

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL**



**DESCRIPCIÓN DE CONEXIONES EMPERNADAS E  
INSTALACIÓN DE PERNOS ESTRUCTURALES DE ALTA  
RESISTENCIA**

**INFORME DE SUFICIENCIA**

**Para optar el Título Profesional de:**

**INGENIERO CIVIL**

**IVÁN JESÚS PAZ VILLACRIZ**

**Lima - Perú**

**2014**

***A mis Padres y Hermana.***

	Pág.
<b>RESUMEN</b>	<b>4</b>
<b>LISTA DE TABLAS</b>	<b>5</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>6</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS Y DE SIGLAS</b>	<b>9</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>10</b>
<b>CAPÍTULO I: CONEXIONES EMPERNADAS</b>	<b>11</b>
1.1 PERNOS	11
1.1.1 Definición	11
1.1.2 Clasificación de pernos	11
1.1.3 Simbología representada en los pernos estructurales de alta resistencia	17
1.2 TUERCAS	19
1.2.1 Definición	19
1.2.2 Tuercas utilizadas en los pernos estructurales de alta resistencia	20
1.2.3 Simbologías representadas en los pernos estructurales de alta resistencia	22
1.3 ARANDELAS	24
1.3.1 Definición	24
1.3.2 Arandelas utilizadas en los pernos estructurales de alta resistencia	24
1.3.3 Simbologías representadas en las arandelas utilizadas en los pernos estructurales de alta resistencia	27
1.4 TIPOS DE TUERCAS Y ARANDELAS COMPATIBLES CON LOS PERNOS ESTRUCTURALES DE ALTA RESISTENCIA	29
1.5 PARÁMETROS IMPORTANTES EN CONEXIONES EMPERNADAS	30
1.5.1 Determinación de la longitud del perno en una conexión	30
1.5.2 Tipos de agujeros para alojar a los pernos estructurales de alta resistencia	30

1.5.3	Distancias mínimas y máximas relacionadas a los pernos estructurales de alta resistencia dentro de una conexión	33
<b>CAPÍTULO II: SOLICITACIONES EN CONEXIONES EMPERNADAS</b>		<b>36</b>
2.1	INTRODUCCIÓN	36
2.2	PRETENSIÓN O PRECARGA DE UN PERNO	37
2.3	RESISTENCIA DE UN PERNO	40
2.3.1	Resistencia a la tracción	40
2.3.2	Resistencia al corte	41
2.4	CONEXIONES	43
2.4.1	Conexiones de tipo aplastamiento	43
2.4.2	Conexiones de tipo deslizamiento crítico	51
<b>CAPÍTULO III: INSTALACIÓN DE PERNOS ESTRUCTURALES DE ALTA RESISTENCIA</b>		<b>56</b>
3.1	INTRODUCCIÓN	56
3.2	VERIFICACIÓN PREVIA A LA INSTALACIÓN DE LOS PERNOS ESTRUCTURALES DE ALTA RESISTENCIA	56
3.3	MÉTODOS DE INSTALACIÓN DE LOS PERNOS ESTRUCTURALES DE ALTA RESISTENCIA	59
3.3.1	Métodos de instalación de los pernos estructurales de alta resistencia en conexiones con condición de apriete ajustado	59
3.3.2	Métodos de instalación de los pernos estructurales de alta resistencia en conexiones pretensadas y de tipo deslizamiento crítico	59
<b>CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>		<b>79</b>
4.1	CONCLUSIONES	79
4.2	RECOMENDACIONES	80
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>		<b>81</b>

**ANEXO 1 : USO DE ARANDELAS EN PERNOS ESTRUCTURALES DE ALTA RESISTENCIA**

**ANEXO 2 : CONEXIONES VARIAS**

**ANEXO 3 : DISEÑO DE UNA CONEXIÓN TIPO APLASTAMIENTO**

**ANEXO 4 : DISEÑO DE UNA CONEXIÓN TIPO DESLIZAMIENTO CRÍTICO**

**ANEXO 5 : ARCHIVO DE FOTOS**

## RESUMEN

Dentro de todo el conjunto de la materialización de un proyecto de estructuras metálicas, un aspecto muy relevante son las conexiones entre los miembros estructurales. De hecho, multitud de accidentes se deben a conexiones mal proyectadas o mal ejecutadas, pues puede ser suficiente que falle una cualquiera de ellas para ocasionar la ruina total o parcial de la estructura.

El problema radica en que por lo general no se toma en cuenta o de cierta forma se minimiza la importancia que tienen las conexiones estructurales, obviando su comportamiento y funcionamiento de las mismas; lo cual ocurre principalmente durante la etapa de construcción. Por ende, los encargados del diseño, fabricación e instalación deben tener un conocimiento bastante amplio en lo que coniere a conexiones y ser conscientes en su labor, para que de esta manera, no se origine a futuro posibles fallas en las estructuras, evitando así, pérdidas humanas y materiales.

Debido a lo anterior, es que se desarrolló este informe que concierne a las conexiones empernadas en estructuras metálicas, en el cual, se describen los tipos de conexiones empernadas y se muestran las formas de instalación de los pernos estructurales de alta resistencia; basados en las Especificaciones Americanas.

		Pág.
Tabla N°1.1	Dimensiones geométricas de los pernos estructurales de alta resistencia	14
Tabla N°1.2	Propiedades mecánicas e las tuercas hexagonales pesadas, calidad ASTM-A563	20
Tabla N°1.3	Dimensiones geométricas de las tuercas hexagonales pesadas, calidad ASTM-A563	21
Tabla N° 1.4	Dimensiones geométricas de arandelas: circular, circular recortada y extra gruesa; calidad ASTM-F436	26
Tabla N° 1.5	Dimensiones geométricas de arandelas biseladas, calidad ASTM-F436	27
Tabla N°1.6	Grados y tipos de: tuercas y arandelas, requeridos para los pernos estructurales de alta resistencia	29
Tabla N° 1.7	Longitud que se adiciona al Grip, según el diámetro del perno	30
Tabla N°1.8	Dimensiones nominales de agujeros	32
Tabla N°1.9	Distancia Mínima al Borde desde el Centro del Agujero Estándar hasta el Borde de la Parte Conectada	34
Tabla N°1.10	Valores de incremento de distancia al borde, $C_2$ ,	34
Tabla N°2.1	Pretensión o precarga mínima de pernos, en conexiones pretensadas y de tipo deslizamiento crítico	38
Tabla N°2.2	Resistencia nominal de los pernos	42
Tabla N°3.1	Pretensión mínima de pernos para la verificación previa a la instalación	58
Tabla N°3.2	Rotación de la tuerca a partir de la condición de apriete ajustado para el pretensado con giro de la tuerca	62

		Pág.
Figura N°1.1	Perno de cabeza hexagonal	11
Figura N°1.2	Perno estructural de alta resistencia	13
Figura N°1.3	Dimensiones geométricas de los pernos estructurales de alta resistencia	14
Figura N°1.4	Perno de tensión controlada (TC)	16
Figura N°1.5	Simbología requerida en los pernos estructurales de alta resistencia	18
Figura N°1.6	Ejemplo-Simbología de un perno de calidad ASTM-A325, Tipo 1	18
Figura N°1.7	Tuerca	19
Figura N°1.8	Dimensiones geométricas de las tuercas hexagonales pesadas, calidad ASTM-A563	21
Figura N°1.9	Simbología requerida en las tuercas	22
Figura N°1.10	Ejemplo-Simbología de una tuerca de calidad ASTM A563, Grado DH	23
Figura N°1.11	Arandelas en forma circular	24
Figura N°1.12	Clasificación de arandelas calidad ASTM-F436, de acuerdo a su forma geométrica	25
Figura N°1.13	Ejemplo - Simbología de una arandela de calidad F436	28
Figura N°1.14	Tipos de agujeros para pernos estructurales de alta resistencia	32
Figura N°2.1	Componentes de solicitaciones en un perno	36
Figura N°2.2	Componentes de fuerzas en un perno	37
Figura N°2.3	Carga externa aplicada a la conexión	39



Figura N°2.4	Resistencia al deslizamiento debido a la pretensión	40
Figura N°2.5	Clasificación de un perno con respecto al plano de corte	41
Figura N°2.6	Conexión tipo aplastamiento	43
Figura N° 2.7	Detalle - Conexión tipo aplastamiento	43
Figura N° 2.8	Conexión con apriete ajustado – Usando llave de impacto	44
Figura N° 2.9	Conexión con apriete ajustado – Usando llave común	44
Figura N°2.10	Falla por ovalamiento del agujero	46
Figura N°2.11	Falla por desgarramiento de la placa	46
Figura N° 2.12	Solicitación a corte y tracción simultánea	48
Figura N° 2.13	Detalle de conexión (Solicitación de corte y tracción simultánea)	49
Figura N° 2.14	Conexión de tipo deslizamiento crítico	52
Figura N° 2.15	Detalle - Conexión de tipo deslizamiento crítico	52
Figura N° 3.1	Calibrador de tensión (Skidmore Wilhelm - Tungsten Capital Partners )	57
Figura N° 3.2	Verificación Previa a la instalación	58
Figura N° 3.3	Pretensado con giro de la tuerca	61
Figura N° 3.4	Torquímetro mecánico	62
Figura N° 3.5	Torquímetro analógico	63
Figura N° 3.6	Torquímetro digital	63
Figura N° 3.7	Acople el dado del torquímetro en el perno	64
Figura N° 3.8	Pretensado del perno con torquímetro mecánico	64
Figura N° 3.9	Llave eléctrica para instalación de los pernos de tensión controlada	66

Figura N° 3.10	Inserción del dado coaxial	67
Figura N° 3.11	Accionamiento de la llave eléctrica	67
Figura N° 3.12	Indicador directo de tensión “Estándar”	68
Figura N° 3.13	Ajuste del perno con arandela indicadora directa de tensión	70
Figura N° 3.14	Lámina calibradora (galga) dentro del espacio entre protuberancias del IDT	72
Figura N° 3.15	Inspección de instalación con lámina calibradora (galga)	72
Figura N° 3.16	Configuraciones del indicador directo de tensión (IDT) ASTM-F959	73
Figura N° 3.17	Indicador directo de tensión “Squirter”	74
Figura N° 3.18	Ajuste del perno con llave de impacto - Calibración de una arandela IDT Squirter, con un calibrador de tensión (Skidmore W.)	75
Figura N° 3.19	Aspecto visual de silicona - Calibración de una arandela ID Squirter, con un calibrador de tensión (Skidmore W.)	76
Figura N° 3.20	Calibración de una arandela indicadora de tensión Squirter, en acero sólido	77
Figura N° 3.21	Pretensión del perno con IDT “Squirter”	77
Figura N° 3.22	Inspección con una lámina o galga, de un perno pretensado con IDT Squiter	78

## LISTA DE SÍMBOLOS

Unidad	Símbolo
<b>Longitud</b>	
Pulgada	(") ó (in.)
Pie	(')
<b>Fuerza:</b>	
Kilolibra	Klb ó Kip
Libra	Lb
<b>Presión o Esfuerzo:</b>	
Kilolibra por pulgada cuadrada	Ksi
Megapascal	Mpa

## LISTA DE SIGLAS

AISC	American Institute of Steel Construction
ANSI	American National Standards Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
ASD	Allowable Stress Design
LRFD	Load and Resistance Factor Design
RCSC	Research Council on Structural Connections

## INTRODUCCIÓN

El presente informe se aboca a una parte fundamental de las estructuras metálicas, que son las conexiones empernadas. Tiene por objetivo, describir los tipos de conexiones empernadas así como establecer los criterios y formas de instalación de los pernos estructurales de alta resistencia.

La razón del presente informe se debe a la vital importancia que tienen las conexiones de los elementos estructurales en el comportamiento general de una estructura (sistema). Toda conexión es por su propia naturaleza una discontinuidad y por tanto, una zona potencialmente peligrosa.

Para el desarrollo del informe se adoptaron los criterios y definiciones indicadas en las Normas Americanas ANSI/AISC 360-10 (Specification for Structural Steel Buildings) y RCSC-2009 (Specification for Structural Joints Using High-Strength Bolts).

La organización del informe consiste en lo siguiente:

- En el Capítulo I, se describen los pernos estructurales de alta resistencia, así como los componentes que forman el ensamble de sujeción. También se definen los parámetros importantes concernientes a las conexiones empernadas.
- En el Capítulo II, se indican las solicitaciones a las que están sometidas las conexiones empernadas, así como también los tipos y funcionamiento de las mismas.
- En el Capítulo III, se muestran las formas o métodos de instalación de los pernos estructurales de alta resistencia.
- Las conclusiones y recomendaciones se presentan en el Capítulo IV.

## CAPÍTULO I: CONEXIONES EMPERNADAS

### 1.1 PERNOS

#### 1.1.1 Definición

Un perno es un tipo de conector que se utiliza para unir elementos de acero. Consiste en una barra metálica de sección transversal circular, con una cabeza hexagonal o cuadrada en un extremo y cuerpo roscado en el otro, el cual recibe a una tuerca hexagonal o cuadrada respectivamente. (Ver Figura N°1.1)

Para su instalación, los pernos se introducen en los agujeros perforados en los elementos de acero y las tuercas se aprietan en el lado roscado.



Figura N°1.1.- Perno de cabeza hexagonal

Fuente: Elaboración propia

#### 1.1.2 Clasificación de los pernos

Con relación al material, proceso de fabricación y resistencia mecánica, los pernos se pueden clasificar como pernos estructurales ordinarios y pernos estructurales de alta resistencia.

## A) Pernos estructurales ordinarios

Estos pernos están fabricados y clasificados comúnmente bajo la especificación ASTM-A307, los cuales se conforman por forja en frío (recalcado) a partir de barras redondas de acero laminado en caliente; tienen propiedades mecánicas muy similares al acero de calidad, ASTM-A36. Por ser pernos de baja resistencia y por consiguiente desarrollar una baja tensión de apriete en las conexiones, son pernos que se utilizan para estructuras ligeras sometidas sólo a cargas estáticas, o para elementos secundarios.

Cabe señalar que como revestimiento de protección contra la corrosión, la Especificación ASTM, permite el galvanizado en caliente o la aplicación de otros tipos de recubrimientos de ser necesarios. Por lo general, estos pernos se suministran con un recubrimiento muy ligero de zinc.

### ➤ Perno estructural ordinario de calidad ASTM-A307

La Especificación indica tres tipos de grados:

- \* Grado A : Con una resistencia a la tracción de 60 Ksi. Son pernos destinados a aplicaciones generales. Sus diámetros varían de  $\frac{1}{4}$ " a  $1\frac{1}{2}$ " para pernos hexagonales estándar y de  $1\frac{5}{8}$ " a 4" para pernos hexagonales pesados. También se incluyen los pernos con cabezas cuadradas.
- \* Grado B : Con una resistencia a la tracción entre 60 Ksi a 100 Ksi. Son Pernos hexagonales pesados, destinados a las conexiones bridadas en los sistemas de tuberías con bridas de hierro fundido. Sus diámetros varían de  $\frac{1}{4}$ " a 4". También se incluyen los pernos con cabezas cuadradas.
- \* Grado C : Reemplazado en el 2007 por la Especificación ASTM-F1554 Grado 36. Son pernos destinados al anclaje estructural.



## B) Pernos estructurales de alta resistencia

Son pernos que se conforman por forja en frío (recalcado) a partir de barras redondas de acero al medio carbono y/o aleado, las cuales han sido tratadas térmicamente bajo el proceso de bonificado (templado y revenido). Estas características mencionadas hacen que el perno adquiera alta resistencia.

Por ser pernos que poseen una alta resistencia y por consiguiente desarrollar una alta tensión de apriete en la instalación, son los que se utilizan para materializar a las conexiones en estructuras de acero que sean sometidas a cargas dinámicas ya sea, vibraciones, inversiones de esfuerzo, con la posibilidad de provocar fatiga. Cabe señalar que estos pernos tienen una cabeza hexagonal pesada con el objetivo de que sea más fácil sujetar y girar la cabeza con una llave.

Es importante mencionar que la Especificación ASTM (American Society for Testing and Materials) (Sociedad Americana de Ensayos y Materiales) es quien establece el rango de los diámetros nominales de los pernos estructurales de alta resistencia, el cual va de  $\frac{1}{2}$ " a  $1\frac{1}{2}$ ". El diámetro nominal del perno corresponde al diámetro de la parte del vástago sin roscar. (Ver Figura N°1.2)

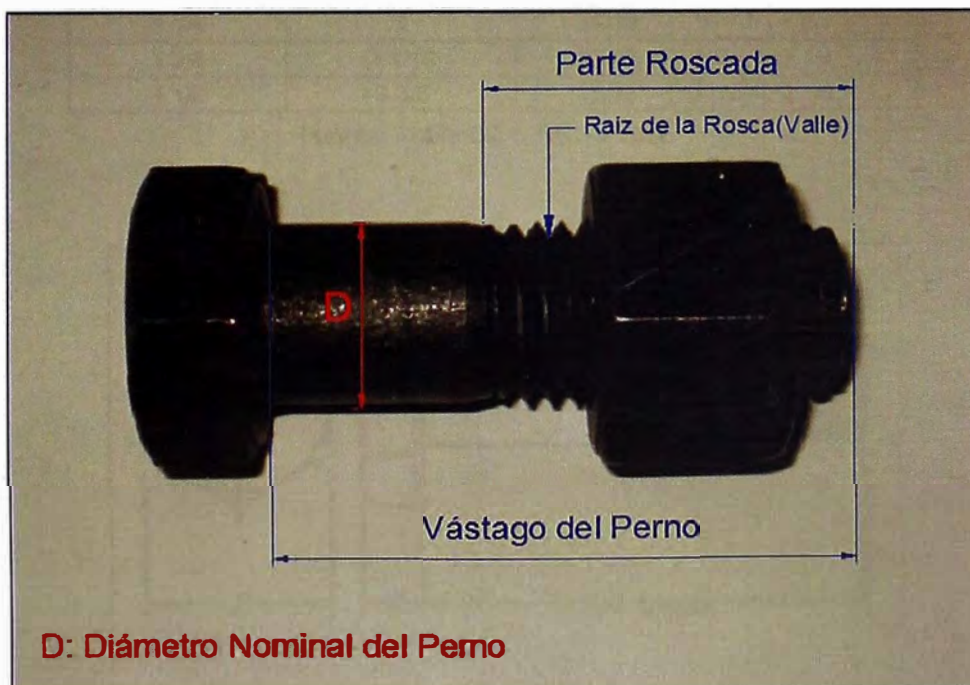


Figura N°1.2.- Perno estructural de alta resistencia

Fuente: Elaboración propia

La primera especificación que regula el uso de los pernos de alta resistencia para las conexiones de estructuras es el Research Council on Structural Connection (RCSC) (Consejo de Investigación de Conexiones Estructurales), siendo su último documento a la fecha (RCSC, 2009), Specification for Structural Joints Using High-Strength Bolts (Especificación para Conexiones Estructurales mediante Pernos de Alta Resistencia).

A continuación se muestran las dimensiones geométricas de los pernos estructurales de alta resistencia (Ver Tabla N°1.1 y Figura N°1.3), indicados por la RCSC, 2009.

Tabla N°1.1. – Dimensiones geométricas de los pernos estructurales de alta resistencia

Diámetro Nominal del Perno, $d_b$ , in	Dimensiones de Perno Hexagonal Pesado, in.		
	Ancho entre caras, F	Altura, $H_1$	Longitud de Rosca, T
1/2	7/8	5/16	1
5/8	1 1/16	25/64	1 1/4
3/4	1 1/4	15/32	1 3/8
7/8	1 7/16	35/64	1 1/2
1	1 5/8	39/64	1 3/4
1 1/8	1 13/16	11/16	2
1 1/4	2	25/32	2
1 3/8	2 3/16	27/32	2 1/4
1 1/2	2 3/8	15/16	2 1/4

Fuente: Tabla C2.1, RCSC 2009

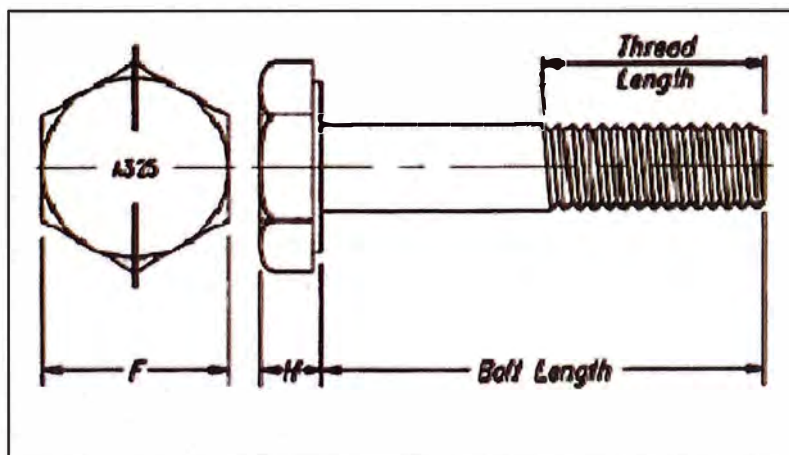


Figura N°1.3.-Dimensiones geométricas de los pernos estructurales de alta resistencia

Fuente: Figura C-2.2, RCSC 2009



Cabe señalar que la longitud del vástago del perno (longitud del perno) varía entre 8" a 9", según sus diámetros. Parte 7, Steel Construction Manual 13<sup>o</sup> Edición - AISC (Manual de Construcción en Acero - Instituto Americano de la Construcción en Acero).

Los pernos de alta resistencia más utilizados en las conexiones estructurales de acero bajo las Especificaciones ASTM (American Society for Testing and Materials) (Sociedad Americana de Ensayos y Materiales), son los siguientes: calidad ASTM-A325, ASTM-A490, ASTM-F1852 y ASTM-F2280.

### ➤ Pernos estructurales de alta resistencia de calidad ASTM-A325

Esta Especificación concierne a los pernos estructurales de acero tratados térmicamente (bonificado), que tienen una resistencia mínima a la tracción de 120/105 Ksi (Ver Figura N°1.2). Su clasificación de acuerdo a sus diámetros y resistencias es:

- Pernos de  $\frac{1}{2}$ " a 1" de diámetro, con una resistencia mínima a la tracción de 120 Ksi.
- Pernos de  $1\frac{1}{8}$ " a  $1\frac{1}{2}$ " de diámetro, con una resistencia mínima a la tracción de 105 Ksi.

Estos pernos poseen en su composición química un contenido medio de carbono y alternativamente otros elementos de aleación. Se clasifican en los siguientes tipos:

- \* Tipo 1 : Acero al medio carbono, acero carbono-boro ó acero al medio carbono aleado.
- \* Tipo 2 : Retirado en 1991, por ser un espécimen redundante al Tipo1.
- \* Tipo 3 : Acero resistente a la corrosión atmosférica.

### ➤ Pernos estructurales de alta resistencia de calidad ASTM-A490

Esta Especificación concierne a los pernos estructurales de acero aleado tratados térmicamente (bonificado), con una resistencia mínima a la tracción de 150 Ksi (Ver Figura N°1.2). Estos pernos poseen en su composición

química un contenido medio de carbono y además otros elementos de aleación que le confieren una mayor resistencia. Se clasifican en los siguientes tipos:

- \* Tipo 1 : Acero aleado - medio carbono.
- \* Tipo 2 : Retirado en el 2002, por ser un espécimen redúndate al Tipo1.
- \* Tipo 3 : Acero resistente a la corrosión atmosférica.

#### ➤ Pernos estructurales de alta resistencia de calidad ASTM-F1852

Esta especificación concierne al conjunto o ensamble formado por un perno de tensión controlada con extremo ranurado (espiga) (Ver Figura N°1.4), una tuerca hexagonal y una arandela. El sistema de tensión controlada del perno es del tipo desprendimiento de espiga por torsión mínima.

La fabricación, composición química y clasificación de los pernos de calidad ASTM-F1852 es equivalente a los pernos de calidad ASTM-A325.



**Figura N°1.4.- Perno de tensión controlada (TC)**

Fuente: Elaboración propia

#### ➤ Pernos estructurales de alta resistencia de calidad ASTM-F2280

Esta especificación concierne al conjunto o ensamble formado por un perno de tensión controlada con extremo ranurado (espiga) (Ver Figura N°1.4), una









tuerca hexagonal y una arandela. El sistema de tensión controlada del perno es del tipo desprendimiento de espiga por torsión mínima.

La fabricación, composición química y clasificación de los pernos de calidad ASTM-F2280 es equivalente a los pernos de calidad ASTM-A490.

### **1.1.3 Simbologías representadas en los pernos estructurales de alta resistencia**

La Especificación, ASTM, establece ciertas simbologías que deben estar grabadas en la parte superior de las cabezas de los pernos estructurales de alta resistencia con el objetivo de que puedan ser identificados con facilidad. Las simbologías requeridas son:

- \* Todos los pernos deben estar identificados con la marca del fabricante. (Ver Figura N°1.5 y Figura N°1.6)
- \* Los pernos Tipo 1, deben estar identificados con la respectiva Especificación "ASTM", sin subrayar. (Ver Figura N°1.5 y Figura N°1.6)
- \* Los pernos Tipo 3, deben estar identificados con la respectiva Especificación "ASTM", subrayada.

PERNO	TIPO 1	TIPO 3
Perno ASTM A325	 <p>Tres líneas radiales 120° es opcional</p>	
Perno ASTM F1852	 <p>Tres líneas radiales 120° es opcional</p>	
Perno ASTM A490		
Perno ASTM F2280		

Notas:  
1. XYZ representa la marca de identificación del fabricante.  
2. Los pernos de tensión controlada, ASTM F1852 y ASTM F2280, también son producidos con cabeza hexagonal pesada con simbologías similares.

Figura N°1.5.- Simbología requerida en los pernos estructurales de alta resistencia

Fuente: Figura C2-1, RCSC 2009



Figura N°1.6.- Ejemplo-Simbología de un perno de calidad ASTM-A325, Tipo 1

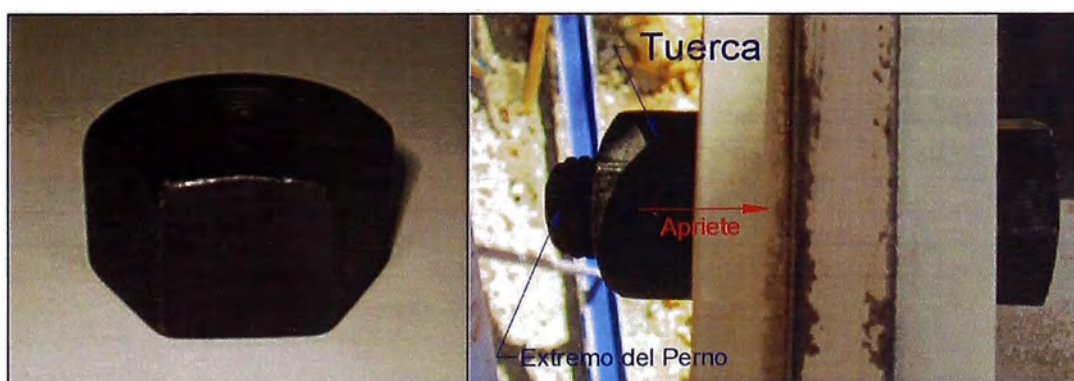
Fuente: Elaboración propia

Es importante indicar que la Especificación, ASTM-A325 y ASTM-F1852, permite el galvanizado de los pernos, ya sea por inmersión en caliente (ASTM-F2329) o mecánico (ASTM-B695). Por el contrario, la Especificación ASTM-A490 y ASTM-F2280, no permite el galvanizado de los pernos, ya sea por los procesos de galvanización por inmersión en caliente o electrodeposición (galvanoplastia) debido al posible riesgo de fragilización por hidrógeno; también, no permite que sean recubiertos por deposición mecánica, debido al posible riesgo de fragilización (en investigación por la RCSC). Sin embargo, la ASTM, ha aprobado el recubrimiento de protección según la Especificación ASTM-F1136 (Especificación estándar para zinc/aluminio, capa de protección contra la corrosión para sujetadores) para los pernos de calidad ASTM-A490 y ASTM-F2280, ya que con la aplicación de este proceso se evita la fragilización por hidrógeno.

## 1.2 TUERCAS

### 1.2.1 Definición

Una tuerca es un elemento de acero roscado interiormente que se acopla por el extremo de un perno para formar una unión de acoplamiento fijo, convirtiendo un movimiento giratorio de apriete en presión lineal. Las tuercas son una parte importante del ensamble del perno, pues estas son las que aprietan a los elementos de acero de la conexión. (Ver Figura N°1.7)



**Figura N°1.7.- Tuerca**

Fuente: Elaboración propia



### 1.2.2 Tuercas utilizadas en los pernos estructurales de alta resistencia

Los pernos de alta resistencia utilizan tuercas hexagonales pesadas del mismo tamaño nominal de la cabeza del perno, esto para que el montador utilice una sola medida de llave tanto para la cabeza como para la tuerca.

La especificación que gobierna a las tuercas que serán usadas con los pernos estructurales de alta resistencia es la ASTM-A563 (Especificación estándar para tuercas de acero al carbono y aleado). Esta especificación está constituida por varios grados de acero, los cuales constan de diferente composición química y estos son:

- \* C : Acero al carbono, templado y revenido.
- \* C3 : Acero resistente a la corrosión atmosférica, templado y revenido. Este Grado puede ser fabricado con cualquiera de las clase (A, B, C, D, E, F y N); la selección del tipo de clase es opción del fabricante.
- \* D : Acero al carbono, templado y revenido.
- \* DH : Acero al carbono, templado y revenido.
- \* DH3 : Acero resistente a la corrosión atmosférica, templado y revenido.

La resistencia mecánica de las tuercas hexagonales pesadas de calidad ASTM-A563, según sus respectivos grados (composición química) se encuentra establecida en la Tabla N°1.2:

Tabla N°1.2. – Propiedades mecánicas e las tuercas hexagonales pesadas, calidad ASTM-A563

Grado	Tipo de Tuerca	Medida Nominal in.	Esfuerzo - Carga de Prueba, ksi	
			Negro	Galvanizado
C / C3	Hex. - Pesada	1 1/8 - 1 1/2	144	144
D	Hex. - Pesada	1/4 - 4	150	150
DH / DH3	Hex. - Pesada	1/4 - 5	175	150

Fuente: Tabla 3, ASTM-A563, 2007

Cabe mencionar que la tuerca ASTM-A563 Grado C es la tuerca hexagonal pesada que se utiliza con mayor frecuencia para el empernado de estructuras de acero y es la tuerca recomendada para el uso de pernos ASTM-A325 de alta

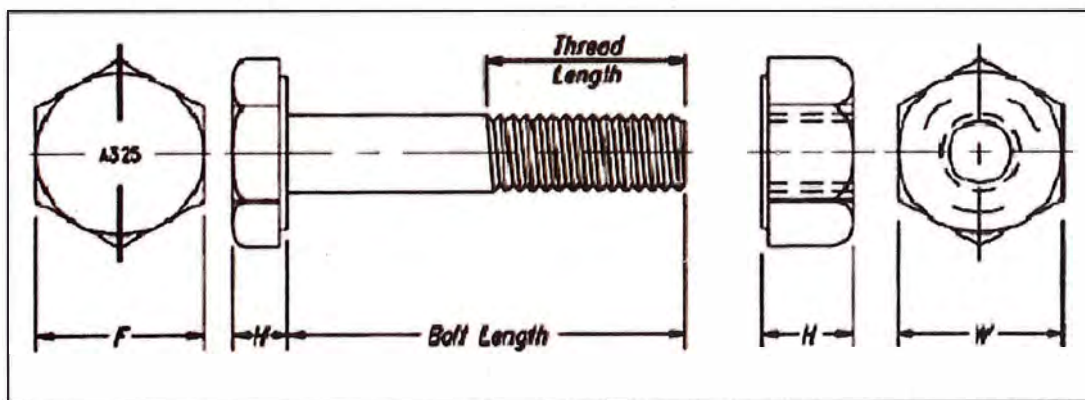
resistencia. La tuerca ASTM-A563 Grado DH es una tuerca hexagonal pesada recomendada para uso con los pernos estructurales ASTM-A490 de alta resistencia. Vinnakota 2006.

Las dimensiones geométricas de las tuercas hexagonales pesadas de calidad ASTM-A563, se encuentra establecido en la Tabla N°1.3 y Figura N°1.8:

**Tabla N°1.3. – Dimensiones geométricas de las tuercas hexagonales pesadas, calidad ASTM-A563**

Diámetro Nominal del Perno, $d_b$ , in	Dimensiones de Perno Hexagonal Pesado, in.			Dimensiones de Tuerca Hexagonal Pesada, in.	
	Ancho entre caras, F	Altura, $H_1$	Longitud de Rosca, T	Ancho entre caras, W	Altura, $H_2$
1/2	7/8	5/16	1	7/8	31/64
5/8	1 1/16	25/64	1 1/4	1 1/16	39/64
3/4	1 1/4	15/32	1 3/8	1 1/4	47/64
7/8	1 7/16	35/64	1 1/2	1 7/16	55/64
1	1 5/8	39/64	1 3/4	1 5/8	63/64
1 1/8	1 4/5	11/16	2	1 13/16	1 7/64
1 1/4	2	25/32	2	2	1 7/32
1 3/8	2 3/16	27/32	2 1/4	2 3/16	1 11/32
1 1/2	2 3/8	15/16	2 1/4	2 3/8	1 15/32

Fuente: Tabla C2.1, RCSC 2009



**Figura N°1.8.- Dimensiones geométricas de las tuercas hexagonales pesadas, calidad ASTM-A563**

Fuente: Figura C-2.2, RCSC 2009

### 1.2.3 Simbologías representadas en las tuercas utilizadas en los pernos estructurales de alta resistencia.

La Especificación, ASTM, establece ciertas simbologías que deben estar grabadas en una cara de las tuercas hexagonales pesadas con el objetivo de que puedan ser identificados con facilidad. Las simbologías requeridas son:

- \* Todas las tuercas deben estar identificados con la marca del fabricante. (Ver Figura N°1.9)
- \* Las tuercas de Grado C, deben estar identificadas en una cara con tres arcos circunferenciales separados 120°. (Ver Figura N°1.9)
- \* Las tuercas de Grado C3, deben estar identificadas en una cara con tres arcos circunferenciales separados 120° y además en la misma cara, debe estar indicado el número 3. (Ver Figura N°1.9)
- \* Las tuercas de Grado D, deben estar identificadas en una cara con la letra D. (Ver Figura N°1.9)
- \* Las tuercas de Grado DH, deben estar identificadas en una cara con las letras DH. (Ver Figura N°1.9 y 1.10)
- \* Las tuercas de Grado DH3, deben estar identificadas en una cara con las letras DH y el número 3. (Ver Figura N°1.9)






TUERCA	TIPO 1	TIPO 3	
Tuerca ASTM A563	 Arcos Indicados Grado C	 Arcos y "3" Indicados Grado C3	 Grado D
	 Grado DH	 Grado DH 3	
Notas: 1. XYZ representa la marca de identificación del fabricante.			

Figura N°1.9.- Simbología requerida en las tuercas

Fuente: Figura C2-1, RCSC 2009





**Figura N°1.10.- Ejemplo-Simbología de una tuerca de calidad ASTM A563, Grado DH**

Fuente: Elaboración propia

Es importante indicar que la Especificación, ASTM-A563, permite el galvanizado de las tuercas, por inmersión en caliente (ASTM-F2329) o mecánico (ASTM-B695). También permite el recubrimiento de protección según la Especificación ASTM-F1136 (Especificación estándar para zinc/aluminio, capa de protección contra la corrosión para sujetadores).

## 1.3 ARANDELAS

### 1.3.1 Definición

Una arandela es una pieza delgada de acero, que por lo general tiene una forma circular y un agujero en el centro (Ver Figura N°1.11). La función fundamental de una arandela es aportar una superficie endurecida no abrasiva bajo la cabeza del perno y/o tuerca que es girado durante la instalación. También ayuda a distribuir los esfuerzos de manera uniforme que se generan bajo su superficie, optimizando la fuerza de sujeción de la conexión.

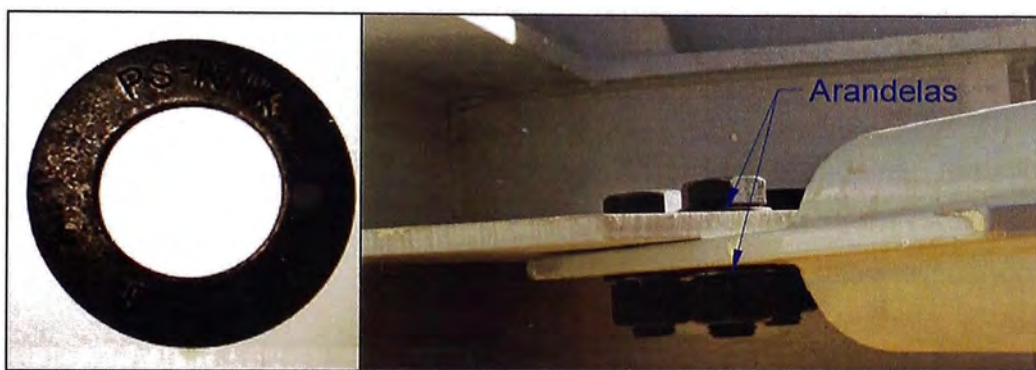


Figura N°1.11.- Arandelas en forma circular

Fuente: Elaboración Propia

### 1.3.2 Arandelas utilizadas en los pernos estructurales de alta resistencia

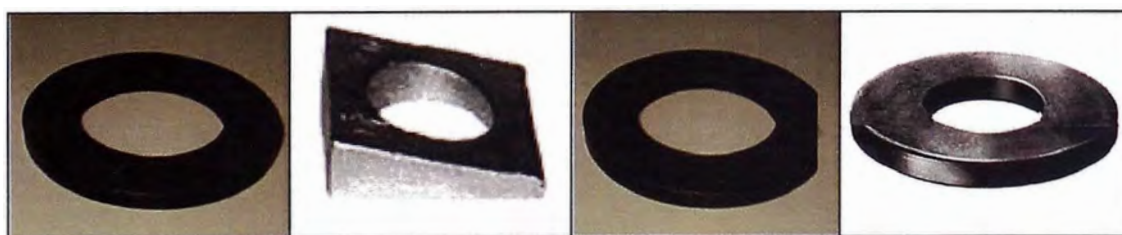
La especificación que gobierna a las arandelas que serán usadas con los pernos estructurales de alta resistencia es la ASTM-F436. Estas arandelas están fabricadas de acero endurecido, tratadas térmicamente (bonificados).

Las arandelas de calidad ASTM-F436, de acuerdo a su composición química, se clasifican en los siguientes tipos:

- \* Tipo 1 : Acero al Carbono.
- \* Tipo 3 : Acero resistente a la corrosión atmosférica

Las arandelas de calidad ASTM-F436, de acuerdo a su forma y uso (Ver Anexo 1), se clasifican en:

- Arandelas circulares : Son arandelas de uso común, se utilizan cuando existe suficiente espacio para poder alojarlas. (Ver Figura N°1.12)
- Arandelas biseladas : Son arandelas cuadradas o rectangulares, las cuales poseen una pendiente de 1:6, y son usadas en perfiles como viga estándar americana y perfiles canales, ya que estos perfiles presentan en la parte inferior de sus alas una pendiente similar. (Ver Figura N° 1.12)
- Arandelas recortadas : También llamadas arandelas reducidas. Estas arandelas pueden ser circulares o biseladas, las cuales son usadas cuando no se cuenta con suficiente espacio o exista interferencia para alojar a la arandela. (Ver Figura N°1.12)
- Arandelas extra gruesas : Son arandelas circulares con un grosor nominal de 5/16", conveniente para usos estructurales con agujeros de gran tamaño. (Ver Figura N°1.12)



a)

b)

c)

d)

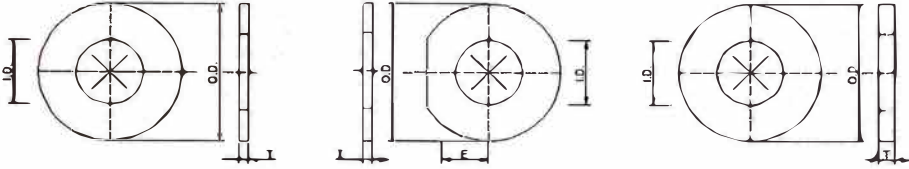
**Figura N°1.12.- Clasificación de arandelas calidad ASTM-F436, de acuerdo a su forma**

**a) Circular b) Biselada c) Recortada circular d) Extra gruesa**

Fuente: Elaboración Propia

A continuación se muestra las dimensiones geométricas de las arandelas de calidad ASTM-F436: circular, circular recortada, extra gruesa (Ver Tabla N°1.4) y biseladas (Ver Tabla N°1.5).

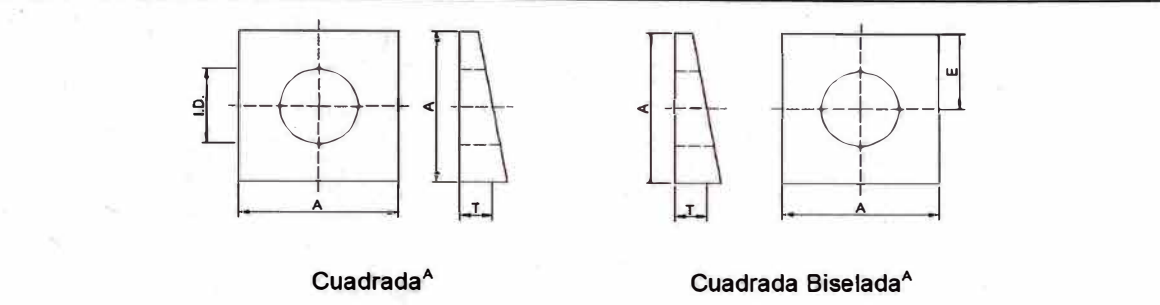
**Tabla N°1.4.- Dimensiones geométricas de arandelas: circular, circular recortada y extra gruesa; calidad ASTM-F436**



Medida Perno, in.	Arandela: Circular, Circular Recortada y Extra Gruesa		Arandela: Circular y Circular Recortada		Arandela: Extra Gruesa		Reducción Distancia Mínima al Borde, (E), in.
	Diámetro Nominal Exterior (OD), in.	Diámetro Nominal interior (ID), in.	Espesor (T), in.		min	max	
			min	max			
1/4	0.625	0.281	0.051	0.080	-	-	0.219
5/16	0.688	0.344	0.051	0.080	-	-	0.281
3/8	0.813	0.406	0.051	0.080	-	-	0.344
7/16	0.922	0.469	0.051	0.080	-	-	0.406
1/2	1.063	0.531	0.097	0.177	0.305	0.375	0.438
9/16	1.188	0.625	0.110	0.177	0.305	0.375	0.500
5/8	1.313	0.688	0.122	0.177	0.305	0.375	0.563
3/4	1.469	0.813	0.122	0.177	0.305	0.375	0.656
7/8	1.750	0.938	0.136	0.177	0.305	0.375	0.781
1	2.000	1.125	0.136	0.177	0.305	0.375	0.875
1 1/8	2.250	1.250	0.136	0.177	0.305	0.375	1.000
1 1/4	2.500	1.375	0.136	0.177	0.305	0.375	1.094
1 3/8	2.750	1.500	0.136	0.177	0.305	0.375	1.219
1 1/2	3.000	1.625	0.136	0.177	0.305	0.375	1.313
1 3/4	3.375	1.875	0.178	0.280	0.305	0.375	1.531
2	3.750	2.125	0.178	0.280	0.305	0.375	1.750
2 1/4	4.000	2.375	0.240	0.340	0.305	0.375	2.000
2 1/2	4.500	2.625	0.240	0.340	0.313	0.375	2.188
2 3/4	5.000	2.875	0.240	0.340	0.313	0.375	2.406
3	5.500	3.125	0.240	0.340	0.313	0.375	2.625
3 1/4	6.000	3.375	0.240	0.340	0.313	0.375	2.875
3 1/2	6.500	3.625	0.240	0.340	0.313	0.375	3.063
3 3/4	7.000	3.875	0.240	0.340	0.313	0.375	3.313
4	7.500	4.125	0.240	0.340	0.313	0.375	3.500

Fuente: Tabla 2, ASTM-F436, 2003

**Tabla N°1.5.- Dimensiones geométricas de arandelas biseladas, calidad ASTM-F436**



Medida Perno, in.	Arandela: Biselada Cuadrada y Biselada Cuadrada - Recortada				Reducción
	Dimensión Lateral Mínima (A), in.	Diámetro Nominal Interior (ID), in.	Espesor Medio (T), in.	Pendiente, in	Distancia Nominal al Borde, (E),in.
1/2	1 3/4	17/32	5/16	1:6	7/16
5/8	1 3/4	11/16	5/16	1:6	9/16
3/4	1 3/4	13/16	5/16	1:6	21/32
7/8	1 3/4	15/16	5/16	1:6	25/32
1	1 3/4	1 1/8	5/16	1:6	7/8
1 1/8	2 1/4	1 1/4	5/16	1:6	1
1 1/4	2 1/4	1 3/8	5/16	1:6	1 3/32
1 3/8	2 1/4	1 1/2	5/16	1:6	1 7/32
1 1/2	2 1/4	1 5/8	5/16	1:6	1 5/16

[A] Las arandelas biseladas rectangulares se ajustaran a las dimensiones que se muestra en la parte superior. Se permite que tengan un lado mayor que la dimensión "A", mostrada.

Fuente: Tabla 2, ASTM-F436, 2000

### 1.3.3 Simbologías representadas en las arandelas utilizadas en los pernos estructurales de alta resistencia

La Especificación, ASTM, establece ciertas simbologías que deben estar grabadas en una cara de las arandelas con el objetivo de que puedan ser identificados con facilidad. Las simbologías requeridas son:

- \* Todas las arandelas deben estar identificados con la marca del fabricante. (Ver Figura N°1.13)
- \* Las arandelas Tipo 1, prescinden de identificador.
- \* Las arandelas Tipo 3, deben estar identificadas en una cara con el número 3.





**Figura N°1.13.- Ejemplo - Simbología de una arandela de calidad F436**

Fuente: Elaboración Propia

Es importante indicar que la Especificación, ASTM-F436, permite el galvanizado de las arandelas, por inmersión en caliente (ASTM-F2329) o mecánico (ASTM-B695). También permite el recubrimiento de protección según la Especificación ASTM-F1136 (Especificación estándar para zinc/aluminio, capa de protección contra la corrosión para sujetadores).

## 1.4 TIPOS DE TUERCAS Y ARANDELAS COMPATIBLES CON LOS TIPOS DE PERNOS ESTRUCTURALES DE ALTA RESISTENCIA

La siguiente tabla (Ver Tabla N°1.6), muestra los respectivos grados y tipos de: tuercas calidad ASTM-A563 y arandelas calidad ASTM-F436; que son compatibles con los respectivos tipos de pernos estructurales de alta resistencia.

**Tabla N°1.6.- Grados y tipos de: tuercas y arandelas, requeridos para los pernos estructurales de alta resistencia**

Diseño ASTM	Tipo de Perno	Acabado del Perno <sup>d</sup>	Grado y Acabado de las Tuercas ASTM A563 <sup>d</sup>	Tipo y Acabado de las ASTM F436 <sup>a,d</sup>
A325	1	Simple (no recubierto)	C, C3, D, DH <sup>c</sup> and DH3; simples	1; simple
		Galvanizado	DH <sup>c</sup> ; galvanizado y lubricado	1; galvanizado
		Zn/Al Inorgánico, por ASTM F1136 Grado 3	DH <sup>c</sup> ; Zn/Al Inorgánico, por ASTM F1136 Grado 5	1; Zn/Al Inorgánico, por ASTM F1136 Grado 3
	3	Simple	C3 y DH3; simple	3; simple
F1852	1	Simple (no recubierto)	C, C3, DH <sup>c</sup> y DH3; simple	1; simple <sup>b</sup>
		Gavanizado Mecánico	DH <sup>c</sup> ; galvanizado mecánico y lubricado	1; galvanizado mecánico <sup>b</sup>
		Zn/Al Inorgánico, por ASTM F1136 Grado 3	DH <sup>c</sup> ; Zn/Al Inorgánico, por ASTM F1136 Grado 5	1; Zn/Al Inorgánico, por ASTM F1136 Grado 3 <sup>b</sup>
	3	Simple	C3 y DH3; simple	3; simple <sup>b</sup>
A490	1	Simple	DH <sup>c</sup> y DH3; simple	1; simple
		Zn/Al Inorgánico, por ASTM F1136 Grado 3	DH <sup>c</sup> ; Zn/Al Inorgánico, por ASTM F1136 Grado 5	1; Zn/Al Inorgánico, por ASTM F1136 Grado 3
	3	Simple	DH3; simple	3; simple
F2280	1	Simple	DH <sup>c</sup> y DH3; simple	1; simple <sup>b</sup>
	3	Simple	DH3; simple	1; simple <sup>b</sup>

[a] Aplicar solamente si la Sección 6 requiere arandela.

[b] Requerido en todos los casos bajo la tuerca por Sección 6.

[c] Está permitido reemplazar con tuercas ASTM A194 de grado 2H las tuercas ASTM A563 de grado DH.

[d] Tal como se utiliza en esta tabla, el término "Galvanizado" se refiere al galvanizado por inmersión en caliente de acuerdo a la Especificación ASTM F2329 o galvanizado mecánico de acuerdo con la Especificación ASTM B695.

[e] "Zn/Al Inorgánico" es usado en esta tabla para referirse a la aplicación de Zn/Al Recubrimiento de protección contra la corrosión de acuerdo con la Especificación ASTM F1136.

Fuente: Tabla 2.1, RCSC 2009

## 1.5- PARÁMETROS IMPORTANTES EN CONEXIONES EMPERNADAS

### 1.5.1- Determinación de la longitud del perno en una conexión

La longitud de un perno es establecida de la siguiente manera; es igual a la suma del grip (agarre ó placas a unir), más los espesores de las arandelas, más el valor que se especifica en la Tabla N°1.7. Adicionalmente a lo anterior, se redondea al siguiente valor de  $\frac{1}{4}$ " , para longitudes de grip menores a 6", de lo contrario se incrementa  $\frac{1}{2}$ " para pernos con grip mayor a 6". RCSC 2009.

Tabla N°1.7.- Longitud que se adiciona al Grip, según el diámetro del perno

Diámetro Nominal del Perno, $d_b$ , in.	Para Determinar la Longitud Requerida, Añadir al Grip, in.
1/2	11/16
5/8	7/8
3/4	1
7/8	1 1/8
1	1 1/4
1 1/8	1 1/2
1 1/4	1 5/8
1 3/8	1 3/4
1 1/2	1 7/8

Fuente: Tabla C-2.2, RCSC 2009

### 1.5.2 Tipos de agujeros para alojar a los pernos estructurales de alta resistencia

La especificación RCSC, proporciona ciertas holguras para las perforaciones de las conexiones donde de alojaran los pernos estructurales de alta resistencia; esto, con el objetivo de dar un cierto juego en el agujero que compensen las faltas de alineación de la ubicación del agujero durante el ensamble, y de esta manera proporcionar cierta facilidad en la instalación de los pernos.

Se tiene tres tipos de perforaciones que se pueden utilizar para instalar los pernos estructurales de alta resistencia, estos son; agujeros estándar, agujeros sobredimensionados, agujeros de ranura corta y agujeros de ranura larga.



### **A) Agujeros estándar (STD)**

Son aquellos en los que se aumenta  $\frac{1}{16}$ " el diámetro nominal del perno, con el objetivo de brindar cierta holgura durante el ensamble de las estructuras. Cuando no exista la autorización por parte del Proyectista para utilizar otros tipos de agujeros (sobredimensionados o ranura), entonces, se deben utilizar en todas las conexiones de pernos estructurales de alta resistencia sólo el agujero estándar. (Ver Figura N°1.14 y Tabla N°1.8)

### **B) Agujeros sobredimensionados (OVS)**

Estos agujeros proporcionan una mayor holgura, ya que se aumenta  $\frac{3}{16}$ " el diámetro nominal del perno a instalar. Se permiten los agujeros sobredimensionados en cualquiera o todas las piezas de conexiones de deslizamiento crítico, sin embargo, estas no deben ser utilizadas en conexiones de tipo aplastamiento, ya que en este caso es más factible que suceda la falla por desgarro u ovalamiento del elemento conectado. (Ver Figura N°1.14 y Tabla N°1.8)

### **C) Agujero de ranura corta (SSL)**

Estos tipos de agujero son los que proporcionan un ajuste en una sola dirección. Se aceptan los agujeros de ranura corta en cualquiera o todas las piezas de conexiones de deslizamiento crítico o tipo aplastamiento. Se permiten las ranuras sin consideración de la dirección de la carga en conexiones de deslizamiento crítico; pero en conexiones tipo aplastamiento la longitud de la ranura debe ser perpendicular a la dirección de la carga; esto, porque si la carga es paralela a la ranura, es más factible que suceda la falla por desgarro u ovalamiento del elemento conectado. (Ver Figura N°1.14 y Tabla N°1.8)

### **D) Agujero de ranura larga (LSL)**

Estos tipos de agujeros también proporcionan un ajuste en una sola dirección. Se aceptan los agujeros de ranura larga solamente en una de las partes conectadas tanto de conexión de deslizamiento crítico o de tipo aplastamiento. Se permiten las ranuras largas sin consideración de la dirección de la carga en

conexiones de deslizamiento crítico, pero en conexiones tipo aplastamiento la longitud de la ranura debe ser perpendicular a la dirección de la carga; esto, porque si la carga es paralela a la ranura, es más factible que suceda la falla por desgarro u ovalamiento del elemento conectado. (Ver Figura N°1.14 y Tabla N°1.8)

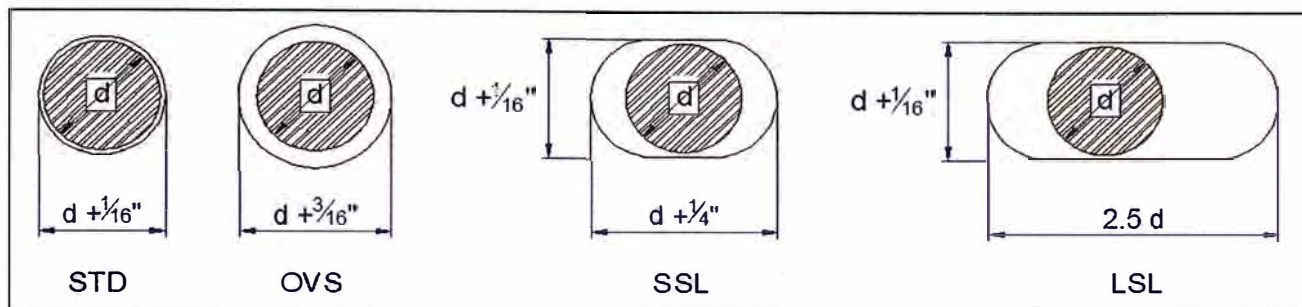


Figura N°1.14.- Tipos de agujeros para pernos estructurales de alta resistencia

Fuente: Elaboración propia

Tabla N°1.8.- Dimensiones nominales de agujeros, in.

Diámetro del Perno, in	Dimensiones de Agujero			
	Estándar (Dia.)	Sobredimensionado (Dia.)	Ranura Corta (Ancho x Largo)	Ranura Larga (Ancho x Largo)
1/2	9/16	5/8	9/16 x 11/16	9/16 x 1 1/4
5/8	11/16	13/16	11/16 x 7/8	11/16 x 1 9/16
3/4	13/16	15/16	13/16 x 1	13/16 x 1 7/8
7/8	15/16	1 1/16	15/16 x 1 1/8	15/16 x 2 3/16
1	1 1/16	1 1/4	1 1/16 x 1 5/16	1 1/16 x 2 1/2
$\geq 1 \frac{1}{8}$	$d + \frac{1}{16}$	$d + \frac{5}{16}$	$(d + \frac{1}{16}) \times (d + \frac{3}{8})$	$(d + \frac{1}{16}) \times (2.5 \times d)$

Fuente: Tabla J3.3, ANSI/AISC 360-10

Los agujeros por lo común se realizan por medio de procesos en frío como son el taladrado y troquelado; por lo general no se procede a realizar agujeros por medio térmico (oxicorte), ya que puede originar problemas de fragilización, fisuración y aparición de esfuerzos residuales en las planchas a perforar; todo ello puede ocurrir debido al enfriamiento rápido y/o desigual.

### **1.5.3 Distancias mínimas y máximas relacionadas a los pernos estructurales de alta resistencia dentro de una conexión**

El espaciamiento o distancias que se debe respetar en la instalación de los pernos estructurales de alta resistencia, ya sea entre los mismos pernos o entre pernos y los bordes de extremo de plancha de conexión, dependen de varios factores como son por ejemplo, la magnitud de las fuerzas a transferir, forma que disponen las partes a unir, el área de unión disponible para alojar a los pernos, los espacios libres requeridos para que ingresen las llaves para apretar las tuercas o cabezas de los pernos, etc.

Los espaciamientos relacionados a los pernos estructurales de alta resistencia son:

#### **A) Espaciamiento mínimo entre pernos**

El espaciamiento mínimo entre los pernos, es decir, la distancia entre los centros de dos agujeros contiguos en cualquier dirección deben ser mayor o igual a los  $\frac{2}{3}$  del diámetro nominal del perno, sin embargo, se prefiere una distancia que no se menor a 3 veces el diámetro nominal del perno. Sección J3.3 ANSI/AISC 360-10.

#### **B) Distancia mínima al borde del elemento conectado**

La distancia desde el centro de un agujero estándar hasta el borde de una parte conectada en cualquier dirección no debe ser menor que el valor aplicable de la Tabla N° 1.9, que se muestra a continuación. Sección J3.4 ANSI/AISC 360-10.

Por otro lado, la distancia desde el centro de un agujero sobredimensionado o ranurado hasta el borde de una parte conectada no debe ser menor que el requerido por un agujero estándar hasta el borde de una de las partes conectadas más el incremento aplicable  $C_2$  de la Tabla N°1.10, que se muestra a continuación.

Lo anterior hace referencia al daño que se puede originar en el material cuando se perfora muy cerca al borde o extremo de esta; también contempla la falla del borde por aplastamiento del elemento (placa) conectada.

**Tabla N°1.9.- Distancia Mínima al Borde <sup>a</sup>, in, desde el Centro del Agujero Estándar <sup>b</sup> hasta el Borde de la Parte Conectada**

Diámetro Perno (in)	Distancia Mínima al Borde (in)
1/2	3/4
5/8	7/8
3/4	1
7/8	1 1/8
1	1 1/4
1 1/8	1 1/2
1 1/4	1 5/8
Sobre 1 1/4	1 1/4 x d

[a] De ser necesario, se permite utilizar distancias de borde menores provisto que satisfacen las disposiciones de la Sección J3-10 y de la Sección J4, sin embargo distancias al borde menores que un diámetro del perno no son permitidas sin aprobación del ingeniero a cargo.  
[b] Para agujeros sobredimensionados y ranurados, ver Tabla J3.5

Fuente: Tabla J3.4., ANSI/AISC 360-10

**Tabla N°1.10.- Valores de incremento de distancia al borde, C<sub>2</sub>, in.**

Diámetro Nominal del Perno (in)	Agujero Sobredimensionado	Agujeros Ranurados		
		Eje Largo Perpendicular al Borde		Eje Largo Paralelo al Borde
		Ranura Corta	Ranura Larga <sup>a</sup>	
≤ 7/8	1/16	1/8	3/4 d	0
1	1/8	1/8		
≥ 1 1/8	1/8	3/16		

[a] Cuando la longitud de la ranura es menor que el máximo admisible (Tabla J3.3), se permite que C<sub>2</sub> sea reducido por la mitad de la diferencia entre las longitudes de ranura máxima y actual.

Fuente: Tabla J3.5., ANSI/AISC 360-10

### C) Distancia máxima al borde del elemento conectado

La distancia máxima desde el centro de cualquier agujero del perno hasta el borde más cercano de partes conectadas debe ser doce veces el espesor de la parte conectada bajo consideración, pero no debe exceder de 6". Sección J3.5 ANSI/AISC 360-10.

Lo anterior hace referencia al problema que se ocasiona al colocar los pernos muy alejados del borde de la pieza, ya que al estar muy separados, las piezas no quedan exactamente en contacto firme, dejando intersticios por donde pueda penetrar la humedad, originando la corrosión del acero.

### **D) Espaciamiento máximo entre pernos**

Para miembros compuestos entre un perfil y una plancha o entre dos planchas, el espaciamiento longitudinal entre pernos no debe exceder de:

- \* Veinticuatro veces el espesor de la plancha más delgada o 12" para miembros pintados o sin pintar no sometidos a corrosión.
- \* Catorce veces el espesor de la plancha más delgada o 7" para miembros sin pintar de acero de alta resistencia a la corrosión atmosférica.

(Sección J3.5 ANSI/AISC 360-10)

## CAPÍTULO II: SOLICITACIONES EN CONEXIONES EMPERNADAS

### 2.1 INTRODUCCIÓN

Existen diversas solicitaciones a las que el perno se encuentra sometido: tensión ( $T$ ), cortante ( $V$ ), momento flector ( $M$ ) y torsión ( $M_t$ ), las cuales se descomponen en seis componentes orientadas respectivamente en los ejes  $X$ ,  $Y$  y  $Z$ ; tal como se muestra en la Figura N°2.1.

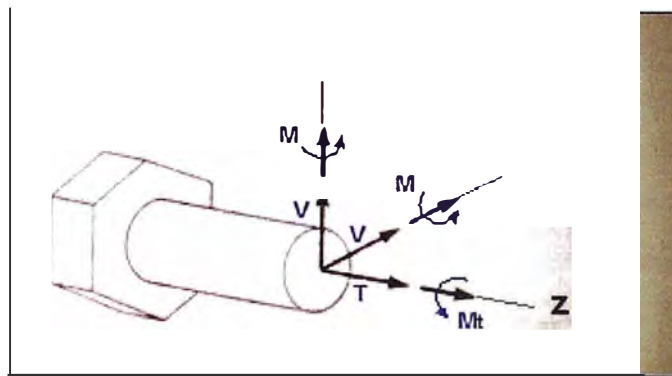


Figura N°2.1.- Componentes de solicitaciones en un perno

Fuente: Elaboración propia

Debido a que las conexiones emperradas que se utilizan en las estructuras de acero, en las que todas las placas unidas están en contacto una con otra y la relación longitud a diámetro del perno es pequeña, los momentos de torsión y flexión resultantes en las secciones transversales de los pernos son insignificantes y no se consideran en el diseño. Vinnakota 2006.

En referencia a lo anterior es posible prescindir de los momentos resultantes de cada eje, y resumir las solicitaciones sobre las secciones transversales de los pernos, en una fuerza normal en dirección a su eje (eje  $Z$ ) y una sola fuerza cortante como resultante de las dos fuerzas cortantes actuantes en los ejes  $X$  e  $Y$  respectivamente, tal como se muestra en la Figura N°2.2.



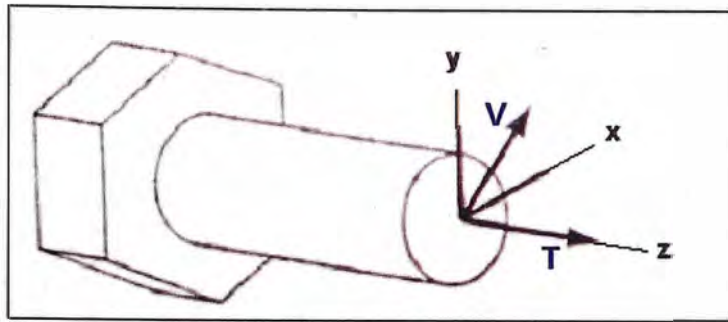


Figura N°2.2.- Componentes de fuerzas en un perno

Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, según las fuerzas resultantes que actúan en una conexión debido a las cargas externas, un perno puede estar sujeto a las sollicitaciones de sólo de tensión, sólo cortante o una combinación de tensión y cortante.

Cabe mencionar que la primera sollicitación a la que es sometido el perno antes de las fuerzas externas propiamente dichas, es una fuerza de tensión, la cual es inducida producto de la instalación (apriete). Esta tensión puede ser:

- a) Por lo general insignificante, cuando se instala un perno con la condición de apriete ajustado (sin holgura), la cual se define como la condición más ajustada que se logra con unos pocos golpes de una llave de impacto o mediante el máximo esfuerzo de un trabajador utilizando una llave común para poner las piezas en contacto firme (RCSC 2009); o
- b) Considerable, cuando se instalan los pernos más allá de la condición de apriete ajustado. A esta tensión se le llama pretensión o precarga. La pretensión o precarga es requerimiento en las conexiones pretensadas y conexiones de deslizamiento crítico.

## 2.2 PRETENSIÓN O PRECARGA DE UN PERNO

Cuando se instala un perno (se aprieta), ya sea girando la tuerca o cabeza del mismo, se introduce una tensión inicial en el perno que a la vez crea la fuerza de sujeción (compresión) en la conexión, la cual es responsable de mantener a los miembros estructurales unidos. Esta fuerza de tensión inicial introducida en el perno es la precarga o pretensión.

Para la instalación, la precarga mínima requerida para los pernos estructurales de alta resistencia es igual al 70% de la resistencia última a la tracción del perno. Sección J3.1 ANSI/AISC 360-10.

**Tabla N°2.1.- Pretensión o precarga mínima de pernos, en conexiones pretensadas y de tipo deslizamiento crítico**

Diámetro Nominal del Perno, $d_b$ , in.	Pretensión Mínima de Pernos, $T_m$ , Kips <sup>a</sup> .	
	ASTM A325 y ASTM F1852	ASTM A490 y ASTM F2280
1/2	12	15
5/8	19	24
3/4	28	35
7/8	39	49
1	51	64
1 1/8	56	80
1 1/4	71	102
1 3/8	85	121
1 1/2	103	148

[a] Igual al 70% de la resistencia última de los pernos, redondeada al valor entero más cercano, tal como lo indican las Especificaciones ASTM para pernos A325 y A490 con hilo UNC.

Fuente: Tabla 8.1, RCSC 2009

Existen tres etapas generales que distinguen el comportamiento de un perno pretensado. Estas son:

- \* Etapa 1: Como consecuencia de la fuerza normal de apriete en la conexión, se genera una resistencia a la fricción o al deslizamiento en la superficie de contacto entre las piezas ante cualquier movimiento entre ellas. Por lo tanto, cuando se aplica una carga externa (Ver Figura N°2.3), la transferencia de carga entre las piezas ocurre por medio de la fricción en sus superficies de contacto.

En esta etapa, la fuerza cortante entre las superficies de contacto no supera la resistencia al deslizamiento, por ende, el vástago del perno no entra en contacto con los bordes de los agujeros de la paca; en consecuencia, el perno aún no se



encuentra solicitado a cortante bajo la acción de la carga externa.

Cabe señalar que la resistencia al deslizamiento es una función de la precarga del perno, coeficiente de rozamiento estático entre las superficies de contacto, y también del número de superficies deslizantes. (Ver Figura N°2.4)

- \* Etapa 2 : En esta etapa la carga externa iguala y supera la resistencia al deslizamiento de la conexión, iniciándose el movimiento de las piezas y posteriormente el contacto de los pernos con los bordes de los agujeros de las placas; reflejándose en aplastamiento de la placa y corte en los pernos.
- \* Etapa 3 : En esta etapa la carga se transmite por aplastamiento de la placa y cortante en los pernos.

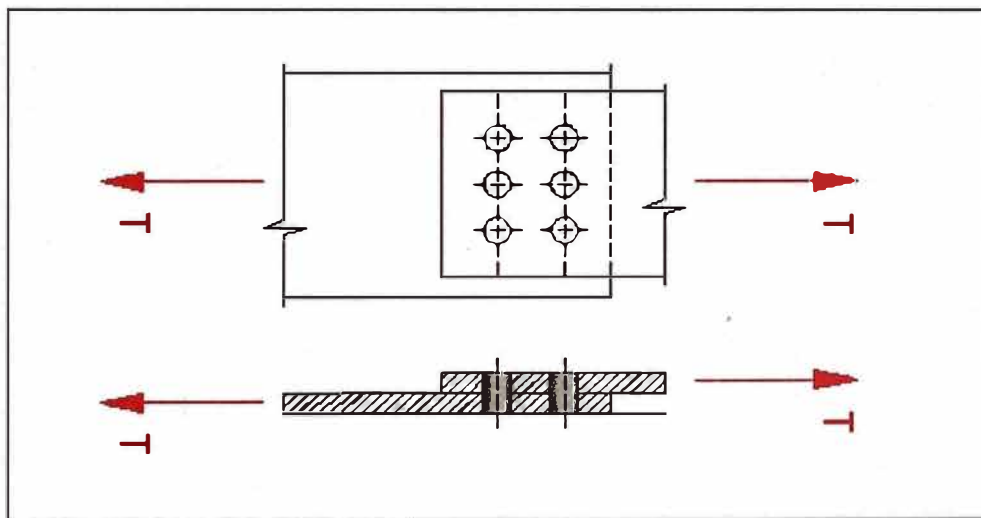


Figura N°2.3.- Carga externa aplicada a la conexión

Fuente: Elaboración propia

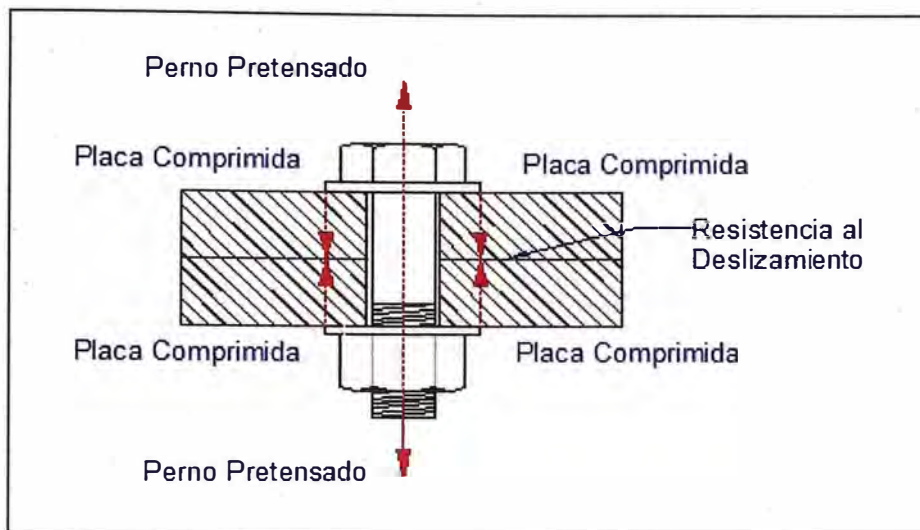


Figura N°2.4.- Resistencia al deslizamiento debido a la pretensión

Fuente: Elaboración propia

Con respecto a lo mencionado anteriormente, se pueden proyectar conexiones de dos tipos: Conexiones tipo aplastamiento, en las cuales sí se permite el deslizamiento entre placas y conexiones de deslizamiento crítico en las cuales se prohíbe el deslizamiento o movimiento entre placas.

## 2.3 RESISTENCIA DE UN PERNO

### 2.3.1 Resistencia a la tracción

Cuando un perno es solicitado a tracción, la sección transversal crítica del perno es la sección en la raíz de la rosca del vástago del perno (Ver Figura N°1.2). Es por ello que la resistencia a la tracción está relacionada con dicha sección.

La resistencia a la tracción de los pernos con condición de apriete ajustado o pretensionado según la Especificación ANSI/AISC 360 -10, Sección J3.6, es:

$$R_n = F_{nt} A_b$$

$$\phi = 0.75 \text{ (LRFD)}$$

$$\Omega = 2.00 \text{ (ASD)}$$

Donde:

- $F_u$  = Resistencia nominal a la tracción, según Tabla N°2.2, Ksi.  
Sección J3.1, ANSI/AISC 360-10.
- $A_b$  = Área total del perno, in<sup>2</sup>.

Cabe señalar que la Especificación ANSI/AISC 360-10 en su formulación utiliza directamente al área total del perno, esto, porque ya implícitamente la reducción del área total del perno está reflejado en la tensión de tracción nominal, al multiplicar por un factor de 0.75 el esfuerzo de tensión ultimo especificado para el perno.

### 2.3.2 Resistencia al corte

La resistencia al corte de un perno es directamente proporcional al área disponible del perno en el plano de cortante; es por ello, que la mayor resistencia al corte se obtiene cuando la sección transversal total del perno se encuentra en el plano de cortante y no cuando la sección transversal de la parte roscada se encuentra en el plano de cortante; esto, porque se dispone de menor área transversal en la raíz de la rosca (Ver Figura N°1.2).

La Especificación AISC, identifica a los pernos que tienen las roscas que se incluyen en el plano de corte con "N", y a los que tienen roscas que se excluyen del plano de corte con "X"; tal como se muestra en la Figura N°2.5.

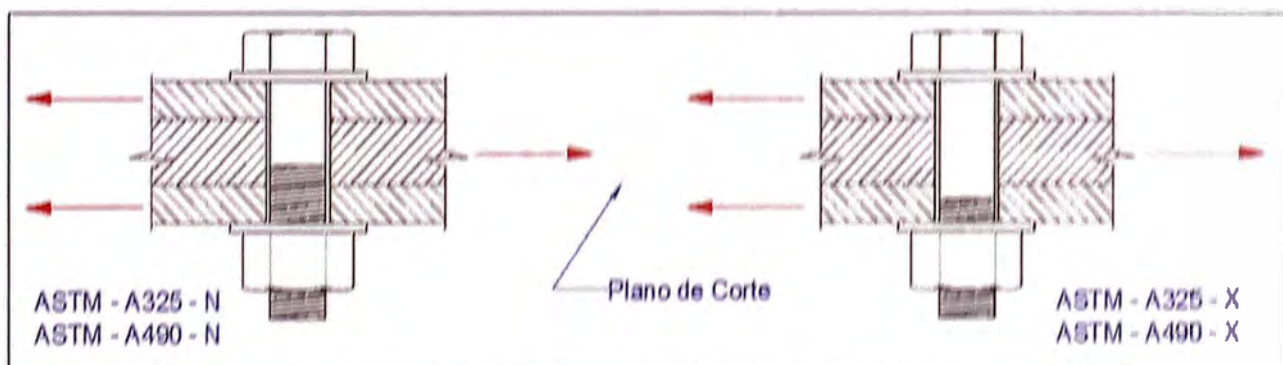


Figura N°2.5.- Clasificación de un perno con respecto al plano de corte

Fuente: Vinnakota 2006

La resistencia al corte de un perno con condición de apriete ajustado o pretensionado según la Especificación ANSI/AISC 360 -10, Sección J3.6, es:

$$R_n = F_{nv} A_b$$

$$\phi = 0.75 \text{ (LRFD)}$$

$$\Omega = 2.00 \text{ (ASD)}$$

Donde:

$$F_{nv} = \text{Resistencia nominal al corte, según Tabla N°2.2, Ksi. Sección J3.1, ANSI/AISC 360-10.}$$

$$A_b = \text{Área total del perno, in}^2.$$

**Tabla N°2.2.- Resistencia nominal de los pernos, Ksi (MPa)**

Descripción del Conector	Resistencia de Tracción Nominal, $F_{nt}$ , Ksi (MPa) <sup>a</sup>	Resistencia de Corte Nominal, $F_{nv}$ , Ksi (MPa) <sup>b</sup>
Pernos A307	45 (310) <sup>c</sup>	27 (188) <sup>c,d</sup>
Grupo A (ej. Pernos A325), cuando la rosca no esta excluida del plano de corte.	90 (620)	54 (372)
Grupo A (ej. Pernos A325), cuando la rosca esta excluida del plano de corte.	90 (620)	68 (457)
Grupo B (ej. Pernos A490), cuando la rosca no esta excluida del plano de corte.	113 (780)	68 (457)
Grupo B (ej. Pernos A490), cuando la rosca esta excluida del plano de corte.	113 (780)	84 (579)
Partes roscadas que cumplen los requisitos de la Sección A3.4, cuando la rosca no está excluida en el plano de corte	0.75 $F_u$	0.450 $F_u$
Partes roscadas que cumplen los requisitos de la Sección A3.4, cuando la rosca esta excluida del plano de corte.	0.75 $F_u$	0.563 $F_u$

[a] Para pernos de alta resistencia sujetos a fatiga por cargas de tracción, ver Anexo 3 (ANSI/AISC 360-10).  
 [b] Para conexiones en los extremos con un patrón de conectores con una longitud mayor a 38 in. (965 mm),  $F_m$  debe ser reducido a un 83.3% de los valores tabulados. La longitud del patrón de conectores es la máxima distancia paralela a la línea de fuerzas entre la línea central de los tornillos que conectan dos partes con una superficie de apriete.  
 [c] Para pernos A307 los valores tabulados deben ser reducidos por 1% para cada 2 mm sobre 5 diámetros de longitud en el agarre.  
 [d] Rosca permitida en los planos de corte.

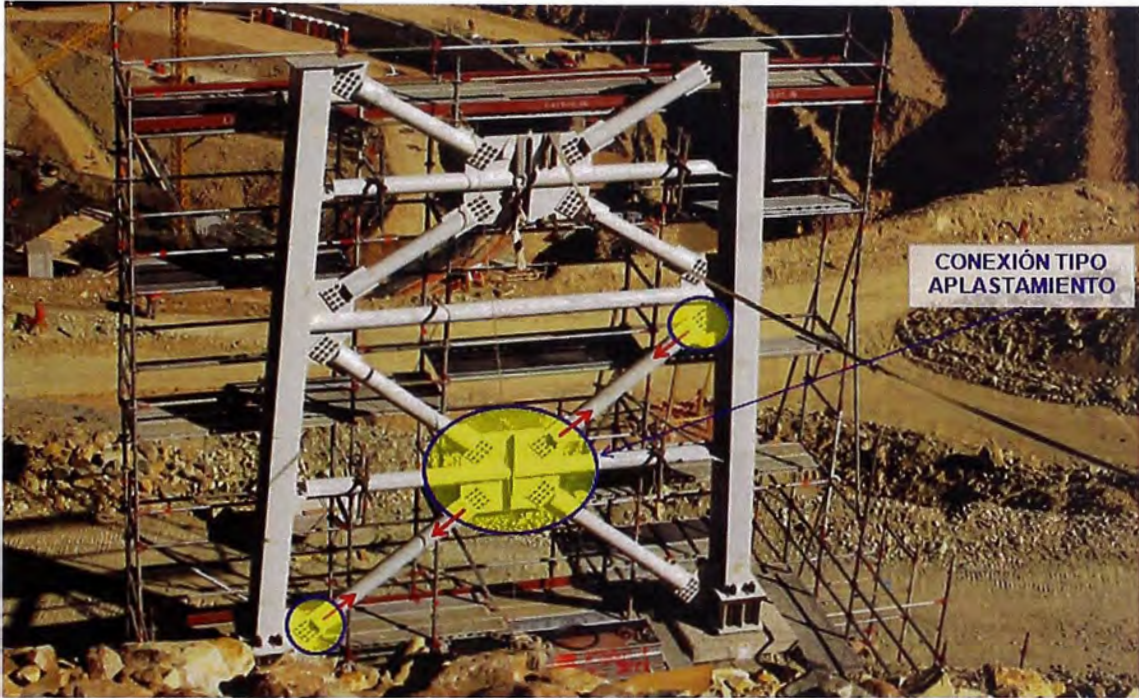
Fuente: Tabla J3.2, ANSI/AISC 360-10



## 2.4 CONEXIONES

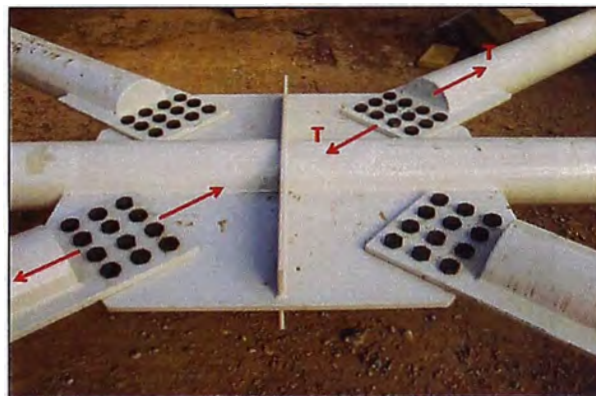
### 2.4.1 Conexiones de tipo aplastamiento

Son conexiones en las cuales el deslizamiento en las superficies de contacto es permitido y por lo tanto las solicitaciones de corte en los pernos y aplastamiento de la placa suceden (Ver Figura N°2.6 y 2.7).



**Figura N°2.6.- Conexión tipo aplastamiento**

Fuente: GyM S.A. (Estructura de apoyo para la galería de la correa transportadora)  
Minera Caserones - Chile



**Figura N°2.7.- Detalle - Conexión tipo aplastamiento**

Fuente: GyM S.A. (Estructura de apoyo para la galería de la correa transportadora)  
Minera Caserones - Chile

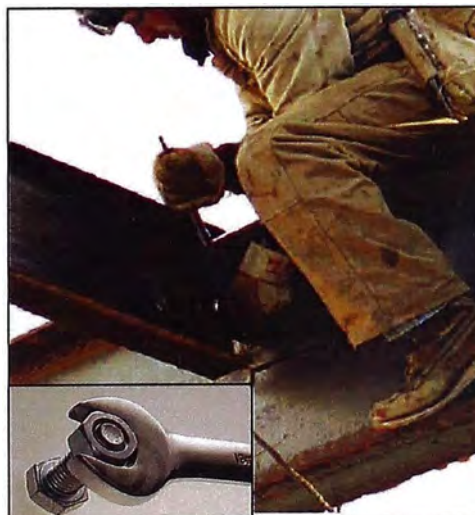
Las conexiones de tipo aplastamiento pueden ser, una conexión con condición de apriete ajustado (sin holgura) o una conexión pretensada:

- La condición de apriete ajustado (sin holgura) se define como la condición más ajustada que se logra con unos pocos golpes de una llave de impacto o mediante el máximo esfuerzo de un trabajador utilizando una llave común para poner las piezas en contacto firme, RCSC 2009. (Ver Figura N°2.8 y 2.9). Esta condición de apriete se debe utilizar cuando no se tengan los casos de requerimientos de una conexión pretensada o de tipo deslizamiento crítico.



**Figura N°2.8.- Conexión con apriete ajustado – Usando llave de impacto**

Fuente: BMA Engineering Inc.



**Figura N°2.9.- Conexión con apriete ajustado – Usando llave común**

Fuente: BMA Engineering Inc.



- En el caso de una conexión pretensada, el ajuste va mucho más allá de la condición de apriete ajustado (Ver Figura N°2.6 y 2.7). La pretensión mínima especificada es la indicada en la Tabla N°2.1.

Las conexiones pretensadas se deben utilizar en los siguientes casos:

- \* Conexiones que estén sometidas a fatiga, pero sin inversión del sentido de las cargas.
- \* Conexiones que estén sometidas a importantes inversiones de cargas, pero sin efecto de fatiga.
- \* Conexiones que estén sometidas a fatiga en tracción.

En las conexiones de tipo aplastamiento no se considera resistencia a la fricción entre las superficies de contacto, y para propósitos de diseño se asume que ocurre el deslizamiento en cuanto a la aplicación de cargas externas.

A continuación se describe la resistencia de la placa o plancha al aplastamiento y también, la resistencia al corte y tracción simultánea de un perno en conexión tipo aplastamiento.

### **A) Resistencia de la placa o plancha al aplastamiento**

El tipo de falla que puede generarse por el aplastamiento de la placa depende de la distancia libre que existe entre el borde del agujero y el extremo de la placa en dirección a la carga, o también de la distancia libre que existe entre los bordes de dos agujeros contiguos en la dirección de la carga.

Para el caso de distancias demasiado grandes, y bajo la acción de la carga, el material circundante al agujero del perno se apilaría (Ver Figura N°2.10) y ello conllevaría a un ovalamiento del agujero, provocando el movimiento relativo entre placas.

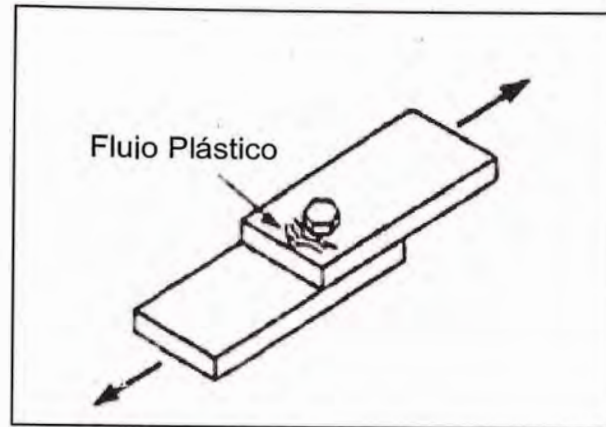


Figura N°2.10.- Falla por ovalamiento del agujero

Fuente: Vinnakota 2006

Por el contrario, en el caso de tener distancias demasiado pequeñas, es decir, si el agujero se localiza muy cerca del borde de la placa o del elemento conectado puede generarse la falla por desgarramiento de la placa. (Ver Figura N°2.11)

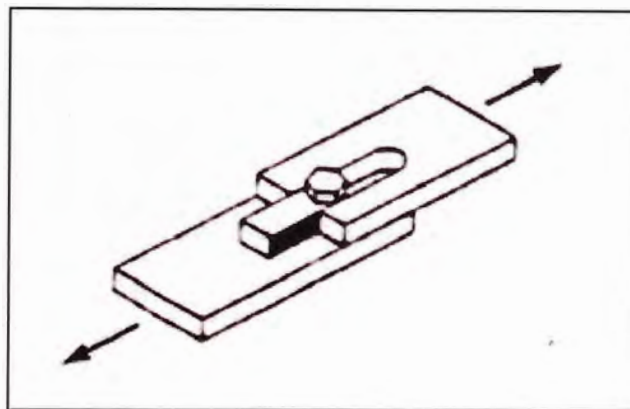


Figura N°2.11.- Falla por desgarramiento de la placa

Fuente: Vinnakota 2006

La resistencia al aplastamiento de los agujeros de los pernos, según la Especificación ANSI/AISC 360 -10, Sección J3.10, es:

$$z = 0,75 \text{ (LRFD)}$$

$$\Omega = 2,00 \text{ (ASD)}$$

a) Para un perno en una conexión con agujeros estándar, agujeros sobredimensionados y de ranura corta, independiente de la dirección de

la carga, o en agujeros de ranura larga con la ranura paralela a la dirección de la carga de aplastamiento, se tiene:

\* En caso que la que deformación alrededor de los agujeros es una consideración en el diseño, entonces:

$$R_n = 1.2 l_c t F_u \leq 2.4 d t F_u$$

\* En caso que la que deformación alrededor de los agujeros no es una consideración en el diseño, entonces:

$$R_n = 1.5 l_c t F_u \leq 3.0 d t F_u$$

b) Para un perno en una conexión con agujeros de ranura larga con la ranura perpendicular a la dirección de la carga.

$$R_n = 1.0 l_c t F_u \leq 2.0 d t F_u$$

Donde:

$F_u$  = Resistencia última mínima especificada del material conectado, Ksi.

$d$  = Diámetro nominal del perno, in<sup>2</sup>.

$l_c$  = Distancia libre, en la dirección de la carga, entre el borde del agujero y el borde del agujero adyacente o borde del material, in.

$t$  = Espesor del material conectado, in.

En realidad el primer término de la desigualdad es la resistencia al desgarramiento de la placa y el segundo término es la resistencia al ovalamiento de la placa, Vinnakota 2006. El planteamiento de la especificación es que predomina el menor valor de ambas resistencias.

Cabe mencionar que la resistencia efectiva de un perno individual debe ser tomada como el menor de la resistencia al corte del perno (Parte 2.3.2) o por la resistencia al aplastamiento del agujero del perno. La resistencia del grupo de pernos es la suma de las resistencias efectivas de los pernos individuales. ANSI/AISC 360-10.

### B) Resistencia al corte y tracción simultánea

Es muy probable que la resistencia de un perno se vea afectada por la solicitación de corte y tracción simultánea, por esto, es que en el diseño se debe considerar esta posible reducción de la resistencia del perno.

Este tipo de solicitación simultánea es común en las conexiones de los miembros de las estructuras que trabajan como arriostres diagonales o como sistema de contraventeo (Ver Figura N°2.12 y 2.13).

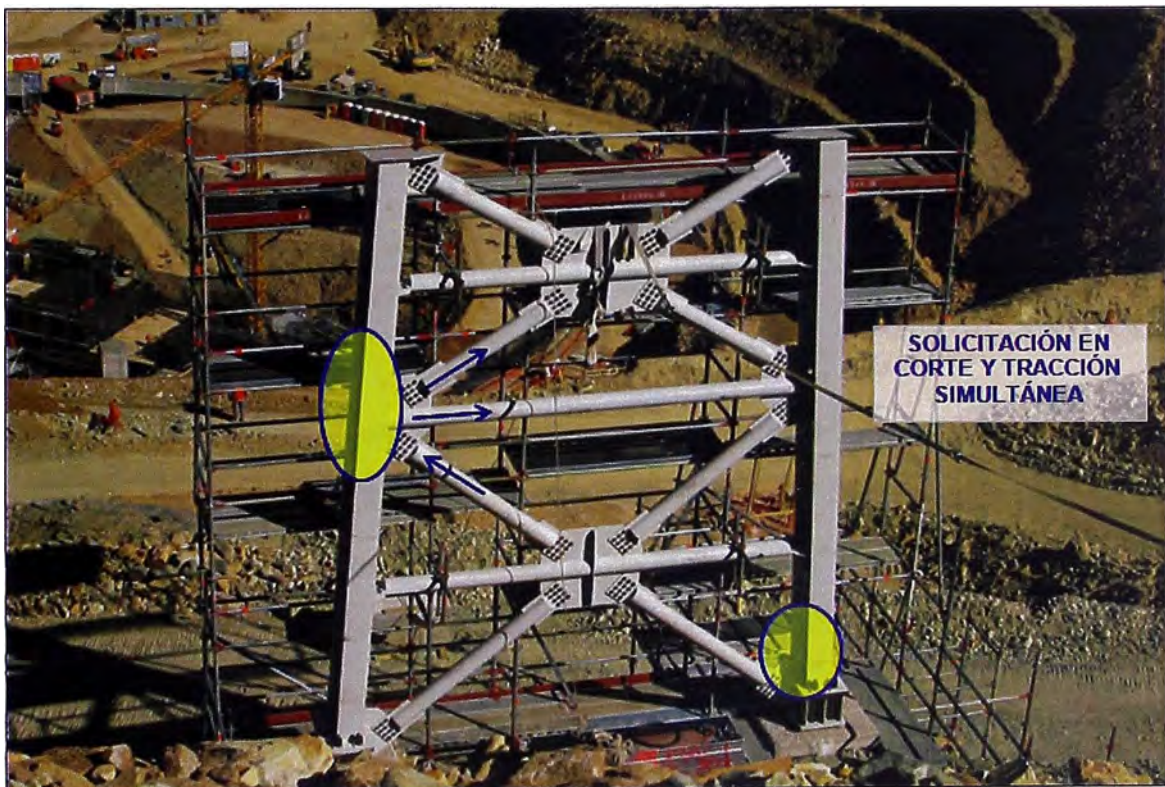
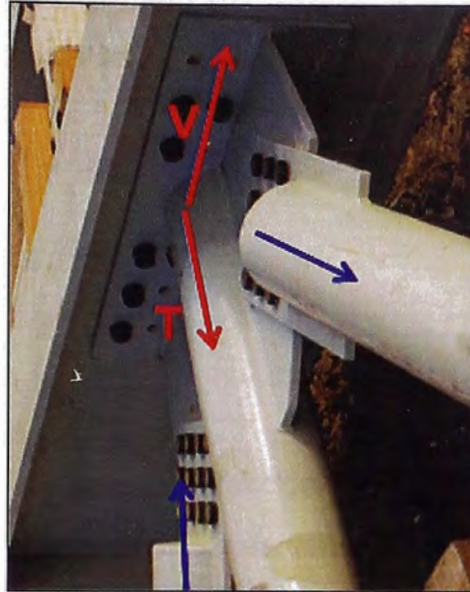


Figura N°2.12.- Solicitación a corte y tracción simultánea

Fuente: GyM S.A. (Estructura de apoyo para la galería de la correa transportadora)

Minera Caserones - Chile





**Figura N°2.13.- Detalle de conexión (Solicitación de corte y tracción simultánea)**

Fuente: GyM S.A. (Estructura de apoyo para galería de correa transportadora)  
Minera Caserones - Chile

La resistencia de un perno en solicitación simultánea, en conexiones tipo aplastamiento se evalúa mediante la siguiente relación elíptica de interacción. Sección 5.2, RCSC 2009.

$$\left[ \frac{T_u}{(\phi R_n)_t} \right]^2 + \left[ \frac{V_u}{(\phi R_n)_v} \right]^2 \leq 1$$

Donde:

- $T_u$  = Resistencia requerida a la tracción  
(carga de tracción factorizada) por perno, Kips.
- $V_u$  = Resistencia requerida al corte  
(carga de corte factorizada) por perno, Kips.
- $(\phi R_n)_t$  = Resistencia de diseño a la tracción por perno  
(cuando el perno está sujeto sólo a tracción), Kips.
- $(\phi R_n)_v$  = Resistencia de diseño al corte por perno  
(cuando el perno está sujeto sólo a corte), Kips.

La Especificación ANSI/AISC 360-10, resume lo establecido anteriormente y establece que la resistencia del perno en sollicitación simultánea es:

$$R_n = F'_{nt} A_b$$

$$\phi = 0.75 \text{ (LRFD)}$$

$$\frac{D}{\Omega} = 2.00 \text{ (ASD)}$$

Donde:

$F'_{nt}$  = Esfuerzo de tracción nominal modificada para incluir los efectos de los esfuerzos de corte, Ksi.

$$F'_{nt} = 1.3F_{nt} - \frac{F_{nt}}{\phi F_{nv}} f_{rv} \leq F_{nt} \text{ (LRFD)}$$

$$F'_{nt} = 1.3F_{nt} - \frac{\Omega F_{nt}}{F_{nv}} f_{rv} \leq F_{nt} \text{ (ASD)}$$

Donde:

$F_{nt}$  = Resistencia nominal a la tracción, según Tabla 2.2. Sección J3.1, ANSI/AISC 360-10, Ksi.

$F_{nv}$  = Resistencia nominal al corte, según Tabla 2.2. Sección J3.1 ANSI/AISC 360-10, Ksi.

$f_{rv}$  = Esfuerzo requerido de corte, Ksi.

La resistencia nominal de corte del conector debe mayor o igual que el esfuerzo de corte requerido,  $f_{rv}$ .



### 2.4.2 Conexiones de tipo deslizamiento crítico

Son un tipo de conexiones en la cual las superficies de contacto se han preparado adecuadamente, y que con la presencia de la sujeción provista por pernos pretensados, son capaces de resistir por fricción a las cargas externas sin deslizamiento en las superficies de contacto (Ver Figura N°2.14 y 2.15). La condición mínima de pretensión es la indicada en la Tabla 2.1.

En este tipo de conexión el modo de falla potencial es por deslizamiento de las placas, lo cual causaría el aplastamiento de la placa y cortante en los pernos.

Como se mencionó anteriormente (Parte 2.2) la resistencia al deslizamiento es una función de la precarga del perno, coeficiente de rozamiento estático entre las superficies de contacto y también del número de superficies deslizantes. La especificación, RCSC 2009, Sección 5.4, define tres clases de preparación de superficie (A, B o C), donde se indica el coeficiente de rozamiento estático  $\mu$ :

- \* Para superficies Clase A (superficies de acero sin pintar, limpias sin laminillo o superficie con baño Clase A en acero limpiado a chorro),  $\mu=0.30$
- \* Para superficies Clase B (superficies de acero sin pintar, limpiadas mediante chorro de arena o superficies con baño clase B en acero limpiado mediante chorro de arena),  $\mu=0.50$
- \* Para superficies Clase C (superficies galvanizadas por inmersión en caliente y rugosas – rascadas o cepilladas),  $\mu=0.35$

Las conexiones de tipo deslizamiento crítico se deben utilizar en los siguientes casos:

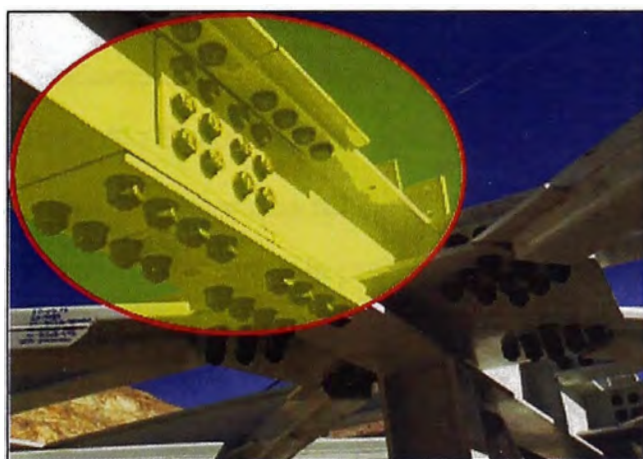
- \* Conexiones que estén sometidas a fatiga con inversión del sentido de las cargas.
- \* Conexiones que utilicen agujeros sobredimensionados.
- \* Conexiones que utilicen agujeros de ranura (corta o larga), a excepción cuando la carga aplicada sea perpendicular a la dirección mayor del agujero.

- \* Conexiones en las cuales el deslizamiento de las superficies de contacto es perjudicial para el comportamiento de la estructura.



**Figura N°2.14.- Conexión de tipo deslizamiento crítico**

Fuente: GyM S.A. (Estructura de la galería para la correa transportadora)  
Minera Caserones - Chile



**Figura N°2.15.- Detalle - Conexión de tipo deslizamiento crítico**

Fuente: GyM S.A. (Estructura de la galería para la correa transportadora)  
Minera Caserones - Chile

A continuación se describe la resistencia al deslizamiento entre superficies de contacto, tanto para una conexión con pernos solicitados sólo a corte y para una conexión con pernos solicitados a corte y tracción simultánea.

### A) Resistencia al deslizamiento (Pernos en sollicitación sólo de corte)

Las conexiones de deslizamiento crítico deben ser diseñadas para prevenir el deslizamiento entre las partes conectadas.

La resistencia al deslizamiento, según la Especificación del ANSI/AISC 360-10, Sección J3-8, es:

$$R_n = \mu D_u h_f T_b n_s ;$$

a) Para agujeros de tamaño estándar y de ranura corta perpendiculares a la dirección de la carga.

$$\phi = 1.00 \text{ (LRFD)} \quad \Omega = 1.50 \text{ (ASD)}$$

b) Para agujeros sobredimensionados y de ranura corta paralelos a la dirección de la carga.

$$\phi = 0.85 \text{ (LRFD)} \quad \Omega = 1.76 \text{ (ASD)}$$

c) Para agujeros de ranura larga.

$$\phi = 0.70 \text{ (LRFD)} \quad \Omega = 2.14 \text{ (ASD)}$$

$\mu$  = Coeficiente de deslizamiento promedio para superficies  
Clase A o B, cuando sea aplicable.

$D_u$  = 1.13, es un factor que refleja la razón entre la pretensión medida del perno instalado y la pretensión mínima especificada del perno; el uso de otros valores pueden ser aprobados por el ingeniero estructural responsable del proyecto

$T_b$  = Pretensión mínima especificada del perno (Tabla N°2.1), Kips.

$h_f$  = Factor por rellenos, determinado según se indica a continuación:

- a) Cuando los pernos han sido agregados para distribuir cargas en el relleno.

$$h_f = 1.00$$

- b) Cuando los pernos no han sido agregados para distribuir la carga en el relleno.

Para un relleno entre las partes conectadas,  $h_f = 1.00$

Para dos o más rellenos entre las partes conectadas,  $h_f = 0.85$

$n_s$  = Número de planos de deslizamiento.

Es importante mencionar, que para las conexiones de tipo deslizamiento crítico, la Especificación ANSI/AISC 360-10, indica que también se debe verificar la resistencia al aplastamiento de las planchas, ya que puede existir la posibilidad de un deslizamiento, y cuando esto ocurra, la conexión deberá tener la capacidad para soportarlo.

### **B) Resistencia al deslizamiento (Pernos en solicitud de corte y tracción simultánea)**

Tal como se explicó anteriormente, se sabe que una conexión de deslizamiento crítico trabaja adecuadamente si es que se tiene una correcta pretensión del perno, ya que esta brinda la resistencia al deslizamiento entre las partes conectadas; sin embargo, esta resistencia se ve afectada cuando se tiene a los pernos solicitados a tracción, ya que esta solicitud tendría a disminuir la fuerza de apriete.

La Especificación ANSI/AISC 360-10, Sección J3-9, establece que para determinar la nueva resistencia al deslizamiento disponible por perno, hay que multiplicar la expresión de la Sección J3-8, por el factor  $K_{sc}$ , como se muestra a continuación:

$$K_{sc} = 1 - \frac{T_u}{D_u T_b n_b} \text{ (LRFD)}$$

$$K_{sc} = 1 - \frac{1.5T_a}{D_u T_b n_b} \text{ (ASD)}$$

Donde:

$T_u$  = Carga de tracción requerida debida a las combinaciones de carga ASD, Ksi.

$T_u$  = Carga de tracción requerida debida a las combinaciones de carga LRFD, Ksi.

$n_b$  Número de pernos que transmiten la tracción aplicada.

## **CAPÍTULO III: INSTALACIÓN DE PERNOS ESTRUCTURALES DE ALTA RESISTENCIA**

### **3.1 INTRODUCCIÓN**

La instalación de los pernos estructurales de alta resistencia es sumamente vital en el montaje de una estructura, ya que de ello va a depender mucho el comportamiento de las conexiones; especialmente de las conexiones con condición de pretensado o conexiones de tipo deslizamiento crítico.

Antes de proceder con el desarrollo de los métodos de instalación de los pernos estructurales de alta resistencia, es importante conocer lo que concierne a la verificación previa a la instalación de los mismos.

### **3.2 VERIFICACIÓN PREVIA A LA INSTALACIÓN DE LOS PERNOS ESTRUCTURALES DE ALTA RESISTENCIA**

Es un ensayo en el sitio de la instalación, que tiene el objetivo de verificar que la totalidad del ensamble del perno es adecuado para su instalación pretensada. Este ensayo se realiza con un dispositivo generalmente hidráulico, llamado, calibrador de tensión, el cual dispone de:

- \* Un dial o reloj donde se indica la pretensión del perno. Cabe señalar que la medición del dial es inducido por el sistema hidráulico interno del dispositivo (Ver Figura N°3.1)
- \* Un plato adaptador (parte frontal) y un buje adaptador (parte posterior) por donde se inserta el vástago del perno, para luego colocar la arandela y tuerca respectiva (Ver Figura N°3.1)
- \* Unos sujetadores regulables para su fijación (Ver Figura N°3.1)



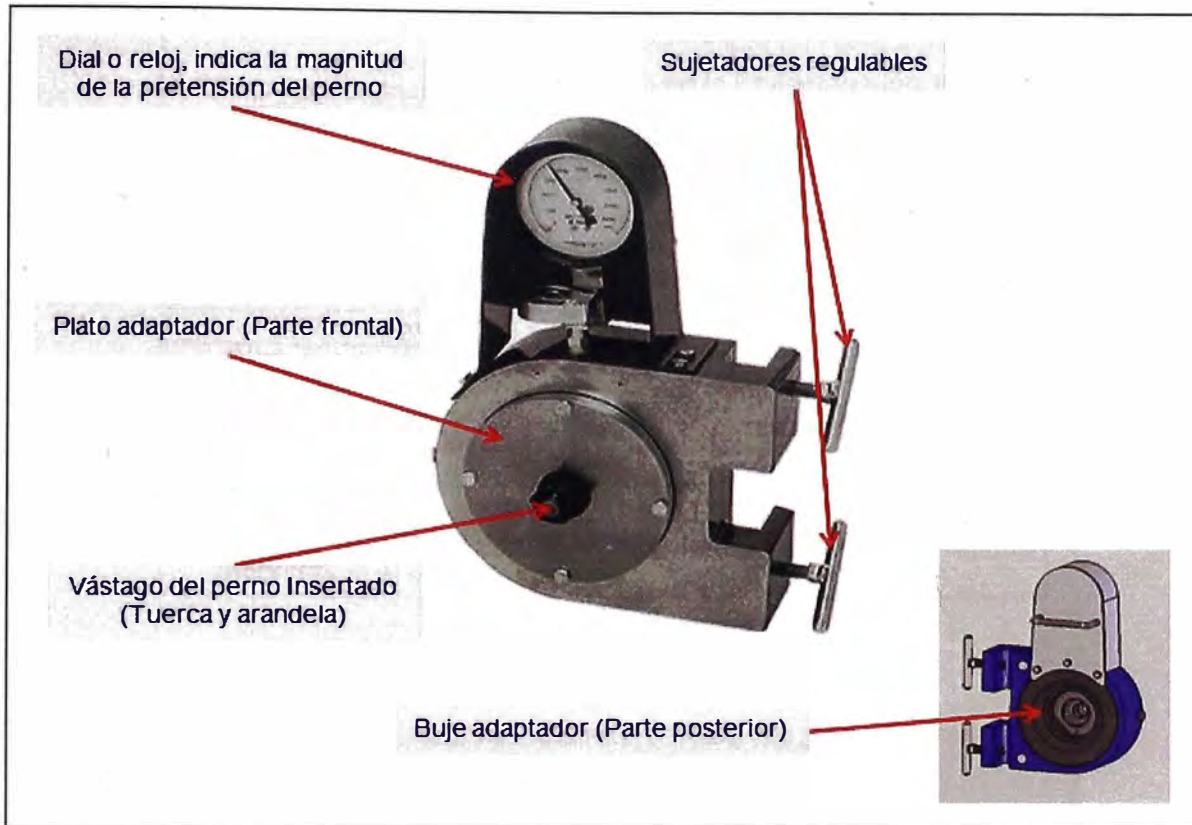


Figura N°3.1.- Calibrador de tensión (Skidmore Wilhelm - Tungsten Capital Partners )

Fuente: Skidmore Wilhelm (Tungsten Capital Partners)

La verificación previa a la instalación es necesaria cuando los pernos se deban instalar en una conexión pretensada o de tipo deslizamiento crítico, RCSC2009, Sección 7.

La Especificación, RCSC 2009, para asegurar que los pernos alcancen la pretensión mínima de instalación indicada de la Tabla N°2.1, establece que la pretensión mínima para ser usada en la verificación, sea 1.05 veces su valor, tal como se muestra en la Tabla N°3.1.

Para las pruebas requeridas se debe ensayar una muestra representativa de no menos de tres ensambles de pernos de cada una de las combinaciones de diámetro, longitud, grado y lote, que se usará en obra (Ver Figura N°3.2)

Tabla N°3.1.- Pretensión mínima de pernos para la verificación previa a la instalación

Diámetro Nominal Perno, $d_b$ , in.	Pretensión Mínima de Pernos para Verificación en la Preinstalación, Kips <sup>a</sup>	
	ASTM A325 y F1852	ASTM A490 y F2280
1/2	13	16
5/8	20	25
3/4	29	37
7/8	41	51
1	54	67
1 1/8	59	84
1 1/4	75	107
1 3/8	89	127
1 1/2	108	155

[a] Igual a 1.05 veces la pretensión mínima de instalación del perno, redondeado al valor más cercano Kip.

Fuente: Tabla 7.1, RCSC 2009

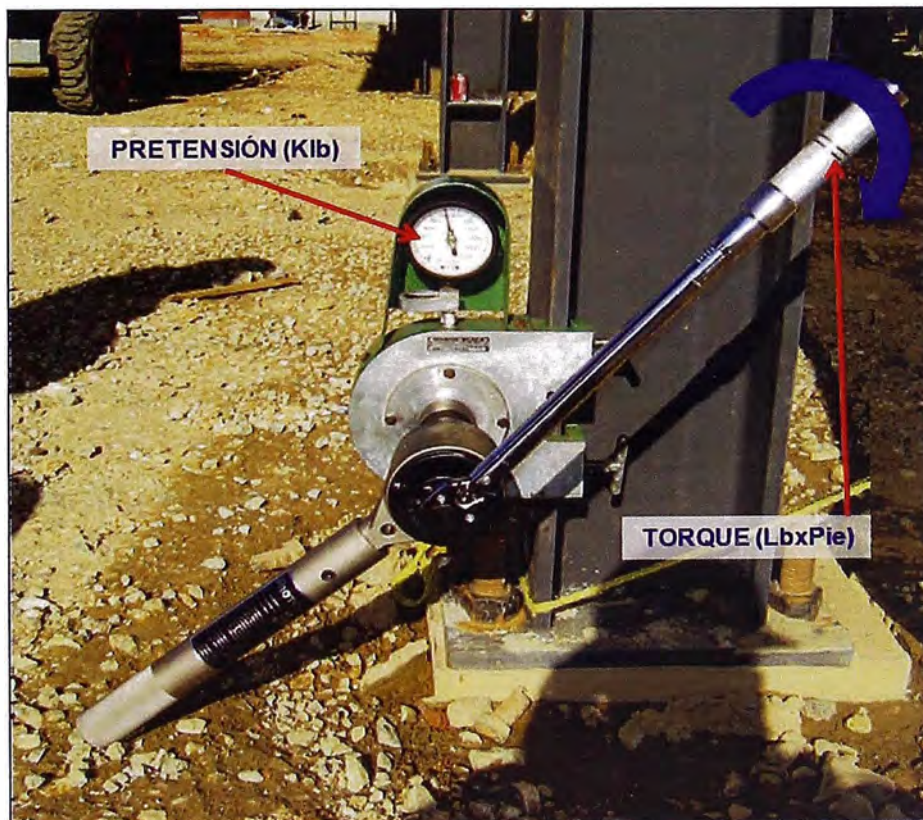


Figura N°3.2.- Verificación Previa a la instalación

Fuente: Skidmore Wilhelm (Tungsten Capital Partners)

En caso del uso de llaves de impacto, estas deben ser de una capacidad adecuada y suministradas con aire suficiente para realizar el pretensado necesario de cada perno dentro de aproximadamente 10 segundos para tornillos de hasta 1 ¼ pulgada de diámetro, y dentro de aproximadamente 15 segundos para pernos de mayor diámetro.

### **3.3 MÉTODOS DE INSTALACIÓN DE LOS PERNOS ESTRUCTURALES DE ALTA RESISTENCIA**

La Sección 8 de la Especificación RCSC 2009, indica las formas o metodologías para instalar los pernos estructurales de alta resistencia tanto para pernos en conexiones con condición de apriete ajustado y para pernos en conexiones pretensadas o de tipo deslizamiento crítico.

A continuación se describen los métodos de instalación con respecto al tipo de conexión.

#### **3.3.1 Método de instalación de los pernos estructurales de alta resistencia en conexiones con condición de apriete ajustado**

Luego de la inserción de los pernos en todos los agujeros colocando las arandelas y tuercas respectivas para completar el ensamble, se procede con la instalación, la cual consiste en obtener la condición más ajustada que se logra con unos pocos golpes de una llave de impacto o mediante el máximo esfuerzo de un trabajador utilizando una llave común para poner las piezas en contacto firme.

#### **3.3.2 Métodos de instalación de los pernos estructurales de alta resistencia en conexiones pretensadas y conexiones de tipo deslizamiento crítico**

La Especificación, RCSC 2009, proporciona cuatro métodos para la instalación de los pernos estructurales de alta resistencia en conexiones pretensadas o de tipo deslizamiento crítico. Estos métodos son: pretensado con giro de la tuerca,

pretensado con llave calibrada (torquímetro), pretensado con pernos de tensión controlada, pretensado con indicador directo de tensión. La Especificación no tiene ninguna preferencia sobre los métodos mencionados.

Es importante mencionar que para cualquiera de los cuatro métodos:

- \* Se debe realizar el procedimiento de verificación previa a la instalación especificado en la Parte 3.2.
- \* Antes de realizar el pretensado respectivo, primero se tiene que llegar a la condición de apriete ajustado y luego proceder con la pretensión; ya que de no hacerlo, obtendremos una pretensión insuficiente y una conexión suelta.
- \* Se debe instalar los pernos con un valor de pretensión mayor o igual a lo indicado en la Tabla N°2.1.
- \* La pretensión de los pernos debe progresar sistemáticamente a partir de la parte más rígida de la conexión de forma que se minimice los efectos de relajación de los pernos. La relajación de los pernos consiste en una pérdida de tensión de la pretensión, como consecuencia de las deformaciones plásticas de las partes roscadas y de las deformaciones plásticas de las planchas que se encuentran debajo de la cabeza del perno y/o tuerca.
- \* La Especificación indica que si no resulta práctico girar la tuerca, se permite pretensar girando la cabeza del perno impidiendo la rotación de la tuerca.



A continuación se describen los métodos para instalar a los pernos estructurales de alta resistencia:

### A) Pretensado con giro de la tuerca

Al igual que en todos los métodos de pretensión, inicialmente todos los pernos se deben instalar hasta la condición de apriete ajustado. Posteriormente, se debe aplicar la rotación de la tuerca o cabeza del perno (Ver Figura N°3.3) según lo especificado en la Tabla N°3.2. El pretensado debe progresar sistemáticamente a partir de la parte más rígida de la conexión con el objetivo de que se minimice la relajación de los pernos que ya han sido pretensados. La parte no girada por la llave (Tuerca o cabeza de perno) debe ser impedida de girar durante la instalación, de lo contrario, se producirá una rotación equivocada.

No está de más mencionar que para la pretensión de los pernos por el método del giro de la tuerca, se requiere de una excelente habilidad del operario con el objetivo de que pueda realizar las respectivas fracciones de giro de la tuerca, teniendo en cuenta las tolerancias que se pueden aceptar según la Especificación.

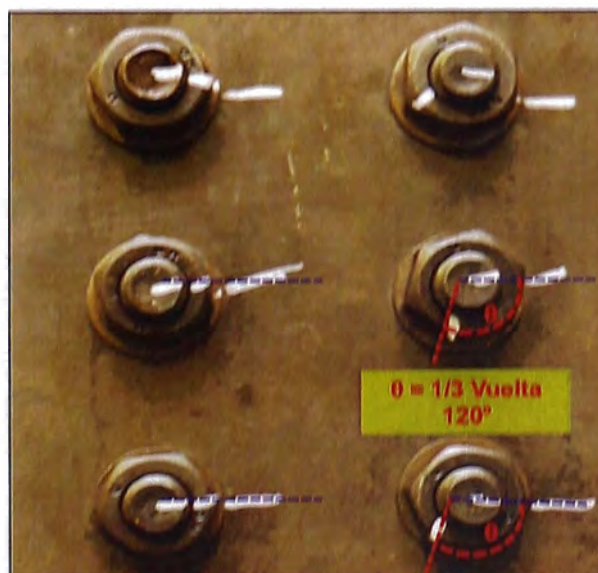


Figura N° 3.3.- Pretensado con giro de la tuerca

Fuente: Applied Bolting Technology

**Tabla N° 3.2.- Rotación de la tuerca a partir de la condición de apriete ajustado para el pretensado con giro de la tuerca**

Longitud del Perno <sup>c</sup>	Disposición de la Cara Externa de las Plozas Empornadas		
	Ambas caras normales al ojo del perno	Una cara normal al ojo del perno, la otra cara con una inclinación de no más de 1:20 <sup>d</sup>	Ambas caras inclinadas no más de 1:20 con respecto a la normal al ojo del perno <sup>d</sup>
≤ 4d	1/3 vuelta	1/2 vuelta	2/3 vuelta
> 4d pero ≤ 8d	1/2 vuelta	2/3 vuelta	5/6 vuelta
> 8d pero ≤ 12d	2/3 vuelta	5/6 vuelta	1 vuelta

[a] La rotación de la tuerca es en relación con el perno, independientemente del elemento girado (tuerca o perno). Para rotaciones requeridas de 1/2 vuelta o inferiores, la tolerancia es +/- 30 grados, para rotaciones requeridas de 2/3 de vuelta o superiores la tolerancia es +/- 45 grados.  
 [b] Aplicable solamente en las conexiones en las cuales el único material dentro de la longitud de apriete es acero.  
 [c] Si la longitud del perno es mayor que 12 d, la rotación requerida para la tuerca se determinará realizando ensayos en un calibrador de tensión que simule las condiciones del acero con ajuste soldado.  
 [d] Cuando no se utilice arandelas biseladas.

Fuente: Tabla 8.2, RCSC 2009

### B) Pretensado con llave calibrada (Llave dinamométrica o torquímetro)

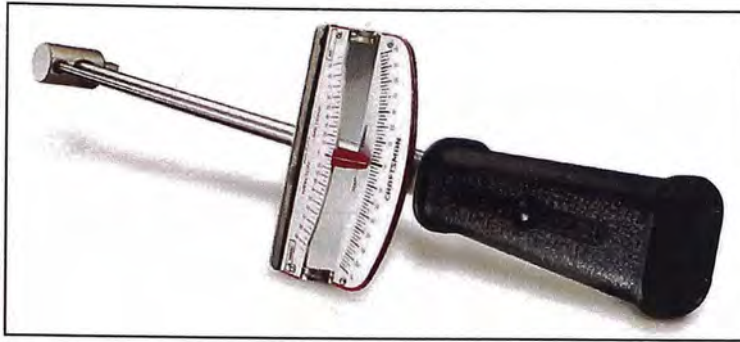
Una llave calibrada o torquímetro es un instrumento de precisión, utilizado para aplicar, predeterminar, o medir el torque al apretar un perno que une partes ensambladas. Básicamente existen tres tipos de torquímetros: mecánico, analógico y digital. (Ver Figura N°3.4, 3.5 y 3.6)



**Figura N°3.4.- Torquímetro mecánico**

Fuente: Craftsman





**Figura N°3.5.- Torquímetro analógico**

Fuente: Crasftsman



**Figura N°3.6.- Torquímetro digital**

Fuente: Crasftsman

Para el pretensado, inicialmente todos los pernos se deben instalar hasta la condición de apriete ajustado. Posteriormente, a los pernos de la conexión se les debe aplicar el torque de instalación (cuyo valor fue determinado en el proceso de verificación previa a la instalación), para esto, se selecciona el valor del torque respectivo en el torquímetro a utilizar y se procede a ajustar. Cabe señalar que se debe aplicar el torque progresando sistemáticamente a partir de la parte más rígida de la conexión con el objetivo minimizar la relajación de los pernos que ya han sido pretensados.

A continuación se muestra el pretensado de un perno con torquímetro mecánico (Ver Figura N°3.7 y 3.8).



**Figura N°3.7.- Acople del dado del torquímetro en el perno**

Fuente: GyM S.A. (Estructura de apoyo para la galería de la correa transportadora)  
Proyecto Minero Caserones - Chile



**Figura N°3.8.- Pretensado del perno con torquímetro mecánico**

Fuente: GyM S.A. (Estructura de apoyo para la galería de la correa transportadora)  
Proyecto Minero Caserones - Chile

La Especificación, RCSC 2009, prohíbe utilizar valores de torque determinados a partir de tablas o a partir de ecuaciones que tratan de relacionar el torque con la pretensión, ya que existen muchos factores que afectan la pretensión en el instante de la instalación. Los factores que afectan la relación entre el torque y la pretensión son los siguientes:

- \* Calidad de los hilos de los pernos y tuercas.
- \* Uniformidad, grado y la condición de lubricación.
- \* Las condiciones del sitio de trabajo que contribuyen a la impregnación del polvo, suciedad y corrosión sobre las roscas.
- \* Fricción entre los elementos.
- \* Variabilidad del suministro del aire comprimido en las llaves de impacto, que puede ser provocado por la longitud de las mangueras o del número de llaves que operan desde una misma fuente.
- \* La condición, la lubricación y la fuente de energía para la llave, los cuales pueden cambiar dentro de un turno de trabajo.
- \* Etc.

Según la Especificación, RCSC 2009, la calibración de la llave (torquímetro) se debe realizar:

- \* Diariamente.
- \* Cuando se cambia cualquier componente del ensamble del perno.
- \* Cuando se vuelve a lubricar cualquier componente del ensamble del perno.
- \* Cuando existan diferencias significativas en el estado de la superficie de las roscas del perno, tuercas y arandelas.
- \* Cuando cualquier componente principal de la llave, incluyendo lubricación, manguera y suministro de aire (llave de impacto) son cambiados.

### C) Pretensado con pernos de tensión controlada (TC)

Este método utiliza los pernos de Tensión Controlada de calidad ASTM-F1852 y ASTM-F2280, los cuales poseen un extremo estriado o ranurado que se extiende más allá de su parte roscada (Ver Figura N°1.4).

Para su instalación, el extremo ranurado se acopla a un dado coaxial de una llave eléctrica especial (Ver Figura N°3.9). El dado coaxial está formado por dos anillos (concéntricos), en los cuales, en el anillo interno se inserta el extremo ranurado del perno y en el anillo externo se inserta la tuerca (Ver Figura N°3.10). Al accionar la máquina, los dos anillos giraran en sentido opuesto uno con respecto del otro para apretar hasta alcanzar el apriete adecuado, seguidamente la espiga ranurada se romperá, separándose del perno (Ver Figura N°3.11).



Figura N°3.9.- Llave eléctrica para instalación de los pernos de tensión controlada

Fuente: Makita



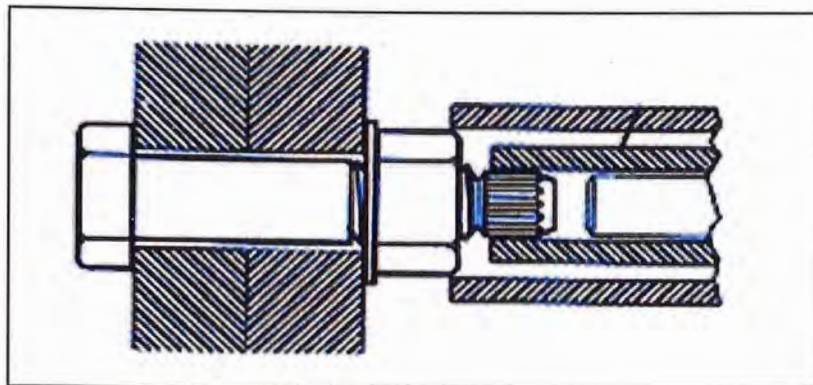


Figura N°3.10.- Inserción del dado coaxial

Fuente: GSA S.A.

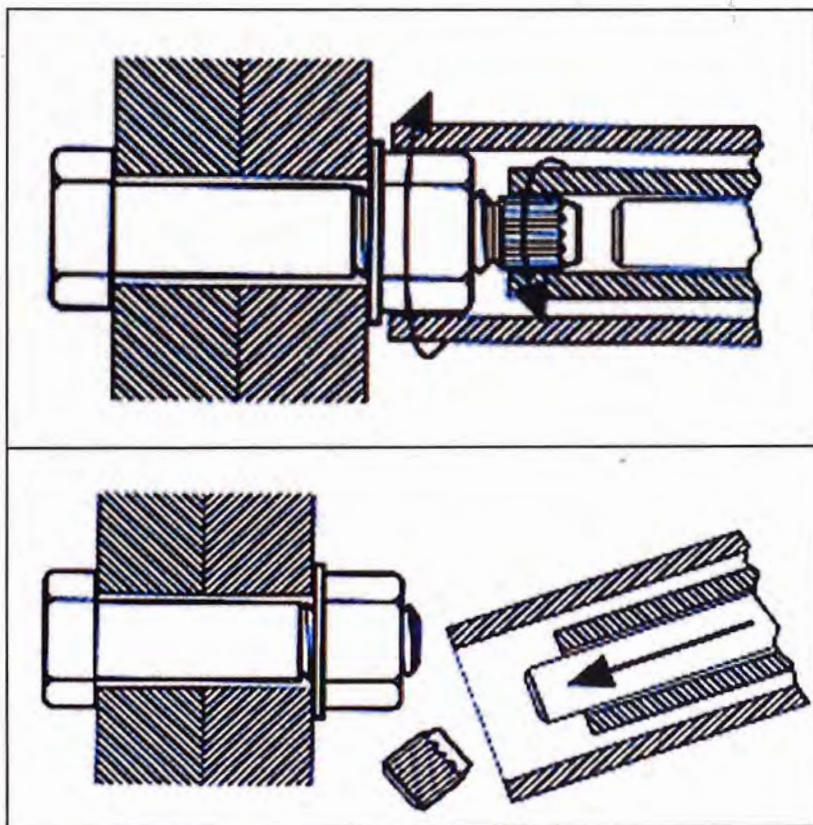


Figura N°3.11.- Accionamiento de la llave eléctrica

Fuente: GSA S.A.

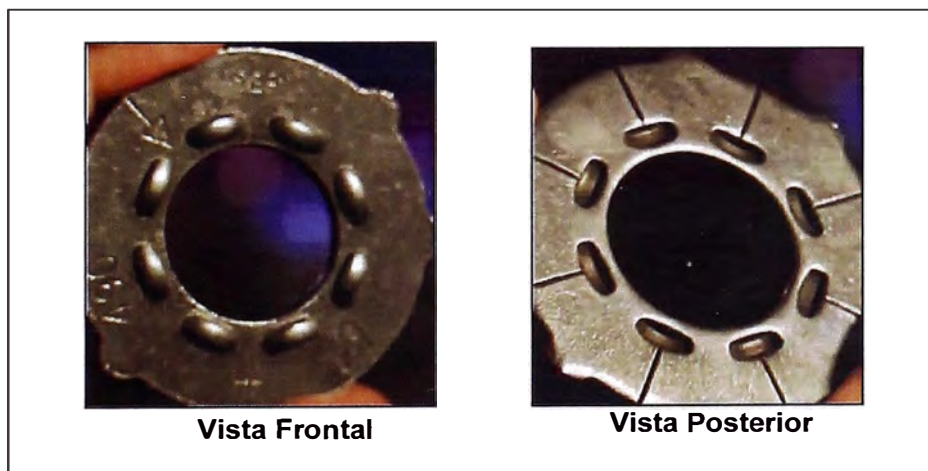


Cabe señalar que inicialmente todos los pernos se deben instalar hasta la condición de apriete ajustado. Luego se continúa con la pretensión de todos los pernos de la conexión, progresando sistemáticamente a partir de la parte más rígida de la conexión con el objetivo de minimizar la relajación de los pernos que ya han sido pretensados.

#### D) Pretensado con indicador directo de tensión (IDT)

##### ➤ Pretensado con indicador directo de tensión “Estándar”

Este método de pretensado utiliza las arandelas indicadoras directas de tensión “Estándar” de calidad ASTM-F959 (Ver Figura N°3.12). Estas arandelas están fabricadas de acero endurecido, tratadas térmicamente (bonificado); disponen de unas protuberancias en una de sus superficies, las cuales son diseñadas para deformarse de una manera controlada cuando están sujetas a una carga compresiva.



**Figura N°3.12.- Indicador directo de tensión “Estándar”**

Fuente: Applied Bolting Technology

La Especificación, ASTM-F959, clasifica a las arandelas indicadoras de tensión en cuatro tipos, las cuales tienen diámetros nominales que varían de  $\frac{1}{2}$ " a  $1 \frac{1}{2}$ ". Los tipos de arandela son:

- \* Tipo 325 : Arandela indicadora directa de tensión para pernos de calidad ASTM-A325 y ASTM-F1852, ambos de Tipo 1.
- \* Tipo 325-3 : Arandela indicadora directa de tensión para pernos de calidad ASTM-A325 y ASTM-F1852, ambos de Tipo 3.
- \* Tipo 490 : Arandela indicadora directa de tensión para pernos de calidad ASTM-A490 y ASTM-F2280, ambos Tipo1.
- \* Tipo 490-3 : Arandela indicadora directa de tensión para pernos de calidad ASTM-490 y ASTM-F2280, ambos Tipo 3.

Es importante mencionar que la Especificación, ASTM-F959, sólo permite el galvanizado mecánico (ASTM-B695) de las arandelas indicadoras directas de tensión Tipo 325, ya que si se utiliza el galvanizado en caliente puede generar problemas de ablandamiento en sus protuberancias, provocando inseguridad o desconfianza para lograr la pretensión del perno. Para el caso de las arandelas indicadoras directas de tensión Tipo 490, sólo permite el galvanizado mecánico (ASTM-B695), ya que si se utiliza el galvanizado en caliente puede generar problemas de ablandamiento en sus protuberancias y fragilización por hidrógeno, provocando inseguridad o desconfianza para lograr la pretensión del perno. También permite el recubrimiento de protección según la Especificación ASTM-F1136 (Especificación estándar para zinc/aluminio, capa de protección contra la corrosión para sujetadores).

El sistema de funcionamiento de una arandela indicadora directa de tensión es el siguiente:

Quando una arandela indicadora directa de tensión es insertada en un perno, ya sea con las protuberancias contra la parte de abajo de la

cabeza del perno o contra una arandela endurecida, existe una separación notable debido a las protuberancias; y a medida que el perno o tuerca son apretados, las protuberancias son reducidas (Ver Figura N°3.13). Cuando las protuberancias se han aplastado de manera que la separación ha sido reducida a la dimensión especificada, el perno ha sido pretensado correctamente.

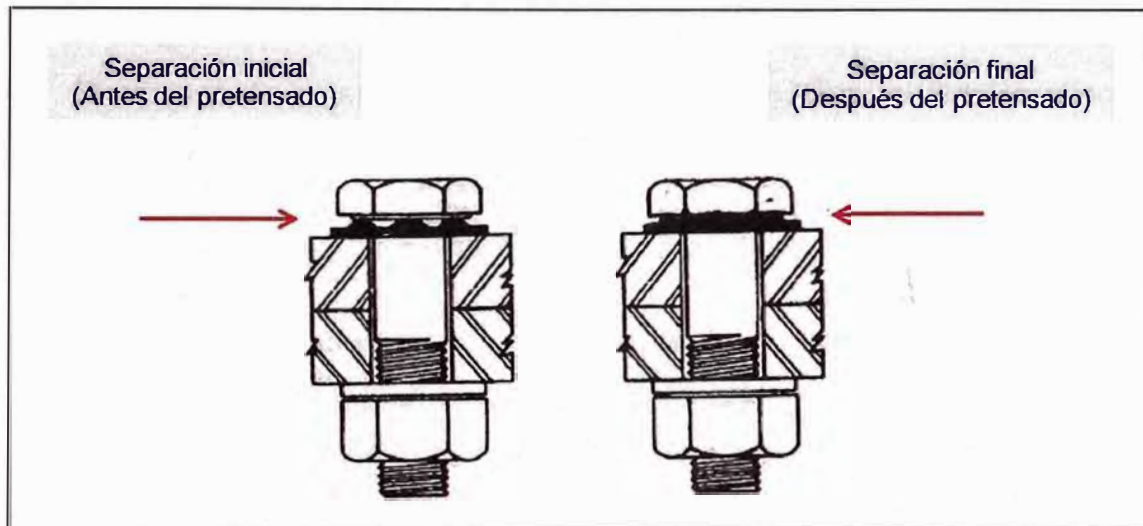


Figura N°3.13.- Ajuste del perno con arandela indicadora directa de tensión

Fuente: J & M Turner Inc.

La Especificación, ASTM-F959, para asegurar que las arandelas indicadoras directas de tensión han sido instaladas correctamente (inspección), establece como medida de separación:

- \* Una lámina calibradora (galga) de 0.015", el cual debe ser usado cuando una arandela indicadora directa de tensión sin recubrimiento es instalada bajo la cabeza del perno y la tuerca es girada (Ver Figura N°3.16 - a) y,
- \* Una lámina calibradora (galga) de 0.005", el cual debe ser usado en cualquiera de las otras configuraciones (Ver Figura N°3.16 - b, c, d),

o en caso de tener arandelas indicadoras directas de tensión recubiertas (galvanizadas).

Para este método de pretensado, el procedimiento de verificación previa a la instalación (Parte 3.2) debe demostrar que, cuando en el perno la tensión de pretensado llegue a 1.05 veces la pretensión mínima (Ver Tabla N°3.1), la separación debe ser mayor o igual que lo especificado para la inspección (0.015" o 0.005").

El proceso de instalación de los pernos con arandelas indicadoras directas de tensión es el siguiente:

Inicialmente, todos los pernos se deben instalar hasta la condición de apriete ajustado. El operario debe verificar que durante esta operación las protuberancias del indicador directo de tensión no se hayan comprimido hasta una separación menor que la separación de inspección de trabajos (0.015" o 0.005"), y si en caso esto ocurriese, el indicador directo de tensión debe ser retirado y reemplazado. Luego se procede a pretensar todos los pernos de la conexión progresando sistemáticamente a partir de la parte más rígida de la conexión con el objetivo de minimizar la relajación de los pernos que ya han sido pretensados. Finalmente, el operario debe verificar que las protuberancias de la arandela indicadora directa de tensión se hayan comprimido correctamente, para esto, la lámina calibradora respectiva no debe entrar en más de la mitad de la cantidad de los espacios entre las protuberancias (Ver Figura N°3.14); de lo contrario, se debe ajustar más el perno (apretar la arandela) para lograr el pretensión del mismo (Ver Figura N°3.15).

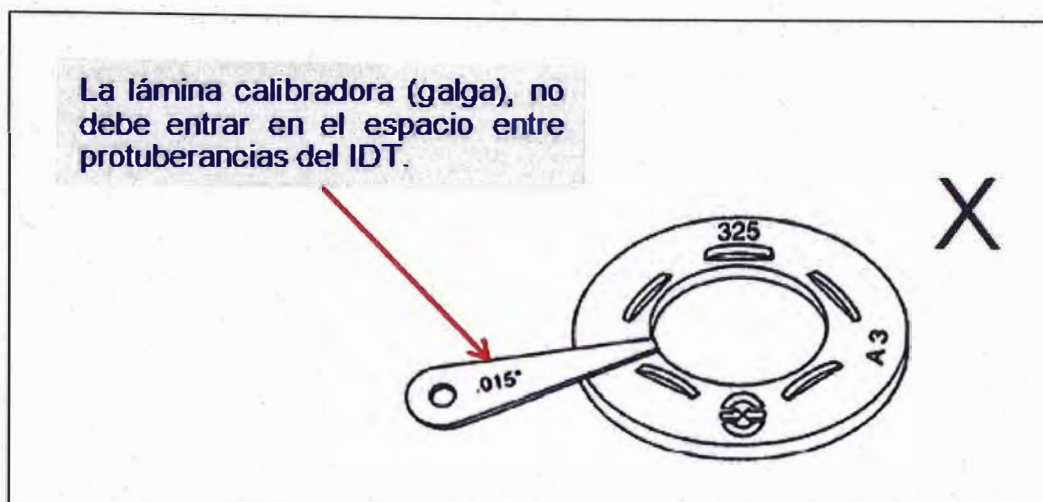


Figura N°3.14.- Lámina calibradora (galga) dentro del espacio entre protuberancias del IDT

Fuente: Elaboración propia



Figura N°3.15.- Inspección de instalación con lámina calibradora (galga)

Fuente: Elaboración propia

La Especificación, RCSC 2009, Sección 9, muestra cuatro configuraciones del posicionamiento u orientación de la arandela indicadora directa de tensión, las cuales se pueden usar para la instalación de los pernos estructurales de alta resistencia. A continuación se muestran las cuatro configuraciones respectivas (Ver Figura N°3.16):



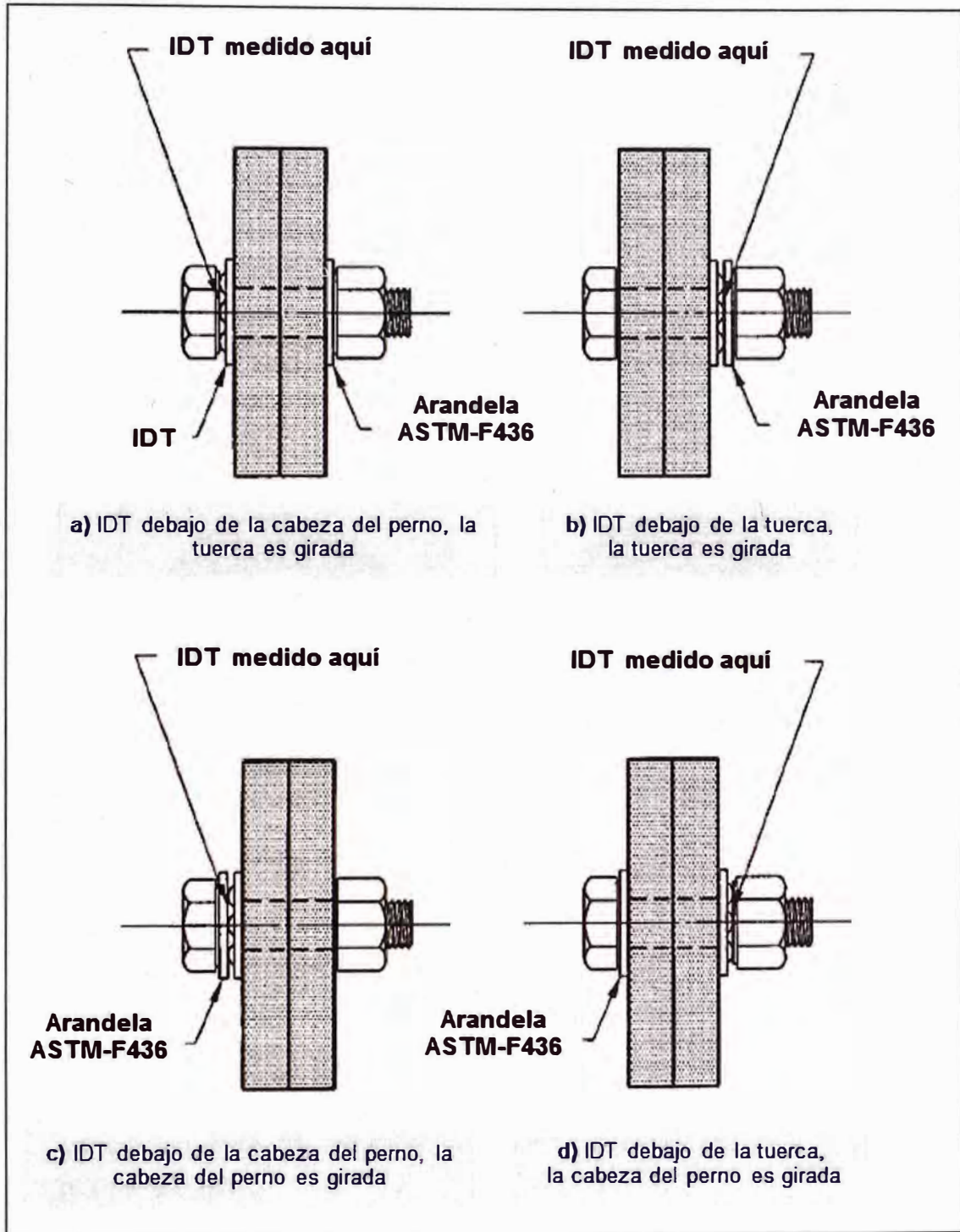


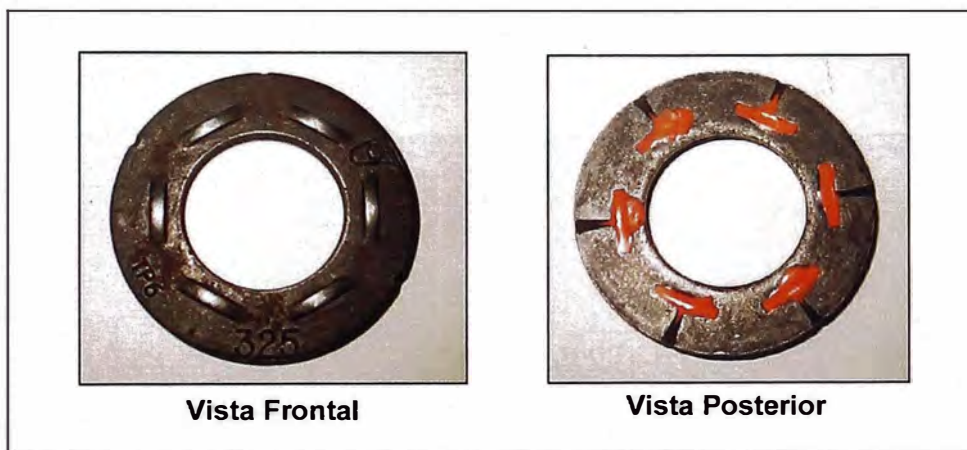
Figura N°3.16.- Configuraciones del indicador directo de tensión (IDT) ASTM-F959

Fuente: Figura C-8.1, RCSC 2009

➤ **Pretensado con indicador directo de tensión “Squirter”**

Para este método de pretensado se utilizan las arandelas indicadoras directas de tensión “Squirter”, las cuales poseen unas siliconas flexibles (color naranja) incrustadas en sus protuberancias (Ver Figura N°3.17) destinadas a poder brindar una impresión visual en la instalación. Estas arandelas indicadoras directas de tensión también son certificadas por la Especificación ASTM-F959.

Cabe señalar que la clasificación de los tipos de arandelas indicadoras directas de tensión “Squirter” son los mismos que se dispone para las arandelas indicadoras directas de tensión “Estándar”.



**Figura N°3.17.- Indicador directo de tensión “Squirter”**

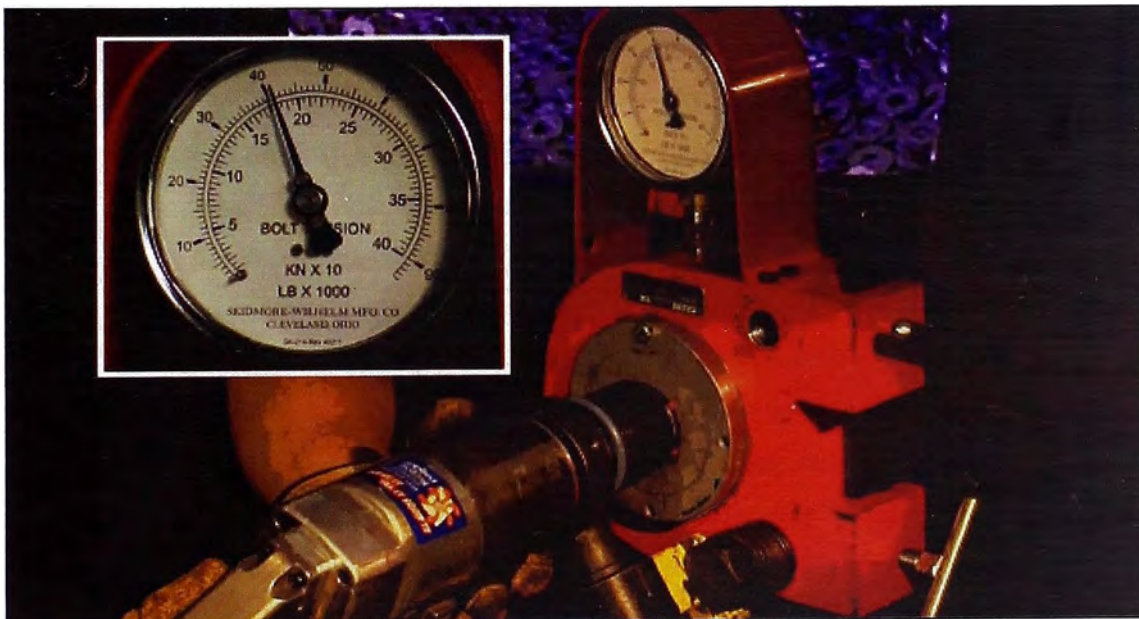
Fuente: Elaboración propia

Para este método de pretensado, el procedimiento de verificación previa a la instalación (Parte 3.2) debe demostrar que, cuando en el perno la tensión de pretensado llegue a 1.05 veces la pretensión mínima (Ver Tabla N°3.1), la separación debe ser mayor o igual que lo especificado para la inspección (0.015” o 0.005”).

Antes de realizar la instalación de los pernos estructurales de alta resistencia con las arandelas indicadoras directas de tensión “Squirter”; éstas deben calibrarse en un calibrador de tensión (Skidmore W.) o en acero

sólido revisando la separación del indicador directo de tensión con una lámina calibradora (galga).

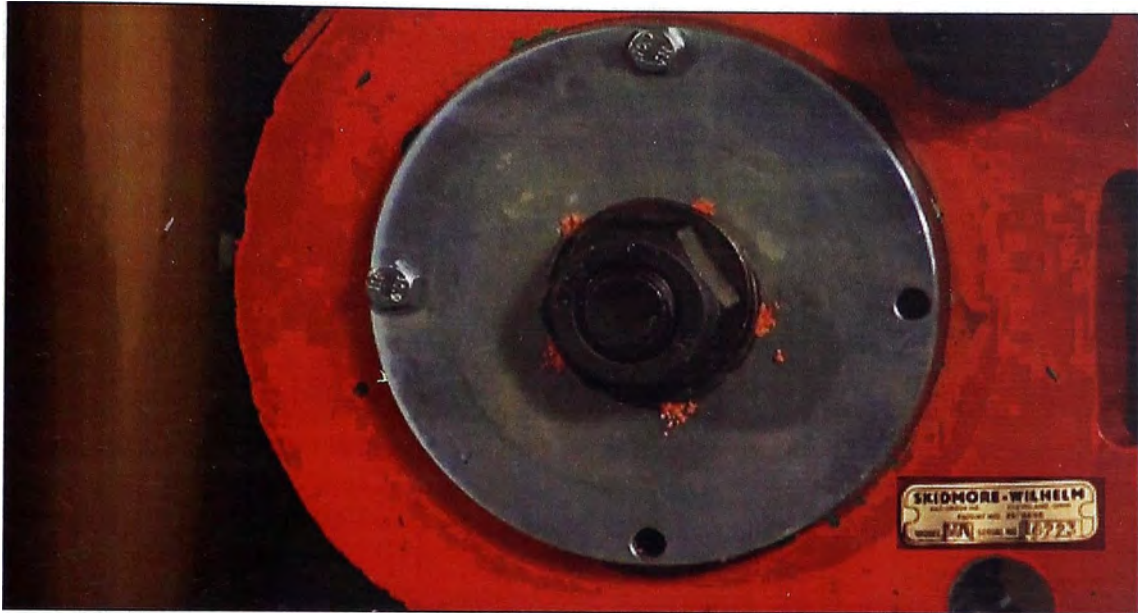
- \* En el caso que se use el calibrador de tensión (Skidmore W.), se debe insertar el perno con su tuerca y arandela en el calibrador de tensión y ajustarlo con cualquier tipo de llave, a un valor de tensión ligeramente mayor al mínimo (10%-20% más). Luego de haberlo ajustado se debe observar el aspecto, volumen y cantidad de silicona desprendida debajo del indicador directo de tensión (Ver Figura N°3.18 y 3.19). Este proceso se debe repetir una cierta cantidad de veces hasta obtener una impresión visual de cuál es la cantidad de silicona necesaria para lograr la pretensión del perno.



**Figura N°3.18.- Ajuste del perno con llave de impacto - Calibración de una arandela IDT Squirer, con un calibrador de tensión (Skidmore W.)**

Fuente: Applied Bolting Technology





**Figura N°3.19.- Aspecto visual de silicona - Calibración de una arandela IDT  
Squirter, con un calibrador de tensión (Skidmore W.)**

Fuente: Applied Bolting Technology

- \* En el caso que se use acero sólido, se debe realizar la prueba en una conexión sólida, ajustando el perno hasta que el indicador directo de tensión se haya comprimido lo necesario de tal manera que una lámina calibradora o galga de 0,015" (si el indicador directo de tensión se encuentra debajo de la cabeza del perno) o 0.005" (en otras disposiciones) no entre en más de la mitad de la cantidad de los espacios entre protuberancias disponibles del indicador directo de tensión. Una vez que se haya ajustado hasta lo establecido, se debe observar el aspecto, volumen y cantidad de silicona desprendida debajo del indicador directo de tensión (Ver Figura N°3.20). Este proceso se debe repetir una cierta cantidad de veces hasta obtener una impresión visual de cuál es la cantidad de silicona necesaria para lograr la pretensión del perno.



Figura N°3.20.- Calibración de una arandela indicadora de tensión Squirter, en acero sólido

Fuente: Applied Bolting Technology

Después de realizar los ensayos de calibración de la arandela indicadora directa de tensión “Squirter”, el operador estará apto para proceder con la instalación de los pernos estructurales de alta resistencia, ya que sabrá cuándo detenerse debido a la impresión visual durante ensayo (Ver Figura N°3.21). Cabe señalar que en esta Figura se muestra el ajuste del perno con una llave convencional, para esto, la calibración de la arandela indicadora de tensión “Squirter”, también debió ser realizada con la misma llave.



Figura N°3.21.- Pretensión del perno con IDT “Squirter”

Fuente: GyM S.A.

Minera Caserones - Chile



Posteriormente, la inspección se puede realizar de forma visual, o si por cualquier razón, no se está seguro que la cantidad de silicona desprendida es la correcta, se debe proceder a realizar la inspección con una lámina calibradora o galga respectiva (Ver Figura N°3.22).



Figura N°3.22.- Inspección con una lámina o galga, de un perno pretensado con IDT Squiter

Fuente: GyM S.A.

Cabe mencionar que el posicionamiento u orientaciones de las arandelas indicadoras directas de tensión "Squiter", son las mismas que se emplean para las arandelas indicadoras directas de tensión "Estándar" mostradas en la Figura N°3.16.

## **CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **4.1 CONCLUSIONES**

- Las conexiones empernadas tienen la ventaja de ser un método relativamente simple de conexión en obra, ya que no se requiere de una especial capacitación para su instalación, tampoco se requiere de un ambiente especial para su montaje; además de que la inspección y control de calidad no requiere de rigurosos procedimientos. En comparación con las conexiones soldadas, estas son más complicadas de ejecutar e inspeccionar en obra, ya que por lo general se requiere de procedimientos muy rigurosos. Por lo tanto, las conexiones empernadas son más económicas que las conexiones soldadas en obra.
  
- El Ingeniero Estructural debe especificar en la documentación técnica el tipo de conexión que se va a utilizar, que puede ser una conexión con condición de apriete ajustado, conexión pretensada o conexión de tipo deslizamiento crítico, ya que esta información es sumamente importante para que el contratista de fabricación pueda materializar la conexión correctamente, y con ello tener a futuro un buen desempeño de la estructura.
  
- Proyectar las estructuras con conexiones empernadas, reduce considerablemente los problemas de transporte de los miembros de grandes luces, ya que las estructuras pueden transportarse desmembradas.
  
- Las conexiones empernadas demandan una detallada elaboración de planos de fabricación, ya que la precisión debe ser completamente respetada en el taller para evitar problemas futuros en el montaje.
  
- La instalación e inspección de los pernos pretensados con el método del indicador directo de tensión “Squirter”, es el más versátil, debido a que:

- \* Ahorra tiempo a los instaladores, ya que pueden distinguir la silicona desprendida con facilidad al momento de la pretensión. Se prescinde galgas o calibres (excepto durante la calibración).
- \* Para los inspectores, permite realizar una inspección visual de la cantidad de silicona desprendida, tal cantidad de silicona desprendida indica que el perno está pretensado, o también realizar una inspección mediante galgas o calibres respectivos.

## 4.2 RECOMENDACIONES

- Es recomendable ejecutar las conexiones empernadas en obra y ejecutar las conexiones soldadas en el taller, ya que el procedimiento de soldadura en obra es mucho más complicado.
- Se debe tener en cuenta las condiciones de superficie y la lubricación de los pernos; pues la pérdida de lubricación, producto de la exposición ambiental o inadecuado almacenaje, conllevará a que se requiera un torque demasiado elevado para lograr la pretensión requerida.
- Para todos los métodos de instalación de los pernos, es necesario realizar los ensayos de verificación previa a la instalación con un calibrador de tensión; con el objetivo de poder cerciorarse que el perno llegue a la pretensión requerida.
- En la instalación, cuando se realice la pretensión de los pernos, es recomendable ajustarlos a un valor ligeramente mayor al valor del mínimo (5% - 10% más) con el objetivo de tener una reserva de fuerza de ajuste, y de esta forma, asegurarnos de no perder fuerza de sujeción debido a la relajación de los pernos.
- Tener presente que para realizar la pretensión de los pernos con el método de la llave calibrada (torquímetro), se prohíbe la utilización de tablas que traten de relacionar la pretensión con el torque, debido a que existen muchos factores que afectan a la pretensión en el instante de la instalación.

## BIBLIOGRAFÍA

- ANSI/AISC 360-10, Specification for Structural Steel Buildings; Chicago, Illinois, Estados Unidos de América, Junio 2010.
- Applied Bolting Technology; Bellows Falls, Vermont, Estados Unidos de América. <http://www.appliedbolting.com/>
- FLUOR, B2CA-0000-15-SP-005, Especificación Técnica-Fabricación Acero Estructural; Proyecto Minero Caserones, Región Atacama, Chile, Diciembre 2010.
- FLUOR, B2CA-0000-15-SP-006, Especificación Técnica-Montaje Acero Estructural; Proyecto Minero Caserones, Región Atacama, Chile, Abril 2011.
- Portland Bolt & Manufacturing Company; Portland, Oregon, Estados Unidos de América. <http://www.portlandbolt.com/>
- RCSC, Specification for Structural Joints Using High-Strength Bolts; Chicago, Illinois, Estados Unidos de América, Diciembre 2009.
- Vinnakota Siramulu, Estructuras de Acero: Comportamiento y LRFD, Editorial McGraw-Hill Companies, Primera Edición en Español, Traducido por McGraw-Hill Companies, México, 2006.

## **ANEXO 1: USO DE ARANDELAS EN PERNOS ESTRUCTURALES DE ALTA RESISTENCIA**

La Especificación, RCSC 2009, Sección 6, establece el uso de las arandelas para los pernos estructurales de alta resistencia en los siguientes casos:

### **1.1.- Arandelas en conexiones con condición de apriete ajustado**

En las conexiones con condición de apriete ajustado se requiere arandelas cuando se tiene lo siguiente:

\* Superficies inclinadas:

Cuando la cara exterior de la conexión tenga una pendiente mayor a 1:20 con respecto a un plano perpendicular al eje del perno, se deberá usar una arandela biselada ASTM-F436, con el objetivo de compensar la falta de paralelismo.

\* Agujero de ranura:

Cuando exista un agujero de ranura en un elemento exterior, se debe utilizar una arandela ASTM-F436 o una arandela de placa común de  $\frac{5}{16}$ " de espesor para cubrir el agujero.

### **1.2.- Uso de arandelas en conexiones pretensadas y conexiones de deslizamiento crítico**

En las conexiones pretensadas y de deslizamiento crítico se requieren arandelas cuando se tiene lo siguiente:

\* Esfuerzo de fluencia mínima especificada del material inferior a 40Ksi:

Cuando se pretensan pernos ASTM-A490 o ASTM-F2280 en un material conectado cuyo esfuerzo de fluencia mínimo especificado es



inferior a 40 Ksi, se deberá utilizar arandelas ASTM-F436 tanto debajo de la cabeza del perno como debajo de la tuerca, sin embargo, una arandela no es necesaria bajo la cabeza de un perno ASTM-F2280 de cabeza circular.

\* Pretensado con llave calibrada (Torquímetro):

Cuando se utilice el método de pretensado con llave calibrada se debe colocar una arandela ASTM-F436 debajo del elemento girado.

\* Pretensado con pernos de tensión controlada tipo desenrosque:

Cuando se utilice pernos de tensión controlada como método de pretensado, se deberá usar una arandela ASTM-F436 bajo la tuerca como parte del ensamble del conector.

\* Pretensado con indicador directo de tensión:

Cuando se utilice el método de pretensado con indicador directo de tensión se deberá colocar una arandela ASTM-F436 de la siguiente forma:

- (1) Si se hace girar la tuerca y el indicador directo de tensión se ubica debajo de la cabeza del perno, se deberá colocar una arandela ASTM-F436 debajo de la tuerca.
- (2) Si se hace girar la tuerca y el indicador directo de tensión se ubica debajo de la tuerca, se deberá colocar una arandela ASTM-F436 entre la tuerca y el indicador directo de tensión.
- (3) Si se hace girar la cabeza del perno y el indicador directo de tensión se ubica debajo de la tuerca, se deberá colocar una arandela ASTM-F436 debajo de la cabeza del perno.
- (4) Si se hace girar la cabeza del perno y el indicador directo de tensión se ubica debajo de la cabeza del perno, se deberá colocar una arandela ASTM-F436 entre la cabeza del perno y el indicador directo de tensión.

\* Agujeros sobredimensionados y de ranura:

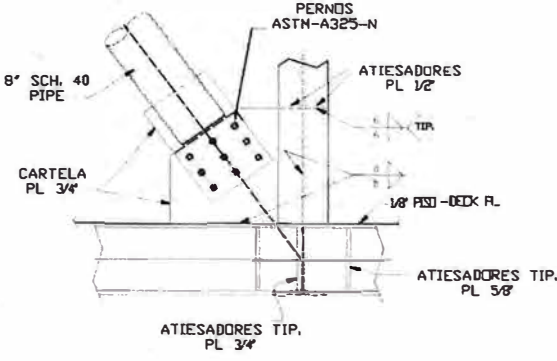
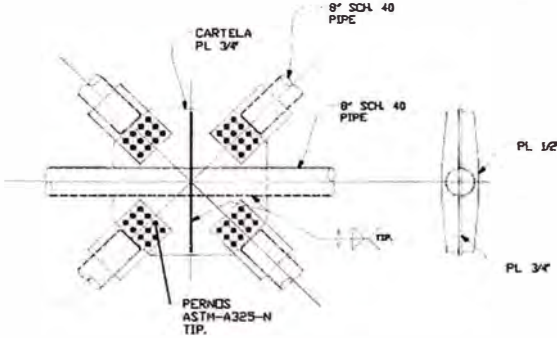
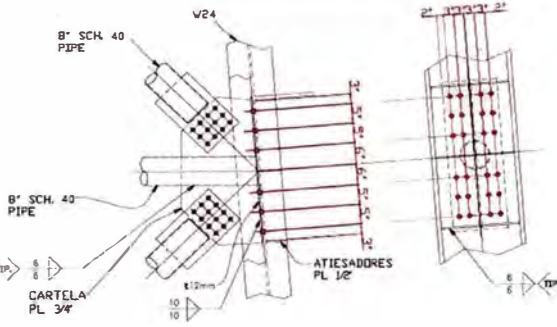
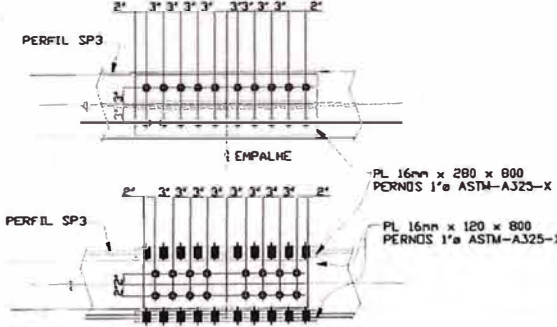
Si en un elemento exterior hay un agujero sobredimensionado o de ranura, los requisitos para las arandelas serán los indicados en la Tabla N°3.1. La arandela utilizada debe tener un tamaño suficiente para cubrir el agujero completamente.

**Tabla N°3.1- Requisitos de arandelas para conexiones pretensionadas y de deslizamiento crítico con agujeros sobredimensionados y de ranura**

Designación ASTM	Diámetro Nominal del Perno, $d_b$ , in.	Tipo de Agujero en el Elemento Exterior		
		Sobredimensionado	Ranura corta	Ranura Larga
A325 o F1852	1/2 - 1 1/2	ASTM F436 <sup>a</sup>		5/16 in. Arandela de placa gruesa o plancha continua <sup>b,c</sup>
	$\leq 1$			
A490 o F2280	> 1	ASTM F436 con 5/16 in. de espesor <sup>a,b,d</sup>		ASTM F436 3/8 in. Arandela de placa gruesa o placa continua <sup>b,c</sup>
<p>[a] Este requerimiento no se aplicará a los ensambles de pernos de control de de tensión de cabeza redonda que cumplan con los requisitos de la Sección 2.7 y que proporcionen un diámetro del círculo de apoyo que cumpla con los requisitos de la especificación ASTM F1852 o ASTM F2280.</p> <p>[b] Las arandelas múltiples con un espesor combinado de 5/16 in o más no satisfacen este requisito.</p> <p>[c] La arandela o plancha deben ser de acero de grado estructural, pero no es necesario que sean endurecidas.</p> <p>[d] Alternativamente, arandelas de un grosos de 3/8 in y arandelas F436 de espedor ordinario se puede utilizar. Las placas de las arandelas no tiene que ser endurecido.</p>				

Fuente: Tabla 6.1, RCSC 2009

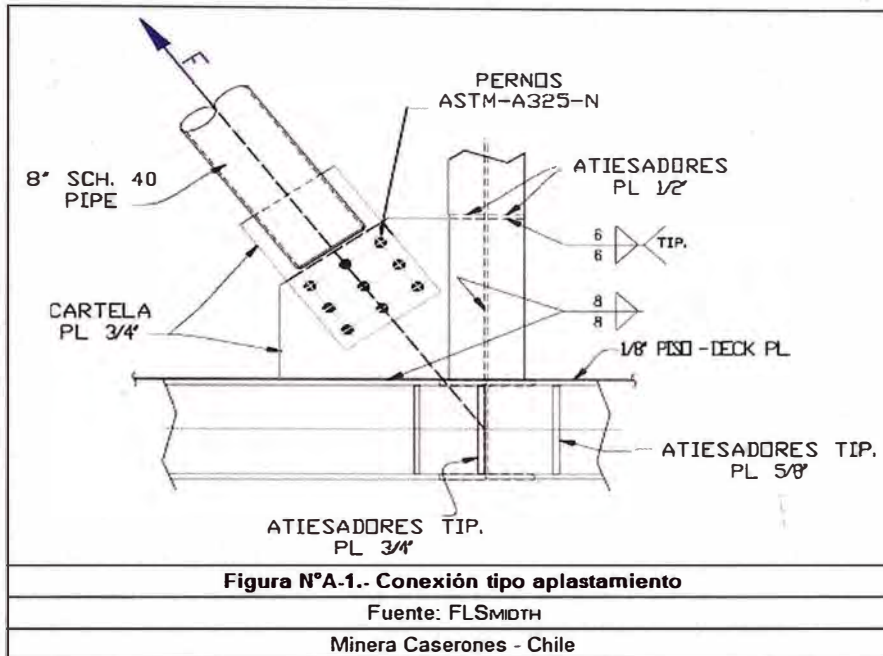
**ANEXO 2: CONEXIONES VARIAS**

CONEXIONES	DESCRIPCIÓN
	<p><b>Conexión tipo aplastamiento</b>  <b>Sólo a corte</b></p> <p>Fuente: FLSMITH                  Minera Caserones - Chile</p>
	<p><b>Conexión tipo aplastamiento</b>  <b>Sólo a corte</b></p> <p>Fuente: FLSMITH                  Minera Caserones - Chile</p>
	<p><b>Conexión tipo aplastamiento</b>  <b>Corte y tracción simultánea</b></p> <p>Fuente: FLSMITH                  Minera Caserones - Chile</p>
	<p><b>Conexión tipo deslizamiento crítico</b></p> <p>Fuente: FLSMITH                  Minera Caserones - Chile</p>

DESCRIPCIÓN DE CONEXIONES EMPERNADAS E INSTALACIÓN DE PERNOS ESTRUCTURALES DE ALTA RESISTENCIA  
 Bach. Paz Villacriz, Iván Jesús

### ANEXO 3: DISEÑO DE UNA CONEXIÓN TIPO APLASTAMIENTO

Se tiene la siguiente conexión tipo aplastamiento, ver Figura N° A-1.



Se requiere determinar la cantidad de pernos de calidad, ASTM-A325-N de 1", que son necesarios para la conexión.

**Datos:**

- 1-Perfil Tubular, acero calidad ASTM-A53, Grado B.
- 2-Cartelas (planchas), acero calidad ASTM-A36.

$e = 3/4$  in      Espesor de Plancha

- 3-Perforaciones estándar.

**Desarrollo:**

Perfil tubular, acero calidad ASTM-A53, Grado B. De la Tabla 2.3 y Tabla 1.14 del Manual del AISC, se tiene que:

$F_y$	=	35	ksi	Esfuerzo de fluencia
$F_u$	=	60	ksi	Esfuerzo último de tracción
$A_g$	=	7.85	in <sup>2</sup>	Área Bruta

Plancha (cartela), acero calidad ASTM-A36. De la Tabla 2.3 del Manual del AISC, se tiene que:

$F_y$	=	36	ksi	Esfuerzo de fluencia
$F_u$	=	58	ksi	Esfuerzo último de tracción

Pernos, calidad ASTM-A325-N. De la Tabla J3.2, de la Especificación ANSI/AISC-360-10, se tiene que:

d	=	1	in	Diámetro nominal del perno
F <sub>nt</sub>	=	90	ksi	Resistencia nominal en tracción
F <sub>nv</sub>	=	54	ksi	Resistencia nominal en corte

Pernos, calidad ASTM-A325-N. De la Tabla 7.1, del Manual del AISC, se tiene que:

$$A_b = 0.785$$

Perforaciones estándar (STD). De la Tabla J3.3, de la Especificación ANSI/AISC 360-10, se tiene que:

d	=	1	in	Diámetro nominal del perno
d <sub>h</sub>	=	1 1/16	in	Diámetro de la perforación

**Asumiendo que el estado límite del perfil tubular en tracción es la fluencia, se tiene que:**

ØP <sub>n</sub>	=		Resistencia a la tracción
ØP <sub>n</sub>	=	Ø*Ag*F <sub>y</sub>	Ecuación D2.1, ANSI/AISC 360-10
ØP <sub>n</sub>	=	247.275 Kip	Ø = 0.9 (L.R.F.D.)
P <sub>u</sub>	=	247.275 Kip	

**Resistencia al corte de un perno:**

ØR <sub>n</sub>	=	Ø*F <sub>nv</sub> *A <sub>b</sub>	Ecuación J3.1, ANSI/AISC 360-10
ØR <sub>n</sub>	=	31.793 Kip	Ø = 0.75 (L.R.F.D.)

**Resistencia al aplastamiento de la placa o plancha:**

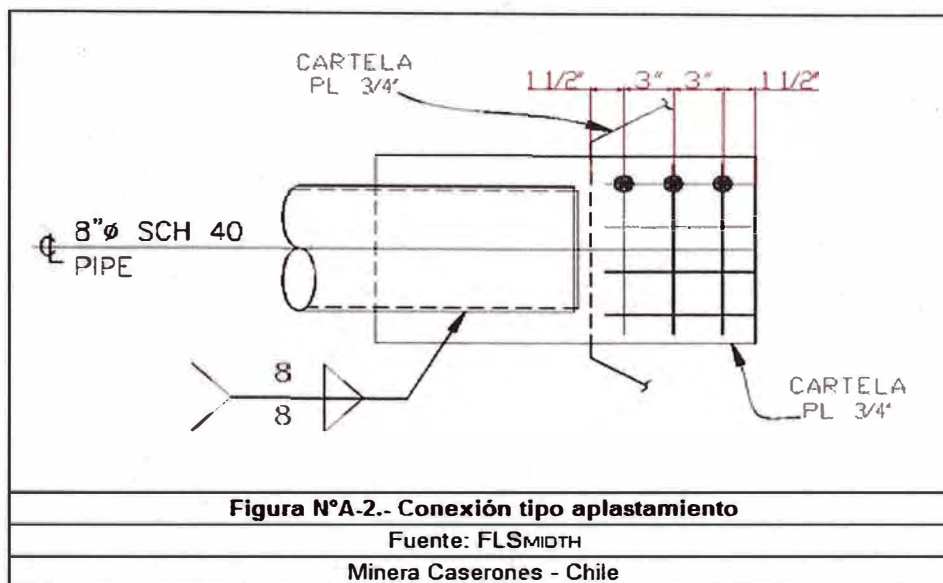
ØR <sub>n</sub>	=	Ø1.2L <sub>c</sub> * t * F <sub>u</sub> ≤ Ø2.4d * t * F <sub>u</sub>	Ecuación J3.6a, ANSI/AISC 360-10
			Ø = 0.75 (L.R.F.D.)

Espaciamiento mínimo entre pernos = 3d = 3 in  
Según Sección J3.3 ANSI /AISC 360-10

Distancia al borde = 1 1/2 in  
Según Tabla J3.4, ANSI/AISC 360-10



Ver Figura N° A-2.



Para un perno exterior:

$$L_{ce} = 0.969 \text{ in} \quad \text{Dist. al borde de un perno exterior}$$

Para un perno interior:

$$L_{ci} = 1.938 \text{ in} \quad \text{Dist. entre bordes-pernos interiores}$$

$$\text{Selección Min } \{ L_{ce}, L_{ci} \} = 0.969 \text{ in}$$

Reemplazando en:

$$\phi R_n = \phi 1.2 L_c * t * F_u \leq \phi 2.4 d * t * F_u$$

$$\phi R_{n1} = \phi 1.2 L_c * t * F_u \quad \text{Controla el desgarro}$$

$$\phi R_{n2} = \phi 2.4 d * t * F_u \quad \text{Controla el ovalamiento}$$

$$\phi R_{n1} = 37.927 \text{ Kip}$$

$$\phi R_{n2} = 78.300 \text{ Kip}$$

$$\text{Selección Min } \{ \phi R_{n1}, \phi R_{n2} \} = 37.927 \text{ Kip} \\ \text{Controla el desgarro}$$

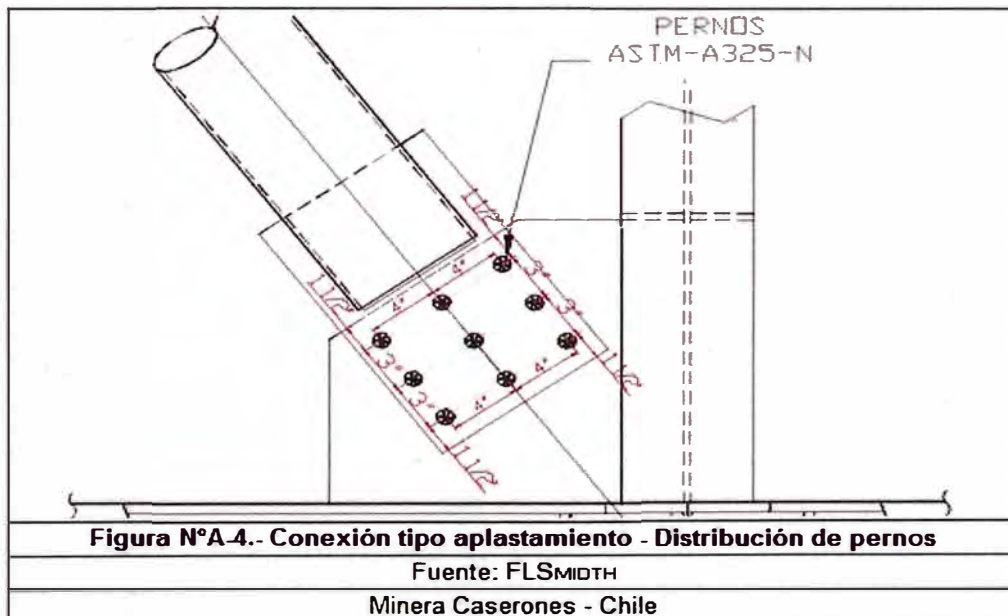
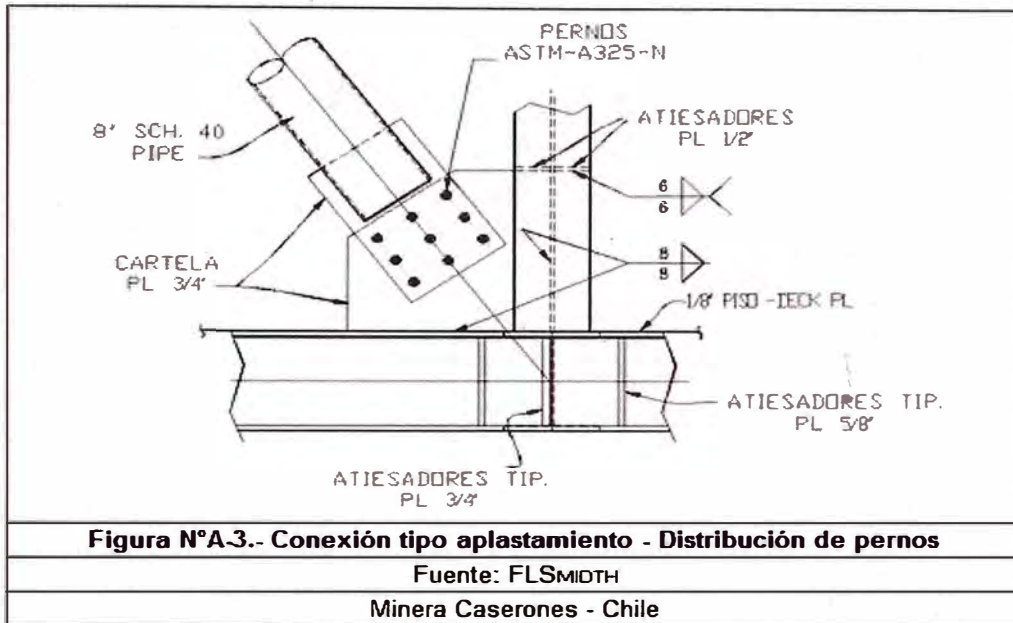
Entonces quien controla el diseño es :

$$\text{Min } \{ \text{Resistencia al corte del perno, Resistencia al aplastamiento} \} \\ = 31.7925 \text{ Kip} \\ \text{Rige la resistencia al corte}$$

Por lo tanto la cantidad de pernos es:

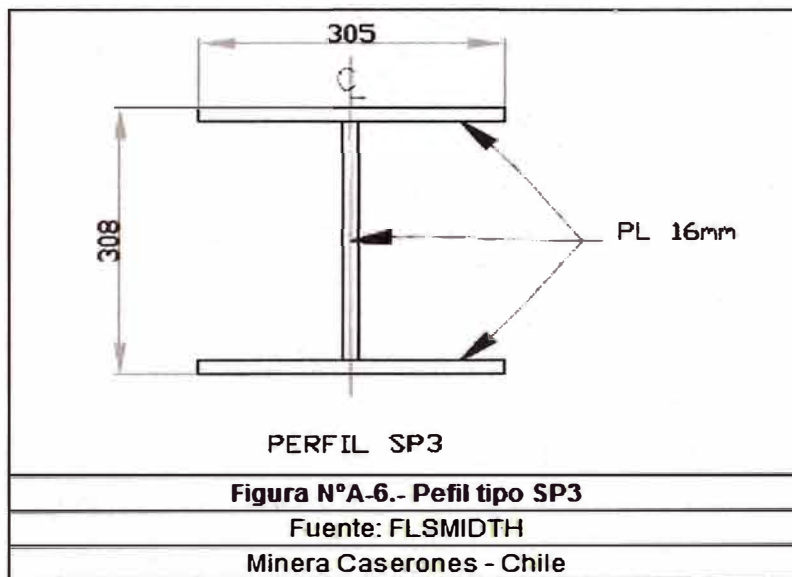
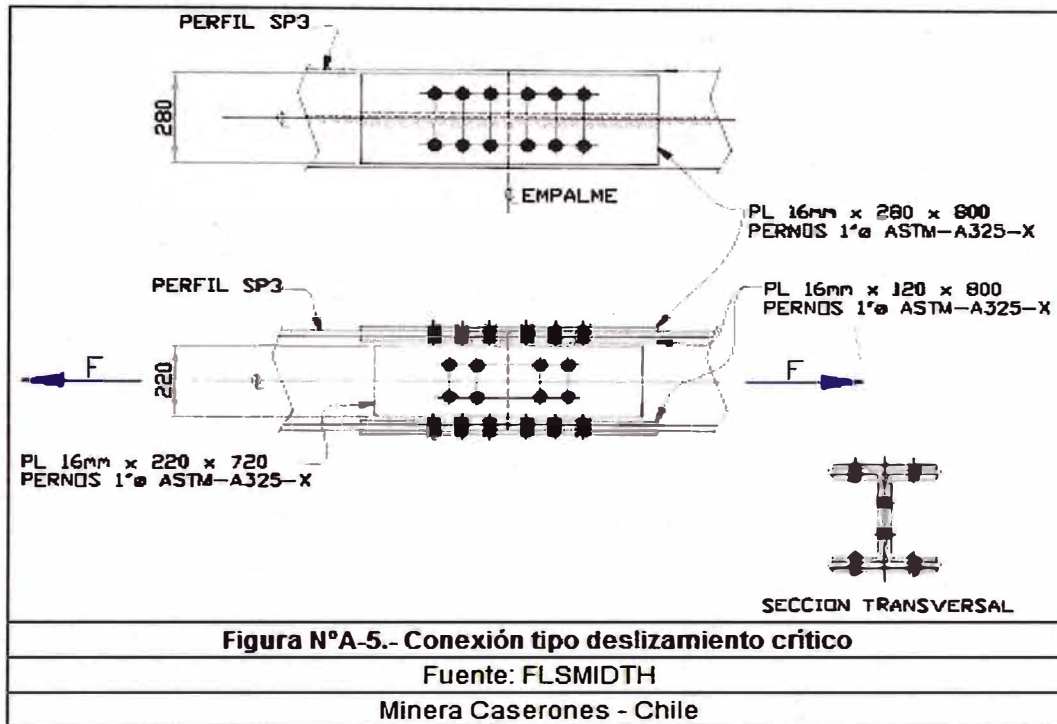
$$\text{N° pernos} = Pu / (\phi R_n) = 8 \text{ Pernos}$$

Ver Figura N° A-3 y Figura A-4.



**ANEXO 4: DISEÑO DE CONEXIÓN TIPO DESLIZAMIENTO CRÍTICO**

Se tiene la siguiente conexión tipo deslizamiento crítico perteneciente a una estructura reticulada, ver Figura N° A-5 y Figura N° A-6. Se requiere determinar la cantidad de pernos de calidad, ASTM-A325-X de 1", que son necesarios para la conexión.



**Datos:**

1-Perfil viga fabricada. Planchas de acero calidad ASTM-A572, Grado 50.

Sección:

$$\begin{aligned} bf &= 305 \text{ mm} \\ tf &= 16 \text{ mm} \\ d &= 308 \text{ mm} \\ tw &= 16 \text{ mm} \\ Ag &= 14176 \text{ mm}^2 \\ Ag &= 21.973 \text{ in}^2 \end{aligned}$$

2-Cubre placa (planchas), acero calidad ASTM-A36.

$$\begin{aligned} e &= 16 \text{ mm} && \text{Espesor de Plancha} \\ e &= 0.63 \text{ in} \end{aligned}$$

3-Perforaciones estándar.

**Desarrollo:**

Perfil viga fabricada. Planchas de acero calidad ASTM-A572, Grado 50. De la Tabla 2.3 del Manual del AISC, se tiene que:

$$\begin{aligned} F_y &= 50 \text{ ksi} && \text{Esfuerzo de fluencia} \\ F_u &= 65 \text{ ksi} && \text{Esfuerzo último de tracción} \end{aligned}$$

Cubre placa (planchas), acero calidad ASTM-A36. De la Tabla 2.3 del Manual del AISC, se tiene que:

$$\begin{aligned} F_y &= 36 \text{ ksi} && \text{Esfuerzo de fluencia} \\ F_u &= 58 \text{ ksi} && \text{Esfuerzo último de tracción} \end{aligned}$$

Pernos, calidad ASTM-A325-X. De la Tabla J3.2, de la Especificación ANSI/AISC-360-10, se tiene que:

$$\begin{aligned} d &= 1 \text{ in} && \text{Diámetro nominal del perno} \\ F_{nt} &= 90 \text{ ksi} && \text{Resistencia nominal en tracción} \\ F_{nv} &= 68 \text{ ksi} && \text{Resistencia nominal en corte} \end{aligned}$$

Pernos, calidad ASTM-A325-X. De la Tabla 7.1, del Manual del AISC, se tiene que:

$$A_b = 0.785$$

Perforaciones estándar (STD). De la Tabla J3.3, de la Especificación ANSI/AISC 360-10, se tiene que:

$$\begin{aligned} d &= 1 \text{ in} && \text{Diámetro nominal del perno} \\ d_h &= 1 \frac{1}{16} \text{ in} && \text{Diámetro de la perforación} \end{aligned}$$

**Asumiendo que el estado límite del perfil en tracción es la fluencia, se tiene que:**

$$\begin{aligned} \phi P_n &= && \text{Resistencia a la tracción} \\ \phi P_n &= \phi * A_g * F_y && \text{Ecuación D2.1, ANSI/AISC 360-10} \\ \phi P_n &= \mathbf{988.778 \text{ Kip}} && \phi = \mathbf{0.9} \text{ (L.R.F.D.)} \\ P_u &= \mathbf{988.778 \text{ Kip}} \end{aligned}$$

**Resistencia al deslizamiento entre planchas inducido por un perno:**

$$\begin{aligned} \phi R_n &= \phi * u * D_u * h_f * T_b * N_s && \text{Ecuación J3.4, ANSI/AISC 360-10} \\ &&& \phi = \mathbf{1.00} \text{ (L.R.F.D.)} \end{aligned}$$

De la Tabla J3.1, de la Especificación ANSI/AISC 360-10, se obtiene que:

$$T_b = \mathbf{51.00 \text{ kip}} \quad \text{Pretensión mínima para perno de 1"}$$

De la Sección J3.8, se obtiene que:

$$\begin{aligned} u &= \mathbf{0.30} && \text{Coeficiente de Ficción para Clase A} \\ D_u &= \mathbf{1.13} && \text{Multiplicador} \\ h_f &= \mathbf{1.00} && \text{Factor de relleno} \\ N_s &= \mathbf{2.00} && \text{Número de planos de corte} \end{aligned}$$

Entonces:

$$\phi P_n = \mathbf{34.578 \text{ kip}}$$

$$\text{N}^\circ \text{ Pernos} = P_u / (\phi R_n) = \mathbf{29 \text{ Pernos}}$$

Considerando una distribución uniforme de pernos en la conexión, se tiene lo siguiente:

$$\text{N}^\circ \text{ pernos} = \mathbf{32}$$

(Ver Figura N° A-7)



**Verificación por Aplastamiento:**

$$\phi R_n = \phi 1.2 L_c * t * F_u \leq \phi 2.4 d * t * F_u$$

Ecuación J3.6a, ANSI/AISC 360-10

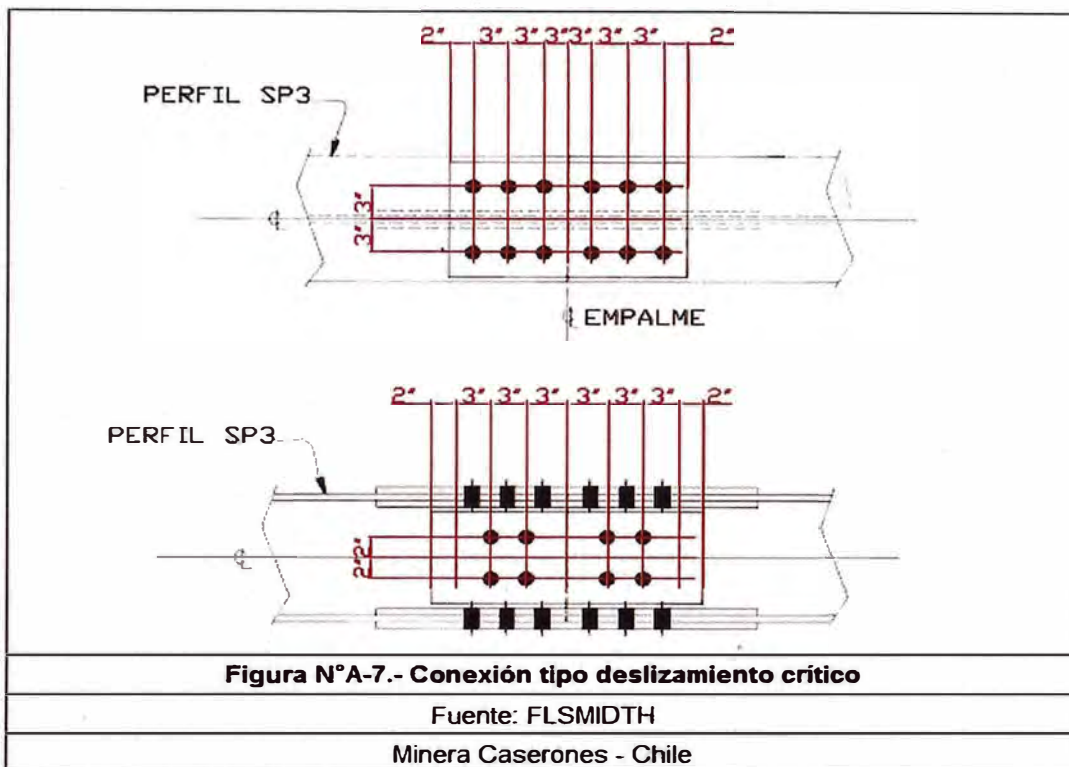
$$\phi = 0.75 \text{ (L.R.F.D.)}$$

Espaciamiento mínimo entre pernos =  $3d = 3 \text{ in}$

Según Sección J3.3 ANSI /AISC 360-10

Distancia al borde =  $2 \text{ in}$

Según Tabla J3.4, ANSI/AISC 360-10



Para un perno exterior:

$L_{ce} = 1.469 \text{ in}$       Dist. al borde de un perno exterior

Para un perno interior:

$L_{ci} = 1.938 \text{ in}$       Dist. entre bordes-pernos interiores

Selección  $\text{Min} \{ L_{ce}, L_{ci} \} = 1.469 \text{ in}$

1.469

Reemplazando en:

$$\phi R_n = \phi 1.2 L_c * t * F_u \leq \phi 2.4 d * t * F_u$$

$$\begin{aligned} \phi R_{n1} &= \phi 1.2 L_c * t * F_u && \text{Controla el desgarro} \\ \phi R_{n2} &= \phi 2.4 d * t * F_u && \text{Controla el ovalamiento} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \phi R_{n1} &= 48.295 && \text{Kip} \\ \phi R_{n2} &= 65.764 && \text{Kip} \end{aligned}$$

$$\text{Selección Min } \{ \phi R_{n1}, \phi R_{n2} \} = 48.295 \text{ Kip}$$

**Controla el desgarro**

De lo anterior, la Resistencia al aplastamiento de la conexión es:  
(N° Pernos / 2) \* Min {  $\phi R_{n1}$ ,  $\phi R_{n2}$  }

$$= 772.724 \text{ Kip}$$

Comparando la Resistencia al aplastamiento y Pu.  
Verificando que Pu sea menor o igual que la Resistencia al aplastamiento  
**= NO CUMPLE**

Nueva distribución y cantidad de pernos:

$$\text{N° pernos} = 44$$

La nueva Resistencia al aplastamiento de la conexión es:  
(N° Pernos / 2) \* Min {  $\phi R_{n1}$ ,  $\phi R_{n2}$  }

$$= 1,062.496 \text{ Kip}$$

Comparando la nueva Resistencia al aplastamiento y Pu.  
Verificando que Pu sea menor o igual que la Resistencia al aplastamiento  
**= CUMPLE**

**Verificación al corte:**

$$\begin{aligned} \phi R_n &= \phi * F_{nv} * A_b && \text{Ecuación J3.1, ANSI/AISC 360-10} \\ \phi R_n &= \phi * F_{nv} * A_b * (N^\circ \text{pernos}/2) \\ \phi R_n &= 880.770 \text{ Kip} && \phi = 0.75 \text{ (L.R.F.D.)} \end{aligned}$$

Comparando la Resistencia al corte y Pu.  
Verificando que Pu sea menor o igual que la Resistencia al corte.  
**= NO CUMPLE**

Nueva distribución y cantidad de pernos:

$$\text{N}^\circ \text{ pernos} = 56$$

La nueva Resistencia al corte es:

$$\phi R_n = \phi * F_{nv} * A_b$$

Ecuación J3.1, ANSI/AISC 360-10

$$\phi R_n = \phi * F_{nv} * A_b * (\text{N}^\circ \text{pernos}/2)$$

$$\phi R_n = 1,120.980 \text{ Kip} \quad \phi = 0.75 \text{ (L.R.F.D.)}$$

Comparando la nueva Resistencia al corte y Pu.

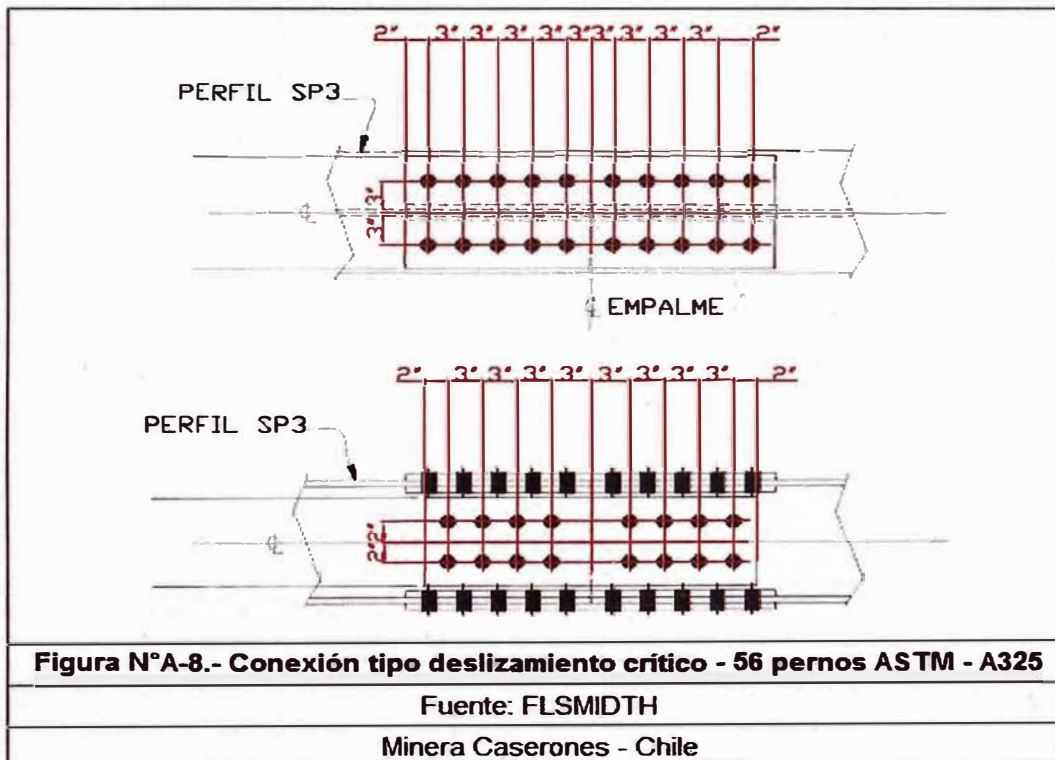
Verificando que Pu sea menor o igual que la Resistencia al corte.

= **CUMPLE**

Por lo tanto, de todo lo anterior, la cantidad de pernos es:

$$\text{N}^\circ \text{ pernos} = 56$$

(Ver Figura N° A-8)



**Table 1-14  
Pipe  
Dimensions and Properties**



**PIPE**

Shape	Nom- inal Wt.	Dimensions		Nominal Wall Thick- ness	Design Wall Thick- ness	Area	D/t	I	S	r	J	Z
		Outside Dia- meter	Inside Dia- meter									
	lb/ft	in.	in.	in.	in.	in. <sup>2</sup>	in. <sup>4</sup>	in. <sup>3</sup>	in.	in. <sup>4</sup>	in. <sup>3</sup>	
<b>Standard Weight (Std.)</b>												
Pipe 12 Std.	49.6	12.8	12.0	0.375	0.349	13.6	36.5	262	41.0	4.39	523	53.7
Pipe 10 Std.	40.5	10.8	10.0	0.365	0.340	11.1	31.6	151	28.1	3.68	302	36.9
Pipe 8 Std.	28.6	8.63	7.98	0.322	0.300	7.85	28.8	68.1	15.8	2.95	136	20.8
Pipe 6 Std.	19.0	6.63	6.07	0.280	0.261	5.22	25.4	26.5	7.99	2.25	52.9	10.6
Pipe 5 Std.	14.6	5.56	5.05	0.258	0.241	4.03	23.1	14.3	5.14	1.88	28.6	6.83
Pipe 4 Std.	10.8	4.50	4.03	0.237	0.221	2.97	20.4	6.82	3.03	1.51	13.6	4.05
Pipe 3 1/2 Std.	9.12	4.00	3.55	0.226	0.211	2.51	19.0	4.52	2.26	1.34	9.04	3.03
Pipe 3 Std.	7.58	3.50	3.07	0.216	0.201	2.08	17.4	2.85	1.63	1.17	5.69	2.19
Pipe 2 1/2 Std.	5.80	2.88	2.47	0.203	0.189	1.59	15.2	1.45	1.01	0.952	2.89	1.37
Pipe 2 Std.	3.66	2.38	2.07	0.154	0.143	1.00	16.6	0.627	0.528	0.791	1.25	0.713
Pipe 1 1/2 Std.	2.72	1.90	1.61	0.145	0.135	0.750	14.1	0.293	0.309	0.626	0.586	0.421
Pipe 1 1/4 Std.	2.27	1.66	1.38	0.140	0.130	0.620	12.8	0.184	0.222	0.543	0.368	0.305
Pipe 1 Std.	1.68	1.32	1.05	0.133	0.124	0.460	10.6	0.0830	0.126	0.423	0.166	0.177
Pipe 3/4 Std.	1.13	1.05	0.824	0.113	0.105	0.310	10.0	0.0350	0.0671	0.336	0.0700	0.0942
Pipe 1/2 Std.	0.850	0.840	0.622	0.109	0.101	0.230	8.32	0.0160	0.0388	0.264	0.0320	0.0555
<b>Extra Strong (x-Strong)</b>												
Pipe 12 x-Strong	65.5	12.8	11.8	0.500	0.465	17.9	27.4	339	53.2	4.35	678	70.2
Pipe 10 x-Strong	54.8	10.8	9.75	0.500	0.465	15.0	23.1	199	37.0	3.64	398	49.2
Pipe 8 x-Strong	43.4	8.63	7.63	0.500	0.465	11.9	18.5	100	23.1	2.89	199	31.0
Pipe 6 x-Strong	28.6	6.63	5.76	0.432	0.403	7.88	16.4	38.3	11.6	2.20	76.6	15.6
Pipe 5 x-Strong	20.8	5.56	4.81	0.375	0.349	5.72	15.9	19.5	7.02	1.85	39.0	9.50
Pipe 4 x-Strong	15.0	4.50	3.83	0.337	0.315	4.14	14.3	9.12	4.05	1.48	18.2	5.53
Pipe 3 1/2 x-Strong	12.5	4.00	3.36	0.318	0.296	3.44	13.5	5.94	2.97	1.31	11.9	4.07
Pipe 3 x-Strong	10.3	3.50	2.90	0.300	0.280	2.83	12.5	3.70	2.11	1.14	7.40	2.91
Pipe 2 1/2 x-Strong	7.67	2.88	2.32	0.276	0.257	2.11	11.2	1.83	1.27	0.930	3.66	1.77
Pipe 2 x-Strong	5.03	2.38	1.94	0.218	0.204	1.39	11.6	0.827	0.696	0.771	1.65	0.964
Pipe 1 1/2 x-Strong	3.63	1.90	1.50	0.200	0.186	1.00	10.2	0.372	0.392	0.610	0.744	0.549
Pipe 1 1/4 x-Strong	3.00	1.66	1.28	0.191	0.178	0.830	9.33	0.231	0.278	0.528	0.462	0.393
Pipe 1 x-Strong	2.17	1.32	0.957	0.179	0.166	0.600	7.92	0.101	0.154	0.410	0.202	0.221
Pipe 3/4 x-Strong	1.48	1.05	0.742	0.154	0.143	0.410	7.34	0.0430	0.0818	0.325	0.0860	0.119
Pipe 1/2 x-Strong	1.09	0.840	0.546	0.147	0.137	0.300	6.13	0.0190	0.0462	0.253	0.0380	0.0686
<b>Double-Extra Strong (xx-Strong)</b>												
Pipe 8 xx-Strong	72.5	8.63	6.88	0.875	0.816	20.0	10.6	154	35.8	2.78	308	49.9
Pipe 6 xx-Strong	53.2	6.63	4.90	0.864	0.805	14.7	8.23	63.5	19.2	2.08	127	27.4
Pipe 5 xx-Strong	38.6	5.56	4.06	0.750	0.699	10.7	7.96	32.2	11.6	1.74	64.4	16.7
Pipe 4 xx-Strong	27.6	4.50	3.15	0.674	0.628	7.64	7.17	14.7	6.53	1.39	29.4	9.50
Pipe 3 xx-Strong	18.6	3.50	2.30	0.600	0.559	5.16	6.26	5.79	3.31	1.06	11.6	4.89
Pipe 2 1/2 xx-Strong	13.7	2.88	1.77	0.552	0.514	3.81	5.59	2.78	1.94	0.854	5.56	2.91
Pipe 2 xx-Strong	9.04	2.38	1.50	0.436	0.406	2.51	5.85	1.27	1.07	0.711	2.54	1.60



### Table 2-3 Applicable ASTM Specifications for Various Structural Shapes

Steel Type	ASTM Designation	F <sub>y</sub> Min. Yield Stress (ksi)	F <sub>u</sub> Tensile Stress <sup>a</sup> (ksi)	Applicable Shape Series											
				W	M	S	HP	C	MC	L	HSS		Pipe		
											Rect.	Round			
Carbon	A36	36	58-80 <sup>b</sup>	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
	A53 Gr. B	35	60	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
	A500	Gr. B	42	58	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
			46	58	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
		Gr. C	46	62	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
			50	62	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	A501	36	58	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
	A529 <sup>c</sup>	Gr. 50	50	65-100	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Gr. 55		55	70-100	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
High-Strength Low-Alloy	A572	Gr. 42	42	60	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
		Gr. 50	50	65 <sup>d</sup>	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
		Gr. 55	55	70	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
		Gr. 60 <sup>e</sup>	60	75	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
		Gr. 65 <sup>e</sup>	65	80	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
	A618 <sup>f</sup>	Gr. I & II	50 <sup>g</sup>	70 <sup>g</sup>	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
		Gr. III	50	65	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
	A913	50	50 <sup>h</sup>	60 <sup>h</sup>	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
60		60	75	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
65		65	80	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
70		70	90	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
A992	50-65 <sup>i</sup>	65 <sup>i</sup>	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
Corrosion Resistant High-Strength Low-Alloy	A242	42 <sup>j</sup>	63 <sup>j</sup>	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
		46 <sup>k</sup>	67 <sup>k</sup>	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
		50 <sup>l</sup>	70 <sup>l</sup>	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
	A588	50	70	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
	A847	50	70	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		

■ = Preferred material specification.  
 ■ = Other applicable material specification, the availability of which should be confirmed prior to specification.  
 □ = Material specification does not apply.

<sup>a</sup> Minimum unless a range is shown.  
<sup>b</sup> For shapes over 426 lb/ft, only the minimum of 58 ksi applies.  
<sup>c</sup> For shapes with a flange thickness less than or equal to 1 1/2 in. only. To improve weldability a maximum carbon equivalent can be specified (per ASTM Supplementary Requirement S78). If desired, maximum tensile stress of 90 ksi can be specified (per ASTM Supplementary Requirement S79).  
<sup>d</sup> If desired, maximum tensile stress of 70 ksi can be specified (per ASTM Supplementary Requirement S91).  
<sup>e</sup> For shapes with a flange thickness less than or equal to 2 in. only.  
<sup>f</sup> ASTM A618 can also be specified as corrosion-resistant; see ASTM A618.  
<sup>g</sup> Minimum applies for walls nominally 3/4-in. thick and under. For wall thicknesses over 3/4 in., F<sub>y</sub> = 46 ksi and F<sub>u</sub> = 67 ksi.  
<sup>h</sup> If desired, maximum yield stress of 65 ksi and maximum yield-to-tensile strength ratio of 0.85 can be specified (per ASTM Supplementary Requirement S75).  
<sup>i</sup> A maximum yield-to-tensile strength ratio of 0.85 and carbon equivalent formula are included as mandatory in ASTM A992.  
<sup>j</sup> For shapes with a flange thickness greater than 2 in. only.  
<sup>k</sup> For shapes with a flange thickness greater than 1 1/2 in. and less than or equal to 2 in. only.  
<sup>l</sup> For shapes with a flange thickness less than or equal to 1 1/2 in. only.



**Table 7-1**  
**Available Shear**  
**Strength of Bolts, kips**

Nominal Bolt Diameter $d_b$ , in.					$5/8$		$3/4$		$7/8$		1	
Nominal Bolt Area, in. <sup>2</sup>					0.307		0.442		0.601		0.785	
ASTM Desig.	Thread Cond.	$F_{nv}/\Omega$ (ksi)	$\phi F_{nv}$ (ksi)	Load- ing	$r_n/\Omega_v$	$\phi_v r_n$	$r_n/\Omega_v$	$\phi_v r_n$	$r_n/\Omega_v$	$\phi_v r_n$	$r_n/\Omega_v$	$\phi_v r_n$
		ASD	LRFD		ASD	LRFD	ASD	LRFD	ASD	LRFD	ASD	LRFD
A325 F1852	N	24.0	36.0	S	7.36	11.0	10.6	15.9	14.4	21.6	18.8	28.3
		D	14.7	22.1	21.2	31.8	28.9	43.3	37.7	56.5		
	X	30.0	45.0	S	9.20	13.8	13.3	19.9	18.0	27.1	23.6	35.3
		D	18.4	27.6	26.5	39.8	36.1	54.1	47.1	70.7		
A490	N	30.0	45.0	S	9.20	13.8	13.3	19.9	18.0	27.1	23.6	35.3
		D	18.4	27.6	26.5	39.8	36.1	54.1	47.1	70.7		
	X	37.5	56.3	S	11.5	17.3	16.6	24.9	22.5	33.8	29.5	44.2
		D	23.0	34.5	33.1	49.7	45.1	67.6	58.9	88.4		
A307	-	12.0	18.0	S	3.68	5.52	5.30	7.95	7.22	10.8	9.42	14.1
		D	7.36	11.0	10.6	15.9	14.4	21.6	18.8	28.3		
Nominal Bolt Diameter $d_b$ , in.					$1\frac{1}{8}$		$1\frac{1}{4}$		$1\frac{3}{8}$		$1\frac{1}{2}$	
Nominal Bolt Area, in. <sup>2</sup>					0.994		1.23		1.48		1.77	
ASTM Desig.	Thread Cond.	$F_{nv}/\Omega$ (ksi)	$\phi F_{nv}$ (ksi)	Load- ing	$r_n/\Omega_v$	$\phi_v r_n$	$r_n/\Omega_v$	$\phi_v r_n$	$r_n/\Omega_v$	$\phi_v r_n$	$r_n/\Omega_v$	$\phi_v r_n$
		ASD	LRFD		ASD	LRFD	ASD	LRFD	ASD	LRFD	ASD	LRFD
A325 F1852	N	24.0	36.0	S	23.9	35.8	29.5	44.2	35.6	53.5	42.4	63.6
		D	47.7	71.6	58.9	88.4	71.3	107	84.8	127		
	X	30.0	45.0	S	29.8	44.7	36.8	55.2	44.5	66.8	53.0	79.5
		D	59.6	89.5	73.6	110	89.1	134	106	159		
A490	N	30.0	45.0	S	29.8	44.7	36.8	55.2	44.5	66.8	53.0	79.5
		D	59.6	89.5	73.6	110	89.1	134	106	159		
	X	37.5	56.3	S	37.3	55.9	46.0	69.0	55.7	83.5	66.3	99.4
		D	74.6	112	92.0	138	111	167	133	199		
A307	-	12.0	18.0	S	11.9	17.9	14.7	22.1	17.8	26.7	21.2	31.8
		D	23.9	35.8	29.5	44.2	35.6	53.5	42.4	63.6		
<b>ASD</b>	<b>LRFD</b>											
$\Omega_v = 2.00$	$\phi_v = 0.75$											

**Table 7-2**  
**Available Tensile**  
**Strength of Bolts, kips**

Nominal Bolt Diameter $d_b$ , in.		$5/8$		$3/4$		$7/8$		1		
Nominal Bolt Area, in. <sup>2</sup>		0.307		0.442		0.601		0.785		
ASTM Desig.	$F_{nt}/\Omega$ (ksi)	$\phi F_{nt}$ (ksi)	$r_n/\Omega$	$\phi r_n$	$r_n/\Omega$	$\phi r_n$	$r_n/\Omega$	$\phi r_n$	$r_n/\Omega$	$\phi r_n$
	ASD	LRFD	ASD	LRFD	ASD	LRFD	ASD	LRFD	ASD	LRFD
A325 & F1852	45.0	67.5	13.8	20.7	19.9	29.8	27.1	40.6	35.3	53.0
A490	56.5	84.8	17.3	26.0	25.0	37.4	34.0	51.0	44.4	66.6
A307	22.5	33.8	6.90	10.4	9.94	14.9	13.5	20.3	17.7	26.5
Nominal Bolt Diameter $d_b$ , in.		$1\ 1/8$		$1\ 1/4$		$1\ 3/8$		$1\ 1/2$		
Nominal Bolt Area, in. <sup>2</sup>		0.994		1.23		1.48		1.77		
ASTM Desig.	$F_{nt}/\Omega$ (ksi)	$\phi F_{nt}$ (ksi)	$r_n/\Omega$	$\phi r_n$	$r_n/\Omega$	$\phi r_n$	$r_n/\Omega$	$\phi r_n$	$r_n/\Omega$	$\phi r_n$
	ASD	LRFD	ASD	LRFD	ASD	LRFD	ASD	LRFD	ASD	LRFD
A325 & F1852	45.0	67.5	44.7	67.1	55.2	82.8	66.8	100	79.5	119
A490	56.5	84.8	56.2	84.2	69.3	104	83.9	126	99.8	150
A307	22.5	33.8	22.4	33.5	27.6	41.4	33.4	50.1	39.8	59.6
ASD		LRFD								
$\Omega_v = 2.00$		$\phi_v = 0.75$								

## **ANEXO 5: ARCHIVO DE FOTOS**

El siguiente archivo de fotos, son referentes al Montaje Electromecánico de la Correa Transportadora del Proyecto Minero Caserones, ubicado en la Provincia de Copiapó, III Región (Atacama), Chile. Propiedad de la Minera Lumina Cooper Chile S.A.

## ARCHIVO DE FOTOS



**Figura N°A-9.- Estructura de una galería para la correa transportadora**

Fuente: GyM S.A.

Minera Caserones - Chile



**Figura N°A-10.- Montaje de una galería para la correa transportadora**

Fuente: GyM S.A.

Minera Caserones - Chile





Figura N°A-11.- Montaje de una estructura de apoyo (cepa) para las galerías

Fuente: GyM S.A.

Minera Caserones - Chile

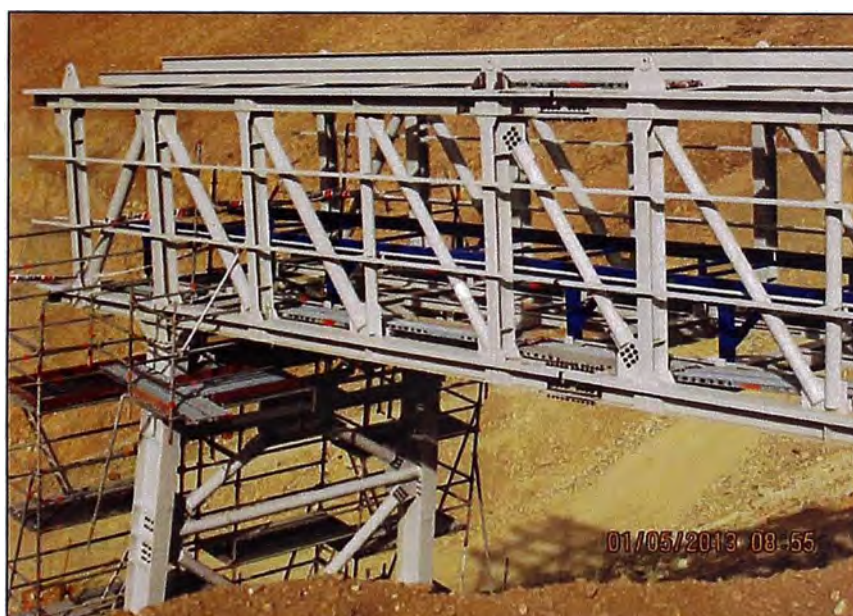


Figura N°A-12.- Instalación de la correa transportadora (Azul)

Fuente: GyM S.A.

Minera Caserones - Chile





**Figura N°A-13.- Vista Panorámica – Estructura total para correa transportadora (Overland)**

Fuente: GyM S.A.

Minera Caserones - Chile



**Figura N°A-14.- Extremo final de estructura para la correa transportadora (Sector Stacker)**

Fuente: GyM S.A.

Minera Caserones - Chile