

Recomendación CIRSOC 305
Ministerio de Planificación Federal,
Inversión Pública y Servicios
Secretaría de Obras Públicas de la Nación

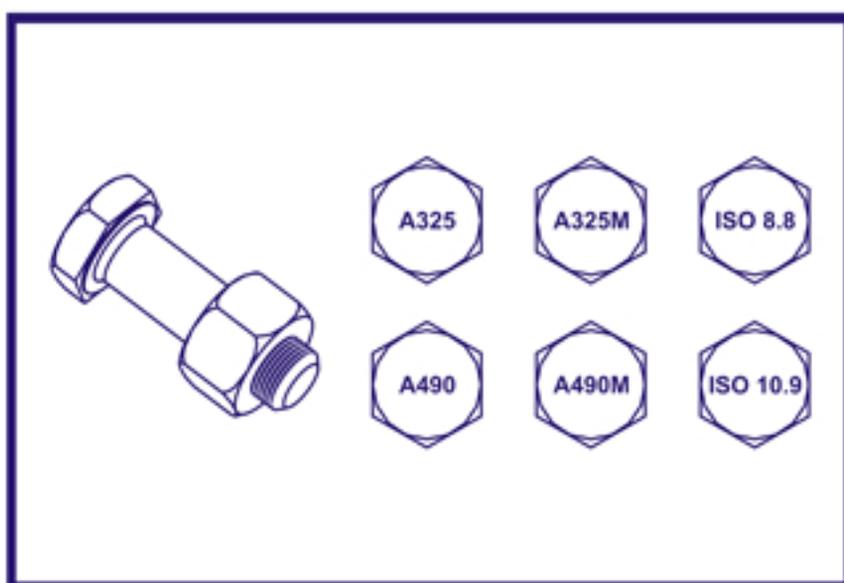
INTI

Instituto Nacional de
Tecnología Industrial



CIRSOC

Centro de Investigación de los
Reglamentos Nacionales de
Seguridad para las Obras Civiles



***COMENTARIOS A LA
RECOMENDACIÓN PARA
UNIONES ESTRUCTURALES
CON BULONES DE ALTA
RESISTENCIA***

Julio 2007

***COMENTARIOS A LA
RECOMENDACIÓN PARA
UNIONES ESTRUCTURALES
CON BULONES DE
ALTA RESISTENCIA***

EDICION JULIO 2007



**Balcarce 186 1° piso - Of. 138
(C1064AAD) Buenos Aires – República Argentina
TELEFAX. (54 11) 4349-8520 / 4349-8524**

**E-mail: cirsoc@inti.gov.ar
cirsoc@mecon.gov.ar**

INTERNET: www.inti.gov.ar/cirsoc

Primer Director Técnico († 1980): Ing. Luis María Machado

Directora Técnica: Inga. Marta S. Parmigiani

Coordinadora Área Acciones: Inga. Alicia M. Aragno

Área Estructuras de Hormigón: Ing. Daniel A. Ortega

Área Administración, Finanzas y Promoción: Lic. Mónica B. Krotz

Área Venta de Publicaciones: Sr. Néstor D. Corti

© 2009

**Editado por INTI
INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGÍA INDUSTRIAL
Av. Leandro N. Alem 1067 – 7° piso - Buenos Aires. Tel. 4515-5000/5001**

**Queda hecho el depósito que fija la ley 11.723. Todos los derechos, reservados. Prohibida la reproducción parcial o total sin autorización escrita del editor. Impreso en la Argentina.
Printed in Argentina.**



ORGANISMOS PROMOTORES

Secretaría de Obras Públicas de la Nación
Subsecretaría de Vivienda de la Nación
Instituto Nacional de Tecnología Industrial
Instituto Nacional de Prevención Sísmica
Ministerio de Hacienda, Finanzas y Obras Públicas de la Provincia del Neuquén
Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires
Dirección Nacional de Vialidad
Vialidad de la Provincia de Buenos Aires
Consejo Interprovincial de Ministros de Obras Públicas
Cámara Argentina de la Construcción
Consejo Profesional de Ingeniería Civil
Cámara Industrial de Cerámica Roja
Asociación de Fabricantes de Cemento Pórtland
Techint
Acindar
Instituto Argentino de Normalización

MIEMBROS ADHERENTES

Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón
Asociación Argentina de Hormigón Estructural
Asociación Argentina de Hormigón Elaborado
Asociación Argentina del Bloque de Hormigón
Asociación de Ingenieros Estructurales
Cámara Argentina de Empresas de Fundaciones de Ingeniería Civil
Centro Argentino de Ingenieros
Instituto Argentino de Siderurgia
Telefónica de Argentina
Transportadora Gas del Sur
Sociedad Central de Arquitectos
Sociedad Argentina de Ingeniería Geotécnica
Quasdam Ingeniería
Colegio de Ingenieros de la Provincia de Buenos Aires
Cámara Argentina del Aluminio y Metales Afines

RECONOCIMIENTO ESPECIAL

El **INTI-CIRSOC** agradece muy especialmente a las Autoridades del **Research Council on Structural Connections (RCSC)** por habernos permitido adoptar como base para el desarrollo de esta Recomendación el documento "*Specification for the Structural Joints using ASTM A 325 or A 490 Bolts*", editado el 23 de junio de 2000.

**ASESORES QUE INTERVINIERON EN LA REDACCIÓN DE
LOS**

**COMENTARIOS A LA
RECOMENDACIÓN PARA
UNIONES ESTRUCTURALES
CON BULONES DE
ALTA RESISTENCIA**

CIRSOC 305

**Ing. Nora E. Moncada
Ing. Antonio D. L. Coloccini
Ing. Juan Carlos Martínez
Ing. Bruno A. Coloccini
Ing. Nuria Ferrero**

COMISION PERMANENTE DE ESTRUCTURAS DE ACERO DE INTI-CIRSOC

Coordinador

Ing. Gabriel R. Troglia UNIVERSIDAD NACIONAL DE CORDOBA, DEPARTAMENTO ESTRUCTURAS, FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS FISICAS Y NATURALES
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA, FACULTAD DE ARQUITECTURA URBANISMO Y DISEÑO

Integrantes:

Ing. Francisco Pedrazzi INSTITUTO ARGENTINO DE SIDERURGIA

Ing. Horacio Rezk UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES, FACULTAD DE INGENIERÍA

Ing. Arnaldo Mallamaci UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN JUAN, FACULTAD DE INGENIERIA

Ing. Alejandro Sesin TECHINT S.A.

Ing. Gustavo Darin UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES, FACULTAD DE INGENIERÍA - U.T.N. FACULTAD REGIONAL BS. AS. - ASOCIACIÓN DE INGENIEROS ESTRUCTURALES

Ing. Juan C. Reimundin UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUCUMÁN, FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y TECNOLOGIA

Inga. Nora Moncada UNIVERSIDAD NACIONAL DE ROSARIO, FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, INGENIERIA Y AGRIM., PROFESORA TITULAR CONSTRUCCIONES METÁLICAS II

Ing. Juan Carlos Piter UNIVERSIDAD TECNOLOGICA NACIONAL, FACULTAD REGIONAL CONCEPCIÓN DEL URUGUAY

Ing. Hector Auad UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUCUMÁN, FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y TECNOLOGÍA

Ing. Alejandro Giuliano INPRES - INSTITUTO NACIONAL DE PREVENCIÓN SÍSMICA

Ing. Fructuoso Berganza CÁMARA DE FABRICANTES DE CAÑOS Y TUBOS DE ACERO

Ing. Adrián Puente Vergara
Ing. Osvaldo R. Arario
Ing. Faustino Amelong ACINDAR S. A.

COMISION PERMANENTE DE ESTRUCTURAS DE ACERO DE INTI-CIRSOC

(continuación)

Ing. Daniel García Gei	UNIVERSIDAD TECNOLOGICA NACIONAL, FACULTAD REGIONAL MENDOZA
Ing. Pablo Alra	TENARIS-SIDERCA
Ing. Raul Cardoso	MARBY S.A.
Ing. Pablo Ruival	M. ROYO S.A.
Ing. Heriberto Martin	TUBOS ARGENTINOS S.A.
Ing. Oliva Hernández	IRAM
Ing. Oscar Troviano	MINISTERIO DE HACIENDA, FINANZAS Y OBRAS PÚBLICAS DE LA PROVINCIA DEL NEUQUEN, SUBSECRETARÍA DE OBRAS Y SERVICIOS PÚBLICOS
Ing. Enrique Trivelli	TUBHIER S.A.
Ing. Francisco Crisafulli	UNIVERSIDAD NACIONAL DE CUYO, FACULTAD DE INGENIERIA
Ing. José M Vidmar	INVITADO ESPECIAL
Ing. Antonio Coloccini	INVITADO ESPECIAL
Ing. Bruno Coloccini	INVITADO ESPECIAL
Ing. Eduardo Asta	INVITADO ESPECIAL

PRÓLOGO

Esta Recomendación CIRSOC ha sido desarrollada en base a la Especificación para Uniones Estructurales con Bulones ASTM A325 ó A490, editada el 23 de Junio de 2000 por el Research Council on Structural Connections (RCSC), considerando las calidades de bulones disponibles en el país y sus aplicaciones en las estructuras.

En el texto de esta Recomendación se hace referencia a especificaciones y códigos internacionales vigentes al momento de desarrollar este documento (año 2007), advirtiendo a los profesionales usuarios de su contenido que dichos documentos pueden tener actualizaciones y correcciones posteriores a la publicación de esta edición.

Por este motivo, el INTI-CIRSOC no asume responsabilidad alguna en relación con dicho material, salvo la de hacer referencia a él e incorporarlo como referencia al momento de la publicación de esta Recomendación CIRSOC 305-2007.

Se advierte a los Proyectistas o Diseñadores Estructurales que en esta Recomendación CIRSOC 305 se adoptan como unidades de medidas de longitud **el milímetro (mm)** y de superficie **el milímetro al cuadrado (mm²)**, lo que difiere del Reglamento CIRSOC 301-2005, donde se adopta el **centímetro (cm)** y el **centímetro al cuadrado (cm²)** respectivamente.

ÍNDICE

SÍMBOLOGIA	
GLOSARIO	
COMENTARIOS AL CAPÍTULO 1. REQUISITOS GENERALES	1
C 1.1. CAMPO DE VALIDEZ	1
C 1.2. ACCIONES, FACTORES DE CARGA Y COMBINACIONES DE ACCIONES	1
C 1.4. DOCUMENTACIÓN TÉCNICA	2
COMENTARIOS AL CAPÍTULO 2. COMPONENTES DE LOS PASADORES	3
C2.1. CERTIFICACIÓN DEL FABRICANTE DE LOS COMPONENTES DE LOS PASADORES	3
C 2.2. ALMACENAMIENTO DE LOS COMPONENTES DE LOS PASADORES	3
C 2.3. BULONES ESTRUCTURALES DE CABEZA HEXAGONAL	4
C 2.4. TUERCAS DE CABEZA HEXAGONAL	11
C 2.7. BULONES DE TORQUE CONTROLADO POR CORTE DE BULÓN	11
C 2.8. PASADORES DE DISEÑO ALTERNATIVO	11
COMENTARIOS AL CAPÍTULO 3. ELEMENTOS ABULONADOS	13
C 3.1. CHAPAS CONECTADAS	13
C 3.2. SUPERFICIES DE CONTACTO	13
C 3.2.1. Uniones con ajuste sin juego y uniones pretensadas	13
C 3.2.2. Uniones con deslizamiento crítico	13
C 3.3. AGUJEROS PARA BULONES	16
C 3.3.1. Agujeros normales	16
C 3.3.2. Agujeros holgados	16
C 3.3.3. Agujeros ovalados cortos	17
C 3.3.4. Agujeros ovalados largos	17
C 3.4. REBABAS	17
COMENTARIOS AL CAPÍTULO 4. TIPOS DE UNIÓN	19
C 4.1. UNIONES CON AJUSTE SIN JUEGO	20
C 4.2. UNIONES PRETENSADAS	20

C 4.3.	UNIONES DE DESLIZAMIENTO CRÍTICO	21
COMENTARIOS AL CAPÍTULO 5. ESTADOS LÍMITES EN UNIONES ABULONADAS		23
C 5.1.	RESISTENCIAS DE DISEÑO AL CORTE Y A LA TRACCIÓN	24
C 5.2.	COMBINACIÓN DE CORTE Y TRACCIÓN	26
C 5.3.	RESISTENCIA DE DISEÑO AL APLASTAMIENTO DE LA CHAPA EN LOS AGUJEROS PARA BULONES	26
C 5.4.	RESISTENCIA DE DISEÑO AL DESLIZAMIENTO	27
C 5.5.	FATIGA POR TRACCIÓN	31
COMENTARIOS AL CAPÍTULO 6. USO DE ARANDELAS		33
C 6.2.	UNIONES PRETENSADAS Y UNIONES DE DESLIZAMIENTO CRÍTICO	33
COMENTARIOS AL CAPÍTULO 7. VERIFICACIÓN PREVIA A LA INSTALACIÓN		35
C 7.1.	CALIBRADOR DE LA TENSIÓN	35
C 7.2.	ENSAYOS REQUERIDOS	35
COMENTARIOS AL CAPÍTULO 8. INSTALACIÓN		37
C 8.1.	UNIONES CON AJUSTE SIN JUEGO	37
C 8.2.	UNIONES PRETENSADAS	37
C 8.2.1.	Pretensado con giro de tuerca	38
C 8.2.2.	Pretensado con llave calibrada	39
C 8.2.3.	Pretensado con indicador directo de la tensión	39
COMENTARIOS AL CAPÍTULO 9. INSPECCIÓN		43
C 9.1.	UNIONES CON AJUSTE SIN JUEGO	43
C 9.2.	UNIONES PRETENSADAS	43
C 9.2.1.	Pretensado con giro de tuerca	43
C 9.2.2.	Pretensado con llave calibrada	44
C 9.2.3.	Pretensado con indicador directo de la tensión	44
C 9.3.	UNIONES DE DESLIZAMIENTO CRÍTICO	44

COMENTARIOS AL CAPÍTULO 10. ARBITRAJE	45
COMENTARIOS AL APÉNDICE A. MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL COEFICIENTE DE FRICCIÓN DE LOS RECUBRIMIENTOS UTILIZADOS EN LAS UNIONES ABULONADAS	A1-1
APÉNDICE A1. REQUISITOS GENERALES	A1-1
C A1.1. PROPÓSITO Y ALCANCE	A1-1
C A1.2. Definición de las variables esenciales	A1-1
C A1.2.2. Espesor del recubrimiento	A1-1
APÉNDICE A2. CHAPAS PARA ENSAYO Y RECUBRIMIENTO DE LAS PROBETAS	A2-3
C A2.1. CHAPAS PARA ENSAYO	A2-3
APÉNDICE A3. ENSAYOS DE DESLIZAMIENTO	A3-5
C A3.1 EQUIPO PARA EL ENSAYO DE COMPRESIÓN	A3-5
C A3.1.1 Sistema para la aplicación de la fuerza de apriete	A3-5
C A3.6. MÉTODOS DE ENSAYO ALTERNATIVOS	A3-5
APÉNDICE A4. ENSAYO DE FLUENCIA LENTA EN TRACCIÓN	A4-7
C A4.2. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO	A4-7
BIBLIOGRAFÍA	9

SIMBOLOGÍA

En esta Recomendación se utilizan los siguientes símbolos.

- A_b** área de la sección transversal en base al diámetro nominal del bulón, en mm^2 .
- D** factor de probabilidad de deslizamiento como se describe en el artículo 5.4.2.
- D_u** factor que refleja la relación entre la pretensión media del bulón instalado y la pretensión mínima especificada para el bulón T_b como se describe en el artículo 5.4.1.
- F_n** resistencia nominal (por unidad de superficie), en MPa.
- F_u** resistencia a la tracción mínima especificada (por unidad de superficie), en MPa.
- F_y** tensión de fluencia especificada para el acero que se está utilizando .El término "tensión de fluencia" se refiere en esta Recomendación, al punto mínimo de fluencia (para aquellos aceros que presentan un punto de fluencia), o a la tensión de fluencia especificada (para aquellos aceros que no presentan un punto de fluencia), en MPa.
- I** momento de inercia del miembro armado respecto al eje de pandeo (ver el comentario al artículo 5.4.), en mm^4 .
- L** longitud total del elemento armado (ver el Comentario al artículo 5.4.), en mm.
- L_c** distancia libre, en la dirección de la fuerza, entre el borde del agujero y el borde del agujero adyacente o el borde del material, en mm.
- N_b** número de bulones en la unión.
- P_u** resistencia axial requerida a la compresión, en kN; fuerza de compresión axial en el miembro armado debida a acciones mayoradas (ver el comentario al artículo 5.4.), en kN.
- Q** momento estático de un componente respecto al eje de pandeo del elemento armado (ver el comentario al artículo 5.4.), en mm^3 .
- R_n** resistencia nominal, (N o kN según se indique en cada caso).
- R_s** resistencia al deslizamiento bajo acción de servicio, en kN.
- T** fuerza de tracción aplicada en servicio, en kN.
- T_b** pretensión mínima especificada para el bulón (para uniones pretensadas como se especifica en la Tabla 8.1), en kN.
- T_u** resistencia requerida a la tracción debida a acciones mayoradas, (en N o kN según se indique en cada caso).

- V_u resistencia requerida al corte debida a acciones mayoradas, (en N o kN según se indique en cada caso).
- d diámetro nominal del bulón, (en mm o pulg según se indique en cada caso).
- t espesor del material conectado, en mm.
- t' espesor total de los suplementos (ver el artículo 5.1.), en mm.
- k_s coeficiente de fricción para una muestra individual determinado conforme al Apéndice A.
- ϕ factor de resistencia
- ϕR_n resistencia de diseño, (en N o kN según se indique en cada caso).
- μ coeficiente medio de fricción.

Equivalencia de unidades:

$$1 \text{ MPa} = 1 \text{ N/mm}^2 = 10 \text{ Kg/ cm}^2$$

GLOSARIO

A continuación se definen los términos más utilizados en esta Recomendación, los que aparecen en el texto con letra cursiva cada vez que se los utiliza con el fin de advertirle al usuario que dicho término está definido en este Glosario.

Coefficiente medio de fricción, μ . Relación entre la carga de corte friccional en la **superficie de contacto** y la fuerza normal total cuando se produce el deslizamiento.

Conexión. Conjunto de una o más *uniones* que se utilizan para transmitir fuerzas entre dos o más miembros.

Contacto firme. Condición que existe en una **superficie de contacto** cuando las chapas están sólidamente asentadas una contra otra, pero no necesariamente en contacto continuo.

Contratista. Persona o personas responsables de proveer, preparar y ensamblar los componentes de los pasadores y las partes conectadas descriptas en esta Recomendación.

Director Técnico. Persona responsable de garantizar que el **contratista** haya cumplido los requisitos de esta Recomendación en sus trabajos.

Fabricante. Persona o personas que producen los componentes del **medio de unión**.

Guía. Hace referencia al documento *Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints /Guía de Criterios de Diseño para Uniones Abulonadas y Remachadas/*, 2° Edición (Kulak y otros., 1987).

Inicio de las tareas. Cualquier momento anterior a la instalación de los *bulones de alta resistencia* en una **conexión** estructural, de acuerdo con el Capítulo 8.

Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings (LRFD): Criterio de diseño por factores de carga y resistencia en base a los estados límites de resistencia y de servicio; adoptado por el American Institute of Steel Construction (AISC)

Longitud de apriete. Espesor total de las chapas de una **unión** que atraviesa el bulón, excluyendo arandelas o indicadores directos de la tensión.

Lote. En esta Recomendación el término **lote** se debe utilizar como se indica en cada norma IRAM que se señala en la siguiente Tabla.

Producto	Norma (*)	Ver definición de lote en el artículo (*)
Bulones	IRAM 5453 (ASTM A325)	(9.4)
	IRAM correspondiente (ASTM A325M)	(9.4)
	IRAM 5464 (ISO 8.8)	
	IRAM 5455 (ASTM A490)	(11.3.2 ó 11.4.2)
	IRAM correspondiente (ASTM A490M)	
	IRAM 5464 (ISO 10.9)	
Tuercas	IRAM 5456 (ASTM A563)	(9.2)
	IRAM correspondiente (ASTM A563M)	(9.2)
	IRAM 5465 (ISO 4775)	
Arandelas	IRAM 5457 (ASTM F436)	(9.2)
	IRAM correspondiente (ASTM F436M)	
Indicadores directos de la tensión tipo arandela compresible	IRAM correspondiente (ASTM F959)	(10.2.2)
	IRAM correspondiente (ASTM F959M)	(10.2.2)
(*) Las normas mencionadas se encuentran en redacción en base a los documentos internacionales que se señalan entre paréntesis, los que se podrán utilizar hasta que las mencionadas normas IRAM estén vigentes. En la columna "Ver definición de lote", el número entre paréntesis corresponde al artículo de la norma ASTM mencionada en la 2° columna dado que aún no se dispone de número de artículo de las normas IRAM.		

Medio de unión. Conjunto formado por los componentes de un pasador que se entregan, ensayan e instalan como una unidad.

Observación de rutina. Monitoreo periódico del trabajo en progreso.

Pasador. Conjunto formado por bulón, arandela y tuerca que sirve para transmitir fuerzas.

Proveedor. Parte que suministra los componentes de los pasadores a la parte que los empleará.

Proyectista Estructural. Profesional responsable del Proyecto y cálculo de la estructura y de las autorizaciones requeridas en esta Recomendación (ver el artículo 1.4 y el Comentario correspondiente).

Resistencia de diseño. ϕR_n , resistencia proporcionada por un elemento o conexión; producto entre la resistencia nominal R_n y el factor de resistencia ϕ .

Resistencia nominal. Capacidad de una estructura o componente de resistir los efectos de las cargas, de acuerdo con lo calculado empleando las resistencias especificadas de los materiales y sus dimensiones y ecuaciones derivadas a partir de principios aceptados de la mecánica estructural, o mediante ensayos en obra o en laboratorio de modelos a

escala, considerando adecuadamente los efectos del modelado y las diferencias entre las condiciones en el laboratorio y en la obra.

Resistencia requerida. Efecto de las acciones que actúan sobre un elemento o *conexión* determinado mediante análisis estructural a partir de las acciones mayoradas utilizando la combinación crítica de acciones.

Suficiente acoplamiento de la rosca. Prolongándose el extremo del bulón más allá de la superficie exterior de la tuerca, o al menos hasta estar en el mismo plano que la misma; condición que desarrolla la resistencia del bulón.

Superficie de contacto. Plano de contacto entre dos chapas de una *unión*.

Superficie de contacto galvanizada. *Superficie de contacto* que se ha galvanizado por inmersión en caliente.

Superficie de contacto no recubierta. Superficie de contacto que no ha sido imprimada, pintada ni galvanizada y que está libre de laminillo, suciedad y otros materiales extraños.

Superficie de contacto recubierta. *Superficie de contacto* que ha sido imprimada, imprimada y pintada o protegida contra la corrosión, excepto mediante galvanizado por inmersión en caliente.

Unión. Conjunto abulonado con o sin cubrejuntas que se utiliza para unir dos elementos estructurales.

Unión con ajuste sin juego. *Unión* en la cual los bulones se han instalado de acuerdo con el artículo 8.1. La condición de ajuste sin juego es la 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 de cola (tuerca) común para poner las chapas en **contacto firme**.

Unión de Deslizamiento Crítico. *Unión* que transmite fuerzas de corte o fuerzas de corte en combinación con fuerzas de tracción, en las cuales los bulones se han instalado de acuerdo con el artículo 8.2., de manera que haya una pretensión en el bulón instalado (fuerza de apriete sobre las *superficies de contacto*) y en las cuales las **superficies de contacto** se han preparado adecuadamente de manera de proporcionar una resistencia al deslizamiento calculable.

Unión Pretensada. *Unión* que transmite fuerzas de corte y/o de tracción en la cual los bulones se han instalado de acuerdo con el artículo 8.2 a fin de aplicar una pretensión al bulón instalado.

Unión sometida a corte y aplastamiento. *Unión con ajuste sin juego o unión pretensada* con bulones que transmiten fuerzas de corte y para las cuales los criterios de diseño se basan en la resistencia al corte de los bulones y la resistencia al aplastamiento de los materiales conectados.

COMENTARIOS AL CAPÍTULO 1.

REQUISITOS GENERALES

C 1.1. CAMPO DE VALIDEZ

Esta Recomendación considera fundamentalmente **bulones de alta resistencia** de dos niveles de resistencia:

Nivel 1: IRAM 5453 (ASTM A325), IRAM correspondiente (ASTM A325M), IRAM 5464-Clase 8.8 (ISO 7412 C8.8); y

Nivel 2: IRAM 5455 (ASTM A490), IRAM correspondiente (ASTM A490M), IRAM 5464-Clase ISO 10.9 (ISO 7412 C10.9).

Su contenido alcanza al diseño, instalación e inspección de **uniones** estructurales de acero. Esta Recomendación no es de aplicación para pasadores de otras composiciones químicas, propiedades mecánicas o tamaños. Tampoco se aplica cuando la **longitud de apriete** abarca materiales diferentes al acero; ni tampoco a las varillas de anclaje.

Esta Recomendación se refiere solamente al comportamiento de los pasadores en **uniones** estructurales de acero y a los aspectos del material conectado que afectan a este comportamiento. Otros aspectos del diseño y fabricación de las **conexiones** son igualmente importantes y no se deben descuidar. Para obtener más información general sobre el diseño y los temas relacionados con el uso de **bulones de alta resistencia** y el material conectado, consultar los textos actualizados sobre diseño de acero y la publicación *Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints*, 2° Edición (Kulak y otros, 1987).

C 1.2. ACCIONES, FACTORES DE CARGA Y COMBINACIONES DE ACCIONES

Esta Recomendación fue redactada con el formato del diseño por factores de carga y resistencia (Estados Límites, LRFD), que constituye un método para dimensionar los componentes estructurales de manera tal que cuando la estructura esté sometida a todas las combinaciones de acciones adecuadas, no se supere ninguno de los estados límites aplicables. Cuando por algún motivo una estructura o componente estructural ya no satisfaga el propósito para el cual fue diseñado, se dice que ha superado un estado límite. Los estados límites últimos se refieren a la máxima capacidad de soportar carga y se relacionan con la seguridad de las construcciones. Los estados límites de servicio generalmente se refieren al comportamiento bajo condiciones normales de servicio y por lo general no se relacionan con la resistencia ni con la seguridad. El término "resistencia" abarca tanto los estados límites últimos como los estados límites de servicio.

La **resistencia de diseño**, ϕR_n , es igual a la **resistencia nominal** R_n multiplicada por el factor de resistencia ϕ . La acción mayorada es la sumatoria de las cargas nominales multiplicadas por los factores de carga, teniendo en cuenta debidamente las

combinaciones de acciones que consideren la improbabilidad de la ocurrencia simultánea de todas las cargas transitorias con sus respectivas intensidades máximas. La **resistencia de diseño**, ϕR_n de cada componente o conjunto estructural debe ser mayor o igual que la **resistencia requerida** (V_u , T_u , etc.).

Aunque en esta Recomendación no se especifican explícitamente las acciones, factores de carga y combinaciones de acciones, los factores de resistencia utilizados en la presente se basan en los correspondientes Reglamentos CIRSOC e INPRES-CIRSOC presentados a partir del año 2005. Si el diseño está determinado por otros criterios de carga, los factores de carga especificados en la presente se deben ajustar de manera apropiada.

C 1.4. DOCUMENTACIÓN TÉCNICA

En este Capítulo se presenta un resumen de toda la información que el **Proyectista o Diseñador Estructural** debe proveer en la documentación técnica. La referencia entre paréntesis incluida en cada uno de los ítems listados indica la ubicación del requisito en esta Recomendación. Además, en esta Recomendación se requiere la aprobación del **Proyectista o Diseñador Estructural** en los siguientes casos:

- (1) Para la reutilización de bulones **Nivel 1** no galvanizados (artículo 2.3.3.);
- (2) Para el uso de dispositivos indicadores alternativos tipo arandela que difieren de aquellos que cumplen con los requisitos indicados en los documentos ASTM F959 ó ASTM F959M (hasta tanto se redacten las normas IRAM correspondientes), incluyendo los correspondientes requisitos de instalación e inspección proporcionados por el **Fabricante** (artículo 2.6.2.);
- (3) Para el uso de pasadores de diseño alternativo, incluyendo los correspondientes requisitos de instalación e inspección proporcionados por el **Fabricante** (artículo 2.8.);
- (4) Para el uso de recubrimientos en las superficies de contacto de las **uniones de deslizamiento crítico** que proveen un **coeficiente medio de fricción** determinado conforme al Apéndice A pero que no son **Clase A** ni **Clase B** (artículo 3.2.2.(b));
- (5) Para el uso de corte térmico en la producción de los agujeros para los bulones (artículo 3.3.);
- (6) Para el uso de agujeros holgados (artículo 3.3.2.), ovalados cortos (artículo 3.3.3.) u ovalados largos (artículo 3.3.4.) en vez de agujeros normales;
- (7) Para el uso de un valor de D_u diferente a **1,13** (artículo 5.4.1.); y
- (8) Para el uso de un valor de D diferente a **0,80** (artículo 5.4.2.).

COMENTARIOS AL CAPÍTULO 2.

COMPONENTES DE LOS PASADORES

C 2.1. CERTIFICACIÓN DEL *FABRICANTE* DE LOS COMPONENTES DE LOS PASADORES

Se requieren certificaciones emitidas por el *Fabricante* o *Proveedor* de los *bulones de alta resistencia*, tuercas, arandelas y otros componentes del *medio de unión*, para garantizar que los componentes a utilizar sean identificables y cumplan con los requisitos de las normas IRAM aplicables o equivalentes.

C 2.2. ALMACENAMIENTO DE LOS COMPONENTES DE LOS PASADORES

Para los *bulones de alta resistencia*, tuercas, arandelas y otros componentes de los pasadores se especifican requisitos de *almacenamiento protegido*. La intención de estos requisitos es evitar tanto como sea posible la modificación de la condición de los componentes tal como fueron entregados hasta el momento de su instalación. Esto incluye:

- (1) Almacenamiento de los componentes de los pasadores en recipientes cerrados para protegerlos de la suciedad y la corrosión;
- (2) Almacenamiento de los recipientes cerrados en un sitio protegido;
- (3) Retirar los componentes de los pasadores del *almacenamiento protegido* sólo a medida que son necesarios; y
- (4) Regresar rápidamente los componentes no utilizados al *almacenamiento protegido*.

Para simplificar su fabricación, impedir la corrosión y facilitar la instalación, el *Fabricante* puede aplicar diferentes recubrimientos y aceites que están presentes en la condición "fabricada". Por lo tanto, para que su instalación pretensada resulte adecuada, la condición de los componentes o *medios de unión* tal como son suministrados no se debe alterar.

Si los componentes de los pasadores se ensucian, se herrumbran o se altera de alguna otra manera la condición en la cual fueron recibidos, puede que no resulten adecuados para su instalación pretensada. También es posible que el *medio de unión* no cumpla los requisitos de verificación previa a la instalación del Capítulo 7. A excepción de algunos pasadores de diseño alternativo (artículo 2.8.), los componentes de los pasadores pueden ser limpiados y lubricados por el *Fabricante* o el montador. Algunos pasadores de diseño alternativo solamente resultan adecuados cuando son lubricados por el *Fabricante*, debido a que la aceptabilidad de su instalación depende de la lubricación específica.

C 2.3. BULONES ESTRUCTURALES DE CABEZA HEXAGONAL

Las normas IRAM 5453 (en redacción en base al documento ASTM A325) e IRAM 5455 (en redacción en base al documento ASTM A490) con diámetros desde 12,7 mm (½ pulg) a 38,1 mm (1½ pulg) y las especificaciones ASTM A325M y ASTM A490M (se redactarán las respectivas normas IRAM) con diámetros desde 12 a 36 mm inclusive, actualmente incluyen requisitos para dos tipos de **bulones de alta resistencia** (de acuerdo con su clasificación metalúrgica).

El **Tipo 1** abarca el acero con contenido medio de carbono para los bulones IRAM 5453 (ASTM A325) y (ASTM A325M), y acero aleado para los bulones IRAM 5455 (ASTM A490) y (ASTM A490M).

El **Tipo 3** abarca los **bulones de alta resistencia** que poseen mejor resistencia a la corrosión atmosférica y mejores características al desgaste por la intemperie. Cuando no se especifica el tipo de bulón, el **Fabricante** puede optar por entregar bulones Tipo 1 ó Tipo 3.

Las correspondientes especificaciones requieren que los bulones estructurales normales de cabeza hexagonal estén marcados de manera distintiva. Además de las marcas obligatorias, el **Fabricante** puede aplicar marcas distintivas adicionales. En la Figura C2.1. se ilustran las marcas obligatorias y algunas marcas opcionales.

Las normas IRAM permiten galvanizar los bulones **Nivel 1** pero no los bulones **Nivel 2**. Tampoco está permitido aplicar zinc a los bulones **Nivel 2** mediante metalizado o procesos mecánicos debido a que el efecto del galvanizado mecánico sobre la fragilización y el agrietamiento retardado de los bulones **Nivel 2** aún no ha sido investigado en profundidad.

Los **bulones de alta resistencia** y las tuercas se deben considerar como un **medio de unión** fabricado. En cuanto a los conjuntos de bulón y tuerca galvanizados por inmersión en caliente, para que los requisitos de esta Recomendación se comprendan y apliquen correctamente, es necesario considerar cuatro factores principales:

- (1) El efecto del proceso de galvanizado por inmersión en caliente sobre las propiedades mecánicas de los aceros de alta resistencia;
- (2) El efecto del sobre-rosado para los recubrimientos galvanizados por inmersión en caliente sobre la resistencia al desgarramiento de la tuerca;
- (3) El efecto del galvanizado y la lubricación sobre el par torsor requerido para el pretensado; y
- (4) Los requisitos para el envío.

Birkemoe y Herrschaft (1970) mostraron que, en la **condición "galvanizada"**, el galvanizado aumenta la fricción entre los filetes de la rosca del bulón y de la tuerca así como la variabilidad de la tensión de pretensado inducida por el par torsor. Si las tuercas están lubricadas se requiere un menor par torsor o momento de apretadura y se obtienen resultados más consistentes. Por lo tanto, para los bulones **Nivel 1** galvanizados se requiere que un bulón galvanizado y una tuerca galvanizada y lubricada que se utilizarán en una **unión** de acero se ensamblen utilizando una arandela galvanizada y sean ensayados por el **Proveedor** antes de su envío. Este ensayo debe demostrar que con el lubricante empleado se puede hacer girar la tuerca galvanizada desde la posición de

ajuste sin juego bastante por encima de la rotación requerida para la instalación pretensada sin que se produzca desgarramiento. Este requisito se aplica tanto para los pasadores galvanizados por inmersión en caliente como para aquellos galvanizados mecánicamente. Los requisitos anteriores claramente indican que:

- (1) Las tuercas y los **bulones de alta resistencia** galvanizados se deben tratar como un **medio de unión**;
- (2) Junto con los **bulones de alta resistencia** el **proveedor** debe entregar tuercas lubricadas y ensayadas;
- (3) Las tuercas y los **bulones de alta resistencia** se deben enviar juntos en el mismo recipiente de embarque; y
- (4) Adquirir los **bulones de alta resistencia** galvanizados y las tuercas galvanizadas de diferentes **Proveedores** no satisface la intención de las especificaciones de las normas IRAM ya que claramente no se proveerían el control del sobroscado, los ensayos y la aplicación del lubricante requeridos; tampoco se podría satisfacer el requisito de la responsabilidad del **Proveedor** por el comportamiento del conjunto.

Debido a que algunos de los lubricantes empleados para cumplir los requisitos de las especificaciones son solubles en agua, se aconseja que las tuercas y los **bulones de alta resistencia** galvanizados se transporten y almacenen en bolsas de plástico o en envases de madera o metal sellados. Los envases que contienen pasadores con lubricantes tipo cera de alto punto de fusión no se deben exponer a temperaturas que provocarían la eliminación del lubricante o la modificación de las propiedades del mismo.

Las especificaciones reconocen para los pasadores **Nivel 1**, tanto el proceso de galvanizado por inmersión en caliente (norma IRAM en redacción sobre la base del documento ASTM A153/A153M) como el proceso de galvanizado mecánico (norma IRAM en redacción sobre la base del documento ASTM B695).

Los efectos de estos dos procesos sobre las características del comportamiento y los requisitos para una correcta instalación difieren considerablemente. Por lo tanto, en los comentarios siguientes es necesario observar esta diferencia. De acuerdo con las especificaciones, todos los componentes roscados del **medio de unión** deben ser galvanizados mediante el mismo proceso y la opción del **proveedor** se limita a un proceso por ítem, sin mezclar los procesos en un mismo **lote**. Si se mezclan **bulones de alta resistencia** galvanizados mediante uno de los procesos con tuercas galvanizadas mediante el otro, el resultado puede ser un conjunto imposible de trabajar.

Los aceros con resistencias a la tracción de **1380 MPa** (200 ksi) y superiores se pueden fragilizar si se permite que permanezca hidrógeno en el acero y el acero se somete a elevadas tensiones de tracción. La mínima resistencia a la tracción de los bulones **Nivel 1** es de **725 MPa** (105 ksi) ó **830 MPa** (120 ksi), dependiendo de su diámetro, y los límites impuestos a la dureza máxima tienen por resultado resistencias a la tracción bastante por debajo del rango crítico. La máxima resistencia a la tracción de los bulones **Nivel 2** se fijó en **1175 MPa** (170 ksi)(A490) y **1200 MPa** (A490M) para que exista un margen ligeramente superior al **10 %** por debajo de los **1380 MPa** (200 ksi). Sin embargo, debido a que los **Fabricantes** deben fijarse un objetivo de producción ligeramente por encima del

Bulón / Tuerca	Tipo 1	Tipo 3
Bulón IRAM (ASTM A325)	Las tres líneas radiales separadas 120° son opcionales 	
Bulón IRAM (ASTM A490)		
Tuerca IRAM (ASTM A563)	 Los arcos indican grado C	 Los arcos con el "3" indican grado C3
	Marca de grado DH 	Marca de grado DH3 

Bulón / Tuerca	Tipo 1	Tipo 3
Bulón IRAM (ASTM A325M)	Las tres líneas radiales separadas 120° son opcionales 	
Bulón IRAM (ASTM A490M)		
Tuerca IRAM (ASTM A563M)	Marca de grado 8S 	Marca de grado 8S3 
	Marca de grado 10S 	Marca de grado 10S3 

Bulón IRAM (ISO 8.8)	
Bulón IRAM (ISO 10.9)	
Tuerca IRAM (ISO 4775)	Marca de Clase 8 grado B 
	Marca de Clase 10 grado B 

Notas:

XYZ representa la marca de identificación del fabricante.

Figura C.2.1. Marcas requeridas para conjuntos aceptables de bulón y tuerca.

mínimo requerido, es dable esperar que los bulones **Nivel 2** estén próximos al rango crítico de resistencia a la tracción. En el caso de los **bulones de alta resistencia** no galvanizados esto no constituye un motivo de preocupación. Sin embargo, si el bulón se galvaniza por inmersión en caliente, la fractura frágil retardada es motivo de preocupación debido a la posibilidad de que se introduzca hidrógeno durante el baño químico limpiador del proceso de galvanizado por inmersión en caliente y el posterior "apresamiento" de hidrógeno por el recubrimiento de cinc. También existe la posibilidad de la absorción catódica de hidrógeno provocada por el proceso de corrosión en ciertos ambientes agresivos.

Los bulones **Nivel 1** y **Nivel 2** se fabrican conforme a las dimensiones especificadas en las normas indicadas en artículo 2.3.2. En la Tabla C.2.1. se indican las dimensiones básicas, las cuales se definen en la Figura C.2.2.

Las principales características geométricas de los bulones estructurales de cabeza hexagonal que los diferencian de los bulones para aplicaciones generales son el tamaño de la cabeza y la longitud no roscada del vástago. La cabeza de los bulones estructurales de cabeza hexagonal está especificada de manera de ser del mismo tamaño que una tuerca hexagonal del mismo diámetro nominal. De este modo el operario puede utilizar la misma llave ya sea para la cabeza del bulón y/o la tuerca. Con la excepción específica de los bulones **A325T** y **A325MT** totalmente roscados discutidos a continuación, los bulones estructurales de cabeza hexagonal poseen longitudes roscadas menores que los bulones para aplicaciones generales. Haciendo que la longitud del vástago del bulón sea la dimensión de control, ha sido posible excluir la rosca de todos los planos de corte cuando así se desea, excepto para el caso de partes exteriores delgadas adyacentes a la tuerca. Las menores longitudes roscadas de los bulones estructurales de cabeza hexagonal tienden a minimizar la porción roscada del bulón dentro de la **longitud de apriete**. En consecuencia, se debe proveer una longitud roscada adecuada entre la tuerca y la cabeza del bulón para permitir una correcta instalación sin que la tuerca se atasque en el último filete de la rosca.

Dependiendo de los incrementos de las longitudes de los bulones entregados, en un conjunto sin arandelas la rosca total se puede extender hacia el interior de la **longitud de apriete** tanto como **9,5 mm** para los **bulones de alta resistencia** de **12,7; 15,9; 19,1; 22,2; 31,8; 38,1 mm** de diámetro y tanto como **12,7 mm** para los **bulones de alta resistencia** de **25,4; 28,6 y 34,9 mm** de diámetro. Cuando el espesor de la chapa más próxima a la tuerca es menor que las dimensiones de **9,5 mm** y **12,7 mm** indicadas anteriormente, aún puede ser posible excluir los filetes de la rosca del plano de corte, cuando sea necesario, dependiendo de la combinación específica de longitud del bulón, **longitud de apriete** y número de arandelas utilizadas bajo la tuerca (Carter, 1996). Si fuera necesario, se podría especificar el siguiente incremento de longitud de bulón con un número suficiente de arandelas para excluir los filetes de la rosca del plano de corte y garantizar que el conjunto se pueda instalar incluyendo un número adecuado de filetes dentro de la **longitud de apriete** para su correcta instalación.

Tabla C.2.1. Dimensiones de bulones y tuercas según norma de fabricación

Norma de fabricación	Diámetro nominal del bulón, <i>d</i> , mm	Diámetro nominal del bulón, <i>d</i> , pulg	Dimensiones de los bulones estructurales de cabeza hexagonal			Dimensiones de las tuercas de cabeza hexagonal	
			Ancho en la porción plana, <i>S</i> mm	Altura <i>H₁</i> mm	Longitud roscada <i>T</i> mm	Ancho en la porción plana, <i>S</i> mm	Altura <i>H₂</i> mm
	mm	pulg	mm	mm	mm	mm	mm
IRAM correspondiente (ANSI/ASME B18.2.6)	12,7	1/2	22,22	7,94	25	22,22	12,3
	15,9	5/8	26,99	9,92	32	26,99	15,5
	19,1	3/4	31,75	11,91	35	31,75	18,7
	22,2	7/8	36,50	13,89	38	36,50	21,8
	25,4	1	41,28	15,48	44	41,28	25,0
	28,6	1 1/8	46,04	17,46	51	46,04	28,2
	31,8	1 1/4	50,80	19,84	51	50,80	31,0
	34,9	1 3/8	55,56	21,43	57	55,56	34,1
	38,1	1 1/2	60,33	23,81	57	60,33	37,3

Norma de fabricación	Diámetro nominal del bulón, <i>d</i> mm	Dimensiones de los bulones estructurales de cabeza hexagonal						Dimensiones de las tuercas de cabeza hexagonal			
		Ancho en la porción plana, <i>S</i> mm		Altura <i>H₁</i> mm		Longitud roscada, <i>T</i> mm		Ancho en la porción plana, <i>S</i> mm		Altura <i>H₂</i> mm	
						L<100	L>100				
		mín	máx	mín	máx	Básica		mín	máx	mín	máx
IRAM correspondiente (ANSI/ASME B18.2.3.7M)	12	20,16	21,00	7,05	7,95	25	32	20,16	21,00	11,9	12,3
	16	26,16	27,00	9,25	10,75	31	38	26,16	27,00	16,4	17,1
	20	33,00	34,00	11,60	13,40	36	43	33,00	34,00	19,4	20,7
	22	35,00	36,00	13,10	14,90	38	45	35,00	36,00	22,3	23,6
	24	40,00	41,00	14,10	15,90	41	48	40,00	41,00	22,9	24,2
	27	45,00	46,00	16,10	17,90	44	51	45,00	46,00	26,3	27,6
	30	49,00	50,00	17,65	19,75	49	56	49,00	50,00	29,1	30,7
	36	58,80	60,00	21,45	23,55	56	63	58,80	60,00	35,0	36,6

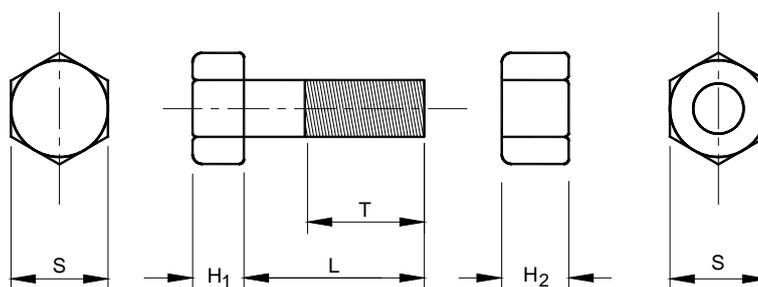


Figura C.2.2. Bulón estructural y tuerca de cabeza hexagonal.

Con la máxima acumulación de tolerancias de todos los componentes del **medio de unión**, el último filete de la rosca podría atravesar el plano de corte para la combinación crítica de longitud de bulón y **longitud de apriete** utilizada para seleccionar las anteriores reglas prácticas sobre espesor de chapa requerido para excluir los filetes de la rosca. Sin embargo, existen dos motivos por los cuales esto no constituye un problema. En primer lugar, es demasiado poco probable que las tolerancias de todos los componentes se acumulen con sus valores máximos y por lo tanto no se justifica su consideración. En segundo lugar, aún cuando ocurriera esta situación de máxima acumulación, la pequeña reducción de la resistencia al corte debida a la presencia del último filete de la rosca (filete incompleto) sería despreciable.

Para los bulones **A325** y **A325M** existe una excepción a los anteriores requisitos sobre longitud de la rosca, no así para los bulones **A490** o **A490M**. Los requisitos suplementarios de la norma IRAM 5453 (en redacción en base al documento ASTM A325 y ASTM A325M) permiten que el comprador especifique un bulón roscado en toda la longitud del vástago cuando la longitud del bulón sea menor o igual que cuatro veces el diámetro nominal. Esta excepción se incluye para mejorar la economía simplificando los pedidos y el control de inventario en la fabricación y montaje de algunas estructuras. Resulta de particular utilidad en las estructuras en las cuales la resistencia de la **conexión** depende de la resistencia al aplastamiento de un material conectado relativamente delgado, antes que de la resistencia al corte del bulón, ya sea con o sin filetes en el plano de corte.

Los **bulones de alta resistencia** cuyo vástago sea totalmente roscado deben estar específicamente marcados con los símbolos identificatorios que correspondan a cada norma de referencia. Ejemplo: los bulones **A325** totalmente roscados se identifican con el símbolo **A325T** y los **A325M** se identifican con **A325MT**.

Para determinar la longitud requerida del bulón, al valor indicado en la Tabla C.2.2. se le debe sumar la **longitud de apriete** (es decir, el espesor total de todos los materiales conectados, excluyendo las arandelas). Por cada arandela descrita en la norma IRAM 5457 (ASTM F436) ó (ASTM F436M) que se utilice se debe agregar **4 mm**; y por cada arandela biselada agregar **8 mm**.

Los valores tabulados consideran adecuadamente las tolerancias de fabricación y también proporcionan **suficiente acoplamiento de la rosca** con la colocación de una tuerca de cabeza hexagonal. La longitud determinada utilizando la Tabla C.2.2. se debe ajustar a los siguientes incrementos: para la serie en pulgadas de **6,4 mm** (en el caso de longitudes mayores a **152 mm**, el incremento será de **12,7 mm**) y en la serie métrica de **5 mm** (para longitudes mayores a **100 mm**, el incremento será de **10 mm**).

La instalación con pretensado implica el alargamiento inelástico de la porción de la longitud roscada comprendida entre la tuerca y el último filete de la rosca. Los bulones **Nivel 1** galvanizados poseen ductilidad suficiente para soportar una instalación con pretensado, pero su ductilidad no tiene la consistencia suficiente como para soportar un segundo pretensado. Sin embargo, los bulones **Nivel 1** no galvanizados poseen ductilidad suficiente para soportar más de una instalación con pretensado. A modo de regla práctica, un bulón **Nivel 1** no galvanizado se puede reutilizar si la tuerca se puede hacer girar sobre los filetes mediante la simple acción manual.

Tabla C.2.2. Incremento para seleccionar la longitud de los bulones

Diámetro nominal del bulón d		Para determinar la longitud requerida para el bulón, agregar a la <i>longitud de apriete</i>
mm	pulg	mm ^{a)}
12,7	(1/2)	17
15,9	(5/8)	22
19,1	(3/4)	25
22,2	(7/8)	28
25,4	(1)	32
28,6	(1 1/8)	38
31,8	(1 ¼)	41
34,9	(1 3/8)	44
38,1	(1 ½)	47
Diámetro nominal del bulón d		Para determinar la longitud requerida para el bulón, agregar a la <i>longitud de apriete</i>
mm		mm ^{a,b)}
12		17
16		20
20		23
22		26
24		27
27		30
30		33
36		39
^{a)} Los valores tabulados no incluyen el espesor de las arandelas. ^{b)} Los valores son para bulones con longitudes de hasta 150 mm. Para bulones con longitudes mayores a 150 mm, adicionar 2 mm a los valores tabulados.		

C 2.4. TUERCAS DE CABEZA HEXAGONAL

Las normas IRAM requieren que las tuercas de cabeza hexagonal tengan marcas distintivas. Algunas marcas son obligatorias. Además de las marcas obligatorias, el **Fabricante** puede aplicar marcas distintivas adicionales. En la Figura C.2.1. se ilustran las marcas obligatorias y algunos ejemplos de marcas opcionales.

El galvanizado por inmersión en caliente afecta la resistencia al desgarramiento del conjunto bulón-tuerca. Esto se debe a que, para acomodar los recubrimientos de cinc relativamente gruesos de espesores no uniformes sobre los filetes de la rosca del bulón, la práctica generalizada consiste en galvanizar por inmersión en caliente la tuerca sin rosca y luego terrajar el sobrante de la tuerca. Esto provoca una reducción del acoplamiento de la rosca con la consiguiente reducción de la resistencia al desgarramiento. Sólo las tuercas endurecidas más resistentes tienen la resistencia adecuada para satisfacer los requisitos IRAM sobre resistencia de los filetes de la rosca luego del sobre-rosado. Por lo tanto, como se muestra en la Tabla 2.1, las únicas tuercas que se pueden utilizar galvanizadas son las especificadas en la norma IRAM 5456 (ASTM A563) de grado **DH**, en (ASTM A563M) de grado **10S** y en la norma IRAM 5465 (ISO 4775) de grado **B** clase **10**. No se debe descuidar este requisito si se adquieren tuercas no galvanizadas que luego se envían a un taller local para su galvanizado por inmersión en caliente. Debido a que mediante el proceso de galvanizado mecánico se obtiene un zincado más uniformemente distribuido y parejo, las tuercas se pueden sobre-rosar antes del galvanizado una cantidad menor que la requerida para el proceso por inmersión en caliente antes del galvanizado.

Las tuercas según norma IRAM 5456 (ASTM A563), (ASTM A563M) y norma IRAM 5465 (ISO 4775) se deben fabricar conforme a las dimensiones especificadas en el artículo 2.4.2. En la Tabla C.2.1 se indican las dimensiones básicas, las cuales se definen en la Figura C.2.2.

C 2.7. BULONES DE TORQUE CONTROLADO POR CORTE DE BULÓN

En la especificación que se ha adoptado de base para desarrollar esta Recomendación (Specification for Structural Joints Using ASTM A325 or A490 Bolts), se detallan los requisitos del pasador de torque controlado por corte de bulón ASTM F1852, a cumplir para su provisión. En esta Recomendación se lo considera como un pasador de diseño alternativo.

C 2.8. PASADORES DE DISEÑO ALTERNATIVO

Cuando el **Fabricante** prepare instrucciones detalladas para la instalación de bulones de diseño alternativo, incluidas en una especificación suplementaria aprobada por el **Proyectista o Diseñador Estructural**, debe especificar, entre otras cosas, el **carácter** y la frecuencia de la verificación requerida previa a la instalación. Como **carácter** se entiende al desarrollo de un proceso detallado de trabajo o instrucciones; como frecuencia se entiende a un número suficiente de veces que se repetirá el proceso para asegurar una correcta verificación durante la etapa previa a la instalación.

COMENTARIOS AL CAPÍTULO 3.

ELEMENTOS ABULONADOS

C 3.1. CHAPAS CONECTADAS

La presencia dentro de la **longitud de apriete** de empaques, materiales aislantes u otros materiales compresibles que no sean los recubrimientos especificados impediría el desarrollo y/o la retención de la tensión de pretensado de los bulones instalados, en caso que ésta fuera necesaria.

La ductilidad de los **medios de unión** con los bulones especificados en esta Recomendación les permite deformarse y adaptarse a una superficie con una pendiente menor o igual que 1:20 con respecto a un plano perpendicular al eje del bulón. Las pendientes más pronunciadas no son recomendables, ya que la flexión localizada resultante disminuye tanto la resistencia como la ductilidad del bulón.

C 3.2. SUPERFICIES DE CONTACTO

C 3.2.1. Uniones con ajuste sin juego y uniones pretensadas

Tanto en las **uniones con ajuste sin juego** como en las **uniones pretensadas** la resistencia última depende del corte transmitido por los bulones y del apoyo de los bulones contra el material conectado. Esta es independiente de cualquier resistencia friccional que pudieran proporcionar las **superficies de contacto**. En consecuencia, ya que la resistencia al deslizamiento no es un factor determinante, está permitido que las **superficies de contacto** no tengan recubrimiento alguno, que estén recubiertas o que estén galvanizadas, independientemente del coeficiente de fricción resultante.

C 3.2.2. Uniones de deslizamiento crítico

Las **uniones de deslizamiento crítico** son aquellas **uniones** cuyas **superficies de contacto** poseen condiciones que, en presencia de una fuerza de apriete provista por pasadores pretensados, resisten una carga de diseño exclusivamente por fricción y sin desplazamiento en las **superficies de contacto**. En consecuencia, es necesario preparar las **superficies de contacto** de manera que efectivamente se logre el comportamiento antideslizante deseado.

Para las **uniones de deslizamiento crítico** se pueden utilizar superficies libres de laminillo (Clase A, ver el artículo 5.4.1.) y superficies de acero limpiadas a chorro. Cuando se las utilizan, es necesario mantener las **superficies de contacto** libres de recubrimientos, incluyendo las pulverizaciones excesivas accidentales.

Con frecuencia las superficies de acero no recubiertas limpiadas a chorro (Clase B, ver el artículo 5.4.1.) se corroen debido a la exposición durante el período comprendido entre su fabricación y su posterior montaje. Bajo las condiciones atmosféricas correspondientes a exposición normal esta corrosión no es perjudicial y en realidad hasta puede incrementar la resistencia al deslizamiento de la **unión**. Yura y otros (1981) descubrieron que el coeficiente de fricción Clase B se podía mantener durante hasta un año antes del montaje de la **unión**.

Polyzois y Frank (1986) demostraron que, para las chapas con espesores comprendidos entre **9,5 mm** y **19,1 mm**, la presión de contacto provocada por la tensión de pretensado de los bulones se concentra sobre las **superficies de contacto** en anillos cerrados alrededor y cerca de los bulones. En este estudio, la presencia de pintura no calificada sobre las **superficies de contacto** a una distancia del borde del agujero del bulón no menor que **25 mm** ni menor que el diámetro del bulón no redujo la resistencia al deslizamiento. Sin embargo, éste probablemente no sería el caso de las **uniones** que involucran materiales de mayor espesor, en particular aquellas con un gran número de bulones ubicados en múltiples líneas; las pretensiones mínimas para los bulones dadas en la Tabla 8.1. podrían no resultar adecuadas para aplanar completamente estos materiales y hacer que estén en **contacto firme** alrededor de cada uno de los bulones. En cambio, la tensión de pretensado del bulón sería equilibrada por la presión de contacto en las regiones de las **superficies de contacto** que están en contacto. Para tener en cuenta ambas posibilidades, esta Recomendación requiere que todas las áreas entre los bulones estén libres de recubrimientos, incluyendo las pulverizaciones excesivas, como se ilustra en la Figura C.3.1.

Como regla práctica, la zona más pequeña libre de recubrimiento se puede disponer y proteger más fácilmente ubicando el enmascarado con respecto al patrón de los agujeros de los bulones y no con respecto a los límites de la totalidad de la **superficie de contacto** cuyas distancias a los bordes son variables e inciertas. Además, la delgada franja de recubrimiento a lo largo del perímetro de la **superficie de contacto** minimiza las operaciones de retoque que se deben realizar en obra sobre el material no recubierto fuera de la **unión**.

Polyzois y Frank (1986) también investigaron los efectos de los diversos grados de pulverización accidental sobre la resistencia al deslizamiento. Se halló que aún una pequeña cantidad de pulverización excesiva de pintura no calificada (es decir, no clasificada como recubrimiento **Clase A** o **Clase B**) dentro del área libre de recubrimiento especificada en las superficies libres de laminillo puede reducir significativamente la resistencia al deslizamiento. Sin embargo, en las superficies limpiadas con chorro, la presencia de una pequeña cantidad de pulverización excesiva no resultó tan perjudicial. Por motivos de simplicidad, **esta Recomendación requiere que se prohíban todas las pulverizaciones accidentales** en las áreas donde se exige que estén libres de recubrimientos en las **uniones de deslizamiento crítico**, independientemente del hecho de que la superficie sea de acero libre de laminillo o de acero limpiado con chorro.

Frank y Yura (1981) demostraron que, para los recubrimientos descritos por un tipo genérico, los coeficientes de fricción no son valores únicos que corresponden a un recubrimiento genérico o producto dado, sino que también dependen del tipo de vehículo utilizado. Las pequeñas diferencias de formulación entre un **Fabricante** y otro o entre un **lote** y otro pueden afectar significativamente los coeficientes de fricción si dentro de un mismo tipo genérico se modifican ciertas variables esenciales. En consecuencia, no

resulta realista asignar a los recubrimientos categorías con diferencias incrementales relativamente pequeñas entre sí exclusivamente en base a una descripción genérica.

Si las **superficies de contacto** de una **unión de deslizamiento crítico** se han de proteger contra la corrosión, es necesario utilizar un recubrimiento calificado. Un recubrimiento calificado es aquél que ha sido ensayado de acuerdo con el Apéndice A, única base para la calificación de cualquier recubrimiento a utilizar con esta Recomendación. Los recubrimientos se pueden calificar de la siguiente manera:

- (1) Recubrimiento **Clase A** como se define en el artículo 5.4.1.;
- (2) Recubrimiento **Clase B** como se define en el artículo 5.4.1; ó
- (3) Recubrimiento con un **coeficiente medio de fricción μ** diferente a **0,33 (Clase A)** pero no mayor que **0,50 (Clase B)**.

Si se modifica cualquiera de las variables esenciales asociadas con la preparación de las superficies, la fabricación de la pintura, el método de aplicación o los requisitos de curado, se debe efectuar una recalificación. Ver Apéndice A.

Frank y Yura (1981) también investigaron el efecto de variar el tiempo entre el momento de recubrir las **superficies de contacto** y el momento de ensamblar la **unión** y pretensar los bulones, a fin de determinar si en la pintura parcialmente curada continuaba el proceso de curado una vez dentro de la **unión** ensamblada durante un período de tiempo. Los resultados indicaron que el curado cesa totalmente en el momento de ensamblar la **unión**, y que la pintura que no estaba totalmente curada en ese momento se comportaba como un lubricante. La resistencia al deslizamiento de las **uniones** ensambladas antes del

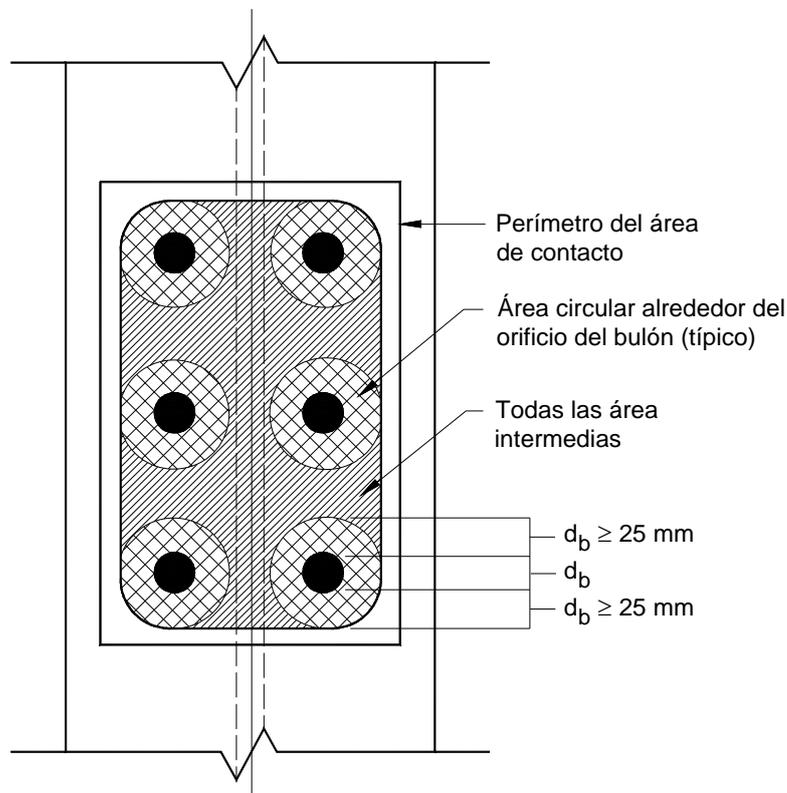


Figura C.3.1. Superficies de contacto de conexiones de deslizamiento crítico pintadas con pinturas no calificadas.

período de tiempo de curado utilizado en los ensayos de calificación se redujo considerablemente. Por lo tanto, el tiempo de curado antes de poner en posición las **superficies de contacto** es un parámetro esencial que debe ser especificado y controlado durante la construcción.

El **coeficiente medio de fricción** correspondiente a las superficies limpias galvanizadas por inmersión en caliente es del orden de **0,19**; para las superficies libres de laminillo este factor es del orden de 0,33. Birkemoe y Herrschaft (1970) demostraron que este **coeficiente medio de fricción** se puede mejorar notablemente mediante tratamientos tales como cepillado manual con cepillos de alambre o un ligero tratamiento con chorro de arenilla. En ambos casos se debe controlar el tratamiento para lograr una rugosidad o estriado visible. El cepillado mecánico no es satisfactorio porque su efecto puede ser el de pulir la superficie y no el de volverla más rugosa; también puede llegar a eliminar el recubrimiento.

La experiencia en obra y los resultados de ensayos demuestran que los conjuntos galvanizados pueden continuar deslizándose bajo cargas sostenidas (Kulak y otros, 1987; págs. 198-208).

Los ensayos de **uniones** galvanizadas por inmersión en caliente sometidas a cargas sostenidas evidenciaron un comportamiento de tipo fluencia lenta que no se observó cuando las cargas aplicadas eran de corta duración o del tipo de cargas que producen fatiga. Ver también el Comentario al Apéndice A.

C 3.3. AGUJEROS PARA BULONES

Las notas al pie de la Tabla 3.1. permiten pequeñas variaciones de las dimensiones de los agujeros para bulones con respecto a las dimensiones nominales. Cuando las dimensiones de los agujeros para bulones son tales que se superan estas variaciones admisibles, el agujero se debe tratar como un agujero del tamaño siguiente.

C 3.3.1 Agujeros normales

Esta Recomendación permite utilizar agujeros **1,6 mm (1/16 pulg)** mayores que el bulón instalado en ellos. Allen y Fisher (1968) demostraron que para los **bulones de alta resistencia** se podrían permitir agujeros de mayor tamaño sin afectar negativamente la resistencia al corte del bulón ni la resistencia al aplastamiento de la chapa del miembro. Sin embargo, es posible que se reduzca la resistencia al deslizamiento debido a que no es posible lograr un pretensado inicial adecuado o a la relajación de la tensión del bulón a medida que el material altamente comprimido, cede en el borde del agujero.

En esta Recomendación los requisitos para los agujeros holgados y ovalados se basan en estos hallazgos y en la preocupación adicional por las consecuencias de un deslizamiento de magnitud considerable si éste se produjera en la dirección del eje mayor del agujero ovalado. Debido a que un incremento en el tamaño del agujero generalmente reduce la superficie neta de un elemento conectado, el uso de agujeros holgados u ovalados está sujeto a la aprobación del **Proyectista o Diseñador Estructural**.

C 3.3.2. Agujeros holgados

Ver el comentario al artículo 3.3.1.

C 3.3.3. Agujeros ovalados cortos

Ver el comentario al artículo 3.3.1.

C 3.3.4. Agujeros ovalados largos

Ver el comentario al artículo 3.3.1.

Cuando los suplementos tipo peine están total y correctamente insertados, su efecto sobre la relajación de la tensión de pretensado de los bulones o sobre el comportamiento de la **conexión** no es igual al comportamiento que presentan los agujeros ovalados largos en una chapa exterior. Si está totalmente insertado, el suplemento proporciona apoyo alrededor de aproximadamente el **75 %** del perímetro del bulón, mientras que con un bulón centrado en un agujero ovalado largo existe una superficie de apoyo bastante mas reducida. Además, los suplementos tipo peine siempre están encerrados a ambos lados por el material conectado, que debería ser efectivo para salvar el espacio entre las lengüetas.

C 3.4. REBABAS

Polyzois y Yura (1985) y McKinney y Zwerneman (1993) demostraron que la presencia de rebabas no modificaba o mejoraba levemente la resistencia al deslizamiento de las **uniones**. Por lo tanto, no es necesario eliminar las pequeñas rebabas (**1,6 mm** o menos) que no impiden asentar sólidamente las partes conectadas. Por otra parte, ensayos paralelos pertenecientes al mismo programa de estudios demostraron que las grandes rebabas (más de **1,6 mm**) podrían provocar un pequeño aumento del giro de tuerca requerido a partir de la condición de ajuste sin juego para lograr la tensión de pretensado especificada con el método de pretensado con giro de tuerca. **Por motivos de simplicidad, esta Recomendación requiere la eliminación de todas las grandes rebabas.**

COMENTARIOS AL CAPÍTULO 4.

TIPOS DE UNIÓN

Si se utilizan bulones no pretensados en el tipo de **unión** en el cual los bulones están solicitados a corte, la carga se transferirá por corte en los bulones y por tensión de aplastamiento en el material conectado. En el estado límite último la falla se producirá por la falla por corte de los bulones, por la falla de aplastamiento del material conectado o por falla del propio elemento. Por otra parte, si en este tipo de **uniones** se utilizan bulones pretensados, la fuerza de fricción que se desarrolla entre las chapas conectadas transmitirá la carga inicialmente. Mientras que no se supere esta fuerza de fricción, en los bulones no hay corte ni hay tensiones de aplastamiento en los componentes conectados. Al aumentar la carga los bulones quedan solicitados a corte y apoyan contra el material conectado, igual que en el caso de los bulones no pretensados. Debido a que la tensión de pretensado de los bulones pretensados se habrá disipado para cuando ocurra la falla por corte del bulón (Kulak y otros, 1987; pág. 49), el estado límite último de una **unión** con bulones pretensados es igual al de una **unión** idéntica con bulones no pretensados.

Como las consecuencias del deslizamiento hacia la condición de aplastamiento varían entre aplicación y aplicación, determinar si una **unión** se puede especificar como de ajuste sin juego o pretensada, o en cambio se debe especificar como de deslizamiento crítico es una decisión que queda a criterio del **Proyectista o Diseñador Estructural**. En el caso de las **uniones** con tres o más bulones en agujeros con un pequeño juego generalmente no existe la posibilidad de deslizamiento. Es probable que las tolerancias de fabricación normales y los procedimientos de montaje sean tales que uno o más bulones estén apoyados aún antes de aplicar carga adicional. Este es el caso de los agujeros normales y de los agujeros ovalados cargados perpendicularmente al eje mayor del mismo.

Las **uniones** que deben ser consideradas de **deslizamiento crítico** son:

- (1) Aquellos casos en los cuales el movimiento de deslizamiento teóricamente podría superar un valor que el **Proyectista o Diseñador Estructural** considere podría afectar la serviciabilidad de la estructura o, debido a la excesiva deformación, reducir la resistencia o la estabilidad, aún cuando la resistencia a la rotura de la **conexión** y la tensión de fluencia del elemento pudieran ser adecuadas; y
- (2) Aquellos casos en los cuales se deben impedir los deslizamientos, cualquiera sea su magnitud, tales como en las **uniones** sometidas a inversiones de cargas considerables y las **uniones** entre elementos de elementos armados comprimidos en los cuales cualquier deslizamiento podría provocar una reducción de la rigidez flexional requerida para la estabilidad del elemento armado.

En esta Recomendación los requisitos para el cálculo, instalación e inspección de las **uniones** abulonadas dependen del tipo de **unión** especificada por el **Proyectista o**

Diseñador Estructural. En consecuencia, se requiere que en la documentación técnica el **Proyectista o Diseñador Estructural** identifique el tipo de **unión**.

C 4.1. UNIONES CON AJUSTE SIN JUEGO

Considerando que la resistencia última de una **conexión** es independiente de la tensión de pretensado de los bulones y del movimiento de deslizamiento, en el cálculo estructural se presentan numerosos casos prácticos en los cuales, si se produce deslizamiento, éste no será perjudicial para la serviciabilidad de la estructura. Además, hay casos en los cuales es deseable que se produzca deslizamiento en la **unión** para permitir la rotación de una **unión** o para minimizar la transferencia de momento. Para permitir estos casos y aprovechar la resistencia al corte de los **bulones de alta resistencia** se permiten las **uniones con ajuste sin juego**.

Teóricamente la máxima cantidad de deslizamiento que puede ocurrir en una **unión** es igual al doble del huelgo del agujero. En términos prácticos, en las experiencias realizadas en laboratorio y en obra se observó que en realidad es mucho menor; generalmente igual a la mitad del huelgo del agujero. Las inexactitudes admisibles en la ubicación de los agujeros dentro de un patrón de bulones generalmente provocan que uno o más bulones estén en aplastamiento en la condición inicial, sin carga. Además, aún cuando los agujeros estén perfectamente posicionados, el método de montaje habitual provoca que el peso de los elementos conectados someta a los bulones a aplastamiento directo mientras el elemento está soportado por bulones sin ajustar y la grúa está desenganchada. Las cargas adicionales en la misma dirección no provocarían deslizamientos adicionales de importancia en las **uniones**.

En esta Recomendación se permiten las **uniones con ajuste sin juego** para aplicaciones cargadas estáticamente que involucran bulones **Nivel 1** en tracción directa. Sin embargo, no está permitido instalar estos pasadores con ajuste sin juego en las aplicaciones que involucran cargas no estáticas, ni en aplicaciones que involucran bulones **Nivel 2**.

C 4.2. UNIONES PRETENSADAS

Conforme a los requisitos de algunas otras especificaciones internacionales, se requiere que ciertas **conexiones** sometidas a corte sean pretensadas, pero no se requiere que sean de deslizamiento crítico. Se dan numerosos casos, por ejemplo en la Sección J1.11 del Reglamento CIRSOC 301-2005, en los cuales ciertas **uniones** abulonadas en las **conexiones** sometidas a aplastamiento deben ser pretensadas ya sea que el potencial de deslizamiento sea una consideración de importancia o no. El Reglamento CIRSOC 301-2005 requiere que las **uniones** se pretensen en los siguientes casos:

- (1) Empalmes en las columnas de edificios con elevadas relaciones entre su altura y su ancho;
- (2) **Conexiones** de elementos que arriostran columnas en edificios de gran altura;
- (3) Diferentes **conexiones** en edificios con grúas de más de 5 toneladas de capacidad; y

- (4) **Conexiones** para los apoyos de maquinarias y otras fuentes de impacto o inversión de tensiones.

Cuando se desea efectuar el pretensado por motivos diferentes a la necesidad de impedir el deslizamiento, en la documentación técnica se debe especificar una **unión pretensada**.

C 4.3. UNIONES DE DESLIZAMIENTO CRÍTICO

En ciertos casos, no se desea o es necesario impedir el deslizamiento de una **unión** abulonada sometida a corte bajo acciones de servicio. Evidentemente las **uniones** sometidas a carga dinámica reversible deben ser de deslizamiento crítico porque el deslizamiento podría provocar un movimiento de vaivén de la **unión** y potencialmente acelerar la falla por fatiga. A menos que se desee el deslizamiento, como sería el caso de una junta de expansión deslizante, es posible que el deslizamiento en las **uniones** con agujeros ovalados largos paralela a la dirección de la carga aplicada sea lo suficientemente grande como para invalidar los análisis estructurales que se basan en la hipótesis de pequeños desplazamientos.

Existen dos alternativas para el cálculo a fatiga del corte de los bulones, de las **uniones** sometidas a carga dinámica, que no involucra una inversión de la dirección de la misma. El diseñador puede utilizar ya sea una **unión de deslizamiento crítico** dimensionada en base al rango de tensiones aplicadas sobre la superficie bruta, o bien una **unión pretensada** dimensionada en base al rango de tensiones aplicadas sobre la superficie neta.

COMENTARIOS AL CAPÍTULO 5.

ESTADOS LÍMITES EN UNIONES ABULONADAS

Este Capítulo presenta los requisitos de diseño para **bulones de alta resistencia** en **uniones** abulonadas. Sin embargo, no es la intención de esta información cubrir exhaustivamente el cálculo de las **conexiones** con **bulones de alta resistencia**. Otras consideraciones de diseño relevantes para el comportamiento satisfactorio del material conectado, tal como la rotura del bloque de corte, el retardo de corte, la **acción de palanca** y la rigidez de la **conexión** y sus efectos sobre el comportamiento estructural, exceden el alcance de esta Recomendación y sus Comentarios.

El cálculo de las **uniones** abulonadas que transmiten corte, requiere considerar la resistencia al corte de los bulones y la resistencia al aplastamiento del material conectado. Si estas **uniones** se diseñan como **uniones de deslizamiento crítico** también es necesario verificar la resistencia al deslizamiento. Esta verificación se puede efectuar a nivel de las acciones mayoradas (artículo 5.4.1.) o a nivel de las acciones de servicio (artículo 5.4.2.). Independientemente del nivel de carga seleccionado, para la verificación de la resistencia al deslizamiento, el criterio de diseño consistirá en impedir el deslizamiento, en el rango de cargas correspondiente al nivel de servicio.

Los parámetros que influyen en la resistencia al corte de las **uniones** abulonadas incluyen:

- (1) Parámetros geométricos: relación entre la superficie neta y la superficie total de las partes conectadas, relación entre la superficie neta de las partes conectadas y la superficie total resistente al corte de los bulones y la longitud de la **unión**; y
- (2) Parámetros del material: relación entre la tensión de fluencia y la resistencia a la tracción de las partes conectadas.

Utilizando tanto modelos matemáticos como ensayos físicos fue posible estudiar la influencia de estos parámetros (Kulak y otros, 1987; págs. 89-116 y 126-132). Estos estudios mostraron que, de acuerdo con las reglas que existían en ese momento, las **uniones** de mayor longitud (y a menudo las más importantes) tenían el menor factor de seguridad, aproximadamente **2,0** en base a la resistencia última.

En general, las **uniones** abulonadas que se diseñan de acuerdo con los requisitos de esta Recomendación, tienen una mayor confiabilidad que los elementos que conectan. Esto se debe fundamentalmente a que los factores de resistencia utilizados en los estados límites, para el cálculo de las **uniones** abulonadas fueron seleccionados de manera de obtener mayor confiabilidad que los utilizados para el cálculo de los elementos. Además, en el elemento estructural el estado límite de resistencia determinante, tal como la fluencia o la deformación, generalmente se alcanza mucho antes de que la **conexión** llegue a su estado límite de resistencia, tal como corte del bulón o resistencia al aplastamiento del material conectado. Los requisitos de instalación varían de acuerdo con el tipo de **unión** e influyen en el comportamiento de las **uniones** dentro del rango de acciones de servicio, pero esta influencia se ignora en todos los cálculos de resistencia. No es necesario

considerar las tensiones de tracción secundarias que se pueden producir en los bulones de las **uniones sometidas a corte/aplastamiento**, como las que se generan debido a la flexión de una **conexión** de doble ángulo para acomodar la rotación del extremo de una viga simple.

Algunas veces es necesario utilizar **bulones de alta resistencia** y soldaduras de filete en una misma **conexión**, particularmente como resultado de las operaciones de reparación. Cuando estos elementos actúan en el mismo plano de corte, su resistencia combinada depende de si los bulones están ajustados sin juego o pretensados, de la ubicación de los bulones con respecto a los agujeros en los cuales están ubicados y la orientación de las soldaduras de filete. Las soldaduras de filete pueden ser paralelas o perpendiculares a la dirección de la carga. Para calcular la **resistencia de diseño** de este tipo de **uniones** se pueden utilizar algunos trabajos desarrollados recientemente (Manuel y Kulak, 1999).

C 5.1. RESISTENCIAS DE DISEÑO AL CORTE Y A LA TRACCIÓN

En la Tabla 5.1. se dan las resistencias nominales al corte y a la tracción de los bulones **Nivel 1** y **Nivel 2**. Estos valores se basan en los trabajos de una gran cantidad de investigadores en todo el mundo. La **resistencia de diseño** es igual a la **resistencia nominal** multiplicada por un factor de resistencia ϕ .

La **resistencia nominal** al corte se basa en la observación de que la resistencia al corte de un solo **bulón de alta resistencia** es alrededor de **0,62** por la resistencia a la tracción de dicho bulón (Kulak y otros, 1987; págs. 44-50). Sin embargo, en los empalmes solapados que transmiten fuerzas axiales entre los miembros con dos o más bulones en la línea de fuerza, la deformación no uniforme del material conectado entre los pasadores provoca una distribución no uniforme del esfuerzo de corte entre los bulones. En consecuencia, la resistencia de la **unión** disminuye en términos de la resistencia promedio de todos los bulones de la **unión** a medida que aumenta la longitud de la **unión** (Kulak y otros, 1987; págs. 99-104). En vez de especificar una función decreciente que refleje esta disminución de la resistencia promedio de los pasadores a medida que aumenta la longitud de la **unión**, al factor de **0,62** se le aplica un único factor de reducción igual a **0,80**. Este se aplica a los bulones de todas las **uniones** de hasta **1300 mm** de longitud, sin afectar seriamente la economía de las **uniones** muy cortas. Como se indica en la Nota b) de la Tabla 5.1., la resistencia al corte promedio de los bulones en **uniones** de más de **1300 mm** de longitud se debe reducir otro **20 %**. Observar que esta reducción no se aplica cuando la distribución de la fuerza es esencialmente uniforme en toda la **unión**, como en el caso de las **uniones** abulonadas en una **conexión** que transmite corte en el extremo de una viga de alma llena de gran altura.

El promedio de la relación entre la resistencia nominal al corte correspondiente a bulones con filetes incluidos en el plano de corte y la resistencia nominal al corte, correspondiente a bulones con los filetes excluidos del plano de corte es igual a **0,83** y la desviación estándar **0,03** (Frank y Yura, 1981). De forma conservadora, se utiliza un factor de reducción igual a **0,80** para considerar la reducción de la resistencia al corte de un bulón con filetes incluidos en el plano de corte, pero calculado con la superficie correspondiente al diámetro nominal del bulón. El caso de un bulón sometido a doble corte con una sección no roscada en uno de los planos de corte y una sección roscada en el otro no se incluyó en esta Recomendación por dos motivos. En primer término, se desconoce cuál es exactamente la manera en que estas dos áreas de corte diferentes comparten la carga. En segundo término, la falta de certidumbre del diseñador con respecto a la orientación del

bulón colocado podría hacer que ambos planos de corte estuvieran en la sección roscada. Por lo tanto, si los filetes están incluidos en un plano de corte, se adopta la hipótesis conservadora que establece que hay filetes incluidos en todos los planos de corte.

La resistencia a la tracción de un **bulón de alta resistencia** es igual al producto entre su resistencia última a la tracción (por unidad de superficie) y una superficie a través de la porción roscada. Esta superficie es una magnitud derivada que es función del tamaño relativo del filete de la rosca y su paso. Para los bulones estructurales de los tamaños habituales, esta superficie es alrededor del **75 %** de la superficie nominal de la sección transversal del bulón. Por lo tanto, las resistencias nominales a la tracción por unidad de superficie dadas en la Tabla 5.1. se calcularon como **0,75** por la resistencia a la tracción del material de los bulones. De acuerdo con la expresión (5-1), luego se utiliza la superficie nominal del bulón para calcular la **resistencia de diseño** a la tracción. La intención de las **resistencias nominales** calculadas de este modo, es que constituyan una base con la cual comparar la tensión aplicada externamente al bulón más cualquier tensión adicional provocada por la **acción de palanca** producida por la deformación de los elementos conectados.

Si se utilizan bulones pretensados en una **unión** que tracciona los bulones, surge la pregunta si la tensión de pretensado y la tensión por tracción aplicada son aditivas. Debido a que las partes comprimidas se descargan durante la aplicación de la fuerza de tracción externa, el incremento de la tensión de los bulones es mínima hasta que las partes se separan (Kulak y otros, 1987; págs. 263-266). Por lo tanto, habrá muy poco incremento de la fuerza en el bulón por encima de la carga de pretensado bajo acciones de servicio. Una vez que las partes se separan, el bulón actúa como un elemento traccionado y su **resistencia de diseño** es la dada por la expresión (5-1) multiplicada por el factor de resistencia ϕ .

Los bulones pretensados están sometidos a torsión durante el proceso de instalación. Una vez finalizada la instalación, cualquier posible torsión residual es muy pequeña y desaparecerá por completo cuando el pasador se cargue hasta el punto de separación de las chapas. Por lo tanto, cuando se considera la resistencia última a la tracción de un **bulón de alta resistencia** no es necesario tener en cuenta la interacción entre torsión y tracción (Kulak y otros, 1987; págs. 41-47).

Cuando resulte necesario, la tensión de pretensado se inducirá imponiendo al bulón un pequeño alargamiento axial durante su instalación, tal como se describe en el comentario al Capítulo 8. Cuando posteriormente la **unión** esté sometida a corte, tracción o a una combinación de tracción y corte los bulones sufrirán deformaciones considerables antes de la falla, las cuales contrarrestarán al pequeño alargamiento axial que se introdujo durante la instalación y, por lo tanto, eliminarán la tensión de pretensado. Las mediciones recogidas en laboratorio confirman que la tensión de pretensado que se podría mantener si la carga aplicada fuera eliminada es esencialmente nula antes que el bulón falle por corte (Kulak y otros, 1987; págs. 93-94). Por lo tanto, las resistencias al corte y a la tracción de un bulón no se ven afectadas por la presencia de una tensión de pretensado inicial en el mismo. Ver también el comentario al artículo 5.5.

C 5.2. COMBINACIÓN DE CORTE Y TRACCIÓN

Cuando sobre un bulón actúan tanto fuerzas de tracción como fuerzas de corte, resulta conveniente expresar la interacción como una solución elíptica (Chesson y otros, 1965) que incluye los elementos del bulón actuando exclusivamente al corte, y el bulón actuando exclusivamente a la tracción. Aunque la solución elíptica proporciona la mejor estimación de la resistencia de los bulones sometidos a una combinación de corte y tracción y, por lo tanto, es la que se utiliza en esta Recomendación, la naturaleza de la solución elíptica permite aproximarla convenientemente por medio de tres rectas (Carter y otros 1997). La utilización de estas representaciones lineales permite una mayor simplicidad en los cálculos de diseño y es el procedimiento adoptado por el Reglamento CIRSOC 301-2005. Alternativamente se puede utilizar la expresión más precisa de interacción elíptica. Esta muestra que, a los fines del cálculo, no se produce una interacción significativa hasta que una de las componentes de la fuerza supera el **20 %** de la resistencia limitante correspondiente a dicho componente.

C 5.3. RESISTENCIA DE DISEÑO AL APLASTAMIENTO DE LA CHAPA EN LOS AGUJEROS PARA BULONES

La presión de contacto en la interfase entre un bulón y el material conectado se puede expresar como una tensión de aplastamiento actuando sobre el bulón o sobre el material conectado. El material conectado siempre es crítico. Por motivos de simplicidad, la superficie de aplastamiento se expresa como el diámetro del bulón por el espesor del material conectado en aplastamiento. El valor determinante de la tensión de aplastamiento se determinó a partir de extensas investigaciones experimentales y una limitación adicional de la resistencia para el caso de un bulón en el extremo de un elemento traccionado o próximo a otro pasador.

Las expresiones de diseño se basan en los modelos presentados en la *Guía* (Kulak y otros, 1987; págs. 141-143), excepto que en esta Recomendación se utiliza la distancia libre a otro agujero o al borde, en vez de la separación entre bulones o la distancia al extremo utilizada en la *Guía* (ver la Figura C.5.1.). La expresión (5-3) se derivó a partir de ensayos (Kulak y otros, 1987; págs 112-116) que mostraron que el alargamiento total, incluyendo la deformación local por aplastamiento, de un agujero normal cargado para obtener la resistencia última igual a $3dt F_u$ de la expresión (5-4), era del orden del diámetro del bulón. Este aparente alargamiento del agujero se debe en gran parte a la deformación por aplastamiento del material inmediatamente adyacente al bulón. El valor inferior de $2,4 dt F_u$ de la expresión (5-3) proporciona una resistencia al aplastamiento en estado límite, que se puede lograr con una deformación razonable (**6,4 mm**). De este modo se utilizaron límites de resistencia y deformación para evaluar conjuntamente los resultados de los ensayos de resistencia al aplastamiento.

Si los agujeros ovalados largos están orientados con su mayor dimensión perpendicular a la dirección de la carga, aumenta la componente de flexión en la deformación del material entre agujeros contiguos o entre el agujero y el borde de la chapa. La resistencia al aplastamiento nominal está limitada a $2dtFu$, que nuevamente proporciona una resistencia al aplastamiento en estado límite que se puede lograr con una deformación razonable.

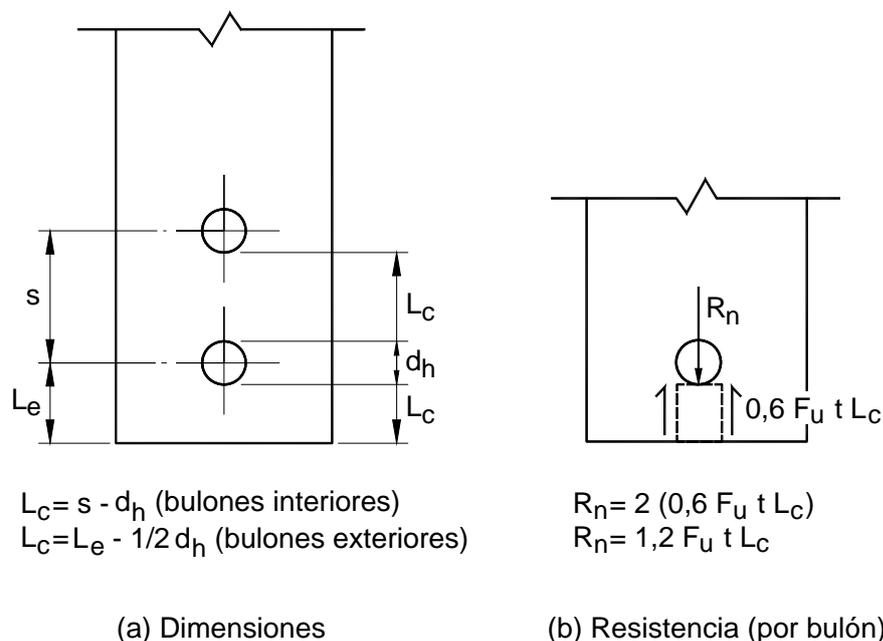


Figura C.5.1. Cálculo de la resistencia al aplastamiento.

La resistencia de diseño al aplastamiento se ha expresado como la de un único bulón, aunque en realidad es la del material en contacto con el bulón. Para calcular la resistencia de diseño al aplastamiento de una parte conectada, la resistencia al aplastamiento total de la parte conectada se puede adoptar como la sumatoria de las resistencias al aplastamiento de los bulones individuales.

C 5.4. RESISTENCIA DE DISEÑO AL DESLIZAMIENTO

La verificación de la resistencia de diseño al deslizamiento se puede efectuar ya sea a nivel de acciones mayoradas (artículo 5.4.1.) o a nivel de acciones de servicio (artículo 5.4.2). Estas alternativas se basan en diferentes filosofías de diseño, las cuales se discuten a continuación. Han sido calibradas para producir esencialmente los mismos resultados. El enfoque de las acciones mayoradas se incluye debido a la facilidad de trabajar solamente con acciones mayoradas. Independientemente del enfoque adoptado, el estado límite se basa en impedir el deslizamiento a nivel de las acciones de servicio.

Si se utiliza el requisito correspondiente a acciones mayoradas, la **resistencia nominal R_n** representa la resistencia promedio, la cual es una función del **coeficiente medio de fricción μ** y la pretensión mínima especificada para los bulones (fuerza de apriete) T_b . El factor **1,13** de la expresión (5-6) tiene en cuenta el valor promedio esperado de la pretensión del bulón instalado que se obtiene con el método de pretensado con llave calibrada, que es **13 %** mayor que la pretensión mínima especificada T_b utilizada en el cálculo. En ausencia de otros datos de ensayos realizados en obra, este valor se utiliza para todos los métodos.

Si se utiliza el enfoque de las acciones de servicio, se debe identificar una probabilidad de deslizamiento. Ésta implica que existe una confiabilidad del **90 %** de que no ocurrirá deslizamiento para la carga de deslizamiento calculada si se utiliza el método de

pretensado con llave calibrada, o que existe una confiabilidad del **95 %** de que no se producirá deslizamiento para la carga de deslizamiento calculada si se utiliza el método de pretensado con giro de tuerca. Al desarrollar estas probabilidades de deslizamiento no se consideró la probabilidad de ocurrencia de las cargas (Kulak y otros, 1987; pág 135).

Para la mayoría de las aplicaciones, la hipótesis de que la resistencia al deslizamiento es igual para todos los pasadores y aditiva con respecto a la de los demás pasadores se basa en que todas las ubicaciones deben desarrollar la fuerza de deslizamiento antes que pueda ocurrir un deslizamiento total de la **unión** en dicho plano. De manera similar, las fuerzas desarrolladas en diferentes planos de deslizamiento no necesariamente se desarrollan simultáneamente, pero se puede suponer que las resistencias totales al deslizamiento se deben movilizar en cada plano antes de que se pueda producir el deslizamiento total de la **unión**. Las expresiones (5-6) y (5-7) han sido formuladas para el caso general de un único plano de deslizamiento. La resistencia total al deslizamiento de una **unión** con múltiples planos de deslizamiento se puede calcular como si se tratara de un solo plano de deslizamiento multiplicando por el número de planos de deslizamiento.

Solamente el **Proyectista o Diseñador Estructural** puede determinar si el deslizamiento potencial de una **unión** es crítico a nivel de las acciones de servicio simplemente como una consideración de la serviciabilidad o si un deslizamiento podría distorsionar el pórtico de manera tal de reducir la capacidad del pórtico para resistir las acciones mayoradas. Los siguientes comentarios se incluyen a modo de guía y como indicación de la intención de esta Recomendación. Ver también los comentarios de los artículos 4.2. y 4.3.

- (1) Si las **uniones** con agujeros normales tienen solamente uno o dos bulones en la dirección de la carga aplicada, es posible que se produzca un pequeño deslizamiento. En este caso, las **uniones** sujetas a vibraciones se deberían dimensionar para resistir el deslizamiento a nivel de las acciones de servicio.
- (2) En los elementos armados comprimidos, tales como los montantes de las cerchas formados por dos perfiles, un pequeño deslizamiento relativo entre los elementos, especialmente en las **conexiones** en los extremos, puede incrementar la longitud efectiva de la sección transversal combinada, hasta la de los componentes individuales y reducir significativamente la resistencia a la compresión del montante. Por lo tanto, la **conexión** entre los elementos en los extremos de los elementos armados se debería verificar a nivel de acciones mayoradas, ya sea que por motivos de serviciabilidad se requiera o no una **unión de deslizamiento crítico**. De acuerdo con Sherman y Yura (1998), la resistencia al deslizamiento requerida es $0,008 P_u L Q/I$, siendo: P_u la fuerza de compresión axial en el elemento armado, en kN, L la longitud total del elemento armado, en mm, Q el momento estático de un componente respecto al eje de pandeo del elemento armado, en mm^3 , e I el momento de inercia del elemento armado con respecto al eje de pandeo, en mm^4 .
- (3) En **uniones** con agujeros ovalados largos paralelos a la dirección de la carga aplicada el diseñador tiene dos alternativas. Se puede diseñar la **unión** para impedir el deslizamiento en el rango de las acciones de servicio utilizando ya sea el requisito correspondiente a nivel de acciones mayoradas del artículo 5.4.1. ó bien el requisito correspondiente a nivel de acciones de servicio del artículo 5.4.2. Sin embargo, en cualquiera de los casos, el análisis estructural debe incluir el efecto de las acciones mayoradas que actúan sobre la estructura deformada

(deformada por el máximo deslizamiento en los agujeros ovalados largos en todas las ubicaciones).

- (4) En **uniones** sujetas a fatiga, el diseño se debería basar en los criterios correspondientes a acciones de servicio y en la resistencia de diseño al deslizamiento del artículo 5.4.2., ya que la fatiga es una función del comportamiento bajo acciones de servicio más que bajo acciones mayoradas.

Se analizaron estadísticamente gran cantidad de datos desarrollados a través de investigaciones a fin de proporcionar mejor información sobre la probabilidad de deslizamiento de las **uniones** en las cuales los bulones han sido pretensados de acuerdo con los requisitos de la Tabla 8.1. Se halló que dos variables afectan la resistencia al deslizamiento de las **uniones**, el **coeficiente medio de fricción** de las **superficies de contacto** y la tensión de pretensado de los bulones. Los estudios realizados en obra sobre bulones instalados en diferentes aplicaciones estructurales (Kulak y Birkemoe, 1993) indican que las pretensiones indicadas en la Tabla 8.1. se alcanzaron tal como se anticipó en las investigaciones de laboratorio.

Un examen de los datos sobre coeficientes de fricción correspondientes a un amplio rango de condiciones superficiales indica que los datos se distribuyen de forma normal y que la desviación estándar es esencialmente la misma para cada clase de condición superficial. Esto significa que se deberían aplicar diferentes factores de reducción, a clases de superficies con diferentes **coeficientes medios de fricción**, para obtener una confiabilidad equivalente para la resistencia al deslizamiento. Mientras más pequeño sea el valor del coeficiente de fricción, más pequeño será el factor de reducción aplicable.

Los datos sobre la fuerza de apriete de los bulones indican que las pretensiones de los bulones se distribuyen de manera normal para cada método de pretensado. Sin embargo, los datos también indican que el valor medio de la tensión de pretensado de los bulones es diferente para cada método. Como se mencionó anteriormente, si se utiliza el método con llave calibrada para pretensar bulones A325, el valor medio de la tensión de pretensado de los bulones será de alrededor de **1,13 veces** la tensión de pretensado mínima especificada en la Tabla 8.1. Si se utiliza el método con giro de tuerca, la tensión de pretensado media será alrededor de **1,35 veces** la tensión de pretensado mínima especificada para bulones **A325** y alrededor de **1,26** para bulones **A490**.

Los efectos combinados de la variabilidad del **coeficiente medio de fricción** y la tensión de pretensado de los bulones se han considerado de manera aproximada en el valor único del factor de probabilidad de deslizamiento **D** de la expresión para resistencia nominal al deslizamiento del artículo 5.4.2. Esto implica una confiabilidad del **90 %** de que no habrá deslizamiento si se utiliza el método de pretensado con llave calibrada y una confiabilidad del **95 %** si se utiliza el método con giro de tuerca. Para obtener valores de **D** que resulten adecuados para otros **coeficientes medios de fricción** y probabilidades de deslizamiento, ver la *Guía* (Kulak y otros.,1987; pág.135). Los valores dados en dicha publicación se pueden sustituir directamente en la fórmula de resistencia al deslizamiento del artículo 5.4.2.

El método de instalación con llave calibrada apunta a lograr una tensión de pretensado objetivo para los bulones, la cual es **5 %** superior al valor mínimo especificado dado en la Tabla 8.1. Por consiguiente, independientemente de la resistencia real de los bulones, este valor objetivo es único para un grado dado de pasadores. Por otra parte, el método de instalación con giro de tuerca impone al pasador un alargamiento. En consecuencia, la

resistencia inherente de los bulones instalados se reflejará en la tensión de pretensado resultante, ya que este alargamiento llevará al pasador a su límite de proporcionalidad bajo una combinación de torsión y tracción. Como resultado de estas diferencias, el valor medio y la naturaleza de la distribución de frecuencias de las pretensiones de los dos métodos de instalación son diferentes. La instalación con giro de tuerca da como resultado niveles medios de pretensado más elevados que la instalación con llave calibrada. Estas diferencias se tuvieron en cuenta durante el desarrollo de los criterios de diseño para **uniones de deslizamiento crítico**.

La información estadística existente sobre las características de pretensado de los bulones instalados en obra utilizando indicadores directos de la tensión es limitada.

En cualquiera de los métodos de instalación antes mencionados es dable esperar que una porción del **medio de unión** (la porción roscada del bulón dentro de la **longitud de apriete** y/o los filetes de rosca acoplados en la tuerca y el bulón) llegarán a la región de comportamiento plástico. Esta deformación permanente no tiene ningún efecto indeseable sobre el comportamiento posterior del bulón.

Debido a la mayor probabilidad de ocurrencia de una deformación significativa en las **uniones** con agujeros holgados u ovalados, a través de una modificación del factor de resistencia ϕ se proporcionan valores menores para la resistencia de diseño al deslizamiento en las uniones con estos tipos de agujeros. Para el caso de agujeros ovalados largos, aún cuando la carga de deslizamiento sea la misma tanto para carga perpendicular como para carga paralela al eje mayor del óvalo, el valor de carga paralela al eje se habrá reducido aún más, empíricamente, en reconocimiento de las consecuencias más severas de un posible deslizamiento.

Aunque la filosofía de diseño para las **uniones de deslizamiento crítico** supone que éstas no se deslizan provocando tensión de aplastamiento cuando están sometidas a cargas en el rango de servicio, se exige que las **uniones de deslizamiento crítico** también cumplan los requisitos de los artículos 5.1., 5.2. y 5.3. Por lo tanto, deben cumplir los requisitos de resistencia para resistir las acciones mayoradas como **uniones sometidas a corte/aplastamiento**.

El artículo 3.2.2.(b) permite que el **Proyectista o Diseñador Estructural** autorice el uso de **superficies de contacto** con un **coeficiente medio de fricción μ** menor que **0,50** (Clase B) y diferente de **0,33** (Clase A). Esta autorización requiere el cumplimiento de las siguientes restricciones:

- (1) El **coeficiente medio de fricción μ** se debe determinar de acuerdo con el Apéndice A; y
- (2) Se debe seleccionar de la *Guía* (Kulak y otros, 1987) el factor de probabilidad de deslizamiento **D** adecuado para cálculo a nivel de acciones de servicio.

C 5.5. FATIGA POR TRACCIÓN

Como se describió en el comentario del artículo 5.1., los **bulones de alta resistencia** en las **uniones pretensadas** que nominalmente están cargadas en tracción experimentarán muy poco incremento de la tensión axial bajo acciones de servicio, si es que lo experimentan. Por este motivo, los bulones pretensados no se ven afectados negativamente por la aplicación de tensiones de tracción correspondientes a acciones de servicio. Sin embargo, se debe cuidar que la fuerza de palanca calculada constituya una parte relativamente pequeña de la tracción total aplicada al bulón (Kulak y otros, 1987; pág 272). Los requisitos que cubren la fatiga de los bulones traccionados se basan en resultados de investigaciones en las cuales diferentes bulones y **uniones** con bulones traccionados fueron sometidas a cargas externas repetidas que produjeron la falla por fatiga de los pasadores pretensados. En estas investigaciones se estudió un rango limitado de efectos de palanca. De manera empírica, en la edición del año 2000 de la especificación de referencia (RCSC), el límite fijado para las fuerzas de palanca como porcentaje de la fuerza de tracción externa total aplicada se redujo del **60 %** al **30 %**.

COMENTARIOS AL CAPÍTULO 6.

USO DE ARANDELAS

C 6.2. UNIONES PRETENSADAS Y UNIONES DE DESLIZAMIENTO CRÍTICO

Es importante que los planos y los detalles de las **conexiones** reflejen claramente el número y la disposición de las arandelas, si éstas son requeridas, especialmente las arandelas endurecidas o arandelas de chapa de espesor considerable que se requieren en algunas aplicaciones con agujeros ovalados. El espesor total de las arandelas dentro de la **longitud de apriete** afecta la longitud de los bulones que se deben proveer y utilizar.

La principal función de las arandelas es proveer una superficie lisa endurecida debajo del elemento que se hace girar, en particular en el caso de los métodos de pretensado que se basan en aplicar un par torsor, tal como el método de pretensado con llave calibrada.

Las arandelas circulares planas que cumplen los requisitos de las normas IRAM 5457 (ASTM F436) o IRAM correspondiente (ASTM F436M) proporcionan tanto una superficie lisa endurecida como un aumento de la superficie de apoyo, que es aproximadamente un **50 %** mayor que la correspondiente a la cabeza hexagonal de un bulón estructural o a una tuerca. Sin embargo, los ensayos han demostrado que estas arandelas de espesores estándares de **4 mm** tienen una pequeña influencia sobre la distribución de la tensión de pretensado inducida en el bulón.

Cuando se utilicen bulones **Nivel 2** con materiales cuya tensión de fluencia mínima especificada sea inferior a **275 MPa** se requiere un mayor espesor. Esto se debe a la necesidad de mitigar los efectos de la fluencia local del material en la proximidad de la superficie de contacto de la cabeza y de la tuerca. Cuando se especifica el uso de este tipo de arandelas, el requisito que establece el uso de arandelas endurecidas de espesor estándar no es aplicable para los pasadores de diseño alternativo que incorporan debajo de la cabeza una superficie de apoyo cuyo diámetro es igual al de la arandela endurecida.

Cuando se utilizan bulones **Nivel 2** de un diámetro mayor que **25,4 mm** se requieren arandelas con tratamiento térmico con un espesor no menor que **8 mm** para cubrir los agujeros holgados y ovalados cortos ubicados en chapas externas. Esto es necesario para distribuir la elevada presión de apriete de manera de impedir el colapso del perímetro del agujero y permitir que se desarrolle la fuerza de apriete deseada. Las investigaciones preliminares han demostrado que se produce una deformación similar pero menos pronunciada cuando los agujeros holgados u ovalados se encuentran en las chapas interiores. La reducción de la fuerza de apriete se puede contrarrestar mediante una "cuña", que tiende a incrementar la resistencia al deslizamiento. Estos efectos se acentúan en las uniones de chapas de poco espesor.

Si se utilizan agujeros ovalados largos en una chapa exterior, la Tabla 6.1. requiere arandelas de chapa de **8 mm** de espesor o planchuelas continuas. Este requisito se puede satisfacer con un material de cualquier grado estructural, siempre y cuando este material esté endurecido cuando se utilizan bulones **Nivel 2** con un diámetro mayor que **25,4 mm**.

Alternativamente, se puede utilizar cualquiera de las siguientes opciones:

- (1) El uso de un material con F_y mayor que **275 MPa** eliminará la necesidad de proveer además arandelas que cumplan las normas IRAM 5457 (ASTM F436) o IRAM correspondiente (ASTM F436M) de acuerdo con los requisitos del artículo 6.2.1. para bulones **Nivel 2** de cualquier diámetro.
- (2) Se puede utilizar un material con F_y menor o igual que **275 MPa** con arandelas que verifiquen las normas IRAM 5457 (ASTM F436) o IRAM correspondiente (ASTM F436M) de acuerdo con los requisitos del artículo 6.2.1.

COMENTARIOS AL CAPÍTULO 7.

VERIFICACIÓN PREVIA A LA INSTALACIÓN

C 7.1. CALIBRADOR DE LA TENSIÓN

Un **calibrador de la tensión** es un dispositivo hidráulico que indica la tensión de pretensado que se desarrolla en un bulón instalado en el mismo. Este dispositivo constituye una herramienta económica y útil que debe estar disponible siempre que se deban pretensar **bulones de alta resistencia**. Un **calibrador de la tensión** es esencial para:

- (1) Verificar antes de su instalación que el **medio de unión**, incluyendo la lubricación que aplica el **Fabricante** o la que se aplica especialmente, sea adecuado para desarrollar la tensión de pretensado mínima especificada;
- (2) Verificar que el método de pretensado especificado sea adecuado y se utiliza correctamente;
- (3) Determinar el par torsor a utilizar cuando la instalación se realice mediante pretensado con llave calibrada; y
- (4) Determinar un par torsor arbitrario según lo especificado en el Capítulo 10, en caso que fuera necesario para resolver una disputa.

Esta herramienta es la única disponible a un costo razonable para las tareas esenciales descritas.

Los calibradores hidráulicos sufren una ligera deformación durante el pretensado de los bulones. Por lo tanto, cuando los bulones se pretensan de acuerdo con el artículo 8.2.1., la rotación de la tuerca correspondiente a la lectura de una tensión de pretensado dada, puede ser algo mayor que si el mismo bulón fuera pretensado en un conjunto de acero sólido. Dicho de otra manera, la lectura de un calibrador hidráulico tiende a subestimar la tensión de pretensado que una rotación dada del elemento girado induciría en un bulón de una **unión pretensada**.

C 7.2. ENSAYOS REQUERIDOS

Los componentes de los pasadores listados en el artículo 1.3. se fabrican conforme a diferentes especificaciones, cada una de las cuales contiene tolerancias que son adecuadas para el elemento individual cubierto por la misma. Aunque la intención de estas tolerancias es permitir un ajuste razonable y trabajable entre los componentes, cuando se los utiliza en un conjunto, el efecto acumulativo de las tolerancias individuales permite una variación significativa de las características de instalación de la totalidad del **medio de unión**. La intención de esta Recomendación es que el **Proveedor** sea responsable por el

correcto comportamiento del **medio de unión**, aunque los componentes del mismo hayan sido producidos por más de un **Fabricante**.

Si se requiere una instalación con pretensado, es fundamental tener en cuenta los efectos de la acumulación de tolerancias, condición superficial y lubricación. Por lo tanto, se requieren ensayos de verificación previa a la instalación según lo indicado en el Capítulo 8 de todo el **medio de unión** para garantizar que los **medios de unión** y los métodos de instalación utilizados proveerán una tensión de pretensado mayor que la especificada en la Tabla 8.1. Sin embargo, la intención no es simplemente verificar el cumplimiento con las especificaciones individuales correspondientes.

Esta Recomendación reconoce que los resultados de los ensayos de verificación previa a la instalación requeridos en el Capítulo 8 tienen una dispersión natural. También reconoce que las tensiones de pretensado desarrolladas al ensayar una muestra representativa de los componentes que se han de instalar en obra, deben ser ligeramente superiores para poder confiar en que la mayoría de los **medios de unión** alcanzarán la tensión de pretensado mínima requerida dada en la Tabla 8.1. En consecuencia, la tensión de pretensado mínima a utilizar en la verificación previa a la instalación es igual a **1,05 veces** la requerida para la instalación e inspección.

Esta Recomendación también requiere ensayos de verificación previa a la instalación de los bulones y tuercas tal como se los recibe, a fin de impedir casos de resistencias deficientes y la falsificación de bulones y tuercas. Los ensayos de verificación previa a la instalación constituyen una forma práctica de garantizar que en la obra no se coloquen **medios de unión** que no satisfagan los requisitos. La experiencia recogida de numerosos proyectos ha demostrado que los bulones y/o tuercas que no satisfacen los requisitos de la norma IRAM aplicable, habrían sido identificados antes de su instalación, si hubieran sido ensayados como conjunto, utilizando un **calibrador de la tensión**. Se podría haber evitado el costo de reemplazar los bulones ya instalados en la estructura una vez descubierto que no eran satisfactorios.

Además, los ensayos de verificación previa a la instalación permiten que los trabajadores que instalarán los bulones y el **Director Técnico** se formen una idea más clara de la correcta implementación del método de pretensado seleccionado y de la precisión de los equipos utilizados para la instalación. También permitirán identificar potenciales fuentes de problemas, tales como la necesidad de utilizar lubricantes para impedir la falla de los bulones por una combinación de par torsor elevado y tracción, conjuntos con resistencia deficiente debida al sobre-roscado de las tuercas galvanizadas por inmersión en caliente u otras fallas que impiden satisfacer los requisitos de resistencia o geometría de las normas IRAM aplicables.

Los requisitos sobre verificación previa a la instalación, incluidos en este Capítulo, asumen que los **medios de unión** verificados de esta manera serán pretensados antes de que la condición de los **medios de unión**, de los equipos o de la estructura de acero, hayan variado significativamente. Cuando el tiempo de exposición entre la colocación en obra de los **medios de unión** y el posterior pretensado de los mismos constituye una preocupación, la verificación previa a la instalación, se puede llevar a cabo sobre elementos retirados de la obra o sobre elementos adicionales que, en el momento de su colocación, se hayan apartados a fin de que experimenten el mismo grado de exposición.

COMENTARIOS AL CAPÍTULO 8.

INSTALACIÓN

C 8.1. UNIONES CON AJUSTE SIN JUEGO

Como se discutió en el comentario del Capítulo 4, las **uniones** abulonadas de la mayoría de las **conexiones** sometidas a corte y numerosas **conexiones** traccionadas se pueden especificar como **uniones con ajuste sin juego**. La condición de ajuste sin juego es la más apretada que se logra con unos pocos impactos de una llave de impacto o el esfuerzo total de un trabajador que utiliza una llave de cola común para hacer que las chapas conectadas estén en **contacto firme**. Puede que sea necesario realizar más de un ciclo de ajuste sobre cada bulón para lograr la **unión con ajuste sin juego**.

Las tensiones de pretensado reales que se obtienen en los pasadores individuales de las **uniones con ajuste sin juego** variarán entre **unión y unión** dependiendo del espesor, el grado de paralelismo y lo planas que sean las chapas conectadas, así como del esfuerzo aplicado. En la mayoría de los casos las chapas de las **uniones** que involucran materiales planos y de los espesores habituales se pueden llevar a la condición de contacto completo con un nivel de pretensado relativamente bajo. Sin embargo, en algunas **uniones** que involucran materiales de gran espesor puede que no sea posible lograr el contacto completo en la totalidad de la **superficie de contacto** del mismo modo que se logra en las uniones de chapas más delgadas. Generalmente esto no perjudica el comportamiento de la **unión**.

Tal como se lo utiliza en el artículo 8.1., el término "**daños indebidos**" significa daños que serían suficientes para hacer que el producto ya no fuera adecuado para el uso pretendido.

C 8.2. UNIONES PRETENSADAS

La tensión de pretensado mínima para los bulones **Nivel 1** y **Nivel 2** es igual al **70 %** de la resistencia a la tracción mínima especificada. En la Tabla 8.1. los valores se han redondeado al kN más cercano.

En esta Recomendación se presentan tres métodos de pretensado, sin una preferencia por ninguno de ellos en particular. Todos los métodos permiten obtener resultados satisfactorios cuando se los implementa cuidadosamente y los componentes del **medio de unión** especificado están en buenas condiciones. Sin embargo, hay que reconocer que el mal uso o el abuso son posibles con cualquiera de los métodos. Cualquiera sea el método a utilizar, es importante en primer lugar instalar bulones en todos los agujeros de la **unión** y ajustar la **unión** hasta que las chapas conectadas estén en **contacto firme**. Sólo después de completar esta operación se puede pretensar la **unión** de manera confiable. Tanto la etapa inicial de apriete de la **unión** como la etapa posterior de pretensado deben comenzar en el punto de mayor rigidez.

En algunas **uniones** que involucran materiales de gran espesor puede que no sea posible lograr un contacto continuo en la totalidad de la **superficie de contacto** como el que habitualmente se obtiene en las **uniones** de chapas más delgadas. Esto no perjudica el comportamiento de la **unión**. Si se consigue una tensión de pretensado en todos los bulones de la **unión** terminada igual a la especificada, la fuerza de apriete total, la cual es igual a la sumatoria de las tensiones de pretensado de todos los bulones, se transferirá en los puntos que están en contacto y la **unión** será plenamente efectiva para resistir el deslizamiento por medio de la fricción.

Si se pretensan bulones individuales en una única operación continua, en una **unión** que no ha sido apretada o armada adecuadamente, el pretensado de los bulones pretensados en primer término se puede relajar o eliminar debido a la tensión de pretensado en los bulones contiguos que se pretensan posteriormente. La reducción resultante en la fuerza de apriete total reducirá la resistencia al deslizamiento.

En el caso de los revestimientos galvanizados por inmersión en caliente, especialmente si la **unión** consiste en numerosas chapas de material con recubrimientos de gran espesor, la relajación de la tensión de pretensado de los bulones puede ser significativa y puede ser necesario pretensar nuevamente los bulones luego del pretensado inicial. Munse (1967) demostró que debido al relajamiento se producía una pérdida de la tensión de pretensado de aproximadamente **6,5 %** en las chapas y bulones galvanizados, siendo esta pérdida igual al **2,5 %** en el caso de las **uniones** sin recubrimiento. Esta pérdida de la tensión de pretensado de los bulones se producía en cinco días; la pérdida registrada luego de estos cinco días fue despreciable. Esta pérdida se puede considerar en el cálculo, o bien se puede llevar la tensión de pretensado nuevamente al nivel prescripto, pretensando nuevamente los bulones, luego de un período inicial de "asentamiento".

Como se establece en la *Guía* (Kulak et al., 1987; página 61), "...parece razonable esperar un incremento de la relajación de la fuerza en los bulones a medida que disminuye la **longitud de apriete**. De manera similar, un aumento del número de chapas en una **longitud de apriete** constante, también podría dar como resultado un aumento de la relajación en los bulones."

C 8.2.1. Pretensado con giro de tuerca

Mediante el método de pretensado con giro de tuerca en los bulones se obtienen tensiones de pretensado más uniformes que las que habitualmente se obtienen con los métodos de pretensado en base al par torsor. El control de las deformaciones que llegan a la región del comportamiento plástico de los bulones es inherentemente más confiable que un método que depende del control del par torsor. Sin embargo, la correcta implementación depende de garantizar que la **unión** esté correctamente apretada antes de aplicar el giro parcial requerido y que la cabeza del bulón (o la tuerca) se mantenga firme mientras se gira la tuerca (o la cabeza del bulón).

Colocar marcas concordantes en la tuerca y en el extremo sobresaliente del bulón luego de lograr el ajuste sin juego puede ser de utilidad en el proceso de instalación posterior, y evidentemente facilita la inspección.

Como se indica en la Tabla 8.2., no hay ninguna investigación disponible que establezca el giro de tuerca para bulones de más de **12 d** de longitud. La rotación requerida para estos bulones se puede establecer caso por caso utilizando un **calibrador de la tensión**.

C 8.2.2. Pretensado con llave calibrada

Cuando se utilizan métodos de instalación controlados por el par torsor, la dispersión de la pretensión instalada puede ser significativa. Las variables que afectan la relación entre el par torsor y la tensión de pretensado incluyen:

- (1) El acabado y la tolerancia de las roscas del bulón y de la tuerca;
- (2) La uniformidad, el grado y la condición de la lubricación;
- (3) Las condiciones en el taller o en obra que contribuyen a la acumulación de polvo y suciedad o corrosión en las roscas;
- (4) La fricción que existe en grado variable entre el elemento girado (la cara de la tuerca o superficie de apoyo de la cabeza del bulón) y la superficie que lo soporta;
- (5) La variabilidad de los parámetros del suministro de aire en las llaves de impacto debida a la longitud de las mangueras neumáticas o del número de llaves que operan con una misma fuente;
- (6) La condición, lubricación y alimentación eléctrica de la llave de torsión, que pueden variar dentro de un mismo turno de trabajo; y
- (7) La posibilidad de repetir la operación de las llaves sensibles al nivel de torque aplicado.

En la primera edición de la Especificación tomada como referencia, publicada en 1951, se incluía una tabla de relaciones entre el par torsor y la tensión de pretensado para bulones de diferentes diámetros. Investigaciones posteriores demostraron que se puede anticipar una variación de esta relación de hasta $\pm 40\%$ a menos que la relación se establezca individualmente para cada **lote** de bulones, diámetro y condición de los pasadores. Por lo tanto, para pretensar con llaves calibradas las llaves se deben calibrar:

- (1) Diariamente;
- (2) Cuando cambia el **lote** de cualquiera de los componentes del **medio de unión**;
- (3) Cuando se vuelve a lubricar cualquiera de los componentes del **medio de unión**;
- (4) Cuando se observan diferencias significativas en la condición superficial de las roscas del bulón, las tuercas o las arandelas; o
- (5) Cuando se altera alguno de los componentes principales de la llave, incluyendo la lubricación, la manguera y el suministro de aire.

También es importante:

- (1) Proteger los componentes de los pasadores de la suciedad y la humedad en el taller o lugar de trabajo como se requiere en el Capítulo 2;
- (2) Utilizar arandelas como se especifica en el Capítulo 6; y
- (3) Minimizar el tiempo entre la extracción del **almacenamiento protegido** y la calibración de las llaves y el pretensado final.

C 8.2.3. Pretensado con indicador directo de la tensión

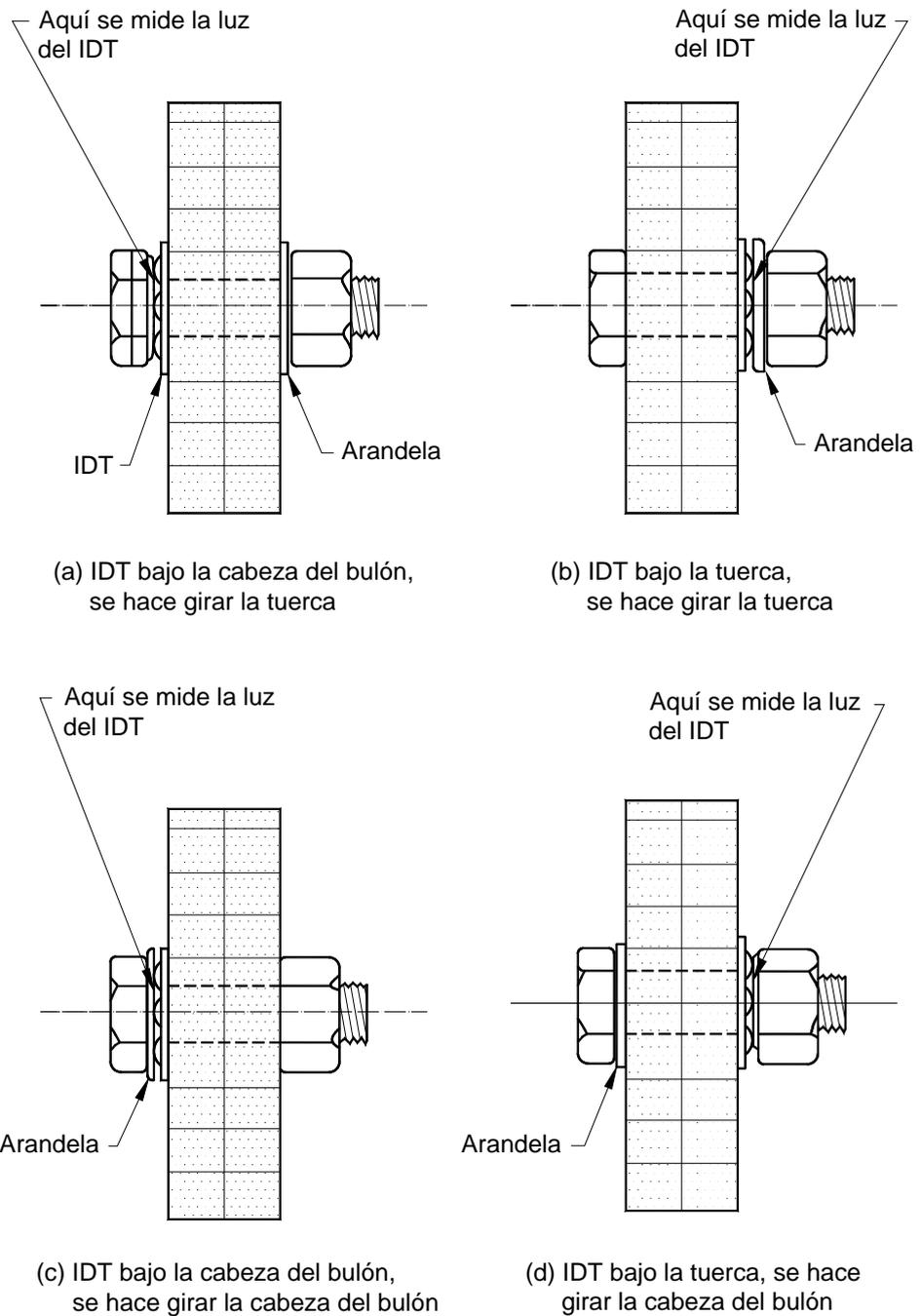
En esta Recomendación los indicadores directos de la tensión, según la norma IRAM que se redactará en base a la ASTM F959 o la norma IRAM correspondiente a la ASTM F959M se reconocen como dispositivos indicadores de la tensión del bulón. Los indicadores directos de la tensión son dispositivos endurecidos, con forma de arandela, que en la superficie de apoyo incorporan pequeñas salientes tipo arco diseñadas para

deformarse de una manera controlada cuando están sometidas a una carga de compresión.

Durante su instalación es necesario cuidar que los arcos del indicador directo de la tensión estén orientados de manera de apoyar contra la superficie de apoyo endurecida de la cabeza del bulón o la tuerca o contra una arandela plana endurecida si es que debajo del elemento girado se utiliza una arandela, ya sea que el elemento girado sea la tuerca o el bulón. En la Figura C.8.1. se ilustra su correcto uso y orientación.

En algunos casos, puede que se requiera más de un único ciclo de pretensado parcial sistemático para deformar las salientes de los indicadores directos de la tensión hasta la luz especificada por el **Fabricante**. Si las luces no se cierran o si se cambia de **lote** de arandelas es necesario llevar a cabo un nuevo procedimiento de verificación utilizando el **calibrador de tensión**.

Una vez que las chapas conectadas, en **contacto firme**, la compresión parcial de las salientes del indicador directo de la tensión, se toma habitualmente como indicación de que se ha logrado la condición de ajuste sin juego.



Nota: * El Capítulo 6 incluye los requisitos generales para el uso de las arandelas
 * IDT = Indicador Directo de Tensión

Figura C.8.1. Uso y orientación del indicador directo de la tensión de acuerdo con las normas IRAM desarrolladas en base a las normas (ASTM F959) o (ASTM F959M).

COMENTARIOS AL CAPÍTULO 9.

INSPECCIÓN

C 9.1. UNIONES CON AJUSTE SIN JUEGO

Los requisitos para la inspección de las **uniones con ajuste sin juego** consisten en verificar que se utilizan componentes adecuados, que los elementos conectados fueron fabricados adecuadamente y que la **unión** se llevó a **contacto firme**. Debido a que para el correcto funcionamiento de las **uniones con ajuste sin juego** no se requiere tensión de pretensado, no es necesario inspeccionar los bulones instalados para determinar la tensión de pretensado real. De manera similar, no son aplicables los procedimientos de arbitraje descritos en el Capítulo 10.

C 9.2. UNIONES PRETENSADAS

Si las **uniones** son pretensadas no están sujetas a los mismos requisitos sobre inspección del tratamiento de las superficies de contacto que los especificados en el artículo 9.3. para las **uniones de deslizamiento crítico**.

C 9.2.1. Pretensado con giro de tuerca

Como se discutió en el comentario al artículo 8.2.1., colocar marcas concordantes en el conjunto durante su instalación facilita la inspección de los bulones que han sido pretensados con giro de tuerca. Los lados de las tuercas y cabezas de bulones que han recibido suficiente impacto para inducir la tensión de pretensado mínima de la Tabla 8.1. evidenciarán ligeras marcas del martillado.

Si durante la construcción se aplica y verifica adecuadamente el método de pretensado con giro de tuerca, este proporciona tensiones de pretensado instaladas más confiables, que si los ensayos de **inspección** son posteriores. Por lo tanto, la correcta inspección del método consiste en que el **Inspector** observe los ensayos de verificación requeridos antes de la instalación de los **medios de unión** y del método a utilizar, y monitoree los posteriores trabajos en ejecución para verificar que el método se aplique de manera correcta y rutinaria, o que realice una inspección visual de los conjuntos con marcas concordantes.

Se han detectado algunos problemas en el pretensado con giro de tuerca de los bulones galvanizados por inmersión en caliente. En algunos casos los problemas se han atribuido a un lubricante particularmente efectivo aplicado por el **Fabricante** para garantizar que los bulones y tuercas cumplan los requisitos de las Especificaciones correspondientes para ensayo de giros mínimos de los pasadores galvanizados. Ensayos realizados en obra con el **calibrador de tensión** demostraron que el lubricante reducía el coeficiente de fricción entre el bulón y la tuerca al punto que "el esfuerzo total de un trabajador utilizando una llave de cola" para ajustar sin juego la **unión**, inducía en realidad la totalidad de la tensión

de pretensado. Además, debido a que las tuercas se podían extraer con una llave de cola común, el **Inspector** juzgaba equivocadamente que el pretensado no era adecuado. Los **bulones de alta resistencia** con lubricación excesiva pueden requerir un par torsor significativamente menor para inducir la tensión de pretensado especificada. La verificación previa a la instalación pondrá al descubierto este potencial problema.

Por el contrario, la ausencia de lubricación o la falta de un sobre-roscado adecuado puede provocar el atascamiento de los filetes de la rosca de la tuerca y el bulón, lo cual provocará que el bulón falle por torsión a una tensión inferior a la tensión de pretensado especificada. En estos casos, el uso de un **calibrador de la tensión** para verificar los conjuntos de bulones a instalar será de utilidad para establecer si existe necesidad de lubricación.

C 9.2.2. Pretensado con llave calibrada

Para la correcta inspección del método, es necesario que el **Director Técnico** observe los ensayos de verificación requeridos antes de la instalación de los **medios de unión** y el método a utilizar, y monitoree los posteriores trabajos en ejecución para garantizar que el método se aplica de manera correcta y rutinaria dentro de los límites de tiempo establecidos entre su retiro del **almacenamiento protegido** y su pretensado final.

C 9.2.3. Pretensado con indicador directo de la tensión

Cuando la **unión** se ajusta inicialmente para dejarla sin juego, las salientes tipo arco del indicador directo de la tensión generalmente se comprimen parcialmente. Cuando la operación de ajuste provoque que la mitad o más de las luces entre estas salientes tipo arco se cierren hasta ser de **0,38 mm** o menos (**0,13 mm** o menos para el caso de indicadores directos de la tensión con recubrimiento), el indicador directo de la tensión debe ser reemplazado. Recién después de esta operación inicial se deben pretensar los bulones de manera sistemática. Si los bulones se instalan y pretensan en una única operación continua, los indicadores directos de la tensión le pueden dar al **Director Técnico** la falsa impresión de que los bulones han sido pretensados adecuadamente. Por lo tanto es necesario que el **Director Técnico** observe los ensayos de verificación previos a la instalación de los **medios de unión** con los indicadores directos de la tensión ubicados correctamente y el método a utilizar correspondiente. Después de esta operación el **Director Técnico** debe monitorear el progreso de los trabajos para garantizar que el método se aplica de manera repetitiva y adecuada.

C 9.3. UNIONES DE DESLIZAMIENTO CRÍTICO

Cuando las uniones se especifican como de deslizamiento crítico es necesario verificar que la condición de las superficies de contacto cumplan los requisitos especificados en los documentos contractuales antes de proceder a armar las uniones, y también verificar que los bulones estén correctamente pretensados luego de su instalación. Por lo tanto, los requisitos de inspección para las uniones de deslizamiento crítico son idénticos a los especificados en el artículo 9.2., agregando los requisitos de verificación de las superficies de contacto.

COMENTARIOS AL CAPÍTULO 10.

ARBITRAJE

Cuando la pretensión de los bulones se arbitra utilizando llaves de torsión luego del pretensado, este arbitraje está sujeto a todas las incertidumbres de la instalación con llave calibrada que se discuten en el comentario al artículo 8.2.2. Además, la confiabilidad del arbitraje posterior a los hechos se reduce debido a la ausencia de muchos de los controles necesarios para minimizar la variabilidad de la relación entre el par torsor y la tensión de pretensado, tales como:

- (1) El uso de arandelas endurecidas ⁽¹⁾
- (1) Cuidadosa atención a la lubricación e
- (2) Incertidumbre de los efectos del paso del tiempo y de la exposición en la condición instalada.

Además, en muchos casos puede ser necesario basar estos arbitrajes en un par torsor de arbitraje que se determina ya sea utilizando bulones que sólo se puede asumir que son representativos de los bulones utilizados en la obra o bien utilizando bulones extraídos de **uniones** terminadas. En definitiva, estos arbitrajes pueden rechazar de manera equivocada bulones que fueron sometidos a un procedimiento de instalación implementado correctamente. A pesar de sus limitaciones, el procedimiento de arbitraje contenido en esta Recomendación se presenta como el mejor procedimiento disponible en este momento.

Los arbitrajes que utilizan un extensómetro ultrasónico o mecánico capaz de medir las variaciones de la longitud del bulón se pueden llevar a cabo sobre una muestra de bulones representativa de los bulones instalados en la obra. Diversos **Fabricantes** producen equipos específicos para esta aplicación. Empleando técnicas adecuadas, las cuales incluyen la calibración, se pueden obtener mediciones muy precisas de la tensión de pretensado real. El método implica medir la variación de la longitud del bulón durante la liberación de la tuerca, en combinación con una calibración de la carga del **medio de unión** a extraer o bien un cálculo teórico de la fuerza correspondiente a la liberación o "estiramiento" elástico. Este procedimiento requiere la reinstalación del bulón liberado o el reemplazo de un bulón.

La liberación requerida sugiere que sólo se deben emplear los extensómetros directamente como herramienta de inspección en los casos más críticos. El problema de la reinstalación puede requerir el reemplazo de bulones, a menos que se pueda aplicar un par torsor lentamente utilizando una llave manual o hidráulica que permita restaurar el alargamiento original.

(1) Por ejemplo, debido a que la confiabilidad del método de pretensado con giro de tuerca no depende de la presencia o ausencia de arandelas debajo del elemento girado, generalmente no se requieren arandelas, excepto por otros motivos indicados en el Capítulo 6. Por lo tanto, en ausencia de arandelas "posteriores a los hechos", el arbitraje en base al par torsor es particularmente no confiable cuando para la instalación se ha utilizado el método de pretensado con giro de tuerca.

APÉNDICE A.

MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL COEFICIENTE DE FRICCIÓN DE LOS RECUBRIMIENTOS UTILIZADOS EN UNIONES ABULONADAS

COMENTARIOS AL APÉNDICE A1.

REQUISITOS GENERALES

C A1.1. PROPÓSITO Y ALCANCE

El coeficiente de fricción bajo carga estática de corta duración es independiente de la magnitud de la fuerza de apriete, de las variaciones del espesor del recubrimiento y del diámetro del agujero del bulón.

Los métodos de ensayo propuestos están diseñados para proporcionar la información necesaria para evaluar si un recubrimiento es adecuado para **uniones de deslizamiento crítico** y para determinar el **coeficiente medio de fricción** a utilizar en el cálculo de las **uniones**. Los ensayos iniciales de las muestras a compresión proporcionan una medida de la dispersión del coeficiente de fricción.

Los ensayos de fluencia lenta están diseñados para medir el comportamiento en fluencia lenta del recubrimiento bajo acciones de servicio, determinado mediante el coeficiente de fricción del recubrimiento basado en los resultados de los ensayos de compresión. El ensayo de deslizamiento que se lleva a cabo al final del ensayo de fluencia lenta, es para garantizar que la pérdida de fuerza de apriete en el bulón, no reduce la carga de deslizamiento por debajo de aquella asociada con el coeficiente de fricción de cálculo. Se especifican bulones **Nivel 2**, ya que la pérdida de fuerza de apriete es mayor para estos bulones que para los bulones **Nivel 1**. En la muestra de ensayo el espesor promedio del recubrimiento a calificar es **50 micrones** mayor al que se utilizará en la estructura, esto es para garantizar que una acumulación no intencional de recubrimiento, provocada por una pulverización excesiva o por cualquier otra causa, no ponga en peligro el comportamiento del recubrimiento.

C A1.2. Definición de las variables esenciales

C A1.2.2. Espesor del recubrimiento

El espesor del recubrimiento y del imprimador se medirán de acuerdo con la norma SSPC-PA2-96 *Measurement of Dry Coating Thickness with Magnetic Gages*, hasta tanto no se especifique o recomiende una norma IRAM que la sustituya.

COMENTARIOS AL APÉNDICE A2.

CHAPAS PARA ENSAYO Y RECUBRIMIENTO DE LAS PROBETAS

C A2.1. CHAPAS PARA ENSAYO

Para los bulones de las probetas se utilizan agujeros de **25,4 mm** (1 pulgada) de diámetro con el propósito de garantizar que haya una luz adecuada y se pueda producir el deslizamiento. Las tolerancias de fabricación, el exceso de recubrimiento en los agujeros y las tolerancias del conjunto tienden a reducir las luces aparentes.

COMENTARIOS AL APÉNDICE A3.

ENSAYOS DE DESLIZAMIENTO

La carga de deslizamiento medida en este ensayo proporciona directamente el coeficiente de fricción, ya que la fuerza de apriete se controla y se mide directamente. Se ha descubierto que el coeficiente de fricción resultante se correlaciona tanto con los ensayos de tracción como con los ensayos de compresión de las probetas abulonadas. Sin embargo, los ensayos de probetas abulonadas indicaron que es posible que la fuerza de apriete no sea constante sino que disminuya con el tiempo debido a la fluencia lenta por compresión del recubrimiento sobre las **superficies de contacto** y debajo de la tuerca y la cabeza del bulón.

Para las uniones con elevada fuerza de apriete y recubrimientos de gran espesor es posible que la reducción de la fuerza de apriete sea considerable (posiblemente hasta una pérdida del **20 %**). Esta reducción de la fuerza de apriete ocasiona una correspondiente reducción de la carga de deslizamiento. La reducción resultante de la carga de deslizamiento debe ser tenida en cuenta en el procedimiento utilizado para determinar las cargas de deslizamiento admisibles de cálculo para el recubrimiento.

La pérdida de la fuerza de apriete es una característica del recubrimiento. En consecuencia, no se puede considerar incrementando el factor de seguridad o reduciendo la fuerza de apriete utilizada para el cálculo, ya que se estaría penalizando indebidamente los recubrimientos que no evidencian este comportamiento.

C A3.1. EQUIPO PARA EL ENSAYO DE COMPRESIÓN

C A3.1.1. Sistema para la aplicación de la fuerza de apriete

El coeficiente de fricción se puede determinar fácilmente utilizando el equipo hidráulico para ensayo de bulones incluido en esta Recomendación. El sistema de aplicación de la fuerza de apriete simula la acción de apriete de un **bulón de alta resistencia pretensado**.

El pisón del agujero central aplica una fuerza de apriete a la probeta, simulando la fuerza debida a un bulón pretensado.

C A3.6. MÉTODOS DE ENSAYO ALTERNATIVOS

Se pueden utilizar probetas y procedimientos de ensayo alternativos siempre y cuando se mantenga la precisión indicada para la medición de las cargas y la geometría de la probeta. Por ejemplo, los bulones con medidor de deformación normalmente pueden proveer la precisión deseada. Sin embargo, los bulones que han sido pretensados mediante los métodos de pretensado con giro de tuerca, llave calibrada, los pasadores de

diseño alternativo o los indicadores directos de la tensión generalmente evidencian demasiada variación como para cumplir el requisito de $\pm 1 \%$ exigido para el ensayo de deslizamiento.

COMENTARIOS AL APÉNDICE A4.

ENSAYO DE FLUENCIA LENTA EN TRACCIÓN

La deformación por fluencia lenta de la *unión* abulonada bajo la carga de corte aplicada también constituye una característica importante y es función del recubrimiento aplicado.

Los recubrimientos de mayor espesor tienden a presentar una mayor fluencia lenta que los recubrimientos de menor espesor. La velocidad de la deformación por fluencia lenta aumenta a medida que la carga aplicada se aproxima a la carga de deslizamiento. Numerosos ensayos han demostrado que la velocidad de la fluencia lenta no es constante en el tiempo, más bien tiende a disminuir en función del tiempo. Luego de alrededor de **1000 horas** de carga la deformación adicional por fluencia lenta es despreciable.

C A4.2. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

Ver el comentario al artículo A1.1.

BIBLIOGRAFIA:

Allen, R.N. and J.W. Fisher, 1968, "Bolted Joints With Oversize or Slotted Holes," *Journal of the Structural Division*, Vol. 94, No. ST9, September, ASCE, Reston, VA.

American Institute of Steel Construction, 1999, *Load and Resistance Factor Design (LRFD) Specification for Structural Steel Buildings*, AISC, Chicago, IL.

Birkemoe, P.C. and D.C. Herrschaft, 1970, "Bolted Galvanized Bridges—Engineering Acceptance Near," *Civil Engineering*, April, ASCE, Reston, VA.

Carter, C.J., R.H.R. Tide and J.A. Yura, 1997, "A Summary of Changes and Derivation of LRFD Bolt Design Provisions," *Engineering Journal*, Vol. 34, No. 3, (3rd Qtr.), AISC, Chicago, IL.

Carter, C.J., 1996, "Specifying Bolt Length for High-Strength Bolts," *Engineering Journal*, Vol. 33, No. 2, (2nd Qtr.), AISC, Chicago, IL.

Chesson, Jr., E, N.L. Faustino and W.H. Munse, 1965, "High-Strength Bolts Subjected to Tension and Shear," *Journal of the Structural Division*, Vol. 91, No. ST5, October, ASCE, Reston, VA.

Fisher, J.W. and J.L. Rumpf, 1965, "Analysis of Bolted Butt Joints," *Journal of the Structural Division*, Vol. 91, No. ST5, October, ASCE, Reston, VA.

Frank, K.H. and J.A. Yura, 1981, "An Experimental Study of Bolted Shear Connections," FHWA/RD-81/148, December, Federal Highway Administration, Washington, D.C.

Kulak, G.L., J.W. Fisher and J.H.A. Struik, 1987, *Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints*, Second Edition, John Wiley & Sons, New York, NY.

Kulak, G.L. and P.C. Birkemoe, 1993, "Field Studies of Bolt Pretension," *Journal of Constructional Steel Research*, No. 25, pp. 95-106.

Kulak, G.L. and S.T. Undershute, 1998, "Tension Control Bolts: Strength and Installation," *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 3 No. 1, February, ASCE, Reston, VA.

Manuel, T.J. and G.L. Kulak, 2000, "Strength of Joints that Combine Bolts and Welds," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 126, No. 3, March, ASCE, Reston, VA.

McKinney, M. and F.J. Zwerneman, 1993, "The Effect of Burrs on the Slip Capacity in Multiple Bolt Connections," *Final Report to the Research Council on Structural Connections*, August.

Munse, W. H., 1967, "Structural Behavior of Hot Galvanized Bolted Connections," *Proceedings of the 8th International Conference on Hot-dip Galvanizing*, June, London, England.

Polyzois, D. and K.H. Frank, 1986, "Effect of Overspray and Incomplete Masking of Faying Surfaces on the Slip Resistance of Bolted Connections," *Engineering Journal*, Vol. 23, No. 2, (2nd Qtr), AISC, Chicago, IL.

Polyzois, D. and J.A. Yura, 1985, "Effect of Burrs on Bolted Friction Connections," *Engineering Journal*, Vol.22, No. 3, (3rd Qtr), AISC, Chicago, IL.

Sherman, D.R. and J.A. Yura, 1998, "Bolted Double-Angle Compression Members," *Journal of Constructional Steel Research*, 46:1-3, Paper No. 197, Elsevier Science Ltd., Kidlington, Oxford, UK.

SSPC, 1993, *Steel Structures Painting Manual*, Vol. 1, Third Edition, SSPC: The Society for Protective Coatings, Pittsburgh, PA.

SSPC, 1991, *Steel Structures Painting Manual*, Vol. 2, Sixth Edition, SSPC: The Society for Protective Coatings, Pittsburgh, PA.

Yura, J.A. and K.H. Frank, 1985, "Testing Method to Determine Slip Coefficient for Coatings Used in Bolted Joints," *Engineering Journal*, Vol. 22, No. 3, (3rd Qtr.), AISC, Chicago, IL.

Yura, J.A., K.H. Frank and L. Cayes, 1981, "Bolted Friction Connections with Weathering Steel," *Journal of the Structural Division*, Vol. 107, No. ST11, November, ASCE, Reston, VA.

INTI

INSTITUTO NACIONAL DE
TECNOLOGÍA INDUSTRIAL



CIRSOC

CENTRO DE INVESTIGACIÓN DE LOS
REGLAMENTOS NACIONALES DE
SEGURIDAD PARA LAS OBRAS CIVILES