

Matheus Castro Bachega

Desenvolvimento de um Software para Auxílio no Projeto e Análise de Elementos de Máquinas

Macaé

2017

Matheus Castro Bachega

Desenvolvimento de um Software para Auxílio no Projeto e Análise de Elementos de Máquinas

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, campus Macaé, como parte das exigências finais para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Engenharia Mecânica

Orientador: Raquel Jahara Lobosco

Macaé

2017

Matheus Castro Bachega

Desenvolvimento de um Software para Auxílio no Projeto e Análise de Elementos de Máquinas/ Matheus Castro Bachega. – Macaé, 2017-
65 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Raquel Jahara Lobosco

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Rio de Janeiro
Engenharia Mecânica , 2017.

1. Engrenagens. 2. Software. 2. Molas. I. Raquel Jahara Lobosco. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro. III. Engenharia Mecânica. IV. Desenvolvimento de um Software para Auxílio no Projeto e Análise de Elementos de Máquinas

Matheus Castro Bachega

Desenvolvimento de um Software para Auxílio no Projeto e Análise de Elementos de Máquinas

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, campus Macaé, como parte das exigências finais para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Trabalho aprovado. Macaé, 14 de Dezembro de 2017:

Raquel Jahara Lobosco
Orientadora

Maurício Aguilar Nepomuceno de Oliveira
Convidado 1

Janaína Gomide
Convidado 2

Macaé
2017

*Este trabalho é dedicado aos meus pais Rosangela e Luciano
cujo apoio tornou possível tudo que fui capaz de realizar.*

Agradecimentos

Grandes agradecimentos à Universidade Federal do Rio de Janeiro, campus Macaé pelo apoio, espaço cedido e grandes docentes, ao José Carlos Macoratti pela grande ajuda na programação e a todos que de alguma forma contribuíram para este trabalho.

Agradecimentos especiais para Raquel Lobosco cuja orientação foi de extrema importância para a realização deste trabalho e à toda comunidade que compartilha informações valiosas que formam os pilares do conhecimento.

*"A imaginação é mais importante que o conhecimento.
(Albert Einstein)*

Resumo

O processo de dimensionamento e análise de elementos de máquinas pode ser assistido pelo uso de computadores. Softwares específicos para essa finalidade são de difícil acesso e pouco difundidos pela comunidade. Este trabalho estuda o desenvolvimento de um software rápido e eficaz no auxílio de projetos de engrenagens e molas. A plataforma dispõe de uma interface gráfica intuitiva, permitindo ao usuário visualizar a geometria da peça e exportá-la no formato STL. Além disso, o software possui rotinas automáticas para a seleção ótima de engrenagens. Por fim, relatórios técnicos e arquivos binários são gerados como forma de armazenar as informações obtidas. A validação do software é feita através de estudos de caso comumente encontrados na rotina do projetista. A aplicação é gratuita e de código-fonte aberto para toda comunidade.

Palavras-chave: Engrenagens, Molas, Software, Interface Gráfica.

Abstract

The process of sizing and analyzing machine elements can be assisted by the use of computers. Specific softwares for this purpose are difficult to access and are not widespread by the community. This work studies the development of fast and efficient software to aid in the design of gears and springs. The platform has an intuitive graphical interface, allowing the user to view the geometry of the part and export it in STL format. In addition, the software has automatic routines for optimal selection of gears. Finally, technical reports and binary files are generated as a way to store the information obtained. The validation of the software is done through case studies commonly found in the routine of the designer. The application is free and open source for the entire community.

Keywords: Gears, Springs, Software, User Interface.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Parâmetros geométricos importantes da engrenagem cilíndrica de dentes retos	20
Figura 2 – Gráficos para obtenção do fator geométrico J.	23
Figura 3 – Parâmetros geométricos de uma mola helicoidal de compressão	25
Figura 4 – Relações entre os parâmetros geométricos da mola e o tipo de extremidade	26
Figura 5 – Condições de apoio das extremidades em molas helicoidais de compressão	28
Figura 6 – Parte do diagrama de classes do software que envolve Mola e suas relações	29
Figura 7 – Malha computacional de superfície gerada pelo <i>EleMAQ</i>	30
Figura 8 – Malha superficial da mola para diferentes incrementos du, dv nas equações 4.17	31
Figura 9 – Desenhos de engrenagens obtidos por meio da aplicação das equações 4.19 e 4.21. em conjunto com transformações geométricas	33
Figura 10 – Malha superficial gerado pelo <i>EleMAQ</i> ao longo da engrenagem	33
Figura 11 – Modelos de iluminação utilizados comumente ((MANSOUR; COHEN, 2006)).	34
Figura 12 – Componentes de luz do modelo <i>Phong</i> vistos separadamente em um mesmo objeto.	34
Figura 13 – Vetor normal de superfície no ponto A.	35
Figura 14 – Renderização final dos elementos engrenagem e mola produzida pelo software.	36
Figura 15 – Etapas do desenvolvimento gráfico de uma mola	36
Figura 16 – Interpolação Bilinear.	37
Figura 17 – Janela Principal do software	39
Figura 18 – Processos dentro de Project Manager	40
Figura 19 – Processos dentro de Mesh Properties	41
Figura 20 – Processos dentro de Mesh Properties	41
Figura 21 – Processos dentro de Model	42
Figura 22 – Geometria de uma mola gerado pelo <i>EleMAQ</i> e importada pelo <i>SolidWorks</i> .	44
Figura 23 – impressão 3D de uma mola gerada pelo <i>EleMAQ</i>	44
Figura 24 – impressão 3D de uma engrenagem gerada pelo <i>EleMAQ</i>	45
Figura 25 – Desenho esquemático da região do motor do compressor de ar.	47
Figura 26 – Dados geométricos de entrada.	48
Figura 27 – Aplicação dos fatores de correção do dimensionamento, parte 1.	49
Figura 28 – Aplicação dos fatores de correção do dimensionamento, parte 2.	50
Figura 29 – Inserção do material.	51
Figura 30 – Inserção das condição de vida útil e ciclos para as engrenagens.	51

Figura 31 – Resultados obtidos da análise preliminar.	52
Figura 32 – Entrada dos parâmetros de otimização.	52
Figura 33 – Resultados da otimização.	53
Figura 34 – Resultados finais do projeto.	53
Figura 35 – Conjunto 3D das engrenagens	54
Figura 36 – Mola do estoque para análise	54
Figura 37 – Inserção dos dados geométricos da mola	55
Figura 38 – Condições de operação da mola	56
Figura 39 – Entrada de dados do material.	57
Figura 40 – Relatório caso 1 - 1ª Página	62
Figura 41 – Relatório caso 1 - 2ª Página	63
Figura 42 – Relatório caso 2 - 1ª Página	64
Figura 43 – Relatório caso 2 - 2ª Página	65

Lista de tabelas

Tabela 1 – Principais fatores de correção utilizados no projeto de engrenagens . . .	22
Tabela 2 – Valores calculados de J por interpolação	39
Tabela 3 – Medição: Geometria da mola	55
Tabela 4 – Dados do aço mola ASTM A229	56
Tabela 5 – Resultados obtidos pelo <i>EleMAQ</i>	57

Lista de abreviaturas e siglas

CAE	Computed Aided Engineering
FEA	Análise por Elementos Finitos
POO	Programação Orientada à Objetos
UI	User Interface (Interface Gráfica)
STL	StereoLithography
GPL	General Public License

Lista de símbolos

R	Raio médio de espira, mm
r	Raio do fio, mm
p	Passo linear, mm
σ	Tensão de Flexão, Mpa
σ_c	Tensão de Contato, Mpa
d_p	Diâmetro Primitivo, mm
h_h	Adendo, mm
h_f	Dedendo, mm
h	Altura do dente, mm
x_c	Correção do dente, mm
μ	Ângulo de pressão, Graus
p_c	Passo circular, mm
p_b	Passo de base, mm
m_g	Razão de movimento/redução
FS	Fator de Segurança
S_f	Fator de segurança na flexão
S_H	Fator de segurança no desgaste

Sumário

1	INTRODUÇÃO	16
2	JUSTIFICATIVA	17
3	OBJETIVO	18
4	METODOLOGIA	19
4.1	Cálculo de Projeto	19
4.1.1	Projeto de Engrenagens	20
4.1.2	Projeto de Molas	25
4.2	Desenvolvimento do Software	28
4.3	Visualização Gráfica	29
4.3.1	Geometria	29
4.3.2	Iluminação	32
4.3.3	Arquivos Externos	35
4.3.3.1	Interpolação Bilinear	37
4.4	Interface com o Usuário	38
4.4.1	Project Manager	40
4.4.2	Mesh Properties	40
4.4.3	Solution Explorer	41
4.4.4	Model	42
5	RESULTADOS	43
5.1	Geração de Arquivos STL	43
5.1.1	Impressão 3D	43
5.2	Armazenamento de Dados	45
5.3	Estudos de Caso	46
5.3.1	Caso 1	46
5.3.2	Caso 2	54
5.4	Relatórios Técnicos	58
6	CONCLUSÃO	59
	REFERÊNCIAS	60

APÊNDICES	61
APÊNDICE A – RELATÓRIO TÉCNICO GERADO PARA O CASO	
1	62
APÊNDICE B – RELATÓRIO TÉCNICO GERADO PARA O CASO	
2	64

1 Introdução

A utilização de softwares para o auxílio em projetos de engenharia cresce significativamente. A cada ano, novos programas são desenvolvidos para cada novo problema que surge. Com isso, torna-se imprescindível a adaptação de métodos de cálculos manuais para computadorizados.

No caso do projeto de elementos de máquinas, existem poucos software livres e de código fonte aberto para a comunidade. No geral é muito utilizado o método FEA para a determinação dos esforços solicitantes em peças. Esse método, por ser bastante abrangente, é usado para análise de diferentes geometrias, sendo amplamente utilizado. Softwares específicos para o dimensionamento de elementos de máquinas são poucos difundidos. A vantagem de se ter um programa próprio para esta finalidade consiste no maior controle de variáveis no processo, utilização de parâmetros próprios, resultados direcionados, relação com dados externos e empíricos, entre outros. A filosofia do software livre permite que diferentes programadores trabalhem no mesmo projeto livremente. Dispor do código-fonte faz com que o usuário tenha poder de alterar qualquer aspecto do programa. Isso permite que muitas pessoas trabalhem ao mesmo tempo, contribuindo para a evolução do software. Para isso, basta licenciar o mesmo sob as condições da GPL (General Public License) em que trabalhos derivados de um produto originalmente licenciado pela GPL só podem ser distribuídos se utilizarem a mesma licença(([GNU...](#), 2017)).

Um outro fator importante é a usabilidade e facilidade de operação do software. Embora seja funcional, um programa sem uma interface gráfica intuitiva pode dificultar na obtenção de resultados pelo usuário. Com isso, o acesso torna-se mais abrangente pois pessoas com baixo conhecimento em programação podem utilizar o software que seja intuitivo e claro no controle de informações.

Em face a essas informações, visa-se com este trabalho o desenvolvimento de um software para o auxílio no projeto de elementos de máquinas com o nome de *EleMAQ*¹. Além disso é totalmente gratuito e de código fonte aberto. Atualmente *EleMAQ* conta com o projeto de engrenagens cilíndricas de dentes retos e molas helicoidais de compressão.

¹ Em homenagem à disciplina de elementos de máquinas do curso de engenharia mecânica

2 Justificativa

O dimensionamento de elementos de máquinas é essencial para a construção de qualquer dispositivo ou máquina que execute alguma tarefa de natureza mecânica. Logo, essa etapa deve ser realizada de forma correta e precisa, visto que o funcionamento da máquina depende da interação entre estes elementos. Atualmente existem diversos softwares CAE que facilitam a tarefa do engenheiro projetista, utilizando diversas técnicas de análises como por exemplo a FEA, garantindo bons resultados. Porém, a grande maioria são softwares comerciais de preço relativamente alto para o estudante de engenharia que deseja melhorar sua experiência em projeto mecânico. Além disso, softwares sem uma interface gráfica intuitiva podem dificultar na obtenção de resultados rápidos e satisfatórios.

Uma outra alternativa para o auxílio nos cálculos de dimensionamento é a utilização de planilhas eletrônicas, no entanto, a falta de uma visualização geométrica do elemento e a forma particular de como as planilhas são criadas - variam conforme criador - dificultam o aprendizado do aluno se distanciando do campo prático da engenharia.

Embora existam diversas ferramentas que auxiliam o projetista na escolha do elemento mecânico ideal para seu projeto, é muito difícil encontrar uma ferramenta específica para o dimensionamento de elementos mecânicos que seja capaz de analisar diferentes tipos como por exemplo molas, engrenagens, eixos entre outros.

3 Objetivo

Com o intuito de facilitar o processo de dimensionamento de elementos mecânicos o vigente trabalho tem como foco o desenvolvimento de um software específico para o cálculo de elementos de máquinas. Com o nome de EleMAQ, a ferramenta possui rotinas de cálculo para engrenagens cilíndricas de dentes retos e molas helicoidais de compressão. Além disso, EleMAQ conta com um recurso de visualização gráfica do elemento de forma que possa ser exportada para posterior uso e análise.

4 Metodologia

4.1 Cálculo de Projeto

Os cálculos envolvendo elementos mecânicos são, em grande parte, dependentes da análise de tensões e deformações dos materiais. A escolha do elemento depende do tipo de transformação mecânica que o projeto requer. O dimensionamento tem como finalidade a prevenção de falhas em conjunto com um baixo custo. Em outras palavras, a otimização da geometria e material.

Conforme mostra (BEER E. RUSSEL JOHNSTON, 1925), a determinação das tensões atuantes e do limite de resistência do material são parâmetros chaves para a obtenção do fator de segurança que envolve o projeto. O fator de segurança pode ser calculado através da seguinte relação:

$$FS = \frac{S_y}{S_a} \quad (4.1)$$

Em que S_y é o limite de resistência do material e S_a é a tensão máxima atuante no elemento. O valor de FS depende principalmente do fator de risco que envolve o projeto.

Para se obter os efeitos desejados, muitos elementos são submetidos a testes práticos através dos quais são criados parâmetros adimensionais - fatores de correção - que são utilizados para correlacionar os resultados teóricos com os resultados práticos.

A correta escolha do elemento mecânico depende da obtenção das cargas atuantes e resistência, garantindo assim um fator de segurança adequado. Para isso, é necessário correlacionar geometria, fatores empíricos e resistência dos materiais.

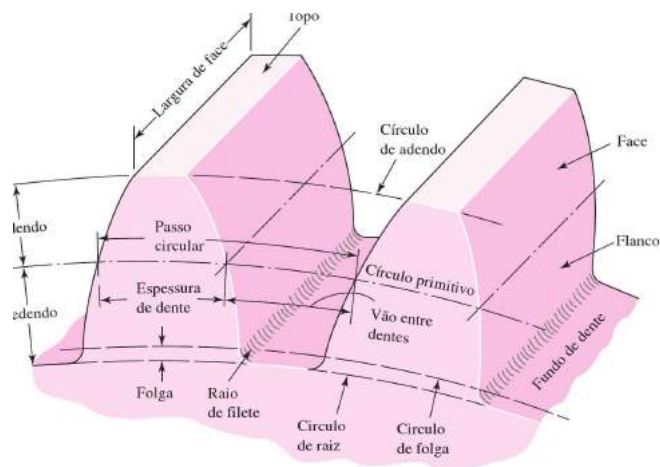
O dimensionamento realizado pelo software segue as seguintes etapas principais:

1. Inserção de dados geométricos
2. Inserção do carregamento (externos: rotação, força externa, deflexões...)
3. Inserção do material
4. Inserção dos fatores de correção (confiabilidade, condições de trabalho...)
5. Cálculo das tensões limites
6. Cálculo das tensões atuantes
7. Cálculo do fator de segurança do projeto

4.1.1 Projeto de Engrenagens

(BUDYNAS; NISBETT, 2009) e (NORTON, 2004) mostram as principais etapas para o dimensionamento de engrenagens conforma a AGMA. O *EleMAQ* se restringe somente ao projeto de engrenagens cilíndricas de dentes retos. No entanto, o cálculo para outros tipos de engrenagens não diferem muito entre si. Com o intuito de se estabelecer relações importantes da geometria da engrenagem faz-se necessária a visualização de alguns parâmetros importantes conforme mostra a Figura 1.

Figura 1 – Parâmetros geométricos importantes da engrenagem cilíndrica de dentes retos



Fonte: (BUDYNAS; NISBETT, 2009).

Uma padronização do tamanho do dente foi definida como módulo (m). Isso facilita a fabricação e a escolha da engrenagem por meio de catálogos. As relações existentes entre os parâmetros mostrados pela Figura 1 são dadas pelo conjunto de Equações 4.2.

$$d_p = m \cdot z \quad (4.2a)$$

$$h_h = \frac{d_h - d_p}{2} = (1 + x_c) \cdot m \quad (4.2b)$$

$$h_f = \frac{d_p - d_f}{2} = (1,25 - x_c) \cdot m \quad (4.2c)$$

$$h = \frac{d_h - d_f}{2} = h_h + h_f = 2,25 \cdot m \quad (4.2d)$$

$$p_c = \pi \cdot m \quad (4.2e)$$

$$p_b = p_c \cdot \cos \mu \quad (4.2f)$$

Embora o ângulo de pressão (μ) possa assumir qualquer valor é mais comum encontrar 20° , 25° e $14,5^\circ$. Dentre os quais, o mais utilizado é 20° .

O formato do dente pode causar interferência no engrenamento entre pinhão e coroa. Isso ocorre quando a ponta de um dente do pinhão entra em contato com a parte inferior do dente da coroa. Isso pode ser evitado através da remoção de material no dente, conhecido como adelgaçamento. Um adelgaçamento severo pode causar falha prematura do dente. Uma outra forma de evitar a interferência é alterar o perfil padronizado de profundidade completa do dente para uma forma involuta que tenha adendo menor no pinhão e maior para a coroa. Esse fator de mudança é conhecido como correção de dente (x_c) e está contido no conjunto de Equações 4.2. Engrenagens com ($x_c > 0$) são conhecidas como *Engrenagens de perfil transladado* (NORTON, 2004).

Para engrenagens de dentes com profundidade completa, o número mínimo de dentes do pinhão capaz de evitar a interferência é dado pela Equação 4.3 e o número máximo de dentes da coroa que pode ser acoplada com este pinhão livre de interferência é dado pela Equação 4.4.

$$N_{p,min} = \frac{2}{(1 + 2m_g) \sin^2 \mu} \cdot (m_g + \sqrt{m_g^2 + (1 + 2m_g) \sin^2 \mu}) \quad (4.3)$$

$$N_{c,max} = \frac{N_p^2 \sin^2 \mu - 4}{4 - 2N_p \sin^2 \mu} \quad (4.4)$$

O contato entre os dentes do pinhão e coroa produz uma carga de ação e reação (W_t). Essa carga no sistema SI pode ser calculada por meio da Equação 4.5.

$$W_t = \frac{60000H}{\pi \cdot d_p \cdot R} \quad [kN] \quad (4.5)$$

W_t pode ocasionar a falha do dente por flexão (tensões de flexão) e por desgaste (tensões superficiais). A determinação das tensões solicitantes no perfil envolvente da engrenagem leva em consideração a influência de condições de operação, tipo de material, acabamento superficial, dentre outros fatores, como os *Fatores de Correção*. Esses, são números adimensionais criados para aproximar o cálculo teórico com o experimental, justificando-se pela complexidade de variáveis externas que influenciam neste valor. Diversos testes elaborados pela AGMA e por Lewis¹ comprovam a utilidade desse método no projeto de engrenagens.

A Tabela 1 mostra os principais fatores de correção utilizados na determinação das tensões solicitantes do dente da engrenagem.

¹ A primeira equação útil para as tensões de flexão e um dente de engrenagem foi desenvolvida por W. Lewis em 1982. Informação extraída de (JÚNIOR; BEZERRA, 2015).

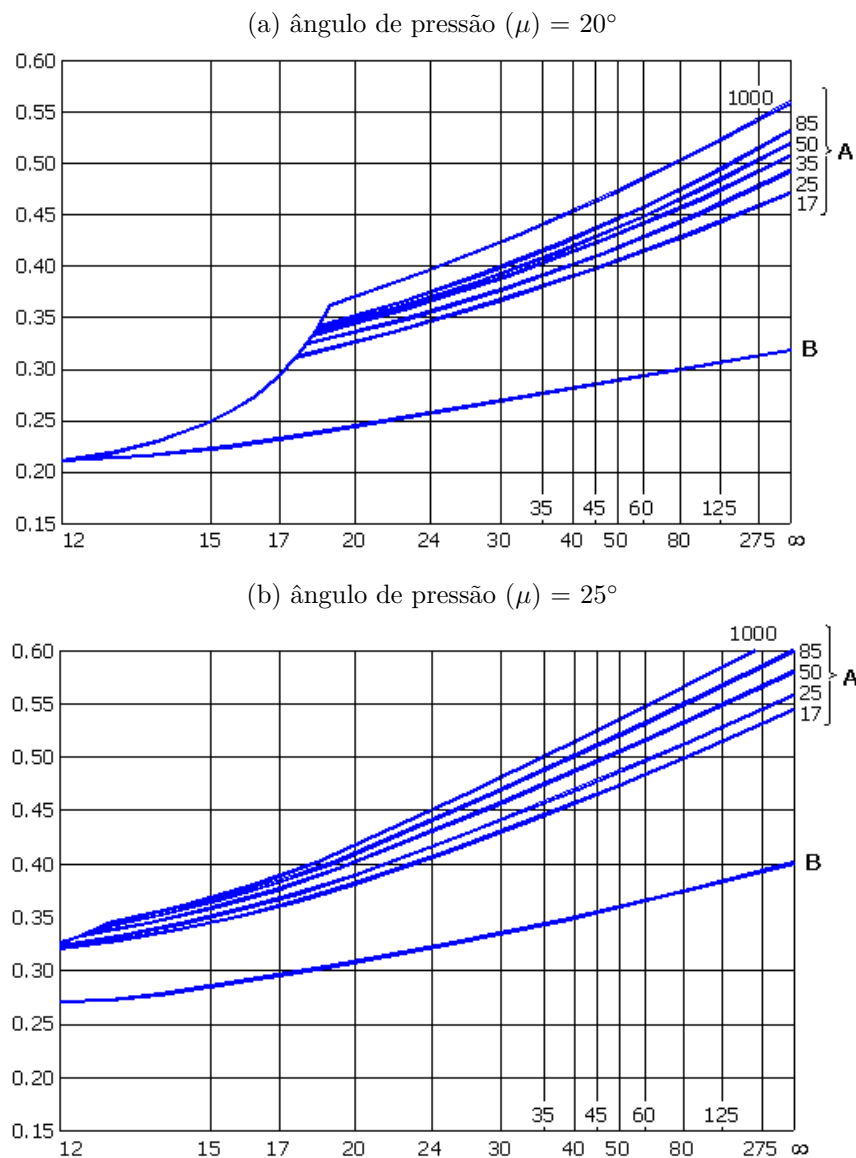
Tabela 1 – Principais fatores de correção utilizados no projeto de engrenagens

Fator de Correção	Descrição	Aplicação
K_0	Correção aplicada sobre a máquina motora e movida. Atua em detrimento de vibrações e impacto.	Tensões superficiais e de flexão
K_v	Fator de velocidade: leva em consideração a velocidade de transmissão de potência.	Tensões superficiais e de flexão
K_s	Fator de correção aplicado em relação ao tamanho do dente, diâmetro da peça, largura de face e outros.	Tensões superficiais e de flexão
K_m	Fator de distribuição de carga, modifica as equações de tensão para corrigir a falta de distribuição uniforme de carga ao longo da linha de contato do dente.	Tensões superficiais e de flexão
K_b	Fator de espessura de borda, Leva em consideração a razão entre o diâmetro primitivo e o diâmetro de furo da engrenagem (efeitos de borda).	Somente em tensões de flexão
C_f	Fator de condição de superfície, Leva em consideração as condições de acabamento do dente	Tensões superficiais
J	Fator geométrico: corrige as tensões pela forma do dente, compartilhamento de carga e concentração de tensões.	Tensões de Flexão
I	Fator geométrico de resistência superficial.	Tensões superficiais
C_p	Coefficiente elástico: depende das características elásticas do material	Tensões superficiais

Fonte: Elaborado pelo Autor.

O cálculo de alguns fatores de correção definidos na Tabela 1 como J , K_s e K_0 necessitam de dados externos encontrados em (AGMA, 1989) na forma de tabelas e gráficos. Para encontrar o fator J (AGMA, 1989) um gráfico que depende do ponto de contato entre os dentes do pinhão e coroa e do número de dentes dos mesmos é fornecido. Esse gráfico está contido nas Figuras 2a e 2b para ângulos de pressão de 20° e 25° respectivamente. Esses dados são suficientes a nível de projeto e os valores de J podem ser obtidos por interpolação visual.

Figura 2 – Gráficos para obtenção do fator geométrico J .



Fonte: (GEOMETRIC..., 2017).

Na Figura 2 o eixo vertical define o valor de J e o horizontal define o número de dentes da engrenagem acoplante. A curva de J é traçada para alguns valores de dentes da engrenagem acoplada (17, 25, 35, 50, 1000). Curvas definidas em tipo A são para cargas distribuídas nos dentes e tipo B para carga aplicada em um único ponto (carregamento na

ponta do dente). Como exemplo, para um pinhão de 24 dentes acoplado com uma coroa de 52 dentes tem-se para o pinhão $J \approx 0,37$ e para a coroa $J \approx 0,40$, analisado para cargas tipo A.

Com base na Tabela 1, as tensões de flexão e contato que atuam nos dentes da engrenagem são dadas respectivamente pelas Equações 4.6 e 4.7, ambas no sistema SI (BUDYNAS; NISBETT, 2009).

$$\sigma = W_t K_0 K_v K_s \frac{1}{F \cdot m} \frac{K_m K_b}{J} \quad [Mpa] \quad (4.6)$$

$$\sigma_c = C_p \sqrt{W_t K_0 K_v K_s \frac{K_m C_f}{d_p \cdot F} \frac{C_f}{I}} \quad [Mpa] \quad (4.7)$$

De modo a criar um parâmetro que indique o risco envolvido no dimensionamento de engrenagens. (AGMA, 1989) define uma forma de calcular o fator de segurança envolvido. A falha da engrenagem pode ocorrer pelas tensões excessivas, ocasionando o rompimento dos dentes por flexão, ou pelo desgaste superficial, ocasionando o crateramento dos dentes. O último é causado por intensas tensões de superfície/contato calculados pela Equação 4.7.

Os fatores de segurança de flexão (S_f) e desgaste (S_H) podem ser calculados por meio das Equações 4.8 e 4.9 respectivamente, onde K_t é um fator de correção relacionado a temperatura de operação da engrenagem, K_r é o fator de confiabilidade (é comum utilizar 99% de confiança), Y_n e Z_n são fatores que levam em consideração o tempo de vida da engrenagem em ciclos (10^7 ciclos é utilizado comumente) e C_H depende da diferença entre as durezas dos materiais do pinhão e coroa. Os termos S_t e S_c representam as tensões de flexão e contato admissíveis², respectivamente.

$$S_f = \frac{S_t Y_n}{\sigma \cdot K_t K_r} \quad [Mpa] \quad (4.8)$$

$$S_H = \frac{S_c Z_n C_H}{\sigma_c \cdot K_t K_r} \quad [Mpa] \quad (4.9)$$

Geralmente, para engrenagens cilíndricas de dentes retos, um fator de segurança maior ou igual a 1,2 na falha por flexão é considerando adequado. No entanto, o correto é comparar S_f com S_H^2 para decidir se o risco do dimensionamento é maior na flexão ou desgaste.

² Valores acima destes levam o material ao estado de escoamento e posterior falha.

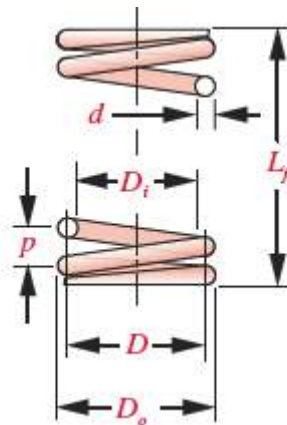
4.1.2 Projeto de Molas

Segundo (NORTON, 2004) o termo mola se refere a partes construídas em configurações particulares para prover um intervalo de força dentro de um espaço significativo de deflexão e/ou para armazenar energia potencial. Portanto, a propriedade conhecida como constante de mola (k) é inerente ao tipo de mola e pode ser calculada pela Equação 4.10, em que F é a força de carregamento e y a deflexão que esta causa no comprimento total da mola. Em termos qualitativos, k é uma constante que define a inclinação da curva força X deflexão. Máquinas que dependem do uso de uma força em função da deflexão provavelmente devem utilizar algum tipo de mola.

$$k = \frac{F}{y} \quad [N/mm] \quad (4.10)$$

O *EleMAQ* se restringe ao cálculo de somente um tipo de mola: molas helicoidais de compressão. No entanto, o projeto para outros tipos sofre pouca variação, mantendo a ideia principal dos cálculos. Para maior entendimento, faz-se necessário o conhecimento de alguns parâmetros principais de molas de compressão conforme será mostrado a seguir. A geometria que define esse tipo de mola pode ser vista na Figura 3, onde L_f é o comprimento livre, d o diâmetro do fio, D o diâmetro médio de espira, D_i o diâmetro interno, D_e o diâmetro externo e p o passo linear das espiras.

Figura 3 – Parâmetros geométricos de uma mola helicoidal de compressão



Fonte: (NORTON, 2004)

As extremidades podem ter as seguintes configurações:

1. Simples
2. Simples e esmerilhadas
3. Esquadrejadas

4. Esquadrejadas e esmerilhadas

O tipo de extremidade pode influenciar no risco de flambagem e análise de vibrações. (BUDYNAS; NISBETT, 2009) resume importantes relações entre a geometria da mola e suas extremidades, conforme mostra a Figura 4.

Figura 4 – Relações entre os parâmetros geométricos da mola e o tipo de extremidade

Termo	Tipo de extremidades de mola			
	Plana	Plana e esmerilhada	Esquadrada ou fechada	Esquadrada e esmerilhada
Espirais de extremidade, N_e	0	1	2	2
Total de espirais, N_t	N_a	$N_a + 1$	$N_a + 2$	$N_a + 2$
Comprimento livre, l_0	$pN_a + d$	$p(N_a + 1)$	$pN_a + 3d$	$pN_a + 2d$
Comprimento sólido, l_s	$d(N_t + 1)$	dN_t	$d(N_t + 1)$	dN_t
Passo, p	$(l_0 - d)/N_a$	$l_0/(N_a + 1)$	$(l_0 - 3d)/N_a$	$(l_0 - 2d)/N_a$

Fonte: (BUDYNAS; NISBETT, 2009)

A constante da mola k também pode ser calculada em termos da geometria e propriedades do material que a constitui, conforme mostrado na Equação 4.11, em que E é o módulo de Young do material, G o módulo de cisalhamento e N_a o número de espiras ativas.

$$k = \frac{d^4 G}{8d^3 N_a} \quad [N/mm] \quad (4.11)$$

A ação do carregamento sobre a mola faz com que ela se deforme de y conforme mostra a Equação 4.10. Isso produz tensões de cisalhamento, pois a flexão em uma mola helicoidal cria tensões torcionais no fio de maneira similar. Logo, o resultado é a combinação de tensão de cisalhamento direta e tensão de cisalhamento de torção. O ponto de máxima tensão (maior risco) ocorre nas fibras internas da mola. A tensão total pode ser obtida através do conjunto de Equações 4.12.

$$\tau = K_s \frac{8FD}{\pi d^3} \quad [Mpa] \quad (4.12a)$$

$$K_s = \frac{2C + 1}{2C} \quad (4.12b)$$

$$C = \frac{D}{d} \quad (4.12c)$$

Na Equações 4.12b, K_s é conhecido por fator de correlação da tensão de cisalhamento e na Equação 4.12c, C um parâmetro adimensional conhecido como Índice de Mola. Normalmente C varia entre 6 e 12.

Somando-se ao projeto de molas, é importante considerar os efeitos de curvatura em que a curva do fio aumenta a tensão no lado interno da mola, mas decresce *ligeiramente* no lado externo. Com isso formulou-se o *fator de Wahl* (K_W) e *fator de Bergstrasser* (K_B) como fatores de correção, calculados pelo conjunto de Equações 4.13 (ambos adimensionais).

$$K_W = \frac{4C - 1}{4C - 4} + \frac{0,615}{C} \quad (4.13a)$$

$$K_B = \frac{4C + 2}{4C - 3} \quad (4.13b)$$

O *EleMAQ* permite ao usuário a escolha do fator de correção utilizado nos cálculos de molas, porém K_B é utilizado por *default*³, uma vez que prevê a maior tensão de cisalhamento e, portanto, é mais conservativo.

A força máxima F_{max} que atua nos fios da mola ocorre quando a mesma se encontra totalmente fechada (comprimento sólido). Dessa forma, substituindo F por F_{max} na Equação 4.12a obtêm-se a maior tensão de cisalhamento da mola (τ_{max}). Seja S_{sy} a máxima tensão de cisalhamento admissível do material, o fator de segurança $F.S$ pode ser obtido através da Equação 4.14. Um fator de segurança acima de 1,2 é geralmente aceito em projetos de baixo risco.

$$F.S = \frac{S_{sy}}{\tau_{max}} \quad (4.14)$$

Diferentemente de engrenagens, os materiais de mola possuem limites de resistência à tração (LRT) dependentes do diâmetro do fio da espira. (BUDYNAS; NISBETT, 2009) mostra que para grande parte dos materiais a curva LRT versus diâmetro do fio segue a seguinte relação:

$$S_{ut} = \frac{A}{d^m} \quad [Mpa] \quad (4.15)$$

Em que A e m são constantes que depende do tipo de material e S_{ut} representa LRT. Pode-se obter uma estimativa para S_{sy} de modo que $S_{sy} = 0,56S_{ut}$. No entanto, o ideal é o projetista possuir dados tabelados do material que utilizará para a mola.

Um estudo de estabilidade deve ser feito para evitar a flambagem. Molas helicoidais de compressão podem flambar em função do carregamento e seu comprimento total. A

³ termo designado para todas as escolhas de parâmetros realizadas previamente pelo software

condição para a estabilidade absoluta é dada por:

$$L_0 < \frac{\pi D}{\alpha} \left[\frac{2(E - G)}{2G + E} \right]^{1/2} \quad [mm] \quad (4.16)$$

Em que α é um parâmetro adimensional que representa a condição de apoio das extremidades. Diferentes condições de apoio podem ser visualizadas pela Figura 5.

Figura 5 – Condições de apoio das extremidades em molas helicoidais de compressão

Condição de extremidade	Constante α
Mola suportada entre superfícies planas paralelas (extremidades fixas)	0,5
Uma extremidade apoiada por superfície plana perpendicular ao eixo de mola (fixo); outra extremidade pivotada (articulada)	0,707
Ambas as extremidades pivotadas (articuladas)	1
Uma extremidade engastada; outra extremidade livre	2

*Extremidades apoiadas por superfícies planas devem ser esquadreadas e esmerilhadas.

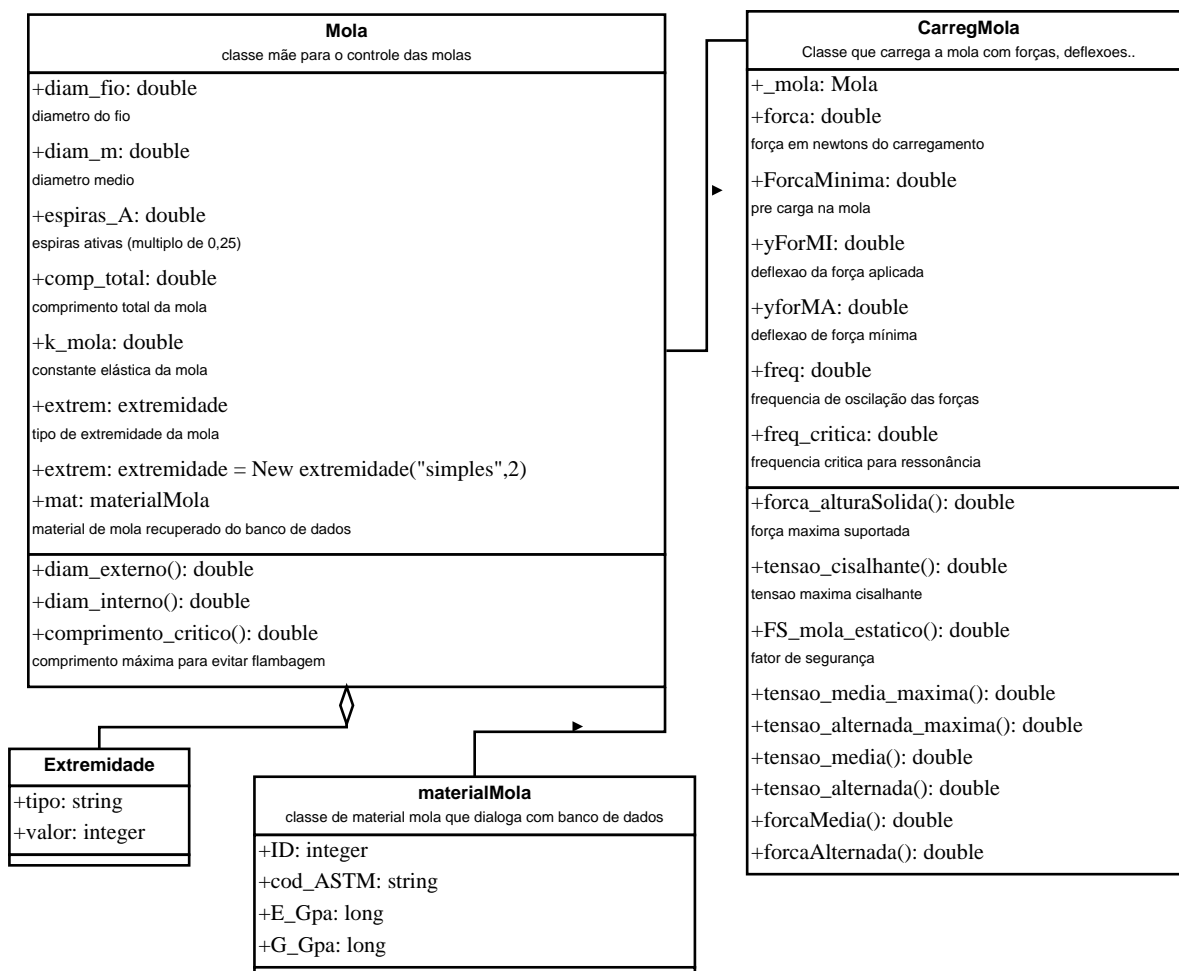
Fonte: (BUDYNAS; NISBETT, 2009)

4.2 Desenvolvimento do Software

O software foi desenvolvido utilizando o Visual Studio Community como ambiente de desenvolvimento integrado e o Visual Basic (VB) como linguagem de programação. A arquitetura e projeto foram desenvolvidos com base na orientação à objetos (POO). Isso se tornou possível visto que o VB é uma linguagem de baixo nível fortemente orientada à objetos. Dessa forma, os elementos de máquinas foram interpretados como classes, possuindo métodos e propriedades.

A Figura 6 mostra uma parte do diagrama de classes do projeto. Ele envolve a relação do elemento Mola com o material do qual é constituído e as entradas que recebe, tais como carga máxima, deflexões e outras. Esse modelo também se aplica à engrenagens, com poucas variações. A POO tem como finalidade a abstração do mundo real, transformando-o em um conjunto hierárquico de classes e subclasses. A classe possui propriedades e métodos. Como por exemplo, a classe carro possui como propriedades marca, modelo, cor, tamanho e como métodos virar à esquerda, buzinar, frear e acelerar. Um objeto é uma instância da classe, uma ramificação. Portanto, todo objeto deve possuir uma classe mãe, da qual herda suas propriedades e métodos. No exemplo anterior, um carro amarelo da marca *Fiat* seria um objeto, com suas propriedades e métodos já definidos e herdados da classe mãe. Observe que objetos podem ter características diferentes (carro amarelo, azul) mas possuem o mesmo "tipo" de propriedades e métodos.

Figura 6 – Parte do diagrama de classes do software que envolve Mola e suas relações



Fonte: Elaborada pelo Autor.

4.3 Visualização Gráfica

Para que o usuário possa visualizar os recursos de forma gráfica, o EleMAQ possui uma interface gráfica com recurso de visualização da geometria dos elementos. Dessa forma, o usuário pode interagir de forma dinâmica com o sistema, facilitando o uso e a obtenção de resultados.

4.3.1 Geometria

A implementação gráfica da geometria dos elementos foi realizada utilizando a biblioteca *OpenGL (Open Graphics Library)* desenvolvida em C/C++, adaptada para uso pela plataforma .NET, com o nome de *OpenTK*. A biblioteca conta com recursos de programação gráfica como transformações geométricas (rotação, translação e escala) que facilitaram na produção do desenho tri-dimensional dos elementos.

Sólidos são construídos computacionalmente através de um conjunto de pontos e

linhas. Com isso, é de notória ajuda a obtenção das equações paramétricas que descrevem a geometria deste sólido.

Para as molas, os pontos sobre sua superfície externa podem ser expressos pela seguinte curva paramétrica $\vec{\gamma}(u, v)$:

$$\vec{\gamma}(u, v) = (x(u, v), y(u, v), z(u, v)), \quad (4.17)$$

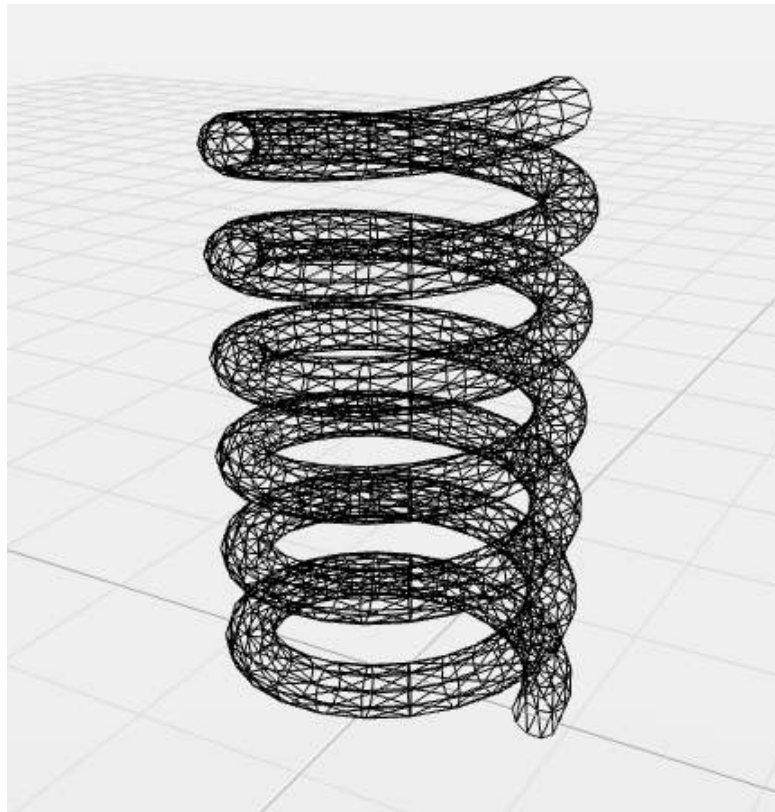
$$x(u, v) = [R - r \cos(v)] \cos(u), \quad (4.18a)$$

$$y(u, v) = [R - r \cos(v)] \sin(u), \quad (4.18b)$$

$$z(u, v) = r \sin(v) + \frac{p \cdot u}{2\pi}, \quad (4.18c)$$

Com laços de repetições para o incremento dos parâmetros u e v e utilizando o conjunto de Equações 4.17 é possível gerar uma malha computacional que representa a superfície da geometria da mola, conforma mostra a Figura 7.

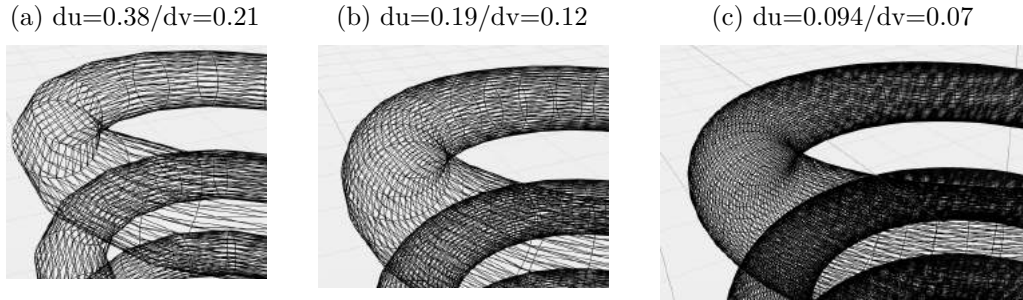
Figura 7 – Malha computacional de superfície gerada pelo *EleMAQ*.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

A qualidade da malha computacional gerada depende do incremento nas variáveis u e v . Para valores baixos têm-se um maior refino na malha, no entanto, o custo computacional aumenta consideravelmente. Diferentes malhas podem ser visualizadas na Figura 8.

Figura 8 – Malha superficial da mola para diferentes incrementos du, dv nas equações 4.17



Fonte: Elaborada pelo Autor.

A geometria da engrenagem, diferentemente da mola, possui um grau de complexidade maior. (BUDYNAS; NISBETT, 2009) traz aspectos importantes relacionados ao perfil do dente, que segue a forma da curva involuta (um tipo de curva envolvente⁴). Para que se possa desenhar o perfil do dente computacionalmente é preciso obter uma forma de parametrizar a involuta de modo que os dados de entrada sejam os parâmetros principais da engrenagem (módulo, diâmetro primitivo, número de dentes, entre outros).

(JÚNIOR; BEZERRA, 2015) mostram uma forma bastante interessante de traçar o perfil do dente, de modo que este seja a união de uma curva envolvente em conjunto com uma curva trocóiide. As coordenadas de um ponto P pertencente à curva envolvente em relação à origem situada no centro da engrenagem são dadas pelas Equações 4.19 e 4.20.

$$X_p = r_p \cdot \sin(\theta' - \theta_p), \quad (4.19a)$$

$$Y_p = r_p \cdot \cos(\theta' - \theta_p), \quad (4.19b)$$

Em que r_p é o raio vetor do ponto P e:

$$\theta' = \frac{\pi}{2z} + \frac{2x_c}{z} \cdot \tan \mu + Ev(\mu) \quad (4.20a)$$

$$\theta_p = Ev(\alpha_p) = \tan(\alpha_p) - \alpha_p \quad (4.20b)$$

$$\alpha_p = \arccos\left(\frac{r_b}{r_p}\right), \quad (4.20c)$$

⁴ a involuta é um tipo de uma curva obtida de outra dada curva anexando a esta um cordão tenso imaginário e traçando um ponto da corda ao enrolá-la na curva; ou, ao contrário, ao desenrolá-la.

Em que r_b é o raio de base. As coordenadas de um ponto T pertencente a curva trocóiide em relação a um sistema de coordenadas situado no centro da engrenagem são dadas pelas Equações 4.21 e 4.22.

$$X_t = r_t \cdot \sin(\theta' + \delta - \theta_t) \quad (4.21a)$$

$$Y_t = r_t \cdot \cos(\theta' + \delta - \theta_t) \quad (4.21b)$$

Em que r_t é o raio vetor do ponto T.

$$\theta_t = \arctan\left(\frac{\sqrt{r_t^2 - (r - h_f)^2}}{r - h_f}\right) - \frac{\sqrt{r_t^2 - (r - h_f)^2}}{r} \quad (4.22a)$$

$$\delta = \mu - \frac{(r - h_f) \cdot \tan \mu}{r} \quad (4.22b)$$

Em que r é o raio primitivo da engrenagem.

Com isso foi possível traçar o perfil dos dentes da engrenagem utilizando informações facilmente obtidas em catálogos de elementos de máquinas. As Equações 4.19 e 4.21 permitem o traçado de um único perfil de dente. Para obter os demais dentes basta aplicar novamente as equações rotacionando os eixos de referência. O ângulo de rotação pode ser calculado através do passo linear. Esse processo iterativo deve ser realizado N vezes, onde N é o número de dentes da engrenagem. A Figura 9 mostra o resultado desse processo para diferentes geometrias de engrenagem.

A criação de um modelo tri-dimensional da engrenagem envolve um processo de *Extrusão* dos modelos bi-dimensional mostrados na Figura 9. Isso foi realizado com a translação de uma cópia do desenho de uma distância Z ao longo do eixo perpendicular à face da engrenagem (esse processo é comumente conhecido como *Extrusão*) em que Z é a largura de face fornecida pelo usuário. Com o uso do *OpenGL* uma malha triangular foi gerada na superfície da engrenagem conforme mostra a Figura 10.

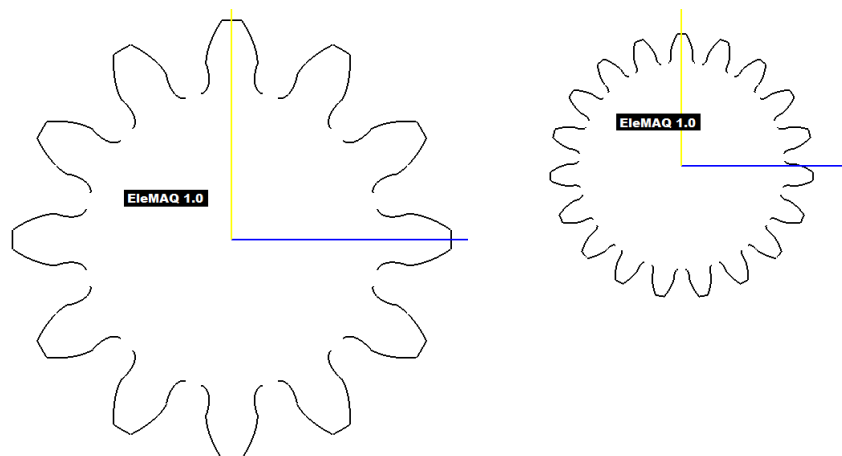
4.3.2 Iluminação

A iluminação computacional torna a superfície do objeto próxima a da visualização real através do estudo de como a luz interage com os objetos em uma cena. Para isso, é preciso formular matematicamente modelos dos seguintes fenômenos:

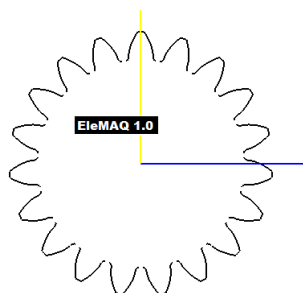
- Emissão
- Transmissão
- Absorção

Figura 9 – Desenhos de engrenagens obtidos por meio da aplicação das equações 4.19 e 4.21. em conjunto com transformações geométricas

- (a) Módulo 5, 12 dentes, ângulo de pressão 20° (b) Módulo 2, 19 dentes, ângulo de pressão 20°

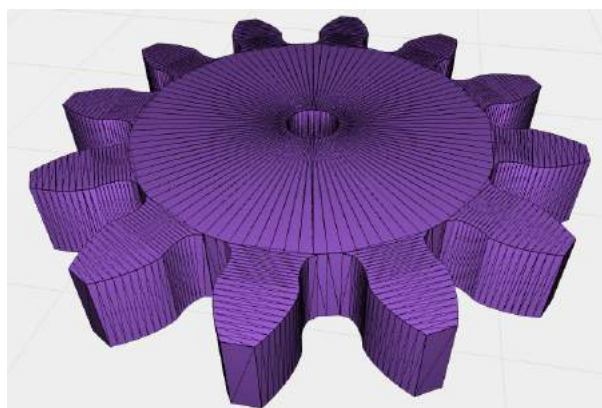


- (c) Módulo 2, 19 dentes, ângulo de pressão 25°



Fonte: Elaborado pelo Autor utilizando *EleMAQ*.

Figura 10 – Malha superficial gerado pelo *EleMAQ* ao longo da engrenagem



Fonte: Elaborado pelo Autor.

- Refração
- Reflexão

No *OpenGL* a luz é amostrada num número discreto de cores primárias (RGB) e o modelo de iluminação é computado somente nos vértices das superfícies. A cor nos restantes dos pixels é interpolada linearmente (sombreamento de *Gouraud*). Além das propriedades da luz e do material, a geometria do objeto também é importante. A posição dos vértices em relação aos olhos e à fonte luminosa contribui para o cálculo dos efeitos atmosféricos.

O método de iluminação sem interpolação é conhecido como *Flat* (MANSSOUR; COHEN, 2006). Já o modelo de Gouraud com a inclusão da componente especular de luz forma o modelo de iluminação conhecido como *Phong*. A interpolação de cores por *Gouraud* faz com que os pontos de brilho sejam atenuados, diminuindo a qualidade da imagem. *Phong* além de interpolar os vetores normais realiza o cálculo de iluminação por pixel, durante a rasterização. Os modelos podem ser comparados através da Figura 11.

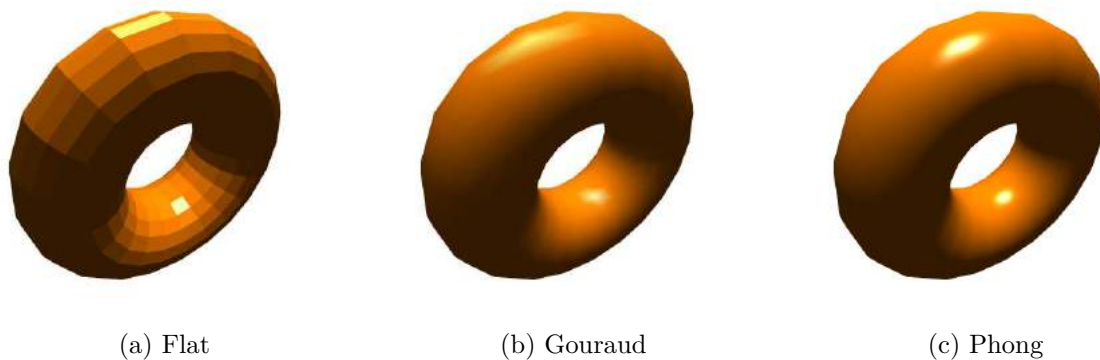


Figura 11 – Modelos de iluminação utilizados comumente ((MANSSOUR; COHEN, 2006)).

No modelo de *Phong* existem três tipos de componentes de luz que modificam sua aparência: Luz especular, ambiente e difusa. O efeito separado de cada uma delas pode ser visto na Figura 12.

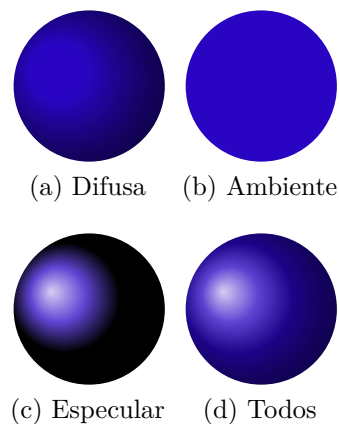


Figura 12 – Componentes de luz do modelo *Phong* vistos separadamente em um mesmo objeto.

O cálculo do vetor normal de superfície (Figura 13) é fundamental para os cálculos de iluminação feitos pelo *OpenGL*. De uma forma geral, o vetor normal pode ser calculado a partir de três vértices dados pela seguinte expressão:

$$\vec{N} = (B - A) \times (C - A), \quad (4.23)$$

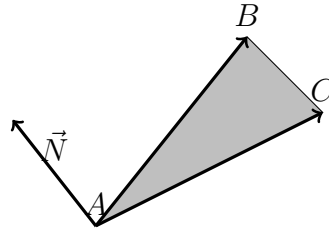


Figura 13 – Vetor normal de superfície no ponto A.

Esse método é muito utilizado pelo fato de que todas as geometrias são produzidas computacionalmente, o que significa que se resume em um conjunto de linhas e pontos. Logo, para todos os vértices que compõem o objeto é possível obter o vetor normal⁵.

Uma outra forma de se obter o vetor normal no ponto é utilizar a Equação 4.17, de modo que o vetor normal pode ser calculado por:

$$\vec{N}(u, v) = \frac{\partial \vec{\gamma}}{\partial u} \times \frac{\partial \vec{\gamma}}{\partial v} \quad (4.24)$$

Por meio da Equação 4.24 é possível obter as coordenadas no vetor normal em qualquer ponto da superfície contínua do objeto, no entanto é preciso conhecer suas equações paramétricas. Para sólidos com superfície complexa essa tarefa se torna extremamente difícil, o que faz com que, computacionalmente, a Equação 4.23 seja preferida.

Com o uso dos conceitos vistos na Seção 4.3.1 em conjunto com a aplicação da iluminação gráfica foi possível obter uma boa visualização dos elementos. A Figura 14 mostra imagens finais de renderização para engrenagens e molas.

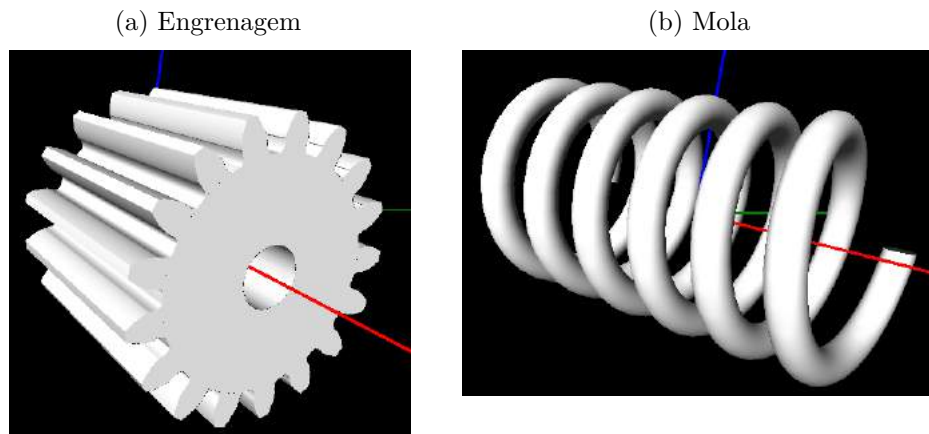
A evolução do objeto iniciando de uma malha superficial até a formação sólida pode ser vista na Figura 15 para o caso da mola. Observe o modelo de iluminação *Flat* evoluir para o modelo *Gouraud*, suavizando a superfície.

4.3.3 Arquivos Externos

Como forma de permitir a entrada de novos dados no *EleMAQ* optou-se pela utilização de arquivos externos no formato *XML*. Isso permite ao usuário personalizar os cálculos efetuados conforme sua necessidade específica. Dados internos só podem ser

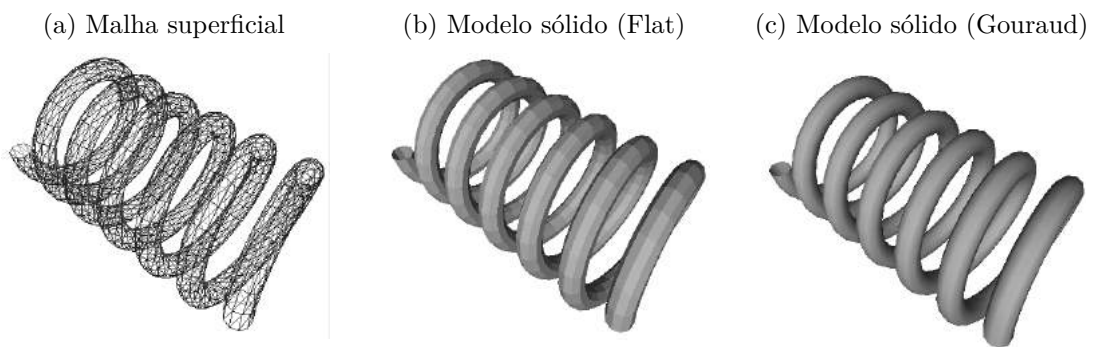
⁵ é necessário no mínimo três vértices para se formar uma superfície (plano).

Figura 14 – Renderização final dos elementos engrenagem e mola produzida pelo software.



Fonte: print screen da aplicação *EleMAQ*

Figura 15 – Etapas do desenvolvimento gráfico de uma mola



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o *EleMAQ*.

alterados com a recompilação do software, o que dificultaria a mudança das condições externas de dimensionamento e distribuição do programa. Assim, o *EleMAQ* interage com os seguintes tipos de arquivos externos:

1. FatorChoque.xml
2. ksdata.dat
3. Arquivos TXT para Fator geométrico J

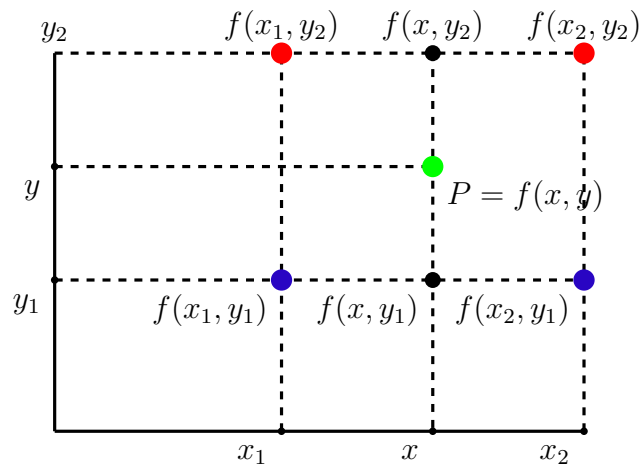
A utilização de arquivos externos se restringiu somente ao dimensionamento de engrenagens tendo em vista a ampla necessidade de dados empíricos formulados pela (AGMA, 1989) no cálculo dos fatores de correção. Para o usuário, obter esses valores pela interpolação visual demandaria grande tempo e facilitaria erros, pois a cada nova variação nos parâmetros de entrada uma nova interpolação visual deveria ser efetuada. Como forma

de contornar este problema foram implementados algoritmos automáticos de interpolação no *EleMAQ*.

4.3.3.1 Interpolação Bilinear

Dada uma função $f(x, y)$ e conhecendo seu valor em quatro pontos (x_1, x_2, y_1, y_2) é possível utilizar interpolação linear em x e y (bilinear) para obter $f(x, y)$, onde $x \in [x_1, x_2]$ e $y \in [y_1, y_2]$. A precisão torna-se maior pela distância entre os valores. Uma representação gráfica pode ser visualizada na Figura 16. Observe que a interpolação bilinear se resume em obter o valor da função no ponto P , região interna ao quadrado formado pelos valores conhecidos de f (valores de extremidade).

Figura 16 – Interpolação Bilinear.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base na Figura 16, interpolando f na direção x , temos os valores de $f(x, y_2)$ e $f(x, y_1)$ (interpolação em x para os diferentes y) que podem ser calculados por meio das Equações 4.25. E então, uma nova interpolação linear é realizada com os valores obtidos de 4.25, na direção y . Para o cálculo de f no ponto P pode-se utilizar a Equação 4.26.

$$f(x, y_2) \approx \frac{(x_2 - x)}{(x_2 - x_1)} f(x_1, y_2) + \frac{(x - x_1)}{(x_2 - x_1)} f(x_2, y_2) \quad (4.25a)$$

$$f(x, y_1) \approx \frac{(x_2 - x)}{(x_2 - x_1)} f(x_1, y_1) + \frac{(x - x_1)}{(x_2 - x_1)} f(x_2, y_1) \quad (4.25b)$$

$$f(x, y) \approx \frac{(y_2 - y)}{(y_2 - y_1)} f(x, y_1) + \frac{(y - y_1)}{(y_2 - y_1)} f(x, y_2) \quad (4.26)$$

A interpolação bilinear foi utilizada pelo *EleMAQ* para obtenção dos valores de fator geométrico J (ver Seção 4.1.1). Analisando a Figura 2 nota-se que J , fixando o

ângulo de pressão, é função de duas variáveis (dentes da engrenagem acoplante e dentes da engrenagem acoplada). Portanto, seja x o número de dentes da engrenagem acoplante e y o número de dentes da engrenagem acoplada, temos que $J \rightarrow f(x, y)$, garantindo o uso das Equações 4.25 e 4.26. Isso só pode ser aplicado na região de cargas tipo A e para $x \geq 18$. Valores de x abaixo de 18 e para cargas tipo B não há a necessidade de interpolação bilinear visto que o fator J só depende do número de dentes da engrenagem acoplante. É importante observar também que para $\mu = 25^\circ$ não há a restrição $x \geq 18$ para cargas tipo A.

No algoritmo implementado pelo *EleMAQ* para obtenção de J , tem-se uma rotina que recalcula J para cada variação dos parâmetros de entrada realizada pelo usuário, garantindo velocidade e prevenção de erros no dimensionamento. No entanto, o software também permite ao usuário a mudança de qualquer valor calculado automaticamente.

Os valores principais de J que o *EleMAQ* utiliza para a interpolação estão disponíveis na forma de arquivos externos editáveis pelo usuário e sem a necessidade de recompilação do programa. A quantidade de pontos a serem interpolados depende do nível de aproximação requerido pelo usuário. Além de gráficos, (NORTON, 2004) disponibiliza valores tabelados de J para diferentes condições que podem ser preferidos pelo usuário na alimentação dos arquivos externos.

Utilizando a Figura 2a, a Tabela 2 mostra diferentes valores de $J(x, y)$ calculados por interpolação visual e pelo algoritmo automático do *EleMAQ*.

4.4 Interface com o Usuário

Para atender todas as necessidades do usuário de forma simples e intuitiva, o software possui uma interface gráfica desenvolvida em *WPF (Windows Presentation Foundation)*. Essa linguagem baseada em XML possui grandes vantagens para o desenvolvedor, uma vez que torna a interface independente do código interno do software, permitindo um trabalho simultâneo e sincronizado entre programador e designer. A janela principal do *EleMAQ* pode ser visualizada através da Figura 17.

O usuário pode criar um número ilimitado de elementos de máquinas conforme sua necessidade (atualmente apenas engrenagens cilíndricas de dentes retos e molas helicoidais de compressão). O software é dividido entre as seguintes seções:

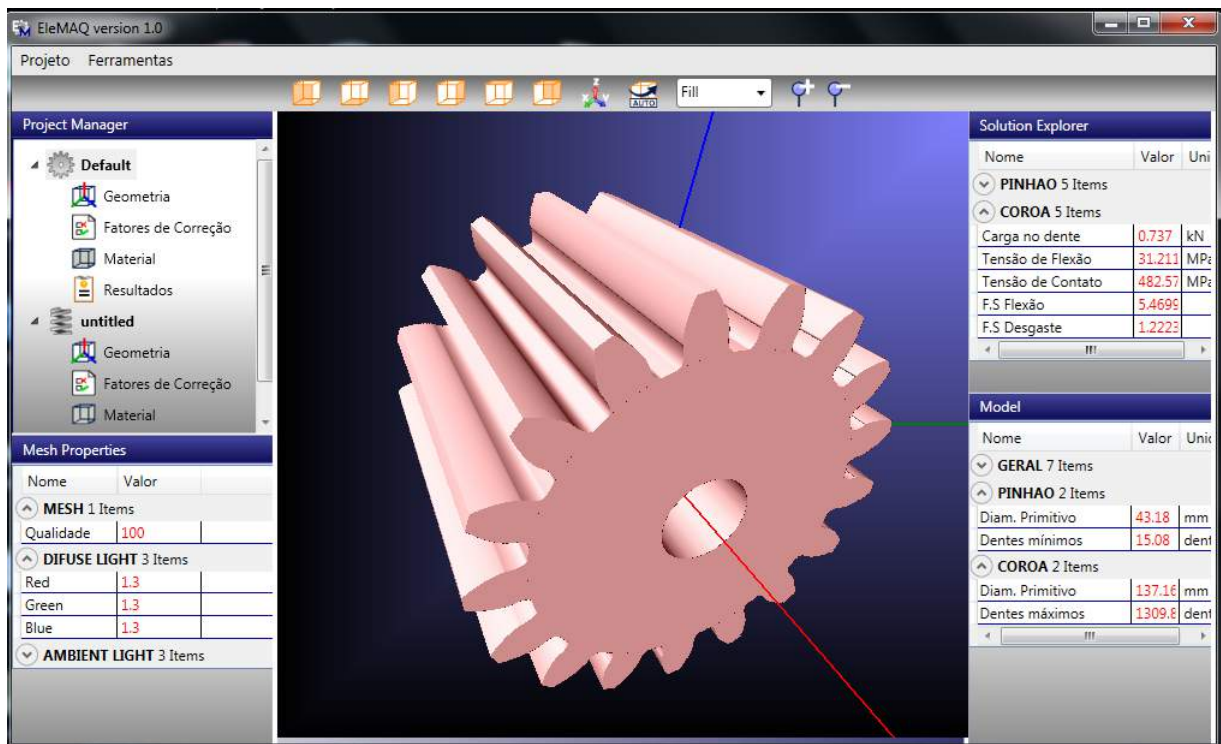
1. Project Manager
2. Mesh Properties
3. Solution Explorer
4. Model

Tabela 2 – Valores calculados de J por interpolação

	Interpolação Visual	Algoritmo do EleMAQ
J(19,50) $\mu = 20^\circ$, Tipo A	0,34	0,335
J(33,85) $\mu = 20^\circ$, Tipo A	0,41	0,412
J(70,25) $\mu = 20^\circ$, Tipo A	0,43	0,433
J(16,y) $\mu = 20^\circ$, Tipo A	0,275	0,275
J(23,y) $\mu = 25^\circ$, Tipo B	0,315	0,3165

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 17 – Janela Principal do software



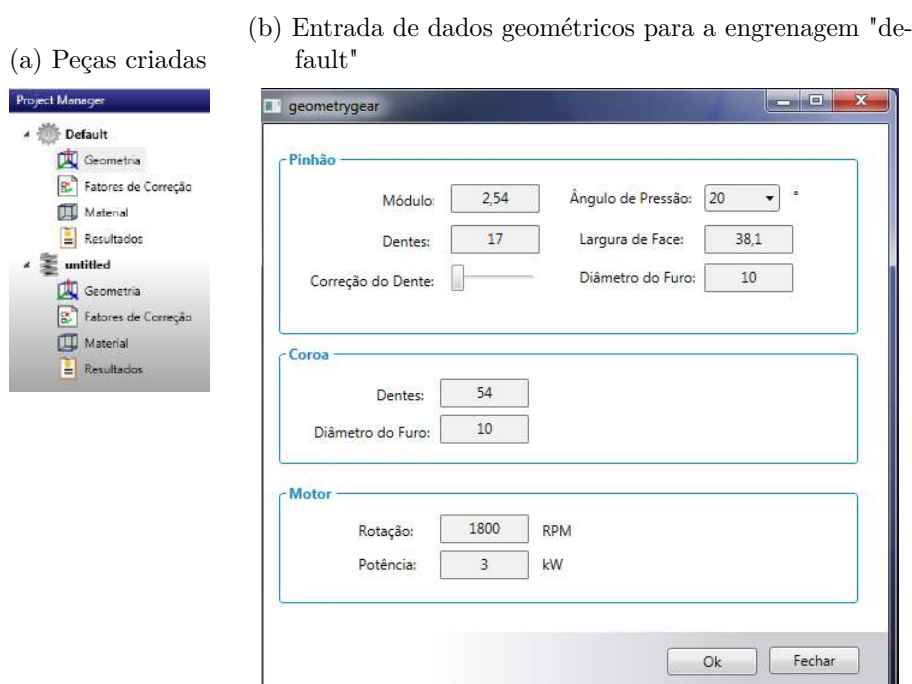
Fonte: print screen da tela.

4.4.1 Project Manager

Essa seção é responsável por gerenciar todos os elementos criados e suas respectivas entradas (geometria, fatores de correção, material e resultados). O usuário deve entrar com todos os parâmetros necessários para a análise da peça.

A Figura 18a mostra duas peças criadas, com os nomes de "default" e "untitled", engrenagem e mola respectivamente. Já na Figura 18b tem-se o processo de entrada de dados geométricos de "default". Embora nesse caso temos duas peças, um número ilimitado de engrenagens e molas poderiam ter sido criados.

Figura 18 – Processos dentro de Project Manager



Fonte: print screen da aplicação

O mesmo procedimento é realizado para a entrada de outros dados. Para cada ícone dentro da peça tem-se um formulário específico conforme mostrado anteriormente.

4.4.2 Mesh Properties

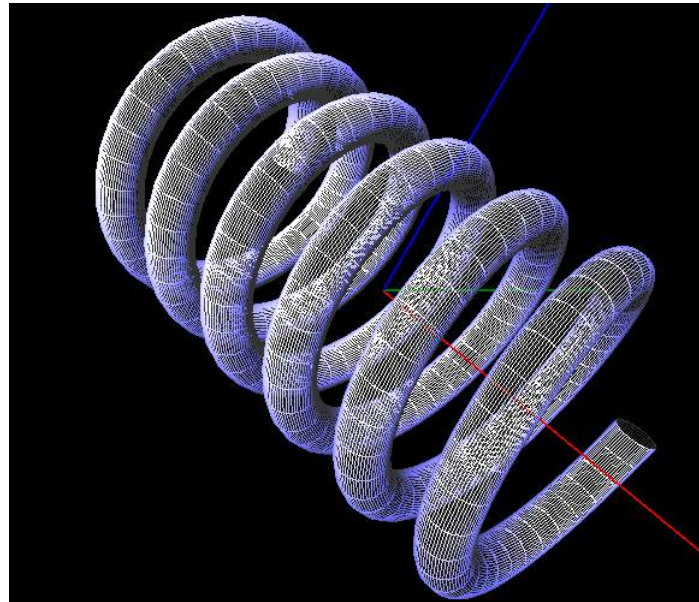
Essa seção é destinada somente para a alteração da malha computacional e visualização gráfica do objeto. Nela pode-se alternar a cor da luz incidente e qualidade da malha, que será utilizada em uma posterior exportação em STL. O usuário pode escolher ver o objeto em sua forma sólida, linhas ou pontos. A Figura 19 mostra alterações de iluminação e malha de uma mola.

Figura 19 – Processos dentro de Mesh Properties

(a) Parâmetros de malha e iluminação

Mesh Properties	
Nome	Valor
MESH 1 Items	
Qualidade	100
DIFUSE LIGHT 3 Items	
Red	1.3
Green	1.3
Blue	1.3
AMBIENT LIGHT 3 Items	
Red	0.8
Green	0.8
Blue	0.8

(b) Objeto após alterações



Fonte: print screen da aplicação

4.4.3 Solution Explorer

Após todas as entradas de dados o usuário pode iniciar a análise. Embora haja parâmetros de cálculo não inseridos, o software faz a seleção automática com base nas suas escolhas compiladas. Para cada alteração em Project Manager, todos os resultados são recalculados de forma autônoma.

Essa Seção mostra todos os parâmetros de saída da análise (resultados) juntamente com o fator de segurança do projeto. Isso pode ser visualizado na Figura 20.

Figura 20 – Processos dentro de Mesh Properties

Solution Explorer		
Nome	Valor	Unid
PINHAO 5 Items		
Carga no dente	0.737	kN
Tensão de Flexão	44.843	MPa
Tensão de Contato	494.19	MPa
F.S Flexão	4.0696	
F.S Desgaste	1.3155	
COROA 5 Items		
Carga no dente	0.737	kN
Tensão de Flexão	31.211	MPa
Tensão de Contato	482.57	MPa
F.S Flexão	5.4699	
F.S Desgaste	1.2223	

Fonte: print screen da aplicação

4.4.4 Model

A janela Model também lista parâmetros de saída no dimensionamento. No entanto, são parâmetros calculados da geometria do modelo. Por exemplo, nas engrenagens, Adendo e Dedendo não são fornecidos pelo usuário e sim calculados com base nos dados geométricos de entrada. A Figura 21 ilustra o formato geral dessa janela.

Figura 21 – Processos dentro de Model



Nome	Valor	Unid
GERAL 7 Items		
Adendo	2.54	mm
Dedendo	3.175	mm
Dist. Centros (C)	90.17	mm
Razão de Contato (mp)	1.641	
Passo frontal	7.98	mm
Passo base	7.498	mm
Comp. de Acao (Z)	12.31	mm
PINHAO 2 Items		
Diam. Primitivo	43.18	mm
Dentes mínimos	15.08	dentes
COROA 2 Items		
Diam. Primitivo	137.16	mm
Dentes máximos	1309.8	dentes

Fonte: print screen da aplicação

5 Resultados

5.1 Geração de Arquivos STL

Os arquivos STL (StereoLithography) são representações geométricas de objetos gerados computacionalmente em um formato de arquivo *.stl*. Para sua criação, o objeto exportado deve ser elaborado com a malha superficial na forma triangular. A Figura 10 é um exemplo desse processo. Observa-se que sua superfície é formada pelo conjunto de triângulos adjacentes.

Para a formação de arquivos STL devem ser fornecidas as componentes do vetor normal para cada triângulo da malha. Para os programas interpretadores de STL, o vetor normal é utilizado para a correta orientação das faces em conjunto com um modelo de iluminação. A exportação pode ocorrer no formato binário ou na forma de um arquivo de texto de extensão *.stl*. O *EleMAQ* permite ao usuário exportar qualquer desenho elaborado (engrenagem ou mola) no formato STL.

O uso de arquivos com extensão padronizada como o STL permite o intercâmbio entre os desenhos produzidos por diversos softwares. Embora cada programa tenha suas particularidades, uma extensão padrão permite que variados softwares interpretem da mesma maneira os arquivos. Um exemplo disso pode ser visto na Figura 22 em que o desenho de uma mola exportada pelo *EleMAQ* é interpretada com o uso do *SolidWorks*.

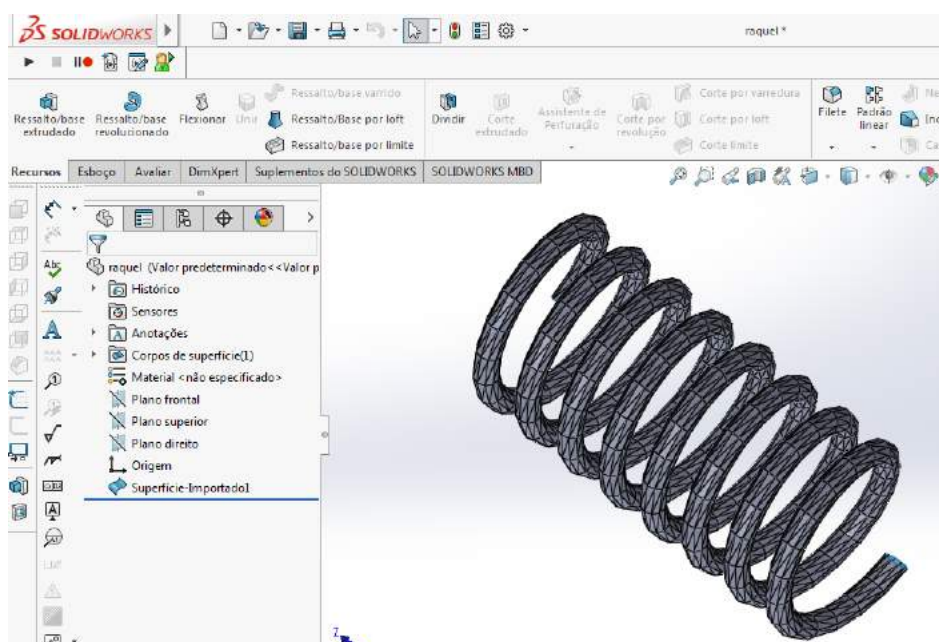
Além disso, softwares de análise por elementos finitos podem usar geometrias STL importadas para geração de malha sobre o sólido.

5.1.1 Impressão 3D

Impressoras 3D são dispositivos capazes de transformar objetos tridimensionais modelados por computador em objetos sólidos reais, "palpáveis". Dos diversos tipos de impressoras 3D, destaque-se aquelas que podem imprimir em um material plástico conhecido como ABS.

O uso dessas máquinas é muito recente e vem se desenvolvendo progressivamente nos últimos anos. As principais aplicações dessa máquina são: produção de moldes para fundição, brinquedos e peças de baixa resistência mecânica. O custo extremamente barato e a velocidade de geração de moldes são grandes atrativos para o uso dessa tecnologia.

Para a impressão 3D é preciso fornecer o modelo computacional da peça a ser impressa. O principal formato de arquivo aceito pela grande maioria de impressoras é o STL. Dessa forma, os desenhos exportados pelo *EleMAQ* são compatíveis com as impressoras

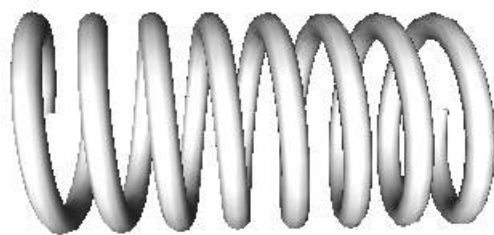
Figura 22 – Geometria de uma mola gerado pelo *EleMAQ* e importada pelo *SolidWorks*.

Fonte: Elaborado pelo Autor utilizando o *SolidWorks*.

3D e, portanto, podem ser impressos. Na Figura 23 é mostrado modelos computacionais de molas e engrenagem gerados pelo software e impressos pela impressora.

Figura 23 – impressão 3D de uma mola gerada pelo *EleMAQ*.

(a) Modelo computacional



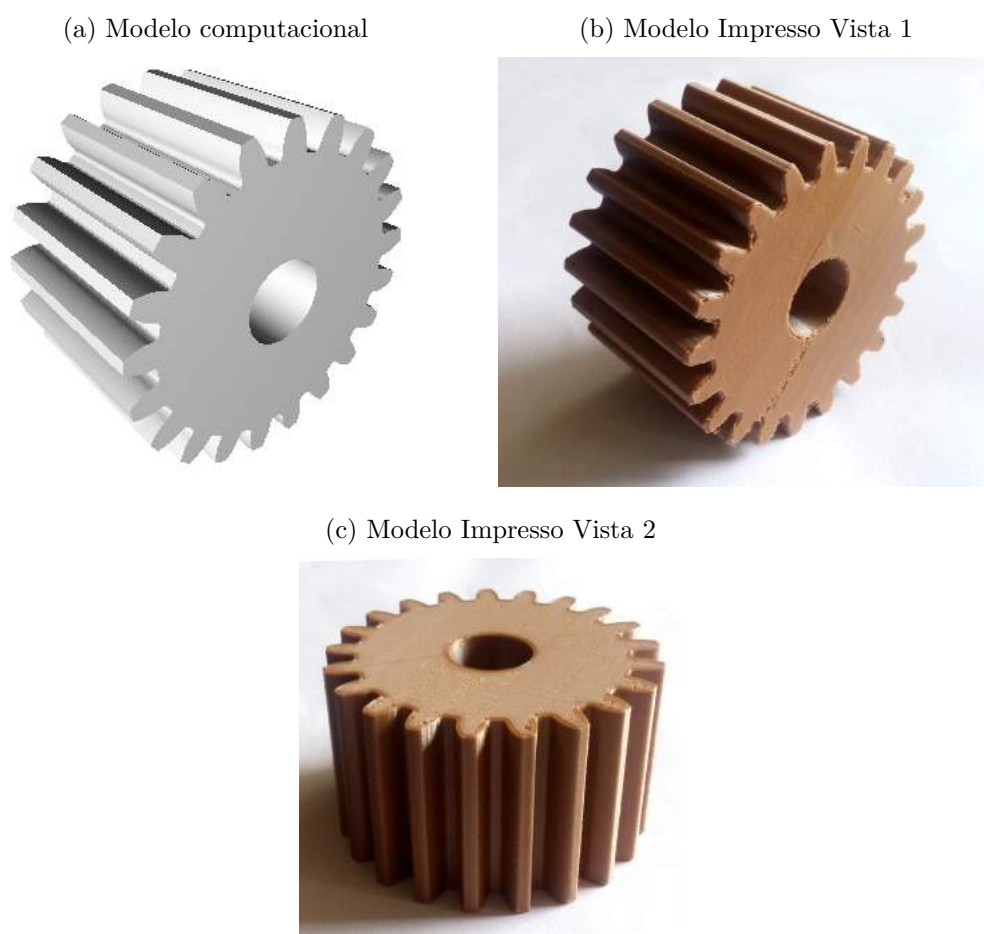
(b) Modelo Impresso



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Modelos de elementos de máquinas impressos podem ser utilizados diretamente na montagem de uma máquina a fim de determinar o posicionamento correto sem a necessidade dessas peças prontas. Além disso, as propriedades do material ABS podem ser inseridas no *EleMAQ* para o projeto de elementos de máquinas em plástico. Isso pode ser usado em máquinas que precisam de peças de baixa resistência mecânica. O custo aproximado da produção de cada peça mostrada nas figuras foi de 8 reais, o que é extremamente barato em comparação com outros métodos de fabricação.

Nota-se a diferença de qualidade nos modelos impressos. Na Figura 23 tem-se um

Figura 24 – impressão 3D de uma engrenagem gerada pelo *EleMAQ*.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

grau de acabamento inferior ao da Figura 24. Isso deve ao fato de a impressora ter de construir uma "sustentação" para imprimir peças com partes sem apoio de base, como a mola. A retirada da sustentação ao final desse processo pode impactar na qualidade do acabamento da peça. No caso de engrenagens, é realizada uma extrusão no sentido da largura de face, mantendo um apoio de base e excluindo a necessidade de uso da sustentação.

5.2 Armazenamento de Dados

Todo software possui um tipo de saída de dados, seja um arquivo de texto ou um vídeo. Para qualquer um destes, os dados armazenados pelo computadores são vistos de forma binária, e é do software o papel de decodificar tais informações e transformar na forma requerida pelo usuário. O armazenamento de tais informações é o processo final de um programa. O *EleMAQ* permite ao usuário o armazenamento de dados nas seguintes formas:

1. Dados Binários
2. Imagens
3. Arquivos de textos

O item 1 é utilizado de forma que o usuário pode terminar um projeto em uma data posterior à data inicial, permitindo armazenar, recuperar e alterar os dados. Para isso o software exporta o projeto no formato binário com extensão *.elmaq*. Ter uma extensão padronizada contribui para a interpretação do computador de forma que o mesmo escolha programas adequados para a abertura dos arquivos. Portanto, o usuário pode criar diversas molas e engrenagem, salvar o projeto e enviar para um outro usuário que possua o *EleMAQ* instalado em sua máquina. Ambos vão visualizar e editar o projeto da mesma forma.

Os itens 1 e 2 são utilizados para o armazenamento de gráficos, geometrias e pontos gerados pelo software. O usuário pode, por exemplo, gravar um gráfico da curva do material de mola ou então gravar os pontos dessa curva. Para isso são utilizadas as saídas de arquivos desses tipos.

Ao final do processo de dimensionamento de uma peça através do software, o usuário pode também optar por guardar os resultados obtidos na forma de um relatório técnico. O *EleMAQ* permite a exportação de relatórios nos formatos *.docx* ou *.pdf* para todos os tipos de peças. O primeiro é totalmente personalizável e pode ser aberto em qualquer software que suporte tal formato, embora o *Microsoft Word* seja o mais utilizado para usuários que possuem o sistema operacional *Windows*. O segundo tipo de formato não é editável, mas além de ser padrão, pode ser gerado em um tempo de processamento mais curto.

5.3 Estudos de Caso

Por razões de teste e validação, o software foi utilizado em diferentes problemas de dimensionamento, mostrando bastante eficácia na resolução destes. Observou-se uma grande redução de tempo e ganho de controle das variáveis quando comparado com outros métodos de resolução.

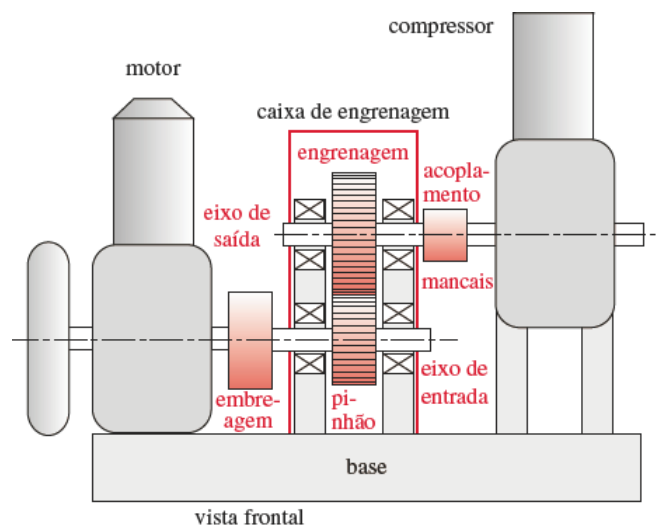
5.3.1 Caso 1

Esse caso consiste na escolha de um par de engrenagem ideal para compor um equipamento mecânico. O problema foi retirado do exemplo 12.12 de (NORTON, 2004).

- Problema: Projetar um par de engrenagens retas para o redutor de compressor mostrado na Figura 25. Especifique materiais e tratamentos apropriados.

- Dados: O torque máximo no eixo de saída é de 66,1 Nm. A redução requerida é de 2,5:1. A velocidade do eixo de saída é de 1500 rpm.
- Hipóteses: Vida de 10 anos para as engrenagens para um turno de operação. Serão utilizados dentes de profundidade completa padronizados pela AGMA. Faça $Q_v = 10$. Tanto o pinhão quanto a coroa serão endurecidos por completo.

Figura 25 – Desenho esquemático da região do motor do compressor de ar.



Fonte: (NORTON, 2004)

Ao desprezar perdas por atrito, a potência máxima do motor foi estimada por meio da seguinte relação:

$$P = \tau \cdot \frac{R}{60} = 66,1 \frac{1500}{60 \cdot 2\pi} = 263W = 0,263kW \quad (5.1)$$

De primeira análise, foi utilizado um pinhão de 17 dentes (menor possível para evitar interferência sem adelgaçamento). Contudo, para obter uma redução de 2,5:1, é preciso uma coroa com $2,5 \cdot 17 = 42,5$ dentes, o que não é possível. Portanto, optou-se por um pinhão de 18 dentes e coroa com 45 para manter a redução requerida. O módulo e espessura das engrenagens foram estimados em 1 e 20 mm, respectivamente, para o início da análise. Os dados de entrada da geometria podem ser visualizados através da Figura 26.

Para definir os fatores de correção, foram feitas algumas considerações:

- Choque da máquina motora e acionante leves
- Confiabilidade de 99%
- Unidades comerciais, fechadas e de precisão

Figura 26 – Dados geométricos de entrada.

Fonte: Print screen da aplicação *EleMAQ*.

- Cargas compartilhadas no dente (HPSTC)

A inserção dos fatores de correção pode ser vista nas Figuras 27 e 28. Todos as caixas de textos desativadas (em cinza) representam cálculos automáticos realizados na ocorrência de qualquer alteração dos parâmetros de entrada.

Com a geometria e fatores de correção definidos é preciso escolher um material para as peças. A escolha é de responsabilidade do usuário, no entanto deve ser realizada de forma a obter peças menores com um bom custo-benefício. (AGMA, 1989) traz especificações de materiais comumente utilizados na indústria. Foi escolhido um aço AGMA totalmente endurecido a 250HB, grau 1. Para obtenção dos valores limite de tensão, (AGMA, 1989) traz a equações que relacionam a qualidade de fabricação e dureza obtida. As tensões admissíveis de flexão e contato para o aço escolhido podem ser calculadas pelas Equações 5.2 e 5.2 respectivamente.

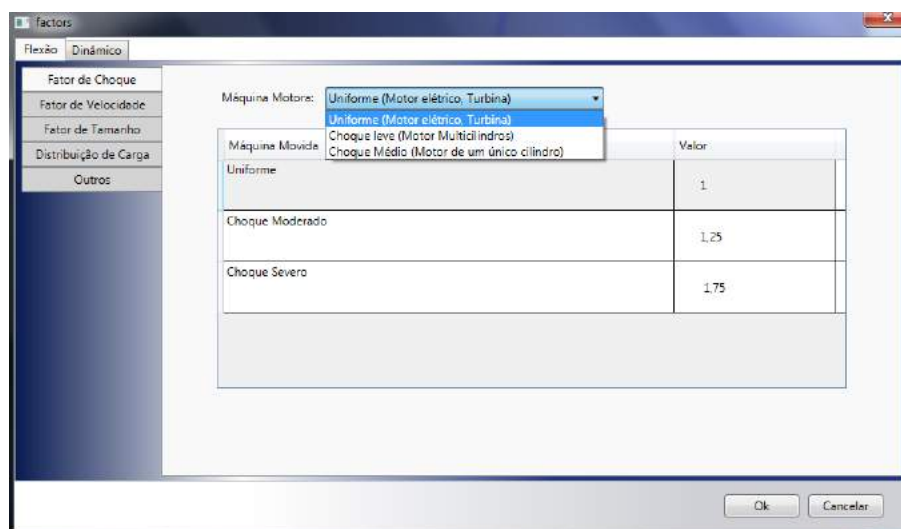
$$S_t = 0,533HB + 88,3 = 221,55Mpa \quad (5.2)$$

$$S_c = 2,22HB + 200 = 755Mpa \quad (5.3)$$

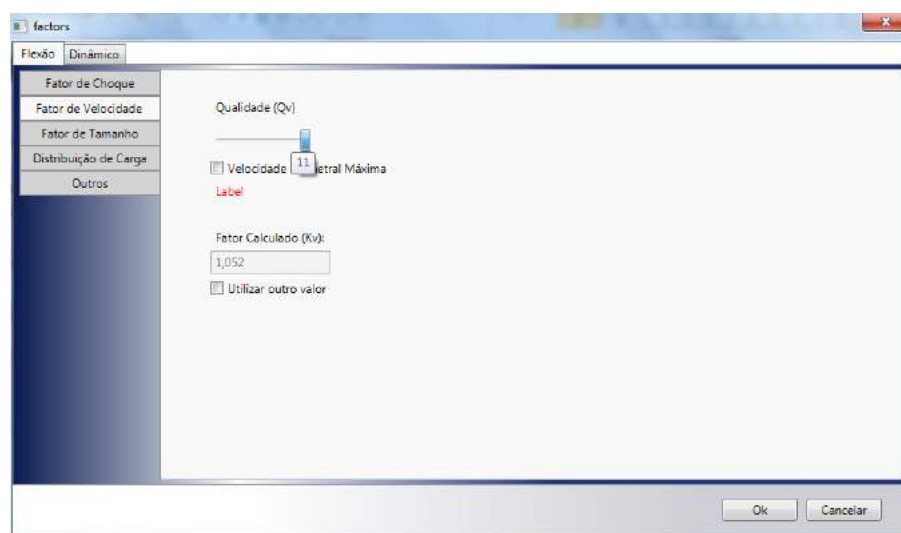
A entrada de dados do material no software pode ser vista na Figura 29.

Figura 27 – Aplicação dos fatores de correção do dimensionamento, parte 1.

(a) Fator de Choque



(b) Qualidade, Fator de Velocidade



Fonte: Print screen da aplicação *EleMAQ*.

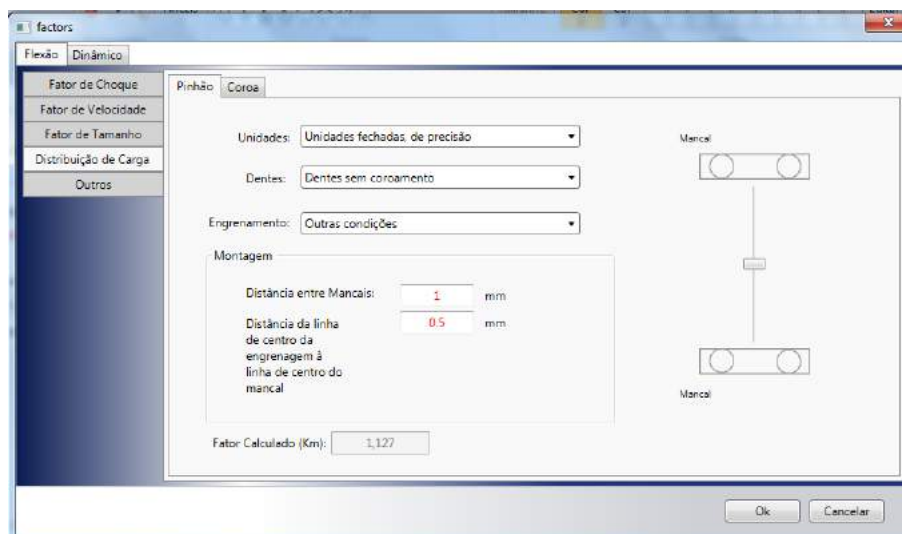
As tensões limite são calculadas para 10^7 ciclos. O problema requer uma vida útil de 10 anos com um turno de operação. Portanto, para um turno de 6 horas, tem-se aproximadamente $1,810^9$ ciclos para o pinhão. Essa condição foi inserida no software conforme mostrado na Figura 30.

Com todos os dados inseridos, a função *solver* do *EleMAQ* calculou os parâmetros de saída conforme mostrado na Figura 31.

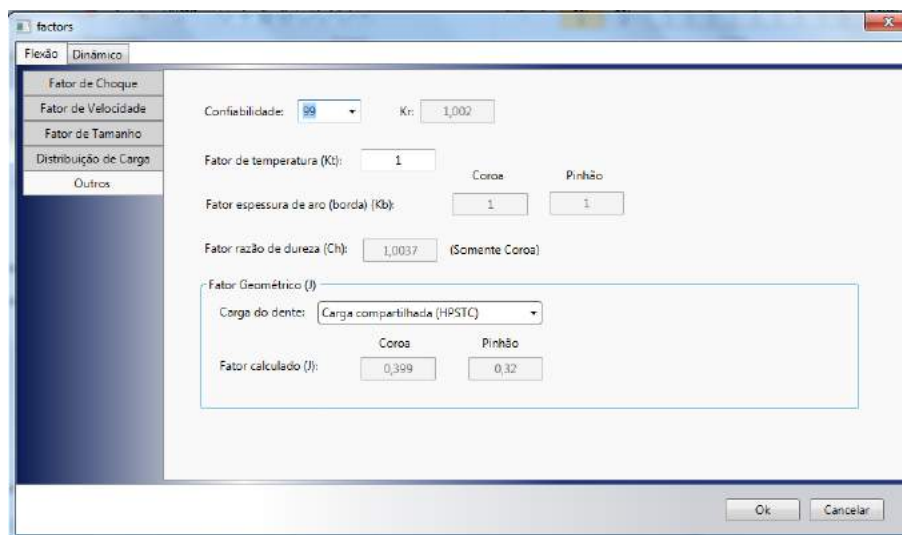
Pôde-se observar através da Figura 31 que os fatores de segurança na flexão foram satisfatórios para ambas as engrenagens. No entanto, para o desgaste, foi obtido fatores de segurança próximos de 1, o que torna o projeto inviável e com alto risco de desgaste excessivo e crateramento. O que se pode fazer para corrigir este problema é aumentar

Figura 28 – Aplicação dos fatores de correção do dimensionamento, parte 2.

(a) Fator de distribuição de carga



(b) Confiabilidade



Fonte: Print screen da aplicação *EleMAQ*.

a dureza do material que conseqüentemente aumentará a tensão admissível de contato. Uma outra alternativa é alterar o módulo e a largura de face das engrenagens de forma a aumentar suas dimensões sem alterar o material.

Para que o usuário não tenha que procurar a geometria ideal manualmente, o software possui funções de otimização que realizam iterações em busca dos parâmetros geométricos ideais que satisfaçam as condições do problema. Para esse processo, o usuário deve fornecer apenas o material, condições de trabalho (confiabilidade, fator de temperatura e outros), potência e rotação no pinhão, fator de segurança na flexão e desgaste mínimos e redução de movimento. O *EleMAQ* realizará diversas iterações em busca do número de dentes das engrenagens que criam a redução do módulo e da largura de face e mantém

Figura 29 – Inserção do material.

The screenshot shows a software window titled 'material' with two sections: 'Pinhão' and 'Coroa'. Each section contains the following input fields:

- Nome do Material: aço AGMA grau 1 endurecido completamente a 250HB
- Dureza Núcleo: 250 HB
- Dureza Superfície: 250 HB
- Poisson: 0,3
- Tensão de Flexão Admissível: 221,55 Mpa
- E: 207 Gpa
- Tensão de Contato Admissível: 755 Mpa

At the bottom of the window are 'Ok' and 'Cancel' buttons.

Fonte: Print screen da aplicação *EleMAQ*.

Figura 30 – Inserção das condições de vida útil e ciclos para as engrenagens.

The screenshot shows the same application window with additional input fields for working conditions and cycles:

- Pinhão:**
 - Regime de trabalho: 6 hrs/dia
 - Fator ciclagem de tensão (Yn): 0,846 Flexão
 - Tempo de vida: 10 anos
 - Fator ciclagem de tensão (Zn): 0,888 Crateramento
 - ciclos: 1,8e+9
- Coroa:**
 - ciclos: 7e+8
 - Fator ciclagem de tensão (Yn): 0,872 Flexão
 - Fator ciclagem de tensão (Zn): 0,907 Crateramento

Fonte: Print screen da aplicação *EleMAQ*.

o fator de segurança desejado. A largura de face, por convenção, é escolhida de forma a ficar entre 3 e 5 vezes o passo frontal linear das engrenagens. Nesse processo de otimização o usuário pode escolher a meta dos cálculos: obter o menor módulo possível ou a menor espessura.

Figura 31 – Resultados obtidos da análise preliminar.

Solution Explorer		
Nome	Valor	Unid
^ PINHAO 5 Items		
Carga no dente	0.186	kN
Tensão de Flexão	66.881	MPa
Tensão de Contato	611.80	MPa
F.S Flexão	2.8133	
F.S Desgaste	1.0985	
^ COROA 5 Items		
Carga no dente	0.186	kN
Tensão de Flexão	52.034	MPa
Tensão de Contato	602.58	MPa
F.S Flexão	3.7266	
F.S Desgaste	1.1391	

Fonte: Print screen da aplicação *EleMAQ*.

Estabeleceu-se que para o vigente problema é requerido um fator de segurança mínimo de 2 para flexão e desgaste e menor módulo possível (limitação de espaço na montagem). A entrada das condições de otimização pode ser visualizada na Figura 32, onde são definidos todos os parâmetros necessários para o início da busca da melhor geometria. Isso diminui o trabalho manual do usuário.

Figura 32 – Entrada dos parâmetros de otimização.

NORTON - 12.12

Otimizador

Restrições

Fator de segurança requerido na Flexão:

Fator de segurança requerido no Desgaste:

Intervalo aceitável para a Espessura (largura de Face)

entre do passo circular

Número de dentes inicial para pinhão:

Variação do Módulo

Min: Incremento:

Max:

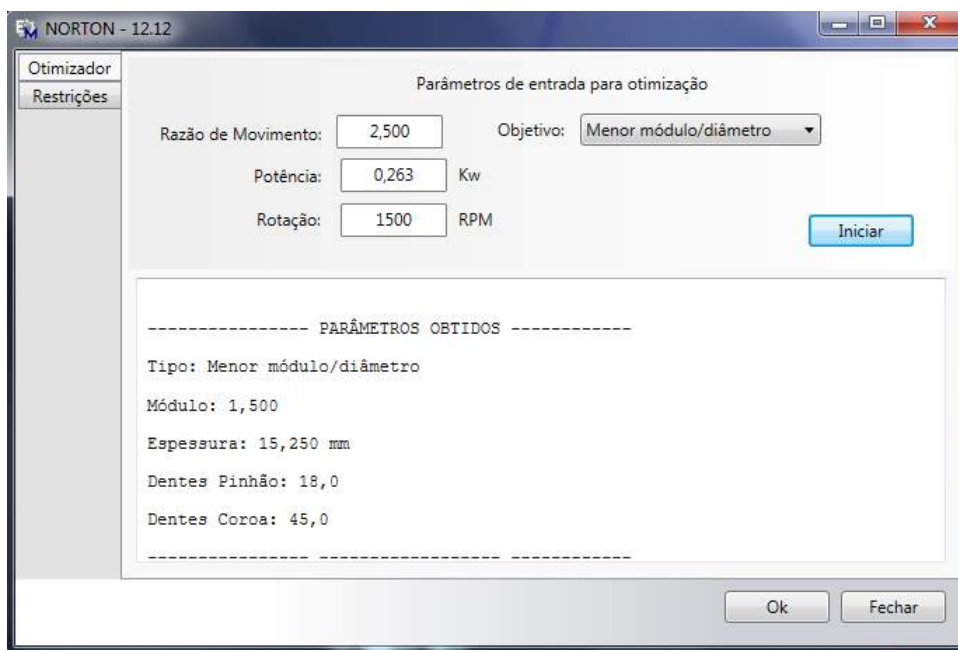
Ok Fechar

Fonte: Print screen da aplicação *EleMAQ*.

Ao final do processo de otimização foram calculados o módulo e espessura que melhor atendem ao problema, conforme mostra a Figura 33.

Com isso, foi escolhido um módulo de 1,5 e uma espessura de aproximadamente 16 mm. Os resultados obtidos para essa nova configuração podem ser vistos na Figura

Figura 33 – Resultados da otimização.



Fonte: Print screen da aplicação *EleMAQ*.

34. Observa-se que foi obtido fatores de segurança mínimos desejados no processo de otimização.

Figura 34 – Resultados finais do projeto.

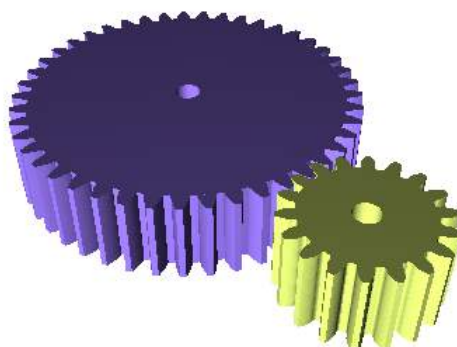
Solution Explorer		
Nome	Valor	Unid
^ PINHAO 5 Items		
Carga no dente	0.124	kN
Tensão de Flexão	18.857	MPa
Tensão de Contato	324.86	MPa
F.S Flexão	9.9196	
F.S Desgaste	2.0596	
^ COROA 5 Items		
Carga no dente	0.124	kN
Tensão de Flexão	14.633	MPa
Tensão de Contato	319.55	MPa
F.S Flexão	13.175	
F.S Desgaste	2.1386	

Fonte: Print screen da aplicação *EleMAQ*.

Os fatores de segurança obtidos na flexão foram muito superiores aos obtidos em relação ao desgaste. Isso se deve ao fato do material utilizado ser pouco resistente à tensões de contato. Através de um tratamento térmico, o fator de segurança pode ser melhorado em conjunto com o aumento da dureza superficial das engrenagens.

Com a utilização do recurso de exportação da geometria em STL conforme visto na Seção 5.1, é possível visualizar o modelo 3D do conjunto das engrenagens escolhidas para o problema, conforme mostra a Figura 35.

Figura 35 – Conjunto 3D das engrenagens



Fonte: Print screen da aplicação (FREE..., 2017)

5.3.2 Caso 2

Em um segundo estudo de caso as propriedades de uma mola existente no estoque de uma fábrica foram analisadas a fim de catalogá-la com todos seus parâmetros de qualidade. Suponha então que somente a geometria (medição das dimensões da mola) e o material na qual foi produzida sejam conhecidos. A mola pode ser vista na Figura 36.

Figura 36 – Mola do estoque para análise



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após um processo de medição foi possível determinar suas dimensões principais, conforme mostra na Tabela 3.

As dimensões foram inseridas no software em conjunto com as condições de acabamento das extremidades. Isso pode ser visualizado na Figura 37.

A escolha das condições de operação da mola pode variar conforme as necessidades do projetista. Para esse caso foi utilizado o critério de Sines para a fadiga e fator de

Tabela 3 – Medição: Geometria da mola

Dimensão	Valor
Diâmetro do fio	6 mm
Diâmetro Médio	33,8 mm
Comprimento total	78,5 mm
Espiras	6,5

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 37 – Inserção dos dados geométricos da mola

The image shows a software window titled 'Geometria' with two main sections: 'Desenho' and 'Carregamento'. In the 'Desenho' section, there are four input fields: 'Diâmetro do Fio' (6 mm), 'Número de Espiras' (6,5), 'Diâmetro Médio das Espiras' (33,8 mm), and 'Comprimento Total' (78,5 mm). Below these is a dropdown menu for 'Extremidades' which is currently open, showing five options: 'Planas e Esmerilhadas' (selected), 'Planas', 'Planas e Esmerilhadas', 'Esquadradas', and 'Esquadradas e Esmerilhadas'. The 'Carregamento' section has two input fields: 'Carga Estática' (40 N) and 'Carga Mínima (Pré-carga)' (10 N). At the bottom of the window are 'Ok' and 'Fechar' buttons.

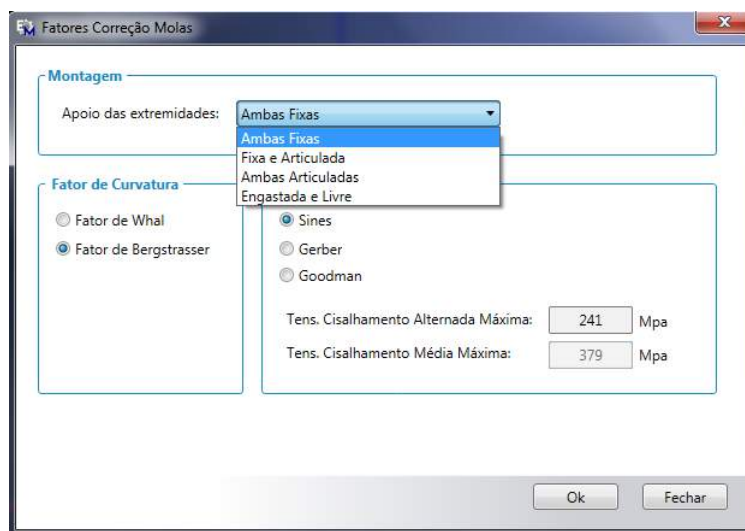
Fonte: Print screen da aplicação *EleMAQ*

curvatura de Bergstrasser por serem mais conservativos (BUDYNAS; NISBETT, 2009). Além disso, para a análise de flambagem foi definido que a mola deve ser montada com ambas extremidades apoiadas. Contudo, a correção de flambagem pode ser feita com a introdução de um pino no interior da mola. A Figura 38 mostra a inserção desses dados no software.

Materiais de mola possuem resistência à tração em função do diâmetro do fio. A Equação 4.15 fornece uma boa estimativa para a determinação dessa resistência conforme mostrado anteriormente.

Segundo as informações contida no estoque, a mola do vigente problema foi produzida utilizando o aço ASTM A229, o qual é um material barato e de uso geral. Para estimar sua resistência à tração (BUDYNAS; NISBETT, 2009) mostra uma tabela que relaciona diferentes tipos de materiais com suas constantes A e m. As propriedades encontradas

Figura 38 – Condições de operação da mola



Fonte: Print screen da aplicação *EleMAQ*

para o ASTM A229 estão contidas na Tabela 4.

Tabela 4 – Dados do aço mola ASTM A229

Propriedade	Valor
Resistência à torção (% de Sut)	85-90
A ($Mpa \cdot mm^m$)	1855
m	0,187
E (Gpa)	196,7
G (Gpa)	77,2

Fonte: (BUDYNAS; NISBETT, 2009)

A inserção dos dados do material no software pode ser vista através da Figura 39. O *EleMAQ* fornece ao usuário a imagem da curva do material conforme a Equação 4.15. Para maior confiança foi utilizado o limite inferior do intervalo da resistência à torção (85%) conforme mostrado na Tabela 4.

Após a inserção de todos os dados foi possível obter parâmetros de qualidade importantes, conforme mostra na Tabela 5. Esses dados devem ser armazenados junto à mola para futuros testes experimentais, pois somente os ensaios revelam o real comportamento da peça. É importante lembrar que os dados apresentados fornecem apenas estimativas, servindo como base no projeto de molas. Contudo, direcionam os ensaios, reduzindo esforço e tempo.

Analisando os resultados obtidos foi possível observar que a força no comprimento

Figura 39 – Entrada de dados do material.

The screenshot shows the 'Materiais Mola' application window. The 'Nome do Material' field contains 'Fio temperado e revenido em óleo A229'. The 'Tipo' section has 'Variável' selected. The 'Tração' section includes 'Diam. Fio: 6 mm', 'Limite de Resist. à Tração inicial: 1855 Mpa', 'Expoente m: 0,187', and 'Limite de resistência à tração corrigido pelo diâmetro do fio: 1326,87 Mpa'. The 'Torção' section includes 'Percentual da Tração: 85 %', 'Limite de Resistência à Torção: 1127,84 Mpa', 'Módulo de Young (E): 196,7 Gpa', and 'Módulo de Cisalhamento (G): 77,2 Gpa'. A 'Gerar curva' button is located below the input fields. The 'Curva do Material' graph plots 'Limite de Resist. à Tração (Mpa)' on the y-axis (0 to 3000) against 'Diâmetro do fio (mm)' on the x-axis (0,9 to 9,9). The curve shows a decreasing trend from approximately 2800 Mpa at 0,9 mm to about 1200 Mpa at 9,9 mm.

Fonte: Print screen da aplicação *EleMAQ*.

Tabela 5 – Resultados obtidos pelo *EleMAQ*.

Parâmetro	Valor
Constante Elástica k (N/mm)	71,97
Força Máxima suportada (N)	2253,5
Força no Comprimento Fechado (N)	2842,9
Fator de Segurança (Estático)	0,8
Frequência Natural (Hz)	399,15

Fonte: Elaborado pelo Autor.

fechado é superior à força máxima suportada. Portanto, o fator de segurança estático é inferior ao recomendado. Dessa forma, a mola não deve operar em sua total deflexão (completamente fechado) porque isso causaria uma falha de cisalhamento no fio. O ideal seria redesenhar a mola uma vez que seu material já está definido. Em caso de um projeto, para aumentar o fator de segurança o projetista pode utilizar um material mais resistente, aumentar as espiras entre outros parâmetros. Em caso de carregamento repetido deve-se ter cautela ao excitar a mola com uma frequência próxima à natural para evitar severas vibrações por ressonância.

5.4 Relatórios Técnicos

A fim de tornar fácil o intercâmbio e armazenamento de informações o *EleMAQ* permite ao usuário imprimir relatórios técnicos de cada elemento de máquina projetado. Para mostrar a utilização desse recurso, foram gerados relatórios para ambos os casos mostrados na seção 5.3. O Apêndice A mostra um relatório em DOCX gerado para o caso 1 e o Apêndice B mostra o mesmo tipo para o Caso 2.

6 Conclusão

O *EleMAQ* é um software altamente eficaz para o auxílio na resolução de problemas da engenharia mecânica. A visualização gráfica das peças e a possibilidade de exportação da geometria em STL é um recurso muito útil para a fabricação de peças e permite a exportação para impressoras 3D, que por sua vez, podem ser utilizadas na criação de moldes de fundição e peças de baixa resistência para compor diferentes tipos de máquinas. Além disso, o formato STL permite boa integração da geometria do projeto com outros softwares. O processo de otimização mostrado em engrenagens serviu como um ótimo recurso para diminuir o trabalho manual do usuário na busca do par de engrenagens ideal. Espera-se que a livre distribuição do software permita sua evolução, com a inclusão de outros tipos de elementos de máquinas. Sendo assim, o *EleMAQ* seria uma plataforma extremamente útil para projetistas, engenheiros e todos que necessitem de auxílio em seus projetos mecânicos.

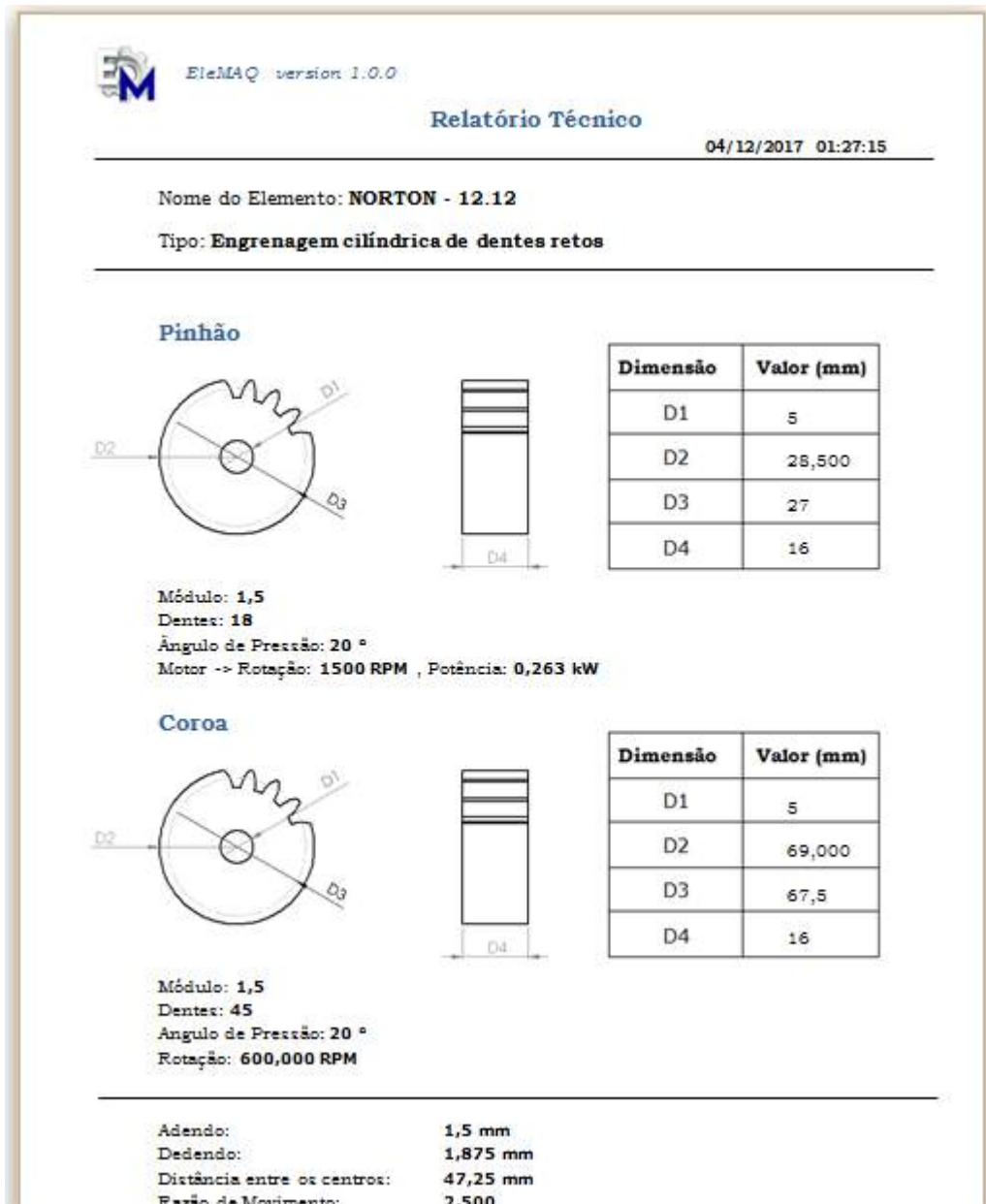
Referências

- AGMA, .-B. S. *Geometry factors for determining the pitting resistance and bending strength of spur, helical and herringbone gear teeth*. [S.l.]: Alexandria, Va, 1989. Citado 4 vezes nas páginas 23, 24, 36 e 48.
- BEER E. RUSSEL JOHNSTON, J. F. P. *Resistencia dos Materiais - Edicao: 2*. [S.l.: s.n.], 1925. Citado na página 19.
- BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. *Elementos de máquinas de Shigley*. [S.l.]: AMGH Editora, 2009. Citado 8 vezes nas páginas 20, 24, 26, 27, 28, 31, 55 e 56.
- FREE Online STL View. 2017. <<https://www.viewstl.com/>>. Acesso em 14 de Novembro de 2017. Citado na página 54.
- GEOMETRIC Factor J in Spur Gears. 2017. <<http://help.autodesk.com/view/INVNTOR/2017/ENU/?guid=GUID-FF9F26D7-79E6-44C8-A888-3F83D86CD729>>. Acesso em 14 de Novembro de 2017. Citado na página 23.
- GNU, General Public License. 2017. <<https://www.gnu.org/philosophy/selling.pt-br.html>>. Acesso em 01 de Dezembro de 2017. Citado na página 16.
- JÚNIOR, F. I. da S.; BEZERRA, R. de A. Projeto de engrenagens de dentes retos com perfil evolvental. 2015. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 31.
- MANSSOUR, I. H.; COHEN, M. Introdução à computação gráfica. *RITA*, v. 13, n. 2, p. 43–68, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 34.
- NORTON, R. *Projeto de Máquinas: Uma Abordagem*. Bookman, 2004. ISBN 9788536302737. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=VpUCIGwm8-sC>>. Citado 6 vezes nas páginas 20, 21, 25, 38, 46 e 47.

Apêndices

APÊNDICE A – Relatório Técnico gerado para o Caso 1

Figura 40 – Relatório caso 1 - 1ª Página



Fonte: Print screen da aplicação *Windows*

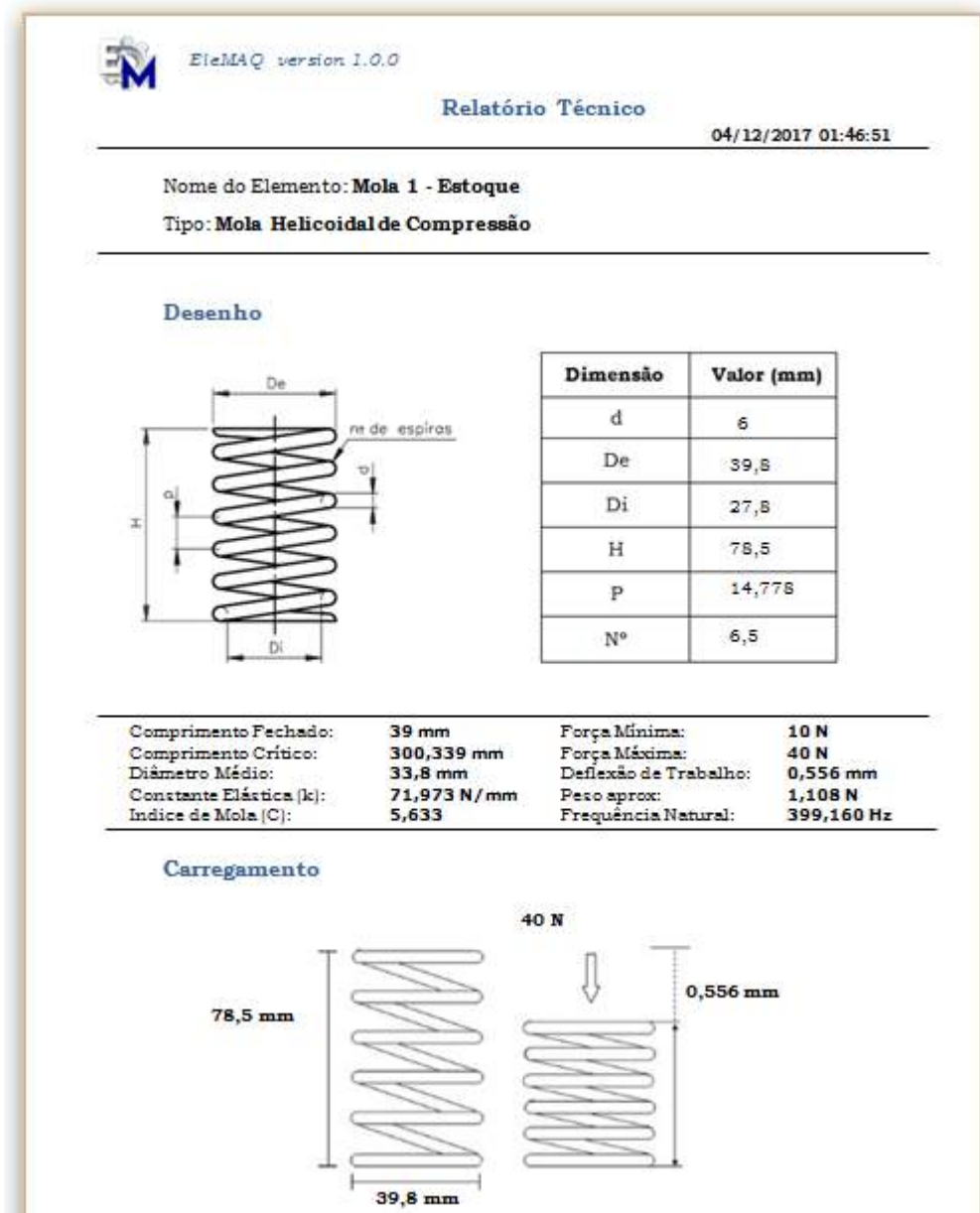
Figura 41 – Relatório caso 1 - 2ª Página

Material		
• Nome (pinhão):	 aço AGMA grau 1 endurecido completamente a 250HB	
• Nome (coroa):	 aço AGMA grau 1 endurecido completamente a 250HB	
	Pinhão	Coroa
Dureza no núcleo (HB)	250	250
Dureza na superfície (HB)	250	250
Módulo de Young (Gpa)	207	207
Poisson	0,3	0,3
Tensão admissível de Flexão (Mpa)	221,550	221,550
Tensão admissível de Contato (Mpa)	755	755
Fatores de Correção		
	Pinhão	Coroa
Fator de choque (kO):	1	1
Fator de velocidade (Kv):	1,052	1,052
Distribuição de Carga (Km):	1,11	1,074
Tamanho (Ks):	1	1
Coefficiente Elástico (Cp):	190,272	190,272
Fator Geométrico de Superfície (I):	0,115	0,115
Ciclagem (Flexão) (Yn):	0,846	0,872
Ciclagem (Desgaste) (Zn):	0,888	0,907
Fator Geométrico (J):	0,32	0,399
Confiabilidade (Kr):	1,002	1,002
Fator de Temperatura (Kt):	1	1
Espessura de Borda (Kb):	1	1
Acabamento Superficial (Cf):	1	1
Razão de Dureza (Ch):	--	1
Resultados		
	Pinhão	Coroa
Torque transmitido ao eixo (kN.m)	0,011	0,026
Carga nos dentes (kN):	0,124	0,124
Tensão de Flexão (Mpa):	18,857	14,633
Tensão de Contato (Mpa):	324,866	319,555
Fator de Segurança na Flexão:	9,920	13,176
Fator de Segurança no Desgaste:	2,060	2,139

Fonte: Print screen da aplicação *Windows*

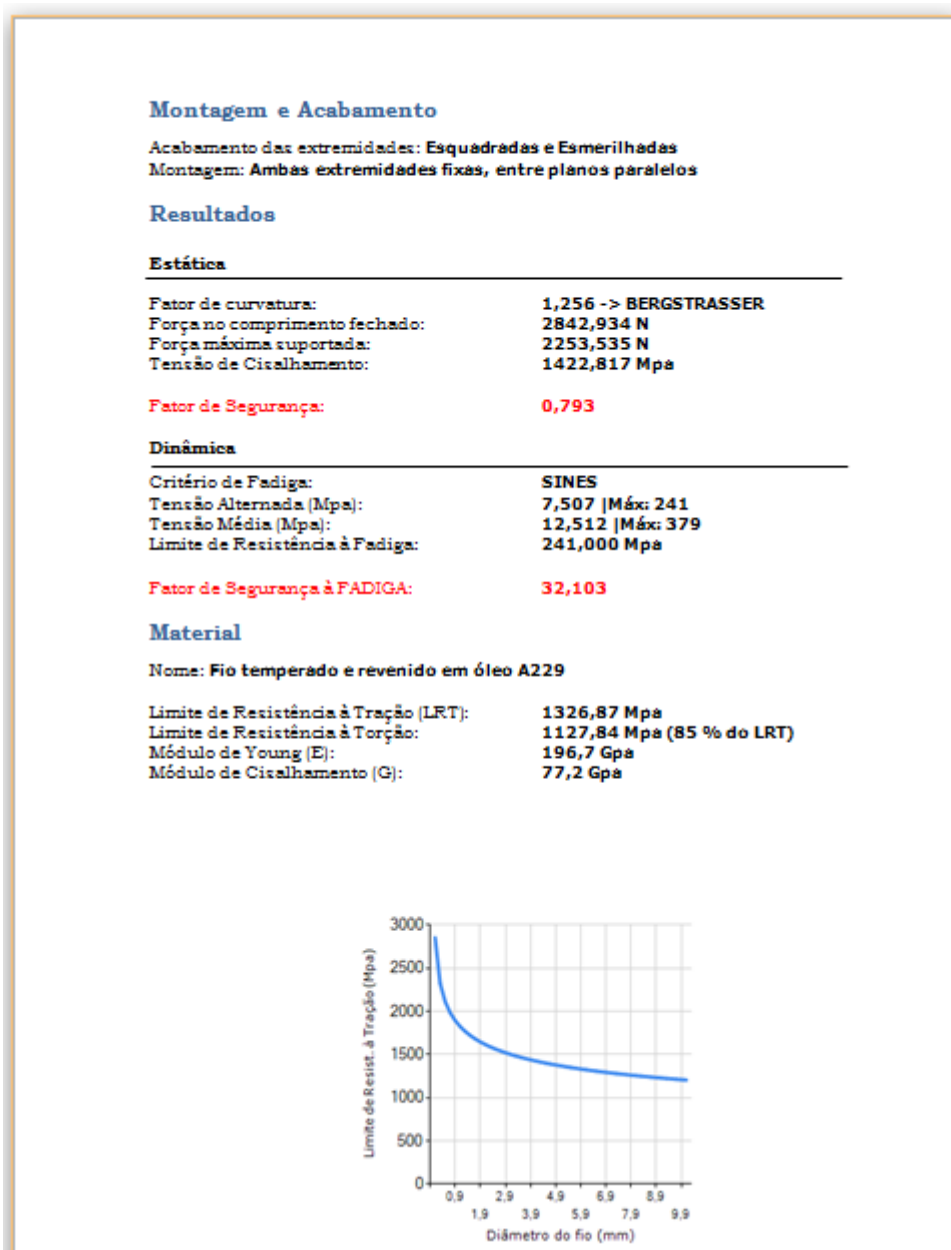
APÊNDICE B – Relatório Técnico gerado para o Caso 2

Figura 42 – Relatório caso 2 - 1ª Página



Fonte: Print screen da aplicação *Windows*

Figura 43 – Relatório caso 2 - 2ª Página



Fonte: Print screen da aplicação *Windows*