# Tensão de contato de Hertz

A tensão de contato entre corpos curvos — fórmulas para contato pontual e linear, o módulo e o raio equivalentes, a tensão de cisalhamento subsuperficial que provoca o pitting e os limites admissíveis.

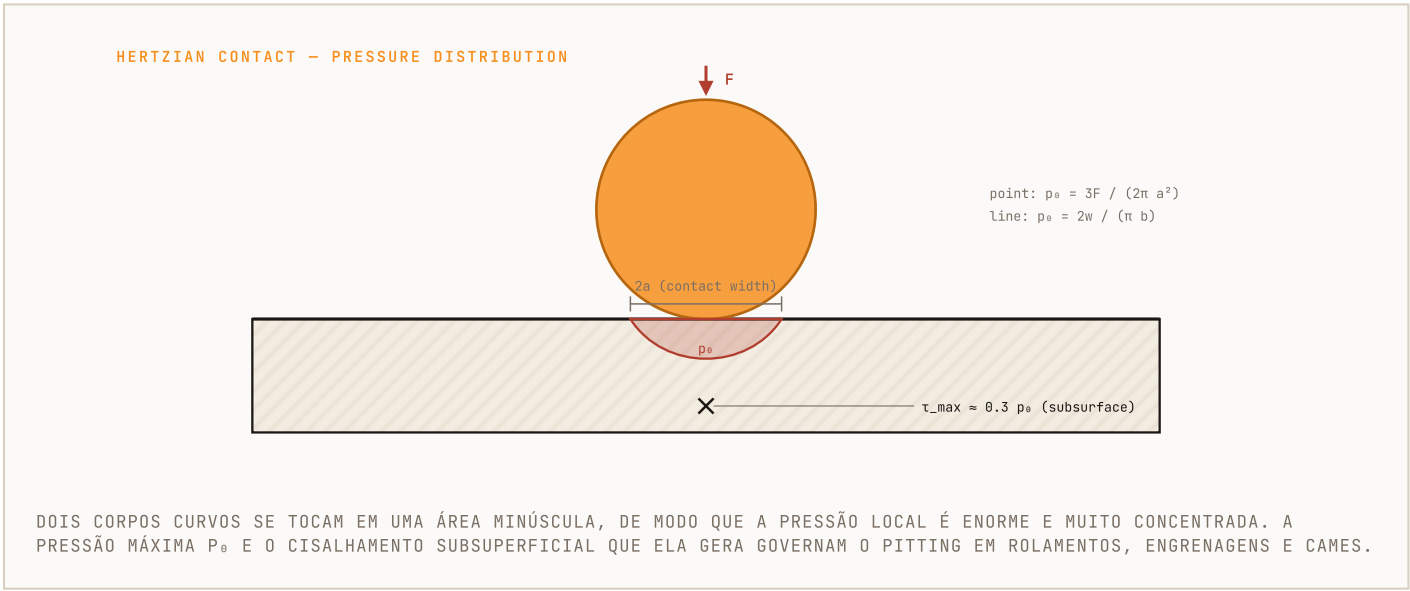

| REVISÃO | PUBLICADO | RESPONSÁVEL | COMPLEMENTO |
|---|---|---|---|
| 1.0 | June 2026 | Engenharia Ideambox | Referência em PDF |



RESUMO

Quando corpos curvos se tocam — uma esfera na pista, um dente de engrenagem no dente conjugado, um came no seguidor, uma roda no trilho —, o contato ocorre em uma área muito pequena, e a tensão local (hertziana) fica muito acima do que a carga nominal sugere. A pressão de contato máxima e o cisalhamento que ela produz logo abaixo da superfície são o que limita os elementos rolantes.

A Seção 1 explica o contato de Hertz. A Seção 2 trata do contato pontual (esferas). A Seção 3 trata do contato linear (cilindros/rolos). A Seção 4 apresenta o módulo e o raio equivalentes. A Seção 5 aborda o cisalhamento subsuperficial e a tensão admissível. A Seção 6 traz recomendações de projeto e um checklist.


DOIS CORPOS CURVOS SE TOCAM EM UMA ÁREA MINÚSCULA, DE MODO QUE A PRESSÃO LOCAL É ENORME E MUITO CONCENTRADA. A PRESSÃO MÁXIMA $P_0$ E O CISALHAMENTO SUBSUPERFICIAL QUE ELA GERA GOVERNAM O PITTING EM ROLAMENTOS, ENGRENAGENS E CAMES.

SUMÁRIO


1. O que é o contato de Hertz
2. Contato pontual (esferas)
3. Contato linear (cilindros / rolos)
4. Módulo e raio equivalentes
5. Cisalhamento subsuperficial e tensão admissível
6. Recomendações de projeto e checklist

## 1. O que é o contato de Hertz

Duas superfícies curvas não conformes pressionadas uma contra a outra se deformam elasticamente, formando uma pequena área de contato — um círculo (contato pontual) ou uma faixa estreita (contato linear). Ao longo dessa área a pressão tem distribuição **semielíptica**, com máximo $\mathbf{p_0}$ no centro. Como a área é minúscula, $p_0$ é muito elevada, e a tensão de cisalhamento máxima fica um pouco **abaixo** da superfície — que é onde se inicia a fadiga de contato de rolamento (pitting/lascamento).

| | |
|---|---|
| $p_0$ | Pressão de contato máxima (no centro) — o valor a verificar |
| `Contato pontual` | Esfera sobre plano / esfera na pista / esfera sobre esfera → área circular de raio a |
| `Contato linear` | Cilindro sobre plano / rolo na pista → faixa de semilargura b, carga por unidade de comprimento w |
| `E*` | Módulo equivalente (reduzido), que combina a elasticidade dos dois corpos |
| `R*` | Raio equivalente (relativo), que combina as curvaturas dos dois corpos |

## 2. Contato pontual (esferas)

Para duas esferas (ou uma esfera sobre um plano, $R_2 \to \infty$):

- Raio de contato $a = (3\ F\ R^*\ /\ 4\ E^*)^{1/3}$
- Pressão máxima $p_0 = 3\ F\ /\ (2\ \pi\ a^2)$ (= 1.5 × a pressão média)

$p_0$ cresce apenas com a **raiz cúbica** da carga, de modo que dobrar a carga eleva a pressão máxima em ~26% — mas ela também cresce rapidamente quando o raio diminui, e por isso esferas pequenas e abaulamentos acentuados ficam muito solicitados.

## 3. Contato linear (cilindros / rolos)

Para dois cilindros paralelos com carga por unidade de comprimento `w = F / L`:

- Semilargura de contato `b = √(4 w R* / (π E*))`
- Pressão máxima `p₀ = 2 w / (π b) = √(w E* / (π R*))`

O contato linear distribui a carga ao longo do rolo, de modo que, para a mesma carga total, resulta em $p_0$ menor que o contato pontual — razão pela qual rolamentos de rolos suportam mais que rolamentos de esferas do mesmo tamanho. Atenção ao **carregamento de borda**: o desalinhamento concentra w nas extremidades do rolo, e por isso os rolos são abaulados.

## 4. Módulo e raio equivalentes

Os dois corpos em contato compartilham a deformação, combinada assim:

- $1/E^* = (1 - \nu_1^2)/E_1 + (1 - \nu_2^2)/E_2$
- $1/R^* = 1/R_1 \pm 1/R_2$

  use **+** para duas superfícies convexas e **−** para um corpo convexo dentro de um côncavo (uma esfera na sua pista), o que torna R* grande e reduz a tensão.

Assim, uma esfera assentada em uma canaleta de pista conforme fica muito menos solicitada que a mesma esfera sobre um plano. Aço sobre aço: $E^* \approx 113$ GPa ($E = 207$ GPa, $\nu = 0.3$ em cada um).

## 5. Cisalhamento subsuperficial e tensão admissível

- O **cisalhamento máximo** é ≈ **0.30 · $p_0$** e se localiza a cerca de **0.48 a** (pontual) ou **0.78 b** (linear) abaixo da superfície. As trincas de fadiga de rolamento nascem ali e avançam até a superfície, formando pites.

- **Limite estático (brinelamento):** a indentação permanente começa em torno de $p_0$ ≈ 4000–4200 MPa para aço de rolamento temperado
  base da capacidade de carga estática $C_0$.

- **Limite cíclico (pitting):** bem mais baixo; flancos de engrenagens e pistas cementados são normalmente projetados para ~1300–1700 MPa de tensão de contato para vida longa (conforme ISO 6336 / vida L10 de rolamentos).

| SITUAÇÃO | LIMITE INDICATIVO DE $P_0$ |
|---|---|
| **Aço de rolamento temperado, estático (brinelamento)** | ~4000–4200 MPa |
| **Flanco de engrenagem cementado, vida longa** | ~1300–1700 MPa |
| **Aço temperado em toda a seção, ciclos moderados** | ~1000–1400 MPa |

Valores indicativos — para a vida real use a ISO 6336 (engrenagens) ou as capacidades L10 dos rolamentos.

## 6. Recomendações de projeto e checklist

- **Reduza $p_0$** aumentando o raio equivalente (abaulamento, canaletas conformes), passando para contato linear ou reduzindo a carga.
- **Eleve o limite** com aço mais duro e mais limpo (cementação, poucas inclusões) e um bom filme de óleo EHL (um filme completo prolonga drasticamente a vida ao pitting).
- **Cuide da limpeza subsuperficial**
  inclusões na profundidade de cisalhamento máximo são núcleos de trinca; por isso os aços de rolamento são desgaseificados a vácuo.
- **Checklist:** determine E* e R* → calcule a/b e $p_0$ (pontual ou linear) → compare com o limite estático (brinelamento) e com o limite cíclico (pitting) para o material e a vida → se estiver alto, aplique abaulamento/conformidade, endureça ou melhore a lubrificação. Complementa as referências de
  Rolamentos
  ,
  Engrenagens
  e
  Fadiga
  .

---

This document is also a web page, kept up to date:
https://ideambox.com/pt/downloads/hertz-contact-stress/

Designing something that needs this? ideambox.com/contact