# Uniões aparafusadas

Projeto de uma união aparafusada a partir da pré-carga — classes de resistência, relação torque–tração, engajamento de rosca, métodos de travamento e os modos de falha que surgem quando a força de aperto está errada.

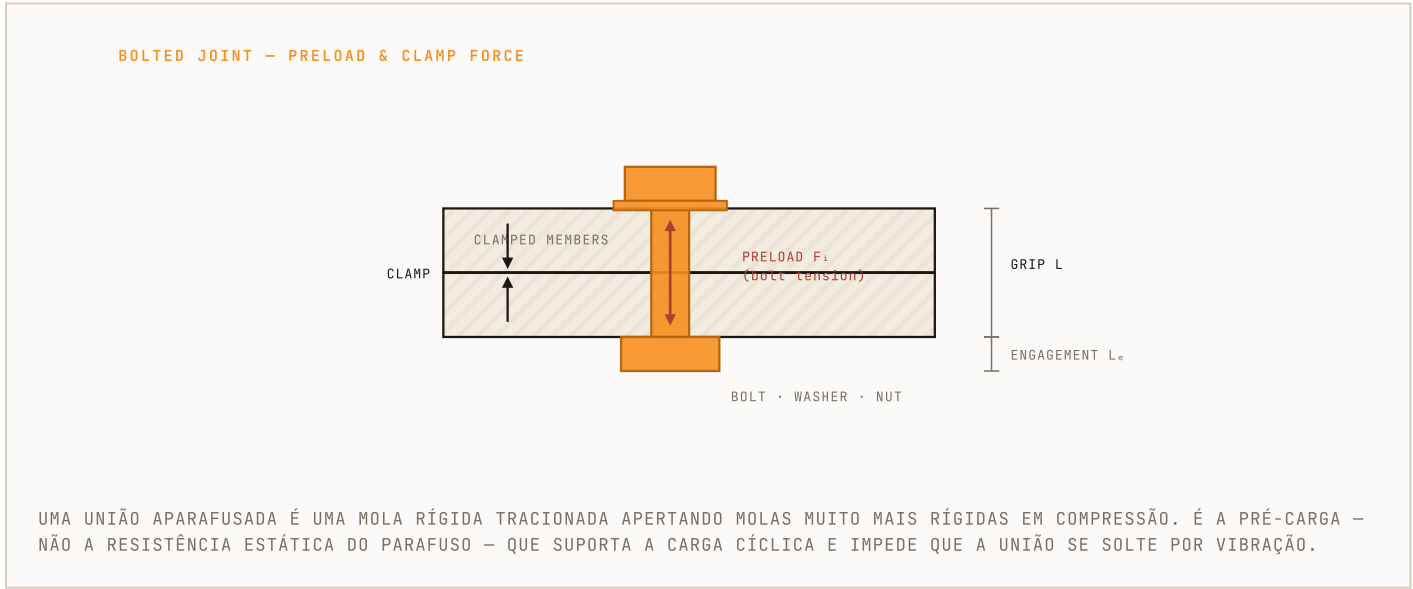

| REVISÃO | PUBLICADO | RESPONSÁVEL | COMPLEMENTO |
|---|---|---|---|
| 1.0 | June 2026 | Engenharia Ideambox | Referência em PDF |



RESUMO

Uma união aparafusada transmite carga por meio da pré-carga (força de aperto), e não pelo parafuso atuando como pino de cisalhamento. Ao apertar, o parafuso é alongado; a tração armazenada aperta as peças. Como a união apertada é muito mais rígida que o parafuso, a maior parte de qualquer carga externa de tração serve para aliviar o aperto, em vez de somar-se à tensão do parafuso — por isso uma união com pré-carga correta praticamente não sente fadiga e não se solta sozinha.

A Seção 1 explica como a união funciona. A Seção 2 trata das classes de resistência e materiais. A Seção 3 aborda pré-carga e aperto (relação torque–tração, fator de porca, precisão do método). A Seção 4 trata do engajamento de rosca e do espanamento. A Seção 5 traz regras de projeto da união. A Seção 6 aborda afrouxamento e métodos de travamento. A Seção 7 traz modos de falha e um checklist de aperto.


UMA UNIÃO APARAFUSADA É UMA MOLA RÍGIDA TRACIONADA APERTANDO MOLAS MUITO MAIS RÍGIDAS EM COMPRESSÃO. É A PRÉ-CARGA — NÃO A RESISTÊNCIA ESTÁTICA DO PARAFUSO — QUE SUPORTA A CARGA CÍCLICA E IMPEDE QUE A UNIÃO SE SOLTE POR VIBRAÇÃO.

SUMÁRIO


1. Como funciona uma união aparafusada
2. Classes de resistência e materiais
3. Pré-carga e aperto
4. Engajamento de rosca e espanamento
5. Regras de projeto da união
6. Afrouxamento e travamento
7. Modos de falha e checklist

# 1. Como funciona uma união aparafusada

Apertar um parafuso o alonga como uma mola; a tração armazenada é a **pré-carga** ($F_i$), e a compressão igual e oposta nas peças é a **força de aperto**. Em repouso, elas se equilibram.

Quando se aplica uma carga externa de tração $F_e$, ela é *dividida* entre o parafuso e a união na proporção de suas rigidezes. Como as peças apertadas são muito mais rígidas que o parafuso esbelto, o parafuso recebe apenas uma pequena fração — o **fator de carga** Φ = k_bolt / (k_bolt + k_members), tipicamente 0.1–0.3. O restante de $F_e$ apenas alivia o aperto. Assim, um parafuso com alta pré-carga sofre só uma pequena *variação* de tensão sob carga cíclica — a chave da vida em fadiga — e a união permanece apertada enquanto $F_e$ não superar a pré-carga.

## 1.1 Termos-chave

| | |
|---|---|
| `Pré-carga (Fᵢ)` | Tração no parafuso após o aperto — a força de aperto com carga externa nula |
| `Carga de prova` | A tração máxima que o parafuso suporta sem deformação permanente (o teto de projeto) |
| `Área resistente à tração (Aₛ)` | Área efetiva da seção roscada usada para a tensão (não o Ø nominal) |
| `Fator de carga (Φ)` | Fração da carga externa que se soma à tração do parafuso (k_bolt / (k_bolt + k_members)) |
| `Comprimento de aperto` | Espessura apertada, de baixo da cabeça até a face de apoio da porca |
| `Classe de resistência` | Grau de resistência marcado na cabeça (ex.: 8.8, 10.9) |

Regra prática de projeto: **pré-carga alta (≈75% da carga de prova), carga externa abaixo da pré-carga e comprimento de aperto suficiente para o parafuso alongar.** Essas três decisões resolvem a maioria das uniões.

## 2. Classes de resistência e materiais

Parafusos métricos de aço são classificados por **classe de resistência**, marcada na cabeça. O primeiro número ×100 ≈ resistência à tração (MPa); o segundo ×10 ≈ escoamento como % da resistência à tração.

| CLASSE | PROVA $S_p$ (MPA) | ESCOAMENTO 0.2% (MPA) | TRAÇÃO $S_u$ (MPA) | OBSERVAÇÕES |
|---|---|---|---|---|
| **4.8** | 310 | 340 | 420 | Baixo carbono, uso geral |
| **8.8** | 580 (≤M16) / 600 | 640 | 800 | Médio carbono, temperado e revenido — o mais usado |
| **10.9** | 830 | 940 | 1040 | Aço-liga temperado e revenido, compacto e de alta carga |
| **12.9** | 970 | 1100 | 1220 | Classe normalizada mais alta; sensível à fragilização |
| **A2-70 (inox 304)** | — | 450 | 700 | Inox austenítico, encruado |
| **A4-80 (inox 316)** | — | 600 | 800 | Serviço marinho / corrosivo |

Use **8.8 por padrão**; passe para 10.9/12.9 apenas quando o espaço exigir um parafuso menor e mais resistente — e cuidado com a fragilização por hidrogênio em peças de alta resistência com revestimento eletrolítico. O inox (A2/A4) troca resistência por resistência à corrosão e engripa com facilidade se apertado a seco.

## 3. Pré-carga e aperto

A pré-carga alvo normalmente é **≈ 75% da carga de prova** para uniões reutilizáveis: $F_i = 0.75 \cdot S_p \cdot A_s$. Uniões permanentes, com aperto controlado pelo escoamento, vão além.

O torque é a forma usual, porém indireta, de atingir essa tração:

$T = K \cdot F_i \cdot d$ — onde d é o diâmetro nominal e **K** é o fator de porca (coeficiente de torque), dominado pelo atrito sob a cabeça e nas roscas.

| CONDIÇÃO DA ROSCA / SOB A CABEÇA | FATOR DE PORCA K |
|---|---|
| **Aço limpo e seco** | 0.20–0.30 (engripa no inox) |
| **Como fornecido, óleo leve** | 0.20 (premissa padrão) |
| **Zincado** | 0.20–0.22 |
| **Oxidado preto** | 0.15 |
| **Lubrificado com óleo / graxa** | 0.12–0.15 |
| **$MoS_2$ / pasta antiengripante / cera** | 0.10–0.12 |
| **Revestido com PTFE** | 0.10–0.12 |

Como K varia tanto, **o torque é uma forma imprecisa de definir a pré-carga** — o estado de lubrificação importa tanto quanto o torquímetro:

| MÉTODO DE APERTO | DISPERSÃO DA PRÉ-CARGA |
|---|---|
| **Torque "no sentimento"** | ±35% |
| **Torquímetro calibrado** | ±25% |
| **Torque + ângulo (giro da porca)** | ±15% |
| **Aperto até o escoamento** | ±8% |
| **Alongamento do parafuso / ultrassom / tensionador** | ±3–10% |

Torque de referência, classe 8.8, K = 0.20, ~75% da carga de prova (use a ferramenta *Screw torque & preload* para o valor exato com o seu K):

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

Para classe 10.9, multiplique por ≈1.4; para 12.9, por ≈1.7. Lubrifique sempre da mesma forma, ou o mesmo torque dará pré-cargas muito diferentes.

## 4. Engajamento de rosca e espanamento

Dimensione o engajamento para que o **parafuso rompa antes de a rosca espanar** — a fratura do parafuso é dúctil e visível; uma rosca espanada falha silenciosamente. O comprimento mínimo de engajamento depende do *material da porca/rosca interna*, não do parafuso:

| MATERIAL DA PORCA / ROSCA INTERNA (PARAFUSO DE AÇO) | ENGAJAMENTO MÍN. $L_e$ |
|---|---|
| **Aço, ≥ classe do parafuso** | 0.8–1.0 × d |
| **Ferro fundido** | ~1.25 × d |
| **Alumínio** | 1.5–2.0 × d |
| **Magnésio / plásticos** | 2.0–2.5 × d |

Acrescente 1–2 passos de rosca em furos roscados cegos para compensar os filetes incompletos de entrada. A ferramenta *Thread engagement* calcula $L_e$ exatamente para uma dada classe de parafuso e material-base.

## 5. Regras de projeto da união

- **Dê comprimento de aperto ao parafuso.** Um parafuso longo e esbelto armazena mais alongamento, mantendo a pré-carga diante de assentamentos e ciclos térmicos, e sofre menor variação de tensão em fadiga. Parafusos curtos e grossos perdem pré-carga com pequenos assentamentos.

- **Evite uniões macias em fadiga.** Juntas de vedação e camadas de revestimento sofrem fluência e aliviam o aperto. Aparafuse metal contra metal sempre que possível ou especifique reaperto após o assentamento.

- **Arruelas** distribuem a pressão de apoio e protegem a superfície sob o elemento girado
  use-as sempre em furos oblongos, materiais macios e furos de passagem sobredimensionados.

- **Espaçamento e distância à borda:** distância à borda ≥ 1.5–2 × d, espaçamento entre parafusos ≥ 2.5–3 × d.

- **Uniões ao cisalhamento:** decida entre união por atrito (a pré-carga transmite o cisalhamento por atrito) e união por contato (a haste apoia no furo). A união por atrito exige pré-carga total e verificada.

- **Não exagere na folga do furo**
  folga grande somada a peças macias favorece escorregamento e assentamento.

## 6. Afrouxamento e travamento

O autoafrouxamento é provocado por **vibração transversal (lateral)**, que vence momentaneamente o atrito da rosca e deixa a porca girar para trás (o mecanismo de Junker). A primeira defesa é sempre **pré-carga alta e mantida, com comprimento de aperto adequado** — a maioria dos "parafusos soltos" são, na verdade, parafusos com pré-carga insuficiente.

| MÉTODO DE TRAVAMENTO | MECANISMO | RETENÇÃO SOB VIBRAÇÃO | REUTILIZÁVEL |
|---|---|---|---|
| **Pré-carga + aperto corretos** | atrito do aperto | alta | sim |
| **Porca com anel de náilon (parlock)** | atrito do anel | média | limitada (≤ ~120 °C) |
| **Porca autotravante toda metálica** | rosca deformada | média–alta | poucas reutilizações |
| **Par de arruelas de cunha (ex.: Nord-Lock)** | efeito de cunha sob a cabeça | muito alta | sim |
| **Trava-rosca adesivo** | resina curada preenche as roscas | alta (conforme o grau) | uso único; desengraxe antes |
| **Arruela de pressão (Grower)** | — | ~nenhuma contra vibração transversal | — |
| **Contraporca (porca dupla)** | inversão da tração na rosca | média–alta | sim |
| **Porca castelo + contrapino / arame de freno** | travamento positivo por forma | muito alta | contrapino de uso único |

Observação: a arruela de pressão comum **não** impede de forma confiável o autoafrouxamento transversal em ensaios modernos — não confie nela contra vibração.

# 7. Modos de falha e checklist

| MODO | CAUSA | CORREÇÃO |
|---|---|---|
| **Fratura por fadiga (raio sob a cabeça / primeiro filete)** | pré-carga baixa, aperto curto, concentrador de tensão | pré-carga ~75% da prova, aperto mais longo, roscas laminadas, raio sob a cabeça |
| **Espanamento da rosca** | engajamento insuficiente, porca macia, torque excessivo | aumentar $L_e$, porca/inserto mais duro, controlar o torque |
| **Assentamento / relaxamento** | faces rugosas ou macias, revestimentos, juntas que assentam | reapertar após o assentamento, menos interfaces, faces mais duras |
| **Escoamento por torque excessivo** | K errado, lubrificação inconsistente | controlar o método, usar o K correto |
| **Fragilização por hidrogênio** | alta resistência (≥10.9) com revestimento eletrolítico | desidrogenação (forno) após o revestimento, zincagem mecânica, evitar em serviço com $H_2$ |
| **Engripamento (inox)** | roscas secas travam no aperto | pasta antiengripante, menor velocidade, combinar ligas diferentes |
| **Corrosão galvânica** | metais diferentes + eletrólito | fixadores compatíveis/revestidos, isolamento |

## 7.1 Checklist de aperto

- **Classe**
  8.8 por padrão; 10.9/12.9 só quando o espaço exigir parafuso menor; A2/A4 para corrosão.
- **Tamanho e pré-carga**
  dimensione pela área resistente à tração $A_s$; defina pré-carga alvo ≈ 75% da carga de prova.
- **Especificação de aperto**
  torque por $T = K \cdot F_i \cdot d$ com o K
  real
  , ou ângulo / escoamento / alongamento para maior precisão.
- **Engajamento**
  verifique $L_e$ para o material-base (Seção 4 / ferramenta).
- **Aperto e arruelas**
  comprimento de aperto adequado; arruelas sob o elemento girado; evite uniões macias/com junta em fadiga.
- **Travamento**
  adeque o método à vibração, à temperatura e à necessidade de reutilização.
- **Especifique no desenho**
  classe, acabamento/revestimento, torque (e método), elemento de travamento, arruela.

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

Designing something that needs this? ideambox.com/contact