



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

RAIANE COSTA DE OLIVEIRA

INTERFACE GRÁFICA PARA O CÁLCULO DE PROJETO DE EIXO

FORTALEZA

2019

RAIANE COSTA DE OLIVEIRA

INTERFACE GRÁFICA PARA O CÁLCULO DE PROJETO DE EIXO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Rômulo do Nascimento Rodrigues

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na
Publicação Universidade Federal do
Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

O51i Oliveira, Raiane Costa de.
Interface Gráfica para o Cálculo do Projeto de Eixo / Raiane Costa de Oliveira. –
2019. 49 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará,
Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2019.

Orientação: Prof. Dr. Rômulo do Nascimento Rodrigues.

1. Projeto de Eixo. 2. Interface Gráfica. 3. MATLAB. 4. Eixo. I. Título.

CDD 620.1

RAIANE COSTA DE OLIVEIRA

INTERFACE GRÁFICA PARA O CÁLCULO DE PROJETO DE EIXO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Rômulo do Nascimento Rodrigues (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Roberto de Araújo Bezerra
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Elicivaldo Lima
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

À minha mãe Claudia, meu pai Reginaldo
e minha irmã Raissa.

Aos meus amigos Handerson e Anderson.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por ter me concedido a vida e ter permitido que eu viva essa experiência.

Ao meu orientador Prof. Dr. Rômulo do Nascimento Rodrigues, pela parceria neste projeto, pelos direcionamentos e pela paciência.

Ao Prof. Dr. Roberto de Araújo Bezerra e Prof. Dr. Francisco Elicivaldo Lima não só por fazerem parte da banca avaliadora, mas também da minha vida acadêmica, colaborando com o meu crescimento pessoal e profissional.

À minha família, por me incentivar, apoiar e sempre torcer pelo sucesso.

Aos meus amigos de toda a vida Handerson Rodrigues, Anderson Carneiro, Carolina Lima, Matheus Passos, Dayse Roberta e Felipe Wendrio por sempre estarem comigo, dividindo tristezas e alegrias, compartilhando experiências e a vida.

Aos amigos que eu ganhei na faculdade Cecília Mesquita, Lucas Moreno, Tito Lívio, Augusto Adolfo, Andreza Freitas, Juliana Brasil, Francisco Lucas e Bruno Lemos por me acolherem e dividirem essa experiência comigo.

Aos meus amigos do trabalho Lucas Damasceno, Bruno Rocha, John Hebert, Carolina Santos, Virgínia Queiroz, Beatriz Vale e Carolina Rodrigues que tanto me incentivaram nesta reta final e torceram para que desse tudo certo.

“O mundo está cheio de coisas óbvias que ninguém jamais observa.”

Sherlock Holmes.

RESUMO

A busca por inovação, produtividade e rentabilidade faz com que cada vez mais com que o ser humano procure ferramentas que facilitem o seu trabalho. A utilização de software para o cálculo voltado para a Engenharia é cada vez mais comum, porém nem sempre a linguagem é a mais fácil de se entender e utilizar. Pensando nisso, este trabalho visa a criação de uma ferramenta voltada para o projeto de eixo que auxilie o projetista a tomar decisões de maneira mais rápida e que possa ser utilizada para um aprendizado prático dos alunos do curso de Engenharia Mecânica. Esse programa visa o cálculo do projeto de um eixo rotativo para evitar falha por fadiga através de uma interface gráfica intuitiva e de fácil utilização. Além disso a interface traz a vantagem do cálculo mais rápido, sem que se perda tempo com a diversas interações que o dimensionamento de eixo possui e sem que o número elementos acoplados ao eixo seja limitado. A interface foi construída através do software MATLAB, que possui uma linguagem de programação voltada para engenheiros. Para a validação do programa foi realizado um teste de cálculo manual e através da interface e os resultados obtidos foram bem próximos, com uma taxa de erro baixa.

Palavras-chave: Interface gráfica, eixo, MATLAB, Engenharia Mecânica, projeto de eixo.

ABSTRACT

The search for innovation, productivity and profitability means that more and more people are looking for tools that facilitate their work. The use of engineering-oriented software is increasingly common, but programming language is not always the easiest to understand and use. With this in mind, this work aims to create a tool for the shaft design that helps the designer to make decisions faster and that can be used for a practical learning for the students of the Mechanical Engineering course. This program aims to calculate the design of a rotary shaft to avoid fatigue ruptures through an intuitive graphical interface that is easy to use. In addition, the interface brings the advantage of faster calculation without losing time with the various interactions that the shaft dimensioning has and without the number of elements coupled to the axis is limited. The interface was built using MATLAB software, which has a programming language aimed at engineers. For the validation of the program a manual and interface calculation test was performed and the results obtained were very similar, presenting a low error rate.

Key-words: Graphical interface, shaft, MATLAB, Mechanical Engineering, shaft design.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Carga no eixo devido ao torque	19
Figura 2 - Cargas no eixo	19
Figura 3 – Tensões no eixo	20
Figura 4 - Tensão de flexão gerada pelo momento	22
Figura 5 - Tensão de torção gerada pelo torque	23
Figura 6 - Teste de fadiga para amostras de aços	29
Figura 7 - GUIDE, ambiente de construção de interface gráfica do MATLAB	31
Figura 8 - GUIDE, Object Browser.	32
Figura 9 - Fluxograma de lógica.....	34
Figura 10 - Interface Gráfica para Cálculo de Eixo – Aba 1	39
Figura 11 - Interface Gráfica para Cálculo de Eixos - Aba 2	40
Figura 12 - Interface Gráfica para Cálculo de Eixos - Aba 3	41

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Gráfico de Juvinall para o fator de superfície	25
Gráfico 2 - Sensibilidade ao entalhe para aços	27

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Casos para o cálculo do momento	20
Tabela 2 - Coeficientes para a equação do fator de superfície	25
Tabela 3 - Fatores de Confiabilidade para o desvio padrão de $0,08\mu$	26
Tabela 4 - Valores da constante de Neuber para aços	28
Tabela 5 - Comparação resultados momentos.....	41
Tabela 6 - Comparação resultados diâmetro.	42

LISTA DE ABREVIATURAS

ASME	American Society of Mechanical Engineers
EES	Engineering Equation Solver
FORTRAN	Formula Translation System
FTOOL	Frame Analysis Tool
GUI	Graphical User Interface
GUIDE	Graphical User Interface Development Environment
MATLAB	Matrix Laboratory

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Posição do mancal A
b	Posição do mancal B
z	Posição da carga
L	Comprimento do eixo
M	Momento
F	Força
M_a	Componente alternada do momento
M_m	Componente média do momento
σ_a	Componente alternada da tensão de flexão
σ_m	Componente média da tensão de flexão
K_{fm}	Fator de concentração de fadiga médio
I	Momento de inércia
T_a	Componente alternada do torque
T_m	Componente média do torque
τ_a	Componente alternada da tensão torcional de cisalhamento
τ_m	Componente média da tensão torcional de cisalhamento
K_{fsm}	Fator de concentração de fadiga médio para o cisalhamento
r	Raio da seção transversal do eixo
J	Momento polar
S_f	Resistência à fadiga
S_e	Limite de resistência à fadiga
S_e'	Limite de resistência à fadiga
S_{ut}	Resistência máxima à tração
S_y	Resistência ao escoamento
C_{carreg}	Fator de correção de solitação;
$C_{tamanho}$	Fator de correção de tamanho;
C_{superf}	Fator de correção de superfície;
C_{temp}	Fator de correção de temperatura;
C_{conf}	Fator de correção de confiabilidade.
T	Temperatura.
K_t	Fator geométrico de concentração de tensão para tensão normal

K_{ts}	Fator geométrico de concentração de tensão para tensão de cisalhamento
q	Sensibilidade ao entalhe
r_e	Raio do entalhe
\sqrt{a}	Constante de Neuber
K_f	Fatores de concentração em fadiga para tensões normais
K_{fs}	Fatores de concentração em fadiga para tensões de cisalhamento
N_f	Coeficiente de segurança
S_{ys}	Resistência de escoamento à torção

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1. Justificativa.....	18
1.2. Objetivo Geral	18
1.3. Objetivos Específicos	18
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
2.1. Projeto de Eixo	19
2.1.1. Determinação das Cargas de um Eixo	19
2.1.2. Determinação das Tensões	21
2.1.3. Propriedades do Materiais na Fadiga	23
2.1.4. Projeto para Flexão Alternada e Torção Fixa	28
2.2. Interface Gráfica.....	30
2.2.1. MATLAB	30
2.2.2. Interface Gráfica de Usuário (GUI)	30
3. METODOLOGIA	33
3.1. Cálculo do Projeto de Eixo	33
3.1.1. Entrada de Dados.....	33
3.1.2. Cálculo das Reações e dos Momentos.....	35
3.1.3. Cálculo e Correção dos Diâmetros	35
3.2. Construção da Interface Gráfica	36
3.2.1. Definição das Abas.....	37
3.2.2. Entrada de Dados.....	37
3.2.3. Saída de Dados	38
4. Resultados e Discussão.....	38
5. Conclusão	42
BIBLIOGRAFIA	44
APÊNDICE A – TESTE DE VALIDAÇÃO DO PROGRAMA.....	46

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, o mercado está cada vez mais competitivo, fazendo com que a busca pela inovação, produtividade e rentabilidade pelos idealizadores e financiadores dos projetos seja algo fundamental para a sobrevivência do empreendimento. No entanto, inovar tecnologicamente implica em desenvolver uma pesquisa de mercado mais assertiva, criar simulações computacionais mais próximas as condições do mundo real e baratear a criação de protótipos.

Nesse contexto, O custo na criação de protótipos diminuiu devido ao barateamento da impressão 3D e da utilização de softwares de projeto com recursos que facilitam a modelagem e realizam cálculos mais assertivos e complexos dos fenômenos naturais.

Hoje em dia muitos softwares podem ser utilizados para auxiliar nas etapas de dimensionamento. Por exemplo, é possível obter os diagramas de momentos fletores a partir do software FTOOL, enquanto as rotinas de cálculo podem ser criadas utilizando softwares como MATHCAD ou EES.

Entretanto, trazendo esse contexto para a realidade da Engenharia Mecânica, esses softwares requerem um conhecimento moderado de programação, e não possuem uma interface intuitiva para quem utiliza a rotina programada.

Um dos campos da Engenharia Mecânica que pode ser mais desenvolvido com relação à criação de ferramentas que facilitem o trabalho do engenheiro e possibilitem um aprendizado prático do estudante de engenharia é o projeto mecânico, que trata do processo de combinação de técnicas e conceitos científicos com o intuito de definir um dispositivo, um método ou um sistema suficientemente pormenorizado para permitir sua realização (NORTON, 2013).

Para este trabalho, foi selecionada a abordagem do projeto de eixos.

Eixos são componentes mecânicos que são usados para a transmissão de potência ou movimento, que podem ser classificados como não rotativos, quando são carregados estaticamente e pode ser projetado como uma viga, ou como rotativo, quando transmite potência, com presença de solicitações de tração e compressão. O que faz com que seja necessário que o eixo seja projetado contra falhas por fadiga para evitar que o mesmo sofra rupturas.

A forma de dimensionamento desse tipo de eixo depende do tipo de carregamento aplicado. A tarefa de dimensionamento é relativamente simples, mas o processo é extremamente trabalhoso e demorado, especialmente porque envolve diversas iterações e passos circulares, pois muitas opções e modificações devem ser testadas, incluindo a resistência do material, coeficiente de segurança e dimensões (NORTON, 2013).

1.1. Justificativa

Com base no exposto anteriormente, a abordagem de recursos práticos auxilia e facilita o aprendizado dos alunos de Engenharia.

Este trabalho tem como justificativa a elaboração de um software voltado para o projeto mecânico de eixos a fim de promover a integração do cálculo, agilizar a concepção do projeto e fornecer uma abordagem prática para os alunos de Engenharia Mecânica.

1.2. Objetivo Geral

Desenvolver uma interface gráfica para o projeto mecânico de eixos, visando acelerar o processo, auxiliar a tomada de decisão do projetista e que pode ser utilizada como uma ferramenta de auxílio às disciplinas relacionadas ao projeto mecânico.

1.3. Objetivos Específicos

- I. Desenvolver uma interface gráfica intuitiva e de fácil utilização;
- II. Desenvolver um programa que permita o cálculo do diâmetro mínimo de um eixo rotativo para evitar falha por fadiga
- III. Permitir que o usuário possa utilizar o programa independentemente da quantidade de elementos acoplados ao eixo, porém apenas considerando cargas pontuais.
- IV. Criar um programa adequado para o projeto de eixos com flexão alternada e torção fixa.

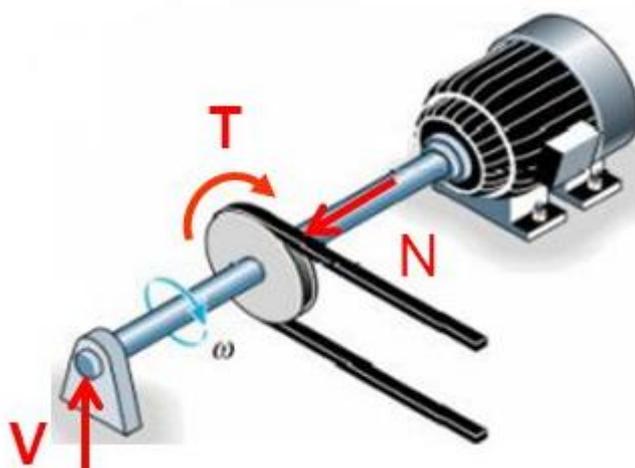
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Projeto de Eixo

2.1.1. Determinação das Cargas de um Eixo

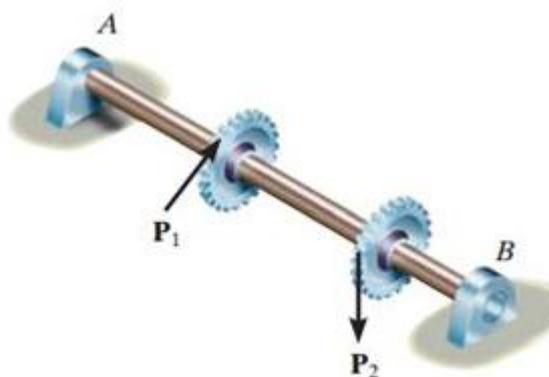
Eixos podem sofrer cargas do tipo torção, devido à transmissão de torque, e flexão, devido às cargas aplicadas em elementos acoplados a ele, conforme ilustrado nas Figuras 1 e 2.

Figura 1 - Carga no eixo devido ao torque



Fonte: Lenzi (2015).

Figura 2 - Cargas no eixo

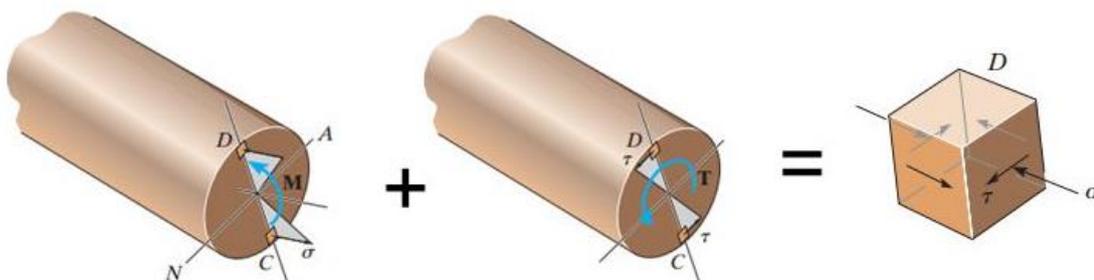


Fonte: Lenzi (2015).

Geralmente, um eixo sofre com o carregamento de torque e momento variados combinados, só haverá carga axial se eixo estiver na vertical ou acoplado a

uma engrenagem helicoidal ou cônica. A combinação de torque e momento em um eixo rotativo faz com que surja tensões multiaxiais, conforme mostrado na Figura 3.

Figura 3 – Tensões no eixo



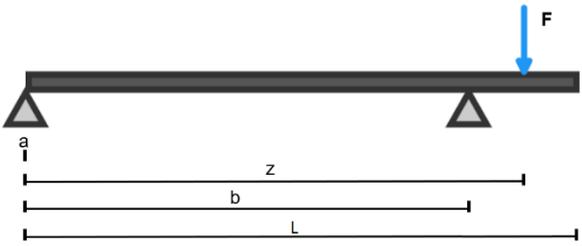
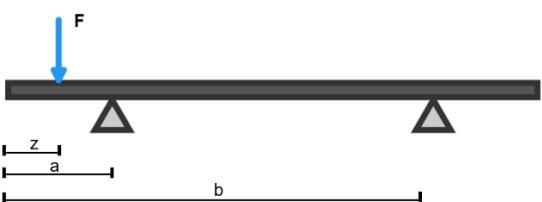
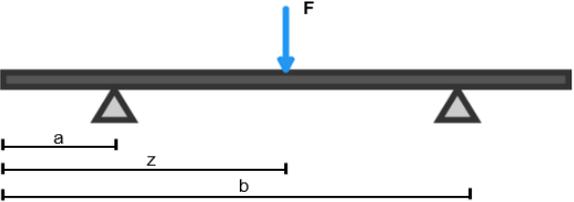
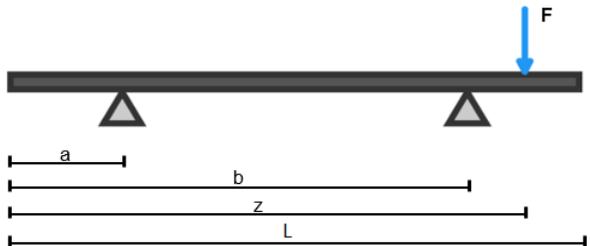
Fonte: Lenzi (2015).

2.1.1.1. Cálculo dos Momentos

É necessário calcular o momento para cada elemento que for acoplado ao eixo. Para simplificar os cálculos, foram definidos casos para cada posição da carga em relação aos mancais, estes são definidos a seguir, na Tabela 1.

Tabela 1 - Casos para o cálculo do momento

Caso	Esquema Ilustrativo	Condições	Equação
1		$a = 0$ $b = L$ $a < z < L$	$M = F * \left(1 - \frac{z-a}{b-a}\right) * (z-a) \quad (1)$
2		$a = 0$ $a < z < b$	$M = F * \left(1 - \frac{z-a}{b-a}\right) * z \quad (2)$

3		$a = 0$ $b < z < L$	$M = F * \left(1 - \frac{z-a}{b-a}\right) * b \quad (3)$
4		$a > 0$ $z > a$	$M = F * (a - z) \quad (4)$
5		$a > 0$ $a < z < b$	$M = F * \left(1 - \frac{z-a}{b-a}\right) * (z-a) \quad (5)$
6		$a > 0$ $b < z < L$	$M = F * \left(1 - \frac{z-a}{b-a}\right) * (b-a) \quad (6)$

Fonte: Elaborada pela autora.

2.1.2. Determinação das Tensões

As tensões devem ser calculadas para todos os pontos do eixo onde houver a aplicação de carga, com as suas componentes alternadas e médias.

Para o cálculo da tensão de flexão, utiliza-se as Equações 7 e 8.

$$\sigma_a = K_f * \frac{M_a * c}{I} \quad (7)$$

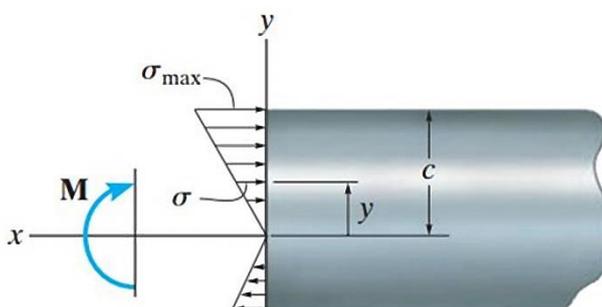
$$\sigma_m = K_{fm} * \frac{M_m * c}{I} \quad (8)$$

Como eixos têm seção circular, assume-se que a distância ao centro (c) será igual ao diâmetro dividido por dois e que o momento de inércia (I) é calculado para a seção transversal circular (Figura 4), com isso tem-se as Equações 9 e 10.

$$\sigma_a = K_f * \frac{32 * M_a}{\pi * d^3} \quad (9)$$

$$\sigma_m = K_{fm} * \frac{32 * M_m}{\pi * d^3} \quad (10)$$

Figura 4 - Tensão de flexão gerada pelo momento



Fonte: Lenzi (2015).

Da mesma forma as tensões torcionais (Figura 5) são dadas pelas Equações 11 e 12:

$$\tau_a = K_{fs} * \frac{T_a * r}{J} \quad (11)$$

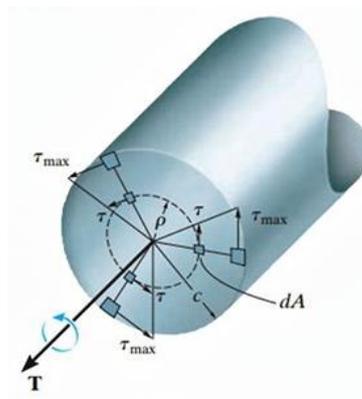
$$\tau_m = K_{fsm} * \frac{T_m * r}{J} \quad (12)$$

Substituindo o raio pelo diâmetro dividido por 2 e o momento polar pela equação para a seção transversal circular do eixo, tem-se as Equações 13 e 14.

$$\tau_a = K_{fs} * \frac{16 * T_a}{\pi * d^3} \quad (13)$$

$$\tau_m = K_{fsm} * \frac{16 * T_m}{\pi * d^3} \quad (14)$$

Figura 5 - Tensão de torção gerada pelo torque



Fonte: Lenzi (2015).

2.1.3. Propriedades dos Materiais na Fadiga

2.1.3.1. Resistência à fadiga e Limite de Resistência à Fadiga

A resistência à fadiga (S_f) e o limite de resistência à fadiga (S_e) determinam a maior tensão de flexão alternada que o material é capaz de suportar sem causar a sua falha. A resistência à fadiga é determinada para materiais, como alumínio e ligas de cobre, cujo ciclo de vida é finito, ou seja, inferior a 10^3 ciclos. Já o limite de resistência à fadiga é determinado para materiais, tais como aços e ferros, cujo ciclo de vida é superior 10^3 ciclos. Neste trabalho, o foco é o projeto de um eixo-árvore fabricado em aço, logo serão utilizados os dados referentes ao limite de resistência à fadiga.

Segundo Shigley, a resistência à fadiga de uma peça ou o seu limite de resistência deveria ser determinada através da realização de ensaios de fadiga, com ensaios de tensão sendo preferíveis a ensaios de deformação. Os dados obtidos através desses ensaios são registrados em literatura para vários tipos de carregamento, logo pode-se estimar a resistência ou limite de resistência com base em informações da resistência máxima a tração (S_{ut}) e a resistência ao escoamento (S_y).

Para calcular o limite de resistência à fadiga dos aços ($S_{e'}$), utiliza-se a relação mostrada na Equação 16.

$$S_{ut} < 1400 \text{ MPa} \rightarrow S_{e'} \cong 0,5 * S_{ut} \quad (15)$$

$$S_{ut} \geq 1400 \text{ MPa} \rightarrow S_{e'} \cong 700 \text{ MPa} \quad (16)$$

2.1.3.2. Fatores de Correção

Quanto mais próximas as condições do ensaio forem das condições de operação do componente, maior a confiabilidade do ensaio. Fatores como dimensões dos componentes e dos equipamentos de ensaio, temperaturas de operação e corrosão diminuem a resistência do material. Na maioria dos casos, a análise nas condições de operação é inviável financeiramente. Adota-se fatores de correção aplicados no limite de resistência à fadiga, de acordo com a Equação 17.

$$S_e = C_{carreg} * C_{tamanho} * C_{superf} * C_{temp} * C_{conf} * S_e \quad (17)$$

2.1.3.2.1. Fator de Correção de Solicitação

Os valores do limite de resistência são diferentes quando calculados para uma solicitação de flexão rotativa e para uma solicitação de tensão normal. Logo, para tensão normal deve-se aplicar um C_{carreg} é igual a 0,70 e para flexão C_{carreg} é igual a 1. Caso haja tensão de cisalhamento devido à torção, considera-se o C_{carreg} é igual a 1, já que em grande parte dos casos se trabalhará com torção pura devido ao cálculo da tensão equivalente de Von Mises.

2.1.3.2.2. Fator de Correção de Tamanho

Os corpos de prova são pequenos se comparados às peças reais que serão fabricadas, logo é necessário aplicar um fator de correção que diminua a resistência a fim de compensar o fato de que peças com o tamanho maior falham se submetidas a menores tensões. Para peças de seção transversal circular pode-se utilizar as relações apontadas na Equações 18 e 19.

$$\text{Se } d \leq 8 \text{ mm} \rightarrow C_{tamanho} = 1 \quad (18)$$

$$\text{Se } 8 \text{ mm} < d \leq 250 \text{ mm} \rightarrow C_{tamanho} = 1,189 * d^{-0,097} \quad (19)$$

Onde:

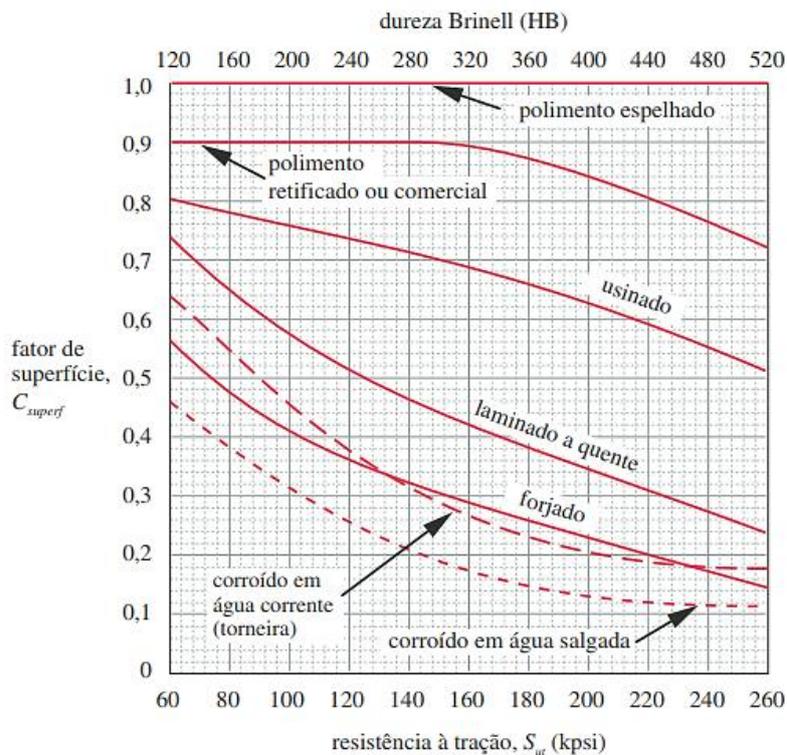
d = diâmetro da seção transversal.

Para materiais que sofrem a aplicação de cargas axiais não há efeito de tamanho, logo $C_{tamanho}$ é igual a 1.

2.1.3.2.3. Fator de Correção de Superfície

Considerando que acabamentos grosseiros reduzem a resistência à fadiga já que promovem o aparecimento de concentrações de tensão e mudança de propriedades físicas do material na superfície. Assim deve-se “corrigir” a resistência de acordo com o acabamento superficial. Observa-se no Gráfico 1 a relação entre o tipo de acabamento superficial e a resistência à tração.

Gráfico 1 - Gráfico de Juvinal para o fator de superfície



Fonte: Norton (2004).

Também pode-se utilizar a Equação 20 recomendada por Shigley e Mischke em conjunto com a Tabela 2 (para S_{ut} em MPa).

$$C_{super} = A * S_{ut}^b \quad (20)$$

Tabela 2 - Coeficientes para a equação do fator de superfície

Acabamento Superficial	A	b
Retificado	1,58	-0,085
Usinado ou estirado a frio	4,51	-0,265
Laminado a quente	57,7	-0,718
Forjado	272	-0,995

Fonte: Norton (2004).

2.1.3.2.4. Fator de Correção de Temperatura

A temperatura é um fator que pode variar bastante e com isso afetar várias características do material, por exemplo: a tenacidade diminui em baixas temperaturas e aumenta e temperaturas elevadas, a resistência do material tende a diminuir conforme o aumento do número de ciclos em temperaturas elevadas. Para que essas alterações possam ser sanadas, Shigley e Mitchell propuseram as Equações 21 e 22 para aços.

$$\text{Para } T \leq 450^{\circ}\text{C} \rightarrow C_{\text{temp}} = 1 \quad (21)$$

$$\text{Para } 450^{\circ}\text{C} < T \leq 550^{\circ}\text{C} \rightarrow C_{\text{temp}} = 1 - 0,0032 * (T - 450) \quad (22)$$

2.1.3.2.5. Fator de Confiabilidade

Os dados registrados são em muitas vezes referentes a valores médios, com isso há casos em que existem consideráveis diferenças entre dados obtidos em ensaios com o mesmo material e condições semelhantes. Por isso, corrige-se a resistência de acordo com o nível de probabilidade que se deseja que as amostras tenham o mesmo valor estimado de resistência. A Tabela 3 foi elaborada para um desvio padrão de 8%, já que na maioria dos casos esse é o valor excedido em cima do valor médio de resistência. μ

Tabela 3 - Fatores de Confiabilidade para o desvio padrão de $0,08\mu$

Confiabilidade %	C_{conf}
50	1,000
90	0,897
95	0,868
99	0,814
99,9	0,753
99,99	0,702
99,999	0,659
99,9999	0,620

Fonte: Norton (2004).

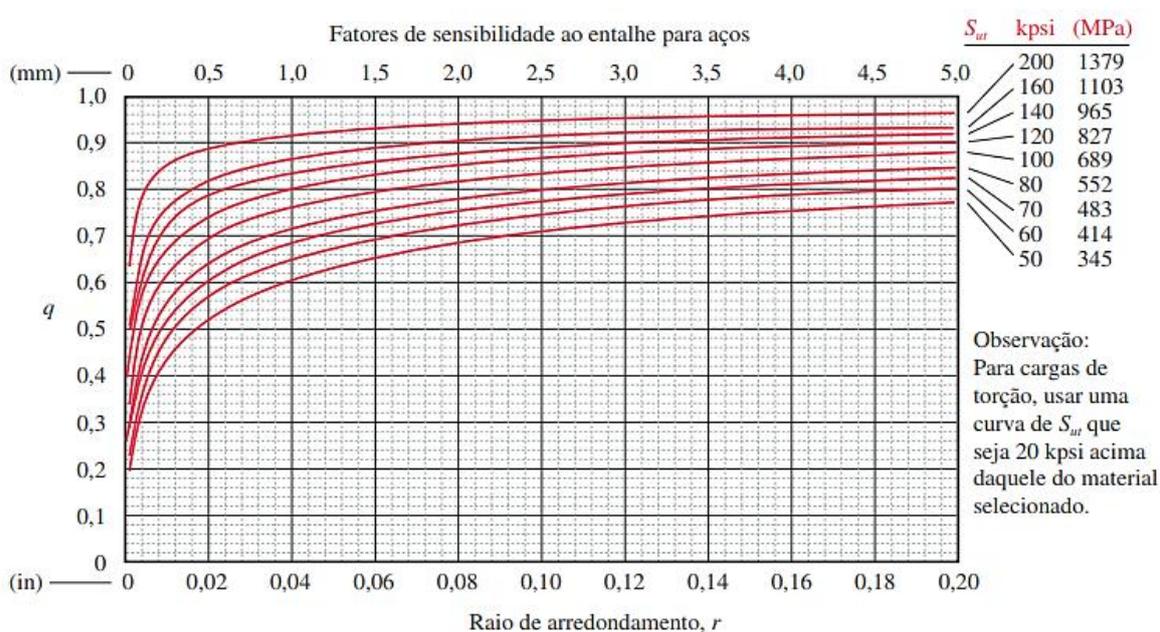
2.1.3.3. Concentração de Tensão e Sensibilidade ao Entalhe

Considerando que elementos de máquinas em geral não possuem seções transversais uniformes, há uma concentração de tensão nos locais onde essas

mudanças estão presentes. Para indicar o valor dessa concentração de tensão, utilizam-se os fatores geométricos de concentração de tensão para tensões normais (K_t) e para tensão de cisalhamento (K_{ts}), estes são calculados a partir da geometria da peça e do seu carregamento.

Os materiais reagem diferentemente às concentrações de tensões, o que é caracterizado pela sensibilidade ao entalhe (q). Essa sensibilidade está diretamente relacionada ao raio de entalhe (r_e), como ilustrado no Gráfico 2, e uma constante do material, chamada constante de Neuber (\sqrt{a}).

Gráfico 2 - Sensibilidade ao entalhe para aços



Fonte: Norton (2004).

Com isso, pode-se calcular a sensibilidade ao entalhe através da fórmula de Kuhn-Hardrath (Equação 23).

$$q = \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{r_e}}} \quad (23)$$

Para o cálculo da constante de Neuber utiliza-se a Tabela 4. É importante frisar que na Equação 23 deve-se utilizar o raio em polegadas para igualar com a unidade da constante de Neuber.

Tabela 4 - Valores da constante de Neuber para aços

S_{ut} (kpsi)	\sqrt{a} (in ^{0,5})
50	0,130
55	0,118
60	0,108
70	0,093
80	0,080
90	0,070
100	0,062
110	0,055
120	0,049
130	0,044
140	0,039
160	0,031
180	0,024
200	0,018
20	0,013
240	0,009

Fonte: Norton (2004).

Para cargas dinâmicas, é necessário que o fator teórico seja corrigido pela sensibilidade para obter os fatores de concentração em fadiga para tensões normais (K_f) e para tensão de cisalhamento (K_{fs}). Pode-se constatar a relação entre eles a partir das Equações 24 e 25.

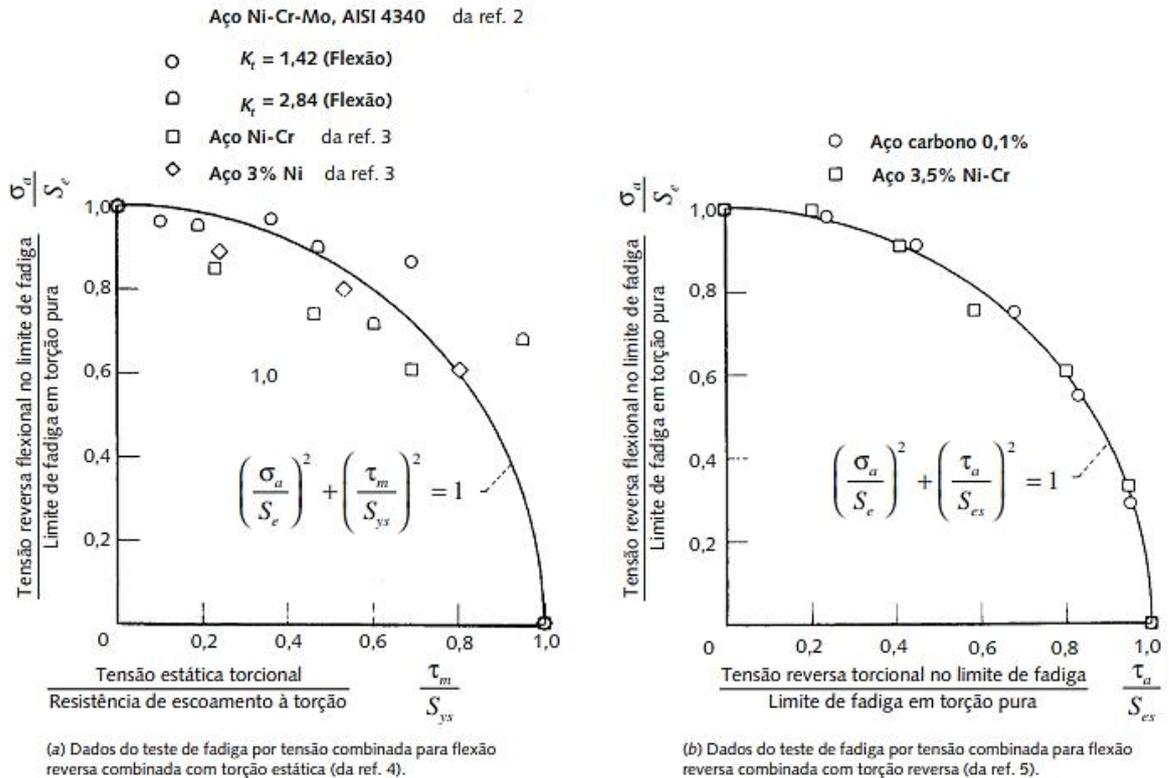
$$K_f = 1 + q * (K_t - 1) \quad (24)$$

$$K_{fs} = 1 + q * (K_{ts} - 1) \quad (25)$$

2.1.4. Projeto para Flexão Alternada e Torção Fixa

Este é um caso de fadiga multiaxial simples, no qual o carregamento é constituído de flexão alternada, sendo a sua componente média nula, e torque fixo, sendo o seu componente alternado nulo. Utilizando o método ASME para calcular o diâmetro do eixo, através da derivação da relação do envelope de falha (Figura 6).

Figura 6 - Teste de fadiga para amostras de aços



Fonte: Norton (2004).

$$\left(\frac{\sigma_a}{S_e}\right)^2 + \left(\frac{\tau_m}{S_{ys}}\right)^2 = 1 \quad (26)$$

$$\left(N_f + \frac{\sigma_a}{S_e}\right)^2 + \left(N_f + \frac{\tau_m}{S_{ys}}\right)^2 = 1 \quad (27)$$

Por Von Mises, pode-se substituir S_{ys} por S_y , dividindo-o pela raiz quadrada de três e substituindo σ_a e τ_m pelas Equações 9 e 14, tem-se:

$$\left[\left(K_f * \frac{32 * M_a}{\pi * d^3}\right) * \left(\frac{N_f}{S_e}\right)\right]^2 + \left[\left(K_{fsm} * \frac{16 * T_m}{\pi * d^3}\right) * \left(\frac{\sqrt{3} * N_f}{S_y}\right)\right]^2 = 1 \quad (28)$$

Reorganizando a Equação 28 para deixar o diâmetro em evidência:

$$d = \left\{ \frac{32 * N_f}{\pi} * \left[\left(K_f * \frac{M_a}{S_f}\right)^2 + \frac{3}{4} * \left(K_{fsm} * \frac{T_m}{S_y}\right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{3}} \quad (29)$$

Considera-se que para um eixo projetado para fadiga o ponto mais solicitado, ponto onde há a maior concentração de tensão e logo onde existe a maior probabilidade de falha, é aquele que possuirá o maior diâmetro.

2.2. Interface Gráfica

2.2.1. MATLAB

O MATLAB®, abreviação de *Matrix Laboratory*, é um software que usa linguagem de programação com funções pré-definidas voltadas para cálculo numérico, capaz de realizar, principalmente, cálculo com matrizes, construção de gráficos e processamento de sinais.

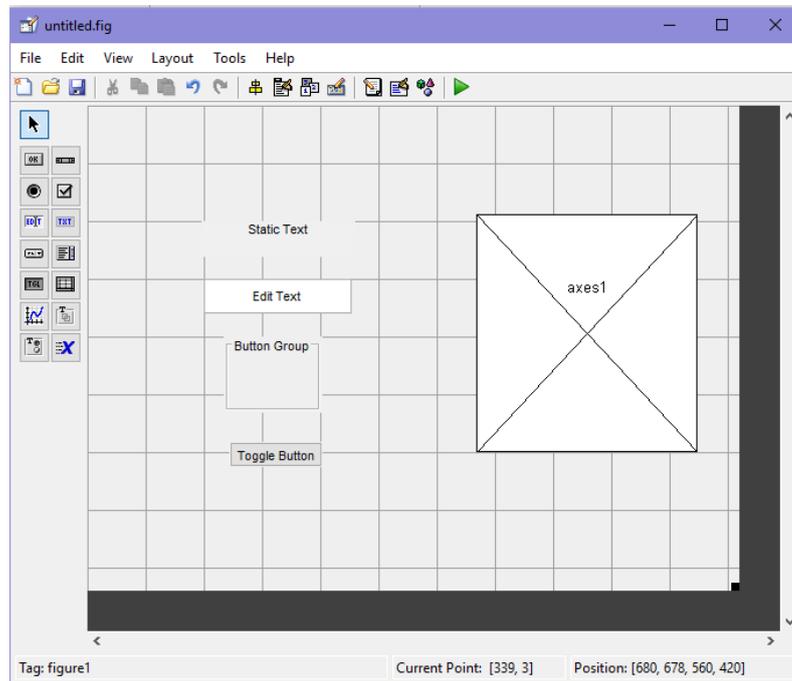
O programa foi primeiramente desenvolvido no final da década de 70 por Clever Moler a partir de uma adaptação de uma linguagem computacional chamada Fortran (acrônimo de *IBM Mathematical FORMula TRANslation System*) e bibliotecas de *softwares* de Fortran voltadas para o cálculos de autovalores de matrizes e equações lineares, chamadas respectivamente de EISPACK e LINPACK. Com isso a versão inicial do MATLAB possuía apenas oitenta funções e era usada para o cálculo matricial. No começo da década de 80, Jack Little e Steve Bangert adaptaram o MATLAB para linguagem em C e adicionaram outras funcionalidades como os *M-files* e caixas de ferramentas.

Hoje em dia, o MATLAB é um programa muito utilizado por cientistas e engenheiros por possuir uma vasta gama de aplicações, linguagem de fácil entendimento e oferecer o uso de ferramentas com funcionalidades profissionais.

2.2.2. Interface Gráfica de Usuário (GUI)

O ambiente GUIDE do MATLAB® (Figura 7) possibilita a criação de uma interface gráfica de maneira fácil, por meio da construção direta do *layout*. O ambiente fornece ferramentas para compor a interface, caixas de texto, botões e gráficos por exemplo. Com o layout finalizado, o *GUIDE* gera e exporta o código para o ambiente de edição do MATLAB.

Figura 7 - GUIDE, ambiente de construção de interface gráfica do MATLAB



Fonte: Elaborada pela autora.

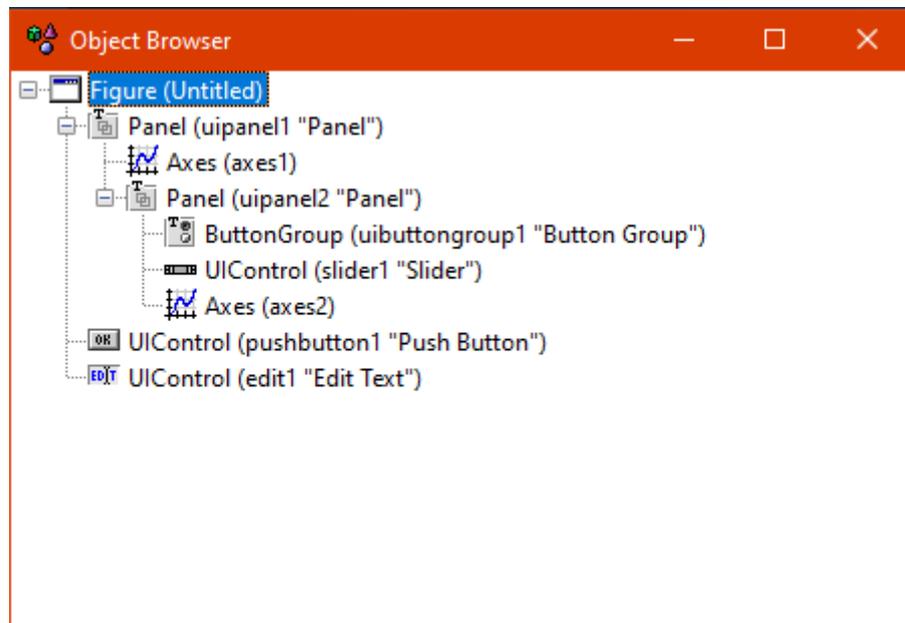
Essa característica favorece a criação de interfaces gráficas complexas sem que o usuário possua conhecimento aprofundado de programação. Porém o conhecimento de funções que definem as propriedades e comportamentos dos elementos auxilia na criação e edição de detalhes no ambiente de edição do MATLAB. Nesse trabalho, as seguintes funções foram utilizadas:

- Função *Callback*: responsável por executar eventos em resposta a uma ação pré-definida pelo usuário, isso é feito quando uma função é atribuída a propriedade de *callback* do elemento;
- Função *Creafcn*: executa o *callback* quando um objeto é criado pelo MATLAB, antes de mostra-lo no *display*;
- Função *Handle*: representa uma função como uma variável no código.
- Função *Findall*: retorna todos as variáveis do objeto, mesmo que invisíveis;
- Função *Set*: especifica valores para as propriedades de elementos gráficos;

- Função *Get*: retorna os valores de todas as propriedades de elementos gráficos identificadas pela função *handle*;
- Função *Xlswrite*: escreve uma matriz em uma planilha do Excel;
- Função *Fullfile*: constrói o nome de um arquivo a partir de partes separadas;
- Função *Uipitfile*: abre a caixa de diálogo para salvar arquivos;
- Função *Str2num*: transforma “strings” (caracteres) em números.

Os componentes gráficos da interface podem ser alterados com a modificação de suas propriedades através do menu do *Property Inspector*, ou alteradas diretamente no script através da função de *callback*. Quando os componentes forem inseridos na janela, é importante conferir como eles estão listados no *Object Browser*, que é uma lista que mostra como a janela está organizada hierarquicamente conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 8 - GUIDE, Object Browser.



Fonte: Elaborado pela autora.

Os componentes utilizados na interface variam de acordo com a necessidade do usuário. Alguns dos elementos mais usados são:

- *Static text*: caixa de texto estático, cujo conteúdo não pode ser alterado pelo usuário, porém quando a informação mostrada pode ser variável, o

conteúdo pode ser mudado através da sua propriedade “*String*” na sua função de *callback*;

- *Edit text*: caixa de texto editável, que é utilizada pelo usuário para a entrada de dados;
- *Push Button*: botão que pode ser ativado ao clicar-se sobre ele;
- *Toggle Button*: botão que possui dois estados, ativado e desativado, conforme ele estiver pressionado sim ou não;
- *Table*: armazena textos e números no formato de tabela;
- *Panel*: é um painel usado para organizar e agrupar diferentes tipos de elementos gráficos;
- *Axes*: onde os objetos gráficos, como figuras e gráficos, são plotados.

3. METODOLOGIA

O projeto foi desenvolvido no software MATLAB®, utilizando-se tanto o ambiente do editor de texto para a escrita da parte código responsável pelo cálculo do projeto de eixo e o ambiente *GUIDE* responsável pela criação da interface gráfica e do seu respectivo código.

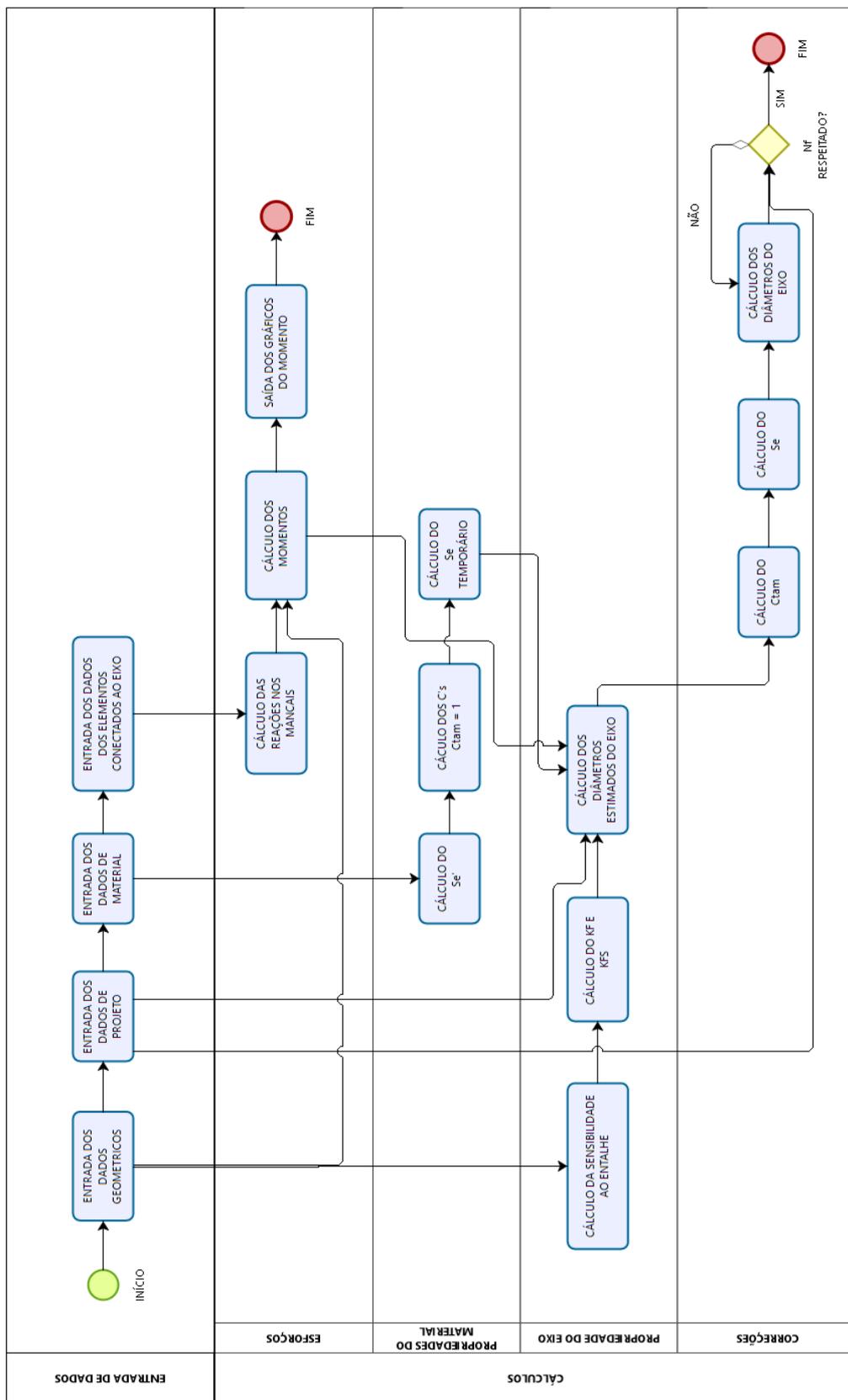
3.1. Cálculo do Projeto de Eixo

O código para o cálculo do projeto de eixo foi escrito no script e foi dividido em três partes, entrada de dados, cálculo das reações e do momento, cálculo do diâmetro e correção do diâmetro. O fluxo completo da metodologia de cálculo empregado pode ser visto na Figura 9.

3.1.1. Entrada de Dados

Como o objetivo principal do programa é calcular o diâmetro mínimo que o eixo deve ter para evitar a falha por fadiga, foi determinado que o usuário entraria com os dados necessários, são eles: dados geométricos do eixo (comprimento do eixo, as posições dos mancais, os fatores geométricos de concentração de tensão dos mancais e raio de entalhe na região do mancal), dados do projeto (torque, coeficiente

Figura 9 - Fluxograma de lógica.



Fonte: Elaborado pela autora.

de segurança e confiabilidade do projeto), dados do material (resistência máxima à tração e resistência ao escoamento) e dados dos elementos acoplados ao eixo (quantidade, posição, cargas, os fatores geométricos de concentração de tensão e raios de entalhe). As unidades dos dados de entrada são expressas na interface para garantir que o diâmetro seja calculado em milímetros.

3.1.2. Cálculo das Reações e dos Momentos

Um dos maiores desafios foi desenvolver o código de modo que o usuário não fosse limitado pelo número de elementos acoplados ao eixo ou que o programa fosse construído para um modelo específico de montagem de eixo. Para que isso não acontecesse, o código classifica cada elemento separadamente de acordo com a posição da sua carga em relação aos mancais, conforme os dados fornecidos pelo usuário. Com isso as reações em relação aos eixos x e y são calculadas.

Considerando que os elementos exercem cargas pontuais sobre o eixo e a sua distribuição é linear, são calculados momentos parciais para diversos pontos ao longo do eixo, de acordo com os casos especificados na seção 2.2.5. deste trabalho, e as resultantes desse momento são calculados. O número de pontos ao longo do eixo é determinado pelo usuário e tal divisão funciona como uma malha para o programa, o que influencia diretamente na sua velocidade de processamento.

3.1.3. Cálculo e Correção dos Diâmetros

Com os momentos atuantes em cada elemento calculados, o programa inicia o cálculo dos diâmetros de cada seção do eixo. Inicialmente, ele calcula o limite de resistência à fadiga estimado (S_e') tomando como base o valor da resistência máxima a tração (S_{ut}) inserido anteriormente. Em seguida, ele calcula os fatores de correção para o limite de resistência à fadiga teórico, considerando o fator de correção do tamanho (C_{tam}) inicialmente igual a 1, já que não se tem o diâmetro da seção do eixo. O fator de correção da solitação é igual 1, já que há esforço de torção presente. O fator de correção de superfície (C_{superf}) é calculado para o tipo de acabamento superficial usinado ou estirado a frio. O fator de correção de temperatura é considerado igual 1, já o fator de correção é calculado através de uma interpolação

linear a partir do valor de confiabilidade entrado pelo usuário. Com isso é calculado o limite de resistência à fadiga (S_e).

Posteriormente, o programa faz o cálculo da sensibilidade ao entalhe (q), tanto para as tensões de flexão quanto de cisalhamento, para cada mudança de seção provocada pelo posicionamento de engrenagens e polias no eixo. Isso é feito a partir do cálculo da constante de Neuber (\sqrt{a}), que é interpolada a partir o do valor de S_{ut} inserido e transformado para a mesma unidade dos valores da tabela, e também dos valores dos fatores de concentração de tensão teóricos incluídos pelo usuário. Com isso são calculados os fatores de tensão em fadiga (K_f) e para tensão de cisalhamento (K_{fs}).

Os diâmetros de cada seção do eixo são então calculados, porém como o limite de resistência à fadiga foi resultado com o fator de correção de tamanho sendo admitido como 1, esse é recalculado para cada diâmetro e o S_e corrigido. Em consequência, faz-se o cálculo de qual seria o fator de segurança (N_f) para o maior diâmetro do eixo (onde o risco de falha é maior) e esse é comparado ao fator de segurança disponibilizado pelo usuário, se o novo N_f for menor que o inicial, os diâmetros são recalculados para garantir que o eixo projetado atenda de forma segura aos requisitos.

3.2. Construção da Interface Gráfica

No ambiente *GUIDE*, primeiramente, foram criados os painéis, nos quais foram alocados determinados objetos como caixas de texto estático, caixas de texto editáveis, tabelas e botões de apertar. Verificou-se então se os objetos colocados possuíam parentesco com o seu respectivo painel, através do *object browser*.

O *GUIDE* exporta o código de todos os itens (o nome, com o qual cada objeto será referido no código fonte, pode ser visto através da propriedade *tag*) presentes em seu módulo para o editor de algoritmo do software, com isso foi possível modificar o código, para que este pudesse executar a programação do projeto de eixo.

3.2.1. Definição das Abas

Foram montados três painéis de acordo com a lógica de funcionamento do programa, um para que sejam inseridos os dados do eixo, um segundo para os dados dos elementos acoplados e um terceiro para os resultados, foram inseridos botões, cuja a função a ser atribuída é mudar a aba visualizada, acionando a sua função *callback*. Isso faz com que haja um redirecionamento para a seção do código responsável pela execução da ação de cada botão.

Nessa seção do código, utilizou-se a função *findall* juntamente com a função *set* para definir a propriedade de visibilidade dos painéis. Isso faz com que apenas um painel seja visto por vez.

Utiliza-se então, a função *set* para que os botões de cada aba possam ser definidos como ativos ou inativos ao clique.

3.2.2. Entrada de Dados

É necessário para que os cálculos do eixo sejam realizados o usuário entrar com determinadas variáveis. Desta forma, foram colocadas caixas de texto editáveis, nas quais o usuário poderá inserir as informações. Além disso, é necessário que esses dados inseridos sejam armazenados em uma tabela, logo, o usuário pode também fornecer os dados diretamente nas tabelas disponíveis em tela.

O programa é iniciado com a aba “Dados do Eixo”, onde são pedidos os dados referentes ao eixo. É importante que ao terminar o preenchimento o usuário clique no botão “Salvar”, pois este coleta as informações digitadas na interface, as transforma em números através da função *str2num*, as coloca em um vetor e as salva na tabela. Contudo, para que seja possível usar os dados atribuídos a essas variáveis no futuro, é preciso declará-las como globais primeiramente. Visando uma maior comodidade do usuário, as tabelas de resistência máxima à tração e resistência ao escoamento podem ser consultadas na interface através do botão “Tabelas Sut e Sy para aços”.

Em seguida, tem-se a aba “Dados dos Elementos”, onde a primeira informação solicitada é a quantidade de elementos (engrenagens e polias) que compõe o eixo. Para que haja o controle das interações, um botão “Começar” foi colocado que, primeiramente, testa se o valor digitado é um número inteiro (e o valor

não for um número ou não for inteiro, uma mensagem de erro é mostrada), após isso será iniciada a contagem de elementos a partir do primeiro e as caixas de texto editável serão habilitadas, fazendo com que o usuário possa entrar com as informações de posição, carga aplicada no eixo x, carga aplicada no eixo y, o fator geométrico de tensão, o fator geométrico de tensão por flexão e o raio do entalhe para cada elemento do eixo. Também foram adicionados botões de “Anterior” e “Próximo” que permite a navegação entre as informações de cada elemento. O botão “Salvar” faz com que os dados sejam então armazenados em um vetor e mostrados na tabela.

3.2.3. Saída de Dados

O resultado do projeto de eixo é mostrado na terceira aba “Resultados”, onde os resultados dos diâmetros calculados para as posições requeridas são mostrados em uma tabela.

Isso é feito através do botão “Calcular”, que reúne todas as variáveis definidas e realiza a rotina de cálculo do projeto de eixo, os resultados são armazenados em um vetor e o mesmo é exportado para a tabela.

Ademais, o usuário tem a opção de obter todos os valores calculados no formato de uma planilha no Excel clicando no botão “Exportar para o Excel”. Os gráficos gerados a partir dos momentos calculados também podem ser vistos na aba “Resultados” e podem ser exportados como imagens.

4. Resultados e Discussão

De modo geral, o layout do programa desenvolvido no MATLAB é composto por caixas para inserir os valores das variáveis, tabela para visualização dos dados inseridos e botões para salvar os dados. A parte superior do layout foi destinada que o usuário possa transitar pelas abas da interface.

Pode-se observar na Figura 10 a aba destinada à entrada dos dados do eixo. A maior parte da tela é composta pelos dados geométricos (comprimento total, posição dos mancais e raio de entalhe), dados de projeto do eixo (fatores geométricos, torque, fator de segurança) e propriedade dos materiais (resistência a tração e ao

escoamento). No lado direito observa-se uma prévia de como as variáveis serão exportadas para o Excel. Abaixo da tabela, existe dois botões. O primeiro para salvar os dados inseridos no programa e o segundo para mostrar as tabelas com as propriedades dos aços.

Figura 10 - Interface Gráfica para Cálculo de Eixo – Aba 1

Interface Gráfica para Cálculo de Eixo

Dados do Eixo **Dados dos Elementos** **Resultados**

Comprimento total do eixo (L): mm

Posição do Mancal A (a): mm

Posição do Mancal B (b): mm

Fator geométrico de tensão na região (kt):

Fator geométrico de tensão por cisalhamento na região (kts):

Raio do entalhe (re): mm

Torque (Tm): Nm

Fator de segurança requerido (Nf):

Confiabilidade do projeto (confi): %

Resistência Máxima a Tração (Sut): MPa

Resistência ao Escoamento (Sy): MPa

L	1000
a	200
b	800
ktr	1
ktsr	1
rer	0.5000
Tm	300
Nf	2
confi	90
sut	469
sy	393

Fonte: Elaborada pela autora.

Podemos observar na Figura 11 a aba destinada a entrada dos dados dos elementos conectados ao eixo. Abaixo da lista de abas, o usuário insere no programa o número de elementos ligados ao eixo. Após clicar no botão 'Começar', o programa inicia o registro da posição, forças radiais, fatores geométricos e raio de entalhe dos elementos conectados ao eixo.

Na parte inferior do layout, observa-se o botão 'Salvar' que registra os valores na tela e segue para o registro das informações do elemento seguinte. O layout também é composto por uma tabela para verificação dos dados inseridos e um botão 'Anterior' para visualização e modificação das informações dos elementos anteriormente inseridos.

A aba destinada aos resultados, Figura 12, possui o layout diferente das demais abas. A esquerda da aba observa-se o botão 'Calcular' que irá realizar o

dimensionamento dos diâmetros, uma tabela relacionando a posição e os diâmetros de cada seção e um botão para salvar todas as variáveis calculadas para o Excel (posição, diâmetros, fatores de correção aplicados, momentos, fatores geométricos, sensibilidades ao entalhe e resistência a fadiga). A direita da aba, observa-se os três gráficos do momento e os respectivos botões para salvar os gráficos.

Figura 11 - Interface Gráfica para Cálculo de Eixos - Aba 2

Interface Gráfica para Cálculo de Eixos

Dados do Eixo | Dados dos Elementos | Resultados

Número de elementos acoplados ao eixo (n):

Elemento **3** / 3

Posição do elemento (z): mm

Carga no eixo radial horizontal (Fx): kN

Carga no eixo radial vertical (Fy): kN

Fator geométrico de tensão na região (kt):

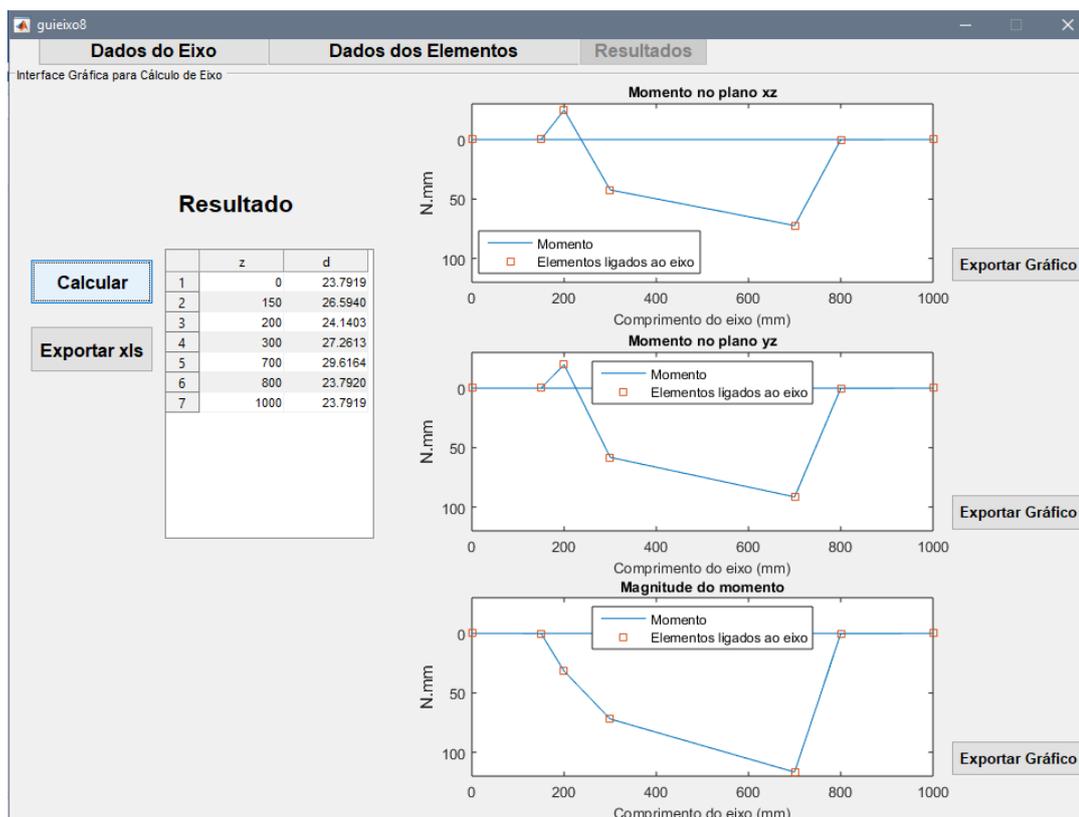
Fator geométrico de tensão por cisalhamento na região (kts):

Determine o raio do entalhe (re): mm

	Z	Fx	Fy	kt	kts	re
1	150	0.5000	0.4000	1.5000	1.6000	0.5000
2	300	0.6000	0.7000	1.3000	1.4000	0.5000
3	0	0	0	0	0	0

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 12 - Interface Gráfica para Cálculo de Eixos - Aba 3



Fonte: Elaborada pela autora.

Para a validação do programa, uma mesma problemática foi resolvida manualmente e através do programa. Na Tabela 5 foram listados os erros percentuais do cálculo do momento. O site Viga Online foi utilizado para a comparação dos valores do momento, pois exibe os gráficos do momento, um dos resultados obtidos pelo programa.

Tabela 5 - Comparação resultados momentos

Posição [mm]	Momento Calculado [Nmm]	Momento Programa [Nmm]	Erro
0	0	0	0,00%
150	0	0,081721556	0,00%
200	32,01	31,75029511	0,81%
300	72,17	71,98040205	0,26%
700	116,86	116,6026472	0,22%
800	0	0,187182132	0,00%
1000	0	0	0,00%

Fonte: Elaborada pela autora.

Os pontos onde não foram aplicados elementos não possuem erros associados. Nos pontos onde são aplicados os elementos, o erro do momento é inferior a 1%. No cálculo dos diâmetros, Tabela 6, o erro percentual possui um leve aumento, mantendo seu valor inferior a 1,5%.

Tabela 6 - Comparação resultados diâmetro.

Posição [mm]	Diâmetro Calculado [mm]	Diâmetro Programa [mm]	Erro
0	23,79193762	23,79193762	0,00%
150	26,93006509	26,59396225	1,25%
200	23,79193762	24,14031602	-1,46%
300	27,21414518	27,2613086	-0,17%
700	29,5223738	29,61639248	-0,32%
800	23,79193762	23,79195015	0,00%
1000	23,79193762	23,79193762	0,00%

Fonte: Elaborada pela autora.

Os resultados obtidos através da interface se aproximam bastante daqueles calculados manualmente, apresentando uma taxa de erro pequena, o que indica que o programa é adequado para ser utilizado no cálculo de projeto de eixo.

5. Conclusão

A interface gráfica desenvolvida é voltada para o projeto mecânica de eixos, atendendo aos casos onde a flexão é alternada e a torção fixa. A ferramenta é de fácil utilização e foi construída com base no projeto de eixos ensinado na disciplina de Elementos de Máquinas, o que faz com que seja possível o seu uso por alunos de Engenharia Mecânica.

A base de cálculo implementada no programa é fundamentada no comportamento linear das cargas conectadas ao eixo, como engrenagens e polias, e no método de análise dos eixos rotativo de seção circulares. Essa característica facilitou a criação do programa, sem deixar de lado a sua aplicabilidade e sem limitar o programa a uma única combinação de elementos acoplados ao eixo.

A interface é simples, intuitiva e rápida, porém é necessário que o usuário esteja familiarizado com o nome técnico das variáveis necessárias para o

dimensionamento do eixo, segundo a ASME, bem como conheça o método empregado.

Além disso, o programa possui ferramentas que tornam o seu uso mais prático como as tabelas de resistência à tração e ao escoamento, que dispensa material complementar, as funções de exportação para Excel distribuídos nas três abas e os botões de exportar os gráficos dos momentos.

Por fim, o resultado final do programa é satisfatório, já que após comparação dos resultados obtidos no programa com exemplos da literatura, constatou-se que a rotina de cálculo elaborada é confiável e apresenta uma boa precisão.

BIBLIOGRAFIA

BUDYNAS, R. G.; MISCHKE, C. R.; SHIGLEY, J. E. **Projeto de Engenharia Mecânica**, 7ª edição. 2005

COSTA, T. F. **VIGA Online**, c2017. Página inicial. Disponível em: <<https://viga.online/index.php/>>. Acessado em: 10 de nov. de 2018.

HOLTZAPPLE, M. T.; REECE, W. D. **Introdução à engenharia**. Grupo Gen-LTC, 2000.

LOBO, R. L.; FILHO, Silva. **Para que devem ser formados os novos engenheiros?**. ESTADÃO, 2012. Disponível em: <<https://educacao.estadao.com.br/noticias/geral,artigo-para-que-devem-ser-formados-os-novos-engenheiros,838027?fbclid=IwAR2rN4907947psxh-S3TAvyqcaULDP58ylvHqzTjNTiFGydQjsQloDM420/>>. Acessado em: 22 de jun. de 2019.

MOLER, C. **The Origins of MATLAB**. MathWorks, 2004. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/company/newsletters/articles/the-origins-ofmatlab.htm/>>. Acessado em: 22 de jun. de 2019.

NORTON, R. L. **Projeto de máquinas**. 4º edição. bookman editora, 2013.

SANTOS, S. L. **Concepção e desenvolvimento de uma interface gráfica para interação tridimensional**. 2009.

SBARDELOTTO, V. G. **Projeto, fabricação e integração de eixo rotativo em fresadora CNC controlada pelo LINUXCNC**. 2017.

WATANABE, F. F. et al. **Desenvolvimento de um software para verificação de eixos**. 2011. Tese de Doutorado. UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO.

LENZI, M. S. **Eixos e Árvores**. 01 de apr de 2015. 14 p. Notas de Aula. Disponível em < <https://slideplayer.com.br/slide/5605543/>>. Acessado em: 02 de jul. de 2019.

APÊNDICE A – TESTE DE VALIDAÇÃO DO PROGRAMA

Para testar se a interface construída é confiável o seguinte exercício foi proposto, suas respostas foram calculadas manualmente com auxílio de uma calculadora científica e também calculadas através do programa

Exercício

Encontrar o diâmetro do eixo que possui 3 elementos acoplados com as seguintes características:

Comprimento (L) = 1000 mm

Posição do mancal A (a) = 200 mm

Posição do mancal B (b) = 800 mm

Fator geométrico de concentração de tensão de cisalhamento para os mancais (k_t) = 1

Fator geométrico de concentração de tensão de flexão para os mancais (k_t) = 1

Raio de entalhe (r_e) = 0,5 mm

Torque médio (T_m) = 300 Nm

Coeficiente de segurança (N_f) = 2

Confiabilidade do projeto = 90%

Material: aço 1020 laminado a frio

Elemento 1

Posição (z) = 150 mm

Carga no eixo X (F_x) = 0,5 kN

Carga no eixo Y (F_y) = 0,4 kN

Fator geométrico de concentração de tensão de cisalhamento para os mancais (k_t) = 1,6

Fator geométrico de concentração de tensão de flexão para os mancais (k_t) = 1,5

Raio de entalhe (r_e) = 0,5 mm

Elemento 2

Posição (z) = 300 mm

Carga no eixo X (F_x) = 0,6 kN

Carga no eixo Y (F_y) = 0,7 kN

Fator geométrico de concentração de tensão de cisalhamento para os mancais (kts)
= 1,4

Fator geométrico de concentração de tensão de flexão para os mancais (kt) = 1,3

Raio de entalhe (re) = 0,5 mm

Elemento 3

Posição (z) = 700 mm

Carga no eixo X (Fx) = 0,8 kN

Carga no eixo Y (Fy) = 1 kN

Fator geométrico de concentração de tensão de cisalhamento para os mancais (kts)
= 1,4

Fator geométrico de concentração de tensão de flexão para os mancais (kt) = 1,5

Raio de entalhe (re) = 0,5 mm

Cálculos

Sut = 469 Mpa

Sy = 393 Mpa

$\sqrt{a} = 0,096$

$\sqrt{as} = 0,072$

$$q = \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{re}}} = 0,593742$$

$$qs = \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{as}}{\sqrt{re}}} = 0,660862$$

$$K_f = 1 + q * (K_t - 1)$$

$$K_{fs} = 1 + q * (K_{ts} - 1)$$

Posição [mm]	Kf	Kfs
0	1	1
150	1,26987	1,3965
200	1	1
300	1,17812	1,2643
700	1,23749	1,3304
800	1	1
1000	1	1

$$S_e = C_{carreg} * C_{tamanho} * C_{superf} * C_{temp} * C_{conf} * S_e'$$

$$S_e = 1 * 1 * 0,8837 * 1 * 0,897 * 234,5$$

$$S_e = 185,88 \text{ MPa}$$

$$d = \left\{ \frac{32 * N_f}{\pi} * \left[\left(K_f * \frac{M_a}{S_f} \right)^2 + \frac{3}{4} * \left(K_{fsm} * \frac{T_m}{S_y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{3}}$$

Posição [mm]	Diâmetro
0	23,7919
150	26,9300
200	23,7919
300	27,2141
700	29,5223
800	23,7919
1000	23,7919

$$\text{Se } 8\text{mm} < d \leq 250 \text{ mm} \rightarrow C_{tamanho} = 1,189 * d^{-0,097}$$

$$S_e = S_e' * C_{tamanho}$$

$$dc = \left\{ \frac{32 * N_f}{\pi} * \left[\left(K_f * \frac{M_a}{S_f} \right)^2 + \frac{3}{4} * \left(K_{fsm} * \frac{T_m}{S_y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{3}}$$

Resultados

Posição [mm]	Ctam	Se corrigido [MPa}	dc [mm]
0	1	161,0245402	26,1672
150	0,864130335	160,6245467	26,93007
200	1	161,0245402	26,1672
300	0,86404356	160,608417	27,21415
700	0,858225014	159,5268656	29,52237
800	1	161,0245402	26,1672
1000	1	161,0245402	26,1672