



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

UNIONES ATORNILLADAS PRETENSADAS. UN AVANCE SOBRE LAS LIMITACIONES DE LOS CÁLCULOS SIMPLIFICADOS

Germán G. Keil¹, Damián F. Campos^{*1}

^{*1}Dpto. Mecánica Aplicada, Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional del Comahue
Buenos Aires 1400 Neuquén – Prov. del Neuquén - Argentina
correo-e: german.keil@fain.uncoma.edu.ar
damian.campos@fain.uncoma.edu.ar

RESUMEN

Conforme a diversos autores del diseño mecánico de uniones atornilladas, a partir de las especificaciones técnicas, las metodologías de cálculo presentadas, centran la atención en el tornillo, de tal manera que cumpla con los requisitos de seguridad preestablecidos, para la condición de máxima sollicitación, tanto desde el punto de vista estático como dinámico. Corrientemente, también se determina la fuerza de cierre sobre los elementos a unir.

En el análisis del comportamiento de una unión atornillada, un aspecto relevante, no considerado por muchos autores en sus cálculos simplificados, es el punto de aplicación de la carga sobre la unión. Si bien resulta complejo en muchos casos su ubicación, la normativa VDI 2230 presenta ejemplos, que pueden servir de referencia para cálculos de dimensionamiento básicos y/o verificaciones preliminares.

Otro hecho no considerado habitualmente en estos procedimientos básicos, y que se entiende también como una limitación trascendente, es la incertidumbre asociada a la real fuerza de pretensado en la unión.

La no consideración de los aspectos señalados, se traduce en centrar la mirada en lo que puede ser la situación más crítica para el tornillo, pero no para la condición de cierre de la junta.

Dada la influencia de los dos aspectos señalados, visualizando las consecuencias de su no consideración en los cálculos, la propuesta que se presenta, limitada a la determinación de las fuerzas actuantes, y que toma como referencia las ecuaciones básicas de cálculo de uso corriente, es trabajar en base a información disponible con rangos de variación estimados, para considerar las incertidumbres asociadas a la fuerza real de pretensado, y la localización del punto de aplicación de la carga. Con el procedimiento que se propone, se pueden determinar sencillamente, en el marco de las incertidumbres señaladas, las eventuales fuerzas actuantes más críticas para el tornillo y los elementos a unir.

Palabras claves: Uniones Atornilladas Pretensión Incertidumbres Fuerzas



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

1. INTRODUCCIÓN

En el marco del diseño mecánico de sujetadores del tipo uniones atornilladas, corresponde señalar que en el contexto de las especificaciones técnicas del problema, el diseñador debe definir o tomar una serie de decisiones en relación a la cantidad de elementos o tornillos a emplear, el tipo o geometría de los mismos asociado a una norma, las características de la rosca y paso, material del tornillo y tuerca con el correspondiente recubrimiento si correspondiere, y tomar previsiones en relación a la metodología y herramental de montaje.

Previo a la toma de decisiones en relación a los aspectos señalados, el diseñador debe indagar en profundidad en relación a las solicitaciones actuantes sobre la unión y las condiciones de operación de la unión (temperatura, agresividad del medio, presencia de vibraciones, calidad del montaje, consecuencias de una eventual falla o aflojamiento de la unión) [1].

Para el predimensionamiento y/o verificación básica, se emplean algoritmos simplificados. Luego conforme a las metodologías propuestas por diversos autores, se procede a realizar la verificación correspondiente. Para el caso de uniones críticas muy solicitadas, la verificación estructural señalada debe contemplar la mayor cantidad de aspectos vinculados al diseño, y que tienen influencia en el comportamiento de dicha unión y sus componentes.

Autores e investigadores en la materia reconocidos internacionalmente [1, 2, 3, 4, 5] presentan, en diversa bibliografía y documentos, metodologías de cálculo y verificación de uniones atornilladas. Las mismas tienen una estructura similar. En general contemplan la determinación de las características de rigidez, del tornillo y de los elementos a unir, fijación de la fuerza de pretensado, determinación de la fuerza máxima sobre el tornillo y remanente sobre los elementos a unir. Con la fuerza máxima sobre el tornillo, con la selección del material y el coeficiente de seguridad se determina el diámetro del mismo o eventualmente dado el diámetro se procede a la verificación. Las determinaciones señaladas, valen tanto para cargas externas estáticas como variables.

El diseño de la unión atornillada, para la condición de carga máxima, debe asegurar que la fuerza o presión de cierre en los elementos a unir no sea inferior al valor mínimo indicado en las especificaciones básicas de diseño. Para esta condición, las tensiones actuantes sobre el tornillo (estáticas – variables) no deben generar un compromiso estructural en el mismo.

Independientemente de lo señalado, corresponde destacar que en las metodologías de cálculo indicadas, el punto de aplicación de la carga sobre la unión, está dado sobre las superficies de apoyo de la cabeza del tornillo y de la tuerca sobre los elementos a unir.

En la realidad, se plantean muchos casos donde el punto real de aplicación de la carga no se identifica con la condición planteada precedentemente. Esta situación trae aparejada una



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

alteración en la determinación del denominado factor de junta teniendo como resultado, respecto a la metodología de cálculo general señalada, una menor carga máxima sobre el tornillo y una menor presión remanente sobre los elementos a unir. En este último caso, la situación puede hacerse crítica, si no se alcanzan los valores mínimos de cierre pautados en las especificaciones. Este aspecto está tratado en profundidad en la normativa VDI 2230 [6].

De la misma manera, se puede observar que en las metodologías generales de cálculo y/o verificación empleadas corrientemente, solo se tiene en cuenta parcialmente la incertidumbre asociada con la real fuerza de pretensado actuante en la unión, la que está vinculada con el herramental y el procedimiento de montaje de la unión y el control asociado. Producto de esa incertidumbre, se tendrán rangos de fuerza de pretensado, máximas y mínimas probables, que tendrán influencia en la carga sobre el tornillo, como así también la fuerza remanente sobre los elementos a unir. Esta condición es tratada en profundidad en la normativa VDI 2230 y en la bibliografía especializada [7, 8].

Dependiendo del método de ajuste de la unión, se pueden dar situaciones donde la fuerza de pretensado pretendida, puede variar para condiciones extremas de +/- 100 a 150 %.

Para tener en cuenta en los cálculos los fenómenos señalados precedentemente, incidencia del punto de aplicación de la carga y dispersión de la fuerza real de pretensado se propone, sobre la base de las expresiones clásicas empleadas por los autores indicados precedentemente, para el cálculo y/o verificación de uniones atornilladas, la inclusión en las mismas de coeficientes de influencia, con valores máximos y mínimos.

2. DEFINICIONES

F : Fuerza exterior sobre la unión.

F_T : Fuerza máxima sobre el tornillo.

F_j : Fuerza de cierre remanente en la junta.

F_V : Fuerza de pretensado.

T : Torque de pretensado.

K : Factor de junta.

δ_T : Elasticidad del tornillo.

δ_j : Elasticidad de los elementos a unir.

K_T : Rigidez del tornillo. Se considera al tornillo como una barra de sección cilíndrica uniforme.

A_T : Área del tornillo.

E_T : Módulo de elasticidad del material del tornillo (acero).



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

- L_T : Longitud del tornillo.
- K_j : Rigidez de la junta o elementos a unir.
- A_j : Área de la junta.
- L_j : Longitud de los elementos a unir.
- E_j : Módulo de elasticidad del material de la junta (acero).
- D : Diámetro del tornillo.
- f_T : Elongación del tornillo por efecto del pretensado.
- f_S : Acortamiento de la junta por efecto del pretensado.
- f : Alargamiento de la junta y tornillo por efecto de la fuerza exterior.

3. DESARROLLO

3.1 Influencia del punto de aplicación de la carga.

En la Figura 1 se muestra una unión atornillada típica, en la cual la carga exterior es aplicada sobre la superficie de contacto de la cabeza del tornillo y de la tuerca, con los elementos a unir. Se trata del caso general referenciado comúnmente por los autores, para la determinación de las distintas expresiones que se emplean para el dimensionamiento y verificación de la unión.

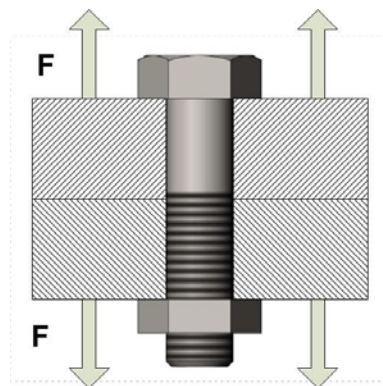


Figura 1

En la Figura 2 [7], se pueden observar los tres estados típicos de una unión atornillada [4], con indicación de las elongaciones y acortamientos de los componentes de la misma: a) Sin pretensado; b) Con pretensado; c) Con aplicación de la carga exterior.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

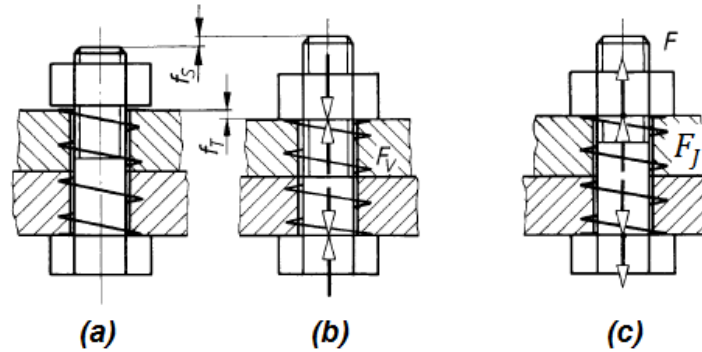


Figura 2

En la Figura 3, se presenta para el esquema de carga de la Figura 1, el correspondiente diagrama de pretensado de la unión atornillada.

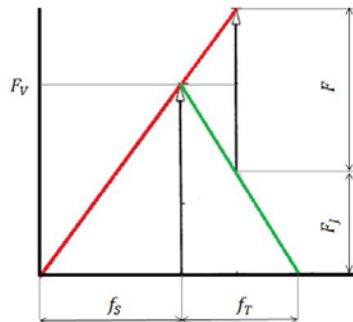


Figura 3

Las siguientes Ecuaciones (1), (2), (3), (4) y (5), son clásicas y empleadas por los diversos autores, para determinar las fuerzas actuantes sobre el tornillo " F_T ", y los elementos de la unión " F_J ".

$$F_T = F_V + K \cdot F \quad (1)$$

$$F_J = F_V - (1 - K) \cdot F \quad (2)$$

El factor de junta " K " se determina a partir de la rigidez del tornillo " K_T " y de los elementos de la junta " K_J ".

$$K = \frac{K_T}{K_T + K_J} \quad (3)$$

$$K_T = \frac{A_T \cdot E_T}{L_T} \quad (4)$$



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

$$K_J = \frac{A_J \cdot E_J}{L_J} \quad (5)$$

Para el caso de la aplicación de la carga exterior “ F ” en un punto intermedio de la longitud de los elementos a unir, se tendrá esquemáticamente conforme a lo indicado en la Figura 4:

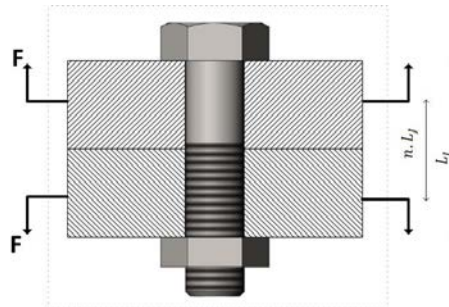


Figura 4

El punto de aplicación de la carga queda definido cuantitativamente, a través de un fracción “ n ” de la longitud “ L_J ” de los elementos a unir. El valor de “ n ” puede oscilar entre 0 y 1. Este último caso, se corresponde con la situación planteada en la Figura 1.

Mediante una extensión de las Ecuaciones (1) y (2) se tendrá:

$$F_T = F_V + n \cdot K \cdot F \quad (6)$$

$$F_J = F_V - (1 - n \cdot K) \cdot F \quad (7)$$

El correspondiente diagrama de pretensado se presenta en la Figura 5.

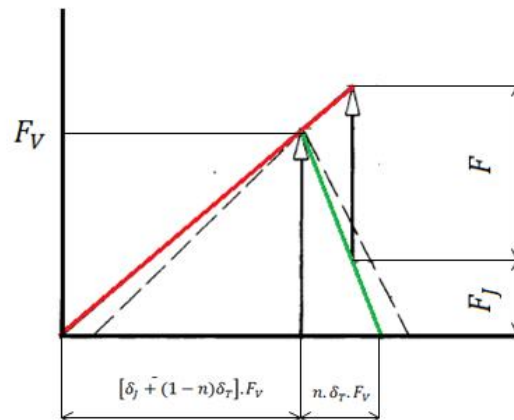


Figura 5



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

En la Figura 5 puede observarse el diagrama pretensado de montaje (línea de trazos) y el operativo (línea llena). El corrimiento del punto de aplicación de la carga (ver Figuras 1 y 4), trae aparejado operativamente, conforme al diagrama de pretensado, un aumento de la rigidez de los elementos a unir, y una disminución de la misma para el tornillo.

Lo señalado implica para valores de “ n ” menores a 1:

- Una reducción de la carga “ F_T ” actuante sobre el tornillo respecto al caso “ $n = 1$ ”;
- Una reducción de la carga “ F_j ” actuante sobre los elementos de la unión respecto al caso “ $n = 1$ ”.

Se puede observar entonces del análisis de las Ecuaciones (6) y (7), que el valor de “ n ” que tiene en cuenta el punto de aplicación de la carga en relación a la longitud de los elementos a unir “ L_j ”, tendrá fuerte incidencia en el comportamiento de la unión.

Independientemente de lo señalado, a priori resulta para la mayoría de los casos reales, muy complejo definir con precisión el valor de “ n ”, que tal lo señalado puede variar entre los valores límites 0 y 1.

En tal sentido en la Figura 6, y propuesto en documentos especializados [7], se pueden visualizar una serie de diversas configuraciones de uniones atornilladas, en donde se establece con precisión el valor del coeficiente “ n ”.

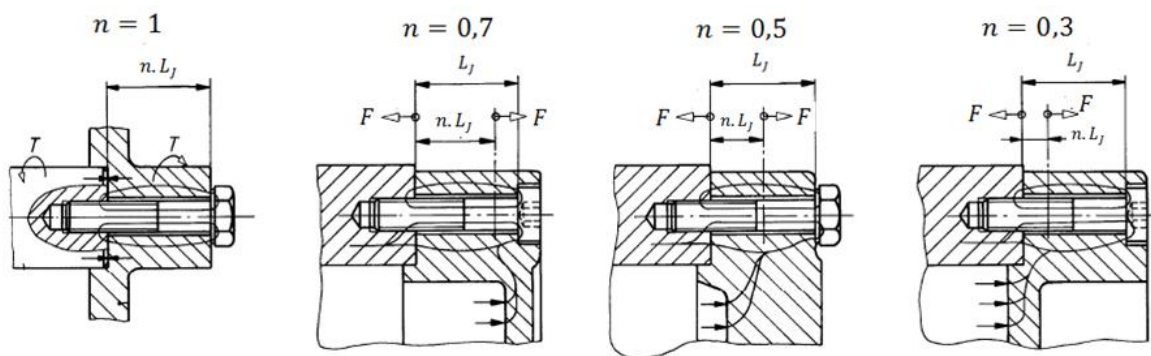


Figura 6

Los autores ya referenciados [1-5], no consideran la influencia del punto de aplicación de la carga en la unión. Tal lo expresado, para cualquier situación que implique para el punto de aplicación de la fuerza un valor “ $n < 1$ ”, se tendrá un valor menor de carga sobre el tornillo, pero también un valor menor en la fuerza de cierre de la unión. La situación que merita atención es esta última, pudiendo dado el caso, generar compromisos sobre la misma, como ejemplo problemas de

estanquidad, o deslizamiento relativo entre superficies, dependiendo de la aplicación. Debe aclararse, que el valor de la fuerza de cierre mínima en la unión debe satisfacer las especificaciones del diseño.

3.2 Incertidumbres asociadas con el método y operación de pretensado.

El diseñador debe fijar la fuerza de pretensado necesaria para lograr en operación, una fuerza de cierre mayor que la mínima requerida en la unión.

Se tiene diversos sistemas de ajuste para lograr dicho pretensado, como ser: llaves torquimétricas, tensores hidráulicos, ajustes térmicos, control de giro, y otros. Para el empleo de los mismos, se debe tener como referencia previa la fuerza de pretensado a generar. Se dispone de expresiones que permiten determinar la relación entre el torque a aplicar y la fuerza de pretensado a generar. El punto de partida para la obtención de la misma, son las denominadas ecuaciones largas que parten de consideraciones de trabajo y energía, y la denominada expresión corta a partir de un equilibrio de fuerzas (analogía de la rosca con un plano inclinado), y que se presenta a continuación [9]:

$$T = c \cdot F_V \cdot D \quad (8)$$

Para este método de ajuste evidentemente se plantean incertidumbres en cuanto a la correlación entre el torque de apriete y la fuerza de pretensado. Dicha relación está fuertemente influenciada por el coeficiente de fricción de los elementos roscados, del estado de las superficies de apoyo del tornillo o tuerca sobre los elementos a unir, la pericia del montador y otros, que están contemplados en el término “c”.

En términos generales los diferentes autores presentan dos situaciones: con superficies lubricadas y sin lubricar. En tal sentido, por ejemplo, Robert Mott [4] propone “c= 0.15” si existe alguna lubricación, y “c=0.20” para roscas limpias y secas. Además plantea, que son dables de esperar variaciones aun para conjuntos atornillados aparentemente similares; y recomienda aplicar pruebas y análisis estadísticos.

Dicha incertidumbre en el valor del término “c”, conforme a la Ecuación (8), se traslada a la fuerza de pretensado real “F_V”, variando entre un máximo y mínimo.

Si se emplean otros métodos de ejecución y control de pretensado, como giro de la tuerca, las variaciones en la fuerza de pretensado pueden oscilar [10] en un +/- 15 %; mediante el alargamiento del tornillo +/- 3 a 15 %.

A los efectos de generalizar la incertidumbre asociada con el valor real de la fuerza de pretensado, se identificará a la misma con el término “m”.

3.3 Incertidumbre asociada con el Factor de Junta.

Conforme a lo indicado en la Ecuación (3) el factor de junta “K” depende de la elasticidad/rigidez de los elementos constitutivos de la unión. De acuerdo a la Ecuación (4) resulta relativamente sencilla la determinación de la rigidez del tornillo, ofreciendo mayor dificultad la correspondiente a los elementos a unir. En tal, el tema central es la predeterminación del volumen deformado [10]. Varios autores asocian dicha geometría a un cono, con un ángulo de la generatriz del mismo con el eje de simetría, que está en el orden de los 30°. La normativa VDI 2230 [6] plantea una serie de expresiones para calcular el área de un cilindro equivalente al del volumen deformado (paraboloide de revolución). Los antecedentes disponibles permiten afirmar [10] que para la obtención del factor de junta “K”, la aplicación de las expresiones propuestas por diversos autores especializados, respecto a la aplicación de herramientas de cálculos fundamentadas en el método de elementos finitos, la diferencia en los resultados no es de significación. Por lo tanto no se plantean dudas, en cuanto a la aplicación generalizada de las metodologías simplificadas de cálculo.

3.4 Coexistencia de incertidumbres.

Teniendo como referencia las Ecuaciones (6) y (7), y los coeficientes de influencia de posición de la carga exterior “n” y de incertidumbre de la fuerza de pretensado “m”, ambos con valores máximos y mínimos, se presentan las Ecuaciones (9) y (10), mediante las cuales se podrán determinar, la carga máxima actuante sobre el tornillo y la mínima remanente sobre la junta.

$$F_T = m \cdot F_V + n \cdot K \cdot F \quad (9)$$

$$F_J = m \cdot F_V - (1 - n \cdot K) \cdot F \quad (10)$$

Para la fijación del valor de “n” se pueden tener en cuenta, a título de referencia básica, los esquemas de la Figura 6. De no coincidir la unión en fase de diseño, cálculo y/o verificación, con alguno de los esquemas indicados, se propone fijar valores alternativos en el marco de un rango. A título de ejemplo: “0.5 < n < 0.7”.

De la misma manera, la determinación del coeficiente “m” se puede obtener a partir de las propuestas de diversos autores que definen, conforme a la Ecuación (8) los rangos de variación de “c” ($\pm\Delta c$), que permite obtener el torque de pretensado en función de la fuerza de pretensado.

$$m = \frac{c}{c \pm \Delta c} \quad (11)$$

CONCLUSIONES

Al diseñar, calcular y verificar una unión atornillada pretensada, además de asegurar la integridad del tornillo, cuestión en la cual las metodologías de cálculo corrientes hacen fuerte hincapié y de hecho las expresiones empleadas para la verificación así lo demuestran, a la par debe garantizarse que la fuerza de cierre en la unión satisfaga los valores mínimos requeridos.

El diseño y cálculo de uniones atornilladas involucra varias variables. No se pueden predecir con absoluta precisión los parámetros operativos reales de dicha unión, llámese fuerza de pretensado, sollicitación máxima sobre el tornillo, sollicitación mínima sobre la junta, ya que son muchos, tal lo indicado, los factores intervinientes.

Entre dichos factores que plantean incertidumbres, no considerando la carga exterior, que se supone conocida, se tienen la determinación del coeficiente de junta, la fuerza real de pretensado aplicada sobre la unión, y el punto de aplicación de la carga.

Tal lo fundamentado, si bien es compleja la distribución de tensiones y deformaciones en una unión atornillada, la disponibilidad de metodologías simples y fiables para la determinación del factor de junta K, hacen que se limiten las incertidumbres en cuanto a las variaciones posibles de las fuerzas sobre la unión.

Conforme al método y procedimiento de montaje de la unión, se pueden tener amplias dispersiones en los valores reales de pretensado, y que luego tendrá gran influencia en el comportamiento de la unión. De lo señalado surge, para reducir el margen posible de incertidumbre, pautar acabadamente el procedimiento de montaje. Como lo plantea R. Mott [4] se recomienda la realización de pruebas y análisis estadísticos de los resultados. No obstante lo señalado, hay numerosa información disponible que sirve de base para la determinación del coeficiente de influencia “m” que se propone emplear para considerar los valores mínimos y máximos expectables, para determinar conforme a las Ecuaciones (9) y (10) el valor de fuerza máximo actuante sobre el tornillo y mínimo sobre la junta.

En lo relativo al punto de aplicación de la fuerza actuante sobre la unión atornillada, su incidencia resulta trascendente, y se presenta a través del coeficiente “n”, como puede observarse en la Figura 4 y Ecuaciones (9) y (10). La propuesta es tomar como referencia esquemas típicos

previstos en la normativa VDI 2230 presentados en la Figura 6. Si la unión a calcular no tiene su analogía con algunas de las disposiciones señaladas, se propone establecer un rango de valores para dicho coeficiente.

Las metodologías básicas empleadas habitualmente para el cálculo y/o verificación básica de uniones atornilladas, consideran las Ecuaciones (1) y (2) para determinar la fuerza sobre el tornillo y la junta o elementos a unir, respectivamente. En los hechos esto significa considerar por defecto un valor “n=1”. Desde el punto de vista de la seguridad, esta situación nos muestra la situación eventual más crítica para el tornillo, y por el contrario, la menos crítica para la unión, desde el punto de vista de la fuerza mínima de cierre requerida.

Teniendo en cuenta que el propósito de la unión es garantizar una fuerza de cierre mínima, para lo cual debe diseñarse en forma adecuada el tornillo (dimensionamiento y montaje), se propone incluir en las Ecuaciones (1) y (2) los coeficientes de influencia “m” para tener en cuenta la incertidumbre en cuanto a la real fuerza de pretensado logrado en la unión, en base a la precisión del método de montaje y del operador, y de la precisión con la cual se puede definir el punto de aplicación de la carga a través del coeficiente “n”.

Se concluye, que tomando como base las expresiones clásicas para el dimensionamiento y/o verificación básica de uniones atornilladas, conforme a la propuesta que se realiza, con el adicional de dos coeficientes que en forma sencilla se pueden establecer a modo de rango y a partir de información disponible, permiten determinar las fuerzas críticas expectables para el tornillo y la junta.

REFERENCIAS

- [1] R. Budynas, J. Keith Nisbett, Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley, Mc Graw Hill, 2008.
- [2] J. Shigley, C. Mischke, Diseño en Ingeniería Mecánica, Mc Graw Hill, 1990.
- [3] R. Juvinall, K. Marshek, Fundamentals of Machine Component Design, Wiley, 2012.
- [4] R. L. Mott, Diseño de elementos de máquinas, Pearson, 2006.
- [5] A. Deutschman, W. Michels, C. Wilson, Diseño de Máquinas, Editorial Continental, 1987.
- [6] VDI – Richtlinien VDI 2230, Systematische Berechnung, 1998.
- [7] H. Wittel, D. Muhs, D. Jannasch, J. Voßiek, Maschinenelemente, Springer, 2013.
- [8] H. Haberhauer, F. Bodenstern, Maschinenelemente, Springer, 2007.
- [9] J. Bickford, An Introduction to the Design and Behavior of Bolted Joints, M. Dekker, 2013.
- [10] Germán Keil, Américo Jurasics, Francisco Gastaldi Bartak, I CAIM 2008, Evaluación analítica y experimental de tensiones y deformaciones de una unión atornillada.