# Uniones atornilladas

Diseño de una unión atornillada en torno a la precarga: clases de resistencia, relación par-tensión, longitud de rosca acoplada, métodos de frenado y los modos de fallo que provoca una fuerza de apriete incorrecta.


| REVISIÓN | PUBLICADO | RESPONSABLE | COMPLEMENTO |
|---|---|---|---|
| 1.0 | June 2026 | Ingeniería Ideambox | Referencia en PDF |

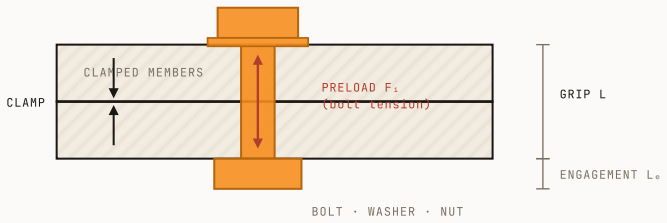


RESUMEN

Una unión atornillada transmite la carga mediante la precarga (fuerza de apriete), no con el tornillo trabajando como un pasador a cortante. Al apretar el tornillo se alarga; la tensión acumulada aprieta las piezas. Como la unión apretada es mucho más rígida que el tornillo, la mayor parte de cualquier carga exterior de tracción se emplea en descomprimir las piezas en lugar de aumentar la tensión del tornillo: por eso una unión bien precargada apenas nota la fatiga y no se afloja sola.

La sección 1 explica cómo funciona la unión. La sección 2 trata las clases de resistencia y los materiales. La sección 3 trata la precarga y el apriete (relación par-tensión, factor de apriete, precisión del método). La sección 4 trata la longitud de rosca acoplada y el desgarro de la rosca. La sección 5 recoge reglas de diseño de la unión. La sección 6 trata el aflojamiento y los métodos de frenado. La sección 7 recoge los modos de fallo y una lista de comprobación del apriete.


BOLTED JOINT — PRELOAD & CLAMP FORCE




UNA UNIÓN ATORNILLADA ES UN MUELLE RÍGIDO TRACCIONADO QUE APRIETA MUELLES MUCHO MÁS RÍGIDOS COMPRIMIDOS. ES LA PRECARGA, Y NO LA RESISTENCIA ESTÁTICA DEL TORNILLO, LA QUE SOPORTA LA CARGA CÍCLICA Y EVITA QUE LA UNIÓN SE AFLOJE POR VIBRACIÓN.

ÍNDICE


1. Cómo funciona una unión atornillada
2. Clases de resistencia y materiales
3. Precarga y apriete
4. Longitud de rosca acoplada y desgarro
5. Reglas de diseño de la unión
6. Aflojamiento y frenado
7. Modos de fallo y lista de comprobación

# 1. Cómo funciona una unión atornillada

Al apretar un tornillo, este se alarga como un muelle; la tensión acumulada es la **precarga** ($F_i$), y la compresión igual y opuesta en las piezas es la **fuerza de apriete**. En reposo se equilibran.

Cuando se aplica una carga exterior de tracción $F_e$, esta se *reparte* entre el tornillo y la unión en proporción a sus rigideces. Como las piezas apretadas son mucho más rígidas que el esbelto tornillo, este solo recoge una pequeña fracción: el **factor de carga** Φ = k_bolt / (k_bolt + k_members), típicamente 0.1–0.3. El resto de $F_e$ simplemente descomprime las piezas. Así, un tornillo con una precarga alta solo ve una pequeña *amplitud* de tensión bajo carga cíclica (la clave de la vida a fatiga) y la unión se mantiene apretada mientras $F_e$ no supere la precarga.

## 1.1 Términos clave

| | |
|---|---|
| `Precarga (Fᵢ)` | Tensión del tornillo tras el apriete; la fuerza de apriete con carga exterior nula |
| `Carga de prueba` | Tracción máxima que soporta un tornillo sin deformación permanente (el techo de diseño) |
| `Sección resistente (Aₛ)` | Área efectiva de la zona roscada usada para el cálculo de tensiones (no el Ø nominal) |
| `Factor de carga (Φ)` | Fracción de la carga exterior que se suma a la tensión del tornillo (k_bolt / (k_bolt + k_members)) |
| `Longitud de apriete` | Espesor apretado desde debajo de la cabeza hasta la cara de apoyo de la tuerca |
| `Clase de resistencia` | Grado de resistencia marcado en la cabeza (p. ej. 8.8, 10.9) |

Regla práctica de diseño: **precarga alta (≈75% de la carga de prueba), carga exterior por debajo de la precarga y suficiente longitud de apriete para que el tornillo se alargue.** Esas tres decisiones resuelven la mayoría de las uniones.

## 2. Clases de resistencia y materiales

Los tornillos métricos de acero se clasifican por **clase de resistencia**, marcada en la cabeza. El primer número ×100 ≈ resistencia a la tracción (MPa); el segundo ×10 ≈ límite elástico como % de la resistencia a la tracción.

| CLASE | PRUEBA $S_p$ (MPA) | LÍMITE ELÁSTICO 0.2% (MPA) | TRACCIÓN $S_u$ (MPA) | NOTAS |
|---|---|---|---|---|
| **4.8** | 310 | 340 | 420 | Bajo en carbono, uso general |
| **8.8** | 580 (≤M16) / 600 | 640 | 800 | Medio carbono, templado y revenido; la opción de batalla |
| **10.9** | 830 | 940 | 1040 | Acero aleado templado y revenido, compacto para cargas altas |
| **12.9** | 970 | 1100 | 1220 | Clase normalizada más alta; sensible a la fragilización |
| **A2-70 (304 SS)** | — | 450 | 700 | Inoxidable austenítico, deformado en frío |
| **A4-80 (316 SS)** | — | 600 | 800 | Servicio marino / corrosivo |

Usar **8.8 por defecto**; pasar a 10.9/12.9 solo cuando el espacio obligue a un tornillo más pequeño y resistente, y vigilar la fragilización por hidrógeno en piezas de alta resistencia con recubrimiento electrolítico. El inoxidable (A2/A4) cambia resistencia por resistencia a la corrosión y se gripa con facilidad si se monta en seco.

## 3. Precarga y apriete

La precarga objetivo suele ser **≈ 75% de la carga de prueba** en uniones reutilizables: $F_i = 0.75 \cdot S_p \cdot A_s$. Las uniones permanentes, controladas por límite elástico, van más alto.

El par es la forma habitual, pero indirecta, de alcanzar esa tensión:

$T = K \cdot F_i \cdot d$ donde d es el diámetro nominal y **K** es el factor de apriete (coeficiente de par), dominado por el rozamiento bajo la cabeza y en las roscas.

| ESTADO DE LA ROSCA / BAJO CABEZA | FACTOR DE APRIETE K |
|---|---|
| **Acero limpio y seco** | 0.20–0.30 (gripado en inoxidable) |
| **Estado de suministro, aceite ligero** | 0.20 (hipótesis por defecto) |
| **Cincado** | 0.20–0.22 |
| **Pavonado** | 0.15 |
| **Lubricado con aceite / grasa** | 0.12–0.15 |
| **$MoS_2$ / pasta antigripante / cera** | 0.10–0.12 |
| **Recubrimiento de PTFE** | 0.10–0.12 |

Como K varía tanto, **el par es una forma muy dispersa de fijar la precarga**: el estado de lubricación importa tanto como la llave.

| MÉTODO DE APRIETE | DISPERSIÓN DE LA PRECARGA |
|---|---|
| **Par a mano, a sentimiento** | ±35% |
| **Llave dinamométrica calibrada** | ±25% |
| **Par + ángulo (giro de tuerca)** | ±15% |
| **Apriete hasta límite elástico** | ±8% |
| **Alargamiento del tornillo / ultrasonidos / tensor hidráulico** | ±3–10% |

Par orientativo, clase 8.8, K = 0.20, ~75% de la carga de prueba (usar la herramienta *Par de apriete y precarga de tornillos* para el valor exacto con el K real):

| MÉTRICA | PAR (N·M) | MÉTRICA | PAR (N·M) |
|---|---|---|---|
| **M3** | 1.3 | M8 | 25 |
| **M4** | 3.0 | M10 | 51 |
| **M5** | 6.0 | M12 | 89 |
| **M6** | 10.5 | M16 | 215 |

Para clase 10.9, multiplicar por ≈1.4; para 12.9, por ≈1.7. Lubricar siempre de forma constante, o el mismo par dará precargas muy distintas.

## 4. Longitud de rosca acoplada y desgarro

Dimensionar el acoplamiento para que **el tornillo rompa antes de que se desgarre la rosca**: la rotura del tornillo es dúctil y visible; una rosca desgarrada falla sin avisar. La longitud mínima de acoplamiento depende del *material de la tuerca o del agujero roscado*, no del tornillo:

| MATERIAL DE LA TUERCA / AGUJERO ROSCADO (TORNILLO DE ACERO) | $L_e$ MÍN. DE ACOPLAMIENTO |
|---|---|
| **Acero, ≥ clase del tornillo** | 0.8–1.0 × d |
| **Fundición** | ~1.25 × d |
| **Aluminio** | 1.5–2.0 × d |
| **Magnesio / plásticos** | 2.0–2.5 × d |

Añadir 1–2 pasos de rosca en agujeros roscados ciegos por los filetes incompletos de entrada. La herramienta *Longitud de rosca acoplada* dimensiona $L_e$ exactamente para una clase de tornillo y un material base dados.

## 5. Reglas de diseño de la unión

- **Dar longitud de apriete al tornillo.** Un tornillo largo y esbelto acumula más alargamiento, por lo que mantiene la precarga frente a asentamientos y ciclos térmicos y sufre una menor amplitud de fatiga. Los tornillos cortos y gruesos pierden precarga con asentamientos mínimos.

- **Evitar uniones blandas en fatiga.** Las juntas y los recubrimientos superpuestos fluyen y relajan el apriete. Atornillar metal con metal siempre que sea posible, o especificar un reapriete tras el asentamiento.

- **Arandelas**: reparten la presión de apoyo y protegen la superficie bajo el elemento que gira; usarlas siempre en agujeros rasgados, materiales blandos y holguras sobredimensionadas.

- **Separación y distancia al borde:** distancia al borde ≥ 1.5–2 × d, separación entre tornillos ≥ 2.5–3 × d.

- **Uniones a cortante:** decidir entre unión resistente al deslizamiento (la precarga transmite el cortante por rozamiento) o a aplastamiento (la caña apoya en el agujero). La resistente al deslizamiento requiere la precarga completa y verificada.

- **No sobredimensionar la holgura del agujero**: mucha holgura con piezas blandas favorece el deslizamiento y el asentamiento.

## 6. Aflojamiento y frenado

El autoaflojamiento se debe a la **vibración transversal (lateral)**, que vence momentáneamente el rozamiento de la rosca y deja que la tuerca retroceda (el mecanismo de Junker). La primera defensa es siempre **una precarga alta y mantenida con suficiente longitud de apriete**: la mayoría de los "tornillos flojos" son en realidad tornillos con precarga insuficiente.

| MÉTODO DE FRENADO | MECANISMO | RETENCIÓN FRENTE A VIBRACIÓN | REUTILIZABLE |
|---|---|---|---|
| **Precarga correcta + longitud de apriete** | rozamiento del apriete | alta | sí |
| **Tuerca autoblocante con inserto de nailon (nyloc)** | rozamiento del inserto | media | limitada (≤ ~120 °C) |
| **Tuerca autoblocante totalmente metálica** | rosca deformada | media–alta | pocas reutilizaciones |
| **Par de arandelas de cuña (p. ej. Nord-Lock)** | leva de cuña bajo la cabeza | muy alta | sí |
| **Fijador de roscas (adhesivo)** | resina curada que rellena las roscas | alta (según grado) | un solo uso; desengrasar antes |
| **Arandela partida / Grower** | — | ~nula frente a vibración transversal | — |
| **Contratuerca (tuerca doble)** | inversión de la tensión en la rosca | media–alta | sí |
| **Tuerca almenada + pasador de aletas / alambre de frenado** | bloqueo positivo por forma | muy alta | pasador de un solo uso |

Nota: la habitual arandela partida (Grower) **no** evita de forma fiable el autoaflojamiento por vibración transversal según los ensayos actuales: no hay que confiar en ella frente a vibraciones.

# 7. Modos de fallo y lista de comprobación

| MODO | CAUSA | SOLUCIÓN |
|---|---|---|
| **Rotura por fatiga (radio bajo cabeza / primer filete)** | precarga baja, longitud de apriete corta, concentrador de tensiones | precarga ~75% de la de prueba, mayor longitud de apriete, roscas laminadas, radio bajo cabeza |
| **Desgarro de la rosca** | acoplamiento insuficiente, tuerca blanda, exceso de par | aumentar $L_e$, tuerca o inserto más duro, controlar el par |
| **Asentamiento / relajación** | caras rugosas o blandas, recubrimientos, juntas que asientan | reapretar tras el asentamiento, menos interfaces, caras más duras |
| **Plastificación por exceso de par** | K erróneo, lubricación irregular | controlar el método, usar el K correcto |
| **Fragilización por hidrógeno** | alta resistencia (≥10.9) con recubrimiento electrolítico | deshidrogenado tras el recubrimiento, cincado mecánico, evitar en servicio con $H_2$ |
| **Gripado (inoxidable)** | roscas en seco que se agarrotan al roscar | pasta antigripante, menor velocidad, combinar aleaciones distintas |
| **Corrosión galvánica** | metales distintos + electrolito | tornillería compatible o recubierta, aislamiento |

## 7.1 Lista de comprobación del apriete

- **Clase**: 8.8 por defecto; 10.9/12.9 solo cuando el espacio obligue a un tornillo más pequeño; A2/A4 frente a corrosión.
- **Métrica y precarga**: dimensionar por la sección resistente $A_s$; fijar una precarga objetivo ≈ 75% de la carga de prueba.
- **Especificación de apriete**: par mediante $T = K \cdot F_i \cdot d$ con el K real, o por ángulo / límite elástico / alargamiento para mayor precisión.
- **Acoplamiento**: comprobar $L_e$ para el material base (sección 4 / herramienta).
- **Longitud de apriete y arandelas**: longitud de apriete suficiente; arandelas bajo el elemento que gira; evitar uniones blandas o con junta en fatiga.
- **Frenado**: adecuar el método a la vibración, la temperatura y la necesidad de reutilización.
- **Especificar en el plano**: clase, acabado/recubrimiento, par (y método), elemento de frenado, arandela.

This document is also a web page, kept up to date:
https://ideambox.com/es/downloads/bolted-joint-reference/

Designing something that needs this? ideambox.com/contact