

Medición de la fuerza de apriete en un ensamble utilizando tornillo autorroscante

Józef Wójcik Filipek¹

Alberto Alfonso Domínguez Gómez¹

José Silverio Nava Chávez¹

Jorge Antonio Pichardo Vázquez¹

RESUMEN

En este artículo se presenta una metodología para medir la tensión en un tornillo autorroscante mediante el uso de galgas extensiométricas. Asimismo, se describen las ventajas y desventajas que se pueden presentar al momento de realizar la prueba. Esta metodología ayudará a dar una mejor referencia del comportamiento de estos tornillos en una unión, así como a evitar diseños de mala calidad, propiciando un ahorro de tiempo y costo en la industria.

Palabras clave: torque, tensión, galga extensiométrica.

ABSTRACT

This article is describing advantages and disadvantages that may become present at the moment of performance utilizing self-threading screws, instrumented with strain gages. At the present time, there is no method or technical paper which describes any process to measure the tension load in assembles that utilize self threading screw attachments, which makes it difficult to know if the validated torque provides the necessary clamp load for the assembly, specially in critical joints. Obtaining a process to measure the bolt tension with these screws and strain gages, will help in giving a better reference to the behavior of these screws in the joints, so as to avoid bad quality designs, propitiating savings in time and cost.

Key words: self tapping screw, clamping force, strain gage.

¹ Facultad de Ingeniería, UAEM. jwf@uaemex.mx, aadom@hotmail.com, silver_6404@hotmail.com, jorgepfi@gmail.com

INTRODUCCIÓN

Los sujetadores roscados fijan de manera semipermanente los diferentes componentes de un ensamble en una determinada posición. Derivado de las cargas de servicio en un ensamble existen dos tipos de uniones con tornillos (Bickford, 1995).

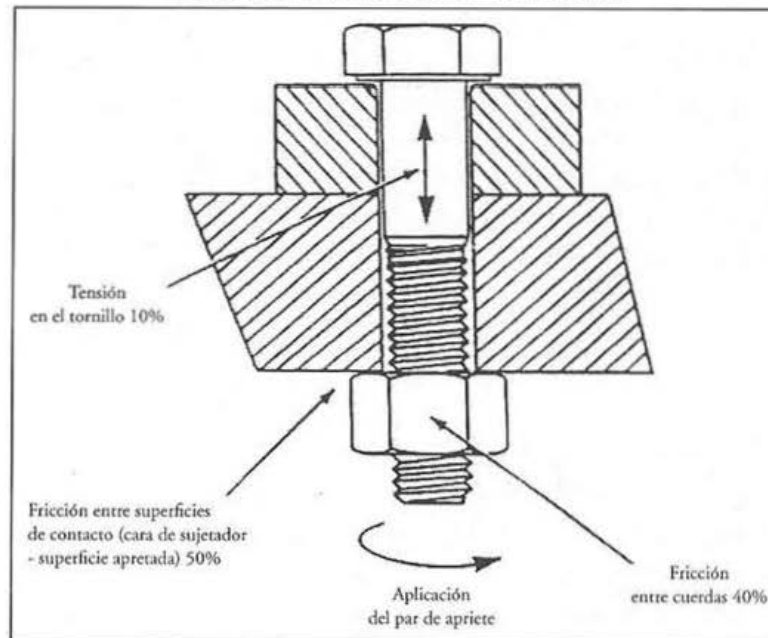
Generalmente, un tornillo trabaja como si fuera un resorte rígido. Cuando alguno de los sujetadores, tuerca o tornillo, es apretado, el tornillo tiende a elongarse cierta cantidad. Este alargamiento es medido por la deformación que sufre el tornillo en el apriete, produciendo el esfuerzo a la tensión y, por lo tanto, desarrollando la fuerza de apriete, medida en Newton.

En un ensamble convencional tornillo-tuerca, gran cantidad de la fuerza de apriete se utiliza en vencer la

fricción producida al entrar en contacto la cuerda del tornillo y la tuerca, así como la cabeza, con la superficie del elemento por apretar. Dado que la fricción es, por definición, una resistencia al movimiento relativo, es necesario mantener la unión sin que se presente pérdida en la fuerza de apriete o algún tipo de relajamiento. Debido a la presencia de la resistencia a la fricción entre la cuerda del tornillo y la cuerda de la tuerca al apretar cualquier elemento se induce un esfuerzo torsional, es decir, una torsión interna en el tornillo. Esta fuerza torsional llamada *par de apriete* T se expresa generalmente en Newton/metro (Nm).

Existe una relación par de apriete-tensión en el tornillo, la cual describe el porcentaje en que se distribuye el par de apriete aplicado a un ensamble convencional tornillo-tuerca, quedando esta distribución (Bickford, 1995) como se muestra en la figura 1.

Figura 1
DISTRIBUCIÓN DEL PAR DE APRIETE ENTRE CUERDAS



- 50% del par de apriete vence la fricción entre la superficie del sujetador roscado con la superficie del elemento apretado.
- 40% del par de apriete vence la fricción existente entre las cuerdas del tornillo y la tuerca.
- 10% del par de apriete elonga o tensa el tornillo.

La relación de distribución de par de apriete mostrada se deriva de un análisis teórico y experimental, en el cual se determina que la relación par de apriete aplicado y tensión en el tornillo tiende a ser una relación lineal. En otras palabras:

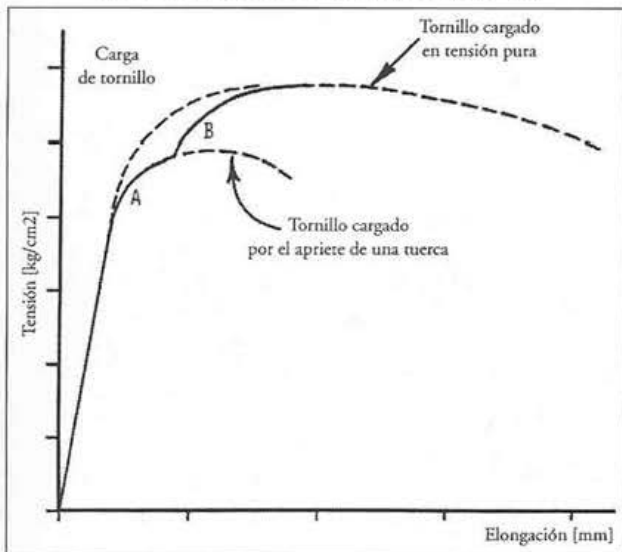
$$T = F_p \times C$$

EFFECTO GENERADO POR EL PAR DE APRIETE SOBRE EL ESFUERZO A LA TENSIÓN

Al apretar un tornillo con una herramienta eléctrica o neumática y graficar la curva esfuerzo-deformación de su comportamiento (figura 2), se aprecia cómo el punto de cedencia A es menor al que podría presentarse en un ensayo de tensión sobre el tornillo; esto se debe básicamente a que en un apriete con herramienta existe tensión y torsión al mismo tiempo. De cualquier manera, el mismo tornillo es capaz de soportar una mayor fuerza de tensión en servicio antes de presentar el punto de cedencia B dado que la torsión usualmente desaparece de manera instantánea después del apriete (Bickford, 1995).

Figura 2

DIAGRAMA DEL COMPORTAMIENTO DE UN TORNILLO 7/8-16 A325
EN UN ENSAMBLE CON UN ESPESOR DE 104.77 MM



DETERMINACIÓN DE ESPECIFICACIONES PAR DE APRIETE-TENSIÓN

Generalmente la determinación de un par de apriete se realiza mediante pruebas hechas en un laboratorio utilizando diferentes métodos dependiendo del tipo de prueba y resultados.

Existen diversos métodos de medición, los cuales han sido de utilidad en la industria para determinar específicamente pares de apriete y tensiones en ensambles

productivos. A continuación se enlistan algunos métodos que suelen tener diferentes condiciones, las cuales hacen un tanto difícil encontrar el par de apriete y la tensión correcta para cada ensamble.

- Comparación de nuevos ensambles con respecto a ensambles productivos o actuales. Al aplicar una especificación actual del par de apriete a un nuevo diseño resulta ser adecuado siempre y cuando el ensamble y la carga dinámica resulten ser idénticas. De cualquier manera, por pequeña que sea la diferencia en el ensamble podría causar un cambio en las condiciones de fricción y, por consiguiente, cambiar el valor del par de apriete.
- Cálculos matemáticos. Mediante la fórmula

$$T = \mu DL \text{ [Nm]}$$

se asume que el par de apriete es el resultado del coeficiente de fricción por el diámetro del tornillo por la carga. Esta relación es válida sabiendo que las condiciones del coeficiente de fricción son las mismas, lo cual desafortunadamente depende de muchas variables que pueden cambiar este coeficiente y no brindar siempre un resultado confiable.

- Medición de la elongación de un tornillo productivo o actual. La elongación en un tornillo a través de máquinas universales no es normalmente muy práctico para determinar el par de apriete. Una partícula de polvo o una excesiva presión en micrómetros puede afectar enormemente los resultados del ensayo.
- Determinación de la falla en el tornillo productivo o actual. Apretar un tornillo para llevarlo a condición de falla, a pesar de parecer algo sencillo, requiere del uso de tornillos con un mínimo en diámetro y dureza para demostrar la peor condición, lo cual resulta difícil de obtener.
- Realización de pruebas par de apriete-tensión sobre el ensamble con equipo especial. Un método para obtener una buena relación par de apriete-tensión en un tornillo es probando el ensamble como se hace directamente en la línea de producción, pero con la instrumentación de galgas extensiométricas en los tornillos. En este tipo de pruebas ningún componente

del ensamble por probar debe ser utilizado más de una vez; entre mayor sea el número de ensambles por probar se obtienen mejores resultados.

Los tornillos instrumentados por galgas extensiométricas resultan ser prácticos y confiables, ya que su presencia no altera las características del ensamble, lo cual suele suceder con las celdas de carga. Después de realizar la prueba, se procede a condensar los resultados de manera estadística, considerando las condiciones máximas y mínimas, así como las muestras que caen dentro de este intervalo. Con estos resultados se determina el valor del par de apriete que satisfaga las necesidades del ensamble. Estas especificaciones resultan ser la combinación del par de apriete, la tensión en el tornillo y la capacidad de la herramienta para lograr esto.

TORNILLOS AUTORROSCANTES

Los tornillos autorroscantes se caracterizan por generar su propia cuerda al momento de ser atornillados, es decir, no requieren de algún elemento adicional, como la tuerca, pues simplemente uno de los componentes del ensamble es barrenado y el tornillo autorroscante realiza la cuerda sobre este barreno (figura 3).

El objetivo principal de la creación de este tipo de tornillos fue reducir costos y operaciones en los ensambles. Al utilizar este tipo de tornillos se elimina la tuerca de un ensamble tradicional tornillo-tuerca, logrando, así, la eliminación de números de parte en

planta, reducción de costos por inventario y manejo, y la optimización de operaciones en la línea de ensamble, lo que se refleja finalmente en el costo. En general, el uso de tornillos autorroscantes puede ser de gran beneficio para la industria; sin embargo, si el tornillo no es seleccionado correctamente para la aplicación o no se consideran los parámetros más importantes, como diámetro de barreno, materiales, espesores y velocidad de la herramienta, en lugar de ser una ventaja para las plantas de ensamble, podrían causar potenciales de fallas y retrabajos, los cuales, en lugar de brindar beneficios económicos, se traducirían en pérdidas y mala calidad del producto.

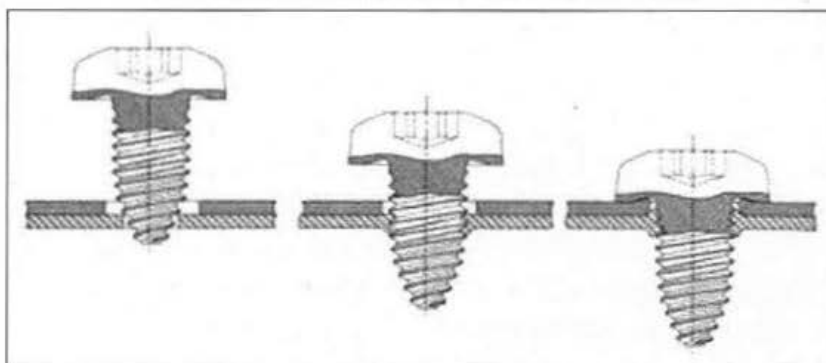
SISTEMA DE MEDICIÓN

DE LA FUERZA DE APRIETE DE UN TORNILLO

Al momento de realizar un ensamble a través de elementos roscados, la principal característica que se busca es la fuerza de apriete brindada por el tornillo. Las galgas extensiométricas junto con otros sofisticados equipos, como transductores de par de apriete y sistemas recolectores de datos, pueden ser de los métodos más precisos para medir la tensión en un tornillo. Las galgas miden la deformación en un cierto punto de la superficie del elemento, por lo que se debe tener cuidado en cuanto a su localización. Además de obtener la tensión en el tornillo, se tiene la capacidad de medir esfuerzos de deformación o torsión, dependiendo del tipo de galga extensiométrica que se utilice.

Figura 3

TORNILLO AUTORROSCANTE GENERANDO SU PROPIA CUERDA



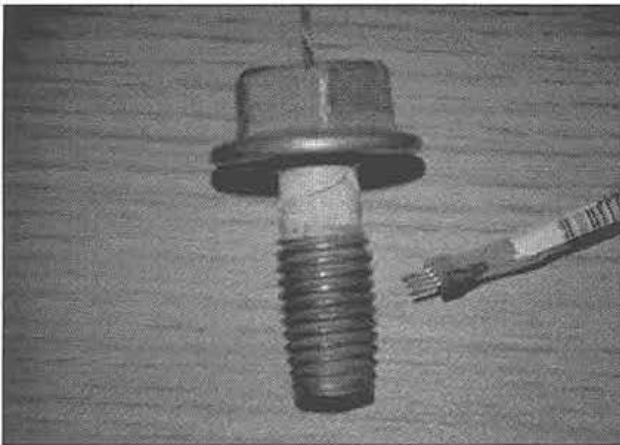
Cuando un tornillo es instrumentado apropiadamente, se puede decir que la precisión en la medida de la tensión en el tornillo puede ser de ± 1 o 2% (Bickford, 1995).

En el caso de la instrumentación de tornillos en donde se desea conocer la deformación de éstos al momento de ser apretados, la galga extensiométrica debe ser colocada con sus hilos paralelos al eje del tornillo. Al momento de apretar el tornillo, éste sufre una elongación, la cual produce variaciones en la geometría del hilo del extensímetro que causan una variación de su resistencia; por lo tanto disponiendo de instrumentos capaces de medir las pequeñas variaciones de resistencia original del extensímetro, se puede conocer la deformación mecánica del tornillo (Olivares, 1999).

Con propósitos de experimentación, se seleccionó un tornillo M12 x 1.75 x 30, considerando que es utilizado en un ensamble crítico de tipo funcional, que es autorroscante y que tiene buen tamaño para ser instrumentado con galgas extensiométricas sin presentar mucha dificultad (figura 4).

Figura 4

TORNILLO AUTORROSCANTE
INSTRUMENTADO CON GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS



En todo ensamble existen variables que pueden afectar la integridad del tornillo. Entre estas variables se pueden considerar como las más importantes, según Domínguez (2004): el material de los elementos a sujetar, el acabado superficial, la velocidad de apriete y las dimensiones de barreno, especialmente para ensambles con tornillo

autorroscante. La principal característica que varió en este estudio fue la dureza de los materiales, ya que es un parámetro importante a considerar en este tipo de ensambles, especialmente por la deformación que se lleva a cabo en el componente que trabaja como tuerca en el momento que el tornillo forma la cuerda.

Las placas de acero que formarán el ensamble, se determinaron de tres diferentes aceros: acero de bajo carbono (SAE 1018), acero de medio carbono (SAE 1045) y acero de alto carbono (SAE 1060).

Prueba par de apriete-tensión-ángulo a falla

Esta prueba consiste en realizar el apriete en un ensamble totalmente nuevo, es decir que los componentes se encuentren en estado productivo. Con ella se determina la relación entre el par de apriete máximo que puede soportar el ensamble y la tensión del tornillo, la cual se considera como la fuerza de apriete que se genera en la unión cuando el tornillo comienza a apretar a los componentes del ensamble. Esta prueba puede realizarse de dos maneras:

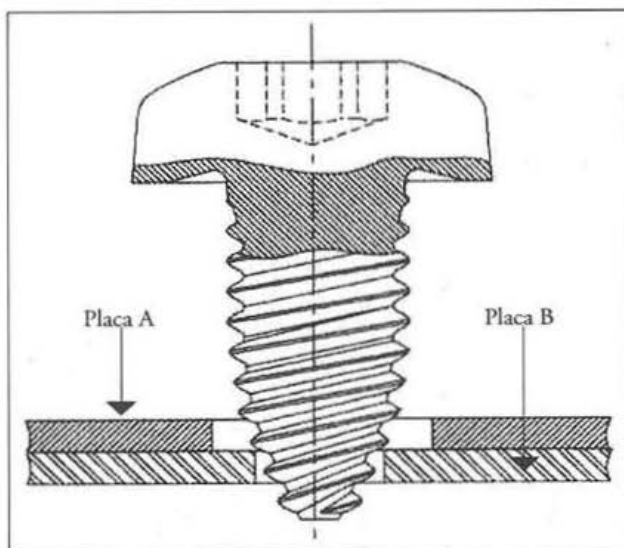
- a) Falla de algún componente del ensamble. En este tipo de prueba se aprieta el tornillo hasta que algún componente del ensamble falle, considerándose como falla la fractura del tornillo o de alguno de los componentes, la presencia de deformación plástica en algún componente del ensamble o la distorsión de las cuerdas hasta llegar al barrido.
- b) Apretar por arriba del límite elástico máximo (10% adicional). En este tipo de prueba los tornillos instrumentados con galgas extensiométricas son sometidos a cargas de tensión y compresión, de tal manera que las galgas extensiométricas son programadas con 10% de esfuerzo por encima del límite máximo elástico del tornillo, por lo que no se requiere llevarlos a falla. La ventaja de este método es poder continuar con el monitoreo de la tensión en el tornillo. El valor del límite elástico máximo del tornillo, de acuerdo con el grado (10.9) y el tamaño (M12), es de 70 kN (Blendulf, 2004).

Las características consideradas para la realización de la prueba par de apriete-tensión-ángulo son:

- Tornillo: M12x1.75x30
Acero calmado SAE 4037
Recubrimiento Sn-Zn
Tipo TAPTITE 2000
- Placa A: Acero SAE 1018, 1045
76.2x76.2x9.53 mm
Diámetro barreno 14 mm
Sin recubrimiento
- Placa B: Acero SAE 1018, 1045, 1060
76.2x76.2x12.70 mm
Diámetro barreno 11.03 mm,
recomendación de proveedor
(Research Engineering & Manufacturing,
2002).
- Herramienta: Tipo eléctrica
Velocidad de 150 rpm
- Equipo: Transductor par de apriete-ángulo
Tacómetro
- Sistema recolector de datos: MC911

Para las pruebas, la placa superior se identifica como placa A, mientras que la inferior como placa B, en la cual el tornillo realiza la cuerda (figura 5).

Figura 5
IDENTIFICACIÓN DE PLACAS PARA LA PRUEBA



La preparación de la prueba requiere del seguimiento de los siguientes puntos:

- Los tornillos y placas por probar deben estar en condiciones productivas, sin haber sufrido alguna variación o modificación física, a excepción de la instrumentación de la galga extensiométrica en el tornillo.
- En caso de presentarse alguna variación en los componentes de la prueba con respecto a lo indicado por especificación debe ser documentada, ya que esto puede afectar el resultado.
- Las partes se revisarán conforme a dibujo o especificación de manera física.
- El ensamble como tal se fijará en una mesa ranurada, evitando el movimiento durante el apriete.
- Se selecciona el transductor de par de apriete y la herramienta adecuados para la realización de la prueba.

Esto se hace tomando como referencia el tamaño del tornillo, el valor del par de apriete que se estime aplicar y el tipo de herramienta que se esté utilizando para ese ensamble, ya sea eléctrica o neumática. El valor del transductor de par de apriete debe ser mayor al par de apriete aplicado, esto con la finalidad de no dañar el transductor.

- Se configurará el sistema recolector de datos de acuerdo al transductor seleccionado y se calibrará de acuerdo al valor de calibración de cada tornillo y del transductor de par de apriete.
- Se alineará y sujetará la herramienta y transductor al eje del tornillo, evitando la presencia de alguna carga lateral.
- Se tomarán fotografías del arreglo antes de efectuar la prueba.
- Se medirá la velocidad de la herramienta (rpm).
- Se anotarán todos los resultados, así como las observaciones presentadas en cada prueba.

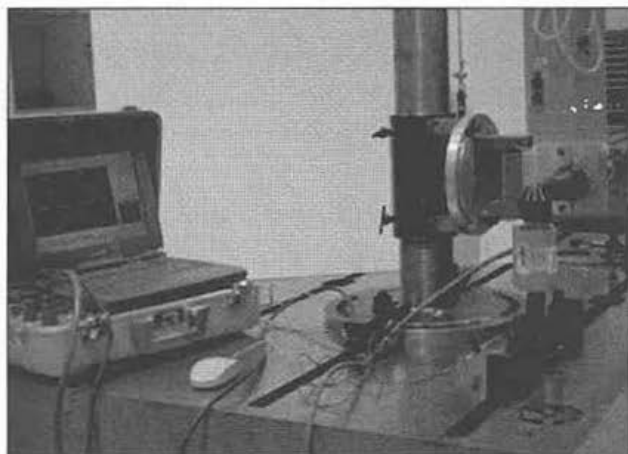
Finalmente, se determina el valor del par de apriete a través del análisis de los resultados.

Desarrollo de prueba par de apriete-tensión-ángulo a falla

Al tener la instrumentación adecuada (figura 6) se realizan las pruebas y se obtienen las gráficas, las cuales muestran el comportamiento del ensamble según sus características.

Figura 6

INSTRUMENTACIÓN DE PRUEBA A TENSION



Las siguientes gráficas muestran dicho comportamiento de acuerdo al tipo de acero utilizado.

Al analizar las gráficas obtenidas en la prueba par de apriete-ángulo a falla se observan los siguientes puntos:

- La dureza de las placas es un factor importante en el ensamble de este tipo de tornillos. El par de apriete máximo alcanzado en los ensambles se mantiene en un promedio de 190 Nm, sin embargo, el par de apriete que varía es el máximo requerido para la generación de la cuerda, teniendo los siguientes valores:

Placa acero SAE 1018 46.31 Nm

Placa acero SAE 1045 55.18 Nm

Placa acero SAE 1060 71.48 Nm

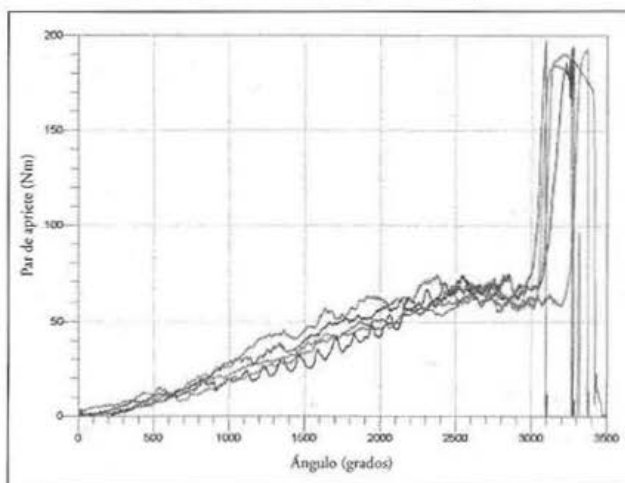
- La velocidad de la herramienta varía conforme a la dureza de las placas, principalmente en las de acero SAE 1060 se presentó una disminución de 10% en las rpm. Esto se debe al incremento de fricción

entre el tornillo y la placa, consecuencia de la dureza de ésta.

- Las gráficas correspondientes a las pruebas realizadas con acero SAE 1045 muestran un comportamiento muy similar a las del acero SAE 1018, pero, en particular, ningún tornillo se fracturó y en todos los casos la herramienta se detuvo; esto se puede atribuir a que la superficie de la placa de acero SAE 1045 tenía mayor dureza y otro acabado superficial diferente a la placa SAE 1018.

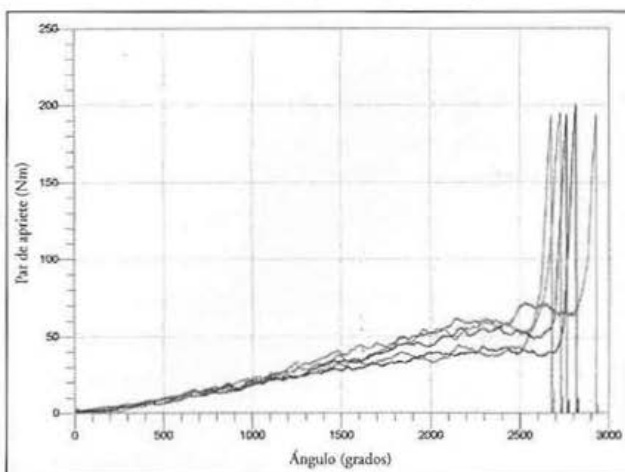
Gráfica 1

PAR DE APRIETE-ÁNGULO,
ACERO SAE 1018 (PLACA A Y PLACA B)



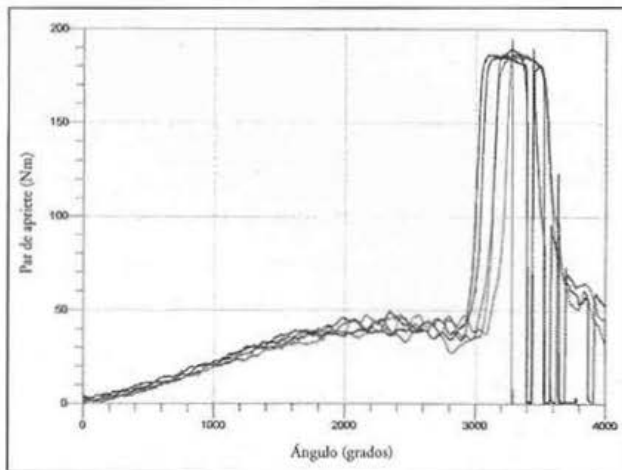
Gráfica 2

PAR DE APRIETE-ÁNGULO,
ACERO SAE 1045 (PLACA A Y PLACA B)



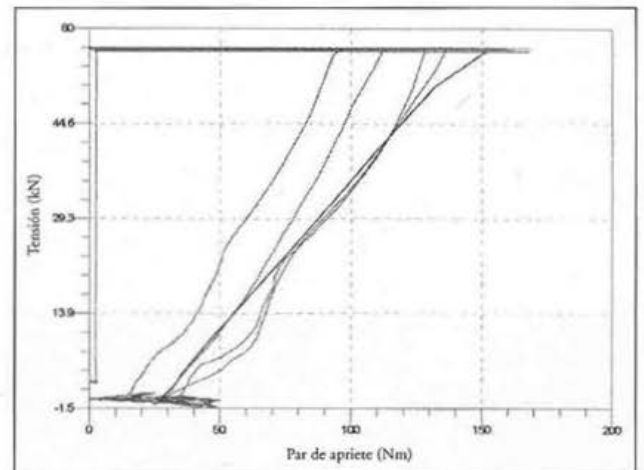
Gráfica 3

PAR DE APRIETE-ÁNGULO,
ACERO SAE 1018 (PLACA A) Y ACERO 1060 (PLACA B)



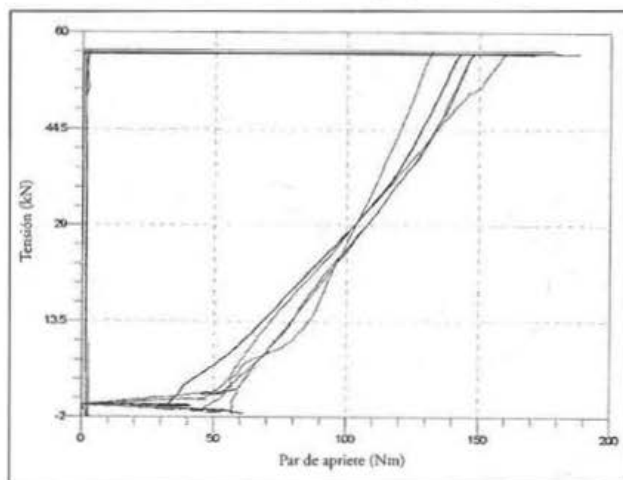
Gráfica 4

TENSIÓN-PAR DE APRIETE,
ACERO SAE 1018 (PLACA A Y B)



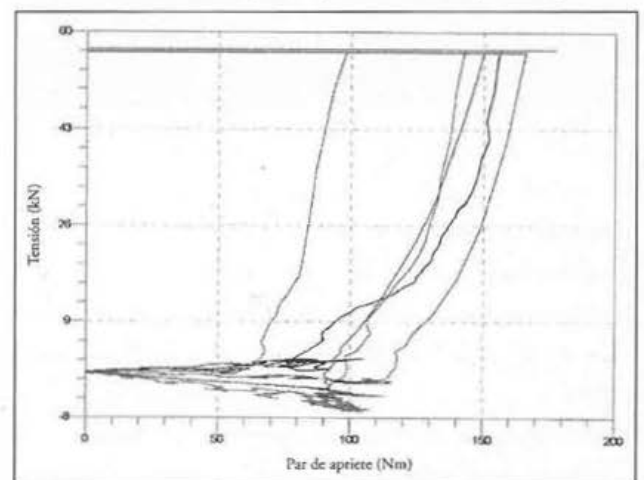
Gráfica 5

TENSIÓN-PAR DE APRIETE,
ACERO SAE 1045 (PLACA A) Y (PLACA B)



Gráfica 6

PAR DE APRIETE-ÁNGULO,
ACERO SAE 1018 (PLACA A) Y ACERO 1060 (PLACA B)



Entonces, de las pruebas de par de apriete-tensión-ángulo a falla realizadas se pueden mencionar los siguientes puntos:

- En un ensamble en el que se utilice tornillo autorroscante sí se puede obtener tensión. A pesar de haber variado el tipo de acero, se obtuvo tensión en los tres aceros utilizados (SAE 1018, SAE 1045 y SAE 1060).
- En las placas de acero SAE 1060 se presentó un excedente de fricción al momento que el tornillo

terminaba de generar las cuerdas, lo cual se ve relacionado con el efecto de compresión, en lugar de tensión, en ese periodo del apriete. Esto se puede atribuir a que la placa de acero SAE 1060, al oponer más resistencia a su penetración, demandó un mayor par de apriete en ese momento y, por ende, una disminución en la tensión. Al momento de terminar la generación de cuerdas se reduce la fricción y con esto se incrementa el par de apriete y la tensión.

- Es muy importante el material sobre el cual el tornillo asienta, así como en el cual se genera la cuerda.
 - Los tornillos instrumentados tuvieron la tendencia a fracturarse en la zona en que el tornillo se desbastó para adherir las galgas extensiométricas. Al fracturarse el tornillo se pierde la tensión.
- 9 Considerando que este tipo de tornillo M12 x 1.75 x 30, grado 10.9, tiene un límite elástico máximo de 70 kN y que la galga extensiométrica se calibró a 77 kN, no se logró monitorear el comportamiento del ensamble mas allá de 56 kN promedio en los tres tipos de acero, debido a la fractura del tornillo antes de alcanzar su límite elástico máximo (figura 7). Sin embargo, se presentó deformación plástica en un par de apriete promedio de las pruebas. En la tabla 1 aparece un resumen de los resultados entre los ensambles hechos con diferente acero.

Figura 7
FRACTURA DE TORNILLO EN ACERO SAE 1045



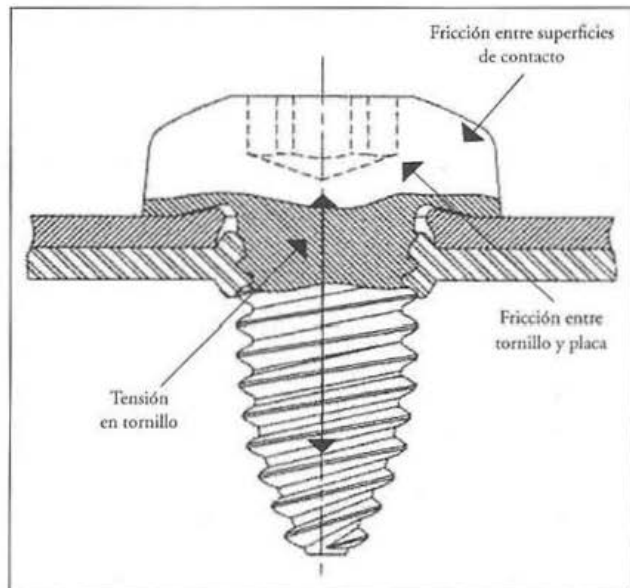
Tabla 1
RESUMEN DE RESULTADOS

Material	Par de apriete	Tensión	Dureza
Acero SAE 1018	144.4 Nm	56.76 kN	89.18 HRb
Acero SAE 1045	149.4 Nm	55.46 kN	91.37 HRb
Acero SAE 1060	152.8 Nm	50.50 kN	101.52 HRb

Con la información anterior se determina que la dureza del material es un factor importante en el valor de la tensión, la cual varía de acuerdo al material y

sus características. Asimismo, se obtiene el porcentaje de distribución del par de apriete para la generación de cuerdas en cada tipo de acero, esto basado en los resultados obtenidos en las gráficas correspondientes a cada tipo de ensamble. El porcentaje del par de apriete correspondiente al vencimiento de fricción entre las superficies de contacto y la tensión en el tornillo no se puede obtener de manera directa, ya que en las gráficas no se distingue esta información (figura 8).

Figura 8
DISTRIBUCIÓN DEL PAR DE APRIETE
EN ENSAMBLE CON AUTORROSCANTE



A través de la información obtenida se aprecia que a mayor dureza de la placa se tiene una mayor demanda del par de apriete en la generación de las cuerdas.

CONCLUSIONES

En este caso se analizó un ensamble diferente al tradicional tornillo-tuerca, utilizando un tornillo autorroscante, el cual permite la eliminación de la tuerca al ser sustituida por una placa barrenada en donde el tornillo genera su propia cuerda. Este tornillo se instrumenta con una galga extensiométrica con la

finalidad de determinar si es posible obtener la tensión en el tornillo al momento de apretarlo y como resultado de pruebas hechas en laboratorio se concluye:

- Sí es posible obtener la fuerza de tensión en un tornillo autorroscante mediante el uso de galgas extensiométricas.
- Las galgas extensiométricas brindan la ventaja de poder ser instrumentadas en diferentes tamaños de tornillos autorroscantes, facilitando la preparación de la prueba y la calibración del equipo para finalmente dar un resultado exacto.
- En ensambles no críticos, en los cuales no existe el riesgo de que por algún mal ensamble se presente una condición insegura o de funcionalidad, no se recomienda obtener la tensión del tornillo, ya que resulta ser un gasto innecesario.
- La relación par de apriete-tensión varía en cada ensamble dependiendo de la dureza del material y del acabado superficial.
- Cuando un ensamble hecho a través de tornillo autorroscante presenta excesiva fricción es recomendable aplicar al tornillo algún tipo de lubricante en las cuerdas con la finalidad de reducir la pérdida de tensión por fricción.
- A pesar de que otros países han trabajado en el estudio y desarrollo de las uniones, este trabajo es la llave para abrir muchas variantes de investigación en cuanto a sujeciones en México, ya que esto permite la generación de tecnología propia de acuerdo a los recursos y necesidades de la industria.
- El uso de tornillos autorroscantes brinda la oportunidad de reducir costos en los diseños y procesos

de ensamble. A través de este tipo de estudios se logra obtener la relación par de apriete-tensión según las características físicas de los componentes, obteniéndose, así, el mejor desempeño de este tipo de tornillos.

- Considerando los elementos sujetadores como parte del diseño de ensamble, se logra optimizar el proceso de producción, lo cual se traduce en reducción de tiempo y costo en la operación.
- Todo ensamble realizado con tornillo autorroscante presenta diversas variaciones del par de apriete debido básicamente a las condiciones y características del apriete.

REFERENCIAS

- Bickford, J. H. (1995). *An introduction to the design and behavior of bolted joints* (3a. ed.). Nueva York: Marcel Dekker.
- Blendulf, B. (2004). *Fastening technology & bolted screwed joint design* (5a. ed.). South California, EE. UU.: Clemson University.
- Olivares Ponce, A. (1999). *Taller de foto elasticidad y extensometría*. México.
- Domínguez Gómez, A. A. (2004). *Medición de la fuerza de apriete en un ensamble por un tornillo autorroscante*. Tesis de maestría no publicada, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México.
- Research Engineering & Manufacturing Inc. (2002). Performance Features. Taptite 2000. *REMINC Catalog*. Middletown, EE. UU.: Autor.