353	10.123	111.452	2014.295	13.145	102.158
-H36	Lámina	1942.053	12.444	104.041	2318.983	16.238	95.210
-H38	Lámina	2321.932	16.269	95.150	2783.727	21.356	86.900
-H131, H241, H341	Lámina	1754.499	10.686	109.460	2090.057	13.894	100.289
-H151, H261, H361	Lámina	2321.932	16.269	95.150	2783.727	21.356	86.900
3005-H25	Lámina	1630.398	9.572	113.550	1938.816	12.413	104.127
-H28	Lámina	2004.933	13.053	102.396	2395.819	17.051	93.671
3105-H25	Lámina	1323.613	7.002	126.024	1565.922	9.010	115.864
5005-H12	Lámina y placa	1022.210	4.752	143.405	1201.333	6.054	132.282
-H14	Lámina y placa	1202.372	6.062	132.225	1419.019	7.772	121.714
-H16	Lamina	1445.713	7.993	120.585	1714.148	10.319	110.741
-H32	Lámina y placa	844.234	3.567	157.798	987.161	4.510	145.928
-H34	Lámina y placa	1082.030	5.175	139.384	1273.524	6.608	128.478
-H36	Lámina	1262.883	6.526	129.018	1492.300	8.382	118.688

Aleación	Producto	Bc [kg/cm <sup>2</sup> ]	Dc [kg/cm <sup>2</sup> ]	Cc	Bp [kg/cm <sup>2</sup> ]	Dp [kg/cm <sup>2</sup> ]	Cp
5050-H32	Lámina	1082.030	5.175	139.384	1273.524	6.608	128.478
-H34	Lámina	1445.713	7.993	120.585	1714.148	10.319	110.741
-H32	Varilla y Barra acabados en frio, Tubo estirado	1202.372	6.062	132.225	1419.019	7.772	121.714
-H34	Varilla y Barra acabados en frio, Tubo estirado	1507.074	8.507	118.104	1788.735	11.000	108.408
5052-O	Lámina y placa	738.583	2.904	169.553	860.529	3.652	157.081
-H32	Lámina y Placa Barra y Varilla	1692.353	10.073	112.011	2014.295	13.079	102.670
-H34	acabados en frio	1942.053	12.382	104.562	2318.983	16.157	95.688
-H36	Lámina	2131.220	14.235	99.814	2550.250	18.633	91.246
5083-O	Extrusiones	1262.883	6.429	130.950	1492.300	8.259	120.465
-H111	Extrusiones	1692.353	9.974	113.121	2014.295	12.951	103.688
-H111	Extrusiones	1692.353	9.974	113.121	2014.295	12.951	103.688
-O	Lámina y placa	1445.713	7.875	122.390	1714.148	10.167	112.399
-H116	Lámina y placa	2131.220	14.095	100.803	2550.250	18.450	92.150
-H32, -H321	Lámina y placa	2131.220	14.095	100.803	2550.250	18.450	92.150
-H116	Placa	1942.053	12.261	105.598	2318.983	15.998	96.636
-H32, -H321	Placa	1942.053	12.261	105.598	2318.983	15.998	96.636
5086-O	Extrusiones	1082.030	5.099	141.471	1273.524	6.511	130.402
-H111	Extrusiones	1445.713	7.875	122.390	1714.148	10.167	112.399
-H111	Extrusiones	1445.713	7.875	122.390	1714.148	10.167	112.399
-O	Lámina y placa	1082.030	5.099	141.471	1273.524	6.511	130.402
-H112	Lámina y placa	1323.613	6.899	127.911	1565.922	8.877	117.599
-H112	Placa	1262.883	6.429	130.950	1492.300	8.259	120.465
-H112	Placa	1202.372	5.973	134.205	1419.019	7.658	123.536
-H116	Lámina y placa	2131.220	14.095	100.803	2550.250	18.450	92.150
-H32	Lámina y placa	2131.220	14.095	100.803	2550.250	18.450	92.150
	Tubo Estirado						
-H34	Lámina y Placa	2643.053	19.466	90.518	3177.460	25.659	82.556
	Tubo Estirado						
5154-H38	Lámina	2772.601	20.915	88.378	3336.479	27.609	80.565
5454-O	Extrusiones	962.632	4.279	149.989	1129.532	5.438	138.465
-H111	Extrusiones	1262.883	6.429	130.950	1492.300	8.259	120.465
-H111	Extrusiones	1262.883	6.429	130.950	1492.300	8.259	120.465
-H112	Extrusiones	1022.210	4.682	145.552	1201.333	5.965	134.263
-O	Lámina y placa	962.632	4.279	149.989	1129.532	5.438	138.465
-H32	Lámina y placa	1942.053	12.261	105.598	2318.983	15.998	96.636
-H34	Lámina y placa	2194.622	14.729	99.336	2627.837	19.298	90.780
5456-O	Lámina y placa	1507.074	8.382	119.873	1788.735	10.838	110.031
-H116	Lámina y placa	2194.622	14.729	99.336	2627.837	19.298	90.780
-H32, -H321	Lámina y placa	2194.622	14.729	99.336	2627.837	19.298	90.780
-H116	Placa	2004.933	12.861	103.929	2395.819	16.800	95.074
-H32, -H321	Placa	2004.933	12.861	103.929	2395.819	16.800	95.074
-H116	Placa	2004.933	12.861	103.929	2395.819	16.800	95.074
-H32, -H321	Placa	2004.933	12.861	103.929	2395.819	16.800	95.074
2014-T6	Lámina	4795.566	37.930	51.837	5534.576	47.028	48.252
-T651	Placa	4732.282	37.182	52.182	5460.509	46.087	48.578
-T6, T6510, T6511	Extrusiones	4228.811	31.409	55.201	4871.501	38.835	51.431
-T6, T651	Barra y Varilla terminada en frio, Tubo estirado	4291.467	32.110	54.797	4944.776	39.714	51.049
Alclad							
2014-T6	Lámina	4542.891	35.136	53.010	5238.888	43.513	49.364
-T6	Lámina	4732.282	37.356	51.939	5460.509	46.303	48.352
-T651	Placa	4542.891	35.136	53.010	5238.888	43.513	49.364
6005-T5	Extrusiones	2750.811	17.129	65.845	3146.382	20.953	61.567

Aleación	Producto	Bc [kg/cm <sup>2</sup> ]	Dc [kg/cm <sup>2</sup> ]	Cc	Bp [kg/cm <sup>2</sup> ]	Dp [kg/cm <sup>2</sup> ]	Cp
6061-T6, T651	Lámina y placa	2750.811	17.129	65.845	3146.382	20.953	61.567
-T6, T6510, T6511	Extrusiones	2750.811	17.129	65.845	3146.382	20.953	61.567
-T6, T651	Barra y Varilla acabados en frio	2750.811	17.129	65.845	3146.382	20.953	61.567
-T6	Tubo Estirado	2750.811	17.129	65.845	3146.382	20.953	61.567
-T6	Tubería	2750.811	17.129	65.845	3146.382	20.953	61.567
6063-T5	Extrusiones	1215.736	5.033	99.045	1368.635	6.011	93.349
-T52	Extrusiones	1215.736	5.033	99.045	1368.635	6.011	93.349
-T5	Extrusiones	1158.403	4.681	101.467	1302.792	5.583	95.679
-T6	Extrusiones y tuberías	1914.351	9.944	78.930	2174.854	12.041	74.052
6066-T6, T6510, T6511	Extrusiones	3606.794	25.717	57.503	4144.587	31.678	53.643
6070-T6, T62	Extrusiones	3606.794	25.717	57.503	4144.587	31.678	53.643
6105-T5	Extrusiones	2750.811	17.129	65.845	3146.382	20.953	61.567
6351-T5	Extrusiones	2750.811	17.129	65.845	3146.382	20.953	61.567
6351-T6	Extrusiones	2932.688	18.855	63.771	3358.212	23.104	59.594
6463-T6	Extrusiones	1914.351	9.944	78.930	2174.854	12.041	74.052
7005-T53	Extrusiones	3421.859	23.300	60.213	3928.680	28.664	56.195

### Constantes de pandeo inelástico para compresión por flexión y cortante en componentes planos

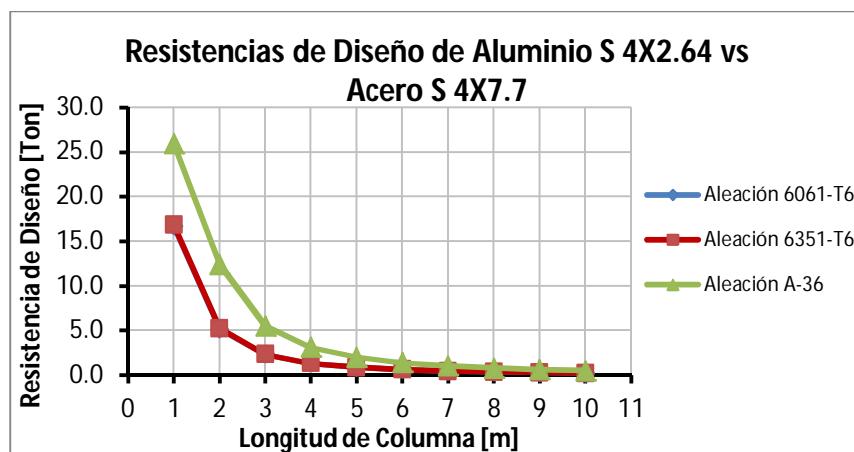
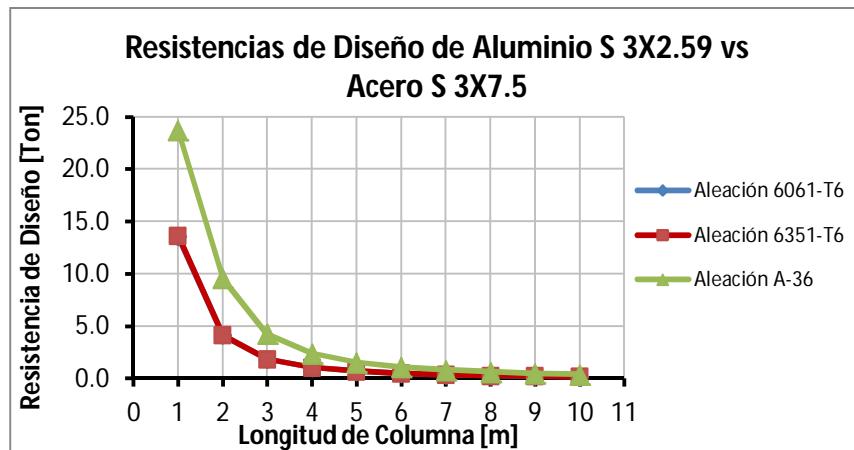
Aleación	Producto	B <sub>br</sub> [kg/cm <sup>2</sup> ]	D <sub>br</sub> [kg/cm <sup>2</sup> ]	C <sub>br</sub>	B <sub>s</sub> [kg/cm <sup>2</sup> ]	D <sub>s</sub> [kg/cm <sup>2</sup> ]	C <sub>s</sub>
1100-H12	Lámina, placa, tubo estirado, varilla rolada y barra	1215.446	6.161	131.512	697.675	2.680	173.583
-H14		1595.052	9.263	114.801	901.125	3.933	152.736
3003-H12	Lámina y placa	1215.446	6.161	131.512	798.790	3.283	162.225
-H14	Lámina y placa	1691.390	10.114	111.484	1109.118	5.371	137.672
-H16	Lámina	2280.024	15.830	96.020	1428.465	7.850	121.311
-H18	Lámina	2580.514	19.061	90.257	1645.709	9.707	113.020
-H12	Tubo estirado	1309.438	6.890	126.704	798.790	3.283	162.225
-H14	Tubo estirado	1983.531	12.845	102.947	1109.118	5.371	137.672
-H16	Tubo estirado	2379.759	16.880	93.987	1428.465	7.850	121.311
-H18	Tubo estirado	2681.513	20.190	88.541	1645.709	9.707	113.020
Alclad							
3003-H12	Lámina y placa	1066.431	5.064	140.400	748.074	2.975	167.634
-H14	Lámina y placa	1595.052	9.263	114.801	1056.727	4.995	141.043
-H16	Lámina	2081.897	13.812	100.486	1374.676	7.411	123.661
-H18	Lámina	2379.759	16.880	93.987	1591.094	9.228	114.944
-H14	Tubo estirado	1885.647	11.906	105.585	1056.727	4.995	141.043
-H18	Tubo estirado	2580.514	19.061	90.257	1591.094	9.228	114.944
3004-H32	Lámina y placa	2280.024	15.830	96.020	1428.465	7.850	121.311
-H34	Lámina y placa	2782.914	21.346	86.913	1700.519	10.196	111.184
-H36	Lámina	3192.362	26.227	81.148	1921.644	12.249	104.592
-H38	Lámina	3817.253	34.293	74.209	2202.041	15.025	97.706
-H34	Tubo estirado	3089.440	24.969	82.488	1700.519	10.196	111.184
-H36	Tubo estirado	3503.270	30.150	77.463	1921.644	12.249	104.592
Alclad							
3004-H32	Lámina	2081.897	13.812	100.486	1374.676	7.411	123.661
-H34	Lámina	2681.513	20.190	88.541	1645.709	9.707	113.020
-H36	Lámina	3089.440	24.969	82.488	1866.088	11.721	106.137
-H38	Lámina	3712.260	32.888	75.251	2089.371	13.887	100.306
-H131, H241, H341	Lámina	2782.914	21.346	86.913	1810.712	11.203	107.748
-H151, H261, H361	Lámina	3712.260	32.888	75.251	2089.371	13.887	100.306

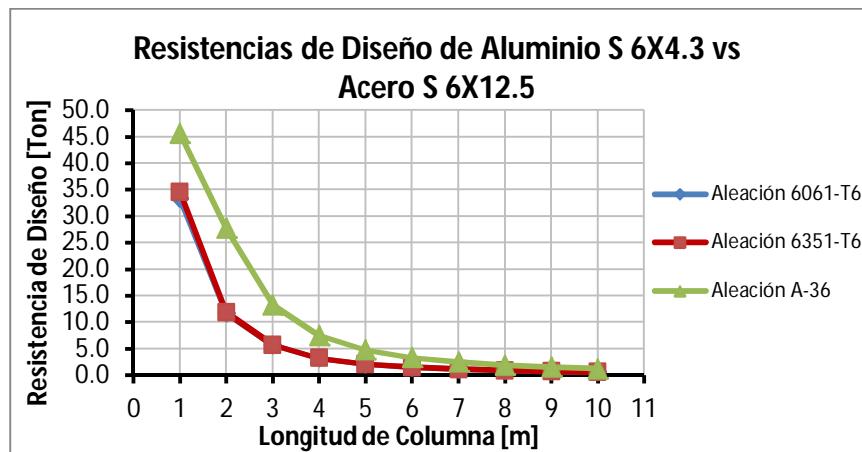
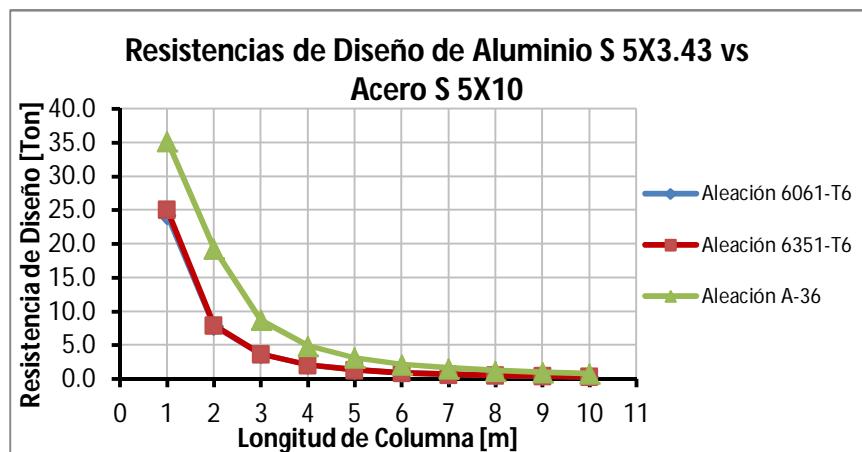
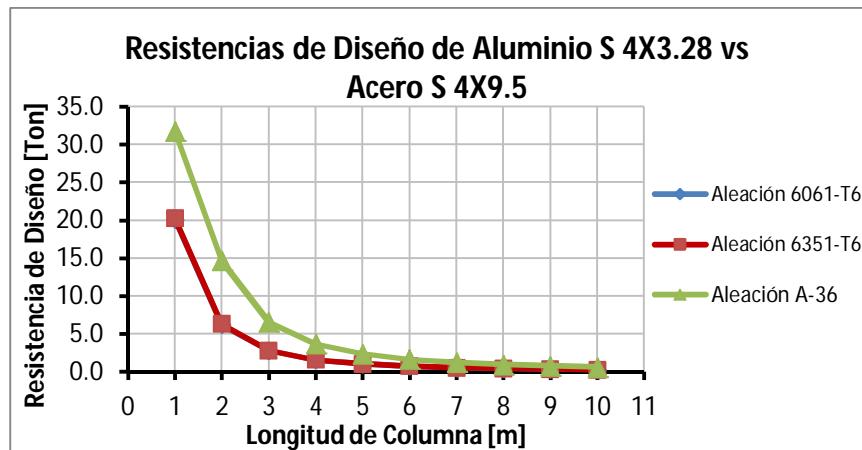
Aleación	Producto	B <sub>br</sub> [kg/cm <sup>2</sup> ]	D <sub>br</sub> [kg/cm <sup>2</sup> ]	C <sub>br</sub>	B <sub>s</sub> [kg/cm <sup>2</sup> ]	D <sub>s</sub> [kg/cm <sup>2</sup> ]	C <sub>s</sub>
3005-H25	Lámina	2580.514	19.061	90.257	1482.467	8.300	119.081
-H28	Lámina	3192.362	26.227	81.148	1866.088	11.721	106.137
3105-H25	Lámina	2081.897	13.812	100.486	1267.758	6.563	128.770
5005-H12	Lámina y placa	1595.052	9.263	114.801	901.125	3.933	152.736
-H14	Lámina y placa	1885.647	11.906	105.585	1109.118	5.371	137.672
-H16	Lamina	2280.024	15.830	96.020	1321.105	6.982	126.143
-H32	Lámina y placa	1309.438	6.890	126.704	798.790	3.283	162.225
-H34	Lámina y placa	1691.390	10.114	111.484	1004.592	4.630	144.657
-H36	Lámina	1983.531	12.845	102.947	1214.640	6.155	131.556
5050-H32	Lámina	1691.390	10.114	111.484	1056.727	4.995	141.043
-H34	Lámina	2280.024	15.830	96.020	1374.676	7.411	123.661
-H32	Varilla y Barra acabados en frio, Tubo estirado	1885.647	11.906	105.585	1056.727	4.995	141.043
-H34	Varilla y Barra acabados en frio, Tubo estirado	2379.759	16.880	93.987	1374.676	7.411	123.661
5052-O	Lámina y placa	1140.721	5.574	136.432	597.887	2.115	188.450
-H32	Lámina y Placa Barra y Varilla	2681.513	20.090	88.985	1591.094	9.182	115.520
-H34	acabados en frio	3089.440	24.844	82.902	1810.712	11.147	108.288
-H36	Lámina	3399.284	28.674	79.034	2033.289	13.265	102.190
5083-O	Extrusiones	1983.531	12.655	104.489	1056.727	4.921	143.155
-H111	Extrusiones	2681.513	19.893	89.867	1645.709	9.564	114.713
-H111	Extrusiones	2681.513	19.893	89.867	1645.709	9.564	114.713
-O	Lámina y placa	2280.024	15.597	97.458	1214.640	6.064	133.526
-H116	Lámina y placa	3399.284	28.392	79.817	2202.041	14.803	99.169
-H32, -H321	Lámina y placa	3399.284	28.392	79.817	2202.041	14.803	99.169
-H116	Placa	3089.440	24.600	83.724	2033.289	13.135	103.202
-H32, -H321	Placa	3089.440	24.600	83.724	2033.289	13.135	103.202
5086-O	Extrusiones	1691.390	9.965	113.153	901.125	3.875	155.023
-H111	Extrusiones	2280.024	15.597	97.458	1428.465	7.734	123.127
-H111	Extrusiones	2280.024	15.597	97.458	1428.465	7.734	123.127
-O	Lámina y placa	1691.390	9.965	113.153	901.125	3.875	155.023
-H112	Lámina y placa	2081.897	13.608	101.990	1214.640	6.064	133.526
-H112	Placa	1983.531	12.655	104.489	1004.592	4.561	146.823
-H112	Placa	1885.647	11.730	107.166	901.125	3.875	155.023
-H116	Lámina y placa	3399.284	28.392	79.817	1977.379	12.597	104.651
-H32	Lámina y placa	3399.284	28.392	79.817	1977.379	12.597	104.651
	Tubo Estirado						
-H34	Lámina y Placa	4240.412	39.558	71.463	2429.329	17.153	94.416
	Tubo Estirado						
5154-H38	Lámina	4453.837	42.582	69.730	2486.543	17.763	93.323
5454-O	Extrusiones	1499.266	8.316	120.185	798.790	3.234	164.654
-H111	Extrusiones	1983.531	12.655	104.489	1267.758	6.467	130.698
-H111	Extrusiones	1983.531	12.655	104.489	1267.758	6.467	130.698
-H112	Extrusiones	1595.052	9.126	116.520	798.790	3.234	164.654
-O	Lámina y placa	1499.266	8.316	120.185	798.790	3.234	164.654
-H32	Lámina y placa	3089.440	24.600	83.724	1810.712	11.038	109.361
-H34	Lámina y placa	3503.270	29.705	78.623	2033.289	13.135	103.202
5456-O	Lámina y placa	2379.759	16.631	95.394	1267.758	6.467	130.698
-H116	Lámina y placa	3503.270	29.705	78.623	2372.269	16.553	95.545
-H32, -H321	Lámina y placa	3503.270	29.705	78.623	2372.269	16.553	95.545
-H116	Placa	3192.362	25.840	82.363	2202.041	14.803	99.169
-H32, -H321	Placa	3192.362	25.840	82.363	2202.041	14.803	99.169
-H116	Placa	3192.362	25.840	82.363	2033.289	13.135	103.202
-H32, -H321	Placa	3192.362	25.840	82.363	2033.289	13.135	103.202

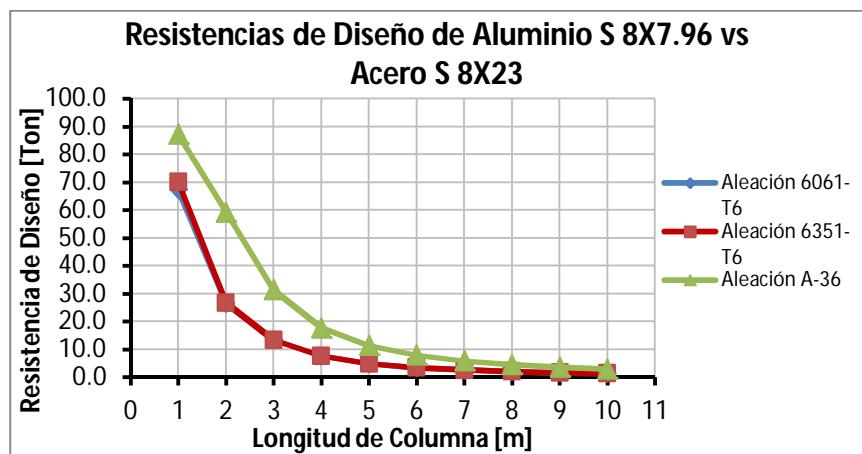
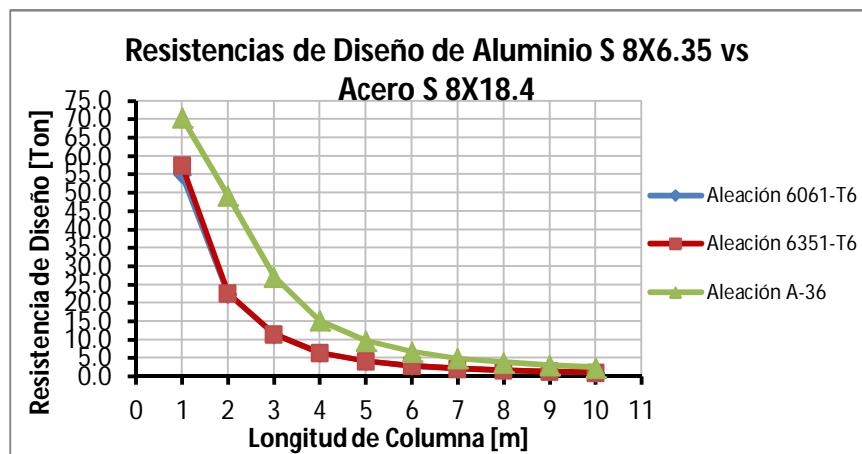
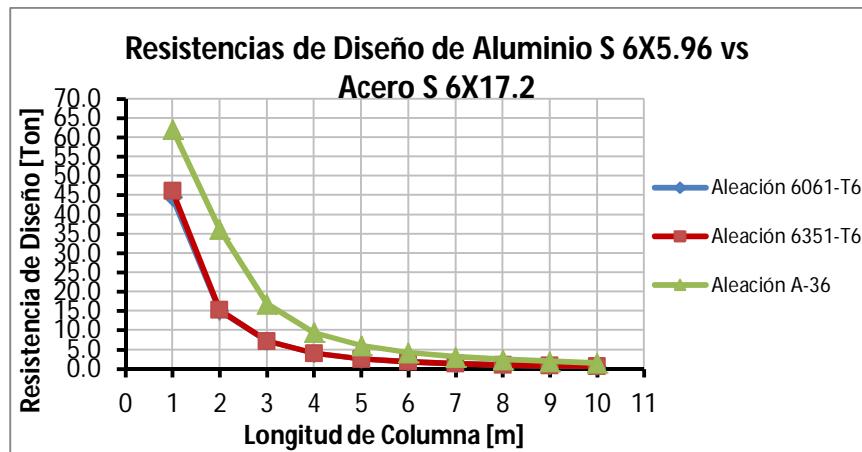
Aleación	Producto	B <sub>br</sub> [kg/cm <sup>2</sup> ]	D <sub>br</sub> [kg/cm <sup>2</sup> ]	C <sub>br</sub>	B <sub>s</sub> [kg/cm <sup>2</sup> ]	D <sub>s</sub> [kg/cm <sup>2</sup> ]	C <sub>s</sub>
2014-T6	Lámina	8356.475	106.858	52.135	3868.206	27.478	57.717
-T651	Placa	8241.107	104.652	52.498	3920.933	28.042	57.328
-T6, T6510, T6511	Extrusiones	7325.669	87.709	55.682	3501.181	23.662	60.667
-T6, T651	Barra y Varilla terminada en frio, Tubo estirado	7439.353	89.758	55.255	3658.030	25.269	59.352
Alclad							
2014-T6	Lámina	7896.238	98.613	53.382	3658.030	25.388	59.075
-T6	Lámina	8241.107	105.143	52.253	3815.552	27.045	57.843
-T651	Placa	7896.238	98.613	53.382	3815.552	27.045	57.843
6005-T5	Extrusiones	4668.443	46.380	67.104	2223.128	12.444	73.244
6061-T6, T651	Lámina y placa	4668.443	46.380	67.104	2223.128	12.444	73.244
-T6, T6510, T6511	Extrusiones	4668.443	46.380	67.104	2223.128	12.444	73.244
-T6, T651	Barra y Varilla acabados en frio	4668.443	46.380	67.104	2223.128	12.444	73.244
-T6	Tubo Estirado	4668.443	46.380	67.104	2223.128	12.444	73.244
-T6	Tubería	4668.443	46.380	67.104	2223.128	12.444	73.244
6063-T5	Extrusiones	1983.531	12.845	102.947	963.641	3.551	111.249
-T52	Extrusiones	1983.531	12.845	102.947	963.641	3.551	111.249
-T5	Extrusiones	1885.647	11.906	105.585	917.105	3.297	114.037
-T6	Extrusiones y tuberías	3192.362	26.227	81.148	1534.194	7.134	88.169
6066-T6, T6510, T6511	Extrusiones	6201.239	71.006	58.223	2932.141	18.850	63.777
6070-T6, T62	Extrusiones	6201.239	71.006	58.223	2932.141	18.850	63.777
6105-T5	Extrusiones	4668.443	46.380	67.104	2223.128	12.444	73.244
6351-T5	Extrusiones	4668.443	46.380	67.104	2223.128	12.444	73.244
6351-T6	Extrusiones	4992.495	51.292	64.889	2373.500	13.728	70.886
6463-T6	Extrusiones	3192.362	26.227	81.148	1534.194	7.134	88.169
7005-T53	Extrusiones	5868.519	64.092	61.043	2880.907	17.999	65.623

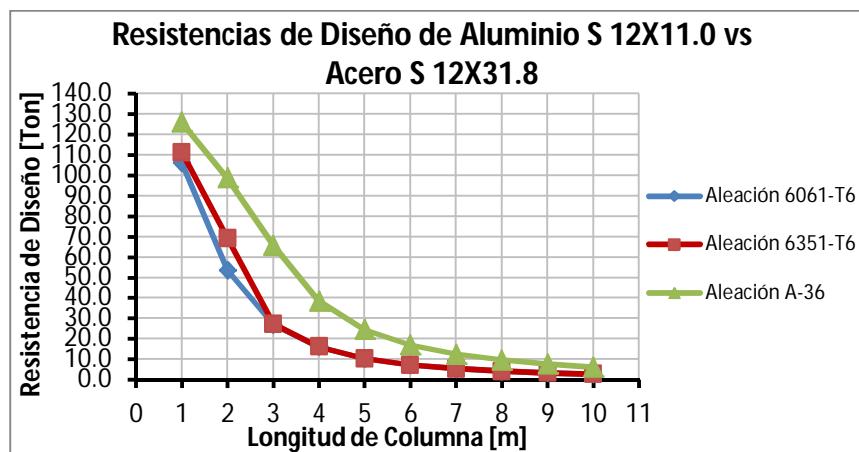
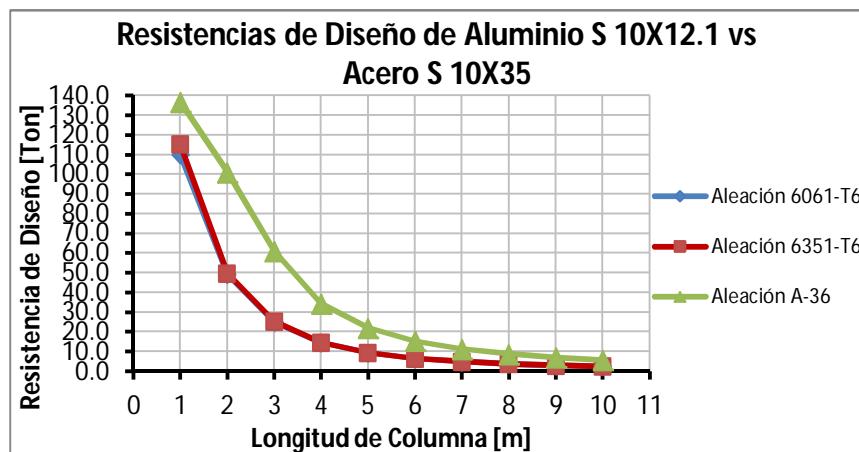
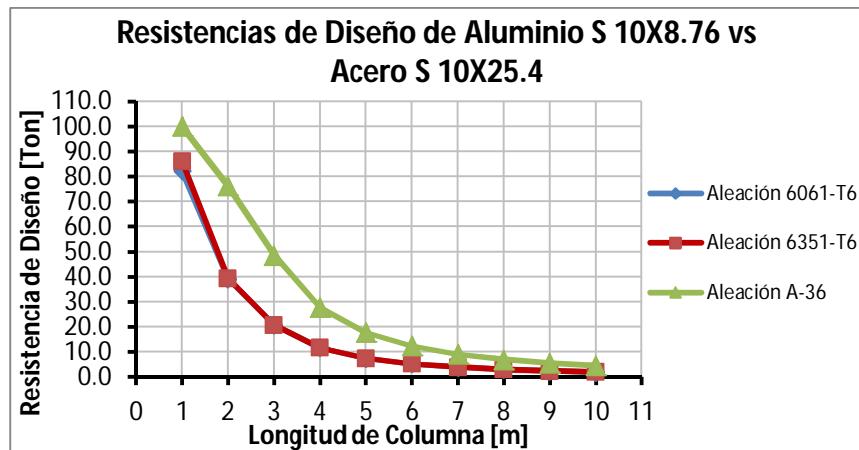
# Apéndice E

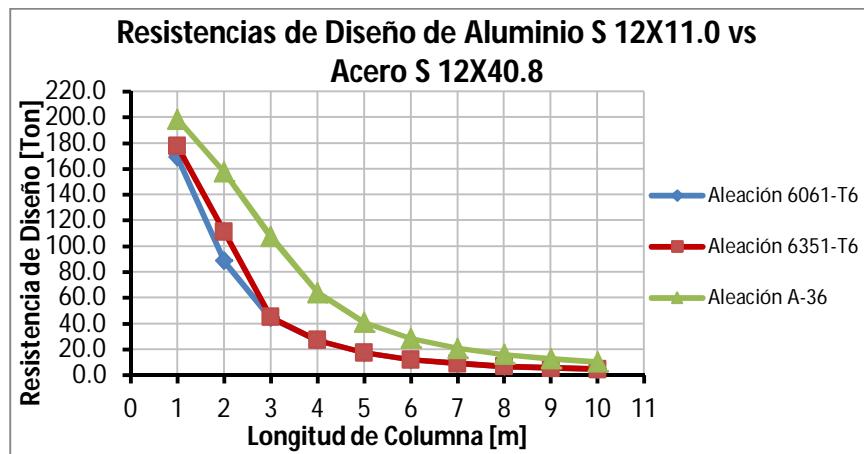
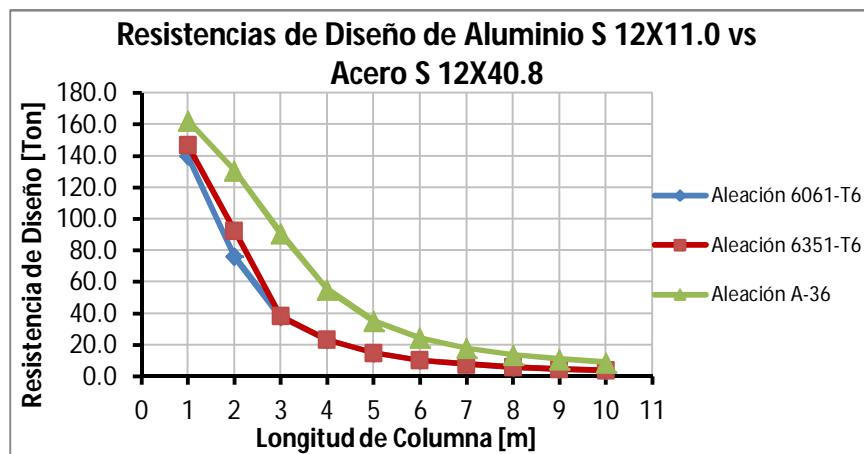
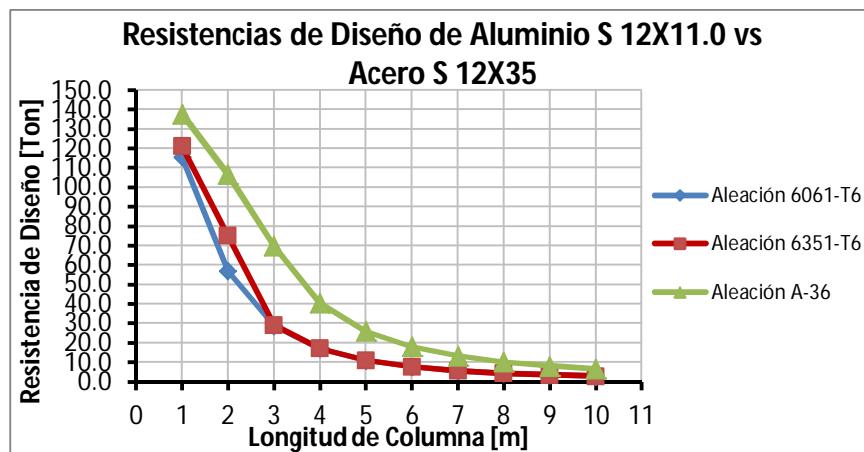
Resistencias de diseño a compresión para aluminio 6061-T6 y 6351-T6 y acero A-36 considerando un coeficiente de longitud efectiva  $k = 1$





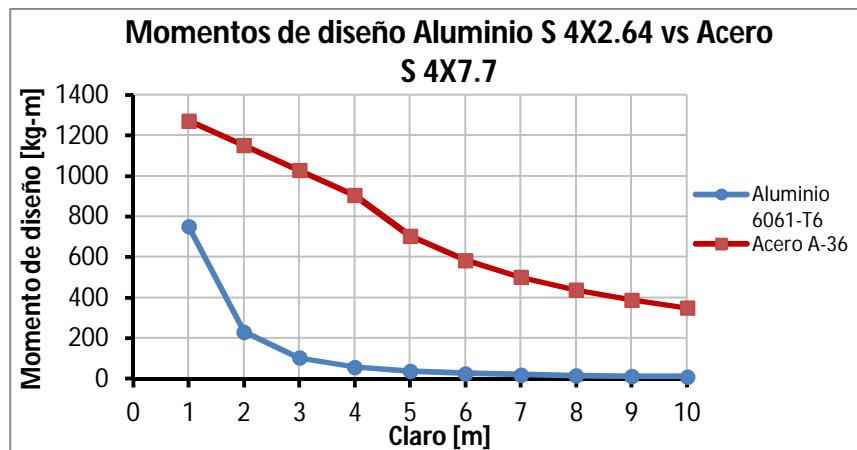
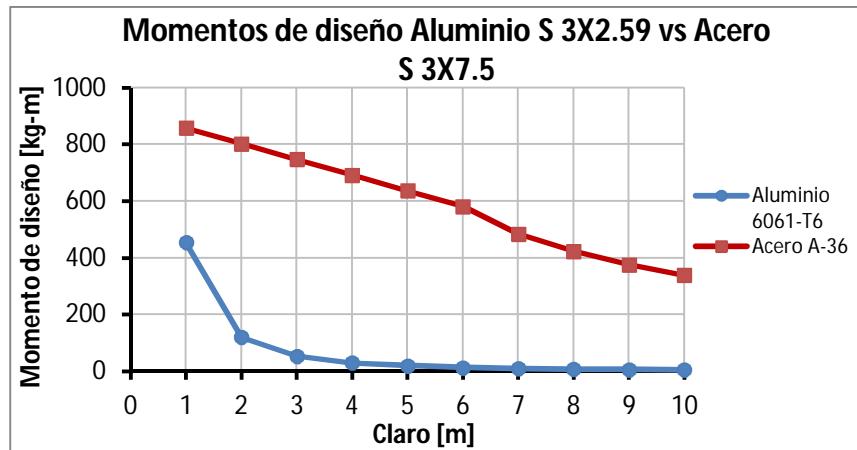


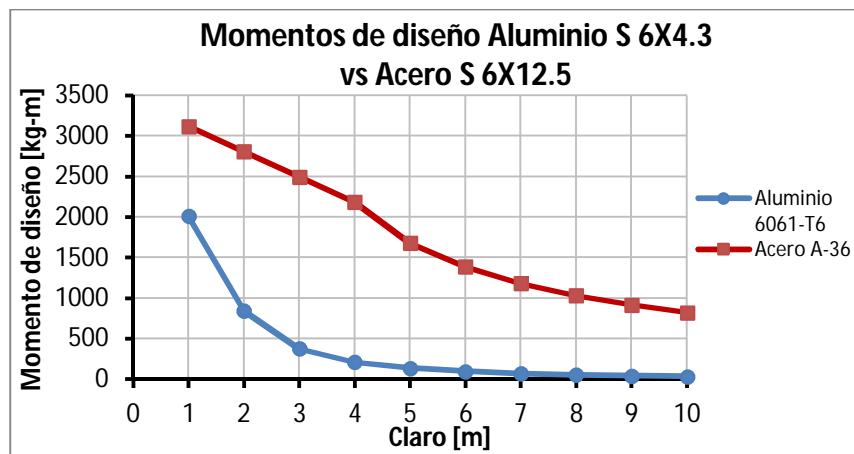
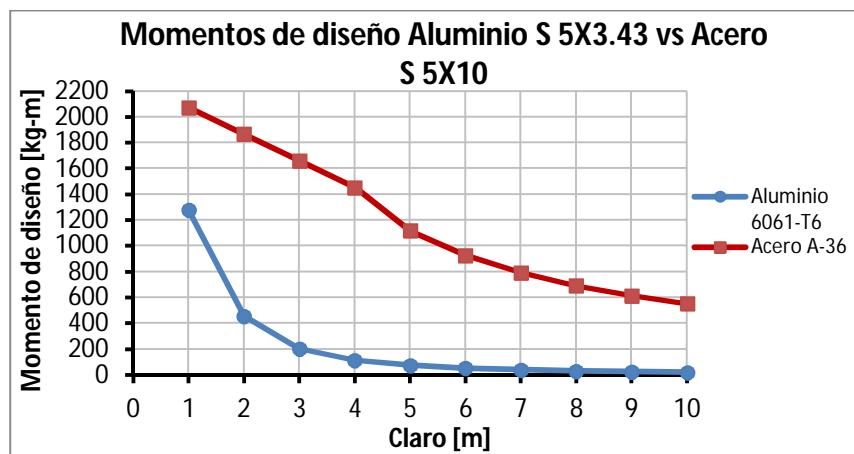
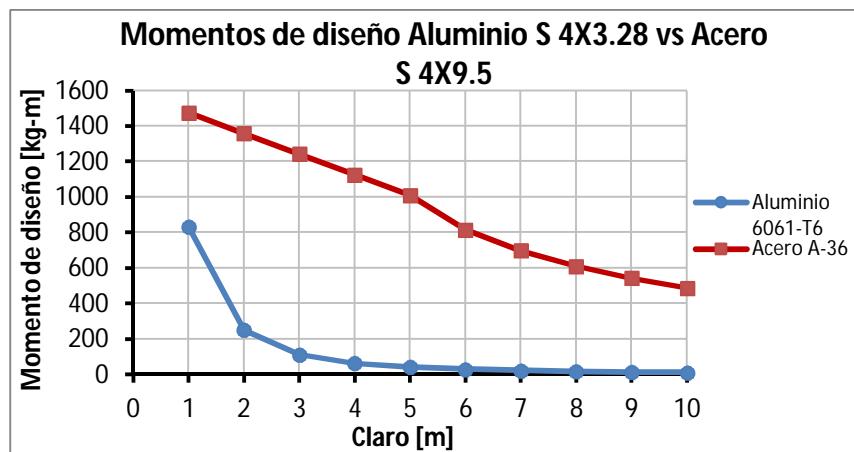


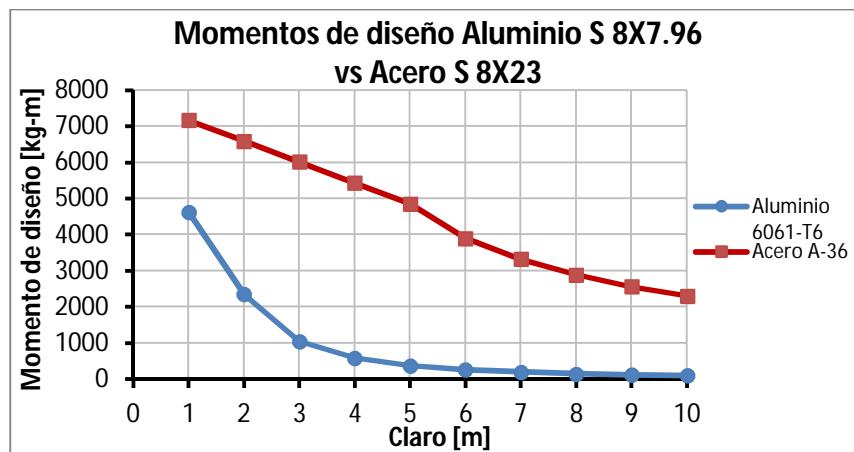
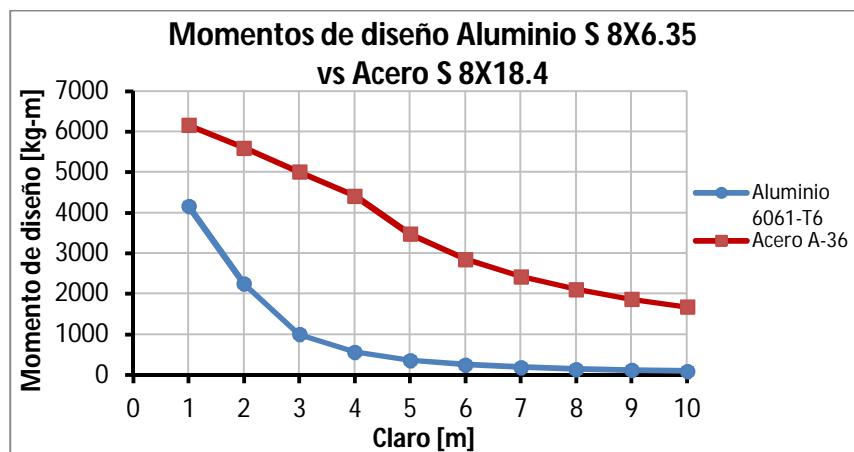
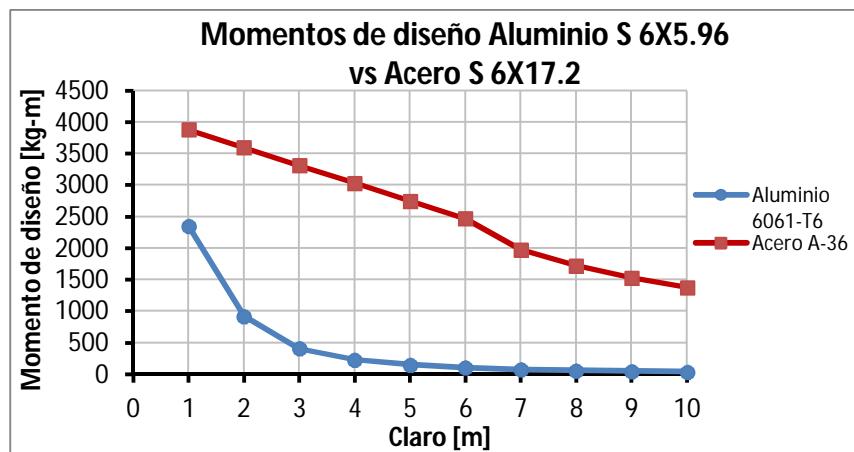


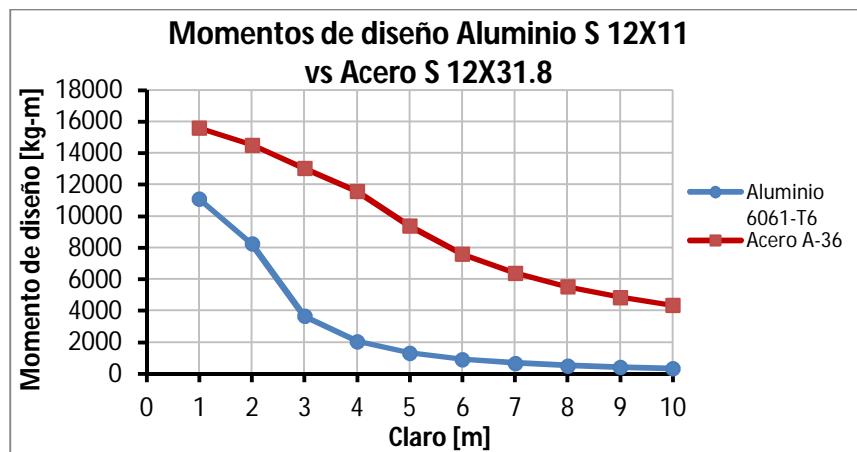
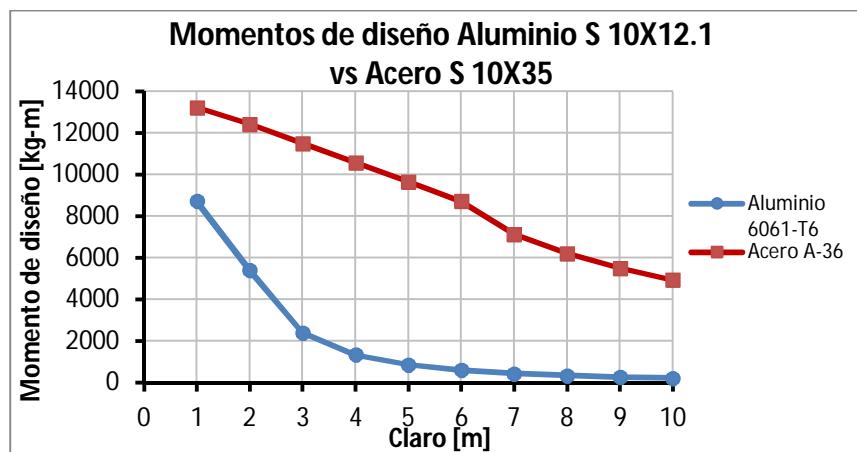
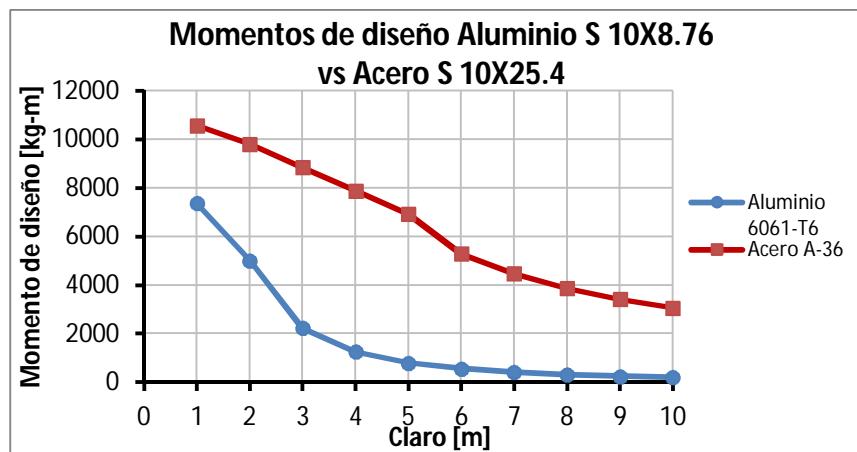
# Apéndice F

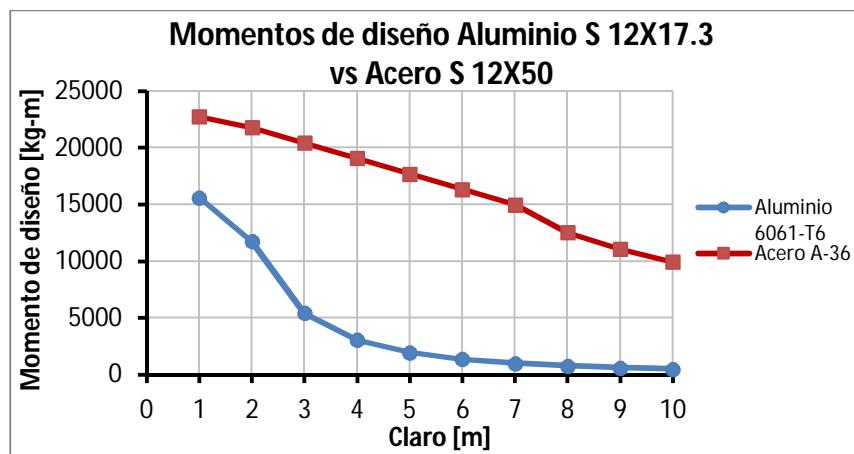
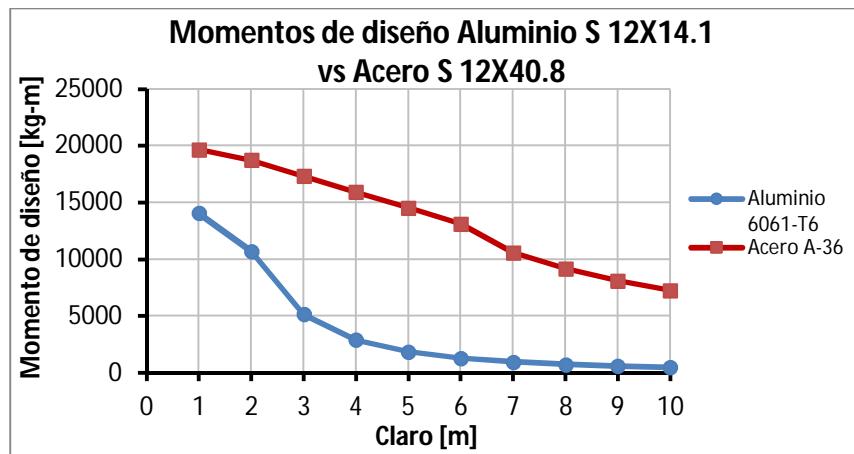
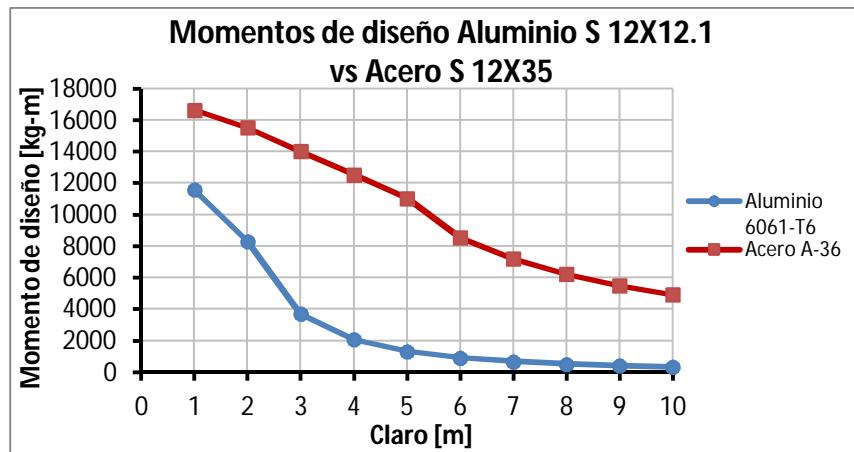
**Momentos de diseño para aluminio 60961-T6 y acero A-36 considerando un factor de modificación de pandeo  $C_b = 1$**











# Apéndice G

## Resistencia de diseño por cortante en el alma para aluminio 6061-T6 y 6351-T6, y para acero A-36

Sección	Resistencias			Acero A-36 [kg]	
	Aluminio 6061-T6      6351-T6		Sección		
	[kg]	[kg]			
3X1.96	3093.00	3286.31	3X5.7	4495.23	
3X2.59	6349.75	6746.60	3X7.5	9228.44	
4X2.64	6061.60	6447.35	4X7.7	6804.54	
4X3.28	9320.58	9903.12	4X9.5	11493.69	
5X3.43	8381.26	8908.87	5X10	9431.17	
6X4.3	11531.22	12246.23	6X12.5	12269.33	
6X5.96	21754.96	23114.65	6X17.2	24591.55	
8X6.35	18254.79	19364.24	8X18.4	19109.13	
8X7.96	32050.71	34093.30	8X23	31096.41	
10X8.76	26232.33	27801.37	10X25.4	27412.09	
10X12.1	55560.34	52492.62	10X35	52356.20	
12X11	35463.82	37557.63	12X31.8	37019.54	
12X12.1	45280.70	48038.52	12X35	45269.61	
12X14.1	47197.26	50115.19	12X40.8	48865.79	
12X17.3	74301.79	70197.28	12X50	72664.07	