



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ

CAMPUS RUSSAS

CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

SAMUEL DA SILVA CARVALHO

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROGRAMA PARA DIMENSIONAR PARAFUSOS
PRÉ CARREGADOS SOB ESFORÇOS AXIAIS EM JUNÇÕES PARAFUSADAS**

RUSSAS

2023

SAMUEL DA SILVA CARVALHO

DESENVOLVIMENTO DE UM PROGRAMA PARA DIMENSIONAR PARAFUSOS PRÉ
CARREGADOS SOB ESFORÇOS AXIAIS EM JUNÇÕES PARAFUSADAS

Trabalho de Conclusão do Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Helton Magalhães Pinheiro.

Coorientador: Prof. Ms. Ramon Rudá Brito Medeiros.

RUSSAS

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

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

C328d Carvalho, Samuel da Silva.

Desenvolvimento de um programa para dimensionar parafusos pré carregados sob esforços axiais em junções parafusadas / Samuel da Silva Carvalho. – 2023.
68 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Curso de Engenharia Mecânica, Russas, 2023.

Orientação: Prof. Dr. Pedro Helton Magalhães Pinheiro.

Coorientação: Prof. Me. Ramon Rudá Brito Medeiros.

1. União parafusada. 2. Dimensionamento. 3. Software. I. Título.

CDD 620.1

SAMUEL DA SILVA CARVALHO

DESENVOLVIMENTO DE UM PROGRAMA PARA DIMENSIONAR PARAFUSOS PRÉ
CARREGADOS SOB ESFORÇOS AXIAIS EM JUNÇÕES PARAFUSADAS

Trabalho de Conclusão do Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovada em: 13/07/2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Pedro Helton Magalhães Pinheiro (Orientador)

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. George Luiz Gomes de Oliveira

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Cândido Jorge de Sousa Lobo

Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Rosangela e Erivando.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Rosangela Carvalho e Erivando Fernandes, por todo apoio.

Aos meus amigos Cleiton Monteiro, Marcos Rogério e Pedro Honorato, por todos os ensinamentos e momentos que passamos juntos durante a graduação.

A minha namorada, Joana Angélica, por toda paciência e amor que recebi durante esses anos.

A mim, Samuel Carvalho, por nunca ter desistido.

Ao Prof. Dr. Pedro Helton Magalhães Pinheiro e Prof. Ms. Ramon Rudá Brito Medeiros, pela excelente orientação e por toda a ajuda.

Aos professores participantes da banca examinadora Prof. Dr. George Luiz Gomes de Oliveira e Prof. Dr. Cândido Jorge de Souza Lobo pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

“Falar é fácil, mostre-me o código.” (Linus Torvalds).

RESUMO

Desde o projeto até a fase de montagem de máquinas, equipamentos e estruturas metálicas, por exemplo, sempre houve a necessidade de unir componentes por meio de fixadores. Um dos elementos de fixação mais utilizados nestas ligações são os parafusos, que permitem ligações aparafusadas entre os componentes. Devido à importância dessas uniões para um bom funcionamento entre os elementos unidos, o projeto se faz necessário para garantir a eficácia e segurança dos parafusos em relação aos esforços a que são submetidas essas uniões aparafusadas e dependendo das configurações de esforços ativos, torna-se complexo, lento, improdutivo e com mais possibilidades de erros o dimensionamento destes elementos feito manualmente. Diante desse problema de dimensionamento de parafusos, visando eficiência, praticidade e acessibilidade no dimensionamento para uso didático e auxílio em projetos comerciais, este trabalho utiliza as tecnologias *Typescript*, *React Js*, *Electron Js*, além de outras tecnologias de desenvolvimento web e desktop para desenvolver um programa para dimensionar parafusos pré-carregados em juntas de parafusos submetido a forças axiais estáticas ou dinâmicas, mostrando ao usuário a constante de rigidez da junta parafusada, os fatores de segurança contra separação da junta, contra escoamento do parafuso e contra falha do parafuso por fadiga, no caso de cargas dinâmicas, além de apresentar gráficos desses fatores de segurança em função da pré-carga aplicada aos parafusos. A metodologia de cálculo de dimensionamento foi adquirida de literatura renomada e repassada para algoritmos feitos em *Typescript*, utilizando a ideia de *Clean Architecture*, onde os algoritmos para realizar os cálculos são separados e independentes da interface gráfica, garantindo maior facilidade de manutenção e escalabilidade dos algoritmos desses códigos, e os algoritmos para criar a interface do programa. Como resultado, por meio das tecnologias utilizadas, foi possível criar uma interface moderna, intuitiva, fácil de usar e com resolução de cálculo quase instantânea. Como o método de cálculo do dimensionamento do parafuso foi retirado da literatura, nos resultados, houve uma comparação entre as respostas da literatura e do software, onde os resultados convergiram sem problemas, tanto em valores quanto nos gráficos apresentados.

Palavras-chave: união parafusada; dimensionamento; software;

ABSTRACT

From design to the assembly phase of machinery, equipment and metallic structures, for example, there has always been a need to join components using fasteners. One of the most used fastening elements in these connections are screws, which allow bolted connections between components. Due to the importance of these unions for a good functioning between the joined elements, the project is necessary to guarantee the effectiveness and safety of the screws in relation to the efforts to which these bolted unions are subjected and depending on the configurations of active efforts, it becomes complex, slow, unproductive and with more possibilities of errors the sizing of these elements done manually. Faced with this screw sizing problem, aiming at agility in sizing and didactic and commercial use, this work uses Typescript, React Js, Electron Js technologies, as well as other web and desktop development technologies to develop a program to size preloaded screws in bolt joints subjected to static or dynamic axial forces, showing the user the stiffness constant of the bolted joint, the safety factors against joint separation, against bolt yielding and against failure of the bolt due to fatigue, in the case of dynamic loads, in addition to presenting graphs of these safety factors as a function of the preload applied to the screws. The sizing calculation methodology was acquired from renowned literature and passed on to algorithms made in Typescript, using the idea of Clean Architecture, where the algorithms to perform the calculations are separate and independent of the graphical interface, ensuring greater ease of maintenance and scalability of the algorithms of these codes, and the algorithms to create the program's interface. As a result, through the technologies used, it was possible to create a modern, intuitive, easy-to-use interface with almost instantaneous calculation resolution. As the screw sizing calculation method was taken from the literature, in the results, there was a comparison between the responses from the literature and the software, where the results converged without problems, both in values and in the graphs presented.

Keywords: screwed union; sizing; software.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Gráfico do comportamento dos componentes da junta parafusada antes da aplicação das cargas estáticas.....	21
Figura 2 - Gráfico do comportamento dos componentes da junta parafusada sob cargas estáticas.....	21
Figura 3 - Gráfico do comportamento dos componentes da junta parafusada antes da aplicação das cargas dinâmicas.....	24
Figura 4 - Gráfico do comportamento dos componentes da junta parafusada sob cargas dinâmicas	25
Figura 5 - Curvas para o dimensionamento sob cargas dinâmicas.....	27
Figura 6 - Junta parafusada em tração.....	32
Figura 7 - Parafuso comprimindo um cilindro onde este sofre ação de cargas externas.....	33
Figura 8 - Gaxeta confinada.....	37
Figura 9 - Anel confinado.....	38
Figura 10 - Gaxeta não confinada.....	38
Figura 11 - Estrutura de arquivos na pasta Domain.....	41
Figura 12 - Fluxograma do software.....	41
Figura 13 - Dados do fator de correção de confiabilidade.....	43
Figura 14 - Pasta de algoritmos para correção do limite a fadiga do aço.....	43
Figura 15 - Algoritmo para realizar a correção do limite a fadiga do aço.....	44
Figura 16 - Estrutura dos arquivos para calcular a constante de rigidez da junta.....	45
Figura 17 - Algoritmo para calcular a constante de rigidez da junta.....	47

Figura 18 - Estrutura dos arquivos para calcular os coeficientes de segurança.....	48
Figura 19 - Algoritmo para calcular o coeficiente de segurança contra a separação da Junta.....	49
Figura 20 - Algoritmo para calcular o coeficiente de segurança contra o escoamento...	49
Figura 21 - Algoritmo para calcular o coeficiente de segurança de Goodman.....	50
Figura 22 - Algoritmo do fluxograma geral da aplicação.....	50
Figura 23 - Interface do software por padrão.....	53
Figura 24 - Interface do software com outras configurações.....	53
Figura 25 - Funcionamento do estudo de caso 15.11 do Norton.....	56
Figura 26 - Software com a resolução do estudo de caso 15-11 do Norton.....	59
Figura 27 - Software com a continuação da resolução do estudo de caso 15-11 do Norton.....	59
Figura 28 - Software com a solução do exemplo 15-2.....	62
Figura 29 - Software com a solução do exemplo 15-3.....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parafusos padrão UNS.....	16
Tabela 2 - Especificações SAE para parafusos de aço.....	17
Tabela 3 - Parafusos padrão ISO.....	18
Tabela 4 - Especificações ISO para parafusos de aço.....	19
Tabela 5 - Parâmetros para o fator de correção de superfície.....	30
Tabela 6 - Valores para o fator de correção de confiabilidade.....	31
Tabela 7 - Parâmetros de rigidez usados na Equação 43.....	34
Tabela 8 - Parâmetros de rigidez usados na Equação 44 e Equação 45.....	35
Tabela 9 - Módulo de elasticidade de materiais para gaxetas.....	37
Tabela 10 - Parâmetros para estimar o limite à fadiga do material do parafuso.....	44
Tabela 11 - Parâmetros para calcular a constante de rigidez da junta parafusada.....	45
Tabela 12 - Parâmetros do exemplo 15-3 do Norton.....	54
Tabela 13 - Comparação dos limites à fadiga corrigidos, em psi.....	54
Tabela 14 - Parâmetros utilizados no exemplo 15-4 do Norton.....	55
Tabela 15 - Comparação da constante de rigidez da junta, para o caso da gaxeta confinada.....	55
Tabela 16 - Comparação da constante de rigidez da junta, para o caso da gaxeta não confinada.....	56
Tabela 17 - Parâmetros utilizados no estudo de caso 15.11 do Norton.....	57
Tabela 18 - Comparação do coeficiente de segurança de Goodman do estudo de caso 15.11.....	58

Tabela 19 - Comparação do coeficiente de segurança contra a separação da junta do estudo de caso 15.11.....	58
Tabela 20 - Comparação do coeficiente de segurança contra o escoamento do estudo de caso 15.11.....	58
Tabela 21 - Comparação da constante de rigidez da junta do estudo de caso 15.11, para o caso da gaxeta não confinada.....	58
Tabela 22 - Parâmetros utilizados no exemplo 15-2 do Norton.....	60
Tabela 23 - Comparação do coeficiente de segurança contra a separação da junta do exemplo 15-2.....	61
Tabela 24 - Comparação do coeficiente de segurança contra o escoamento do exemplo 15-2.....	61
Tabela 25 - Comparação da constante de rigidez da junta do exemplo 15-2 para o caso da gaxeta confinada.....	61
Tabela 26 - Comparação do coeficiente de segurança de Goodman do exemplo 15-3.....	61
Tabela 27 - Comparação do coeficiente de segurança contra a separação da junta do exemplo 15-3.....	62
Tabela 28 - Comparação do coeficiente de segurança contra o escoamento do exemplo 15-3.....	62

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Objetivo geral.....	15
1.2 Objetivos específicos.....	15
2 REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1 Parafusos padronizados.....	16
2.1.1 Padrão UNS.....	16
2.1.2 Padrão ISO.....	17
2.2 Pré-carga em junções parafusadas.....	19
2.3 Cargas atuantes em parafusos pré-carregados.....	20
2.3.1 Cargas estáticas.....	20
2.3.2 Separação da junta parafusada e escoamento do parafuso.....	23
2.3.3 Cargas dinâmicas.....	24
2.3.4 Coeficiente de segurança contra a falha por fadiga.....	26
2.4 Constante de rigidez da junta parafusada.....	31
2.4.1 Juntas com flanges feitas do mesmo material.....	34
2.4.2 Juntas com flanges feitas de materiais diferentes.....	35
2.4.3 Juntas com retentores.....	36
2.5 Tecnologias e ferramentas utilizadas.....	38
2.5.2 React Js.....	39
2.5.3 Electron Js.....	39
2.5.4 Visual Studio Code.....	39
3 METODOLOGIA	40
3.1 Arquitetura do software para realizar os cálculos de dimensionamento.....	40
3.2 Interface do software.....	42
3.3 Cálculo do limite à fadiga estimado corrigido.....	42
3.4 Cálculo da constante de rigidez da junta.....	44
3.5 Cálculo de dimensionamento dos parafusos.....	47
3.6 Coeficientes de segurança em função do pré carregamento.....	50
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
4.1 Validando o cálculo do limite a fadiga corrigido do aço.....	53
4.2 Validando o cálculo da constante de rigidez da junta.....	54
4.3 Validando o cálculo dos coeficientes de segurança.....	56

4.4 Validação com o exemplo 15-2 e 15-3 do Norton	59
5 CONCLUSÃO	64
REFERÊNCIAS.....	65

1 INTRODUÇÃO

Máquinas, equipamentos e estruturas em geral sempre são compostos por diversos elementos, cada um com sua função, que necessitam trabalhar em conjunto e para tanto, precisam estar interligados de alguma forma. Segundo Griza (2000), a união dos componentes de máquinas, ferramentas e estruturas em geral é um importante método construtivo. Ainda de acordo com Griza (2000), muitas vezes é impossível projetá-los sem que seja empregada alguma forma de conexão, como parafusos, por exemplo.

Cada elemento é projetado para realizar sua devida função, mas como esses elementos trabalham em conjunto, o projeto das uniões entre eles também se faz necessário, uma vez que essas uniões também podem falhar. Segundo Júnior (2020), o projeto de um elemento de fixação ou junta parafusada, como o de qualquer outra coisa, envolve uma consideração detalhada de função, formas, materiais, dimensões, cargas de trabalho, ambiente de serviço, entre outros.

De acordo com Barbosa (2011), pode-se primeiramente dividir as uniões mecânicas em desmontáveis e não desmontáveis. No caso das uniões desmontáveis, tem-se a possibilidade de substituir componentes danificados sem a necessidade de danificar a união ou outros componentes. Nesse tipo de ligação, um dos principais elementos de fixação empregado é o parafuso. Segundo Filho (1999), para ser considerado um parafuso, dois requisitos básicos são necessários. O primeiro é a rosca e o segundo é o dispositivo de atarraxar, que não muito raramente é confundido com o tipo de cabeça.

Parafusos são elementos de união bastante utilizados em ligações de flanges, sejam elas em estruturas metálicas estáticas, no caso da construção civil, ou em estruturas com carregamentos dinâmicos como, no caso de certos vasos de pressão, estando sujeitos a esforços de tração, compressão, cisalhamento, flexão ou até mesmo o conjunto desses esforços.

Com a importância do parafuso nas uniões de componentes e para o bom funcionamento do conjunto de peças, é necessário que os parafusos sejam dimensionados para evitar o afrouxamento ou separação total dessas junções em uniões sujeitas a esforços axiais. Isso mostra a devida importância na hora de dimensionar e adequar os coeficientes de segurança para as devidas necessidades. Segundo Silveira (2013), no entanto, um fator de segurança muito elevado implica em maiores custos, em maior peso e menor eficiência, o que torna necessário projetar o parafuso da maneira mais otimizada possível para cada tipo de aplicação.

Como o dimensionamento adequado e otimizado dos parafusos requer várias condições de cargas, ambiente e montagem, fazer os cálculos manualmente torna-se lento, muitas vezes

ineficazes, uma vez que várias iterações podem ser necessárias, e com maiores possibilidades de erros, além da menor produtividade. Para esses tipos de problemas, o uso de software torna-se indispensável, uma vez que os cálculos podem ser feitos várias vezes, de forma rápida, com erros de cálculo minimizados, garantindo eficiência e rapidez na hora de projetar parafusos em ligações parafusadas ou em estudos. Segundo Branchier (2017), cabe salientar que cálculos estruturais através de prototipagem virtual não extinguem a necessidade de um protótipo físico, porém são de fundamental importância para minimizar custos, reduzindo o número desses protótipos e potenciais erros de execução.

1.1 Objetivo geral

Esse trabalho propõe o desenvolvimento de um programa para realizar o dimensionamento de parafusos de fixação sujeitos a esforços exclusivamente axiais em junções parafusadas, com o intuito de proporcionar uma experiência de cálculo e estudos mais eficiente, prática e acessível, seja para estudantes ou profissionais da área.

1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos que esse trabalho busca são:

- Desenvolver uma arquitetura de software de fácil manutenção, altamente escalável, independente da interface do usuário e acessível;
- Criar uma interface amigável, intuitiva e dinâmica;
- Criar um algoritmo para estimar o limite à falha por fadiga corrigida do material do parafuso, para o caso de carregamentos dinâmicos;
- Criar um algoritmo para calcular a constante de rigidez da junta parafusada;
- Criar um algoritmo para calcular os coeficientes de segurança contra separação de junta, contra o escoamento do parafuso, e contra a falha por fadiga do parafuso;
- Mostrar graficamente os coeficientes de segurança em função da pré-carga aplicada;
- Validar o software com estudo de caso;

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Parafusos padronizados

Parafusos são elementos de corpo cilíndrico uma cabeça podendo ser de alguns tipos, além de possuir roscas padronizadas em uma certa ou total extensão do seu corpo. Estas roscas podem ser de diferentes especificações e trabalham em conjunto com porcas, com as mesmas características de roscas (FRANCESCHI, 2014).

2.1.1 Padrão UNS

O padrão *Unified National Standard* (UNS) trata dos parafusos padronizados seguindo o Sistema americano de medidas. A Tabela 1 mostra alguns parafusos desse padrão, onde as medidas são no formato americano de medidas.

Tabela 1 - Parafusos padrão UNS

Tabela 15-1 Principais dimensões de roscas de parafusos UNS
Dados calculados a partir das Equações 15.1 – Ver a Referência 3 para mais informações

Tamanho	Roscas grossas – UNC			Roscas finas – UNF			
	Diâmetro maior d (in)	Roscas por polegada	Diâmetro menor d_r (in)	Área sob tração A_t (in ²)	Roscas por polegada	Diâmetro menor d_r (in)	Área sob tração A_t (in ²)
0	0,0600	–	–	–	80	0,0438	0,0018
1	0,0730	64	0,0527	0,0026	72	0,0550	0,0028
2	0,0860	56	0,0628	0,0037	64	0,0657	0,0039
3	0,0990	48	0,0719	0,0049	56	0,0758	0,0052
4	0,1120	40	0,0795	0,0060	48	0,0849	0,0066
5	0,1250	40	0,0925	0,0080	44	0,0955	0,0083
6	0,1380	32	0,0974	0,0091	40	0,1055	0,0101
8	0,1640	32	0,1234	0,0140	36	0,1279	0,0147
10	0,1900	24	0,1359	0,0175	32	0,1494	0,0200
12	0,2160	24	0,1619	0,0242	28	0,1696	0,0258
1/4	0,2500	20	0,1850	0,0318	28	0,2036	0,0364
5/16	0,3125	18	0,2403	0,0524	24	0,2584	0,0581
3/8	0,3750	16	0,2938	0,0775	24	0,3209	0,0878
7/16	0,4375	14	0,3447	0,1063	20	0,3725	0,1187
1/2	0,5000	13	0,4001	0,1419	20	0,4350	0,1600
9/16	0,5625	12	0,4542	0,1819	18	0,4903	0,2030
5/8	0,6250	11	0,5069	0,2260	18	0,5528	0,2560
3/4	0,7500	10	0,6201	0,3345	16	0,6688	0,3730
7/8	0,8750	9	0,7307	0,4617	14	0,7822	0,5095

FONTE: Norton (2013)

A nomenclatura dos parafusos UNS é dada por 5/16-18 UNC, onde 5/16 é o diâmetro maior do parafuso em polegadas, 18 é a quantidade de roscas por polegadas e UNC representa roscas grossas.

O aço utilizado nos parafusos de padrão UNC também são padronizados, onde os responsáveis por essa padronização são a *Society of Automobile Engineers* (SAE). A Tabela 2 mostra os aços padrão SAE, segundo o seu grau SAE.

Tabela 2 - Especificações SAE para parafusos de aço

Tabela 15-6 Especificações SAE e resistências de parafusos de aço

Número de grau SAE	Intervalo de diâmetro externo (in)	Resistência mínima de prova (kpsi)	Resistência mínima de escoamento (kpsi)	Resistência mínima à tração (kpsi)	Material
1	0,25-1,5	33	36	60	carbono baixo ou médio
2	0,25-0,75	55	57	74	carbono baixo ou médio
2	0,875-1,5	33	36	60	carbono baixo ou médio
4	0,25-1,5	65	100	115	carbono médio repuxado a frio
5	0,25-1,0	85	92	120	carbono médio, Q&T*
5	1,125-1,5	74	81	105	carbono médio, Q&T
5,2	0,25-1,0	85	92	120	baixo carbono martensítico, Q&T
7	0,25-1,5	105	115	133	aço-liga médio, Q&T
8	0,25-1,5	120	130	150	aço-liga médio, Q&T
8,2	0,25-1,0	120	130	150	baixo carbono martensítico, Q&T

FONTE: Norton (2013)

2.1.2 Padrão ISO

A Organização internacional de padronização (ISO) possui normas que padronizam diversos tipos de parafusos, seguindo a unidade de medida padrão do Sistema internacional de medida (SI). A Tabela 3 mostra alguns parafusos padrão ISO.

Tabela 3 - Parafusos padrão ISO

Tabela 15-2 Dimensões principais de roscas de parafusos métricos padrão ISO
 Dados calculados a partir das Equações 15.1 – Ver a Referência 4 para mais informações

Diâmetro maior d (in)	Roscas grossas			Roscas finas		
	Passo p mm	Diâmetro menor d_1 (mm)	Área sob tração A_t (mm ²)	Passo p mm	Diâmetro menor d_1 (mm)	Área sob tração A_t (mm ²)
3,0	0,50	2,39	5,03			
3,5	0,60	2,76	6,78			
4,0	0,70	3,14	8,78			
5,0	0,80	4,02	14,18			
6,0	1,00	4,77	20,12			
7,0	1,00	5,77	28,86			
8,0	1,25	6,47	36,61	1,00	6,77	39,17
10,0	1,50	8,16	57,99	1,25	8,47	61,20
12,0	1,75	9,85	84,27	1,25	10,47	92,07
14,0	2,00	11,55	115,44	1,50	12,16	124,55
16,0	2,00	13,55	156,67	1,50	14,16	167,25
18,0	2,50	14,93	192,47	1,50	16,16	216,23
20,0	2,50	16,93	244,79	1,50	18,16	271,50
22,0	2,50	18,93	303,40	1,50	20,16	333,06
24,0	3,00	20,32	352,50	2,00	21,55	384,42
27,0	3,00	23,32	459,41	2,00	24,55	495,74
30,0	3,50	25,71	560,59	2,00	27,55	621,20
33,0	3,50	28,71	693,55	2,00	30,55	760,80
36,0	4,00	31,09	816,72	3,00	32,32	864,94
39,0	4,00	34,09	975,75	3,00	35,32	1028,39

FONTE: Norton (2013)

Utilizando o primeiro parafuso da Tabela 3, temos o parafuso M3x0,50, onde 3 é o diâmetro maior do parafuso em milímetros e 0,50 é o passo de hélice do parafuso também em milímetros.

O material utilizado nos parafusos ISO também é padronizado pela mesma organização. A Tabela 4 mostra alguns aços para parafusos ISO e suas propriedades segundo sua classe.

Tabela 4 - Especificações ISO para parafusos de aço

Número de classe	Intervalo de diâmetro externo (mm)	Resistência mínima de prova (MPa)	Resistência mínima de escoamento (MPa)	Resistência mínima à tração (MPa)	Material
4,6	M5–M36	225	240	400	aço-carbono, médio ou baixo
4,8	M1,6–M16	310	340	420	aço-carbono, médio ou baixo
5,8	M5–M24	380	420	520	aço-carbono, médio ou baixo
8,8	M3–M36	600	660	830	carbono médio, Q&T
9,8	M1,6–M16	650	720	900	carbono médio, Q&T
10,9	M5–M36	830	940	1040	baixo carbono, martensítico, Q&T
12,9	M1,6–M36	970	1100	1220	liga, Q&T

FONTE: Norton (2013)

2.2 Pré-carga em junções parafusadas

Existem parafusos com apertos normais e parafusos com protensão inicial. Segundo Fakury (2016), o aperto com protensão inicial é feito de maneira que o parafuso desenvolva em seu corpo uma força de protensão mínima, equivalente a aproximadamente 70% da sua força de tração resistente nominal.

Durante o processo de montagem dos parafusos sujeitos a tração, um pré carregamento de tração próximo a resistência de prova é aplicado para garantir a eficiência e segurança da montagem deles. Segundo Budynas (2011), a resistência de prova é a resistência máxima de um parafuso sem que ele apresente deformações permanentes. Para junções que suportarão esforços estáticos, essa pré-carga aplicada gera normalmente, uma tensão de 90% da resistência de prova, e para esforços dinâmicos, esse pré carregamento é de 75% a resistência de prova.

Com a montagem da junção parafusada sendo feita dessa maneira, garante uma segurança de que se os parafusos não romperem na aplicação dessas pré cargas, dificilmente irão romper em serviço, segundo Norton.

Quando o parafuso é apertado, os materiais da junta tendem a se comprimir enquanto o parafuso tende a tracionar, garantindo elevadas tensões de tração no parafuso antes mesmo dele entrar em serviço.

A pré carga aplicada no parafuso é dada pela Equação 1 para carregamentos estáticos e pela Equação 2 para carregamentos dinâmicos.

$$F_i = S_{ut} \cdot A_t \cdot 0,90 \quad (1)$$

$$F_i = S_{ut} \cdot A_t \cdot 0,75 \quad (2)$$

onde, S_{ut} é a resistência de prova do material do parafuso e A_t é a área sob tração do parafuso.

2.3 Cargas atuantes em parafusos pré-carregados

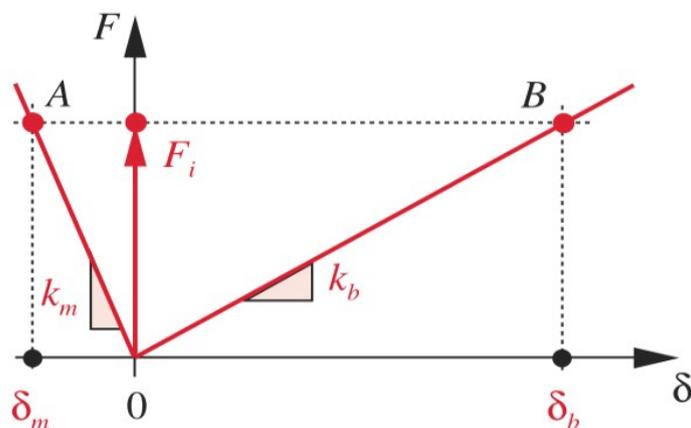
Para analisar as tensões e forças atuantes nos parafusos pré-carregados, deve-se duas situações possíveis, a de cargas estáticas e a de cargas dinâmicas.

2.3.1 Cargas estáticas

A junta com parafusos pré-carregados sujeitos a cargas estáticas apresenta comportamentos diferentes entre seus componentes, que no caso são os materiais da junta e os parafusos.

Fazendo uma análise através da deflexão dos componentes da junta, nota-se que durante a aplicação da pré-carga, ambos apresentam comportamentos semelhantes, porém opostos. Enquanto o parafuso traciona durante a aplicação da pré carga, o material da junta tende a comprimir. Isso é mostrado no gráfico da Figura 1, onde F_i é a força de pré carga aplicada, K_m e δ_m são o módulo de elasticidade e deflexão do material da junta respectivamente, e K_b e δ_b são o módulo de elasticidade e deflexão do parafuso respectivamente.

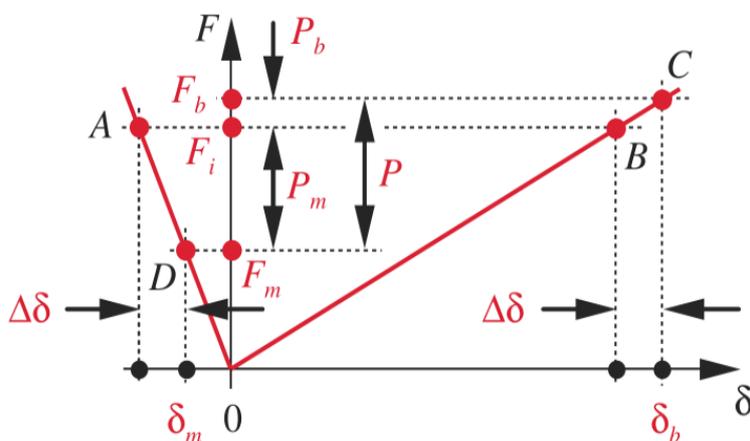
Figura 1 - Gráfico do comportamento dos componentes da junta parafusada antes da aplicação das cargas estáticas



FONTE: Norton (2013)

Após a aplicação do carregamento estático P , como mostra a Figura 2, uma deflexão adicional $\Delta\delta$ é introduzida tanto no parafuso quanto no material da junta. Essa nova deflexão é igual para ambos os componentes quando a tensão aplicada é menor que a pré carga aplicada. Para essa nova configuração de deflexão causa uma mudança nas cargas atuantes no parafuso e material da junta, onde a carga no parafuso é aumentada em P_b , tornando-se F_b , e a carga no material diminui em P_m , tornando-se F_m .

Figura 2 - Gráfico do comportamento dos componentes da junta parafusada sob cargas estáticas



FONTE: Norton (2013)

Nessa problemática, pode-se extrair a informação de que uma carga estática de tração aplicada em uma junta parafusada é dividida em duas componentes suportadas pelo material da junta e pelo parafuso. Então tem-se pela Equação 3

$$P = P_m + P_b \quad (3)$$

onde, P é carga aplicada, P_m é parcela da carga aplicada suportada pelo material da junta e P_b é parcela da carga aplicada suportada pelo parafuso.

Com isso, tem-se uma carga compressiva no material da junta e uma carga de tração no parafuso, ambas dadas pela Equação 4 e Equação 5, respectivamente.

$$F_m = F_i - P_m \quad (4)$$

$$F_b = F_i + P_b \quad (5)$$

Para cargas aplicadas abaixo da pré carga de montagem da junta, o carregamento é suportado tanto pelo parafuso quanto pelo material da junta, tornando a junta mais eficiente. Isso explica o porquê de pré-cargas altas serem bem usuais. Segundo Norton (2013), para os casos em que a carga aplicada é superior à pré-carga de montagem, ela é suportada integralmente pelo parafuso, pois há a separação da junta e o material não conseguirá ser suporte para o carregamento.

Para exemplificar essa situação física, tem-se que a deflexão $\Delta\delta$ pode ser dada pela Equação 6

$$\Delta\delta = \frac{P_b}{K_b} = \frac{P_m}{K_m} \quad (6)$$

Logo, P_m pode ser dado pela Equação 7

$$P_b = \frac{P_m}{K_m} \cdot K_b \quad (7)$$

Substituindo a Equação 7 na Equação 3, tem-se a Equação 8 e Equação 9

$$P = \frac{P_m}{K_m} \cdot K_b + P_b \quad (8)$$

$$P_b = \frac{K_b}{K_m + K_b} \cdot P \quad (9)$$

Nota-se na Equação 9 que um dos termos é exatamente a constante de rigidez da junta, representada por C , que será apresentada posteriormente. Com isso, tem-se a Equação 10 e Equação 11

$$P_b = C \cdot P \quad (10)$$

$$P_m = (1 - C) \cdot P \quad (11)$$

As cargas no parafuso e material da junta podem ser dadas respectivamente pela Equação 12 e pela Equação 13

$$F_m = F_i - (1 - C) \cdot P \quad (12)$$

$$F_b = F_i + (C \cdot P) \quad (13)$$

Para os casos em que há a separação da junta, F_m se torna zero, devido ao material da junta não resistir mais às cargas aplicadas. Com isso, tem-se que a carga necessária para separar a junta é dada pela Equação 14

$$P_0 = \frac{F_i}{(1-C)} \quad (14)$$

2.3.2 Separação da junta parafusada e escoamento do parafuso

O coeficiente de segurança à falha por separação de junta pode ser encontrado a partir da Equação 15

$$N_{separação} = \frac{P_0}{P} = \frac{F_i}{P \cdot (1-C)} \quad (15)$$

e o coeficiente de segurança contra o escoamento é dado pela Equação 16

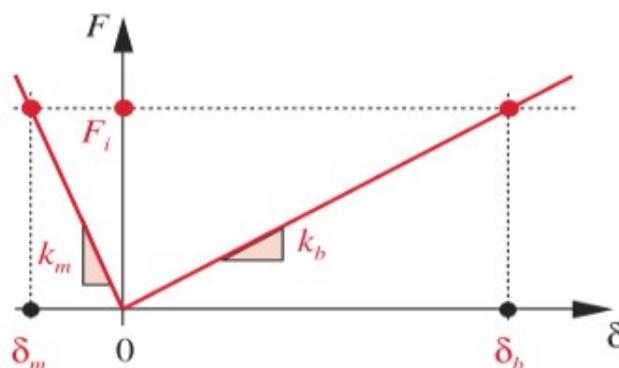
$$Ny = \frac{Sy}{\sigma b} \quad (16)$$

onde Sy é a resistência ao escoamento do material e $\sigma b = \frac{Fb}{At}$ é a tensão estática atuante no parafuso.

2.3.3 Cargas dinâmicas

Em carregamentos dinâmicos, há a atuação de uma carga que varia ao longo do tempo, entre um intervalo de carga mínima P_{\min} e uma carga máxima P_{\max} . A Figura 3 mostra o comportamento do parafuso e do material antes da aplicação da carga dinâmica.

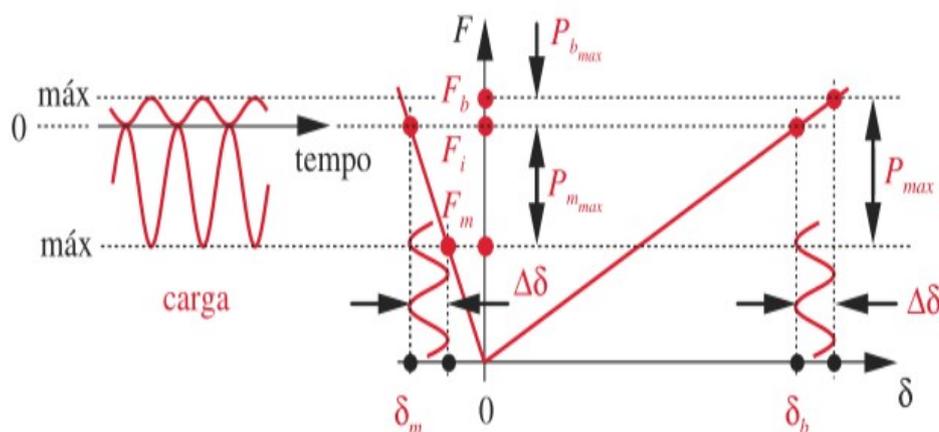
Figura 3 - Gráfico do comportamento dos componentes da junta parafusada antes da aplicação das cargas dinâmicas



FONTE: Norton (2013)

Devido a presença da pré-carga, o parafuso recebe apenas uma certa parcela do carregamento máximo, enquanto o material da junta absorve maior parte da carga, como mostra a Figura 4. Como se trata de carregamentos dinâmicos, o critério de segurança para o dimensionamento se dá pela falha a fadiga, que ocorre sempre devido a tensão de tração no parafuso, fazendo com que a tensão de compressão no material não seja levada em conta, no que tange a falha por fadiga.

Figura 4 - Gráfico do comportamento dos componentes da junta parafusada sob cargas dinâmicas



FONTE: Norton (2013)

Tratando dos esforços atuantes no parafuso, tem-se as forças alternadas e médias mostradas na Equação 17 e Equação 18 respectivamente

$$F_{alt} = \frac{F_b - F_i}{2} \quad (17)$$

$$F_{med} = \frac{F_b + F_i}{2} \quad (18)$$

Com isso, as tensões alternadas e médias atuantes no parafuso são dadas pela Equação 19 e Equação 20 respectivamente

$$\sigma_{Nalt} = \frac{F_{alt}}{A_t} \quad (19)$$

$$\sigma_{Nmed} = \frac{F_{med}}{A_t} \quad (20)$$

Para a tensão alternada local atuante no parafuso, temos que adicionar o fator de concentração de tensões a fadiga K_f , que é dado pela Equação 21

$$K_f = 5,7 + 0,02682 \cdot d \quad (21)$$

onde d é o diâmetro nominal da rosca do parafuso em milímetros. Já para a tensão média local no parafuso, tem-se que adicionar o fator de concentração a fadiga K_{fm} , que é dado pelas condições mostradas na Equação 22, Equação 23 e Equação 24

$$K_f \cdot |\sigma_{Nmax}| > S_y \rightarrow K_{fm} = \frac{S_y - K_f \cdot \sigma_{Nalt}}{|\sigma_{Nmed}|} \quad (22)$$

$$K_f \cdot |\sigma_{Nmax}| < S_y \rightarrow K_{fm} = K_f \quad (23)$$

$$K_f \cdot |\sigma_{Nmax} - \sigma_{Nmin}| > 2 \cdot S_y \rightarrow K_{fm} = 0 \quad (24)$$

onde σ_{Nmax} é encontrado quando se utiliza $P = P_{max}$ para encontrar F_b , e σ_{Nmin} é encontrado quando se utiliza $P = P_{min}$ para encontrar F_b . S_y é o limite de escoamento do material do parafuso.

Com os coeficientes de concentração K_f e K_{fm} definidos, pode-se encontrar as tensões locais alternada e média através da Equação 25 e Equação 26 respectivamente.

$$\sigma_{alt} = K_f \cdot \sigma_{Nalt} \quad (25)$$

$$\sigma_{med} = K_{fm} \cdot \sigma_{Nmed} \quad (26)$$

A tensão correspondente a pré-carga inicial é calculada pela Equação 27

$$\sigma_i = K_{fm} \cdot \frac{F_i}{A_t} \quad (27)$$

2.3.4 Coeficiente de segurança contra a falha por fadiga

Para as tensões dinâmicas mostradas anteriormente, é necessária uma análise de resistência à fadiga do parafuso, uma vez que as tensões suportadas pelo mesmo variam ao longo do tempo, estando sujeito a falha por fadiga do material. Segundo Da Rosa (2002), a fadiga é um processo de redução da capacidade de carga de componentes estruturais pela ruptura lenta do material, através do avanço quase infinitesimal da trinca a cada ciclo de carregamento. Ainda de acordo com Da Rosa (2002), a fadiga ocorre pela presença de tensões

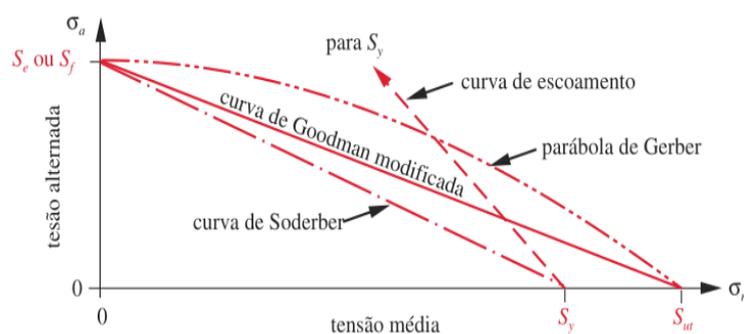
que variam com o tempo, que provocam deformações plásticas cíclicas localizadas nos pontos mais críticos.

Para o estudo da fadiga no material, vários tipos de situações de carregamento dinâmico como flexão rotativa, tração, torção, entre outros, são analisados, para através dos parâmetros iniciais do material e do tipo de carga atuante, obter um comportamento padrão que possa ser projetado graficamente e assim, conseguir estimar limites de resistência e tempo em que os materiais possam trabalhar sem que ocorra a falha por fadiga.

Uma das maneiras mais comuns de realizar essa análise, são através das tensões médias e alternadas combinadas para cargas repetidas ou pulsantes, tornando possível uma análise gráfica da situação, comparando as tensões dinâmicas atuantes no parafuso com o limite e resistência a fadiga do material do parafuso.

A ferramenta comumente utilizada para fazer essa análise em projetos de peças sujeitas às tensões dinâmicas, é o diagrama de Goodman modificado. Esse diagrama mostra o comportamento de falha por fadiga do material, com a atuação de tensões médias e alternadas, como mostra a Figura 5.

Figura 5 - Curvas para o dimensionamento sob cargas dinâmicas



FONTE: Norton (2013)

A curva de Goodman modificado é dada pela Equação 28

$$\sigma_a = S_e \cdot \left(1 - \frac{\sigma_m}{S_{ut}}\right) \quad (28)$$

onde S_e é o limite de fadiga corrigido e S_{ut} é a resistência à tração do material.

Conhecida as tensões dinâmicas atuantes no parafuso, basta agora determinar o limite e resistência à fadiga do material. A melhor maneira de obter essas informações é através de ensaios mecânicos realizados com os próprios parafusos utilizados ou corpos de provas com o mesmo material, segundo Norton (2013). Porém, fazer esses ensaios exigiria maiores gastos, tempo e desperdício de material, tornando essa análise inviável em muitos casos. Outra maneira de ter esses dados seriam através de informações do fabricante ou dados em literaturas. Caso nenhuma dessas opções sejam encontradas, uma estimativa teórica do limite e da resistência à fadiga do material pode ser feita a partir de dados de ensaios estáticos, como a resistência ao escoamento S_{ut} , e a depender das condições de fabricação e trabalho da peça, alguns fatores são calculados para fazer uma correção desses valores teóricos para essas propriedades mecânicas.

A partir de análises estáticas, chegou-se a algumas relações para determinação da resistência à fadiga ou limite de fadiga, a depender do material e de sua resistência à tração, como mostrado na Equação 29 e na Equação 30.

Equação 29 - Condições de limite à fadiga para aços e ferros

$$\begin{aligned} \text{aços:} & \quad \left\{ \begin{array}{ll} S_{e'} \cong 0,5 S_{ut} & \text{para } S_{ut} < 200 \text{ kpsi (1400 MPa)} \\ S_{e'} \cong 100 \text{ kpsi (700 MPa)} & \text{para } S_{ut} \geq 200 \text{ kpsi (1400 MPa)} \end{array} \right\} \\ \text{ferros:} & \quad \left\{ \begin{array}{ll} S_{e'} \cong 0,4 S_{ut} & \text{para } S_{ut} < 60 \text{ kpsi (400 MPa)} \\ S_{e'} \cong 24 \text{ kpsi (160 MPa)} & \text{para } S_{ut} \geq 60 \text{ kpsi (400 MPa)} \end{array} \right\} \end{aligned}$$

FONTE: Norton (2013)

Equação 30 - Condições de limite à fadiga para alumínio e ligas de cobre

$$\begin{aligned} \text{alumínios:} & \quad \left\{ \begin{array}{ll} S_{f@5E8}' \cong 0,4 S_{ut} & \text{para } S_{ut} < 48 \text{ kpsi (330 MPa)} \\ S_{f@5E8}' \cong 19 \text{ kpsi (130 MPa)} & \text{para } S_{ut} \geq 48 \text{ kpsi (330 MPa)} \end{array} \right\} \\ \text{ligas de cobre:} & \quad \left\{ \begin{array}{ll} S_{f@5E8}' \cong 0,4 S_{ut} & \text{para } S_{ut} < 40 \text{ kpsi (280 MPa)} \\ S_{f@5E8}' \cong 14 \text{ kpsi (100 MPa)} & \text{para } S_{ut} \geq 40 \text{ kpsi (280 MPa)} \end{array} \right\} \end{aligned}$$

FONTE: Norton (2013)

onde $S_{e'}$ é o limite de fadiga para materiais de vida infinita, e $S_{f@5E8}'$ é a resistência à fadiga para materiais de vida limitada a 5×10^8 ciclos.

Esses dados foram obtidos através de ensaios estáticos controlados, e para trazê-los para a realidade de falha por fadiga, meios de fabricação da peça, condições de ambiente de trabalho e considerações de projetos, o limite de fadiga ou resistência à fadiga são corrigidos através da Equação 31 e Equação 32, respectivamente

$$S_e = C_{carreg} \cdot C_{tamanho} \cdot C_{superf} \cdot C_{temp} \cdot C_{conf} \cdot S_e' \quad (31)$$

$$S_f = C_{carreg} \cdot C_{tamanho} \cdot C_{superf} \cdot C_{temp} \cdot C_{conf} \cdot S_f' \quad (32)$$

O primeiro coeficiente de correção é o C_{carreg} que trata das cargas atuantes. Ensaios feitos sob flexão rotativa e sob força normal mostram como uma peça possui uma resistência à fadiga menor sob esforços de força normal do que sob flexão rotativa (Norton, 2013). Devido a isso, há a necessidade de redução da resistência à fadiga para materiais sujeitos a forças normais, tornando C_{carreg} igual a 1, para flexão e 0,70 para força normal

O coeficiente $C_{tamanho}$ é definido pois os ensaios de peças estáticas e sob flexão rotativas foram feitas em peças com dimensões de diâmetros menores ou iguais a 8 mm. Para peças maiores que essas, a resistência à fadiga diminui devido à maior probabilidade de existir defeitos na área sob tensão. Budynas (2011) apresenta equações simples e conservadoras mostradas na Equação 33.

Equação 33 - Condições de tamanho para o fator de correção

$$\begin{aligned} \text{para } d \leq 0,3 \text{ in (8 mm)} : & \quad C_{tamanho} = 1 \\ \text{para } 0,3 \text{ in} < d \leq 10 \text{ in:} & \quad C_{tamanho} = 0,869d^{-0,097} \\ \text{para } 8 \text{ mm} < d \leq 250 \text{ mm:} & \quad C_{tamanho} = 1,189d^{-0,097} \end{aligned}$$

FONTE: Norton (2013)

Para valores maiores que 250 mm, adotar $C_{tamanho}$ igual a 0,6. Esses parâmetros são válidos para peças cilíndricas feitas com metais ferrosos, que é o caso dos parafusos no estudo em questão.

O C_{superf} é utilizado, pois dependendo do acabamento superficial, defeitos podem ser encontrados na superfície das peças, facilitando a propagação de trincas e diminuindo sua resistência à fadiga. Através de estudos e ensaios, descobriu-se a relação para encontrar C_{superf} dependendo do tipo de acabamento superficial pela Equação 34

$$C_{superf} = A \cdot S_{ut}^b \quad (34)$$

onde A e b são parâmetros a depender do tipo de acabamento superficial, apresentados na Tabela 5. Vale ressaltar que essa equação serve apenas para peças feitas em aço e que se C_{superf} for maior que 1, utilize 1.

Tabela 5 - Parâmetros para o fator de correção de superfície

Acabamento superficial	Para S_{ut} em MPa, use		Para S_{ut} em kpsi (não em psi), use	
	A	b	A	b
Retificado	1,58	-0,085	1,34	-0,085
Usinado ou estirado a frio	4,51	-0,265	2,7	-0,265
Laminado a quente	57,7	-0,718	14,4	-0,718
Forjado	272	-0,995	39,9	-0,995

FONTE: Norton (2013)

O C_{temp} está relacionado à temperatura ambiente de trabalho em que a peça está sujeita. Algumas relações foram criadas para o cálculo do C_{temp} , baseado em ensaios com peças de aço, podendo ser dadas pelas relações apresentadas na Equação 35.

Equação 35 - Condições de temperatura para o fator de correção

$$\begin{aligned} \text{para } T \leq 450^{\circ}\text{C} \text{ (840}^{\circ}\text{F)}: & \quad C_{temp} = 1 \\ \text{para } 450^{\circ}\text{C} < T \leq 550^{\circ}\text{C}: & \quad C_{temp} = 1 - 0,0058(T - 450) \\ \text{para } 840^{\circ}\text{F} < T \leq 1020^{\circ}\text{F}: & \quad C_{temp} = 1 - 0,0032(T - 840) \end{aligned}$$

FONTE: Norton (2013)

Por fim, tem-se o C_{conf} que trata do grau de confiabilidade que se deseja obter com os dados apresentados até então pelas literaturas e ensaios. Podemos defini-lo através da Tabela 6.

Tabela 6 - Valores para o fator de correção de confiabilidade

Fatores de confiabilidade para $S_d = 0,08\mu$

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 (2013)

Visto os conhecimentos de cargas dinâmicas, falha por fadiga e propriedades dos materiais em relação a falha por fadiga, pode-se definir o coeficiente de falha por fadiga de uma peça sujeita a cargas dinâmicas uniaxiais, que é o caso dos parafusos, pela Equação 36

$$Nf = \frac{Se \cdot (Sut - \sigma_i)}{Se \cdot (\sigma_m - \sigma_i) + Sut \cdot \sigma_a} \quad (36)$$

2.4 Constante de rigidez da junta parafusada

O cálculo da rigidez dos parafusos pode ser efetuado com relativa facilidade, porém, ele não é válido para a rigidez das placas da junta, devido a isso vários estudos foram realizados ao longo dos anos para que fosse possível estimar sua rigidez, como exemplo os trabalhos de Haidar et al. (2011). Dessa forma, o cálculo para determinarmos a rigidez do parafuso pode ser realizado como a constante de uma mola de uma barra em tração, podendo ser calculada através da equação de deflexão de uma barra de tração, como mostrado na Equação 37 (GUIDI, 2013).

$$\delta = \frac{Fl_i}{A_p E} \quad (37)$$

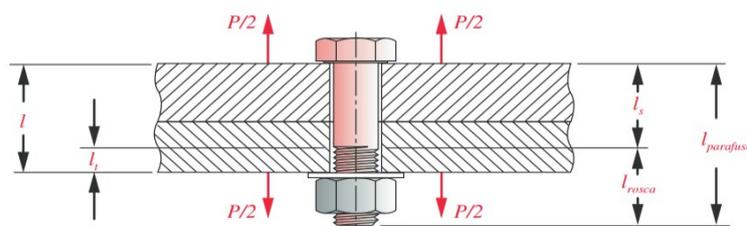
Na Equação 38, a constante elástica k é isolada.

$$k = \frac{F}{\delta} = \frac{A_p E}{l_i} \quad (38)$$

onde δ é a deflexão da peça, F é a força externa A_p é a área resistente do parafuso, l_i é o comprimento sujeitado do parafuso e E é o Módulo de elasticidade do material.

Na Figura 6 é mostrado uma junta parafusada submetida a tração.

Figura 6 - Junta parafusada em tração



FONTE: Norton (2013)

A distribuição de tensões ao redor do parafuso se parece à forma de um cone, as juntas podem ser constituídas de placas feitas de materiais diferentes, e de grandes espessuras, o que acarretará a necessidade de parafusos mais extensos que contenham parte cilíndrica, lisa e rosca, e por consequência, diferentes áreas de seções transversais. Essas diferentes áreas irão proporcionar diferentes valores de rigidez, desse modo, podemos calcular a rigidez total do parafuso adaptando a associação de molas em série, resultando na Equação 39 (GUIDI, 2013).

$$\frac{l}{k_b} = \frac{l_t}{A_t E_b} + \frac{l - l_t}{A_b E_b} \quad (39)$$

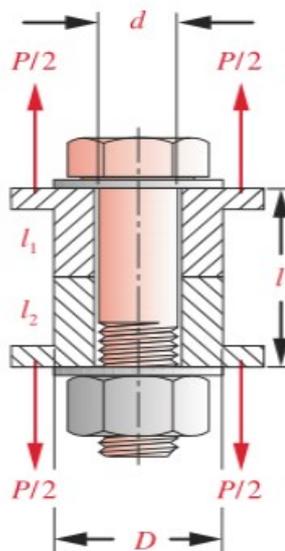
onde k_b é a rigidez do parafuso l é a espessura da junta ou Zona Sujetada, l_t é o comprimento da parte rosca do parafuso carregada axialmente dentro da zona sujeitada l , A_t é a área da seção transversal sujeita a tensão de tração do parafuso, A_b é a área da seção transversal lisa do parafuso e E_b é o módulo de elasticidade do material do parafuso.

Um dos métodos utilizados para o cálculo da rigidez das placas da junta faz uso de uma geometria cilíndrica a qual as cargas externas são aplicadas e comprimidas pelo parafuso, como mostrado na Figura 7. Para tal situação, a equação da constante de rigidez das placas das juntas é apresentada pela Equação 40.

$$\frac{l}{k_m} = \frac{l_1}{A_{m1}E_1} + \frac{l_2}{A_{m2}E_2} = \frac{4l_1}{\pi D_{ef1}^2 E_1} + \frac{4l_2}{\pi D_{ef2}^2 E_2} \quad (40)$$

onde k_m é a rigidez das placas das juntas, l_1 é a espessura da placa da junta do material 1, l_2 é a espessura da placa da junta do material 2, D_{ef1} é o diâmetro efetivo da área sujeitada do material 1, D_{ef2} é o diâmetro efetivo da área sujeitada do material 2, E_1 é o módulo de elasticidade do material 1 e E_2 é o módulo de elasticidade do material 2.

Figura 7 - Parafuso comprimindo um cilindro onde este sofre ação de cargas externas



FONTE: Norton (2013)

Quando as placas são constituídas do mesmo material, a Equação 40 pode ser resumida pela Equação 41.

$$k_m = \frac{\pi D_{ef}^2 E_m}{4l} \quad (41)$$

onde D_{ef} é o diâmetro efetivo da área sujeitada da junta e E_m é o módulo de elasticidade do material das placas da junta.

A correlação entre a rigidez do parafuso e a rigidez das placas da união é expressa pelo fator de rigidez de junta C , mostrado pela Equação 42.

$$C = \frac{k_b}{k_b + k_m} \quad (42)$$

2.4.1 Juntas com flanges feitas do mesmo material

O estudo utilizando o Método dos Elementos Finitos (MFE) feito por Cornwell investigou juntas com razões de aspectos da junta j variando de 0,1 a 2,0. Além disso, também foi analisado o efeito da variação na razão de módulo de chapa para parafuso r no fator de rigidez C . Através dos dados obtidos na análise foi possível produzir a Equação 43 para C , quando utilizado o mesmo material na junta.

$$C = C_r = p_3 r^3 + p_2 r^2 + p_1 r + p_0 \quad (43)$$

onde $j = \frac{d}{l}$, sendo d , o diâmetro do parafuso e l a espessura da placa da junta, p_0 , p_1 , p_2 e p_3 são coeficientes em função de j e estão disponíveis na Tabela 7 e r é a razão de módulo de chapa para parafuso dada por $\frac{E_m}{E_b}$.

Tabela 7 - Parâmetros de rigidez usados na Equação 43

j	p_0	p_1	p_2	p_3
0,10	0,4389	-0,9197	0,8901	-0,3187
0,20	0,6118	-1,1715	1,0875	-0,3806
0,30	0,6932	-1,2426	1,1177	-0,3845
0,40	0,7351	-1,2612	1,1111	-0,3779
0,50	0,7580	-1,2632	1,0979	-0,3708
0,60	0,7709	-1,2600	1,0851	-0,3647
0,70	0,7773	-1,2543	1,0735	-0,3595
0,80	0,7800	-1,2503	1,0672	-0,3571
0,90	0,7797	-1,2458	1,0620	-0,3552
1,00	0,7774	-1,2413	1,0577	-0,3537
1,25	0,7667	-1,2333	1,0548	-0,3535
1,50	0,7518	-1,2264	1,0554	-0,3550
1,75	0,7350	-1,2202	1,0581	-0,3574
2,00	0,7175	-1,2133	1,0604	-0,3596

FONTE: Norton (2013)

2.4.2 Juntas com flanges feitas de materiais diferentes

Durante o mesmo estudo realizado por Cornwell, através do MFE foi possível relacionar a constante C da junta e a razão de espessura da chapa t . Diante disso, foram traçadas diversas curvas polinomiais ajustadas para cada valor da razão de aspecto da junta j , as quais são definidas pela Equação 44 e Equação 45

$$C_t = q_5 t^5 + q_4 t^4 + q_3 t^3 + q_2 t^2 + q_1 t + q_0 \quad (44)$$

$$C_t = q_3 t^3 + q_2 t^2 + q_1 t + q_0 \quad (45)$$

onde, a Equação 44 é usada apenas para a razão de aspecto da junta $j = 0,1$ e a Equação 45 se aplica a todos os outros valores de j , $t = \frac{T_L}{T_L + T_H}$, sendo T_L e T_H a espessura da chapa com módulo de Young mais baixo e mais alto, respectivamente e q_0, q_1, q_2, q_3, q_4 e q_5 são coeficientes em função de j e estão disponíveis na Tabela 8.

Tabela 8 - Parâmetros de rigidez usados na Equação 44 e Equação 45

j	q_0	q_1	q_2	q_3	q_4	q_5
0,10	0,0079	17,040	-92,832	202,44	-209,38	82,726
0,20	0,1010	8,5465	-24,166	15,497		
0,30	0,0861	8,2344	-22,274	13,963		
0,40	0,0695	8,0297	-20,727	12,646		
0,50	0,0533	7,8676	-19,357	11,457		
0,60	0,0372	7,6705	-17,951	10,262		
0,70	0,0197	7,3030	-16,235	8,9273		
0,80	0,0029	6,9893	-14,737	7,7545		
0,90	-0,0123	6,7006	-13,363	6,6784		
1,00	-0,0265	6,4643	-12,188	5,7481		
1,00	-0,0524	5,7363	-9,3326	3,6348		
1,50	-0,0678	5,0674	-7,0322	2,0107		
1,75	-0,0763	4,5187	-5,1590	0,6861		
2,00	-0,0784	3,9617	-3,5248	-0,3956		

FONTE: Norton (2013)

Para simplificar o uso dos dados obtidos através dessas equações não lineares, Cornwell criou um fator de correção a , dado pela Equação 46

$$a = e^{(0,0598(\ln j)^3 + 0,1385(\ln j)^2 - 0,4350(\ln j) - 2,3516)} \quad (46)$$

Sendo C_H e C_L as constantes de junta para os materiais de alto e baixo módulos da chapa, respectivamente, calculados pela Equação 43, temos que uma vez que encontrados C_H , C_L , C_t e a , a constante C da junta é encontrada como uma função desses parâmetros e a razão de espessura da chapa t através da Equação 47.

$$C = C_H + (t + aC_t)(C_L - C_H) \quad (47)$$

2.4.3 Juntas com retentores

Gaxetas são elementos mecânicos utilizados para criar uma vedação na união entre dois materiais, tais elementos são usados em larga escala, exemplo disto são montagens de tubulações e vasos de pressão, além de apresentar um custo consideravelmente baixo. Tal elemento apresenta uma baixa resistência à compressão, ao se fazer uso das forças atuantes na junta, a gaxeta adere ao material das partes envolvidas garantindo que imperfeições e corrosão das juntas não acarrete um vazamento, por exemplo.

Com relação ao cálculo do fator de rigidez de junta, se faz necessário que a gaxeta entre como mais um fator a ser levado em conta na avaliação do fator de rigidez do material, desse modo, ela será considerada como se fosse uma mola disposta em paralelo (RODRIGUES, 2018).

A Equação 48 mostra a relação da combinação de rigidez dos materiais da junta parafusada

$$\frac{1}{k_m} = \frac{1}{k_{m1}} + \frac{1}{k_{m2}} + \frac{1}{k_g} \quad (48)$$

onde, k_m é a rigidez das placas das juntas, k_{m1} é a rigidez da placa da junta do material 1, k_{m2} é a rigidez da placa da junta do material 2, k_g é a rigidez do material da gaxeta.

As gaxetas apresentam diversas composições, desde materiais não metálicos como cortiça e asbesto comprimido, materiais totalmente metálicos como o cobre e pode ser constituída também por materiais semimetálicos fazendo uma combinação dos dois. Exceto as gaxetas feitas por material metálico, de forma geral seu módulo de elasticidade é muito menor em comparação aos materiais da junta parafusada, devido a isso, o módulo de elasticidade da gaxeta não terá tanta relevância, podendo ser ignorada a sua influência do material da junta. A

Tabela 9 apresenta alguns dos materiais utilizados para a confecção de gaxetas e seus respectivos módulos de elasticidade.

Tabela 9 - Módulo de elasticidade de materiais para gaxetas

Material	Módulo de elasticidade	
	psi	Mpa
Cortiça	12,5E3	86
Asbesto comprimido	70E3	480
Cobre asbesto	13,5E6	93E3
Cobre (puro)	17,5E6	121E3
Borracha pura	10E3	69
Enrolamento em espiral	41E3	280
Teflon	35E3	240
Fibra vegetal	17E3	120

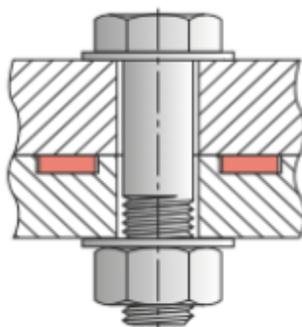
FONTE: Norton (2013)

É importante levar em conta, para um melhor entendimento do funcionamento de uma gaxeta, é sobre sua posição de montagem em relação à junta parafusada, pois, neste ponto, a gaxeta pode ser confinada, anel de confinado ou não confinada.

A situação considerada mais crítica levando em conta o comportamento da junta é o caso de não confinado, onde os materiais da junta estarão separados por completo um do outro pela gaxeta. Tal situação é a única que se faz necessário que haja a consideração de haver uma influência da gaxeta no cálculo do fator de rigidez de junta (RODRIGUES, 2018).

A Figura 8 mostra a configuração para gaxeta confinada.

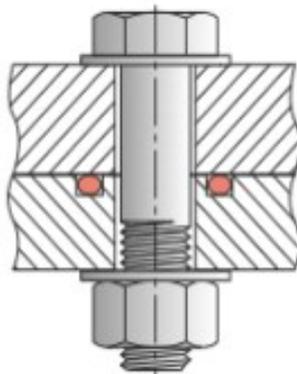
Figura 8 - Gaxeta Confinada



FONTE: Norton (2013)

A Figura 9 mostra a configuração para um anel de vedação.

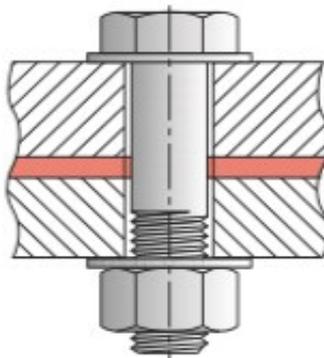
Figura 9 - Anel Confinado



FONTE: Norton (2013)

Por fim, temos a configuração para a gaxeta não confinada, mostrada na Figura 10.

Figura 10 - Gaxeta não confinada



Fonte: Norton (2013)

2.5 Tecnologias e ferramentas utilizadas

2.5.1 Javascript e Typescript

O *javascript* é uma linguagem de programação dinâmica utilizada principalmente no desenvolvimento web. De acordo com Flanagan (2013), *JavaScript* é uma linguagem de alto

nível, dinâmica, interpretada e não tipada, conveniente para estilos de programação orientados a objetos e funcionais. Com a popularização do *javascript* no desenvolvimento web devido ao sucesso da internet, muitos desenvolvedores e pesquisadores observaram a necessidade de se ter tipagem no *javascript*, para fins de melhorias durante a criação dos códigos. A partir dessa necessidade, a Microsoft criou o *typescript*, que tem a função de adicionar tipagens estáticas ao *javascript* de maneira opcional.

Inicialmente, o *typescript* era considerado apenas uma interface para melhorar o *javascript*, mas logo passou a ser reconhecida como uma linguagem de programação com os mesmos fundamentos do *javascript*, porém, com tipagem estática.

2.5.2 React Js

Com o avanço das tecnologias e popularização da web e conseqüentemente do *javascript*, algumas empresas desenvolveram softwares que utilizam do *javascript* ou *typescript* para além do desenvolvimento web, também o desenvolvimento mobile e desktop.

Uma dessas tecnologias é o *React Js*, uma biblioteca criada pelo Facebook com licença MIT para desenvolver aplicações móveis e desktop de multiplataformas, ou seja, uma única aplicação que funciona em smartphones e computadores de diferentes sistemas operacionais, sem a necessidade de alterar código. Isso é possível porque o *javascript* ou *typescript* é convertido em código nativo no momento da execução, através da tecnologia *React Js* e a linguagem XML.

2.5.3 Electron Js

Electron Js é um framework para criação de aplicações nativas utilizando tecnologias web como *JavaScript*, *HTML* e *CSS* (OPENJS FOUNDATION, 2021). Com o auxílio das tecnologias *Node Js* e *Chromium*, é possível utilizar o *React js* para o desenvolvimento do programa para computador.

2.5.4 Visual Studio Code

Visual Studio Code é uma ferramenta criada pela Microsoft para escrever códigos de diversas linguagens de programação de maneira mais produtiva e simples. Atualmente é a IDE mais popular entre os programadores.

3 METODOLOGIA

Para desenvolver essa aplicação, foi utilizada a *Clean Architecture*. Segundo Martin (2019), uma boa arquitetura torna o sistema fácil de entender, fácil de desenvolver, fácil de manter e fácil de implantar.

Todos os códigos desenvolvidos para a resolução dos cálculos de dimensionamento dos parafusos bem como da constante de rigidez da junta parafusada são separados dos códigos de implementação da interface do usuário. Isso garante que independente da interface do usuário, ou do tipo de aplicação, seja desktop, mobile ou web, os cálculos de dimensionamento são feitos de maneira independente, tornando esses códigos totalmente reutilizáveis e escaláveis para aplicações maiores.

A linguagem de programação utilizada foi o *TypeScript* para tornar mais fácil a utilização das tecnologias *React Js* e *Electron Js*.

Para cada rotina de cálculo desenvolvida nos algoritmos, foram utilizados exemplos e um estudo de caso do Norton.

Neste trabalho, o sistema métrico adotado foi o SI, onde o software trabalha com as subdivisões do sistema SI, com comprimentos em milímetros, tensões em Mpa e forças em newtons. A exceção é a temperatura de trabalho do parafuso, sendo adotada em graus Celsius.

O dimensionamento realizado por esse software desenvolvido serve apenas para parafusos de aço.

3.1 Arquitetura do software para realizar os cálculos de dimensionamento

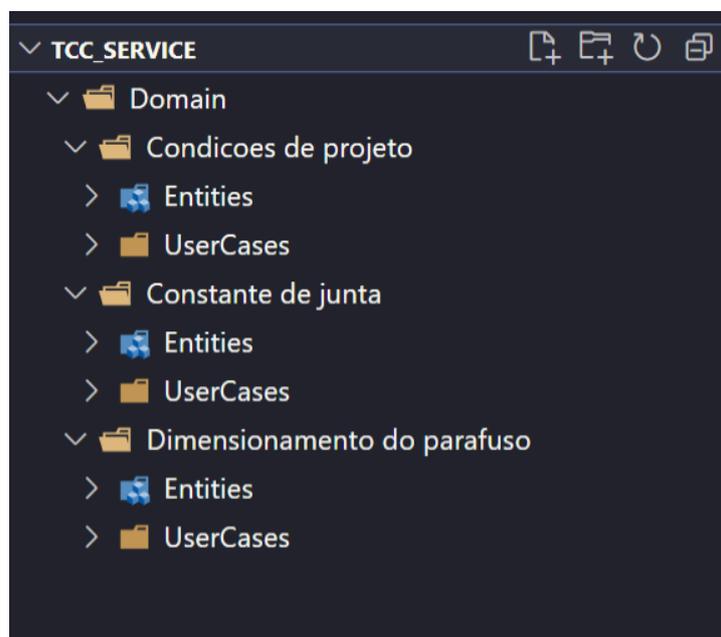
Na pasta Domain, como mostra a Figura 11 estão organizados em pastas e arquivos do tipo *typescript* todo o código da aplicação responsável por receber as informações inseridas pelo usuário, fazer todos os cálculos de dimensionamento dos parafusos e retornar para o usuário os devidos coeficientes de segurança contra a separação, contra o escoamento e contra a falha por fadiga, caso seja necessário, além de plotar os gráficos de cada um desses coeficientes em função da porcentagem de pré carga aplicada nos parafusos.

Existem três pastas que organizam o código por funções. Essas pastas são a Condições de projeto, Constante de junta e Dimensionamento do parafuso.

Dentro de todas elas existe uma estrutura padrão com a pasta Entities, que possui dentro dela todas as funções, classes e métodos que realizam separadamente um cálculo em específico, tornando o código mais limpo, escalável e de fácil manutenção, e a pasta UserCases que tem

um código para interligar todos os arquivos da pasta Entities e fazer um fluxograma de cálculo para resolver a problemática em questão.

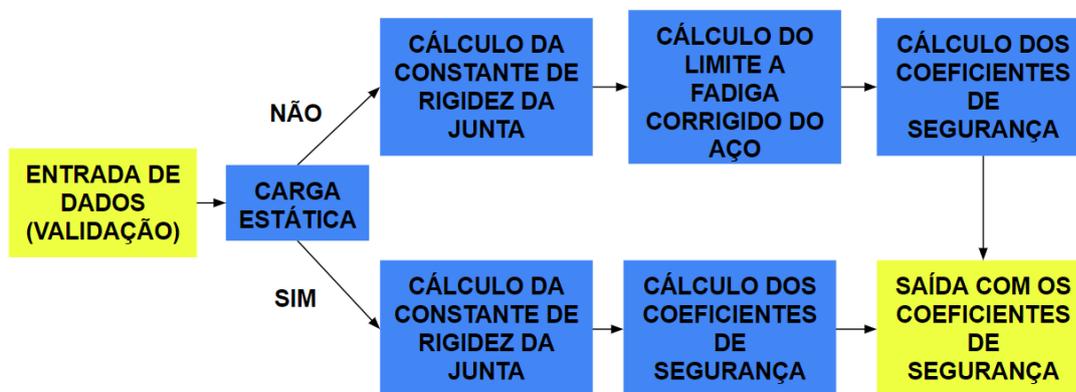
Figura 11 - Estrutura de arquivos na pasta Domain



FONTE: Autor (2023)

O fluxograma da aplicação é mostrado na Figura 12, para fins de entendimento da maneira como a aplicação realiza os cálculos.

Figura 12 – Fluxograma do software



FONTE: Autor (2023)

3.2 Interface do software

A interface do software propõe mais possibilidades ao usuário, pois foi implementado opções de escolha para o tipo de carregamento, o padrão de rosca do parafuso e a condição da gaxeta.

Para o tipo de carregamento, as escolhas possíveis para as cargas são estáticas ou dinâmicas. Para o carregamento dinâmico, a interface mostra alguns dados a mais que precisam ser preenchidos, como a temperatura de trabalho, a confiabilidade, o acabamento superficial do parafuso e os limites superior e inferior da carga atuante. Ainda nesse caso, o coeficiente de segurança contra a falha por fadiga aparece também na interface, enquanto em cargas estáticas, além de não ter esses dados a mais, apenas os coeficientes de segurança contra a separação da junta e contra o escoamento aparecem.

Para o padrão de rosca escolhido, a interface mostra apenas listas diferentes de parafusos padronizados, juntamente com sua respectiva lista de aços padronizados.

Na gaxeta, existe na interface as opções de confinada e Desconfiada, onde na escolha dessa última opção, a interface apresenta campos para informar a espessura da gaxeta e qual o seu material.

No campo dos resultados, a interface mostra quadros com os coeficientes de segurança e a constante de rigidez da junta parafusada para os dados inseridos.

Logo abaixo dos coeficientes de segurança estão os gráficos para os coeficientes de segurança em função do pré carregamento dos parafusos.

Para obter todos os dados inseridos pelo usuário e enviá-los para as funções realizarem os devidos cálculos de dimensionamento e retornar os coeficientes de segurança foi utilizado a tecnologia *react-hook-form*. Essa ferramenta possibilita a criação de formulários de alto desempenho, flexíveis e extensíveis com validação fácil de usar (BEIER, 2023).

3.3 Cálculo do limite à fadiga estimado corrigido

No caso desta aplicação, todos os materiais são aços padronizados pela SAE e ISO, pois suas propriedades são bem definidas e encontradas na Tabela 2 e Tabela 4. As informações desses aços estão armazenadas em tabelas no próprio código fonte, a exemplo da Figura 13. Nesse caso, quando as cargas atuantes na junta parafusada são dinâmicas, é necessário verificar o coeficiente de segurança contra a falha à fadiga, e para isso, é necessário estimar o limite à fadiga corrigido do material do parafuso.

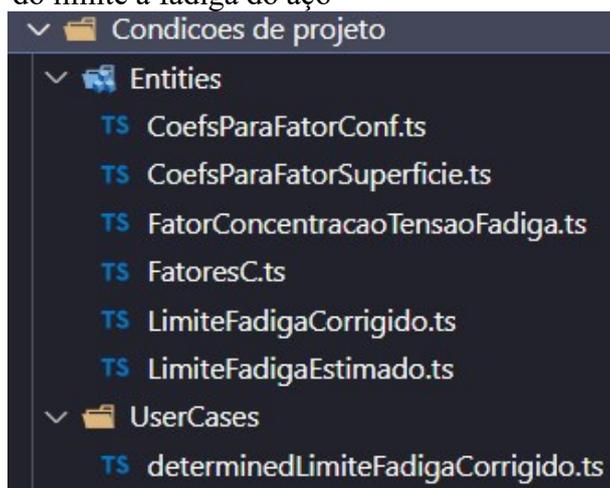
Figura 13 – Dados do fator de correção de confiabilidade

```
export const TabelaConf = [  
  [50, 1],  
  [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: Autor (2023)

A pasta é a Condições de projeto, possui o código fonte para receber as informações relacionadas ao material utilizado no parafuso e as condições de serviço do projeto, como mostra a Figura 14.

Figura 14 – Pasta de algoritmos para correção do limite a fadiga do aço



Fonte: Autor (2023)

Para estimar esse limite, os parâmetros necessários estão na Tabela 10.

Tabela 10 - Parâmetros para estimar o limite à fadiga do material do parafuso

PARÂMETROS	DESCRIÇÃO
DiametroParafuso	Diâmetro do parafuso
ResistenciaTracao	Resistência à tração do material do parafuso
AcabamentoSuperficial	Acabamento superficial utilizado no parafuso
Temperatura	Temperatura de trabalho do parafuso
Confiabilidade	Confiabilidade desejada no projeto

FONTE: Autor (2023)

Com esses dados, os algoritmos presentes na pasta Condiçoes de projeto irão calcular o limite à fadiga estimado Se' , como descrito na Equação 29, para o caso dos aços, os fatores de correções desse limite, como descrito na seção 2.2.4. e por fim calcular e retornar o limite à fadiga corrigido usando a Equação 31, para o caso do aço. A Figura 15 mostra parte do código.

Figura 15 – Algoritmo para realizar a correção do limite a fadiga do aço

```
export default function DeterminedLimiteFadigaCorrigido(
  DiametroParafuso: number,
  ResistenciaTracao: number,
  AcabamentoSuperficial: string,
  Temperatura: number,
  Confiabilidade: number) {

  const ObjectFatoresC = new FatoresC(
    DiametroParafuso,
    ResistenciaTracao,
    AcabamentoSuperficial,
    Temperatura,
    Confiabilidade
  );

  const Ccarregamento: number = ObjectFatoresC.Ccarregamento();
  const Ctamanho: number = ObjectFatoresC.Ctamanho();
  const Csuperficie: number = ObjectFatoresC.Csuperficie();
  const Ctemperatura: number = ObjectFatoresC.Ctemperatura();
  const Cconfiabilidade: number = ObjectFatoresC.Cconfiabilidade();

  const LimiteFadigaEstimado: number = LimiteFadiga(ResistenciaTracao);
  const LimiteFadigaC: number = LimiteFadigaCorrigido(Ccarregamento, Csuperficie, Ctamanho, Ctemperatura, Cconfiabil
  return LimiteFadigaC;
}
```

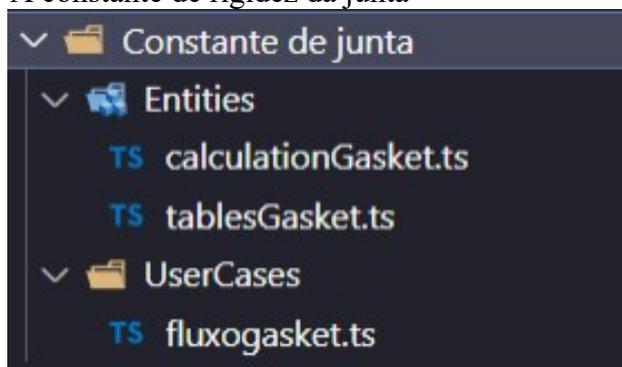
Fonte: Autor (2023)

3.4 Cálculo da constante de rigidez da junta

Para o cálculo da constante de rigidez da junta, as condições analisadas são a gaxeta da junta parafusada, se ela for confinada ou não, se os materiais das chapas unidades são iguais ou não, bem como suas espessuras e a rigidez do material do parafuso.

A pasta Constante de junta possui os arquivos para realizar todos os cálculos descritos na seção 2.4. Essa organização dos arquivos pode ser vista na Figura 16.

Figura 16 – Estrutura dos arquivos para calcular A constante de rigidez da junta



FONTE: Autor (2023)

Para realizar os cálculos da constante de rigidez da junta, é necessário enviar para o algoritmo os parâmetros descritos na Tabela 11, feitos pelo usuário, seja digitando quanto na escolha do parafuso e condições do projeto.

Tabela 11 - Parâmetros para calcular a constante de rigidez da junta parafusada

PARÂMETROS	DESCRIÇÃO
Dflange	Diâmetro do flange
Dc	Diâmetro do cilindro
Pressao	Pressão interna no cilindro
Nparaf	Quantidade de parafusos
Dparaf	Diâmetro do parafuso
Lsujeit	Comprimento sujeito do parafuso nos flanges
Eparaf	Módulo de elasticidade do material do parafuso
EH	Maior módulo de elasticidade do material do flange

PARÂMETROS	DESCRIÇÃO
EL	Menor módulo de elasticidade do material do flange
TH	Espessura do flange de maior módulo de elasticidade
TL	Espessura do flange de menor módulo de elasticidade
AreaTracao	Área de tração do parafuso
AreaHaste	Área de haste do parafuso
Lparaf	Comprimento do parafuso
Egasket	Módulo de elasticidade do material da gaxeta
Lgasket	Espessura da gaxeta

FONTE: Autor (2023)

Quando o software recebe esses parâmetros, ele verifica se a gaxeta é confinada ou não confinada, pois nesse último caso é necessário informar a espessura da gaxeta e o material dela.

As opções de materiais da gaxeta são os mesmos da Tabela 9, onde os dados desses materiais estão armazenados em tabelas do próprio código fonte. Esses dados são usados para calcular a rigidez da gaxeta e por fim, calcular a rigidez combinada da gaxeta, parafuso e flanges.

No caso de a gaxeta ser confinada, a rigidez da gaxeta pode ser desprezada, sendo necessário apenas a rigidez do parafuso e dos flanges para o cálculo da rigidez do conjunto (NORTON, 2013).

A partir disso, o software faz a verificação se os módulos de elasticidades EH e EL são iguais ou não para saber se os materiais são iguais ou não. Caso os materiais sejam iguais, o software segue o cálculo descrito na seção 2.4.1 e retorna a constante de rigidez de acordo com a Equação 43. Os dados da Tabela 7 e Tabela 8 estão armazenados em tabelas no próprio código fonte. Para o caso de os materiais dos flanges serem diferentes, o software faz os cálculos como descrito na seção 2.4.2 e retorna o constante de rigidez da junta de acordo com a Equação 47.

Uma observação é de que as espessuras dos flanges são necessárias apenas para o caso em que os materiais desses flanges sejam diferentes.

O uma parte do algoritmo que realiza esses cálculos está na Figura 17 logo a seguir.

Figura 17 – Algoritmo para calcular a constante de rigidez da junta

```

this.TL = TL;
this.AreaHaste = AreaHaste;
this.AreaTracao = AreaTracao;
this.Lparaf = Lparaf;

this.Resolution = new GasketResolution(Dflange, Dc, Pressao, Nparaf, Dparaf, Lsujeit, Eparaf, EH, EL, TH, TL,
]

determinedConfinedGasket(){
  if (this.EH === this.EL) {
    const C: number = this.Resolution.determinedCH();
    return C;
  } else {
    const C: number = this.Resolution.determinedCGasketConfined();
    return C;
  }
}

determinedNotConfinedGasket(Egasket: number, Lgasket: number){
  const c: number = this.determinedConfinedGasket();
  const C: number = this.Resolution.determinedCgasketNotConfined(c, Egasket, Lgasket );
  return C;
}

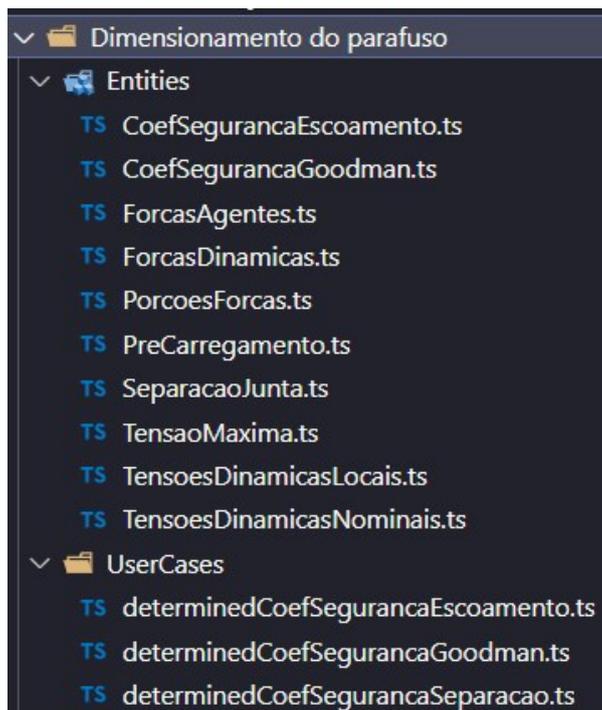
```

FONTE: Autor (2023)

3.5 Cálculo de dimensionamento dos parafusos

Nessa parte de implementação do código, as respostas que importam são o coeficiente de segurança contra a separação da junta, contra o escoamento e de Goodman, para os casos de falha por fadiga do material. A estrutura dos arquivos dessa parte dos algoritmos está na Figura 18.

Figura 18 – Estrutura dos arquivos para calcular os coeficientes de segurança



FONTE: Autor (2023)

Para realizar os cálculos desses coeficientes, o limite de fadiga corrigido e a constante de rigidez da junta parafusada são calculados separadamente como descrito nas seções 3.3 e 3.4 respectivamente e usados para realizar os cálculos de dimensionamento do parafuso.

Os cálculos e parâmetros necessários para o dimensionamento dos parafusos irá depender das condições definidas pelo usuário na interface do programa, seja o tipo de carregamento, a condição da gaxeta, bem como o tipo e material do parafuso

Com todas essas informações, o software irá executar os cálculos descritos na seção 2.3.1 e seção 2.3.2 para carregamentos estáticos e executar os cálculos descritos na seção 2.3.2 e seção 2.3.3 para carregamentos dinâmicos.

O Algoritmo para realizar o cálculo do coeficiente de segurança contra a separação da junta pode ser visto na Figura 19;

Figura 19 – Algoritmo para calcular o coeficiente de segurança contra a separação da junta

```
import PreCarregamento from "../Entities/PreCarregamento";

export function Nseparacao(
  Pressao: number,
  AreaTracao: number,
  PorcentCarga: number,
  ResistenciaProva: number,
  ConstanteJunta: number
) {
  const ForcaProva: number = PreCarregamento(PorcentCarga, ResistenciaProva, AreaTracao);
  const Po: number = ForcaProva / (1 - ConstanteJunta);
  const Nseparacao: number = Po / Pressao;

  return Nseparacao;
}
```

FONTE: Autor (2023)

O algoritmo para o cálculo do coeficiente de segurança contra o escoamento do parafuso pode ser visto na Figura 20.

Figura 20 – Algoritmo para calcular o coeficiente de segurança contra o escoamento

```
export function Nescoamento(
  carga: number,
  AreaTracao: number,
  PorcentCarga: number,
  ResistenciaProva: number,
  ResistenciaEscoamento: number,
  ConstanteJunta: number
) {
  const ForcaProva: number = PreCarregamento(PorcentCarga, ResistenciaProva, AreaTracao);

  const ObjectPorcoes = new PorcoesForcas(carga, ConstanteJunta);

  const PorcaoForcaParafuso: number = ObjectPorcoes.ForcaSentidaParafuso();
  const PorcaoForcaMaterial: number = ObjectPorcoes.ForcaSentidaMaterial();

  const ObjectForcasAgentes = new ForcasAgentes(ForcaProva, PorcaoForcaParafuso, PorcaoForcaMaterial);
  const ForcaAgenteParafuso: number = ObjectForcasAgentes.ForcaAgenteParafuso();

  const TensaoMax: number = TensaoMaxima(ForcaAgenteParafuso, AreaTracao);

  const Nescoamento: number = CoefSegurancaEscoamento(ResistenciaEscoamento, TensaoMax);
  return Nescoamento;
}
```

FONTE: Autor (2023)

Por fim, o algoritmo para o cálculo do coeficiente de Goodman é mostrado na Figura 21.

Figura 21 – Algoritmo para calcular o coeficiente de segurança de Goodman

```

Confiabilidade: number) {
  const ForcaProva: number = PreCarregamento(PorcentCarga, ResistenciaProva, AreaTracao);
  const ObjectPorcoes = new PorcoesForcas(pressao, ConstanteJunta);
  const PorcaoForcaParafuso: number = ObjectPorcoes.ForcaSentidaParafuso();
  const PorcaoForcaMaterial: number = ObjectPorcoes.ForcaSentidaMaterial();
  const ObjectForcasAgentes = new ForcasAgentes(ForcaProva, PorcaoForcaParafuso, PorcaoForcaMaterial);
  const ForcaAgenteParafuso: number = ObjectForcasAgentes.ForcaAgenteParafuso();
  const ObjectForcasDinamicas = new ForcasDinamicas(ForcaAgenteParafuso, ForcaProva);
  const ForcaAlternadaParafuso: number = ObjectForcasDinamicas.ForcaAlternada();
  const ForcaMediaParafuso: number = ObjectForcasDinamicas.ForcaMedia();
  const ObjectTensoesDinamicasNominais = new TensoesDinamicasNominais(ForcaAlternadaParafuso, ForcaMediaParafuso, AreaTracao, ForcaProva);
  const TensaoAlternadaNominal: number = ObjectTensoesDinamicasNominais.TensaoAlternadaNominal();
  const TensaoMediaNominal: number = ObjectTensoesDinamicasNominais.TensaoMediaNominal();
  const TensaoProvaNominal: number = ObjectTensoesDinamicasNominais.TensaoProvaNominal();
  const ObecjtFatorConcentracao = new FatorConcentracaoTensaoFadiga(Dparaf, ResistenciaEscoamento, TensaoAlternadaNominal, TensaoMediaNominal);
  const Kf: number = ObecjtFatorConcentracao.Kf();
  const Kfm: number = ObecjtFatorConcentracao.Kfm();
  const ObjectTensoesDinamicasLocais = new TensoesDinamicasLocais(TensaoAlternadaNominal, TensaoMediaNominal, TensaoProvaNominal, Kf, Kfm);
  const TensaoAlternadaLocal: number = ObjectTensoesDinamicasLocais.TensaoAlternadaLocal();
  const TensaoMediaLocal: number = ObjectTensoesDinamicasLocais.TensaoMediaLocal();
  const TensaoProvaLocal: number = ObjectTensoesDinamicasLocais.TensaoProvaLocal();
  const LimiteFadigaCorrigido: number = DeterminedLimiteFadigaCorrigido(Dparaf, ResistenciaTracao, AcabamentoSuperficial, Temperatura, Confiabilidade);
  const Nf: number = CoefSegurancaGoodman(LimiteFadigaCorrigido, ResistenciaTracao, TensaoProvaLocal, TensaoMediaLocal, TensaoAlternadaLocal);
  return Nf;
}

```

FONTE: Autor (2023)

O algoritmo que realiza esse fluxograma geral da aplicação está mostrado na Figura 22 a seguir.

Figura 22 – Algoritmo do fluxograma geral da aplicação

```

let Ns: number;
let Ne: number;
let Ng: number;
if (type_pressao=="ISO"){
  AreaTracao = ParafusosISO.filter(value => value.name===parafuso)[0].areaTracao
  DiameterParafuso = ParafusosISO.filter(value => value.name===parafuso)[0].diameter
  ResistenciaProva = MaterialISO.filter(value => value.classe===material_parafuso)[0].resistenciaProva
  ResistenciaEscoamento = MaterialISO.filter(value => value.classe===material_parafuso)[0].resistenciaEscoamento
  ResistenciaTracao = MaterialISO.filter(value => value.classe===material_parafuso)[0].resistenciaTracao
}else{
  AreaTracao = ParafusosNG.filter(value => value.name===parafuso)[0].areaTracao
  DiameterParafuso = ParafusosNG.filter(value => value.name===parafuso)[0].diameter
  ResistenciaProva = MaterialSAE.filter(value => value.classe===material_parafuso)[0].resistenciaProva
  ResistenciaEscoamento = MaterialSAE.filter(value => value.classe===material_parafuso)[0].resistenciaEscoamento
  ResistenciaTracao = MaterialSAE.filter(value => value.classe===material_parafuso)[0].resistenciaTracao
}
let AreaGasteParafuso: number = Math.PI * (DiameterParafuso/2)**2
let c = new GasketFlange(diametro_flange, diametro_do_cilindro, pressao_positivo*AreaTracao, quantidade_parafusos, DiameterParafuso, comprimento_sujeitado_do_parafuso, ModuloElasticidadeParafuso, motor_modulo_eLas);
let ConstanteJunta: number;
if (type_gaxeta=="Confinada"){
  ConstanteJunta = c.determinedConfinadGasket();
}else{
  ModuloElasticidadeGaxeta = MaterialGaxeta.filter(value => (value.name===material_gaxeta))[0].moduloElasticidade;
  ConstanteJunta = c.determinedNotConfinadGasket(ModuloElasticidadeGaxeta, espessura_da_gaxeta);
}
if (type_pressao=="Estática"){
  Ns = Nseparacao(pressao_positivo/quantidade_parafusos, AreaTracao, pre_carga, ResistenciaProva, ConstanteJunta);
  Ne = Nescoamento(pressao_positivo/quantidade_parafusos, AreaTracao, pre_carga, ResistenciaProva, ResistenciaEscoamento, ConstanteJunta);
  Ng = 0;
}else{
  Ns = Nseparacao(pressao_positivo/quantidade_parafusos, AreaTracao, pre_carga, ResistenciaProva, ConstanteJunta);
  Ne = Nescoamento(pressao_positivo/quantidade_parafusos, AreaTracao, pre_carga, ResistenciaProva, ResistenciaEscoamento, ConstanteJunta);
  Ng = NGoodman(DiameterParafuso, ConstanteJunta, pressao_positivo/quantidade_parafusos, AreaTracao, pre_carga, ResistenciaProva, ResistenciaEscoamento, ResistenciaTracao, acabamento_superficial, temperatura_d
}
return [Number(Ns.toFixed(4)), Number(Ne.toFixed(4)), Number(Ng.toFixed(4)), Number(ConstanteJunta.toFixed(4))]
}

```

FONTE: Autor (2023)

3.6 Coeficientes de segurança em função do pré carregamento

Foi implementada uma rotina que utiliza os dados inseridos pelo usuário e calcula os coeficientes de segurança em função do pré carregamento que varia em 10%, em um intervalo

de 0% a 100%. Os Coeficientes para cada pré carga são armazenados em uma lista, sendo exibida em forma de gráfico na interface do software, tendo assim uma comparação visual de cada coeficiente de segurança em função do pré carregamento.

Foi utilizado a tecnologia *Apex Chart* para exibição dos gráficos dos coeficientes de segurança em função do pré carregamento, pois trata-se de uma moderna biblioteca de gráficos *JavaScript* que permite criar visualizações de dados interativas com API simples (BRIAN, 2023).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com a utilização da *clean architecture*, foi possível desenvolver algoritmos para estimar o limite de resistência à fadiga do aço, a constante de rigidez da junta parafusada, bem como os coeficientes de segurança contra a separação da junta, contra o escoamento do material e contra a falha por fadiga que funcionam de maneira independente da interface gráfica. Feito em *Typescript*, esses algoritmos podem ser usados para aplicações desktop, que é o caso deste trabalho, assim como também para aplicações mobile e web.

Pelo fato de ser independente, esses algoritmos são escaláveis, ou seja, podem ser acrescentadas mais funcionalidades a eles sem a necessidade de mexer na interface gráfica, assim como a interface também pode ser modificada sem a necessidade de modificar esses algoritmos, além de tornar fácil a manutenção nesses códigos fontes.

A interface padrão da aplicação quando se abre o software pode ser vista na Figura 13, onde do lado esquerdo, tem-se os campos para preencher com os dados da situação que se deseja dimensionar os parafusos, e do lado direito, tem-se os campos para mostrar os devidos coeficientes de segurança, a constante de rigidez da junta parafusada, e um gráfico que mostra os coeficientes de segurança em função da pré carga aplicada.

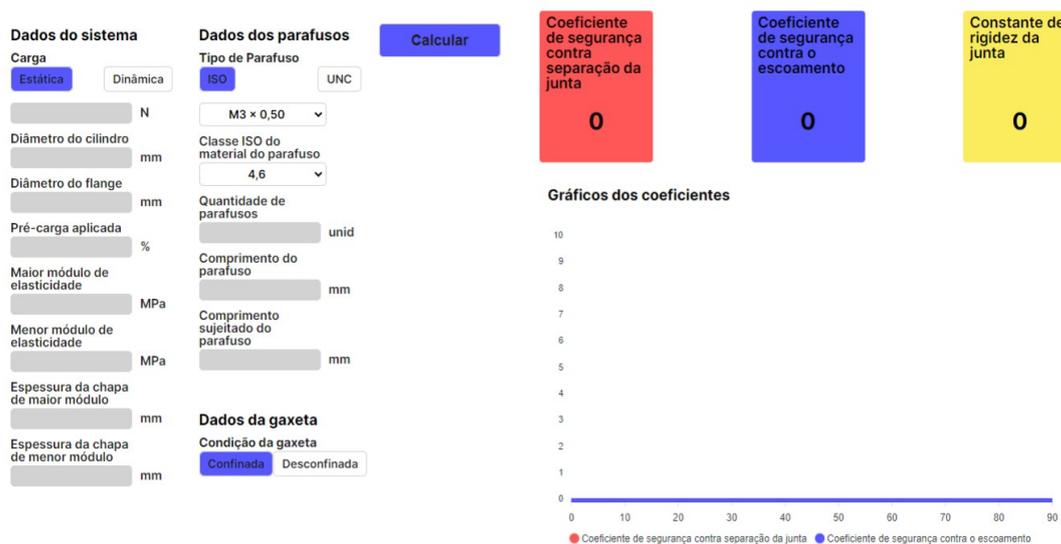
Os dados do sistema apresentado na interface trata-se das condições de trabalho em que a junta parafusada está sujeita. São dados relacionados aos flanges unidos, a pré carga aplicada e a carga atuante. Para o caso das cargas atuantes, elas podem ser estáticas ou dinâmicas, onde nas cargas dinâmicas, alguns dados a mais precisam ser informados.

Na parte dos Dados do parafuso, existe a opção de escolher o parafuso pelo tipo da rosca, sendo ISO e UNC as opções. Dependendo da escolha, o material do parafuso muda, onde os parafusos de roscas ISO possuem aços padronizados segundo a própria ISO, enquanto parafusos com roscas UNC possuem aços padronizados segundo a SAE. Além desses padrões, o usuário também precisa informar o comprimento do parafuso e o comprimento engastado dele.

Nos dados da gaxeta, existe a opção de escolher se a gaxeta é confinada ou desconfinada. No caso desta última, mais campos aparecem para o usuário inserir mais informações, que seria o material da gaxeta e sua espessura, uma vez que no caso da gaxeta não confinada, ela é considerada no cálculo da rigidez da junta parafusada.

A Figura 23 mostra a interface do programa por padrão, assim que ele é inicializado.

Figura 23 - Interface do software por padrão



FONTE: Autor (2023)

A Figura 24 mostra a configuração da interface para o caso de cargas dinâmicas

Figura 24 - Interface do software com outra configuração



FONTE: Autor (2023)

4.1 Validando o cálculo do limite a fadiga corrigido do aço

No exemplo 15-3 do Norton, há uma situação de parafusos pré-carregados sob carregamento dinâmico. Nesse caso, é necessário estimar o limite a fadiga do material. O

desenvolvimento do algoritmo se baseou na resolução deste exemplo juntamente com a teoria da falha por fadiga apresentada no capítulo 6 do Norton.

O aço utilizado no parafuso foi da classe SAE 5.2 e os demais parâmetros do exemplo estão na Tabela 12.

Tabela 12 - Parâmetros do exemplo 15-3 do Norton

PARÂMETROS	VALORES
DiametroParafuso	0,3125 in
ResistenciaTracao	120000 psi
AcabamentoSuperficial	Usinado
Temperatura	300 °F
Confiabilidade	99%

FONTE: Autor (2023)

Os resultados obtidos estão na Tabela 13 a seguir. Os resultados do software são informados em Mpa e foi convertido para fins de comparação. A pequena diferença entre os resultados se dá pelo fato de o livro utilizar arredondamentos durante o desenvolvimento dos cálculos, diferentemente do software.

Tabela 13 - Comparação dos limites à fadiga corrigidos, em psi

EXEMPLO 15-3 DO NORTON	SOFTWARE
25726 psi	25993 psi

FONTE: Autor (2023)

4.2 Validando o cálculo da constante de rigidez da junta

O exemplo 15-4 do Norton apresenta uma resolução mais detalhada sobre o cálculo da constante de rigidez da junta, levando em consideração se os flanges conectados são do mesmo material ou não, assim como se a junta possui vedação com gaxeta confinada ou não confinada.

Na Tabela 14 estão descritos os parâmetros usados na resolução desse problema.

Tabela 14 - Parâmetros utilizados no exemplo 15-4 do Norton

PARÂMETROS	VALORES
Dflange	7,25 in
Dc	4 in
Pressao	1500 psi
Nparaf	8
Dparaf	0,375 in
Lsujeit	1,875 in
Eparaf	30 Mpsi
EH	30 Mpsi
EL	10,4 Mpsi
TH	0,75 in
TL	1,125 in
AreaTracao	0,077 in ²
AreaHaste	0,11 in ²
Lparaf	2,25 in
Egasket	10 Kpsi
Lgasket	0,125 in

FONTE: Autor (2023)

Na Tabela 15 está a comparação dos resultados para o caso de a gaxeta ser confinada

Tabela 15 - Comparação da constante de rigidez da junta, para o caso da gaxeta confinada

EXEMPLO 15-4 DO NORTON	SOFTWARE
0,247	0,246

FONTE: Autor (2023)

Na Tabela 16 estão os resultados para o caso de a gaxeta não ser confinada.

Tabela 16 - Comparação da constante de rigidez da junta, para o caso da gaxeta não confinada

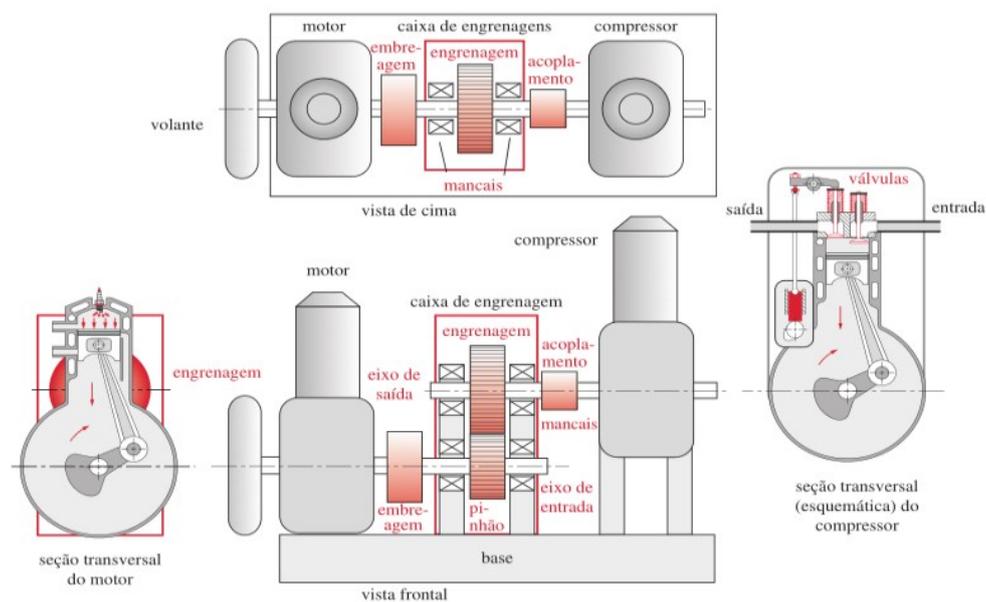
EXEMPLO 15-4 DO NORTON	SOFTWARE
0,832	0,832

FONTE: Autor (2023)

4.3 Validando o cálculo dos coeficientes de segurança

Para validação de modo geral do software foi utilizado a resolução do estudo de caso 15.11 do Norton, que trata do dimensionamento de parafusos para a cabeça de um compressor de ar. A Figura 25 mostra o esquema de funcionamento do compressor.

Figura 25 - Funcionamento do estudo de caso 15.11 do Norton



FONTE: Norton (2013)

A Tabela 17 mostra todos os dados utilizados neste estudo de caso.

Tabela 17 - Parâmetros utilizados no estudo de caso 15.11 do Norton

PARÂMETROS	VALORES
Dflange	5,625 in
Dc	3,125 in
Pressao	130 psi
Nparaf	8
Dparaf	0,3125 in
Lsujeit	1,25 in
Eparaf	30 Mpsi
EH	10,4 Mpsi
EL	10,4 Mpsi
TH	0,75 in
TL	1,125 in
AreaTracao	0,052431 in ²
AreaHaste	0,077 in ²
Lparaf	1,25 in
Egasket	13,5 Mpsi
Lgasket	0,06 in
ResistenciaTracao	133000 psi
AcabamentoSuperficial	Usinado
Temperatura	Menor que 350°F
Confiabilidade	99,90%
Parafuso	5/16-18 UNC-2A

FONTE: Autor (2023)

Os resultados obtidos com o software são comparados com os resultados da literatura, como mostrado na Tabela 18, Tabela 19, Tabela 20 e Tabela 21.

Tabela 18 - Comparação do coeficiente de segurança de Goodman do estudo de caso 15.11

ESTUDO DE CASO 15.11 DO NORTON	SOFTWARE
1,6	1,58

FONTE: Autor (2023)

Tabela 19 - Comparação do coeficiente de segurança contra a separação da junta do estudo de caso 15.11

ESTUDO DE CASO 15.11 DO NORTON	SOFTWARE
47	47,5

FONTE: Autor (2023)

Tabela 20 - Comparação do coeficiente de segurança contra o escoamento do estudo de caso 15.11

ESTUDO DE CASO 15.11 DO NORTON	SOFTWARE
1,5	1,54

FONTE: Autor (2023)

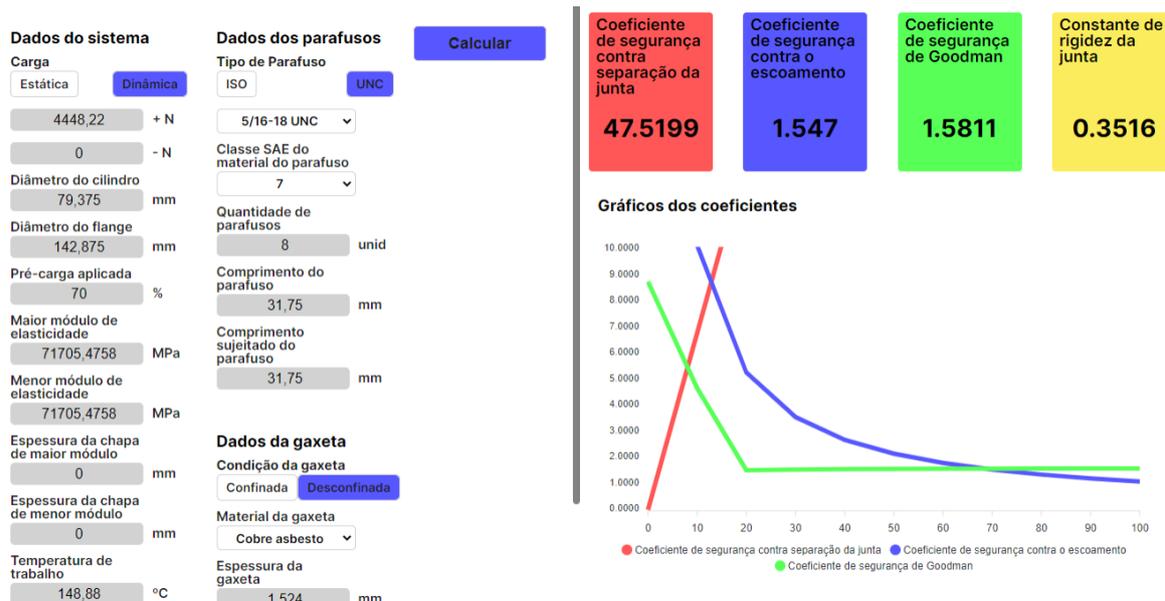
Tabela 21 - Comparação da constante de rigidez da junta do estudo de caso 15.11, para o caso da gaxeta não confinada

ESTUDO DE CASO 15.11 DO NORTON	SOFTWARE
0,352	0,351

FONTE: Autor (2023)

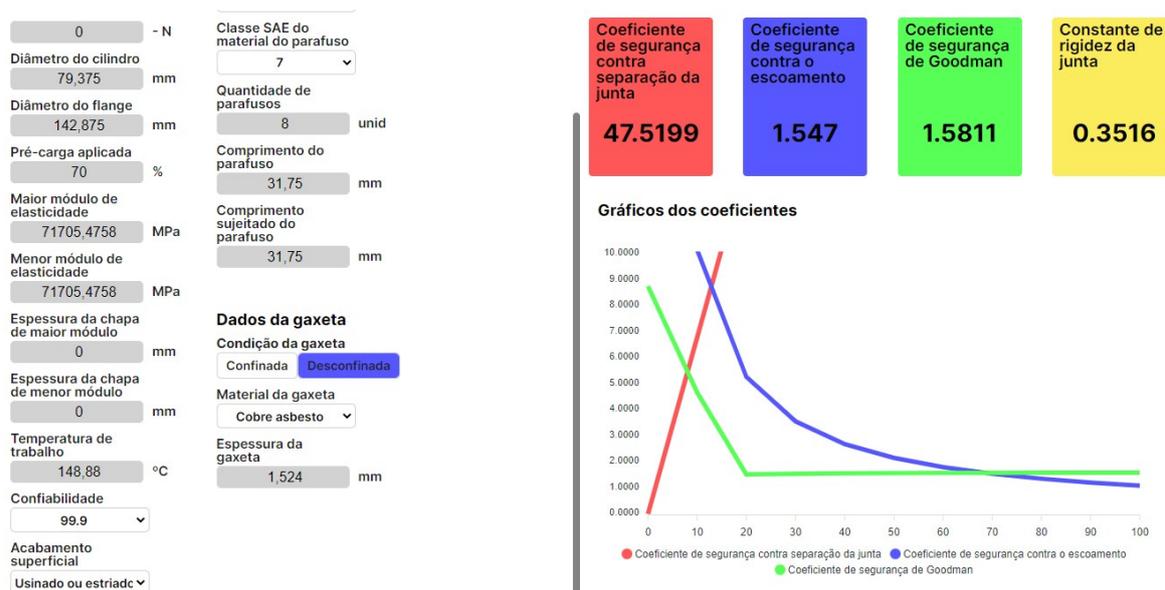
Os resultados podem ser mostrados na interface do programa, como mostra a figura 26 e Figura 27.

Figura 26 - Software com a resolução do estudo de caso 15-11 do Norton



FONTE: Autor (2023)

Figura 27 - Software com a continuação da resolução do estudo de caso 15-11 do Norton



FONTE: Autor (2023)

4.4 Validação com o exemplo 15-2 e 15-3 do Norton

As validações com os exemplos 15-2 e 15-3 do Norton não ficaram bem sólidas devido ao livro realizar uma abordagem simplificado na resolução da constante de rigidez da junta,

acarretando divergências significativas entre o livro e o software, uma vez que o algoritmo utiliza o método mais detalhado, como descrito no exemplo 15-4.

Para as cargas estáticas, foi utilizado o exemplo 15-2 do Norton, onde os parâmetros utilizados estão descritos na Tabela 22.

Tabela 22 - Parâmetros utilizados no exemplo 15-2 do Norton

PARÂMETROS	DESCRIÇÃO
Dflange	1 in
Dc	0,312 in
Carga	2000 lb
Nparaf	1
Parafuso	UNC 5/16-18
Lsujeit	2 in
Eparaf	30 Mpsi
EH	30 Mpsi
EL	30 Mpsi
Lparaf	2,5 in
Material do parafuso	Classe SAE 5,2

FONTE: Autor (2023)

Os coeficientes de segurança contra a separação da junta e contra o escoamento estão comparados na Tabela 23 e Tabela 24, respectivamente. A constante de rigidez da junta é comparada na Tabela 25.

Tabela 23 - Comparação do coeficiente de segurança contra a separação da junta do exemplo 15-2

EXEMPLO 15-2 DO NORTON	SOFTWARE
2,2	2,2839

FONTE: Autor (2023)

Tabela 24 - Comparação do coeficiente de segurança contra o escoamento do exemplo 15-2

EXEMPLO 15-2 DO NORTON	SOFTWARE
1,5	1,13

FONTE: Autor (2023)

Tabela 25 - Comparação da constante de rigidez da junta do exemplo 15-2, para o caso da gaxeta confinada

EXEMPLO 15-2 DO NORTON	SOFTWARE
0,09056	0,12240

FONTE: Autor (2023)

Os mesmos parâmetros são utilizados no exemplo 15-3 do Norton, para parafusos pré-carregados sob carregamento dinâmico, com mudança apenas na carga, sendo de 1000lb e acréscimo dos parâmetros já descritos na Tabela 10.

Com isso, os resultados para o coeficiente de segurança contra a falha por fadiga, também chamado de coeficiente de segurança de Goodman, são comparados na Tabela 26.

Tabela 26 - Comparação do coeficiente de segurança de Goodman do exemplo 15-3

EXEMPLO 15-3 DO NORTON	SOFTWARE
1,38	1,09

FONTE: Autor (2023)

Os coeficientes de segurança contra a separação da junta e contra o escoamento do exemplo 15-3 do Norton, são comparados na Tabela 27 e Tabela 28, respectivamente.

Tabela 27 - Comparação do coeficiente de segurança contra a separação da junta do exemplo 15-3

EXEMPLO 15-3 DO NORTON	SOFTWARE
4,4	4,5

FONTE: Autor (2023)

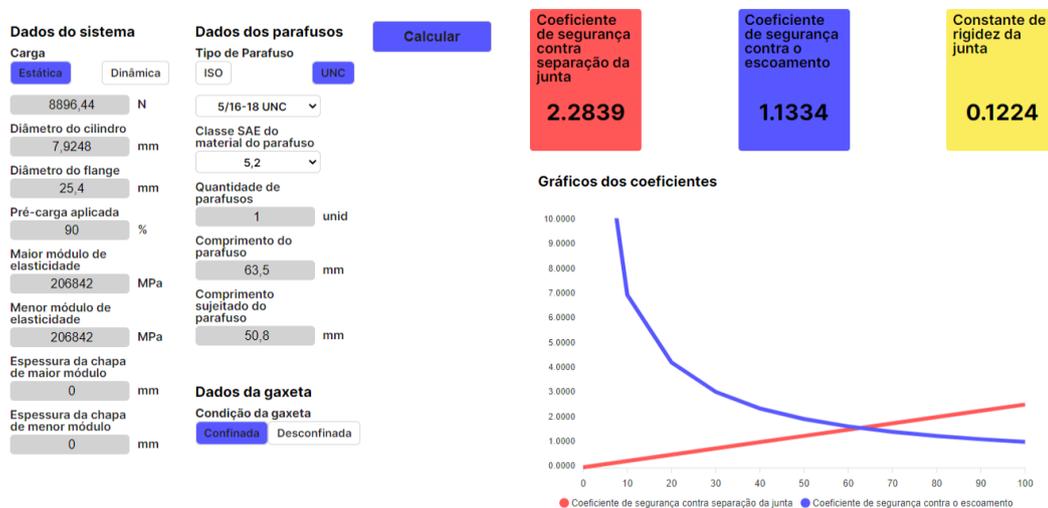
Tabela 28 - Comparação do coeficiente de segurança contra o escoamento do exemplo 15-3

EXEMPLO 15-3 DO NORTON	SOFTWARE
1,18	1,16

FONTE: Autor (2023)

Esses dados são mostrados na interface do software através da Figura 28, mostrando o exemplo 15-2.

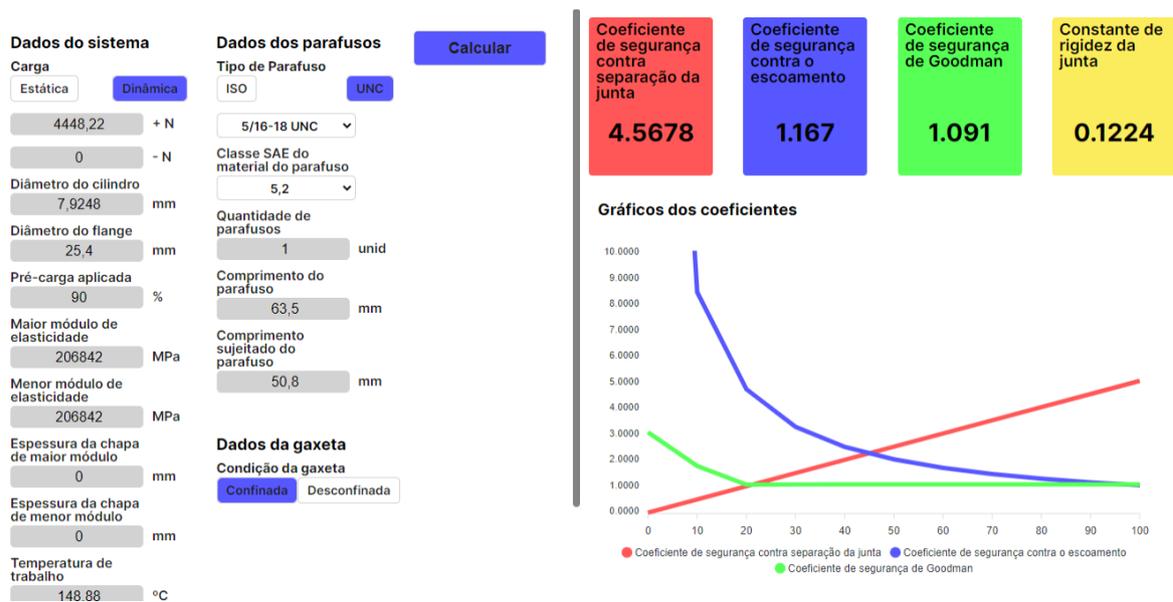
Figura 28 - Software com a resolução do exemplo 15-2



FONTE: Autor (2023)

O exemplo 15-3 é mostrado na interface do software na Figura 29.

Figura 29 - Software com a resolução do exemplo 15-3



FONTE: Autor (2023)

5 CONCLUSÃO

Conclui-se com este trabalho, um software desenvolvido para desktop, seja Linux, Windows ou MacOS, que torna mais acessível o auxílio no dimensionamento de parafusos sujeitos a esforços axiais para uniões de flanges, sejam elas de vedação ou estrutural.

Os algoritmos desenvolvidos para os cálculos dos coeficientes de segurança contra a separação da junta, contra o escoamento do parafuso e contra a falha por fadiga, além do cálculo da constante de rigidez da junta e estimativa de limite a fadiga do material do parafuso funcionam de maneira independente da interface, assim como prevê a filosofia da *Clean Architecture*, garantindo facilidades na manutenção e ampliação desse software.

A interface do software é moderna e intuitiva, principalmente devido às tecnologias como *React Js*, que permitem o desenvolvimento de aplicações mais robustas, bonitas, modernas e até mesmo reutilizável para o caso de uma versão web dessa aplicação.

A aplicação desktop mostrou-se confiável em relação a resolução de problemáticas relacionadas a parafusos sujeitos a esforços axiais, quando usada para solucionar os exemplos e estudo de caso do Norton, atingindo os resultados coerentes com a literatura, em questões de segundos, garantindo o principal objetivo deste trabalho, que era desenvolver uma aplicação para auxiliar nos cálculos de dimensionamento de parafusos sujeitos a esforços de tração em uniões parafusadas de maneira fácil, rápida e acessível, tornando-se uma ótima ferramenta para auxiliar o desenvolvimento de projetos.

Além dos valores dos coeficientes de segurança, o software mostra graficamente o comportamento desses coeficientes em função da pré carga aplicada nos parafusos, tornando possível uma análise mais aprofundada sobre o comportamento da junção parafusada em relação a pré carga aplicada aos parafusos no momento da montagem, ajudando o usuário na tomada de decisões do problema.

REFERÊNCIAS

- BARBOSA, JOÃO PAULO. **Elementos de Máquinas**. São Mateus, ES: Instituto Federal Espírito Santo, Campus São Mateus, 2011.
- BEIER, LOU. **React Hook Form**. [S.I], 2023. Disponível em: <https://react-hook-form.com/>. Acesso em: 15 jun. 2023.
- BRANCHIER, HENRIQUE. **Contribuições dos softwares na aprendizagem e análise e cálculo de elementos estruturais**. 2017. Trabalho de conclusão do curso (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade do Vale do Taquari, Lajeado, 2017.
- BRIAN, LAGUNAS. **ApexCharts**. [S.I], 2023. Disponível em: <https://github.com/apexcharts/apexcharts.js>. Acesso em 24 jun. 2023.
- BUDYNAS, RICHARD *et al.* **Elementos de máquinas de Shigley**: projeto de engenharia mecânica. 8. ed. Porto Alegre, RS: AMGH, 2011.
- DA ROSA, EDISON. **Análise de resistência mecânica de peças e componentes estruturais**: Mecânica da fratura e fadiga. Florianópolis, SC: Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.
- FAKURY, RICARDO H. *et al.* **Dimensionamento básico de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto**. São Paulo, SP: Pearson Education do Brasil, 2016.
- FILHO, MARCOS *et al.* **Sistemas especialistas**: especificação de parafusos de união. 1999. Artigo (Graduação em engenharia mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.
- FLANAGAN, DAVID. **Javascript**: o guia definitivo. 6. ed. Porto Alegre, RS: Bookman, 2013.
- FRANCESCHI, ALESSANDRO. **Elementos de máquinas**. Santa Maria, RS: Universidade Federal de Santa Maria, Colégio Técnico Industrial de Santa Maria: Rede e-Tec Brasil, 2014.
- GRIZA, S. **Efeito do torque na vida em fadiga de uniões parafusadas**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais) – Curso de Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.
- GUIDI, Erick Siqueira. **Influência de parâmetros construtivos e operacionais na vida em fadiga de uniões aparafusadas em tração**. 2013. 110 f. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2013.
- Haidar N., Obeed S., Jawad, M, 2011. **Mathematical representation of bolted-joint stiffness**: A new suggested model. *Journal of Mechanical Science and Technology*, v.25, p. 2827 – 2834.

JÚNIOR, FRANCISCO *et al.* **Dimensionamento de parafuso para fixação de placas de revestimentos utilizadas nos moinhos de bolas da indústria cimenteira.** 2020. Artigo (Graduação em engenharia mecânica) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2020.

MARTIN, ROBERT C. **Arquitetura limpa:** O guia do artesão para estrutura e design de software. 1. ed. [S.I]: Alta Books, 2019.

NORTON, ROBERT L. **Projeto de máquinas:** uma abordagem integrada. 4. ed. Porto Alegre, RS: Bookman, 2013.

OPENJS FOUNDATION. **Electron.** [S.I], 2021. Disponível em:
<https://www.electronjs.org/pt/docs/latest>. Acesso em: 20 abr. 2023.

RODRIGUES, NETO. **Análise da influência de elementos de vedação na rigidez de juntas parafusadas em tração utilizando o software Excel.** 2018. Trabalho de conclusão do curso (Graduação em engenharia mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2018.

SILVEIRA, ZILDA C. **Seleção e pré-dimensionamento de juntas mecânicas.** 1. ed. [S.I]: Universidade de São Paulo, Escola de engenharia de São Carlos: Departamento de Engenharia Mecânica, 2013.