

Aulas Laboratoriais - Engrenagens

Órgãos de Máquinas

Carlos Fernandes, David Gonçalves, Ramiro Martins

2023/2024

Licenciatura em Engenharia Mecânica

Hiperligação para aula

[Aula Laboratorial 1](#)

[Aula Laboratorial 2](#)

[Aula Laboratorial 3](#)

[Referências](#)

Aula Laboratorial 1

Sumário

1. Classificação das engrenagens	3
2. Processos de fabrico	6
3. Software KISSSoft	13
4. Exemplo numérico	16

Classificação das Engrenagens

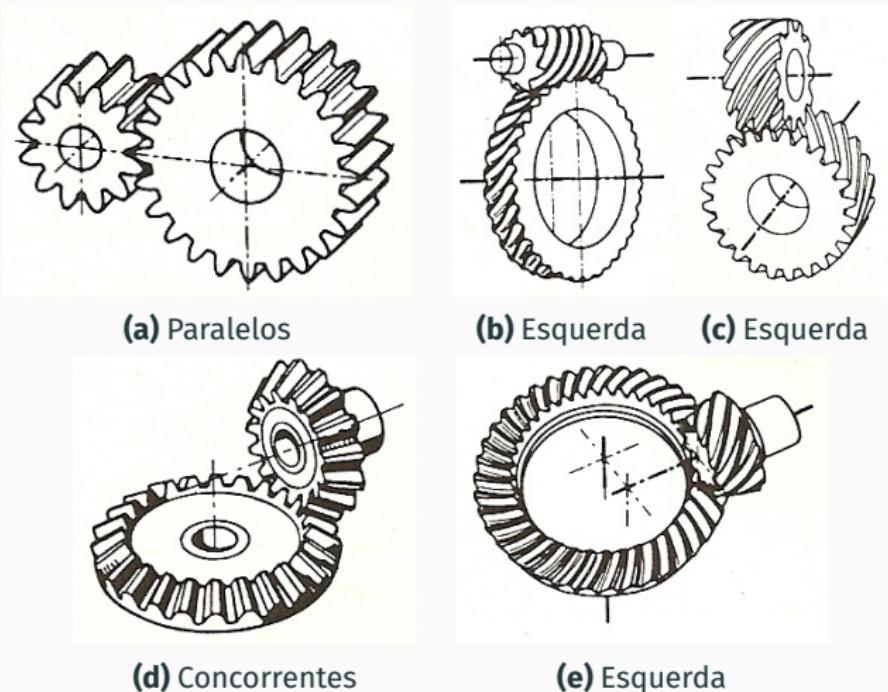


Figura 1: Classificação quanto à Posição dos Eixos [1].

Classificação das Engrenagens

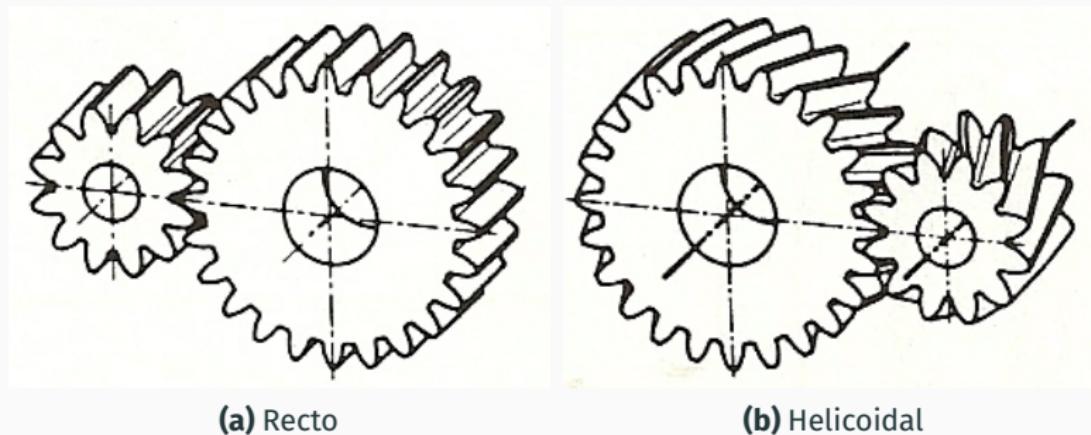
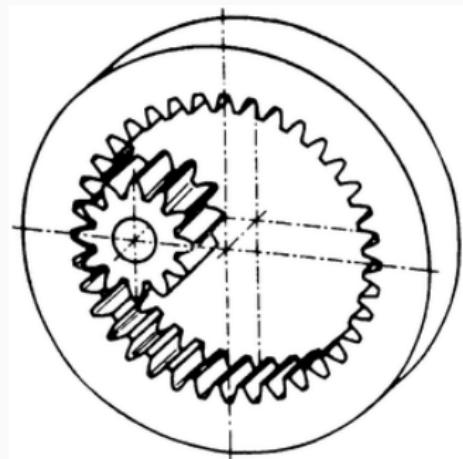
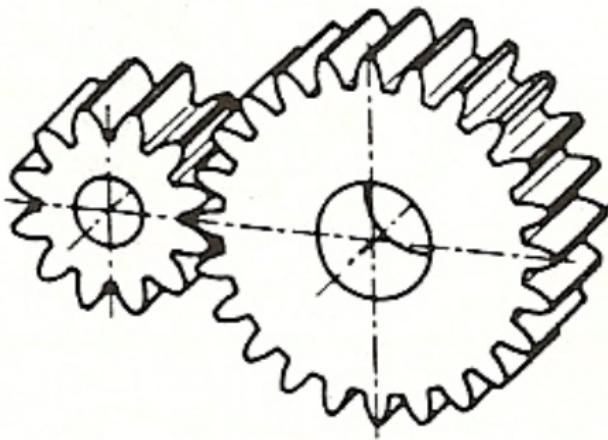


Figura 2: Classificação quanto ao Tipo de Dentado [1].

Classificação das Engrenagens



(a) Interior



(b) Exterior

Figura 3: Classificação quanto à Posição do Centro Instantâneo de Rotação [1].

Processos de corte de rodas cilíndricas

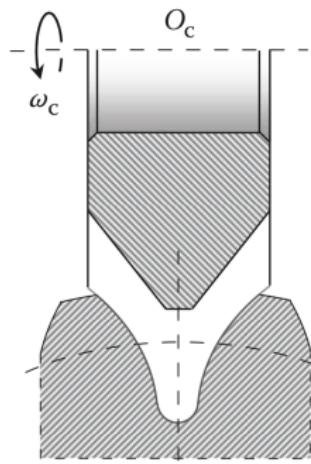
Os processos de corte de engrenagens cilíndricas dividem-se em dois métodos principais¹:

1. Talhagem por fresa de forma
(fr: fraise de forme; en: form-milling cutter)
2. Talhagem por geração (o mais comum):
 - buril-cremalheira
(fr: outil-crémaillère; en: rack-type cutter)
 - fresa mãe
(fr: fraise mère; en: hob cutter)
 - buril-pinhão
(fr: outil-crémaillère; en: pinion-type cutter)

¹Existem outros métodos/ferramentas utilizados para a obtenção de engrenagens cilíndricas em evolvente de círculo. Aqui apenas se apresentam os mais relevantes.

Talhagem por fresa de forma

É materializada por fresas de disco.



(a) Processo de talhagem



(b) Fresa de disco

Figura 4: Talhagem por fresa de forma [2].

[Vídeo](#)

Talhagem por geração – buril-cremalheira

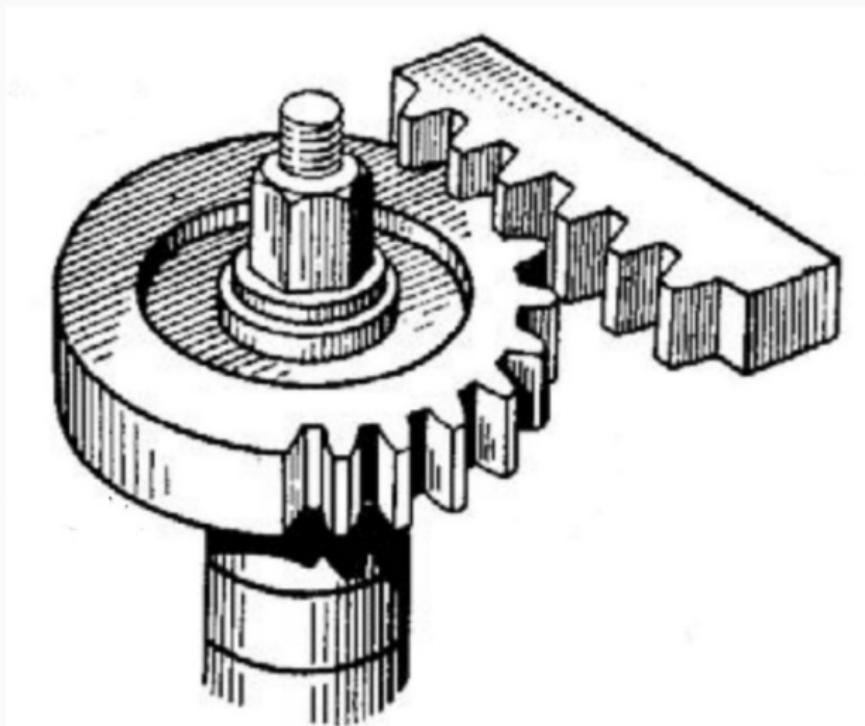


Figura 5: Processo de geração por buril-cremalheira

Talhagem por geração – buril-cremalheira

Processo MAAG:

- o eixo da roda a talhar é vertical;
- a ferramenta é accionada apenas pelo movimento de corte mortizante;
- o movimento gerador consiste:
 - numa rotação da mesa porta-peças;
 - uma translação conjugada do carro porta-peças.



Figura 6: Máquina MAAG

[Vídeo](#)

Dado que o buril-cremalheira tem um número limitado de dentes, o ciclo de corte é necessariamente descontínuo.

O software Roda2007.lsp

1. Abrir AutoCAD e selecionar “Start Drawing”;
2. Inserir o comando “upload”;
3. Selecionar o ficheiro “Roda2007.lsp” e clicar “Load” e em seguida “Close”;
4. Agora basta chamar o comando “Roda2007” e clicar “ENTER”;
5. Inserir os dados pedidos, como o seguinte exemplo:

Nº de dentes (z)	20
Módulo (m)	2 mm
Largura (b)	15 mm
Correção de dentado* (x)	0
Ângulo de pressão (α)	20°
Ângulo de hélice (β)	0°
Precisão da representação	3
Nº de Voltas	1
Vista da representação	C



Figura 7: Resultado da Geração da Roda Dentada

Talhagem por geração – fresa mãe

É materializada por fresa mãe.



(a) Processo de talhagem



(b) Fresa mãe

Figura 8: Geração de dentado por fresa mãe [2].

Vídeo

Talhagem por geração – buril-pinhão

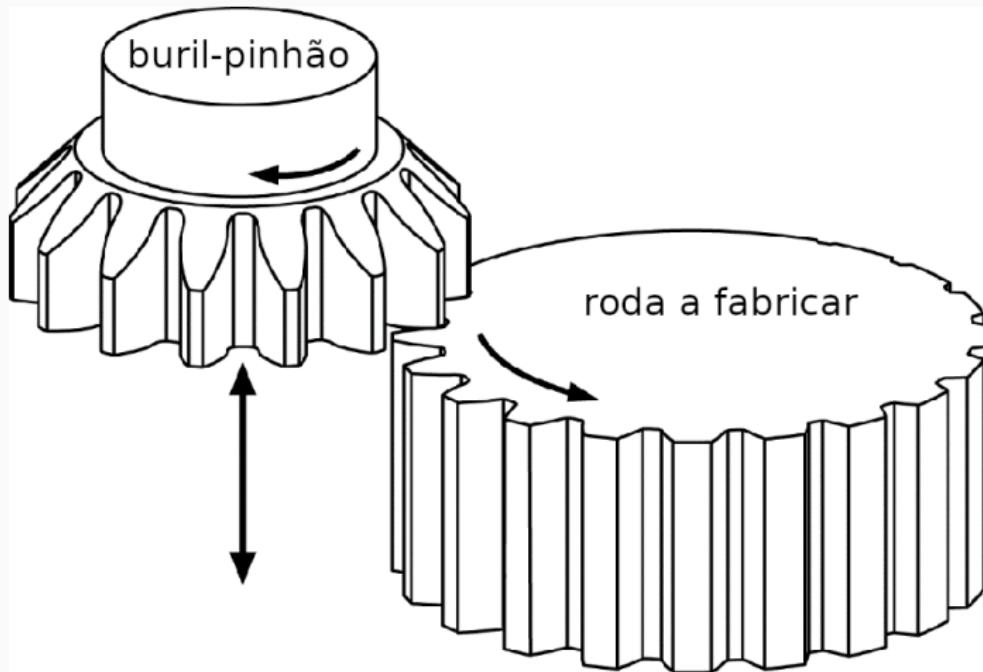


Figura 9: Geração de dentado por buril-pinhão [2].

Muito Breve Demonstração KissSoft

KissSoft: software para cálculo de órgãos de máquinas disponibilizado aos estudantes através do servidor de aplicações apps.fe.up.pt.

- engrenagens;
- veios
- rolamentos
- chumaceiras hidrodinâmicas
- molas
- parafusos
- pinos
- chavetas
- juntas soldadas e adesivas
- transmissões por polia
- sincronizadores
- embraiagens

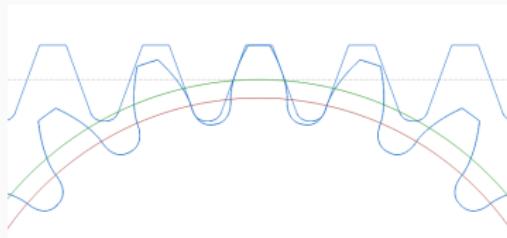


Figura 10: Cremalheira/pinhão
KissSoft

KISSSoft na FEUP

Há três formas de utilizar o **KISSSoft** sendo estudante da FEUP:

1. Nas salas de computadores do edifício B da FEUP
2. Usando o servidor de aplicações remoto apps.fe.up.pt
3. Instalação local no computador pessoal
(necessário ligação à VPN FEUP para validação da licença)

Instalação do KissSoft e KissSys

1. Mapear a unidade de rede que contém a licença:
 - Ligar-se à VPN FEUP: configuração para Windows 10
 - Mapear a unidade de rede \\software.fe.up.pt\lickissoft\ - ver como mapear uma unidade de rede
2. O executável de instalação encontra-se dentro da unidade de rede na pasta: “2fev2022\KissSoftInstall\KISSSoft-2021”
3. Instalar o software no PC
4. Quando a instalação pergunta pela licença:
 - Selecionar: “Yes, I have a license file”
 - Selecionar a unidade de rede configurada no ponto 1 e selecionar o ficheiro de licença “license261_2021”.
5. Finalizar a instalação e verificar se o programa funciona.

Exemplo numérico

Exemplo de cálculo de características geométricas de uma engrenagem normal, sem correção de dentado, com os dados da Tabela 1.

Tabela 1: Dados da Engrenagem

Z_1	38
Z_2	57
m	1.5 mm
α	20°
b	15 mm

Calcule:

1. passo e passo de base
2. raio primitivo, raio de cabeça e raio de pé
3. raio de base
4. entre-eixo normal
5. escolha k e determine W_k

Sugestão de trabalho:

Crie o pinhão e a roda da engrenagem da Tabela 1, utilizando o software “Roda2007.lsp”.

Aula Laboratorial 2

Sumário

- | | |
|---|----|
| 1. Controlo metrológico de rodas dentadas | 18 |
| 2. Engenharia inversa de uma roda dentada | 19 |

Controlo metrológico de rodas dentadas

Métodos de controlo tipicamente utilizados:

1. cota tangencial W_k sobre k dentes;
2. medição sobre calibres cilíndricos;



Figura 11: Medição da cota tangencial sobre k dentes



Figura 12: Medição sobre calibres cilíndricos

Engenharia inversa de uma roda dentada

1. Calcular o passo de base usando medições da cota tangencial sobre k dentes:
 - determinação do módulo normalizado;
2. Calcular as propriedades geométricas da roda dentada, assumindo que não há correção de dentado;
3. Medir os diâmetros de cabeça e de pé;
4. Medir a cota de controlo com calibres cilíndricos;
5. Calcular a correção de dentado (efetiva ou prática);
6. Calcular os diâmetros de cabeça e de pé (com a correção determinada em 5);
7. Comparar os valores determinados em 3 com os valores determinados em 6.

Calcular o passo de base

1. Contar o número de dentes;
2. Estabelecer o número de dentes para medição da cota tangencial sobre k dentes:

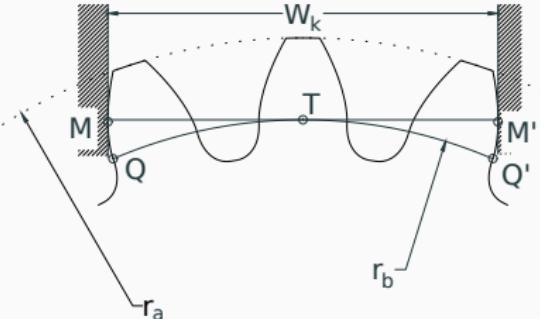
$$k = \frac{z}{\pi} \cdot \alpha_n + \frac{1}{2}$$

3. Não é conhecido o ângulo de pressão α - arbitrar.
4. Medir a cota tangencial sobre k dentes e ainda sobre $k+1$ dentes;
5. A diferença entre os dois valores $W_{k+1} - W_k$, corresponde ao passo de base da engrenagem p_b .

$$p_b = W_{k+1} - W_k = \pi \cdot m_n \cdot \cos \alpha_n$$

6. Determinar o módulo e procurar o valor normalizado mais próximo.

Demonstração da determinação do passo de base



$$W_k = \widehat{QQ'} = (k - 1) \cdot p_b + s_b$$

Para k dentes:

$$W_k = (k - 1) \cdot p_b + s_b$$

Para $k + 1$ dentes:

$$W_k = (k + 1 - 1) \cdot p_b + s_b$$

Então:

$$W_{k+1} - W_k =$$

$$k \cdot p_b + s_b - (k - 1) \cdot p_b - s_b$$

$$W_{k+1} - W_k = p_b$$

Figura 13: Cota tangencial sobre $k=3$ dentes

A equação para determinar a cota tangencial para qualquer k :

Calcular propriedades geométricas da roda dentada

Para a roda dentada de módulo m e número de dentes z , calcular as seguintes propriedades geométricas:

1. raio primitivo;
2. raio de base;
3. raio de cabeça;
4. raio de pé.

Assumir que não existe correção de dentado e que a roda dentada possui um perfil de dentado do tipo A, de acordo com a ISO 53.

Na prática, pode acontecer que o perfil de referência não seja do tipo A, e ser necessário mais iterações.

Medir o diâmetro de cabeça

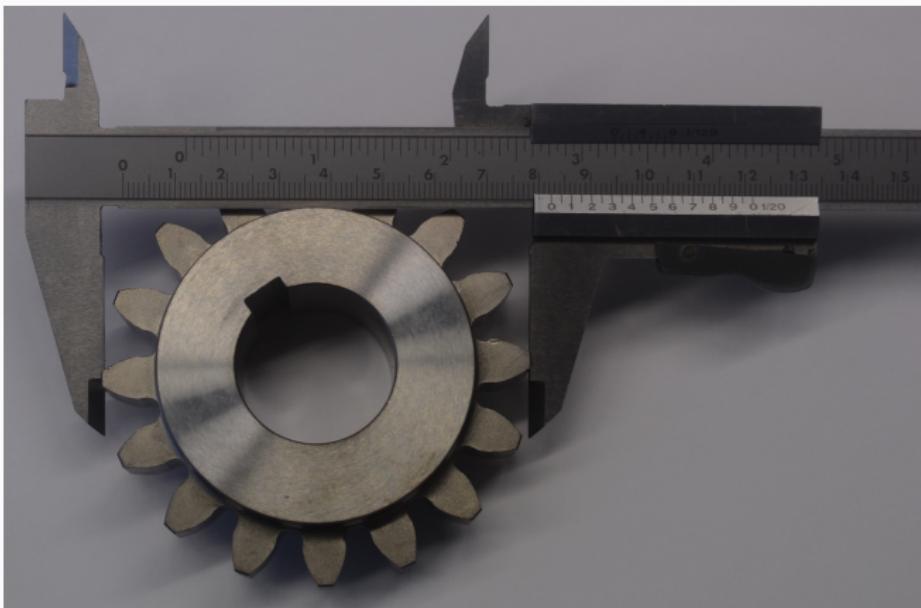


Figura 14: Medição do diâmetro de cabeça

Medir o diâmetro de pé

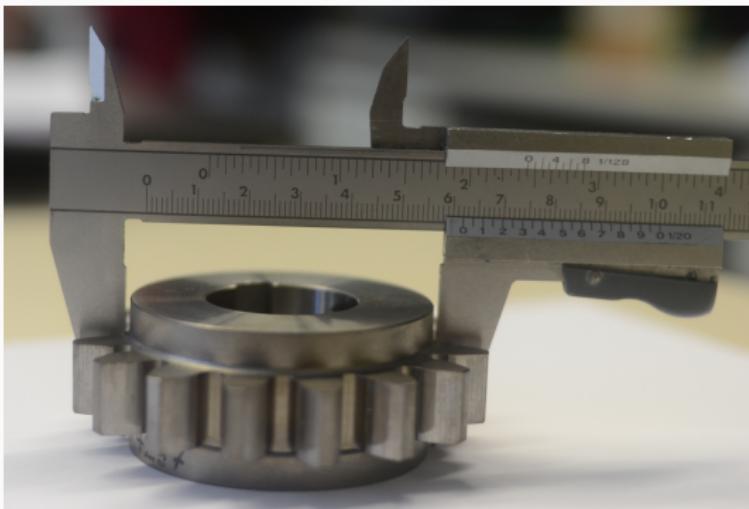


Figura 15: Medição do diâmetro de pé

Tipicamente, o raio de pé não é sujeito a uma tolerância tão apertada como o raio de cabeça. Assim é expectável que usar este elemento como referência seja menos adequado que o raio de cabeça.

Controlo com calibres cilíndricos

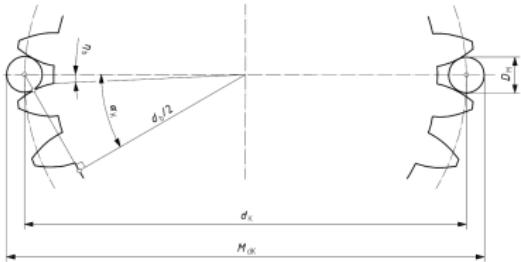


Figura 16: $M_{dk} = d_k + D_M$

Escolha do calibre cilíndrico, de acordo com o livro MAAG:

$$D_M \approx 1.8 \cdot m_n$$

Espaço entre dentes de roda dentada com correção:

$$i = \frac{\pi \cdot m_n}{2} - 2 \cdot x \cdot m_n \cdot \tan \alpha_n$$

Resolver sistema de equações e determinar x efetivo ou prático:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{inv } \alpha_n \cdot r_b + \frac{D_M}{2} = \frac{i}{2} \cdot \frac{r_b}{r} + \text{inv } \alpha_k \cdot r_b \\ \frac{d_k}{2} \cdot \cos \alpha_k = r_b \\ M_{dk} = d_k + D_M \end{array} \right.$$

Aula Laboratorial 3

Sumário

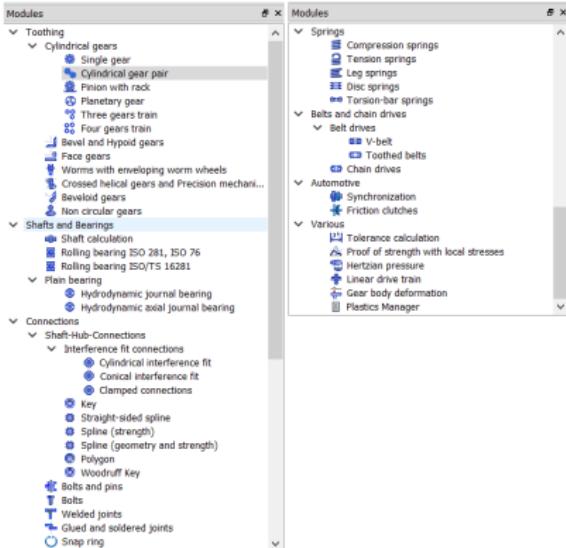
1. Introdução ao KissSoft e KissSys	27
2. Exemplo prático	29
3. Janelas de configuração do cálculo	31
4. Resultados	40
5. Ferramentas de dimensionamento adicionais	50

Ver instalação pág. 15

Software de dimensionamento
de órgãos de máquinas:

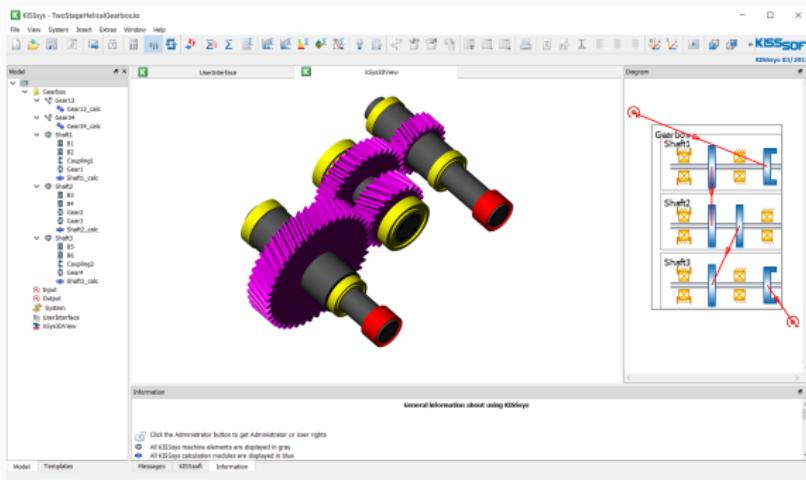
- Cálculo de acordo com procedimentos normalizados (ISO, AGMA, DIN, ...);
- Interface simples, embora enganadora quanto à complexidade do procedimento de cálculo;
- Possui excelentes bases de dados de materiais, lubrificantes, etc

- Conhecimento das normas é imprescindível para um uso adequado.



Software que permite calcular de modo integrado um mecanismo com diversos órgãos de máquinas:

- Usando os procedimentos de cálculo do KissSoft;
- Ligando os elementos com as devidas relações cinemáticas.

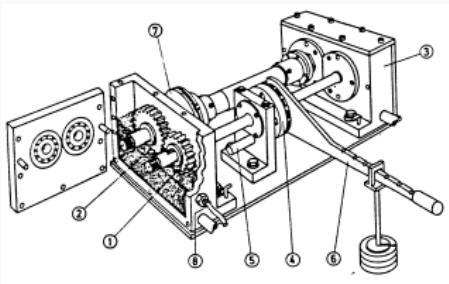


Exemplo prático em KissSoft

1. Determine a vida e os coeficientes de segurança da seguinte transmissão:

Gear type A20	Pinhão	roda
z	16	24
mn / mm		4.5
a' / mm		91.5
α / °		20
b / mm		20
x	+0.85	-0.50
da / mm	88.68	112.50
Ra / μm		0.35
Perfil		Perfil A

Acionamento	roda
Binário / N m	400
Velocidade / rpm	2000
Material	18CrNiMo7
Lubrificante	ISO VG 150
Aplicação	máquina de ensaio
Norma	DIN 3990



2. Melhorar a engrenagem minimizando a velocidade de escorregamento

Introdução ao KissSoft

Interface para cálculo de engrenagens “Cylindrical gear pair”

Basic data Reference profile Tolerances Rating Factors

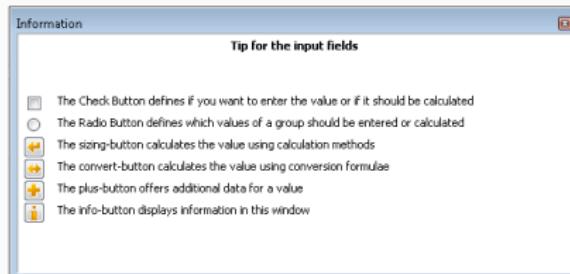
Geometry

Normal module	m_n	1.0000	mm		Gear 1	Gear 2		
Pressure angle at normal section	α_n	20.0000	°		Number of teeth	z_1	0	0
Gear 1	spur gear				Facewidth	b	0.0000	0.0000 mm
Helix angle at reference circle	β	0.0000	°		Profile shift coefficient	x^*	0.0000	0.0000
Center distance	a	0.0000	mm		Quality (ISO 1328:1995)	Q	6	6

Material and lubrication

Gear 1	18CrNiMo7-6, Case-carburized steel, case-hardened, ISO 6336-5 Figure 9/10 (MQ), Core hardness >=25HRC Jominy J=12mm<HRC28		
Gear 2	18CrNiMo7-6, Case-carburized steel, case-hardened, ISO 6336-5 Figure 9/10 (MQ), Core hardness >=25HRC Jominy J=12mm<HRC28		
Lubrication	Oil: ISO-VG 220		

Informação sobre símbolos no kissSoft



Janelas de configuração do cálculo

Janelas existentes no módulo de cálculo de engrenagens
“Cylindrical gear pair”:

1. Basic data: inserir a informação geométrica básica
2. Reference profile: escolha do perfil de referência e processo de fabrico
3. Tolerances: escolha das tolerâncias de fabrico
4. Rating: cálculo da capacidade carga (desativada por defeito)
5. Factors: definição de fatores de funcionamento relevantes para o cálculo da capacidade carga

1. Basic data

Basic data	Reference profile	Tolerances	Rating	Factors
Geometry				
Normal module m_n	1.0000 mm			Gear 1 Gear 2 Details...
Pressure angle at normal section α_n	20.0000 °			Number of teeth z 0 0
Gear 1	spur gear			Facewidth b 0.0000 0.0000 mm
Helix angle at reference circle β	0.0000 °			Profile shift coefficient x' 0.0000 0.0000
Center distance a	0.0000 mm	<input checked="" type="checkbox"/>		Quality (ISO 1328:1995) Q 6 6
Material and lubrication				
Gear 1	18CrNiMo7-6, Case-carburized steel, case-hardened, ISO 6336-5 Figure 9/10 (MQ), Core hardness >=25HRC Jominy J=12mm<HRC28			
Gear 2	18CrNiMo7-6, Case-carburized steel, case-hardened, ISO 6336-5 Figure 9/10 (MQ), Core hardness >=25HRC Jominy J=12mm<HRC28			
Lubrication	Oil: ISO-VG 220			Oil bath lubrication

- Dados base da geometria
- Bases de dados de:
 - Materiais e tratamentos térmicos;
 - Lubrificantes.

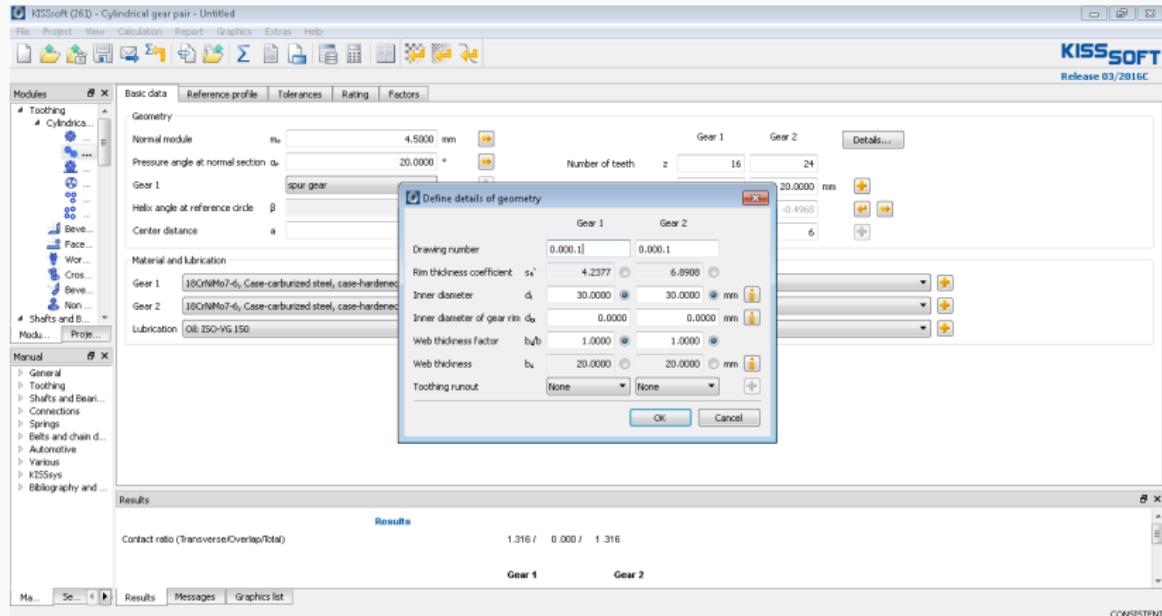
1. Basic data

The screenshot shows the KISSsoft software interface for calculating cylindrical gear pairs. The main window displays various gear types in the 'Modules' tree, with 'Cylindrical gears' and 'Cylindrical gear pair' selected. The 'Basic data' tab is active, showing input fields for Normal module ($m_n = 4.5000$ mm), Pressure angle at normal section ($\alpha_n = 20.0000^\circ$), Gear 1 (spur gear), Helix angle at reference circle ($\beta = 0.0000^\circ$), Center distance ($a = 91.5000$ mm), Number of teeth ($z_1 = 16$, $z_2 = 24$), Facewidth ($b = 20.0000$ mm), Profile shift coefficient ($x^* = 0.0000$), and Quality (ISO 1328:1995 Q6). Material and lubrication details are also listed. A modal dialog box titled 'Sizing of profile shift coefficient' is open, showing tables for Gear 1 and Gear 2 under different criteria. The dialog includes buttons for 'OK' and 'Cancel'. The bottom status bar indicates 'INCONSISTENT'.

Profile shift coefficient	Gear 1	Gear 2
For optimal specific sliding	0.3032	0.0500
For minimum sliding velocity	0.1799	0.1772
Minimum Gear 1 (geometrical boundaries)	0.0641	0.2890
Maximum Gear 1 (geometrical boundaries)	0.7569	-0.4038
For undercut boundary per gear	0.0641	-0.4038
For minimum topload per gear	0.7962	1.1022

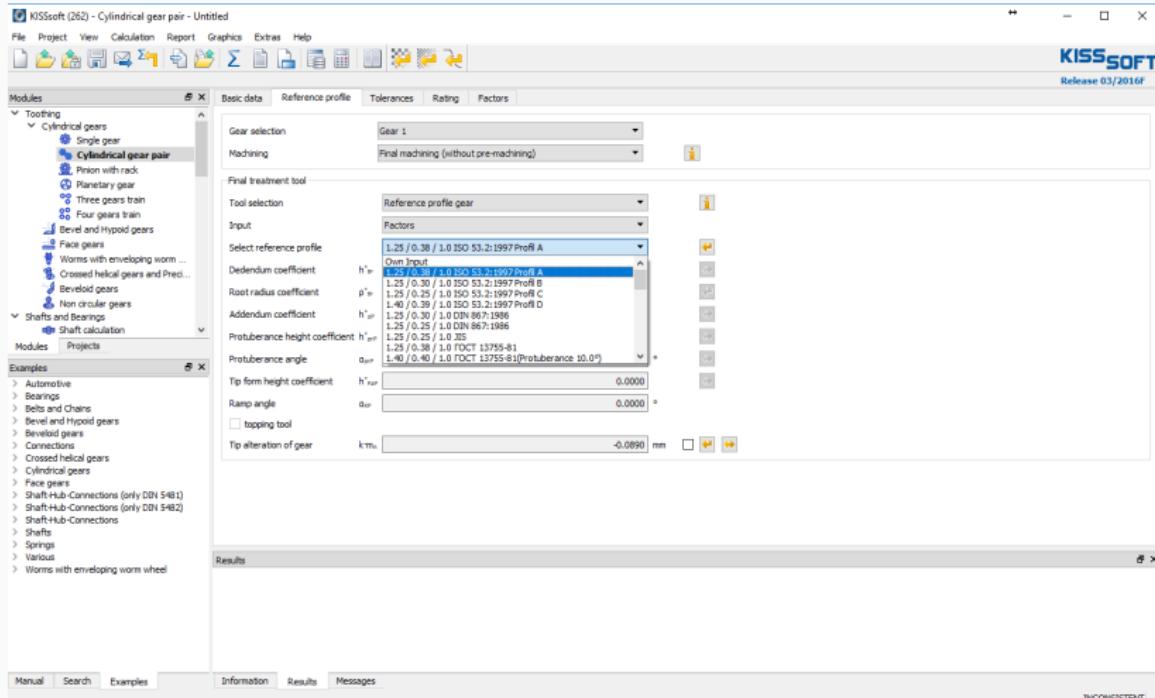
- Menu de escolha da correção do dentado para diversos critérios

1. Basic data



- Dimensões do veio
- Características da alma / anel postiço (engrenagens de aro)

2. Reference profile



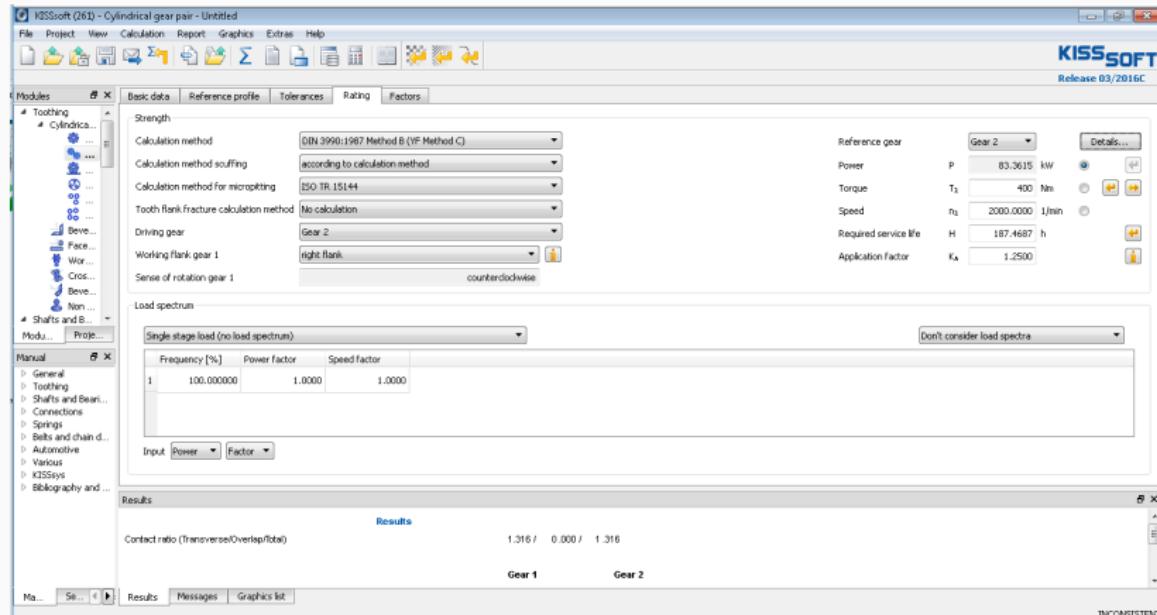
- Escolha do perfil de dentado e do processo de fabrico
- Fator de redução de *addendum*

3. Tolerances

Basic data		Reference profile		Tolerances	Rating	Factors
Allowances						
Gear 1						
Tooth thickness tolerance	DIN 3967 cd25					
Tooth thickness allowance (upper/lower)	A _{sh}	-0.0700	-0.1100	mm	<input checked="" type="radio"/>	
Base tangent length allowance (upper/lower)	A _{sh}	-0.0658	-0.1034	mm	<input type="radio"/>	
Normal backlash (upper/lower)	j _h	0.0658	0.1034	mm	<input type="radio"/>	
Circumferential backlash (upper/lower)	j _c	0.0700	0.1100	mm	<input type="radio"/>	
Tip diameter allowance (upper/lower)	A _{dh}	0.0000	-0.0100	mm	<input checked="" type="checkbox"/>	
Root diameter allowance (upper/lower)	A _{dr}	-0.1923	-0.3022	mm	<input type="checkbox"/>	
Number of teeth spanned	k ₁	3		<input type="checkbox"/>		
Diameter of ball/pin	D _{H1}	10.0000		mm	<input type="checkbox"/>	
Gear 2						
Tooth thickness tolerance	DIN 3967 cd25					
Tooth thickness allowance (upper/lower)	A _{sh}	-0.0700	-0.1100	mm	<input checked="" type="radio"/>	
Base tangent length allowance (upper/lower)	A _{sh}	-0.0658	-0.1034	mm	<input type="radio"/>	
Normal backlash (upper/lower)	j _h	0.0658	0.1034	mm	<input type="radio"/>	
Circumferential backlash (upper/lower)	j _c	0.0700	0.1100	mm	<input type="radio"/>	
Tip diameter allowance (upper/lower)	A _{dh}	0.0000	-0.0100	mm	<input checked="" type="checkbox"/>	
Root diameter allowance (upper/lower)	A _{dr}	-0.1923	-0.3022	mm	<input type="checkbox"/>	
Number of teeth spanned	k ₂	3		<input type="checkbox"/>		
Diameter of ball/pin	D _{H2}	8.0000		mm	<input type="checkbox"/>	
Center distance						
Center distance tolerance	ISO 286:2010 Measure js7					
Center distance allowance (upper/lower)	A _{z2}	0.0175	-0.0175	mm		
Tolerance field for tooth form calculation						
Diameter	Mean value					
Tooth thickness	Mean value					

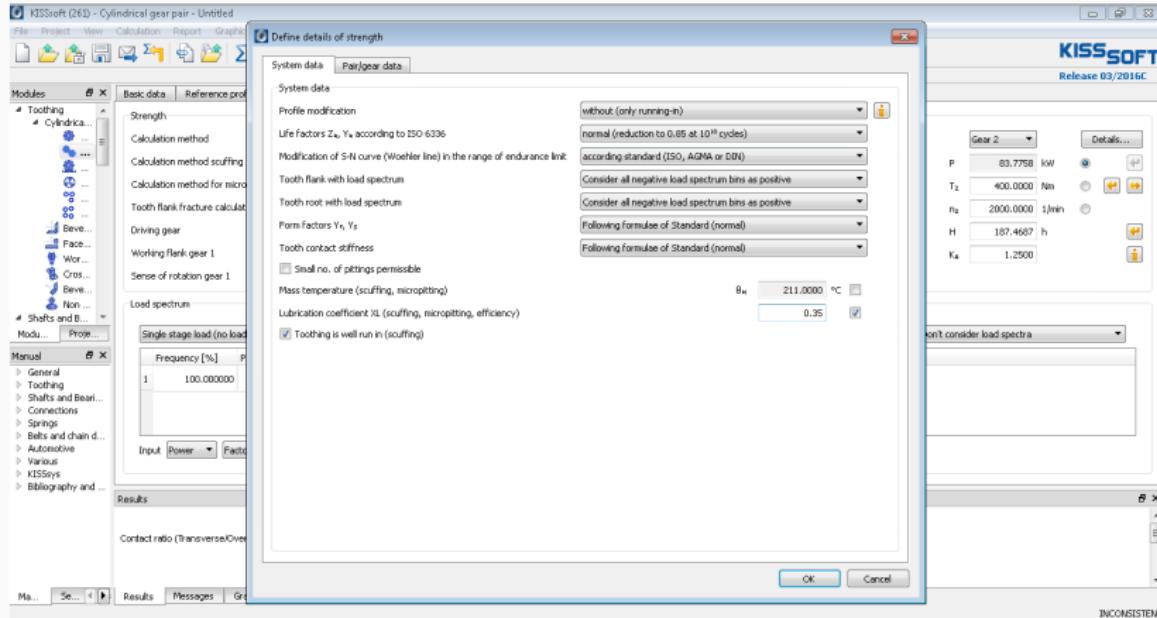
- Escolha das tolerâncias do dentado e do entre-eixo
- Cota tangencial sobre k dentes

4. Rating



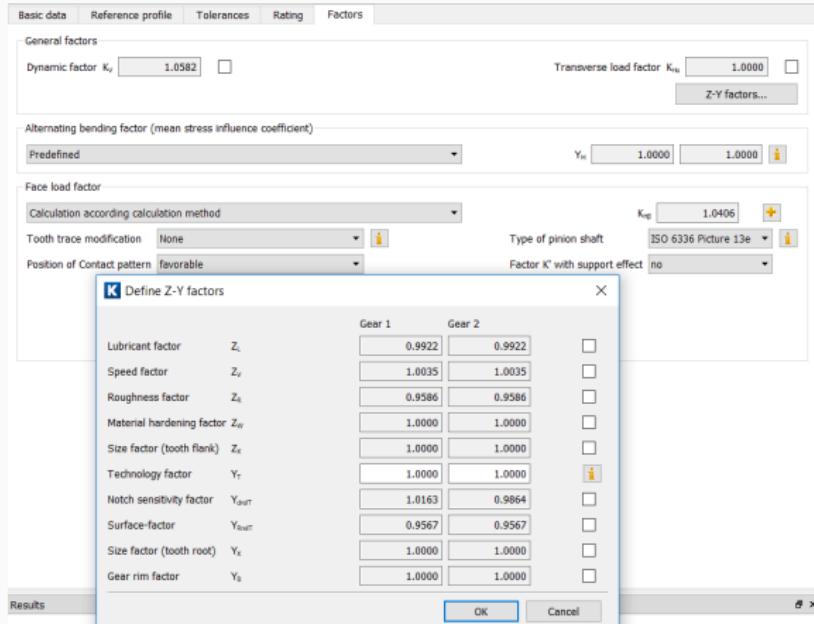
- Dimensionamento, input de potência/binário/velocidade/vida
- Escolha do método de cálculo (ISO 6336)
- Fator de aplicação de carga K_A
- Cálculo usando espectro de cargas

4. Rating



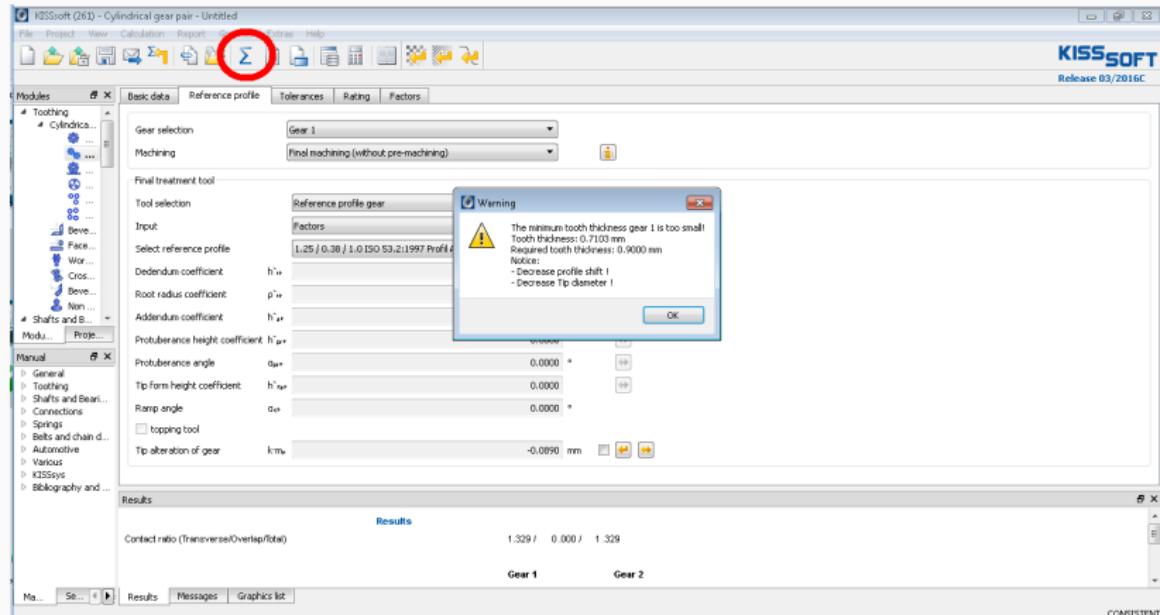
- Outras características do fabrico/funcionamento
- Fator de correção do lubrificante XL - correção do atrito com base em dados experimentais

5. Factors



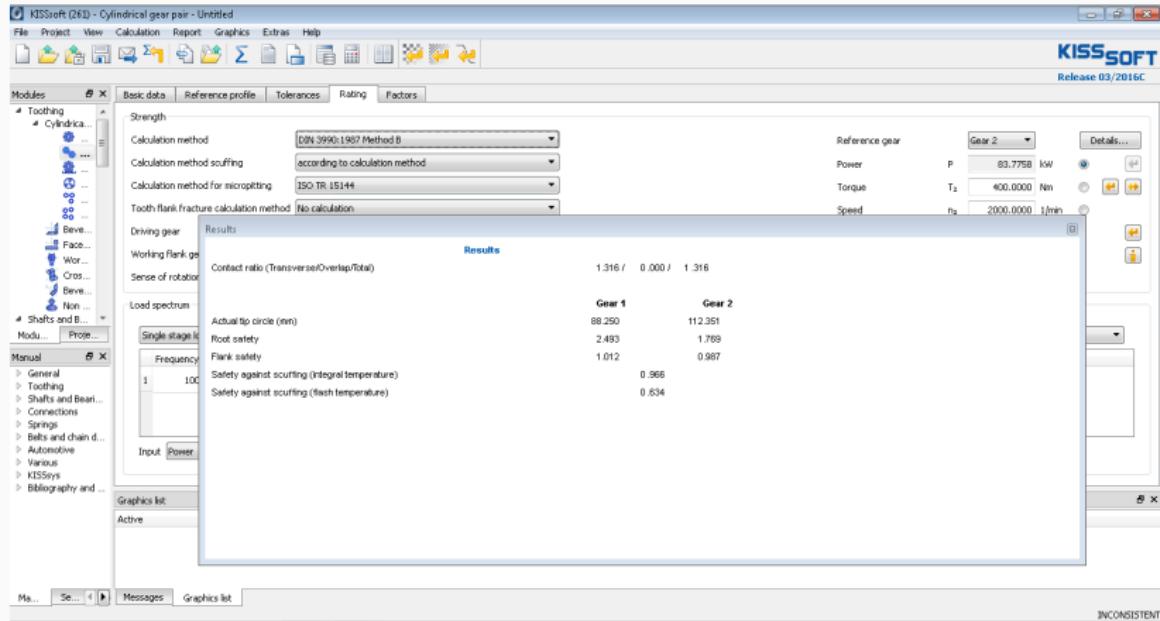
- Outros fatores de influência de acordo com os métodos de cálculo escolhidos na janela “Rating”

Resultados



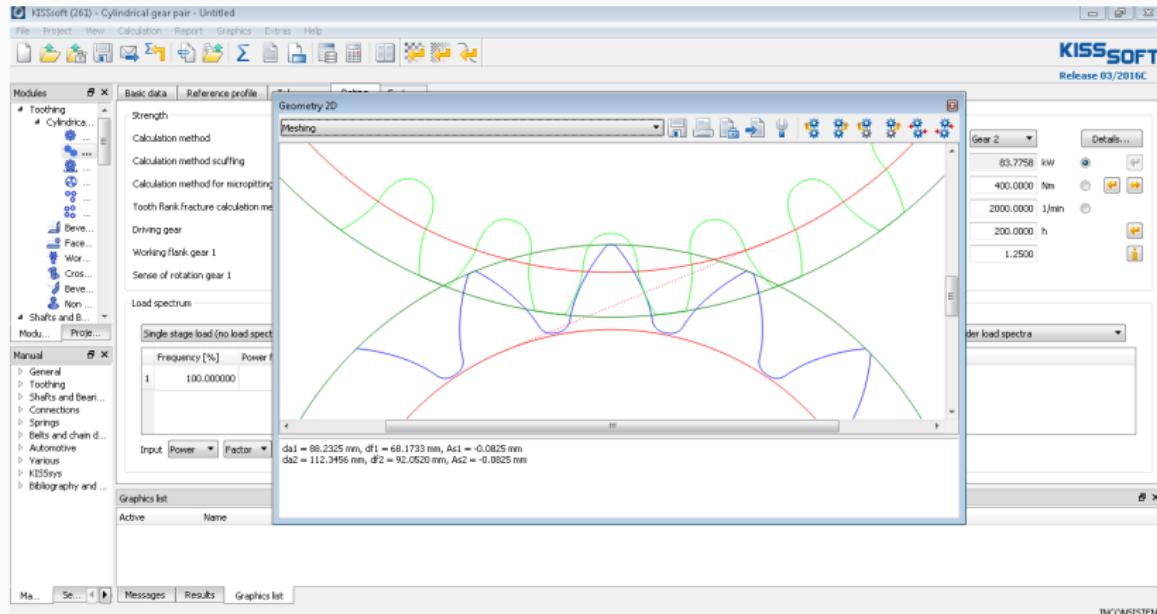
- Resultados do cálculo e eventuais mensagens de erro ou aviso
- Coeficiente de segurança base

Resultados: resumo



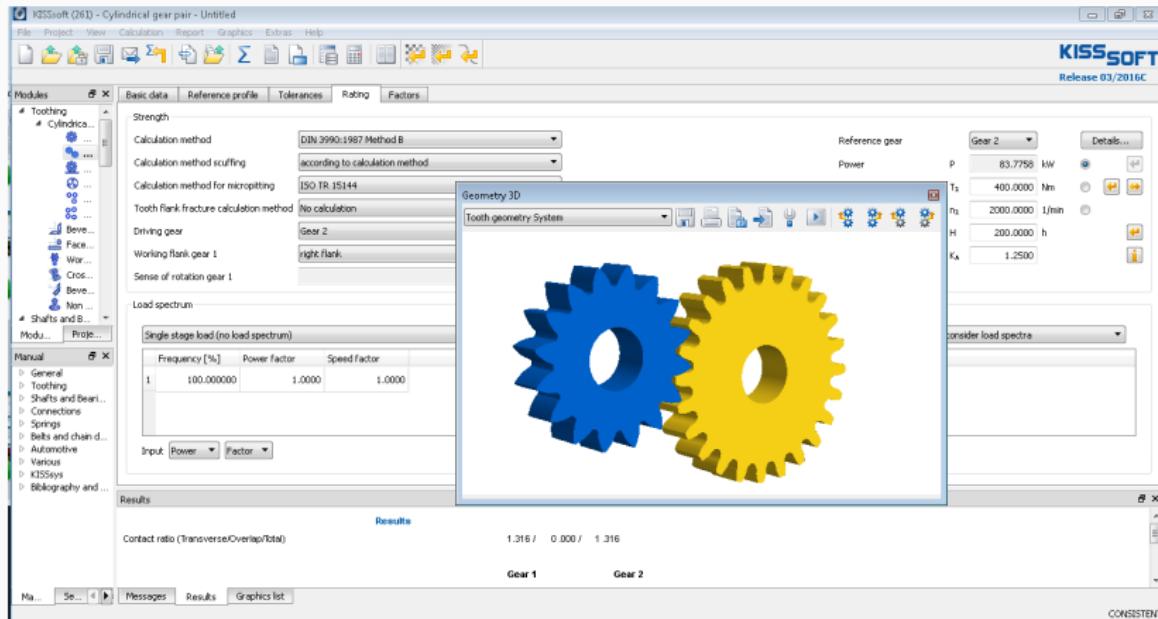
- Razão de condução / suplementar / total
- Coeficientes de segurança principais em relação à vida pré-definida

Resultados: geometria 2D



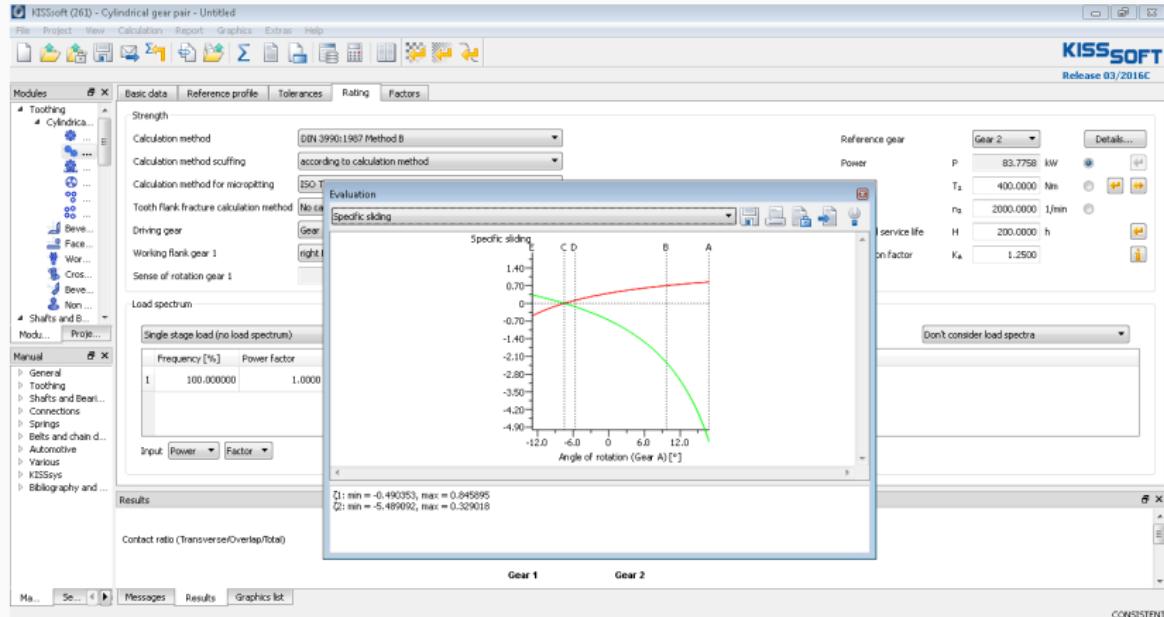
- Outputs de geometria vários no menu “Graphics”
- 2D (exportação para “.dxf”)

Resultados: geometria 3D



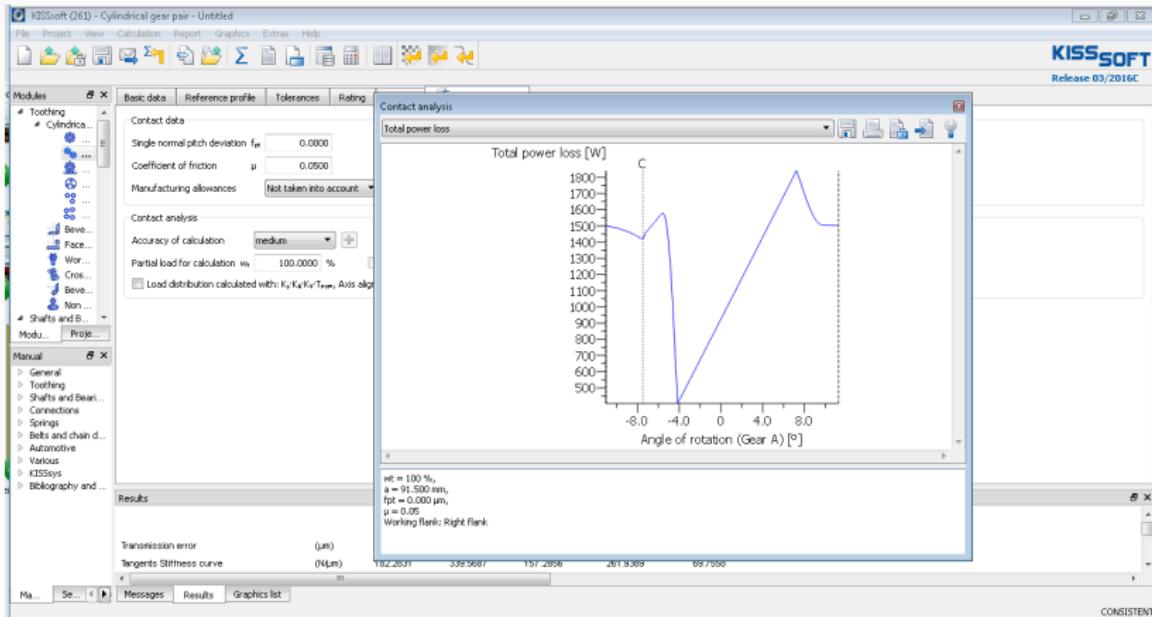
- Outputs de geometria vários no menu “Graphics”
- 3D (exportação para step)

Resultados: escorregamento específico



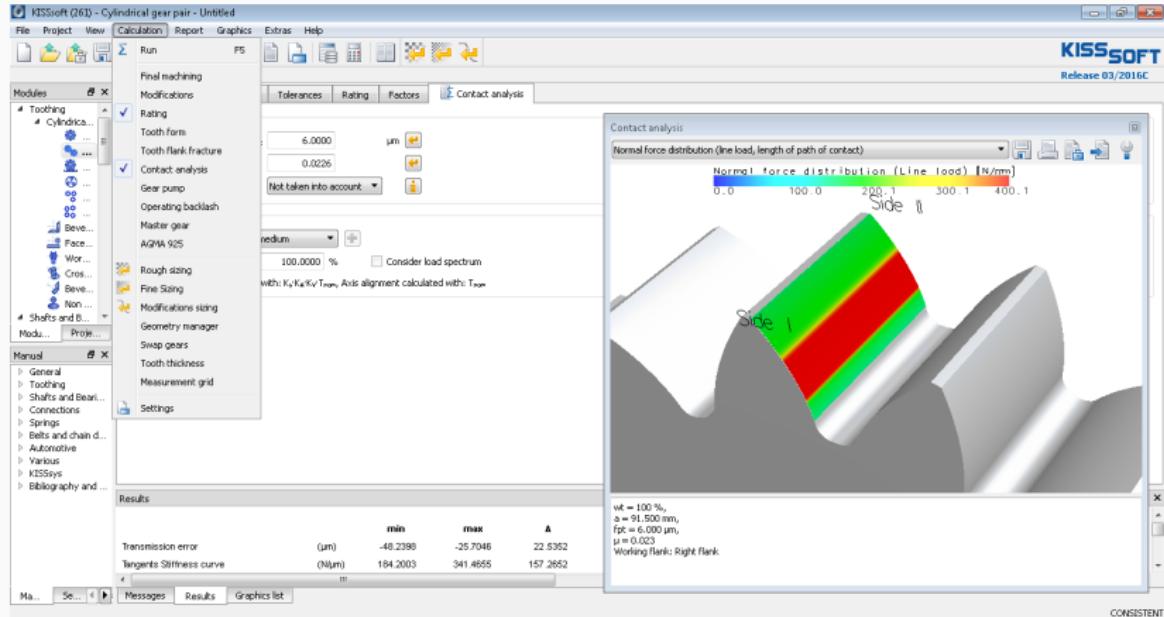
- Outputs de geometria vários no menu “Graphics”
- Escorregamento específico

Resultados: perda de potência



- Outputs de geometria vários no menu “Graphics”
- Perda de potência total

Resultados: força normal



- Módulo avançado de análise do contacto entre os dentes: "Contact analysis"
- Representação 3D da força normal ao flanco

Resultados: geração de relatório

The screenshot shows the KISSsoft software interface with the title "KISSsoft (261) - Cylindrical gear pair - Untitled". The menu bar includes File, Project, View, Calculation, Report, Graphics, Extras, and Help. The top right corner displays "KISSSOFT Release 03/2016c". The left sidebar lists modules: Tooothing, Cylindrical, Bevel, Face, Worm, Cross, Bevel, Non, Shafts and B..., Modu..., Proj..., Manual, General, Tooothing, Shafts and Bearin..., Connections, Springs, Belts and chain d..., Alternative, Various, KISSsys, and Bibliography and ...

The main workspace displays a table of calculated parameters:

	[mm]	[m]	[N]	[m/s]
Diameter of single contact point D (mm)	16.495	70.629	70.611	107.190
Diameter of single contact point D (nm)	70.629	76.431	76.508	112.951
Addendum contact ratio	[eps]	0.711	0.713	0.709
Minimal length of contact line (mm)	[Lmin]	0.711	0.713	0.709
Transverse contact ratio	[eps_a]	1.423		
Transverse contact ratio with allowances	[eps_a,elmt]	1.426	1.421	1.416
Overlap ratio	[eps_B]	0.000		
Total contact ratio	[eps_SL]	1.423		
Total contact ratio with allowances	[eps_gelmt]	1.426	1.421	1.416

2. FACTORS OF GENERAL INFLUENCE

	OEAR 1	OEAR 2
Nominal circum. force at pitch circle (N)	[Fp]	7407.4
Axial force (N)	[Fa]	0.0
Radial force (N)	[Fr]	2696.1
Nominal force (N)	[Fnom]	7892.5
Nominal circumferential force per mm (N/mm)	[Fv]	370.37
Only as information: Forces at operating pitch circle		
Nominal circumferential force (N)	[Fop]	7286.0
Axial force (N)	[Fao]	0.0
Radial force (N)	[Foro]	3008.8
Circumferential speed reference circle (m/s)	[V]	11.31
Circumferential speed operating pitch circle (m/s)	[Vop]	11.50
Running-in value (μm)	[yf]	0.7
Runout value (μm)	[uf]	0.8

At the bottom, there are buttons for Ma..., Se..., Messages, Graphics list, and a status bar indicating "CONSISTENT".

- Geração de relatório com todas as variáveis geométricas, do material, dimensões, fatores de influência, verificação da flexão no pé de dente, pressão superficial, gripagem, micropitting, etc...

Discussão do exemplo prático

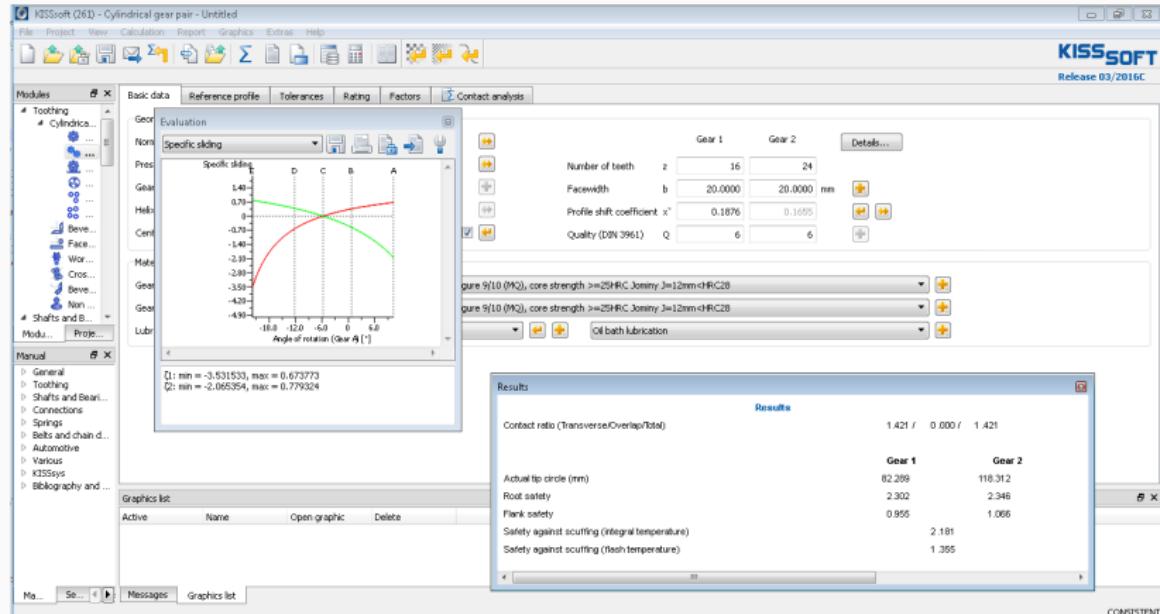
1. Qual a avaria mais provável? Porquê?

Engrenagem tipo A



2. Melhorar a engrenagem igualando os escorregamentos específicos

Escorregamentos específicos

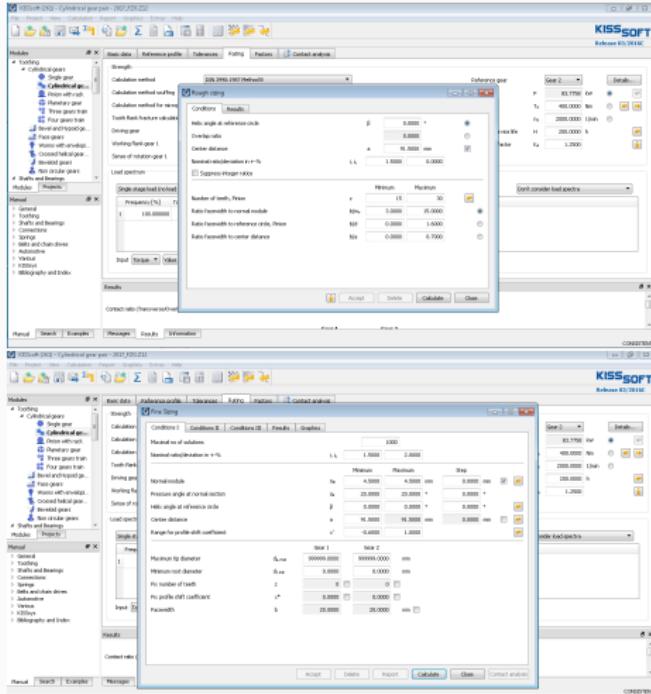
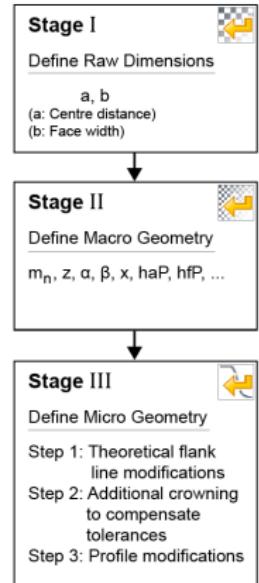


- Correcção de dentado para igualar escorregamentos específicos:
 - Coeficiente de segurança à gripagem aumenta
 - Fadiga no flanco passa a ser o fator limitativo

Ferramentas de dimensionamento adicionais

“Rough sizing” e “Fine Sizing”

Layout process of a gear set



Referências

Referências i

- [1] DIN 3998-1: *Denominations on Gears and Gear Pairs: General Definitions.*
1976.
- [2] Radzevich, Stephen P.: *Gear Cutting Tools: Science and Engineering.*
CRC Press, Boca Raton, 2^a edição, 2017, ISBN 9781119130536.