

PROJETO MECÂNICO (SEM 0347)

Notas de Aulas v.2019

Aula 07 – Transmissões

Professor: Carlos Alberto Fortulan
Colaborador: Rogério Erbereli

Transmissão

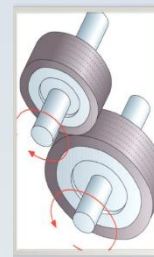
Em uma máquina, acionamentos são necessários para transmitir energia de um motor para vários componentes, geralmente de um eixo para outro, e é feito por componentes de transmissão.

Componentes de transmissão

- ✓ Correias;
- ✓ Correntes;
- ✓ Engrenagens;
- ✓ Roda de atrito;
- ✓ Cabos de aço

Seleção dos componentes de transmissão

- ✓ Espaço requerido;
- ✓ Precisão;
- ✓ Exigências de funcionamento;
- ✓ Precisão de fabricação;
- ✓ Formas construtivas
- ✓ Dados para dimensionar
- ✓ Comparação de dimensões, peso e preço.



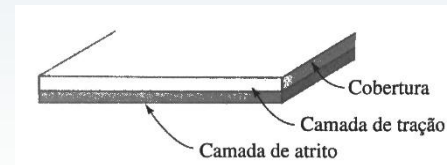
	Engrenagens Cilíndricas	Parafuso sem fim	Corrente	Correia plana	Correia em V	Correia dentada	Rodas de atrito
Potência (kW)	3.000	120	200	150	100	100	25
Relação	8	50	6	5	8	8	6
Velocidade Tangencial (m/s)	50	25	10	60	25	40	25
Rotação (rpm)	150.000	40.000	10.000	200.000	8.000	30.000	10.000
Eficiência	93-99	50-96	97-98	96-98	92-94	96-98	90-98
Precisão	Alta	Alta	Média	Baixa	Baixa	Média	Baixa
Ruído	Médio	Médio	Alto	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo
Custo	Alto	Alto	Médio	Baixo	Médio	Médio	Baixo

Machine	Typical Efficiency
V-belt drives	95%
Timing belt drives	98%
Poly-V or ribbed belt drives	97%
Flat belt drives, leather or rubber	98%
Nylon core	98% to 99%
Variable speed, spring loaded, wide range	
V-belt drives	80% to 90%
Compound drive	75% to 90%
Cam-reaction drive	95%
Helical gear reducer	
Single-stage	98%
Two-stage	96%
Worm gear reducer	
10:1 ratio	86%
25:1 ratio	82%
60:1 ratio	66%
Roller chain	98%
Leadscrew, 60 deg helix angle	65% to 85%
Flexible coupling, shear-type	99%+

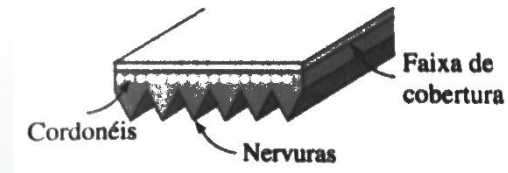
Características	Roda de atrito	Engrenagem	Correia plana	Correia Trapezoidal	Correia sincronizadora	Corrente
Máx. potência [kW]	80	80e3	200	350	120	400
Máx. torque [kNm]	5	7000	3	5	1	40
Máx. veloc. Linear [m/s]	20	20	100	30	60	10
Eficiência	0,95	0,97	0,97	0,97	0,96	0,95
Potência como função da velocidade	sim	não	sim	sim	sim	sim
Máx. razão de trans. (1 estágio)	6-18	6-10	6-8	6-10	6-10	6-10
Tensionamento	sim	não	sim	sim	sim	sim
Carregamento nos mancais	alto	baixo	alto	alto	baixo	baixo
Precisão	Médio	alto	baixo	baixo	baixo	médio
Escorregamento	sim	não	sim	sim	não	não
Ruído (barulho)	baixo	médio	baixo	baixo	baixo	alto
Limite de sobrecarga	sim	não	sim	sim	não	não
Custo	baixo	alto	baixo	médio	médio	médio

Tipos de correias

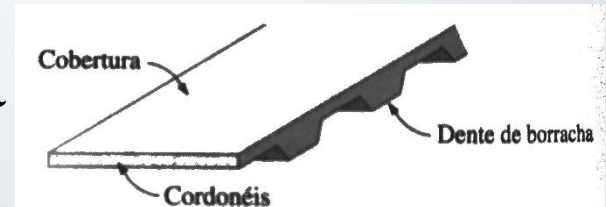
✓ Correia Plana;



✓ Correia em “V”;



✓ Correia Sincronizadora



Correias planas

Seção transversal retangular

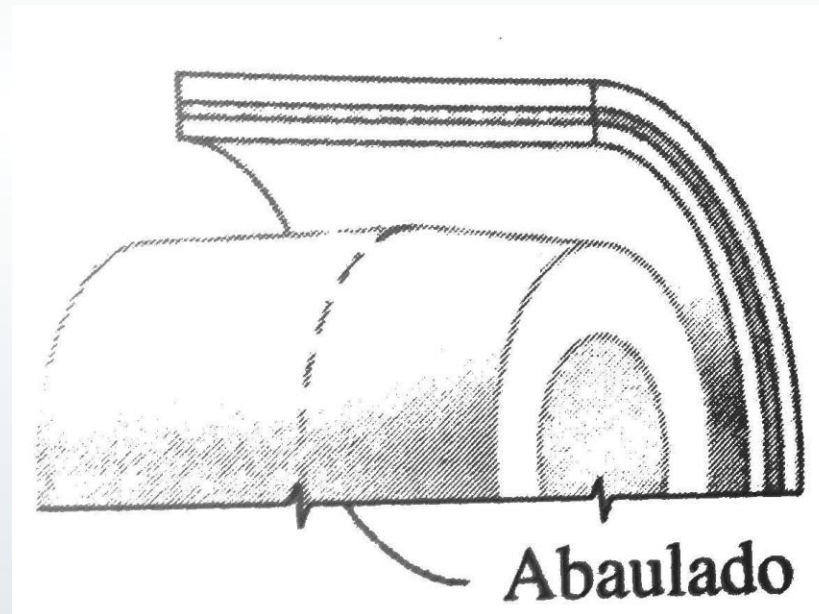
- Construção simples;
- Baixo custo;
- Alta flexibilidade;
- Elevada tolerância à sobrecarga;
- Boa resistência em ambientes abrasivos;
- Ruidosa;
- Deslizamento é provável;
- Baixa eficiência em baixas velocidades;
- Tensionamento é necessário.



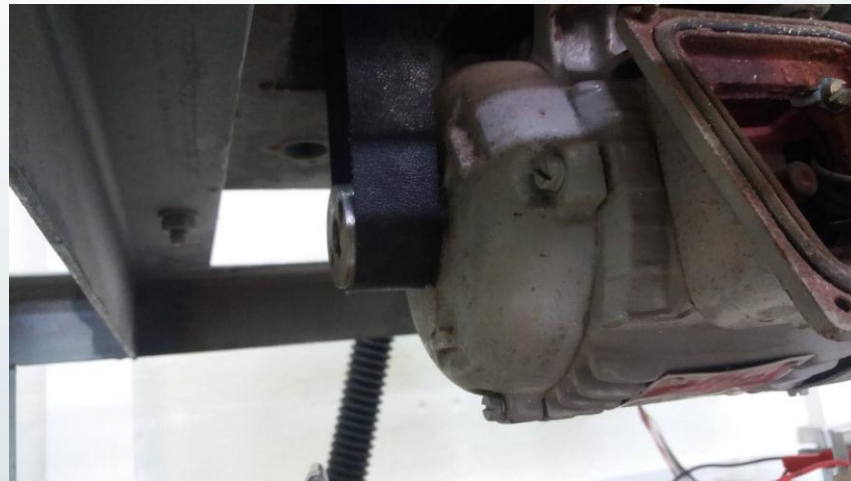
Polias para correias planas

As polias são abauladas para correia plana

- Esse tipo de polia provê uma trajetória estável para a correia -

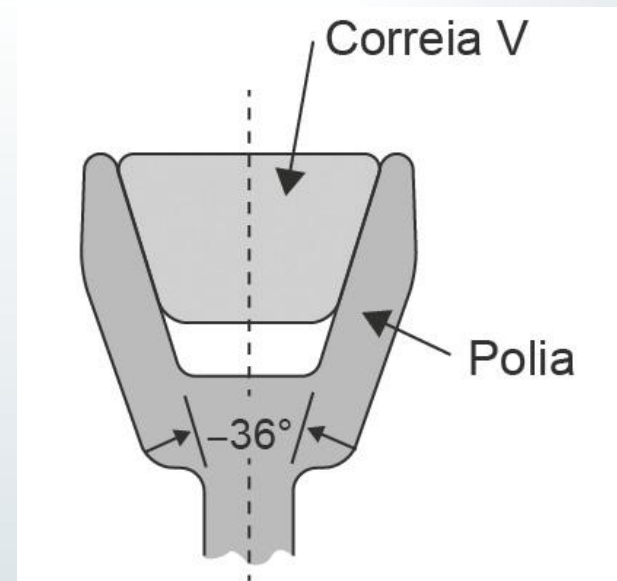


Correias planas



Correias trapezoidais

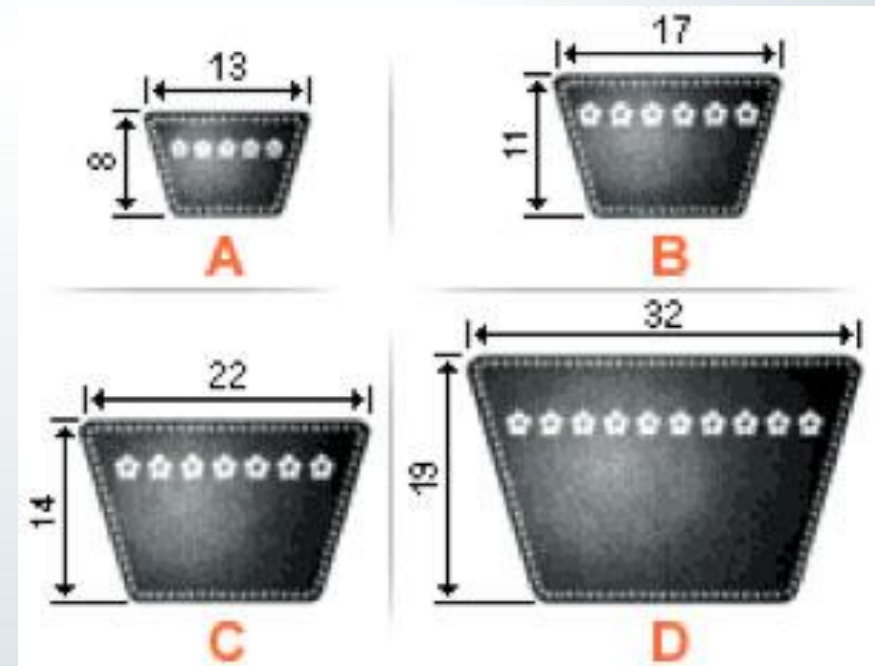
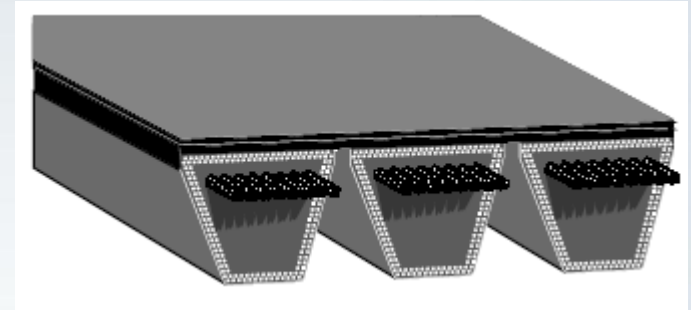
- ✓ Transmissão por atrito, a correia em formato "V" tende a uma espécie de cunha para dentro do canal da polia, quando maior a carga maior a força de atrito;

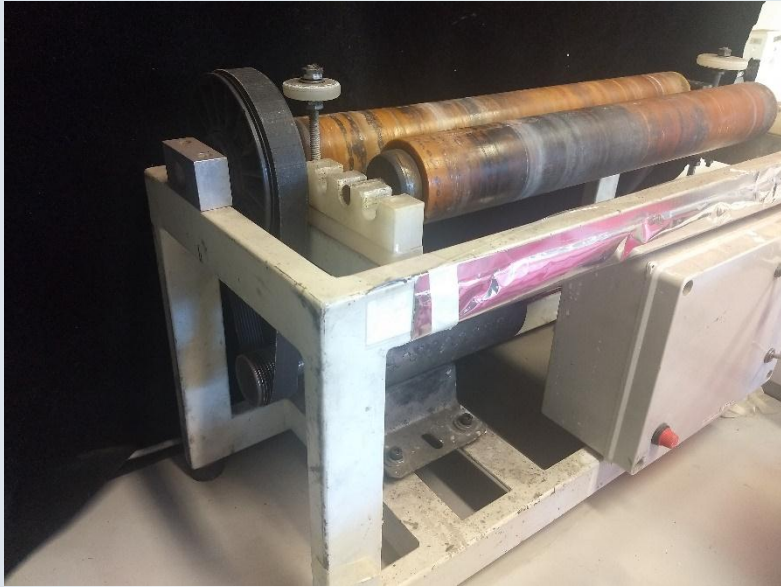


✓ Para alta potência, dois ou mais correias V podem ser unidas lado a lado em um arranjo chamado de multi-V, correspondente a feixes multi-canal;

✓ Boa resistência à sobrecargas;

✓ Ações simultâneas entre os feixes pode não ser precisos;





Correias sincronizadoras (Timing Belts)

São correias dentadas onde o sincronismo é garantido pela presença de dentes. A carga é transferida pelos dentes e pela superfície.

Utilizadas em:

impressoras jato de tinta;
alguns grandes robôs XY.

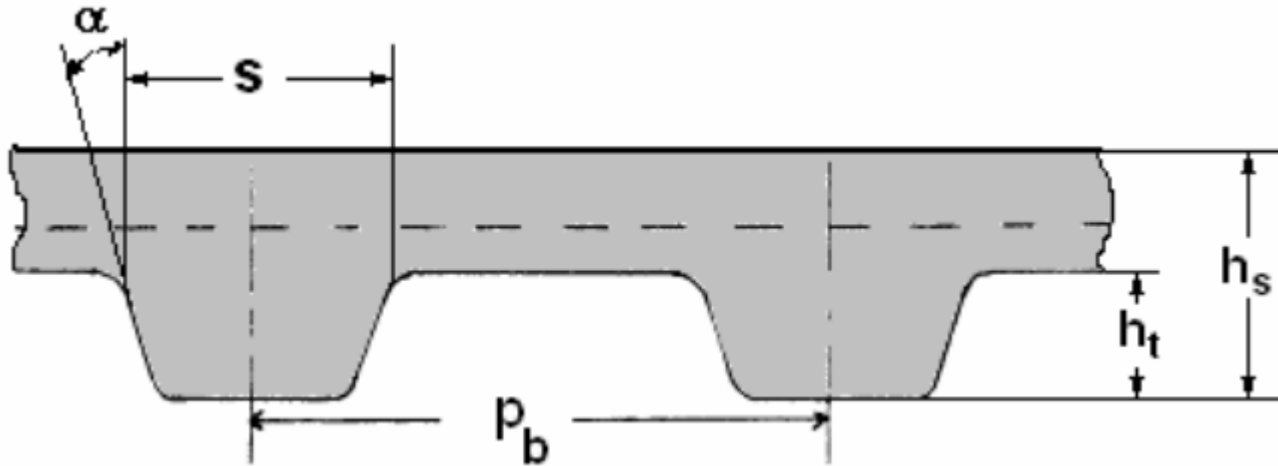


Correias sincronizadoras: tipos de dentes



Finalidade do tipo de dente:

- ✓ Redução de ruído;
- ✓ Aumento da carga máxima;
- ✓ Aumento da vida;
- ✓ Aumento da v_{\max}



Parâmetro		Tipo de Perfil					
		extra extra leve	extra leve	leve	pesado	extra pesado	duplamente extra pesado
		MXL	XL	L	H	XH	XXH
Passo P_b	mm	2,032	5,080	9,525	12,700	22,225	31,750
Ângulo de flanco	α	20°	25°	20°	20°	20°	20°
Espessura do dente s	mm		2,57	4,65	6,12	12,57	19,05
Altura do dente - h_t	mm	0,46	1,27	1,91	2,29	6,35	9,53
Altura total - h_s	mm	1,14	2,3	3,6	4,3	11,2	15,7
Nº mínimo de dentes recomendado na polia			12 - 10	16 - 12	20 - 17	26 - 22	26 - 22

Polias sincronizadoras



Considerações dinâmicas

A variação da tensão de uma correia ao longo da polia de tração pode ser expressa por:

$$\frac{T}{T_2} = e^{\mu\theta}$$

Onde:

T = tensão de entrada na polia;

T_2 = tensão de saída da polia;

μ = coeficiente de atrito

θ = ângulo de abraçamento.

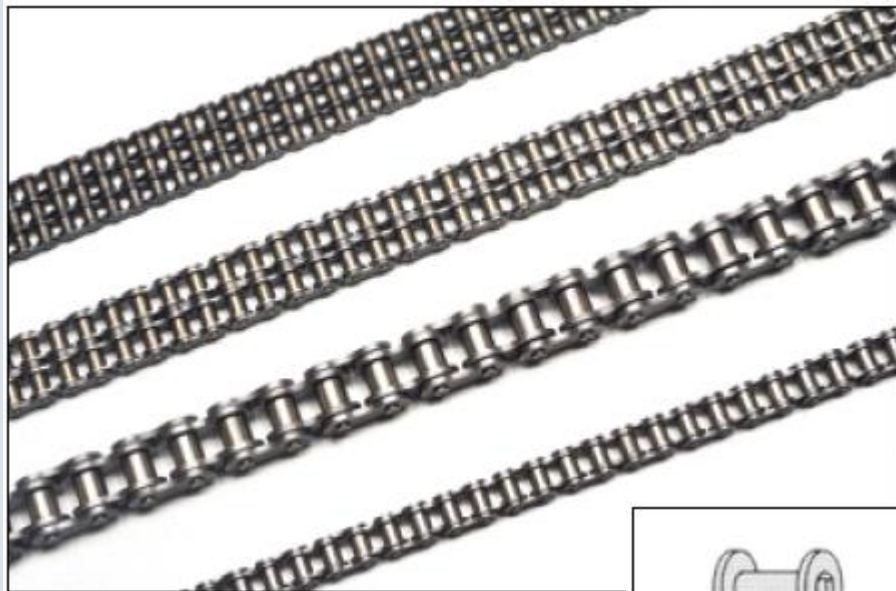
Considerações dinâmicas

É possível aumentar o torque transmitido por:

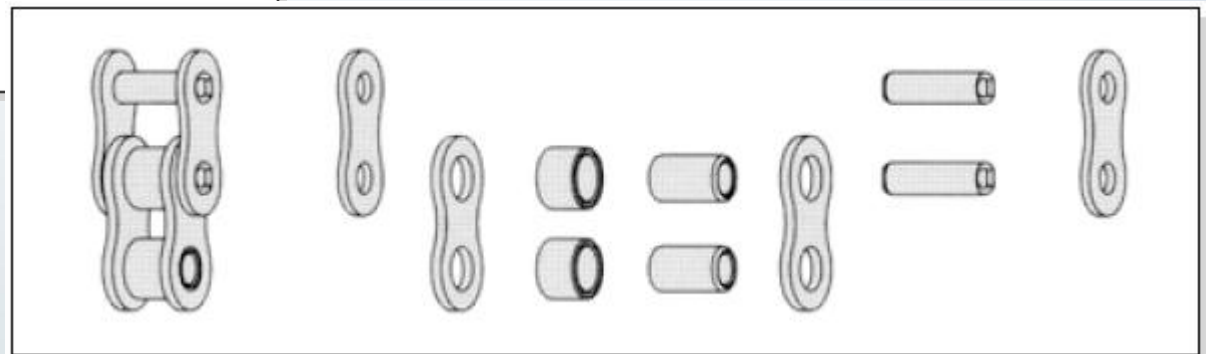
- ✓ aumento do coeficiente de atrito;
- ✓ aumento do ângulo de 'abraçamento' → empregando polias tensionadoras.
- ✓ A razão de transmissão é igual à razão entre o número de dentes da polia motora pelo da polia movida.

Transmissão por correntes

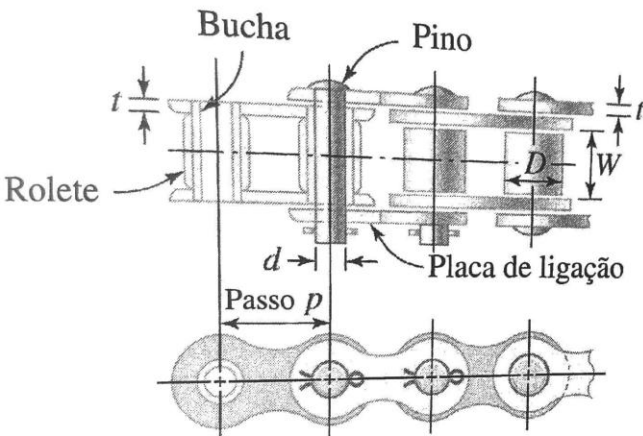
- ✓ As correntes também tem flexibilidade, e são preferidos para distâncias intermediárias.



- ✓ Transmissão mais precisa que das correias;
- ✓ Longa vida de serviço;
- ✓ Custo intermediário (maior que com correias e menor que com engrenagens);



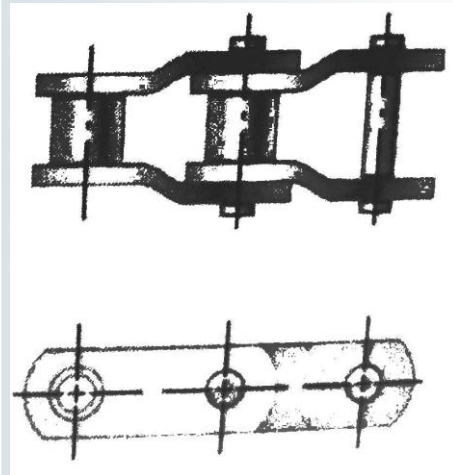
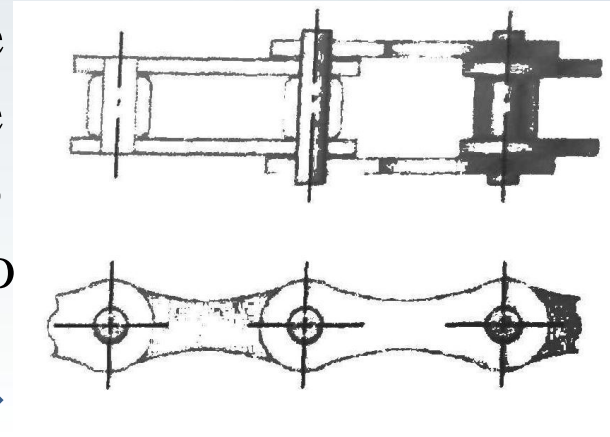
Tipos de correntes



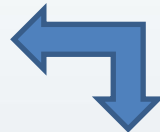
Corrente de roletes de precisão



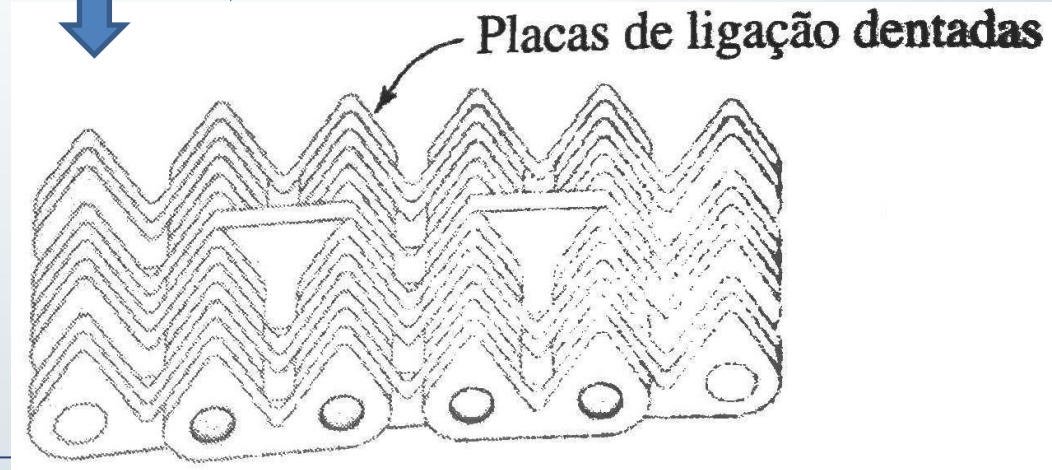
Corrente de rolete de passo estendido

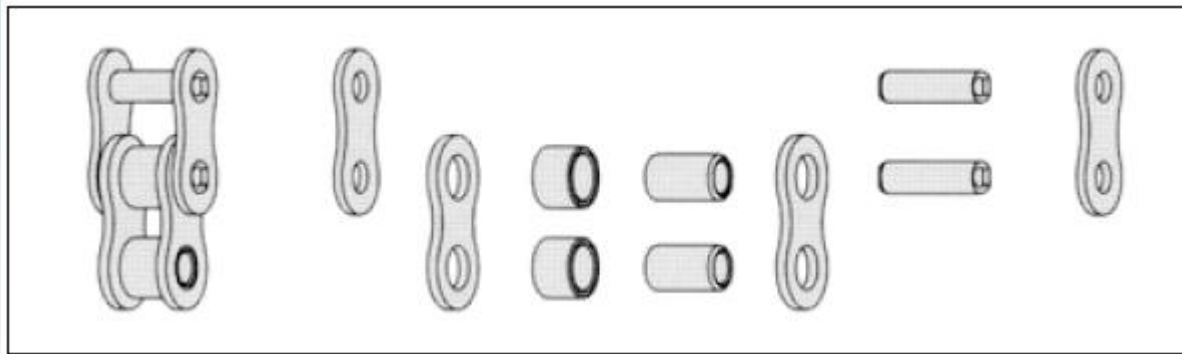


Corrente de classe de engenharia



Corrente de dentes invertidos



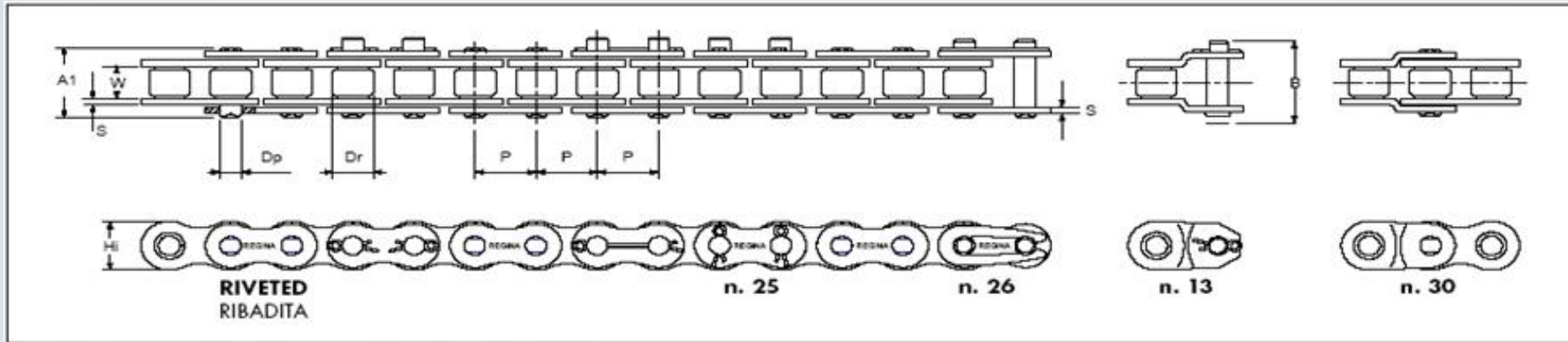


Cadeia = sequencia de link interno e link de pino articulado, que a torna um dispositivo flexível para transmissão de energia

Principais parâmetros:

- Pitch: distância entre 2 pinos consecutivos;
- Diâmetro do rolamento: dimensão do diâmetro exterior dos rolos da corrente;
- Largura interna: distância entre os dois lados internos opostos das placas de ligação internas.

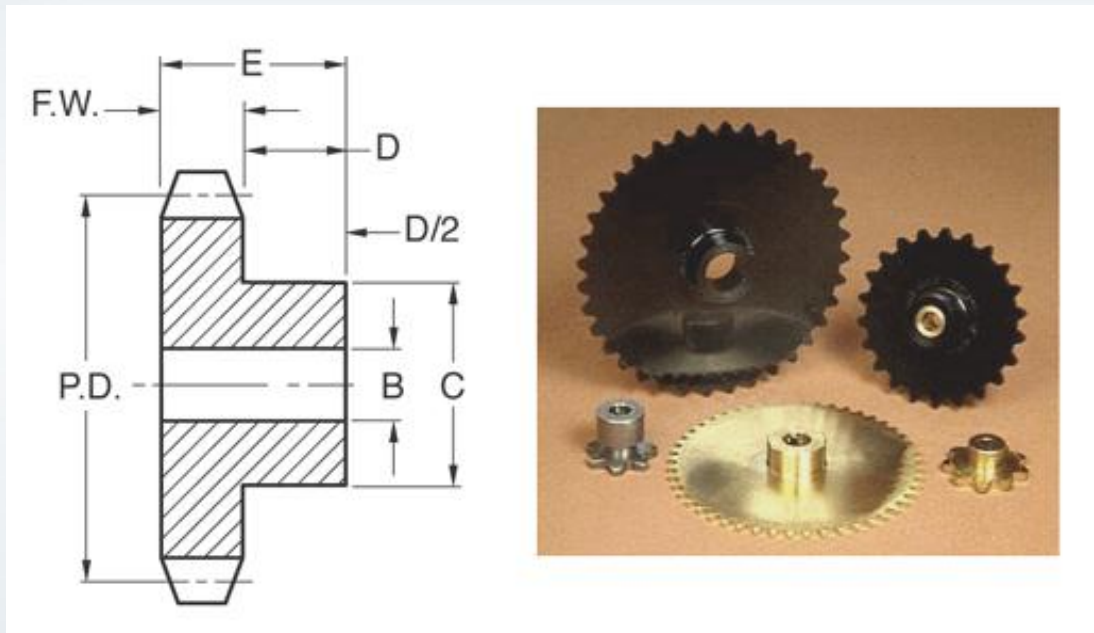
Dimensões



EUROPEAN SERIES - SINGLE STRAND SERIE EUROPEA - SEMPLICI

ISO N°	Regina Chain N° Codice Catena Regina	Product Range Gamma	Other versions of frequent use Varianti di uso frequente	Pitch Passo		Roller Diameter Diametro Rullo	Inside Width Larghezza interna	Plate / Piastra		Pin/Perno			Working Surface Superficie di lavoro	Measuring Load Carico di Misura	Min. Ultim. Strength Carico di rottura minimo	Avg. Ultim. Strength Carico di rottura medio	Avg. Weight Peso approx.	Standard loose parts Parti staccate standard		
				P	Dr			W	Hi	s	Dp	A1						B	Conn. Link Giunto	Offset link Maglia falsa
				mm	" inches	max mm	min mm	max mm	inner/outer mm	max mm	max mm	max mm	mm ²	N	kN	kN	Kg/m			
X	05 B-1	105	STD	SS	8,00	0,315	5,00	3,00	7,11	0,80/0,70	2,31	8,30	13,00	11	50	4,40	4,90	0,16	26	30
	-	C120	SPEC-DIM		9,525	3/8	6,35	3,90	8,26	1,27/1,03	3,28	11,00	15,00	22	70	8,90	9,80	0,35	26	30
X	06 B-1	C121	STD	NC-SS	9,525	3/8	6,35	5,72	8,26	1,27/1,03	3,28	12,80	19,00	28	70	8,90	9,80	0,39	26	13-30
X	06 B-1	C121CH	CHROMA		9,525	3/8	6,35	5,72	8,26	1,27/1,03	3,28	12,80	19,00	28	70	8,90	9,80	0,39	26	30
	082	50	SPEC-DIM		12,70	1/2	7,75	2,38	9,91	0,95/0,92	3,66	8,10	10,60	16	120	9,02	9,80	0,26	26	-
	081	53	SPEC-DIM		12,70	1/2	7,75	3,30	9,91	0,95/0,92	3,66	9,30	12,30	20	125	8,00	9,80	0,29	26	30
	083	54	SPEC-DIM	SS	12,70	1/2	7,75	4,88	10,30	1,40/1,40	4,09	12,90	15,90	33	125	11,60	11,80	0,43	26	30
	084	90R	SPEC-DIM		12,70	1/2	7,75	4,88	11,15	1,80/1,63	4,09	14,60	17,60	36	125	15,60	15,70	0,51	26	30
	-	124R	SPEC-DIM		12,70	1/2	7,75	6,48	11,15	1,80/1,63	4,09	16,20	19,00	42	120	14,95	16,00	0,56	26	30

Rodas dentadas



Características

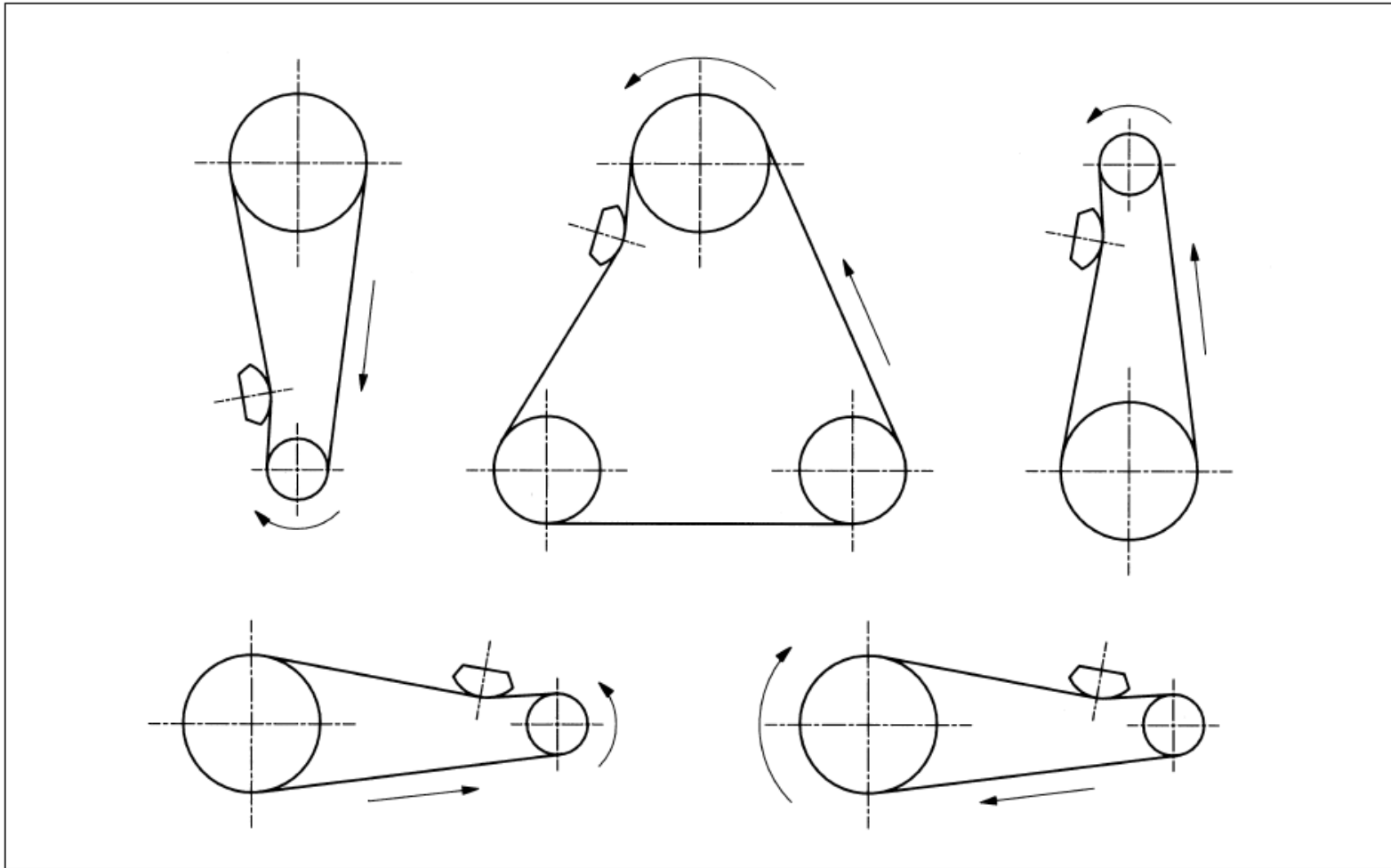
Prós:

- ✓ boa vida útil;
- ✓ Alto carregamento;
- ✓ menor ângulo de abraçamento (relativo às polias).

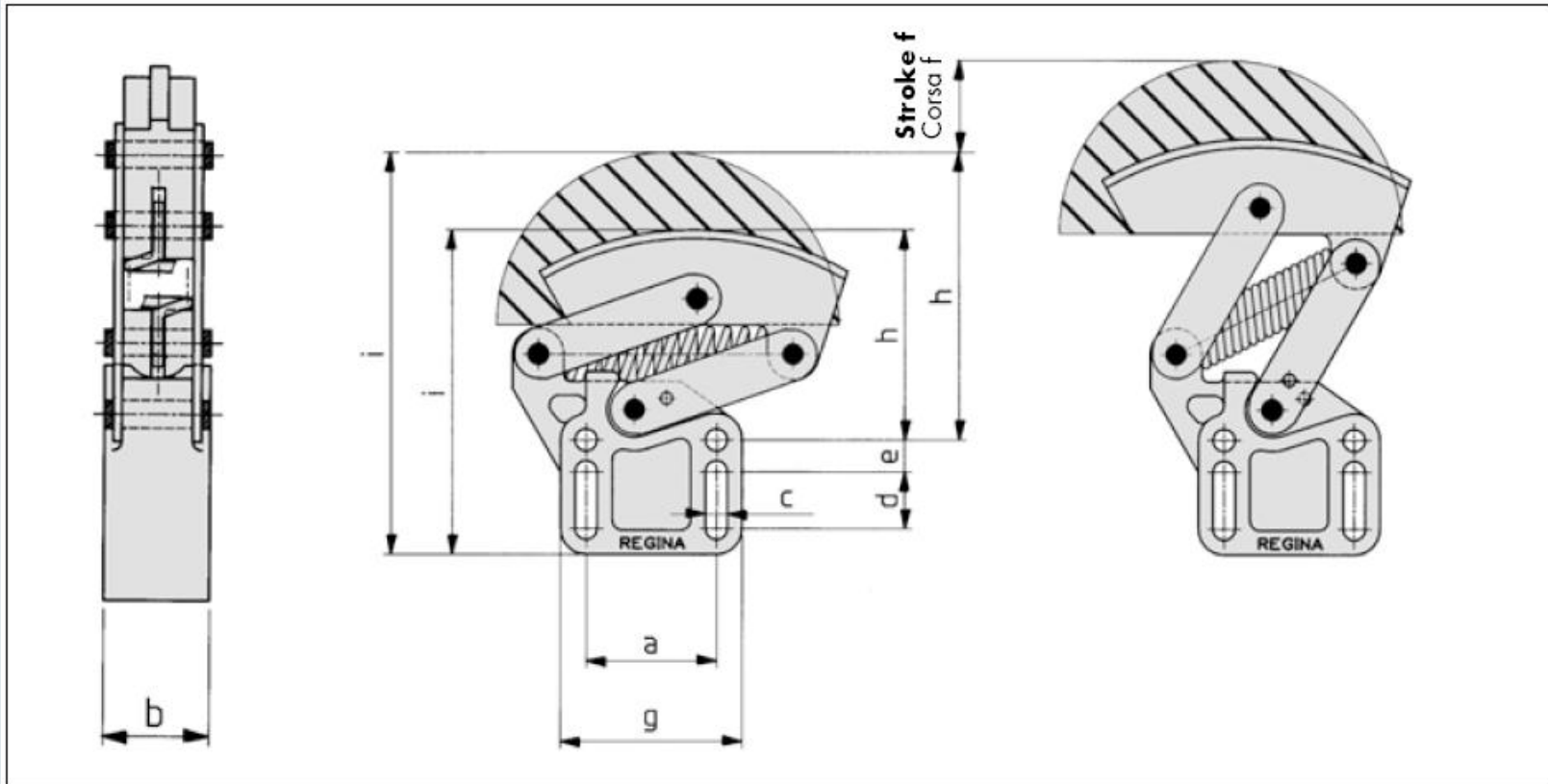
Contras:

- ✓ Custo (relativo às polias);
- ✓ Menor velocidade (< 10 m/s);
- ✓ Requer manutenção frequente (lubrificação);
- ✓ Ruído.

Configurações



Tensionadores



Engrenagens

As engrenagens são amplamente utilizadas para transmitir energia em máquinas, têm perfil dentado e podem ser classificadas em:

- ✓ engrenagens de dentes retos;
- ✓ engrenagens helicoidais;
- ✓ engrenagens cônicas;
- ✓ sem-fim.

Estado da Técnica

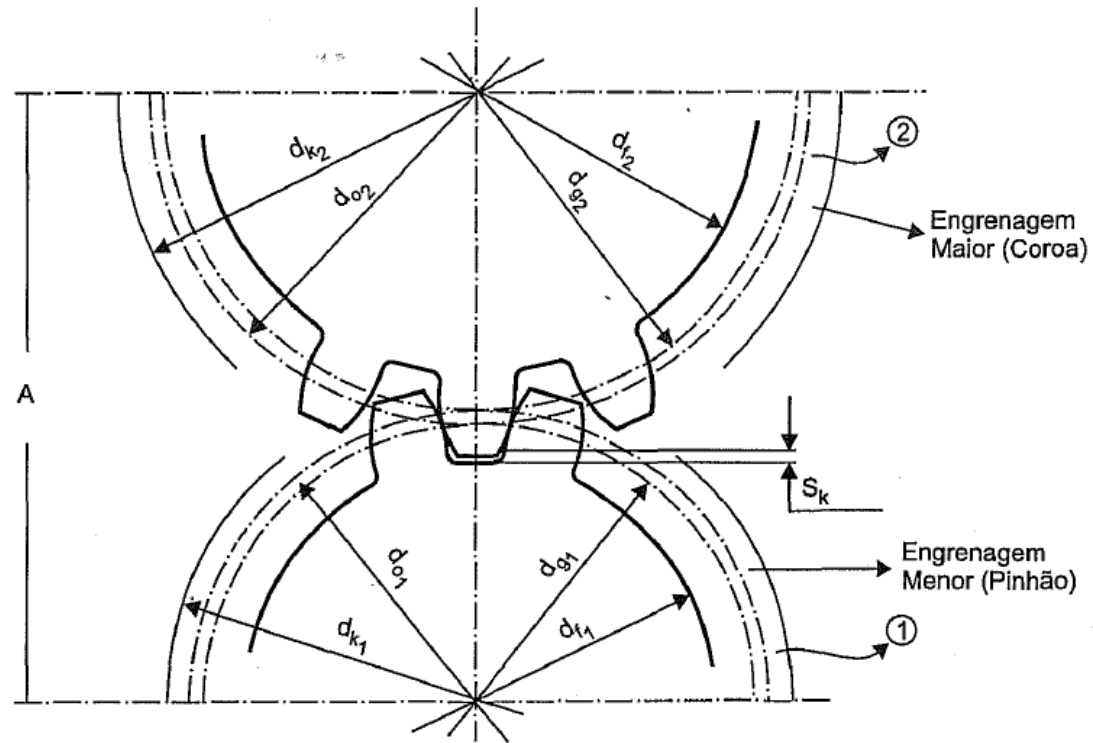
- ✓ **Engrenagens**
- ✓ Maior variedade de potências, rotações e relações de transmissão
- ✓ Rendimento entre 96 e 99%
- ✓ Potência de até 25.000 CV
- ✓ Não há deslizamento



Transmissão por engrenagens

- ✓ As engrenagens são usadas quando os eixos estão muito perto uns com os outros.
- ✓ Transmissão positiva, pois não há deslizamento.
- ✓ Trem de engrenagens é uma combinação de engrenagens, que são utilizados para a transmissão de movimento de um eixo para outro.

Engrenagens de dentes retos



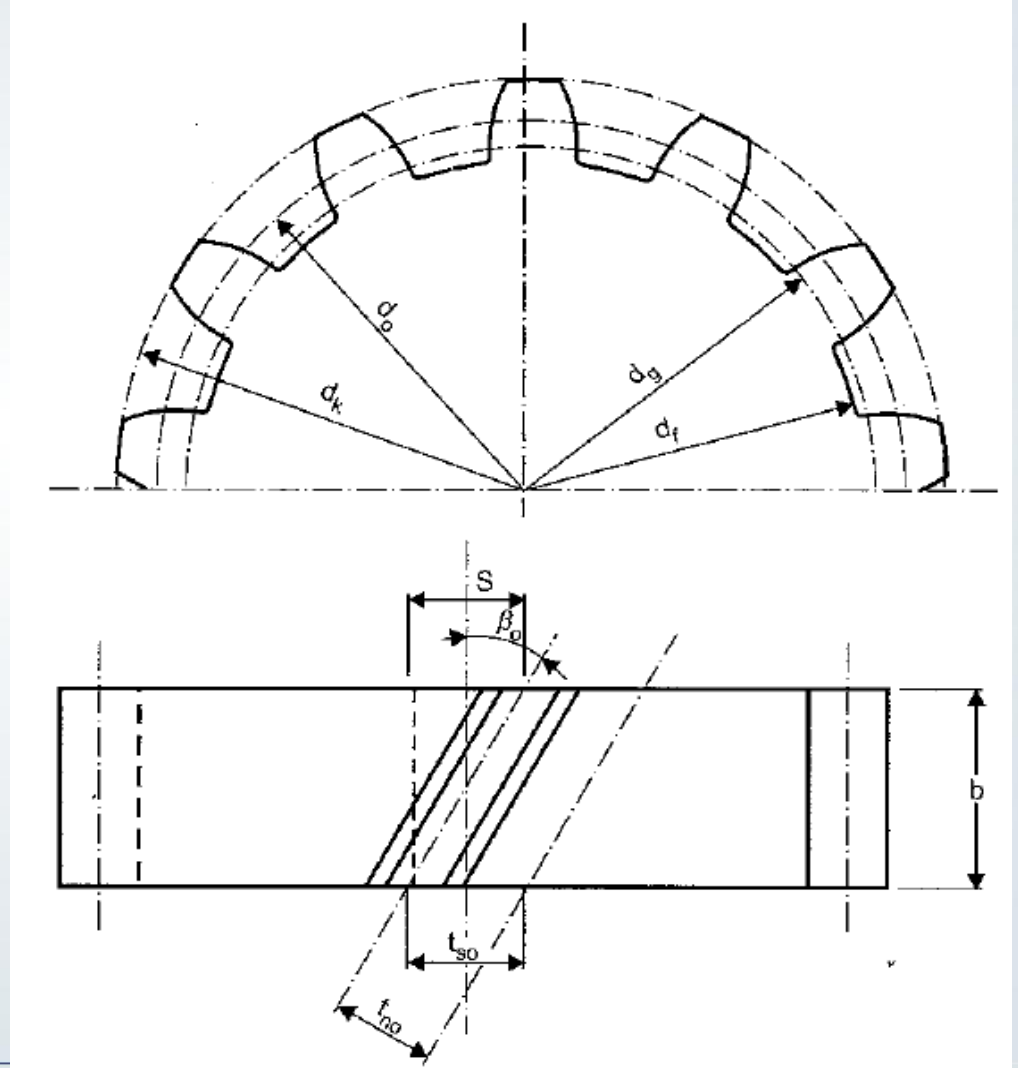
Diâmetro primitivo: d_0

Diâmetro de base: d_g

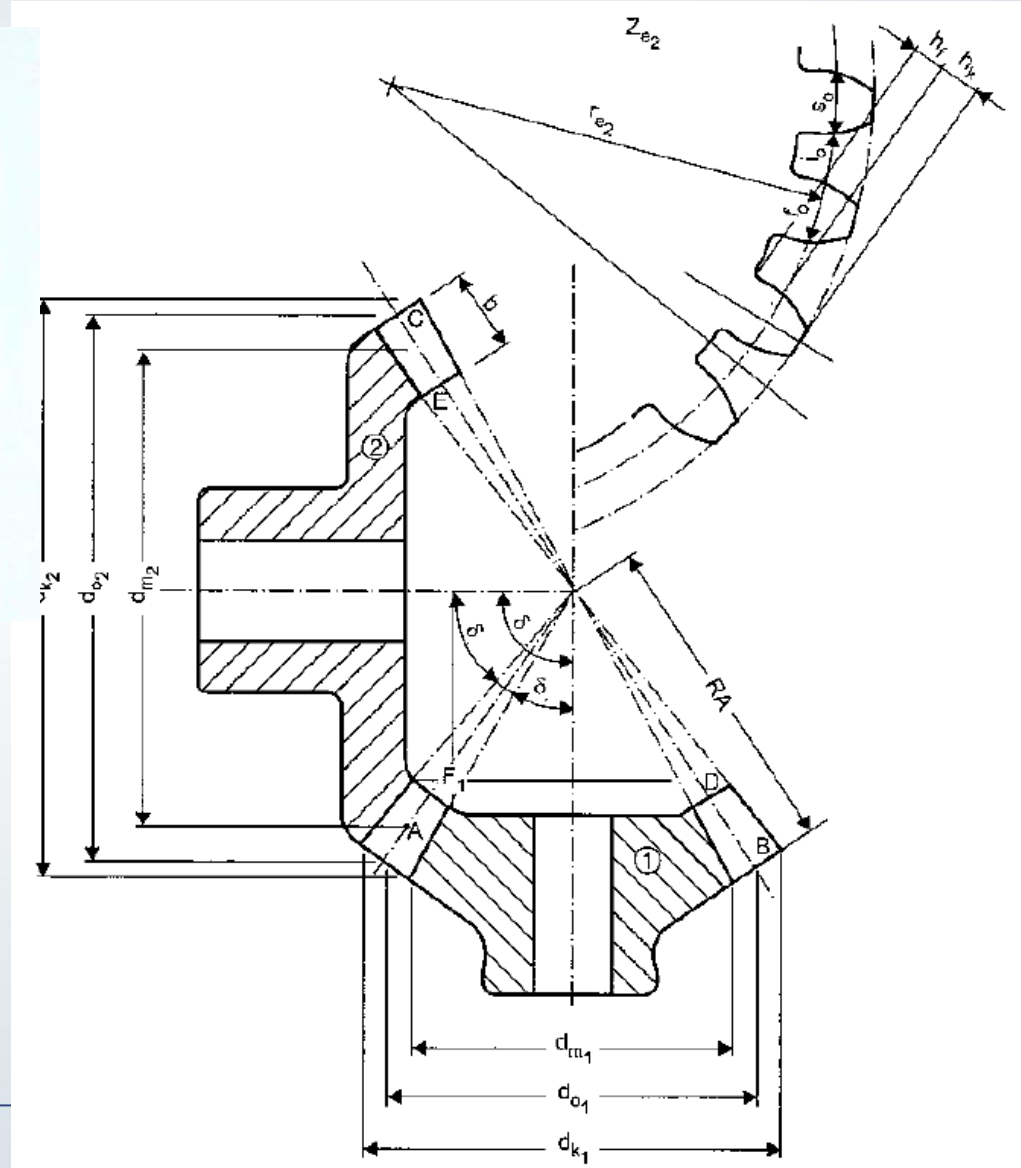
Diâmetro interno ou diâmetro do pé do dente: d_f

Diâmetro externo ou diâmetro de cabeça do dente: d_k

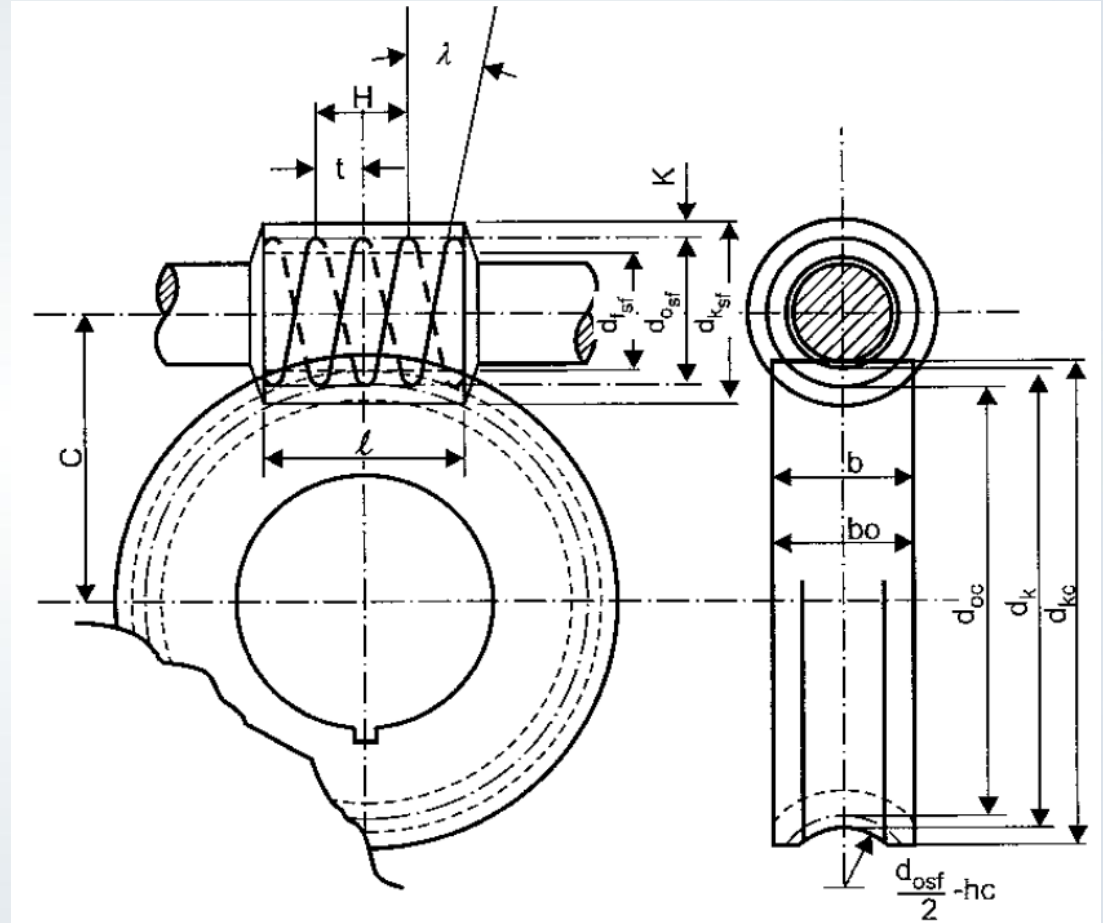
Engrenagens helicoidais



Engrenagens cônicas



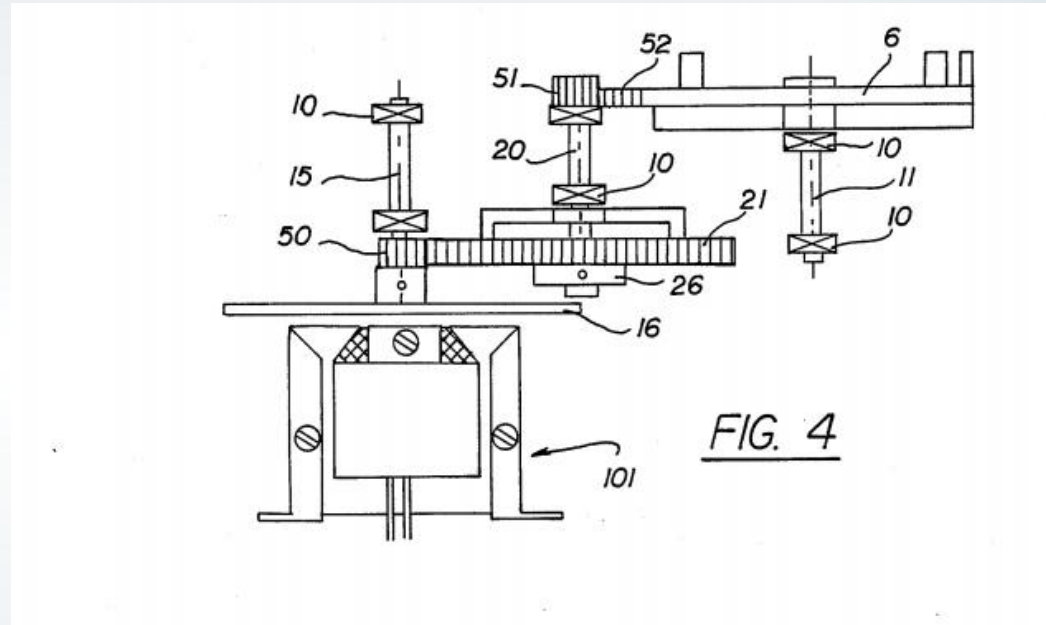
Coroa sem fim



Estado da Técnica → Patentes

Transmissão

Engrenagens (7)



Patente US4776832 (Martin, Black e Kazlauskas, 1988)

Engrenagem x Rodas de atrito

Engrenagem:

- ✓ Transmissão mais robusta
- ✓ Mais barulhenta
- ✓ Mais cara

Rodas de atrito:

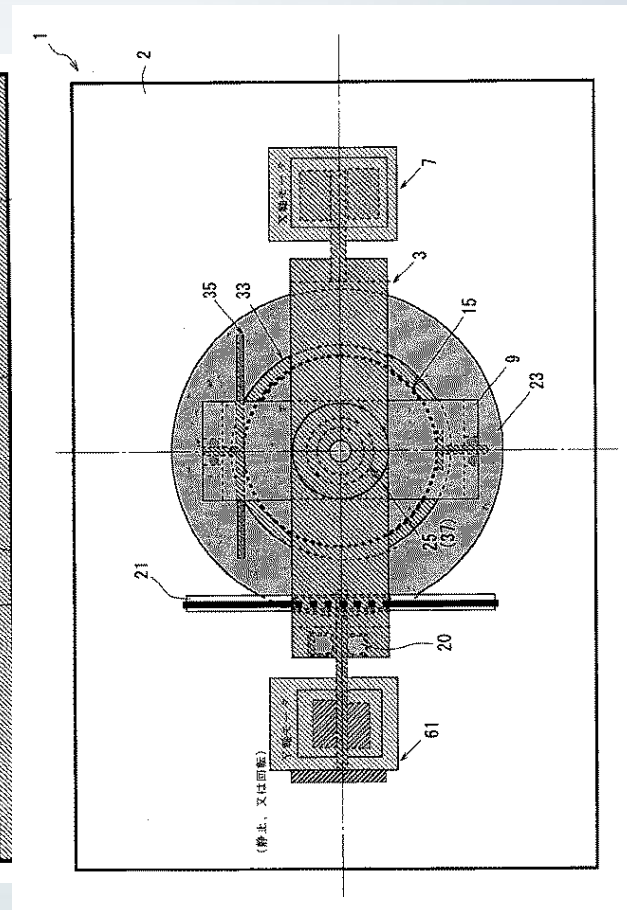
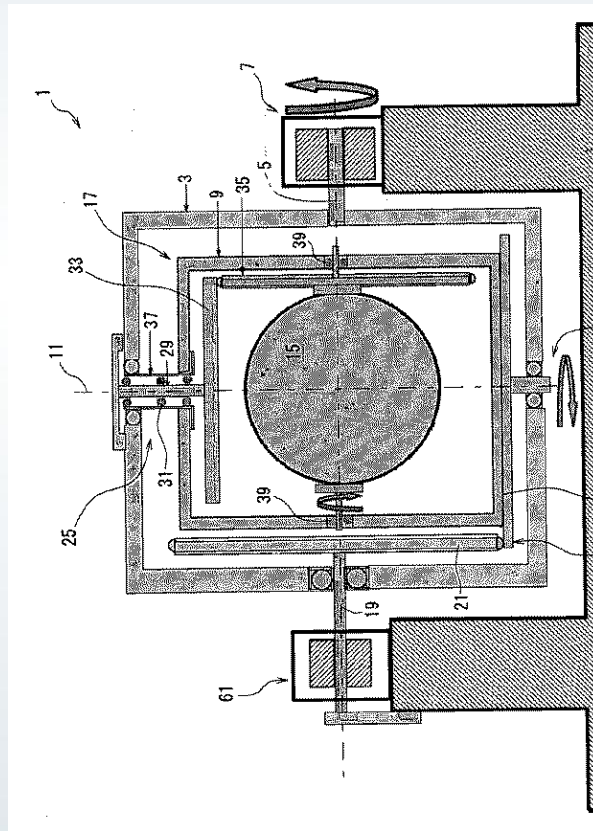
- ✓ Valores vantajosos de distância entre eixo e preço
- ✓ Limitação de potência (200 CV) e velocidade tangencial (20 m/s)
- ✓ Escorregamento
- ✓ Necessidade de pressão específica para transmissão

Estado da Técnica → Patentes

Transmissão

Rodas de Atrito

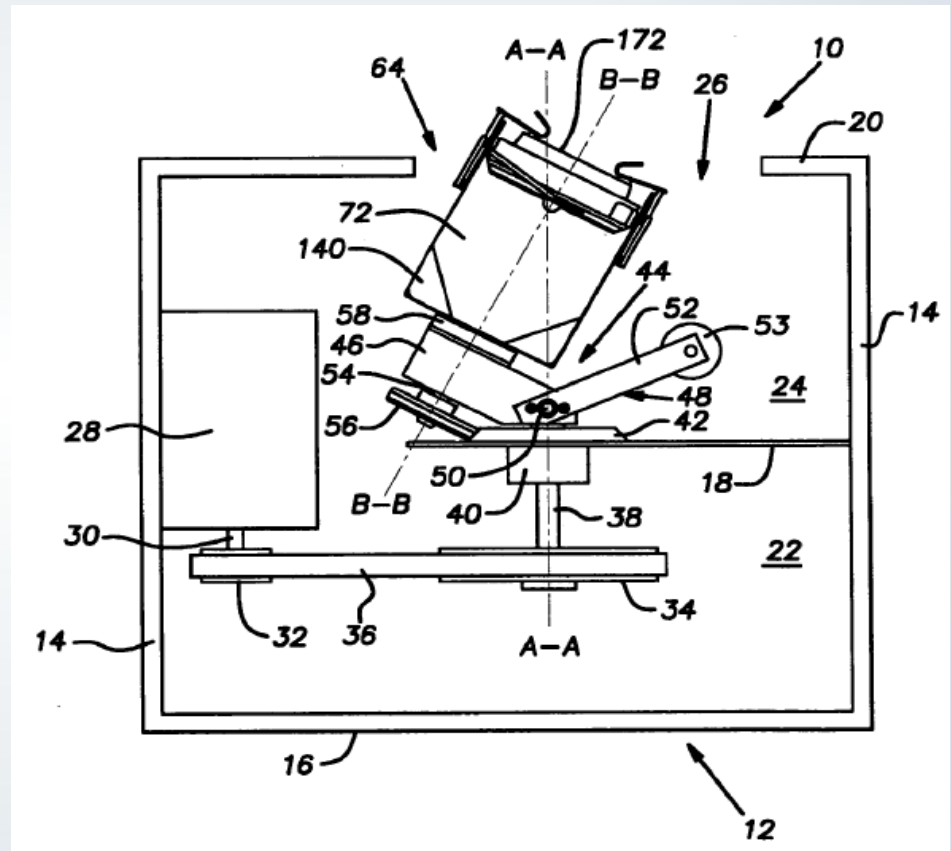
Perpendicular



Estado da Técnica → Patentes

Transmissão

Rodas de Atrito (1)*

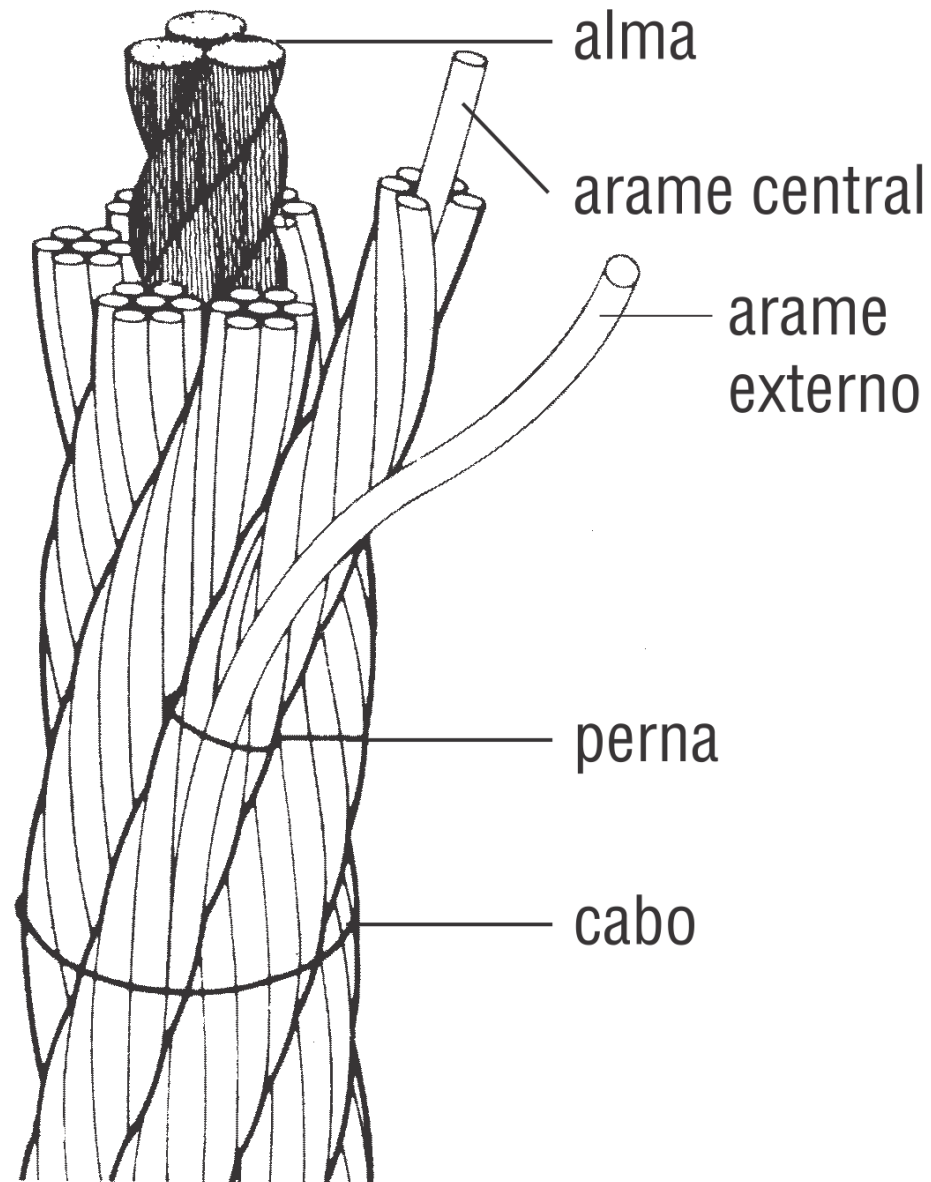


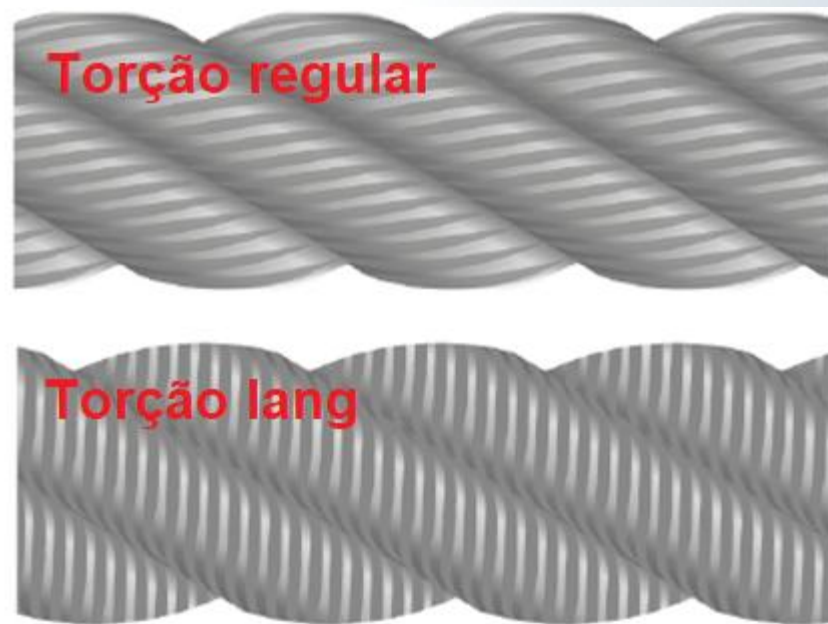
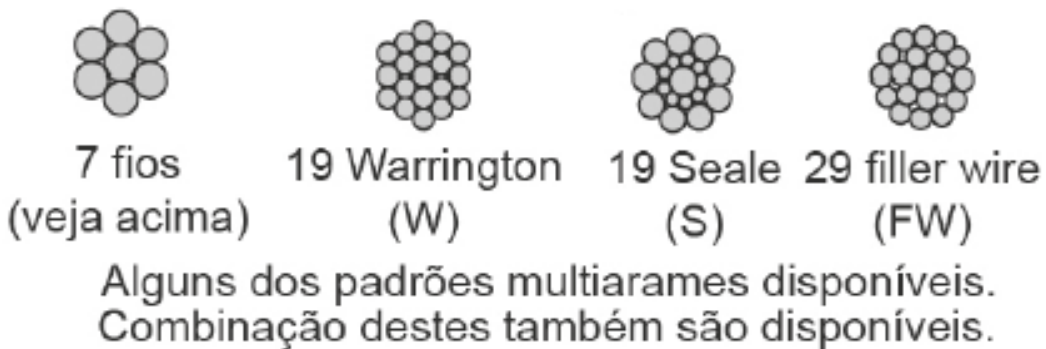
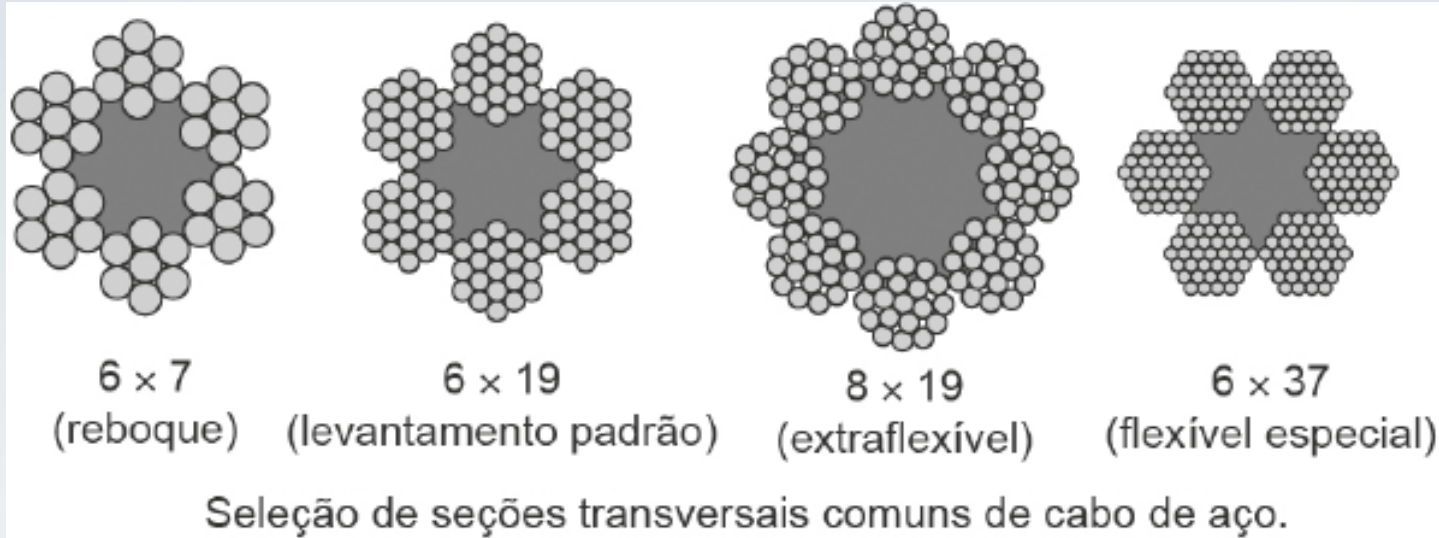
US20060256648 (Huckby, MacDonald e O'brien, 2006)

Cabos de aço

Os cabos de aço são utilizados para aplicações de elevação, reboque ou transporte no qual o cabo suporta carregamento em seu comprimento.

A flexibilidade do cabo é obtida através do uso de um grande número de arames de pequeno diâmetro torcidos em torno da alma.





Carga de ruptura dos cabos de aço

CARGA DE RUPTURA TEÓRICA

Área Metálica x Resistência dos Arames

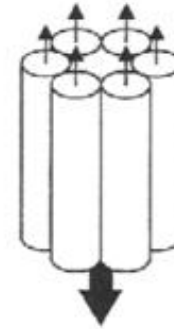
CARGA DE RUPTURA MÍNIMA EFETIVA

Carga de Ruptura Teórica x Fator de
Perda por Encabramento

$CRME = CRT \times F$ ou $CRME = Am R \text{ arames} \times F$

CARGA DE RUPTURA PRÁTICA

Carga Obtida no Ensaio de Tração



Fatores de segurança aplicados na utilização dos cabos de aço

Aplicação	Fator de segurança
Cabos e cordalhas estáticas	3 a 4
Cabos para tração no sentido horizontal (esteios)	4 a 5
Guinchos	5
Guindastes e escavadeiras	5
Laços (Lingas)	5 a 6
Pontes rolantes	6 a 8
Talhas elétricas e outras	7
Guindastes estacionários	6 a 8
Elevadores de baixas velocidades (carga)	8 a 10
Elevadores de alta velocidade (passageiros)	10 a 12

Roteiro de seleção para cabos de aço

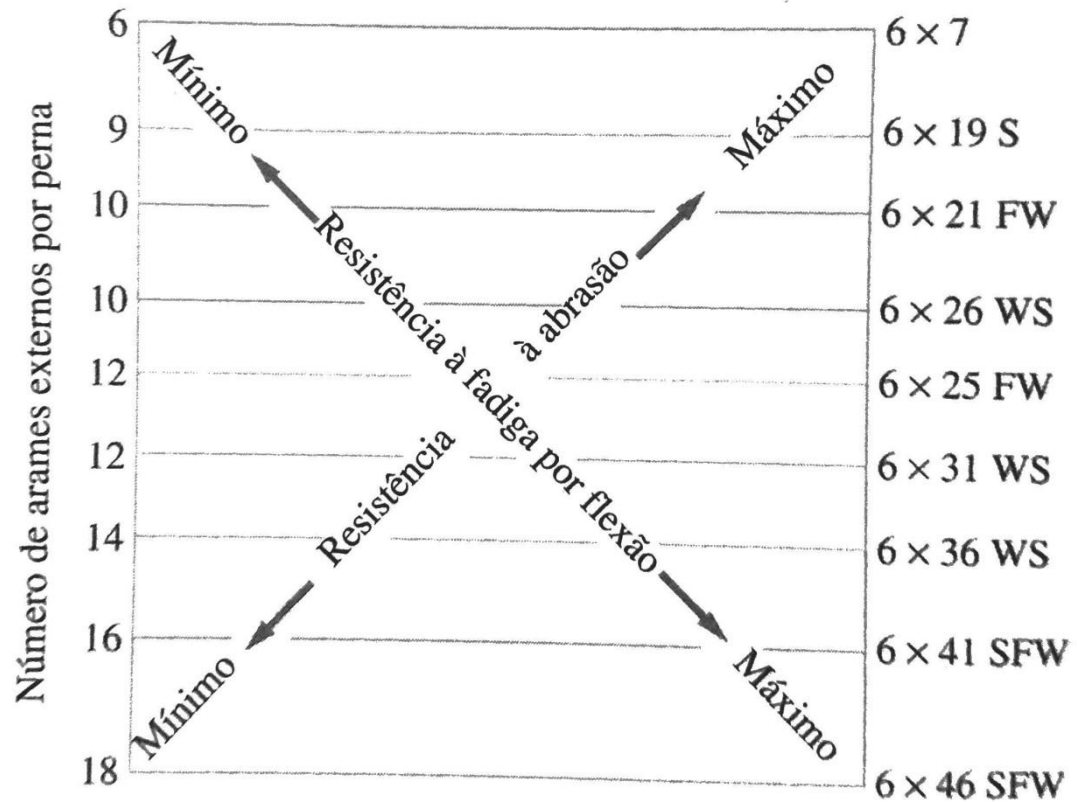
Para a seleção de um cabo de aço alguns passos devem ser seguidos; são eles:

PASSO 01 – Estabelecer especificações de projeto para uso e objective o seu projeto quanto:

- ✓ **Modo de falha;**
 - ✓ **Vida;**
 - ✓ **Segurança;**
 - ✓ **Custos.**

PASSO 02 –

- A partir do gráfico de em **X** (flexão x abrasão) selecione previamente o cabo.
- Selecione o material do cabo.
- Selecione o fator de segurança.



Designação padrão de pernas:

- S = Seale
- FW = Filler wire
- WS = Warrington seale
- SFW = Seale filler wire

PASSO 03 –

Uma vez pré selecionado o material e a classe do cabo é então determinada a bitola do cabo usando:

$$\sigma_t = \frac{T}{A_c}$$

Atente-se para não esquecer nenhuma força envolvida no carregamento. Essa bitola é denominada como: d_c

Para cargas subitamente aplicadas utiliza-se:

$$(\sigma_{m\acute{a}x})_{sub\ aplicada} = 2\sigma_t = 2\frac{T}{A_c}$$

T = resultante da força trativa no cabo

A_c = área aproximada da seção transversal metálica do cabo em função da bitola

PASSO 04 –

Uma vez determinada a bitola do cabo, deve-se determinar o diâmetro mínimo recomendado para a polia.

O diâmetro da polia provem de tabelas como a seguir e esse diâmetro é representado por: d_1

Classificação nominal		6 × 7	6 × 19	6 × 37	8 × 19
Número de pernas externas		6	6	6	8
Número de arames por perna ¹		3–14	15–26	27–49	15–26
Número máximo de arames externos ¹		9	12	18	12
Diâmetro aprox. dos arames externos ¹ , d_a , in		$d_c/9$	$d_c/13-d_c/16$	$d_c/22$	$d_c/15-d_c/19$
Materiais tipicamente disponíveis ^{2,3} (limite de resistência aprox., ksi)	Alma: (FC)	IPS (200)	I (80) T (130) IPS (200)	IPS (200)	I (80) T (130) IPS (200)
	Alma: (IWRC)	IPS (190)	IPS (190) EIPS (220) EEIPS (255)	EIPS (220) EEIPS (255)	IPS (190) EIPS (220)
Seção transversal metálica aprox. do cabo, A_c , in ²	Alma: (FC)	$0,384 d_c^2$	$0,404 d_c^2 (S)^4$	$0,427 d_c^2 (FW)^4$	$0,366 d_c^2 (W)^4$
	Alma: (IWRC)	$0,451 d_c^2$	$0,470 d_c^2 (S)^4$	$0,493 d_c^2 (FW)^4$	$0,497 d_c^2 (W)^4$
Bitolas padronizadas nominais de cabo disponíveis, d_c , in		$1/4-5/8$ de $1/16$ em $1/16$; $3/4-1 1/2$ de $1/8$ em $1/8$	$1/4-5/8$ de $1/16$ em $1/16$; $3/4-2 3/4$ de $1/8$ em $1/8$	$1/4-5/8$ de $1/16$ em $1/16$; $3/4-3 1/4$ de $1/8$ em $1/8$	$1/4-5/8$ de $1/16$ em $1/16$; $3/4-1 1/2$ de $1/8$ em $1/8$
Peso por unidade de comprimento, lbf/ft		$1,50 d_c^2$	$1,60 d_c^2$	$1,55 d_c^2$	$1,45 d_c^2$
Módulo de elasticidade aprox. para o cabo ^{3,5} , E_c , psi	0–20% de S_u	$11,7 \times 10^6$ (FC)	$10,8 \times 10^6$ (FC); $13,5 \times 10^6$ (IWRC)	$9,9 \times 10^6$ (FC); $12,6 \times 10^6$ (IWRC)	$8,1 \times 10^6$ (FC)
	21–65% de S_u	$13,0 \times 10^6$ (FC)	$12,0 \times 10^6$ (FC) $15,0 \times 10^6$ (IWRC)	$11,6 \times 10^6$ (FC) $14,0 \times 10^6$ (IWRC)	$9,0 \times 10^6$
Diâmetro mínimo recomendado para polia ou tambor, $(d_t)_{min}$, in		$42 d_c$	$34 d_c$	$18 d_c$	$26 d_c$

PASSO 05 –

Estimar a tensão de flexão dos arames externos usando:

$$\sigma_{flexão} = \frac{M c_a}{I_a} = \frac{M \left(\frac{d_a}{2} \right)}{\left(\frac{M d_1}{2 E_c} \right)} = \frac{d_a}{d_1} E_c$$

d_a = diâmetro do arame

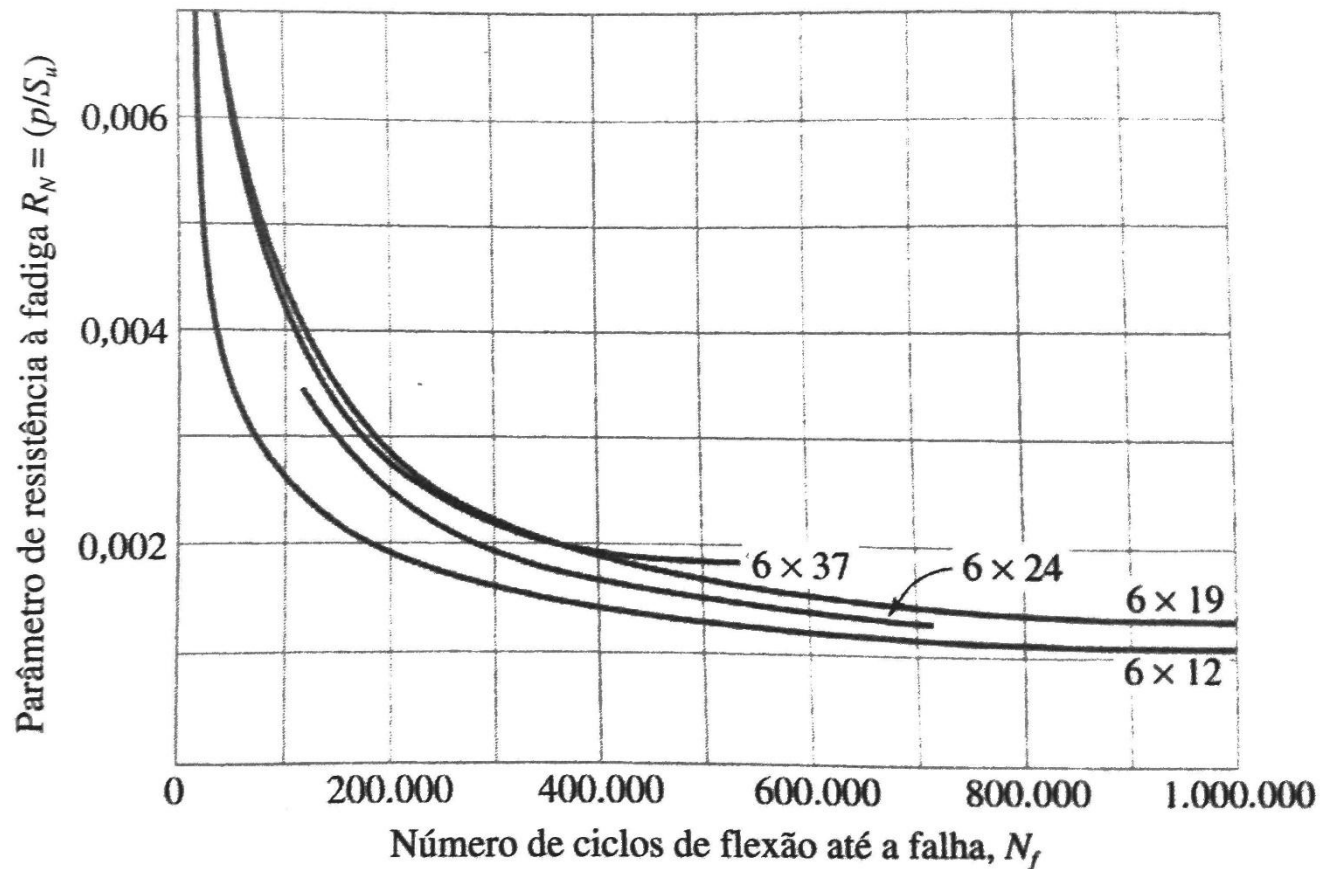
d_1 = diâmetro da polia

E_c = módulo de elasticidade do cabo

PASSO 06 –

Utilizando os requisitos de vida do projeto N_d , usar a figura abaixo para relacionar: tipo de cabo com números de ciclos até a fadiga e

até a fadiga e consequentemente encontrar o parâmetro de resistência a fadiga R_n



A partir do valor de R_n calculado e do fator de segurança obtido no passo 02 é possível então determinar a bitola necessária para o cabo baseado na fadiga.

PASSO 07 –

A partir da tabela da máxima pressão de contato admissível baseada em experiência, relacionada ao desgaste, entre cabo e tambores ou polias, de vários materiais, determina-se a pressão limite baseado ao desgaste para a classe de cabo escolhida e o material da polia ou tambor.

E é calculado o diâmetro do cabo baseado no desgaste.

PASSO 08 –

A partir dos valores de diâmetro encontrado anteriormente identifica-se a maior bitola e então é selecionada a bitola nominal padrão do cabo de aço que iguale ou que supere imediatamente esse valor.

PASSO 09 –

Refazer os cálculos utilizando esse cabo de aço padrão selecionado.

Caso seja necessário modificar a seleção.

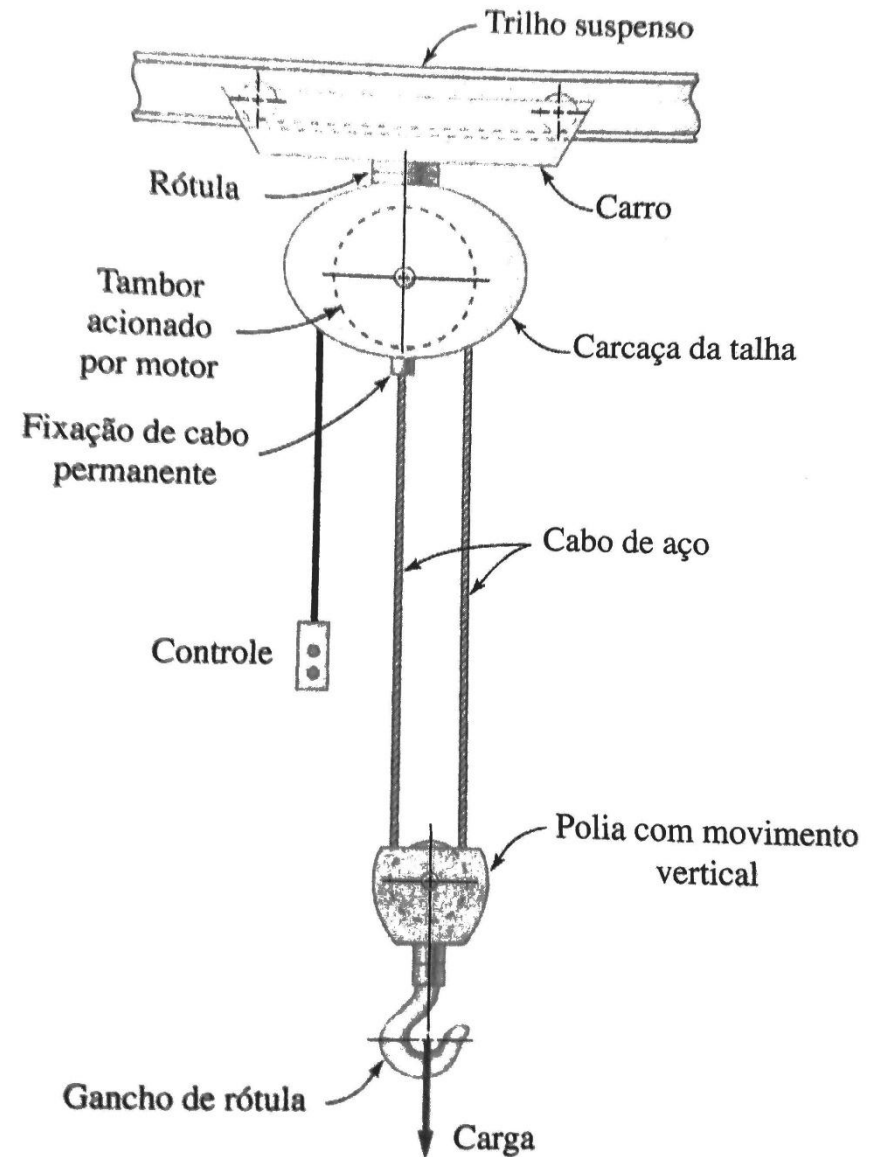
PASSO 10 –

Resuma os resultados, incluindo:

- ✓ Bitola do cabo padrão necessário;
- ✓ A construção do cabo
- ✓ Material do cabo, das polias e do tambor
- ✓ Diâmetros da polia e do tambor
- ✓ Outros requisitos especiais.

Exercício:

Um guincho para elevar **1 tonelada** deve ser projetado para operar como uma talha de baixa velocidade de levantamento de carga. Dois cabos de aço são usados para suportar a carga, que estão conectados a uma polia que se move verticalmente como um gancho de rótula, como indica a figura ao lado



A vida de projeto desejada para o cabo de aço é de **2 anos**, e aproximadamente, **15 elevações por hora** devem ser feitas, durante **8 horas por dia** e **por 250 dias por ano**, selecione o cabo de aço ideal para essa aplicação.

Ocasionalmente podem ocorrer que cargas sejam aplicadas subitamente.

Fator de segurança deve ser **5** baseado na resistência última estática.



EESC • USP

www.eesc.usp.br