

**Otimização no tempo de análise de um veio de transmissão,  
por meio de uma aplicação online, para a correta tomada de  
decisões**

**Lucas Huber Pissaia**

Dissertação apresentada à

**Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de  
Bragança para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Industrial  
no âmbito da Dupla Diplomação com a Universidade Tecnológica Federal  
do Paraná – Campus Guarapuava**

Este trabalho foi efetuado sob orientação de:

**Professor Doutor Carlos Andrade**

Coorientação de:

**Professor Doutor David Lira Nunez**

Outubro de 2021

Lucas Huber Pissaia

**Otimização no tempo de análise de um veio de transmissão,  
por meio de uma aplicação online, para a correta tomada de  
decisões**

Dissertação apresentada ao Programa de Dupla  
Diplomação entre a Universidade Tecnológica Federal  
do Paraná - Campus Guarapuava e o Instituto Politécnico  
de Bragança, como requisito para obtenção do título de  
Mestre em Engenharia Industrial, ramo de Engenharia  
Mecânica.

Orientador: Professor Doutor Carlos Andrade

Coorientador: Professor Doutor David Lira Nunez

Bragança

2021

# Agradecimentos

Este trabalho acadêmico é fruto da colaboração e incentivo de muitas pessoas, além das instituições que possibilitaram e deram o apoio necessário. A Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) campus Guarapuava e a todos que a fazem ser o que é, também ao Instituto Politécnico de Bragança (IPB) por ter me recebido e acolhido.

Aos meus orientadores, Professor Doutor Carlos Andrade e Professor Doutor David Lira Nunez, por me auxiliarem e sempre estarem a disposição quando necessário, além de darem o apoio que eu precisava.

Aos colegas e amigos que estiveram presentes nessa jornada. Aos que cresceram comigo e estão juntos mesmo longe. Aos que fiz na UTFPR, seja nas salas de aula ou em projetos, da Actus ao Pró-Enem. Aos que o intercâmbio para o Japão me presenteou e que tanto me ajudaram, pessoas especiais para uma experiência única, どうもありがとうございます! Aos que conheci em Portugal e que tanto me ajudaram, em especial aos que dividi não só a casa, mas todos os medos e reflexões que o momento nos trouxe. Aos amigos que fiz e que tanto me ajudaram.

A toda minha família que me incentiva e apoia em buscar e crescer cada vez mais. Aos meus avós, pais, irmã e sobrinhos, vocês são a minha saudade diária. A vocês, em especial ao meu afilhado Guilherme, sempre digo que busco desafios e vivências para me tornar uma pessoa melhor por mim e para vocês, porque é isso que merecem.

A minha mãe, Luciane, e ao meu pai, Neury, toda a minha gratidão e amor. Sem vocês, nada disso seria possível, não há palavras para descrever o quanto eu sou grato. Mãe e pai, vocês são meu orgulho, força e motivação para sempre seguir em frente, eu amo vocês mais do que tudo. Por vocês, eu dou a minha vida.

Enfim, para todos os que contribuíram de alguma forma para esse trabalho e minha jornada acadêmica, meu muito obrigado.



## RESUMO

Veios são componentes essenciais na engenharia mecânica, usados em máquinas para sustentar outros elementos mecânicos e transmitir potência, como em aerogeradores, que ganham cada vez mais espaço ao redor do mundo na geração de energia de maneira renovável. Para evitar a falha por fadiga em tais componentes, é necessário verificar o fator de segurança e fazer a análise ainda na fase de projeto, pois falhas podem ter um efeito cascata e trazer danos a toda a estrutura em que está conectado, para um aerogerador, isso pode resultar em problemas em toda a caixa de engrenagens ou na própria nacelle. Os cálculos referentes à fadiga, são repetitivos e ocupam demasiado tempo do engenheiro ou projetista responsável. Para isso, este trabalho pretende desenvolver uma aplicação web, utilizando o *framework web Django*, que com critérios de análise confiáveis possa diagnosticar o projeto de veios de seção transversal circular, maciços, dúcteis e de aço carbono, que estejam sob cargas fletoras e/ou torcionais. Assim, será possível para qualquer usuário com acesso à internet, identificar, ainda na fase de projeto, uma provável falha devido à fadiga, ou conferir se um veio atuante está ou não respeitando a faixa de segurança. Em seguida, será realizado um estudo de caso, no qual, uma seção crítica de um veio de alta velocidade de um aerogerador será analisado em consonância com o procedimento proposto, também será possível comparar a diferença de tempo investido para o cálculo manual e o automatizado pela aplicação. Além dos resultados particulares que oferecerá o trabalho, será possível identificar que a aplicação desenvolvida auxilia e deixa mais prática simulações com possíveis alterações na geometria ou material do veio analisado, facilitando a tomada de decisões, diminuindo os erros acidentais de projeto e otimizando o tempo envolvido no processo de análise de um veio em relação a sua resistência à fadiga.

**Palavras-chave:** Veio de Transmissão. Fratura por Fadiga. Aerogerador. Veio de Alta Velocidade. Aplicação Web. Python. Automatização.

## ABSTRACT

Shafts are essential components in mechanical engineering, used in machines to support other mechanical elements and transmit power, as in wind turbines, which are increasingly gaining more space around the world in renewable energy generation. To avoid fatigue failure in such components, is necessary to verify the safety factor and perform the analysis during the design phase, as failures can have a cascade effect and bring damage to the entire structure to which is connected, for a wind turbine this can result in problems for the gearbox or the nacelle itself. The calculations referring to fatigue are repetitive and cost too much time for the responsible engineer or designer. For that, this work intends to develop a web application, using the Django web framework, which with reliable analysis criteria can diagnose the design of circular cross-section, solid, ductile and carbon steel shafts, under bending and/or torsional loads. So, it will be possible for any user with internet access to identify, during the design phase, a probable failure due to fatigue or to verify whether an active shaft is in or out the respective safety range. Then, a case study will be carried out, in which a critical section of a high-speed wind turbine shaft will be analyzed in line with the proposed procedure, it will also be possible to compare the difference in time invested for manual calculation and the automated one, made by the application. In addition to the results that the work will offer, it will be possible to identify that the developed application assists and makes simulations with possible changes in the geometry or material of the analyzed shaft more practical, facilitating decision-making, reducing accidental design errors, and optimizing the time involved in the process of analyzing a shaft in relation to its resistance to fatigue.

**Keywords:** Transmission shaft. Fatigue fracture. Wind turbine. High speed shaft. Web application. Python. Automatization.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Aerogerador do parque eólico de Taikoyama caído [3].....	13
Figura 2.1: Porcentagem da demanda média anual de eletricidade coberta pela energia eólica [22]. .....	18
Figura 2.2: Novas e o total (acumulativo) de instalações na Europa – Cenário de expectativas realistas da WindEurope [22]. .....	19
Figura 2.3: Pareto da produção de energia elétrica a partir de fontes renováveis. Dados: [23]. .....	20
Figura 2.4: Evolução da produção de eletricidade em Portugal por FER (GWh) [24]. .....	20
Figura 2.5: Funcionamento de um aerogerador esquema geral [25]. .....	21
Figura 2.6: Aerogerador de eixo vertical [26]. .....	22
Figura 2.7: Característica operacional padrão de um aerogerador, relação potência x velocidade do vento [28]. .....	22
Figura 2.8: Curva de potência modelo N90 – R80 [29]. .....	23
Figura 2.9: Principais componentes de um aerogerador [4]. .....	24
Figura 2.10: Elementos de um aerogerador de forma simplificada [5]. .....	26
Figura 2.11: Acoplamento entre turbina e gerador eólico por meio da transmissão mecânica [31]. .....	27
Figura 2.12: Variação típica de torque para o veio do rotor [6]. .....	29
Figura 2.13: Torque no veio do rotor durante uma frenagem [6]. .....	30
Figura 2.14: Fatores de superfície para diversos tipos de acabamento superficial para aços [33]. .....	33
Figura 2.15: Concentração de tensão causada por mudança abrupta da seção transversal .....	36
Figura 2.16: Veio cilíndrico maciço com raio de arredondamento no ressalto sob torção .....	37
Figura 2.17: Veio cilíndrico maciço com raio de arredondamento no ressalto sob flexão .....	37
Figura 2.18: Veio cilíndrico maciço com sulco no ressalto sob flexão .....	38
Figura 2.19: Veio cilíndrico maciço com sulco no ressalto sob torção .....	38
Figura 2.20: Veio cilíndrico maciço com canal de fundo plano sob flexão .....	39
Figura 2.21: Veio cilíndrico maciço com canal de fundo plano sob torção .....	40
Figura 2.22: Valores do fator de sensibilidade de entalhe por flexão, $q$ .....	41
Figura 2.23: Valores do fator de sensibilidade de entalhe por torção, $qs$ .....	42
Figura 2.24: Comportamento de uma tensão flutuante com ondulação de alta frequência.....	43
Figura 2.25: Representação gráfica dos critérios de falha.....	48
Figura 2.26: Representação gráfica dos critérios de falha com o método-FKM.....	49
Figura 2.27: Representação do caminho percorrido em uma programação utilizando Django.....	52
Figura 3.1: Funções de decisão automática para fator de segurança e diâmetro.....	57
Figura 3.2: Lógica para um programa com o Django .....	58
Figura 3.3: Funcionamento do programa web.....	60
Figura 4.1: Veio de alta velocidade e elementos adjacentes .....	63
Figura 4.2: Seções do veio de alta velocidade e sua utilização .....	64
Figura 4.3: Escolha de idioma .....	65
Figura 4.4: Escolha do formato do ressalto .....	65
Figura 4.5: Escolha de acabamento, carga, equilíbrio e componentes .....	66
Figura 4.6: Escolha dos últimos dados de entrada.....	67

Figura 4.7: Resultados encontrados .....	67
Figura 4.8: Resultados para acabamento usinado ou laminado a frio .....	69
Figura 4.9: Resultado para acabamento retificado .....	70
Figura 4.10: Resultado em inglês simulando componente média do torque .....	71
Figura 4.11: Etapas para cálculo manual e automatizado .....	73

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Parâmetros para o fator de superfície .....	32
Tabela 2.2 - Valores para fator de carga.....	33
Tabela 2.3 - Valores para fator de temperatura. ....	34
Tabela 2.4 - Valores para fator de confiabilidade .....	34
Tabela 2.5 - Valores para fator de confiabilidade. ....	40
Tabela 2.6 - Valor do fator de segurança e sua aplicação .....	45
Tabela 4.1 - Dados de entrada .....	62
Tabela 4.2 - Utilização de cada seção.....	65
Tabela 4.3 - Fator de segurança para cada acabamento .....	70
Tabela 4.4 - Fatores de segurança para FKM e Goodman .....	72
Tabela 4.5 – Tempo necessário para cálculo manual em diferentes etapas .....	74
Tabela 4.6 - Tempo necessário para cálculo automatizado em diferentes etapas .....	75
Tabela 4.7 - Economia de tempo para análise do fator de segurança.....	75

## ÍNDICE

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
1.1	OBJETIVOS	16
1.1.1	Objetivo Geral	16
1.1.2	Objetivos Específicos	16
<b>2.</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>17</b>
2.1	ENERGIA EÓLICA COMO ENERGIA RENOVÁVEL	17
2.2	FUNCIONAMENTO DE UM AEROGERADOR	20
2.2.1	Principais componentes de um aerogerador	23
2.2.2	Sistema de transmissão de um aerogerador	25
2.3	ELEMENTO MECÂNICO VEIO	27
2.3.1	Cargas sofridas por um veio de transmissão de um aerogerador	28
2.4	RESISTÊNCIA À FADIGA	30
2.4.1	Cálculo do Limite de resistência à fadiga	31
2.5	CONCENTRADORES DE TENSÃO	35
2.5.1	Fatores de concentração de tensão para fadiga	36
2.6	TENSÕES FLUTUANTES	42
2.7	CRITÉRIOS DE FALHA POR FADIGA PARA UM VEIO	44
2.7.1	Critério de falha de Goodman modificado	46
2.7.2	Critério de falha de Soderberg	46
2.7.3	Outros critérios	47
2.8	REPRODUÇÃO NA FORMA ALGÉBRICA DE CURVAS EXPERIMENTAIS NO EDITOR DE FOLHAS DE CÁLCULO	50
2.9	LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO	50
2.10	INTERFACES ONLINE	52
<b>3.</b>	<b>ASPECTOS METODOLÓGICOS</b>	<b>54</b>
<b>4.</b>	<b>CONCEPÇÃO E DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO</b>	<b>62</b>
4.1	DEMONSTRAÇÃO DO USO EM ESTUDO DE CASO	62
4.2	COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS PARA DIFERENTES MÉTODOS	72
4.3	OTIMIZAÇÃO DO TEMPO INVESTIDO PARA O CÁLCULO	73
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>77</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>79</b>
	<b>APÊNDICE</b>	<b>84</b>

# 1. INTRODUÇÃO

Falha por fratura é um problema para o homem desde as primeiras ferramentas e máquinas, suas consequências e complexidades vem aumentando desde então, até o ponto que falhas catastróficas em uma estrutura ou componente mecânico podem levar a tragédias ou, no mínimo, perdas financeiras. Um exemplo disso é um estudo econômico que estima que em 1978 os Estados Unidos teve um custo de 119 bilhões de dólares devido à ocorrência de fratura, ainda é dito que com a tecnologia da data do estudo (1995) o custo anual poderia ser reduzido em 35 bilhões, e que com mais pesquisas sobre mecanismos das fraturas o quadro poderia haver uma redução de mais 28 bilhões [1].

Quando se olha para o fenômeno da fadiga, sabe-se que ela tem início com uma pequena fratura, que pode estar presente no material desde a sua manufatura ou se desenvolver ao longo do tempo devido às deformações cíclicas ao redor das concentrações de tensões. Um caso de tragédia por falha por fadiga é o do avião *Comet*, que começou a operar em 1952 como um sucesso devido às velocidades alcançadas, porém devido a um desgaste na fuselagem que fraturou a ponta de uma das janelas, fraturas inferiores a 1,77 milímetros, elevadas concentrações de tensão desencadearam a queda da aeronave, desde então, as janelas de avião possuem formato arredondado nas pontas. Acredita-se que essas falhas também custaram ao Reino Unido a perda de liderança no segmento da indústria comercial de aeronaves para os Estados Unidos [2].

Outro acidente envolvendo o fenômeno da fadiga foi no parque eólico de Taikoyama, Kyoto, Japão. Neste, um aerogerador desabou e evidências de propagação de fissura por fadiga foram encontradas no interior da torre. Com alguns parafusos sofrendo elevada tensão, a avaliação da fadiga mostrou que o tempo de vida diminuiu rapidamente para menos de dois meses, sendo que o tempo de vida normal é de 20 anos. A construção, que custou aproximadamente 12,5 milhões de dólares, pode ser vista na Figura 1.1 [3].



Figura 1.1: Aerogerador do parque eólico de Taikoyama caído [3].

Quando falamos sobre aerogeradores, conversão de energia e melhoria da eficiência se tornaram uma prioridade mundial para garantir o fornecimento de energia e enfrentar desafios como mudanças climáticas, redução da emissão de gases de efeito estufa, proteção da biodiversidade e desenvolvimento de tecnologias no setor das energias renováveis. A energia eólica se destaca em relação ao aumento da capacidade instalada de produção e a geração de energia, sendo uma energia renovável que vem crescendo exponencialmente ao redor do mundo, ano após ano [4].

Esse crescimento, tanto da capacidade como da produção, atraiu mais atenção aos custos e investimentos relacionados a operação e manutenção dos aerogeradores. Para uma turbina eólica recém-construída, estes custos podem facilmente corresponder de 20 a 25% do custo total de eletricidade ao longo da vida útil do equipamento [5].

Um dos componentes que precisam de atenção tanto no momento do projeto como na manutenção são os veios do aerogerador, que são responsáveis por, entre outras funções, suportar o torque do rotor e da caixa de engrenagens, sendo um guia no movimento de rotação [6]. Um dimensionamento errado pode causar deflexões acima do aceitável, devido à baixa rigidez de torção, ou ainda, uma falha de fratura porque o veio não resistiu à fadiga devido ao carregamento cíclico ao longo de sua vida útil [7].

As falhas mecânicas em veios de transmissão podem ser de dois tipos: estática ou por fadiga, sendo a segunda também chamada de dinâmica [8]. Logo, já na fase de projeto, analisar e considerar possíveis falhas por fadiga é fundamental, seja para fazer o monitoramento ou

análise do estado do veio já em funcionamento, soluções confiáveis podem ser encontradas na literatura, podendo ser medições de vibração e análises do espectro, numérica e/ou analítica [9].

Nesse sentido, a investigação prática do presente trabalho envolve uma análise de um veio dentro da nacele de um aerogerador, pois um excesso de vibração, ou ainda uma torção e/ou desequilíbrio do veio, pode causar avarias graves e falhas catastróficas à chumaceira de rolamentos, à caixa de engrenagem e/ou ao *drivetrain* [10].

Isso geraria custos na troca e na perda de produção de energia, pois exige um tempo de parada grande para realizar o reparo, o que é extremamente custoso para as empresas detentoras de parques eólicos [11]. Sabe-se que uma falha ou defeito por fadiga em um veio, pode levar a uma falha estrutural à outros componentes conectados a ele, a chamada falha em cascata [8]. Em alguns modelos, uma falha no veio de baixa velocidade levou ao colapso da caixa de velocidades, resultando em prejuízos na casa dos 0,5 M€ [5], [12]. Outro exemplo é que em uma caixa de velocidades cerca de 45% das falhas acontecem no rolamento do veio de alta velocidade e 11% no rolamento do veio intermediário, uma falha ou desalinhamento em um desses veios podem afetar toda a caixa [13]. Além de ameaçar a segurança de todo o aerogerador de maneira direta [14].

Além disso, em pesquisas que buscaram realizar a análise de modo e efeito de falha (FMEA – do inglês *Failure Mode and Effect Analysis*) para um aerogerador, as pás e o veio do rotor foram tidos como os subsistemas mais críticos [15]. Ainda, em um estudo sobre a análise de falha utilizando FMEA, o veio principal foi considerado por 4 de 5 especialistas consultados como tendo índice de severidade, ou gravidade, máxima ou um ponto abaixo, além de criticamente receber a maior importância para três dos especialistas [16]. Devido aos pontos levantados, este mecanismo demanda constantes estudos e análises para melhoria, seja para fazer o dimensionamento correto ou verificar se não está superdimensionado [4].

Para o dimensionamento de um veio, cientistas e engenheiros mecânicos, de países em desenvolvimento, possuem dificuldades em adquirir pacotes computacionais para análises de projeto e simulação, ter um método automatizado de cálculo para fazer a análise de falha por fadiga beneficiaria tanto a indústria quanto a academia [17].

A automatização de cálculos dentro da engenharia mecânica segue sendo muito importante, não só para a área acadêmica, mas também para a indústria. Leal em [18], automatizou o cálculo de um sistema de produção de trabalho motor alimentado a gaseificação da madeira. Neto em [17] deixa claro como o seu programa deixou mais prática as simulações de possíveis alterações na geometria e/ou na escolha de material do veio analisado. Costa em

[19], utilizando um programa computacional VBA (do inglês *Virtual basic for application*) para auxiliar o projetista durante algumas etapas de um projeto de ancoragem, mostra como reduziu o tempo total do projeto em 30,5 vezes.

A otimização do tempo de um profissional da área de projeto é uma das prioridades em qualquer setor, seja na indústria ou na academia, assim, automatizar os cálculos e prover dados mais diretos para essa análise tem o objetivo de poupar tempo e garantir a precisão e qualidade do veio de transmissão [19]. Além disso, programas com uma interface convidativa e amigável ao usuário, permitem também que profissionais sem conhecimentos específicos em programação ou com acesso direto a um software e pacotes computacionais caros [20], façam uma rápida verificação na análise de um veio desejado.

Sabendo então da importância do dimensionamento de forma otimizada de um veio para evitar a falha por fadiga, este trabalho busca seguir a linha proposta por Neto em [17], que, utilizando um programa escrito em Python, considera dados da geometria do veio (estimados ou não) e das cargas aplicadas por elementos como engrenagens, polias e acoplamentos, para retornar fatores de segurança relativos a critérios de falha convenientes e recomendados. O programa desenvolvido está disponível em plataformas comunitárias, a partir dele este trabalho irá focar em uma das sugestões para trabalhos futuros proposta pelo autor, que é projetar uma interface gráfica e tornar o programa mais acessível.

Este trabalho então, pretende proporcionar um programa que facilite o cálculo para o dimensionamento do veio, otimizando o processo de análise na fase de projeto e auxiliando na tomada de decisão do engenheiro projetista, ajudando quando há necessidade de mudança ou adaptação. Com o uso do *framework* Django, busca-se otimizar o código e criar uma aplicação web, ficando de fácil acesso para qualquer usuário com uma interface amigável e de simples uso, sem a necessidade de trabalhar diretamente com Python.

Por fim, pretende-se aplicar o programa criado em um estudo de caso, no qual será calculado o fator de segurança de um veio de alta velocidade de um aerogerador e, então, comparar o tempo de análise e cálculo do programa com o tempo que seria gasto em um cálculo manual.

## **1.1 OBJETIVOS**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral deste trabalho é a elaboração de um programa computacional para automatizar a análise do efeito de cargas cíclicas mistas em veios de transmissão de uma caixa de engrenagens de um aerogerador, apresentando uma interface amigável para o engenheiro ou projetista que deseja realizar a análise.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- Pesquisar as diferentes aplicações de veios e sua importância para tomada de decisões na engenharia mecânica;
- Estudar o comportamento de um veio submetido a esforços;
- Identificar os critérios e normas referentes aos cálculos de esforços em um veio;
- Levantamento das principais cargas sofridas por um veio de transmissão de um aerogerador;
- Estudar e detalhar o sistema de transmissão de um gerador eólico;
- Verificar a viabilidade de uma interface online para hospedar o programa;
- Analisar ferramentas computacionais gratuitas para a otimização do processo;
- Propor um modelo prático e seguro de análise de fadiga em um veio;
- Demonstrar a aplicabilidade do modelo proposto, avaliando-o com um estudo de caso;
- Verificar a diferença de tempo entre uma análise por cálculo manual e uma com o uso do programa.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 ENERGIA EÓLICA COMO ENERGIA RENOVÁVEL

A utilização das forças do vento como fonte de energia renovável está presente desde os primórdios do desenvolvimento da civilização humana. Com as mais diversas aplicações, seja impulsionar barcos à vela ou motor de movimento para moinhos de vento, o uso para produção de energia elétrica é consideravelmente recente, datando o seu início há aproximadamente 120 a 140 anos [21].

Atualmente, a força dos ventos é considerada pela *International Renewable Energy Agency* (IRENA) como a que mais cresce em tecnologia na área das energias renováveis. Um dos motivos disso, segundo a própria IRENA, é a constante redução de custos e aumento da capacidade de geração de energia, crescendo em quase 75 vezes nas últimas duas décadas (de 7,5 GW em 1997 a 564 GW em 2018).

De acordo com o estudo publicado em fevereiro de 2021, intitulado “*Wind energy in Europe. 2020 Statistics and the outlook for 2021-2025*” pela *WindEurope*, antiga Associação Europeia de Energia Eólica, a energia eólica atendeu a 16,4% da demanda de energia elétrica de toda a União Europeia e do Reino Unido. A Dinamarca teve melhor resultado, tendo 48% da demanda atendida pela eólica, Portugal figura como quinto, com 25% do seu mercado sendo atendido pelo segmento, como pode ser visto na Figura 2.1.

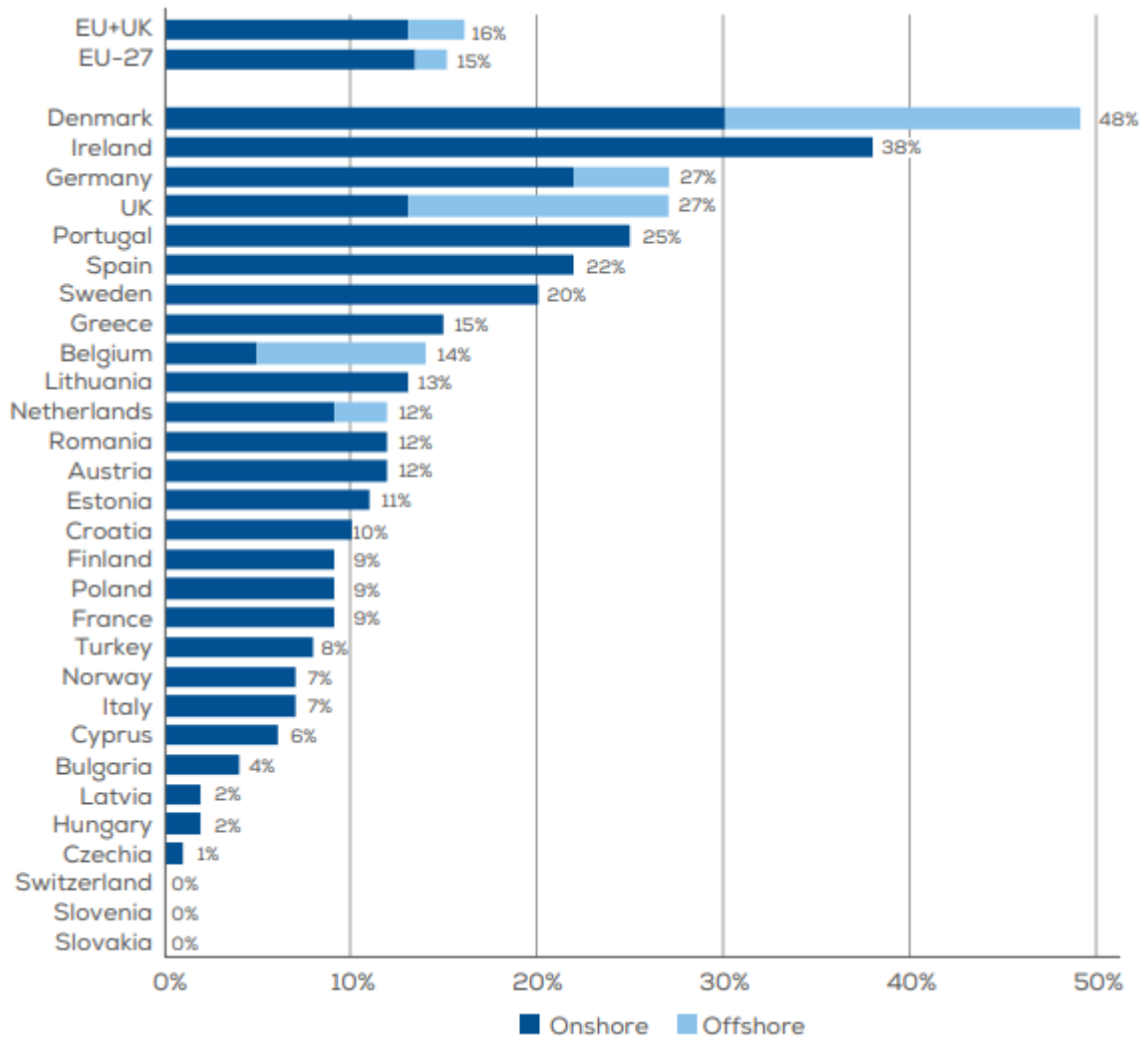


Figura 2.1: Porcentagem da demanda média anual de eletricidade coberta pela energia eólica [22].

Por mais que a energia eólica não supra totalmente nenhum país da União Europeia, a sua importância é destacada quando vemos o quanto é importante para cada país. Como é o exemplo de Portugal, que possui um quarto de sua demanda média anual de eletricidade coberta pela eólica. Em um “olhar para o futuro”, o relatório prevê um aumento em novas instalações para os próximos anos e na capacidade acumulada, como mostra a Figura 2.2.

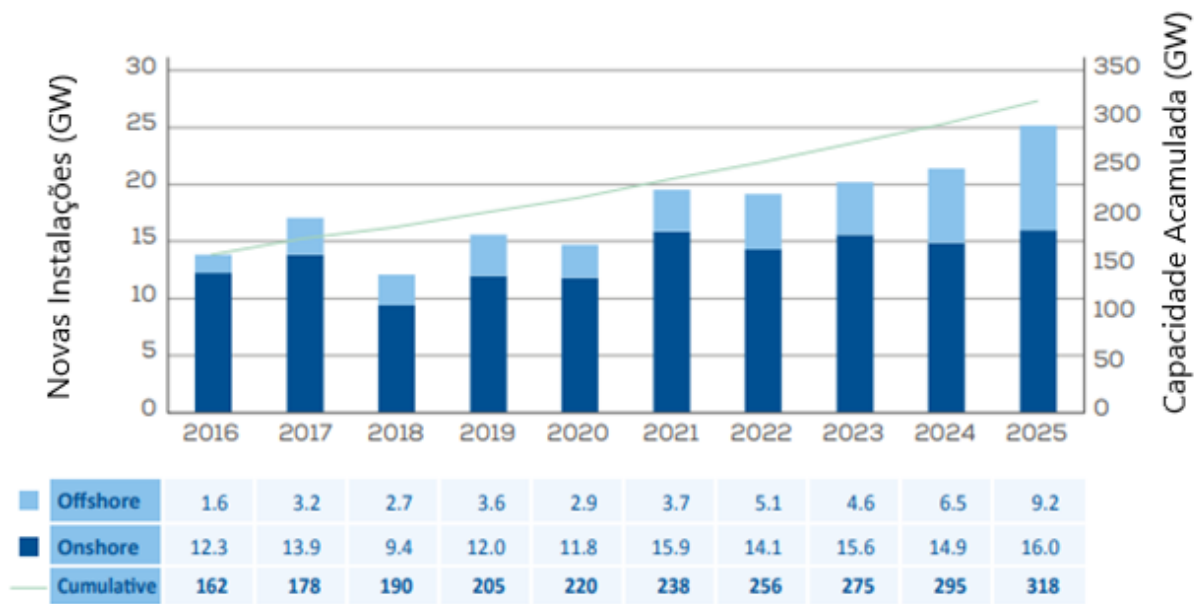


Figura 2.2: Novas e o total (acumulativo) de instalações na Europa – Cenário de expectativas realistas da WindEurope [22].

Quando olhamos diretamente para Portugal, de acordo com a Direção-Geral de Energia e Geologia, em 2019 a geração por eólica foi responsável por 47,4% do total de GW produzidos pelas renováveis, a segunda em número é a produção por energia hídrica, juntos são responsáveis por 79,62% de toda a produção, como podemos ver na Figura 2.3.

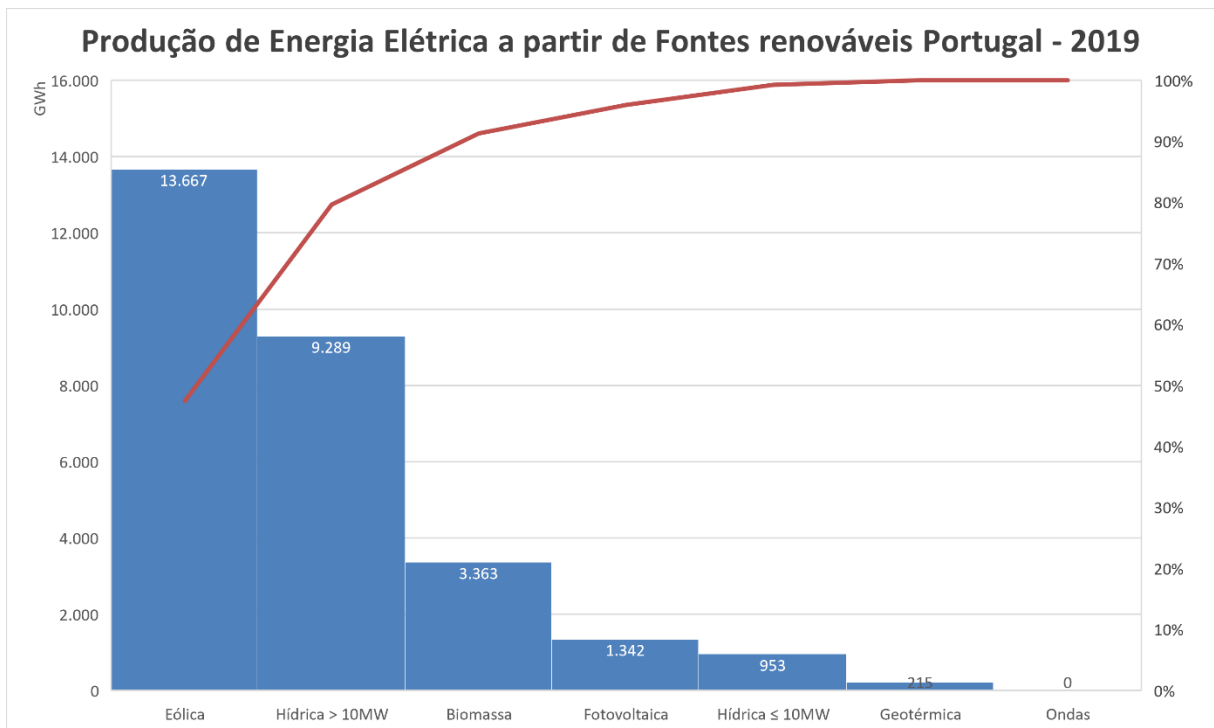


Figura 2.3: Pareto da produção de energia elétrica a partir de fontes renováveis. Dados: [23].

A importância da geração de energia por fontes renováveis (FER) tende a aumentar ainda mais para os próximos anos, como visto em mais um estudo, esse de 2019: “Impacto da energia renovável”, desenvolvido pela Deloitte em colaboração com a APREN – Associação Portuguesa de Energias Renováveis. A estimativa é que a produção de eletricidade em Portugal por fontes renováveis em 2030 seja o dobro da de 2018, com o aumento da geração por eólica e solar assumindo papéis de protagonistas, como mostra a Figura 2.4.

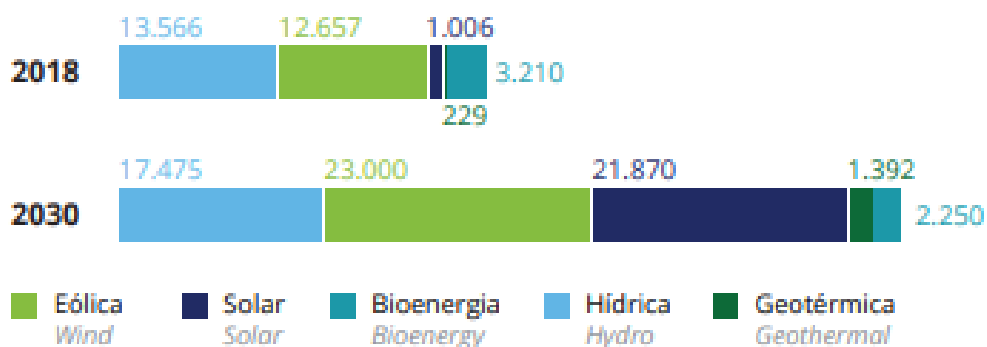


Figura 2.4: Evolução da produção de eletricidade em Portugal por FER (GWh) [24].

## 2.2 FUNCIONAMENTO DE UM AEROGERADOR

O princípio do funcionamento de um aerogerador, ou turbina eólica, é um sistema de conversão de energia que aproveita o vento como fonte para a produção de eletricidade. É no

rotor da turbina que se converte a potência do vento em potência mecânica, à medida que o rotor recebe velocidade do vento ele aproveita a energia cinética que vem com a massa de ar, essa energia cinética é depois convertida em energia elétrica com o gerador [25]. Os aerogeradores são compostos por pás que giram com a força do vento, fazendo girar o eixo principal que é ligado a caixa de velocidades, essa entrega ao gerador um eixo trabalhando em rotação suficiente para a geração de energia elétrica, visível na Figura 2.5.

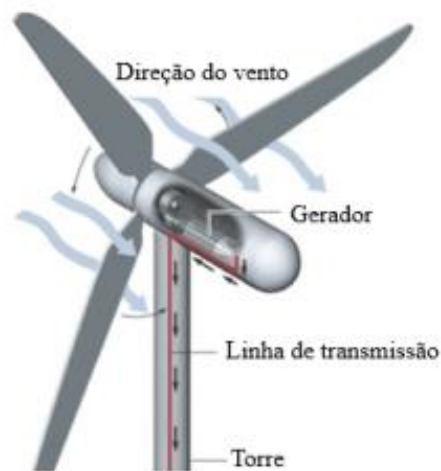


Figura 2.5: Funcionamento de um aerogerador esquema geral [25].

A Figura 2.5 é referente a um aerogerador de eixo horizontal, no qual será analisado o veio lento como será descrito mais adiante neste trabalho, apenas para registro, a Figura 2.6 mostra o outro modelo de aerogerador, este de eixo vertical.



Figura 2.6: Aerogerador de eixo vertical [26].

Sobre as características operacionais de um aerogerador, para que ocorra a conversão e conseqüente produção de energia, o vento tem que perder velocidade ao passar pelas pás e seguir o seu caminho em uma velocidade menor, a velocidade de saída não pode ser nula, pois se for não há movimentação das pás. Existe então um limite de energia que pode ser extraído do vento, nomeado como “limite de Betz”, que é o valor teórico máximo de rendimento da conversão de energia eólica em energia mecânica, sendo o seu valor de 59,26% [27].

É importante também salientar que a partir de determinada velocidade do vento a potência gerada passa a ser constante, com o aerogerador operando até a sua velocidade máxima operacional. A partir desse valor não há mais geração de energia para evitar a sobrecarga no aerogerador ou sobrevelocidades muito grandes que podem significar sobretensões [28]. A relação “potência x velocidade de vento” pode ser vista na Figura 2.7.

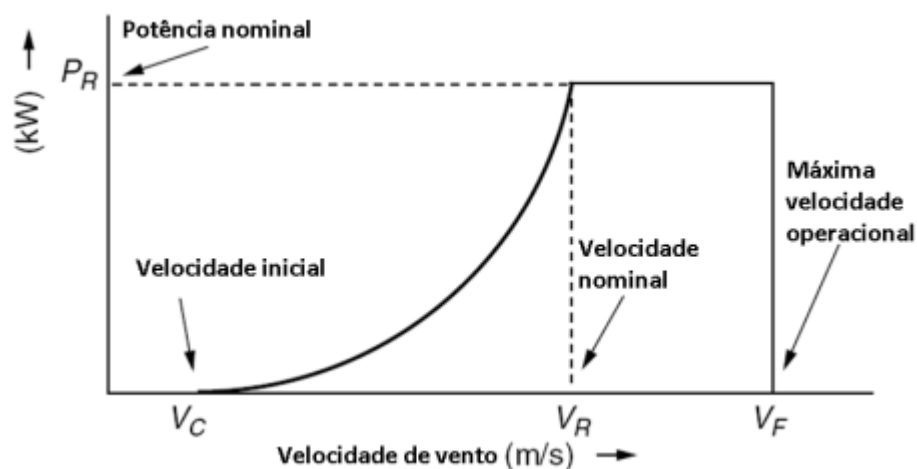


Figura 2.7: Característica operacional padrão de um aerogerador, relação potência x velocidade do vento [28].

Como exemplo prático, a Figura 2.8 representa a curva de potência para o modelo NORDEX - N90 - R80 de 2.500 kW, instalado pela Iberwind no parque eólico de Bornes, localizado em Macedo de Cavaleiros, detido pela empresa Parque Eólico da Serra de Bornes, S.A.

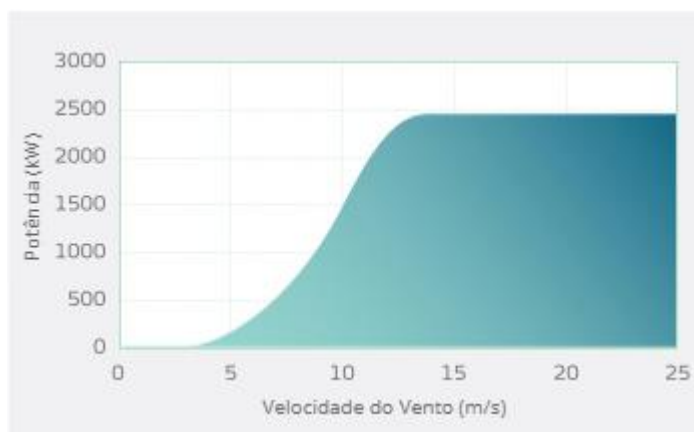


Figura 2.8: Curva de potência modelo N90 – R80 [29].

Percebesse que a curva de potência do modelo N90-R80 segue a característica operacional padrão mostrada na Figura 2.7, atingindo a potência nominal para uma velocidade do vento um pouco inferior a 15 m/s. A velocidade de rotação da turbina para esse caso varia de 9,6 a 16,9 rotações por minuto (rpm).

### 2.2.1 Principais componentes de um aerogerador

O mecanismo de funcionamento de um aerogerador necessita de vários componentes para o seu bom funcionamento, como dito nos objetivos, o componente que vai ser dado mais atenção neste trabalho é o veio do aerogerador, especificamente o veio de alta velocidade. A seguir, na Figura 2.9, podemos ver os principais componentes e, em seguida, uma explicação breve sobre a função de cada de acordo com a norma ANSI/AGMA/AWEA 6006-A03 *Standard for Design and Specifications of Gearboxes of Wind Turbines* junto de seus nomes em inglês.

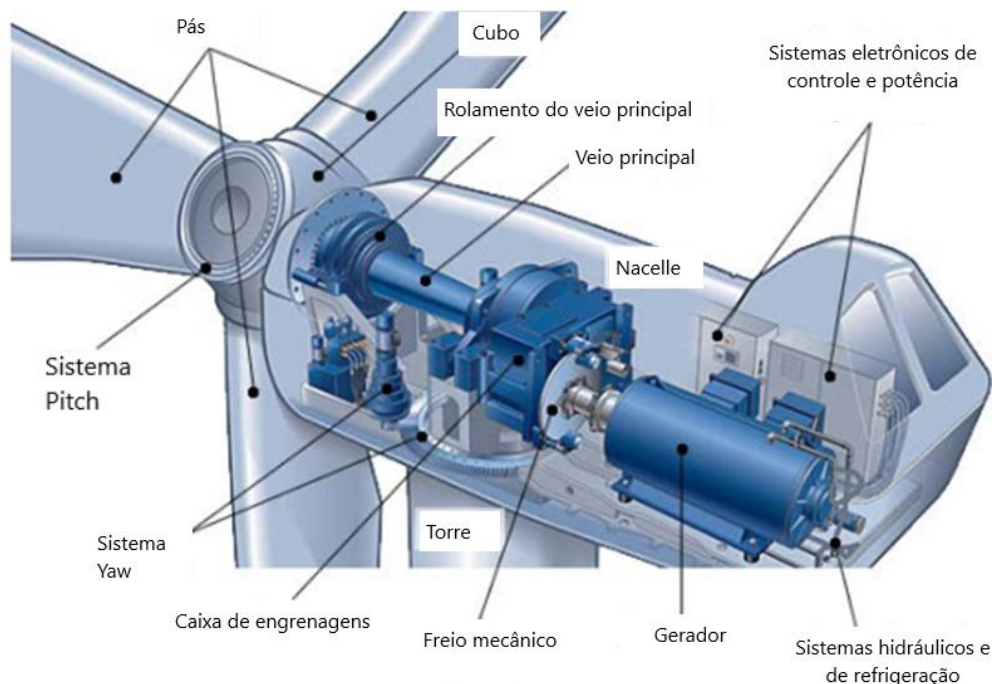


Figura 2.9: Principais componentes de um aerogerador [4].

*Blades* (Pás): Componente do rotor que converte energia eólica em rotação do veio do rotor;

*Pitch System* (Sistema Pitch): Controla a posição angular das pás em relação ao rotor, limita o torque do veio do rotor ajustando a inclinação;

*Hub* (Cubo): Estrutura que anexa as pás com o veio do rotor;

*Nacelle* (Nacelle): Estrutura que contém a caixa de velocidades, gerador e outros componentes localizados no topo do aerogerador;

*Yaw system* (Sistema Yaw): Rotaciona a Nacelle em relação ao veio axial da torre;

*Main shaft bearings* (Rolamento do veio principal): Rolamento que suporta o veio principal;

*Main shaft* (*Low Speed Shaft*, veio principal ou veio lento): Veio que suporta o rotor e transmite o seu torque para a caixa de engrenagens, também chamado “veio de baixa velocidade”;

*Gearbox* (Caixa de engrenagens ou Caixa de velocidades): Conjunto de componentes composto por engrenagens, veios, rolamentos, carcaça, vedações, sistema de lubrificação e outros. Tem como função aumentar a rotação recebida pelo veio lento para o veio rápido (eixo de alta velocidade), que encontra o gerador;

*High Speed Shaft* (Veio rápido ou veio de alta velocidade): Veio que transmite o torque vindo da caixa de engrenagens para o gerador. Pode ser visto na Figura 2.10;

*Mechanical brake* (Freio mecânico): Freio responsável para impedir que grandes velocidades danifiquem o sistema, em especial o gerador;

*Generator* (Gerador): Recebe o torque do veio de alta velocidade para gerar energia;

*Control and power electronics systems* (Sistemas eletrônicos de controle e potência): Conjunto de sensores e sistemas de controle que monitoram o aerogerador e o ambiente externo, ajustando a turbina para que continue operando dentro dos seus limites;

*Hydrolic and cooling systems* (Sistema hidráulico e de refrigeração): Sistema responsável pela refrigeração dos componentes.

*Tower* (Torre): Estrutura que suporta a nacelle e todo o sistema do aerogerador de veio horizontal.

### 2.2.2 Sistema de transmissão de um aerogerador

O sistema de transmissão consiste em um órgão mecânico que conecta o rotor da turbina ao rotor do gerador, para sistemas eólicos a caixa de velocidades é a tecnologia dominante nesse segmento. O sistema tem desvantagens que envolve principalmente perda de energia mecânica (na ordem dos 3,75% da energia total produzida), devido a vibrações, atritos e aquecimentos, que implicam a necessidade de fluídos lubrificantes e refrigerar o interior da nacelle [30].

Esse sistema, é constituído do veio de baixa velocidade, o veio de alta velocidade e a caixa de velocidades. A caixa de engrenagens é usada para geradores com um número pequeno de pólos, para um gerador síncrono com grande número de pólos (mais de 50) não há o multiplicador de velocidades. Além dos elementos citados, ainda tem no veio um freio mecânico, como elemento de proteção contra eventual excesso de velocidade. A velocidade angular dos rotores de aerogeradores varia na faixa de 20 a 150 rpm, para os geradores de indução de quatro pólos, que fornecem uma tensão de frequência de 60 Hertz (Hz) à rede, a velocidade é próxima a 1800 rpm. [31]

É possível ver o sistema de transmissão, de maneira simplificada, na Figura 2.10:

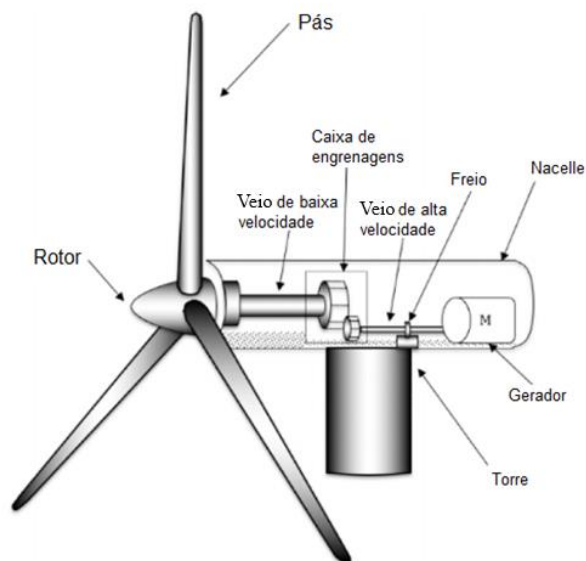


Figura 2.10: Elementos de um aerogerador de forma simplificada [5].

O veio de baixa velocidade gera torque conforme a sua velocidade angular, essa que depende da velocidade do vento absorvida pelas pás, então o sistema de engrenagens dentro da caixa de velocidades multiplica a rotação para que seja possível a geração de energia. Na Figura 2.11 tem-se um esquema simples ilustrando o funcionamento, aonde a caixa de velocidades recebe os valores de torque e velocidade angular transmitidos pelo veio lento,  $T_t$  e  $W_t$  respectivamente, e os novos valores de torque e velocidade angular,  $T_m$  e  $W_m$ , são transmitidos ao gerador pelo veio rápido.

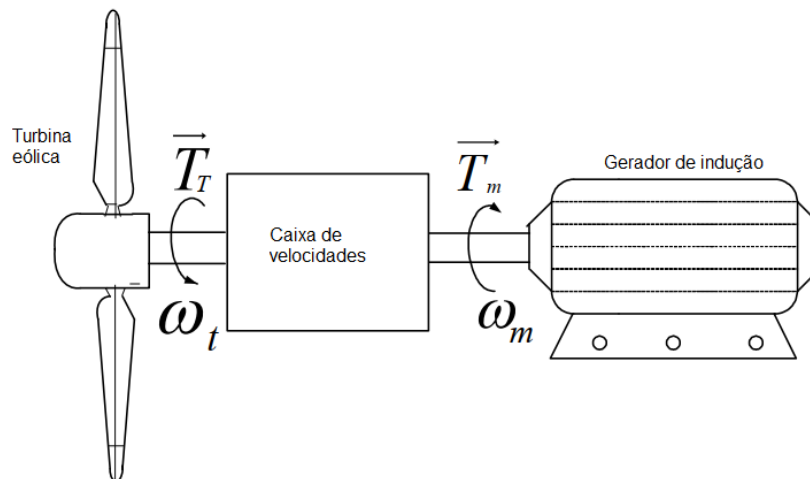


Figura 2.11: Acoplamento entre turbina e gerador eólico por meio da transmissão mecânica [31].

Os veios, que são os elementos em foco para esse trabalho, serão abordados no próximo tópico.

### 2.3 ELEMENTO MECÂNICO VEIO

De acordo com [32], a definição de veio é um membro rotativo, usualmente de seção transversal circular, usada para transmitir potência ou movimento. Ele provê o eixo de rotação, ou oscilação, de elementos tais como engrenagens, polias, volantes, manivelas, rodas dentadas, rotores, turbinas e similares, e controla a geometria dos seus movimentos. Ainda em Shigley, é chamado a atenção que por mais que o veio não requiera nenhum tratamento especial além dos métodos básicos para projetos de outros elementos mecânicos, é importante dar a ele e seu projeto uma atenção especial, por estar presente em diversas aplicações de projetos de máquinas.

Norton em [33] deixa claro a importância do elemento quando afirma que um veio de transmissão, ou apenas veios, são usados em praticamente todas as peças de máquinas rotativas para transmitir movimento rotativo e torque.

Para o projeto de dimensionar um veio, é preciso entender que há muita interdependência do projeto com outros componentes. A própria máquina ou sistema ditará que alguns elementos terão sido parcialmente analisados, com tamanhos e espaçamentos tentativamente determinados [32]. Ao dimensionar o veio, a análise de tensão é feita em um ponto específico que ocorre a concentração de tensões, ponto discutido no tópico 2.5 deste trabalho.

Em relação ao material do veio, é importante dizer que a deflexão não é afetada pela resistência, mas sim pela rigidez representada pelo módulo de elasticidade, que é essencialmente constante para todos os aços. Logo, a rigidez pode ser controlada somente por decisões geométricas. A resistência necessária para as tensões de carregamento afeta a escolha de materiais e seus tratamentos, muitos veios são feitos de aço de baixo carbono, estirado a frio ou laminado a quente, tais como os aços ANSI 1020-1050 [32]. As duas principais cargas sofridas pelos veios, que são torção devido a transmissão do torque e flexão pelos carregamentos transversais de outros elementos fixados, serão melhor abordadas no tópico 2.3.1.

### **2.3.1 Cargas sofridas por um veio de transmissão de um aerogerador**

As cargas e tensões em todo o aerogerador são muito afetados pela configuração e a estratégia de controle, é responsabilidade do fabricante da turbina incluir os efeitos de cada função de controle e estados operacionais, que podem ser únicos para a configuração do aerogerador. Alguns dos pontos que influenciam são: número de lâminas, método de regular o pico de potência, orientação do rotor contra ou a favor do vento, método de controle do sistema Yaw (passivo ou ativo), método de frenagem mecânica e aerodinâmica, peso dos componentes rotativos e estacionários, configuração de componentes integrados (como o gerador e suporte do rotor), resposta do sistema para condições de falha (por exemplo uma variação do controle de velocidade) [6].

Ainda segundo a norma ANSI AGMA 6006-A03, além dos pontos citados anteriormente, o projetista ainda deve considerar condições operacionais para preparar o espectro de carga da turbina. Flutuações de carga podem resultar de algumas condições, como por exemplo: turbulência causadas pelo súbito aumento ou diminuição da velocidade do vento, cargas provenientes do balanço de componentes, movimento do rotor, carregamento instável, transporte, montagem etc.

Para caixas de velocidades com freios no veio de alta velocidade (HSS), tem-se que o próprio veio, os dentes das engrenagens, rolamentos e outros componentes estão sujeitos a cargas transitórias muito altas durante a frenagem, que excedem significativamente as cargas operacionais do projeto. Os carregamentos para o veio de baixa velocidade incluem a carga lateral e momentos de flexão resultantes de itens como o peso do rotor, a girada do sistema Yaw, aerodinâmica instável, cisalhamento do veio e empuxo do rotor [6].

A Figura 2.12 traz a variação de torque no veio do rotor para um aerogerador com média de mais de 8000 rotações. A 280 graus de rotação o veio experimenta um valor máximo que ocorre a cada revolução, aproximadamente na mesma posição angular. Da mesma forma há um valor mínimo que ocorre em cerca de 120 graus.

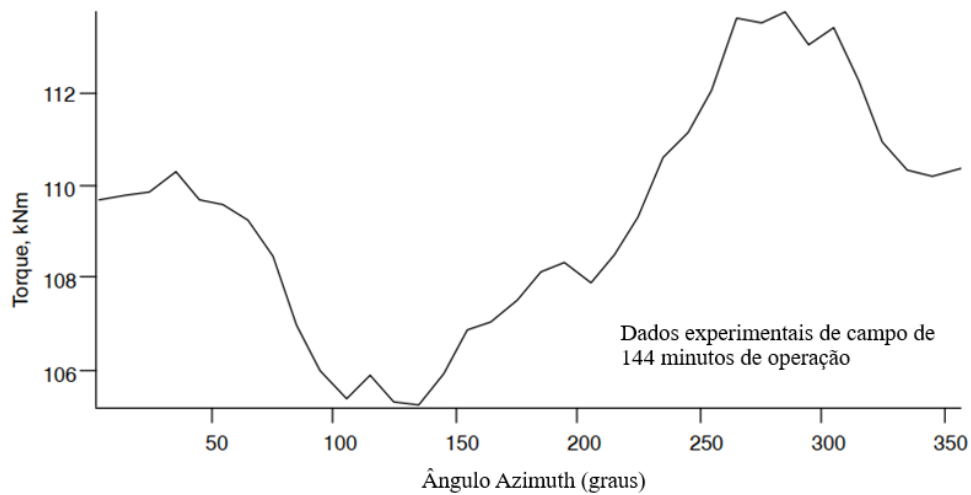


Figura 2.12: Variação típica de torque para o veio do rotor [6].

Para entender melhor essa variação no carregamento durante o funcionamento de um aerogerador, é usado a Figura 2.13. No ponto 1, o gerador está gerando energia. No ponto 2 as pontas das lâminas desdobram, levando o gerador para potência negativa. Entre os pontos 2 e 4, o freio mecânico está começando a funcionar, mas ainda não totalmente. No ponto 3 o torque sobe rapidamente conforme o freio engata e a velocidade de rotação diminui. No ponto 4, o veio de alta velocidade para totalmente. No ponto 5, há rápidas e repetidas reversões de torque enquanto vibrações transitórias diminuem.

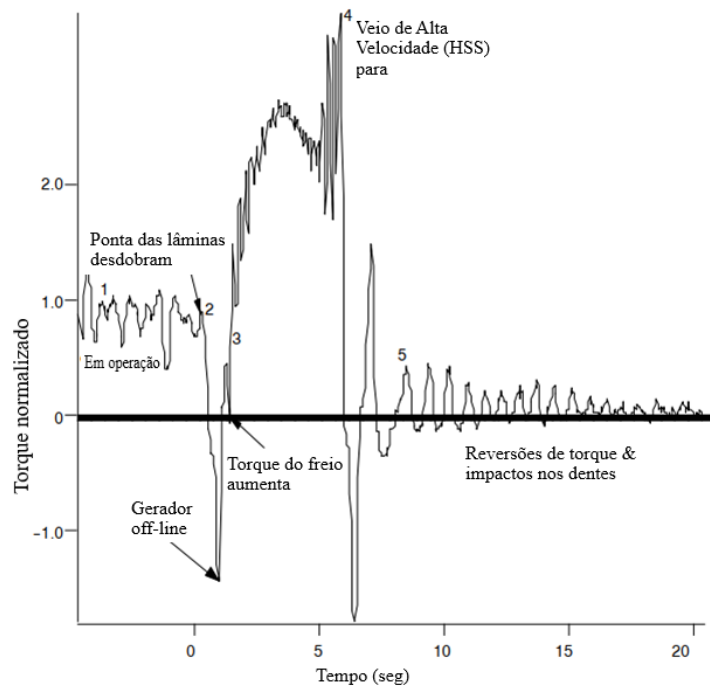


Figura 2.13: Torque no veio do rotor durante uma frenagem [6].

Os tópicos seguintes são relacionados ao cálculo da resistência à fadiga e fatores de segurança, como será visto, dos dados de entrada necessários para o cálculo temos as componentes do momento e de torque. Como dito pela norma ANSI AGMA 6006-A03, espera-se que esses valores sejam fornecidos pelo fabricante do aerogerador, portanto, o método de cálculo e obtenção não será abordado de maneira profunda neste trabalho.

## 2.4 RESISTÊNCIA À FADIGA

A maioria dos componentes mecânicos e estruturas operam sob cargas que variam com o tempo, essa variação tem efeito negativo na durabilidade dos materiais. Na literatura, temos características de fadiga para cargas de tração e compressão, flexão e torção e, às vezes, de cisalhamento. Esses são os estados básicos de tensão mais comumente encontrados em testes de fadiga, portanto, há uma crescente necessidade de modelar o comportamento do elemento, usando o mínimo de material possível para os testes [34].

Dimensionar algum elemento prevendo uma falha estática é mais simples do que quando há falha dinâmica. Normalmente a primeira é uma falha visível e que dá sinais prévios, pois ocorre quando a tensão ultrapassa o limite de escoamento do material, diferente do dimensionamento quando há fadiga, em que pode ocorrer falha dinâmica. Essas são falhas

súbitas, começam por fraturas e fissuras pequenas e evoluem rapidamente, causando perda total da peça. Existem zonas críticas no elemento, como canais de chaveta, anéis de retenção e ressalto, nessas que há maior concentração de tensão [1].

Concentradores de tensão terão um tópico para si mais adiante no trabalho.

Há três estágios de desenvolvimento em uma falha por fadiga, o estágio 1 é o começo de uma ou mais microfaturas, causadas pela deformação plástica cíclica seguida de propagação cristalográfica que se estende a outros grãos, as fraturas do primeiro estágio não são visíveis a olho nu. No estágio 2, a fratura progride de micro para macro fraturas. O estágio 3 ocorre no ciclo de tensão final, quando o material remanescente não consegue suportar as cargas, resultando em uma fratura rápida e repentina. Uma falha nesse estágio pode ser frágil, dúctil ou uma combinação de ambas [32].

Na maioria das peças, o dano começa na superfície do material, logo, o estado desta superfície exerce uma grande influência sobre o limite de resistência à fadiga ou no período útil de trabalho da peça, quando sujeita a fadiga. Por conta disso, se nota uma importância no acabamento superficial do material [35].

#### 2.4.1 Cálculo do Limite de resistência à fadiga

As equações mostradas nesta seção e nas seguintes encontram-se no trabalho de Budynas e Nisbett [36] e podem ser conferidas em Juvinall e Marshek [37]. A linha de cálculo é a mesma utilizada por Carvalho Neto [17].

O limite de resistência à fadiga (também chamado de à endurança, limite à fadiga ou limite de resistência, a depender do autor) é o valor numérico abaixo do qual não haverá falha por fadiga para aquele elemento mecânico. Pode ser calculado matematicamente pelo uso de fórmulas e dados obtidos de maneira experimental [17].

Obter a resistência à fadiga teórica,  $S'_e$ , para aços é possível pela seguinte relação, obtida experimentalmente [38]:

$$\begin{aligned} S'_e &= 0,50 S_{ut}, & \text{para } S_{ut} \leq 1400 \text{ MPa} \\ S'_e &= 700 \text{ MPa}, & \text{para } S_{ut} > 1400 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (2.1)$$

onde  $S_{ut}$  é a resistência última do material em mega Pascal (MPa).

Na prática, esse limite é afetado por outras variáveis e precisa ser corrigido [39]. Para isso, temos fatores de correção [32], sendo eles:

$k_a$  = fator para condição de superfície

$k_b$  = fator de tamanho

$k_c$  = fator de carga

$k_d$  = fator de temperatura

$k_e$  = fator de confiabilidade

$k_f$  = fator de efeitos diversos

Então, o limite de resistência à fadiga é escrito como:

$$S_e = k_a * k_b * k_c * k_d * k_e * k_f * S'_e \quad (2.2)$$

O fator de correção para condição de superfície é dado pela seguinte equação:

$$k_a = a * S_{ut}^b \quad (2.3)$$

Sendo que os valores para  $a$  e  $b$  para um veio são obtidos pela Tabela 2.1. Esses valores dependem do processo de fabricação que o elemento será submetido.

Tabela 2.1 - Parâmetros para o fator de superfície [32].

Acabamento superficial	Fator $a$	Expoente $b$
Retificado	1,58	-0,085
Usinado ou Laminado a frio	4,51	-0,265
Laminado a quente	57,7	-0,718
Forjado	272	-0,995

Em relação a dureza dada por cada tipo de acabamento, segue a Figura 2.14, que mostra que a menor dureza é fornecida quando o material é forjado, a maior, dentre as opções deste programa, é quando ele recebe polimento retificado.

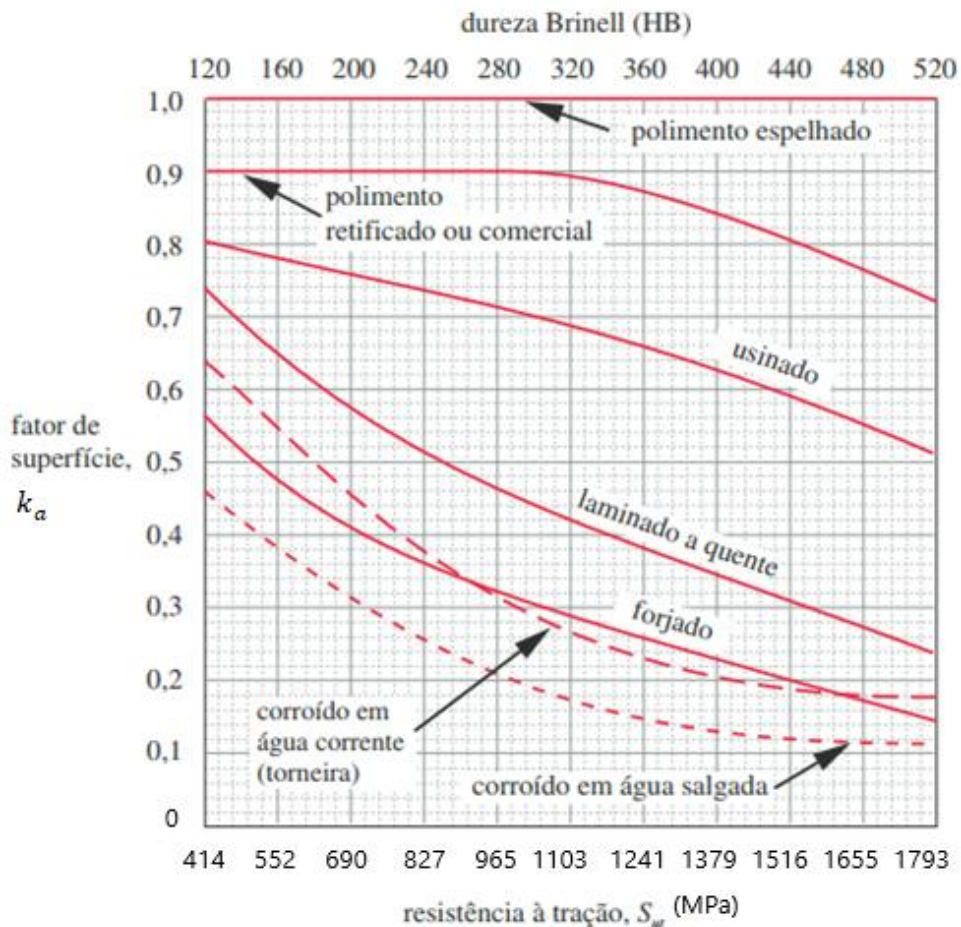


Figura 2.14: Fatores de superfície para diversos tipos de acabamento superficial para aços [33].

O fator de tamanho  $k_b$  é dependente do diâmetro nominal do veio, para materiais dúcteis pode ser calculado usando a seguinte equação (2.4),  $d$  é o diâmetro nominal da seção analisada do veio [32]. Em “Elementos de máquinas de Shigley” não se tem o valor de  $k_b$  para diâmetros maiores, portanto, usaremos o valor dado por Norton em [33] para diâmetros maiores do que 254 mm.

$$\begin{aligned}
 k_b &= 1,24 * d^{-0,107} && \text{Para } 2,79 \leq d \leq 51 \text{ mm} \\
 k_b &= 1,51 * d^{-0,107} && \text{Para } 51 \leq d \leq 254 \text{ mm} \\
 k_b &= 0,6 && \text{Para } d > 254 \text{ mm}
 \end{aligned}
 \tag{2.4}$$

Para o fator de carga  $k_c$ , temos que ele pode assumir três valores, que dependem da carga a qual o veio está ou será submetido, como pode ser visto na Tabela 2.2

Tabela 2.2 - Valores para fator de carga [32].

Tipo de carga	$k_c$
Flexão pura ou Flexão e Torção	1

Carga Axial	0,85
Torção pura	0,59

Geralmente o fator de temperatura,  $k_d$ , é considerado 1, o que significa dizer que o veio trabalha a aproximadamente 20 °C, temperatura ambiente. Entretanto, Carvalho Neto [17] considerou os valores de Budynas e Nisbett [36] para quem se interessar em verificar a influência da temperatura na resistência do elemento, portanto, segue os valores de  $k_d$  para diferentes temperaturas.

Tabela 2.3 - Valores para fator de temperatura [32].

Temperatura, °C	$k_d$
20	1,000
50	1,010
100	1,020
150	1,025
200	1,020
250	1,000
300	0,975
350	0,943
400	0,900
450	0,843
500	0,768
550	0,672
600	0,549

Como a maior parte dos dados de resistência à fadiga são relacionados como valores médios, há possíveis desvios nos dados de entrada que são compensados pelo fator de confiabilidade,  $k_e$ . Como a maioria das equações fornecidas são obtidas usando médias de dados experimentais, a confiabilidade geralmente é de 50% [32]. Segue tabela com alguns valores para algumas confiabilidades-padrão especificadas.

Tabela 2.4 - Valores para fator de confiabilidade [32].

Confiabilidade, %	$k_e$
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	0,62

---

O fator de efeitos diversos,  $k_f$ , por mais que tenha como objetivo levar em conta a redução do limite de fadiga em razão de outros efeitos, é tido mais como um lembrete de que eles devem ser levados em consideração, porque os valores reais do fator não estão sempre disponíveis.  $k_f$  então é considerado como 1 na maioria dos casos e também neste trabalho.

A corrosão também age sobre o valor da resistência à fadiga do material, porém como a corrosão e o tensionamento ocorrem ao mesmo tempo, não é simples encontrar o limite de resistência do elemento que esteja corroído. Sabe-se que, com o tempo, qualquer peça vai falhar quando sujeita a um ambiente corrosivo e a um tensionamento repetido. Fica ao projetista ou engenheiro minimizar os fatores que afetam a vida de fadiga [32].

Além dos fatores apresentados, é importante levar em consideração zonas de mudança brusca de geometria do veio, pois ali há a concentração de tensão. São esses pontos chamados de concentradores de tensão e serão abordados a seguir.

## 2.5 CONCENTRADORES DE TENSÃO

No desenvolvimento de equações básicas de resistência dos materiais, seja para tensão, compressão, flexão ou torção, é assumido uma superfície sem irregularidades para o elemento a ser considerado. Porém para elementos mecânicos, principalmente veios, é difícil uma aplicação que não exija mudanças ao longo de sua geometria e seção transversal. Veios de transmissão precisam ter ressaltos que sirvam de apoio para mancais, canais de chaveta para polias e engrenagens, ou ainda canais para anéis de retenção (ou elásticos) [40].

Isso causa uma concentração de tensão e a necessidade de novas equações. Como pode ser visto na Figura 2.15.

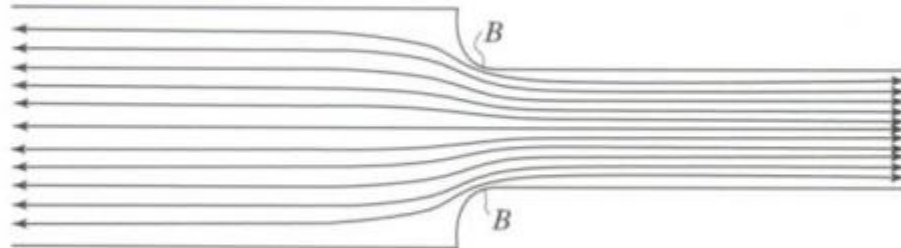


Figura 2.15: Concentração de tensão causada por mudança abrupta da seção transversal [40].

A tensão máxima ocorre próximo no ponto B, ali há uma concentração de tensões e é necessário equações específicas para esse tipo de região [40].

As tensões máximas então são dadas por:

$$\sigma_{máx} = K_t * \sigma_0 \quad (2.5)$$

$$\tau_{máx} = K_{ts} * \tau_0 \quad (2.6)$$

Sendo  $\sigma_0$  a tensão nominal normal e  $\tau_0$  a tensão nominal de cisalhamento. Os fatores de concentração de tensão,  $K_t$  e  $K_{ts}$ , são relacionados ao cálculo, respectivamente, da tensão normal máxima e da tensão de cisalhamento máxima no local da irregularidade. Para materiais que não são totalmente sensíveis à presença de entalhes temos os fatores  $K_f$  e  $K_{fs}$  [32].

### 2.5.1 Fatores de concentração de tensão para fadiga

Falaremos sobre  $K_f$  e  $K_{fs}$ , após entender como são obtidos  $K_t$  e  $K_{ts}$ . Para obtê-los, fazemos o uso de gráficos que correlacionam as características geométricas do elemento e relação entre diâmetros antes e após a irregularidade [32]. Os gráficos de obtenção para veios de seção transversal circular são mostrados da Figura 2.16 à Figura 2.21.

Começamos com a Figura 2.16 e com a Figura 2.17, que trazem os fatores para quando há um arredondamento no ressalto e o elemento está sofrendo de torção e flexão, respectivamente.

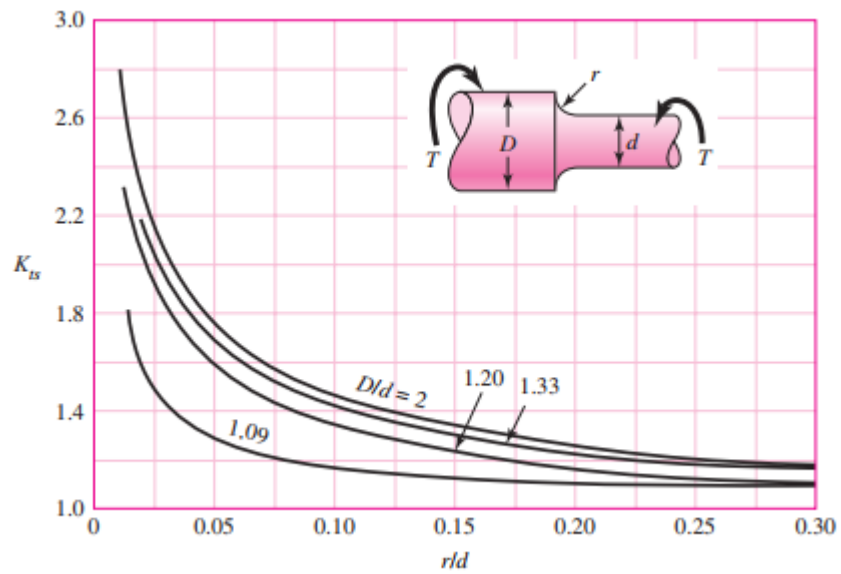


Figura 2.16: Veio cilíndrico maciço com raio de arredondamento no ressalto sob torção [36].

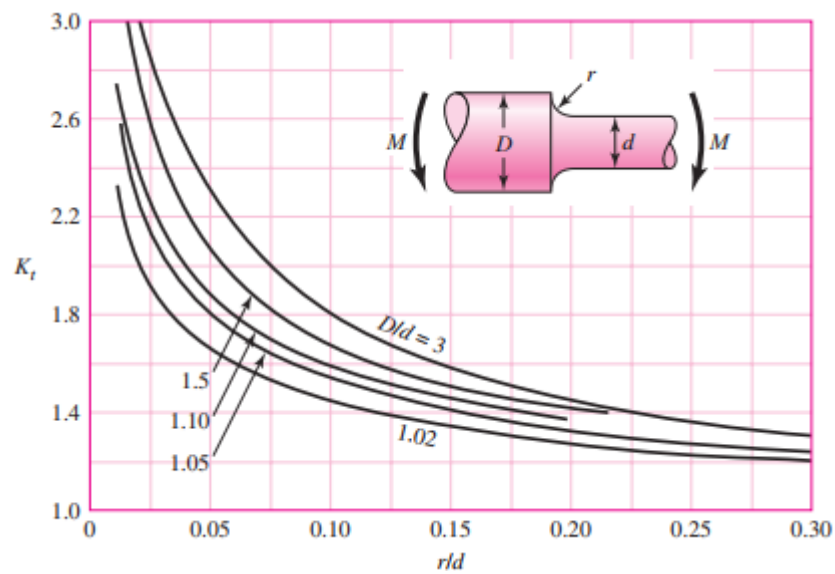


Figura 2.17: Veio cilíndrico maciço com raio de arredondamento no ressalto sob flexão [36].

Agora a Figura 2.18 e a Figura 2.19 trazem uma situação de sulco no ressalto para alívio de tensões, situação bastante útil para quando um mancal não permite um raio de arredondamento maior, que seria necessário para evitar a falha por fadiga [17].

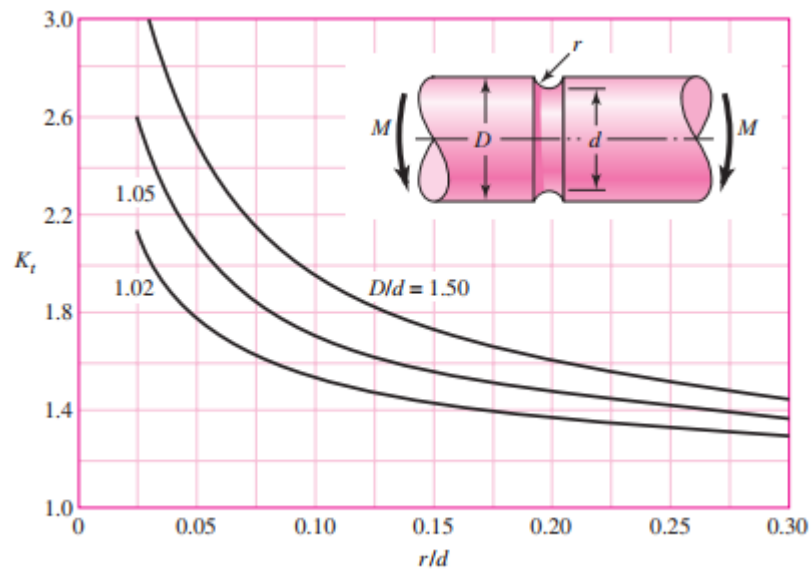


Figura 2.18: Veio cilíndrico maciço com sulco no ressalto sob flexão [36].

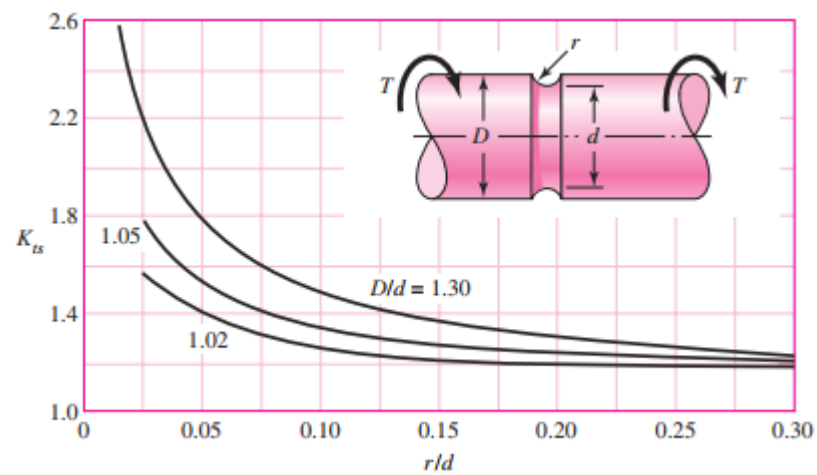


Figura 2.19: Veio cilíndrico maciço com sulco no ressalto sob torção [36].

Por último, a Figura 2.20 e a Figura 2.21 são referentes a um veio que possui canal de fundo plano, como aqueles feitos para anéis de retenção ou elásticos.

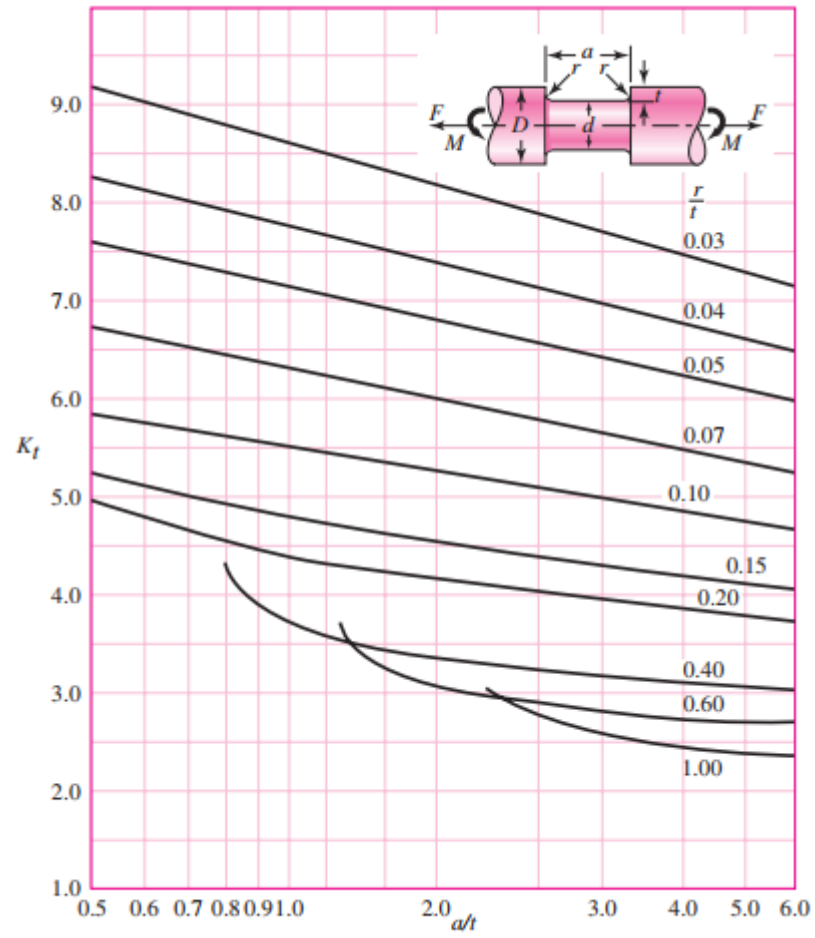


Figura 2.20: Veio cilíndrico maciço com canal de fundo plano sob flexão [36].

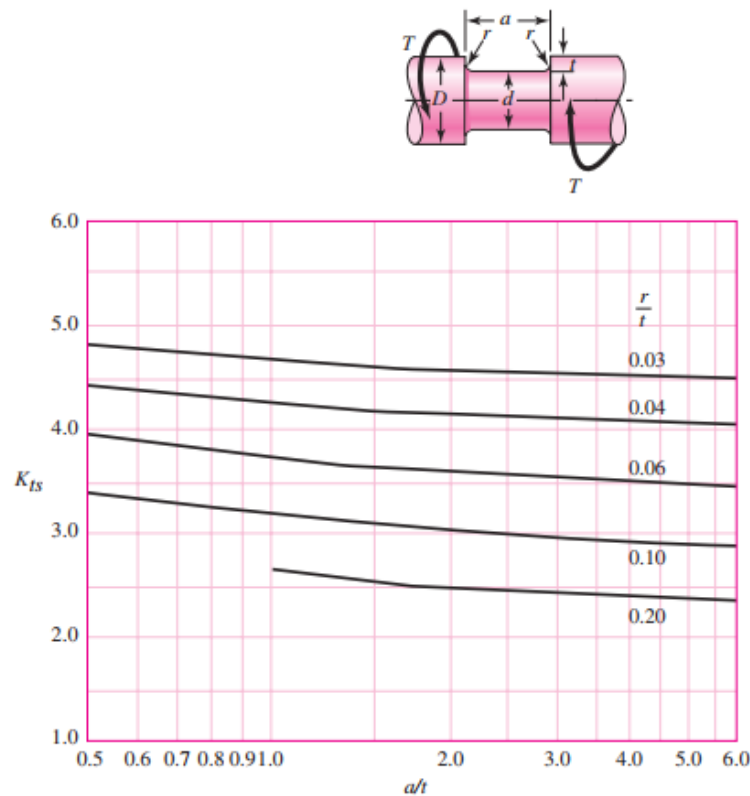


Figura 2.21: Veio cilíndrico maciço com canal de fundo plano sob torção [36].

Como estimativa inicial, caso as dimensões da geometria sejam desconhecidas, sugere-se usar os dados da Tabela 2.5. A literatura deixa claro que são para serem usados apenas quando as dimensões reais ainda não foram determinadas [32].

Tabela 2.5 - Valores para fator de confiabilidade [32].

	Flexão, $K_t$	Torção, $K_{ts}$
Arredondamento pontudo ( $\frac{r}{d} = 0,02$ )	2,7	2,2
Arredondamento bem arredondado ( $\frac{r}{d} = 0,1$ )	1,7	1,5
Assento de chaveta de extremidade fresada ( $\frac{r}{d} = 0,02$ )	2,14	3
Assento de chaveta formato corredor de trenó	1,7	-
Sulco de anel retentor	5	3

Os valores definidos para  $K_t$  e  $K_{ts}$  são usados junto da tensão nominal para obter a tensão máxima resultante por irregularidade ou defeito. Como alguns materiais não são totalmente sensíveis à presença de entalhes, tem-se um valor reduzido de  $K_t$  e  $K_{ts}$ , que são respectivamente,  $K_f$  e  $K_{fs}$ . São eles os fatores de concentração de tensão de fadiga, por isso o subscrito  $f$ . Podem ser obtidos pelas equações (2.7) e (2.8) [32].

$$K_f = 1 + q(K_t - 1) \quad (2.7)$$

$$K_{fs} = 1 + q_s(K_{ts} - 1) \quad (2.8)$$

Os fatores  $q$  e  $q_s$  são, respectivamente, sensibilidade de entalhe por flexão e por torção. Seus valores variam de zero a um, caso sejam nulos isso significa que o elemento não é sensível ao entalhe. Analisando para o valor de  $q$ , se ele for zero isso resulta em  $K_f$  sendo igual a um, o que significa dizer que o material não tem sensibilidade nenhuma a entalhes. Já caso seja igual a um, isso resulta em  $K_f = K_t$ , o que nos diz que o material tem sensibilidade total ao entalhe. Para aços e liga de alumínio, os valores são obtidos seguindo os gráficos na Figura 2.22 e na Figura 2.23 [32].

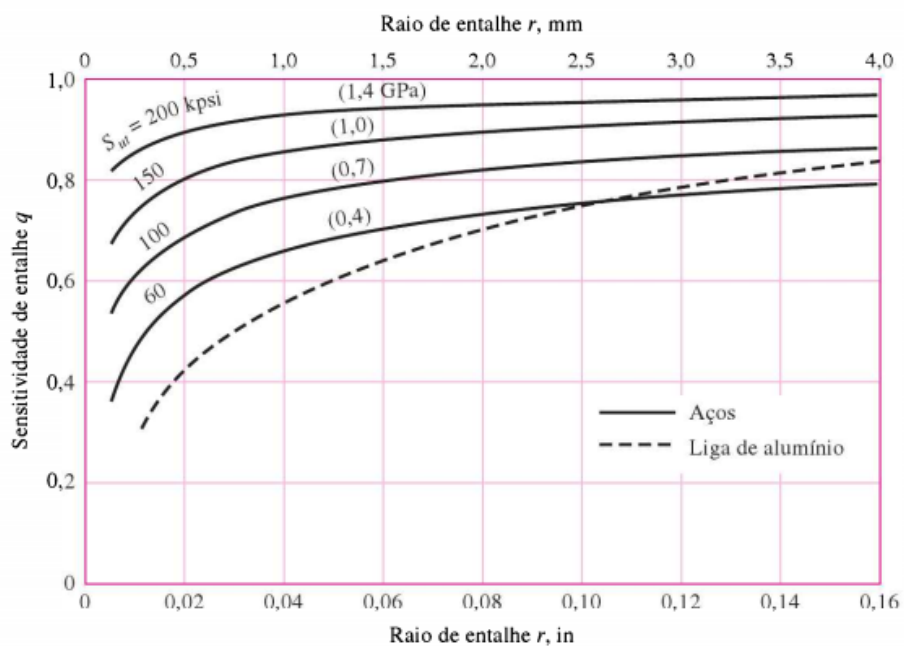


Figura 2.22: Valores do fator de sensibilidade de entalhe por flexão,  $q$  [32].

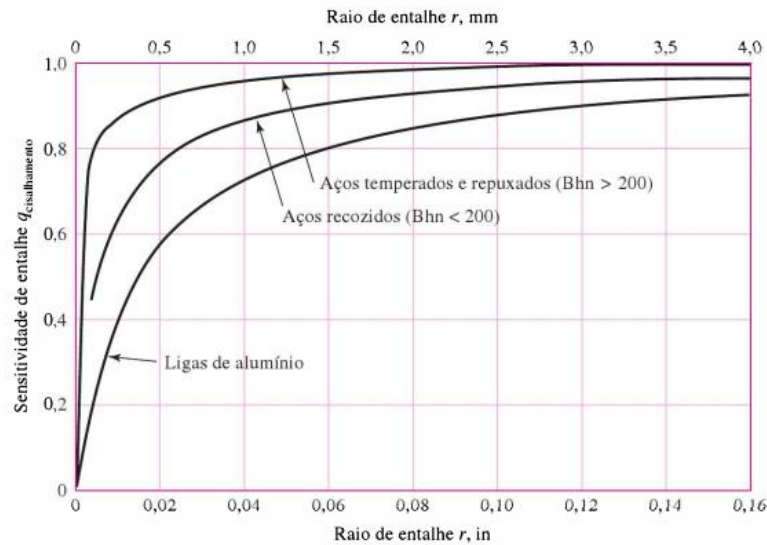


Figura 2.23: Valores do fator de sensibilidade de entalhe por torção,  $q_s$  [32].

Além de poder obter  $q$  e  $q_s$  pelos gráficos anteriores, eles podem ser obtidos pelas equações (2.9) e (2.10). As equações são válidas para  $S_{ut}$  em kpsi e o raio  $r$  em polegadas, é necessário então uma conversão de unidades para o Sistema Internacional (SI) antes de usá-las [17].

$$q = \frac{1}{1 + \frac{1}{\sqrt{r}} * (0,190 - 2,51 * 10^{-3} * S_{ut} + 1,51 * 10^{-5} * S_{ut}^2 - 2,67 * 10^{-8} * S_{ut}^3)} \quad (2.9)$$

$$q_s = \frac{1}{1 + \frac{1}{\sqrt{r}} * (0,190 - 2,51 * 10^{-3} * S_{ut} + 1,35 * 10^{-5} * S_{ut}^2 - 2,67 * 10^{-8} * S_{ut}^3)} \quad (2.10)$$

Para entender mais afundo o fenômeno da fadiga, o próximo tópico é referente a tensões flutuantes.

## 2.6 TENSÕES FLUTUANTES

Tensões flutuantes em máquinas frequentemente tomam a forma de um padrão senoidal, devido à natureza de algumas máquinas rotativas. Como um veio gira, as tensões tendem a seguir esse padrão senoidal, um padrão cíclico. Sabendo que existem padrões periódicos em um valor máximo e um mínimo de força, a forma da onda deixa de ser importante, o que se torna o foco são os picos em ambos os lados. Com esses valores se decompõe a tensão flutuante e é encontrado

duas componentes: uma média, ou constante, e uma alternada, que oscila, produzindo um padrão repetitivo [17], [32].

As duas componentes são calculadas da seguinte forma, respectivamente:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} + \sigma_{m\acute{i}n}}{2} \quad (2.11)$$

$$\sigma_a = \left| \frac{\sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n}}{2} \right| \quad (2.12)$$

Sendo  $\sigma_{m\acute{a}x}$  o valor de tensão máxima e  $\sigma_{m\acute{i}n}$  o valor mínimo.

O comportamento gráfico de uma tensão flutuante com ondulação de alta frequência é mostrado na Figura 2.24.

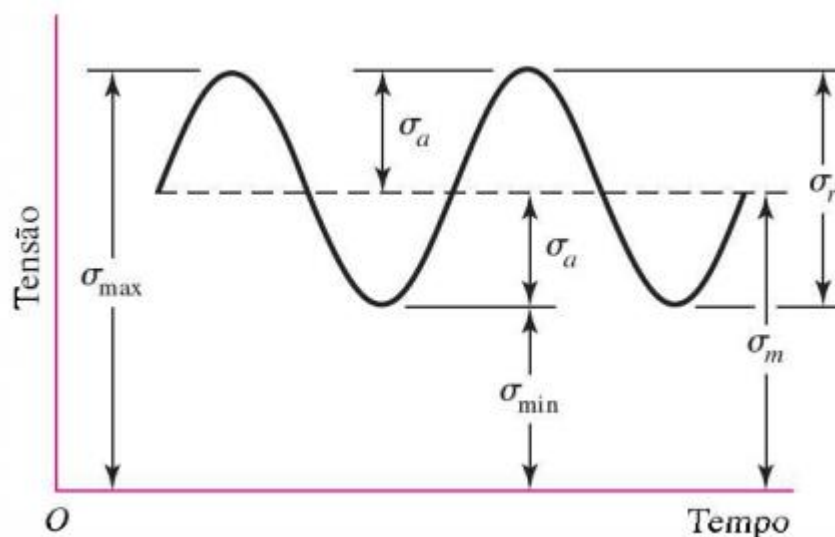


Figura 2.24: Comportamento de uma tensão flutuante com ondulação de alta frequência [32].

O conceito de separar uma tensão em duas componentes, a média e a alternada, não é somente válido para a tensão normal flutuante, mas também para tensão de cisalhamento, uma força ou um momento com a mesma característica. Um exemplo da dinâmica entre as componentes, é quando temos um veio estável, ou seja, em rotação constante. Este vai possuir apenas a componente alternada de flexão e somente a componente constante de torque, o que normalmente é desejado na grande maioria dos projetos de veios de transmissão [17].

A teoria relacionada a fadiga até então abordada, é com o objetivo de obter critérios de segurança para o projeto, que é o próximo tópico do trabalho.

## 2.7 CRITÉRIOS DE FALHA POR FADIGA PARA UM VEIO

Já definidos os componentes de tensão associados a um veio sujeito à tensão flutuante, sabendo que temos as zonas de concentração de tensão e a superfície externa do veio como região propensa à falha, é necessário um resultado numérico para poder analisar como o elemento está em relação a sua resistência à fadiga. Assim como em Carvalho Neto [17], neste trabalho também irá desconsiderar a pouca influência de cargas axiais, que podem surgir devido a fenômenos como a dilatação térmica, pois um veio já tem recomendações para que esses fenômenos sejam considerados. Em alguns casos, as forças axiais tem grande influência na análise da resistência à fadiga, como é o caso de uma furadeira, que tem a força axial como principal carga [17].

Combinando os conceitos utilizados nas seções 2.5 e 2.6, seguindo a linha de cálculo de Carvalho Neto (2020), temos as seguintes equações:

$$\sigma_a = \frac{K_f * M_a * c}{I} \quad \sigma_a = \frac{K_f * M_m * c}{I} \quad (2.13)$$

$$\tau_a = \frac{K_{fs} * T_a * r}{J} \quad \tau_a = \frac{K_{fs} * T_m * r}{J} \quad (2.14)$$

Da mecânica dos sólidos, para um veio maciço de seção transversal circular, tem-se:

$$c = \frac{d}{2} \quad r = \frac{d}{2} \quad (2.15)$$

$$I = \frac{\pi * d^4}{64} \quad J = \frac{\pi * d^4}{32} \quad (2.16)$$

Substituindo as equações (2.15) e (2.16) em (2.13) e (2.14), tem-se as tensões média e alternada:

$$\sigma_a = \frac{32 * K_f * M_a}{\pi * d^3} \quad \sigma_a = \frac{32 * K_f * M_m}{\pi * d^3} \quad (2.17)$$

$$\tau_a = \frac{16 * K_{fs} * T_a}{\pi * d^3} \quad \tau_a = \frac{16 * K_{fs} * T_m}{\pi * d^3} \quad (2.18)$$

Pode-se escrever as tensões alternadas e flutuantes em termos de suas equivalentes de Von Mises. Dentro da mecânica dos sólidos, tem-se uma comparação a ser feita para saber se o material vai falhar ou não, que é entre o valor do seu limite de resistência ao escoamento com a sua tensão equivalente de Von Mises, que, para um estado plano de tensões, é dada como [41]:

$$\sigma' = \left( (\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + 3 * \tau_{xy}^2 \right)^{0,5} \quad (2.19)$$

Considerando que a única tensão normal neste trabalho está na direção do próprio veio, tendo os resultados encontrados nas equações (2.17) e (2.18), tem-se que:

$$\sigma'_a = (\sigma_a^2 + 3 * \tau_a^2)^{0,5} \quad (2.20)$$

$$\sigma'_m = (\sigma_m^2 + 3 * \tau_m^2)^{0,5} \quad (2.21)$$

Agora, segue-se ao cálculo dos números capazes de descrever margens de segurança para projetos, são eles os fatores de segurança. Historicamente, já foram usados valores na ordem de 30, porém isso causava excessos, seja no material ou tamanho do veio. Atualmente, o cálculo é bem mais específico, trazendo resultados que giram em torno de 1,25 a 4, para um veio sugere-se considerar um fator de segurança entre 2 e 2,5. Há ainda, em literaturas bem consolidadas, a recomendação de um fator de segurança entre 2,5 e 3 para veios de transmissão [17].

Seguindo Juvinal em [37], a Tabela 2.6 mostra a sua recomendação para cada fator de segurança.

Tabela 2.6 - Valor do fator de segurança e sua aplicação [37].

<b>Valor do Fator de Segurança</b>	<b>Aplicação</b>
1,25 a 1,5	Para materiais excepcionalmente confiáveis a serem utilizados sob condições controladas e sujeitos a cargas e tensões que possam ser determinadas com alto grau de precisão – utilizados quase que invariavelmente onde o baixo peso é uma consideração particularmente importante.
1,5 a 2	Para materiais bem conhecidos, sob condições ambientais razoavelmente constantes, sujeitos a cargas e tensões que podem ser determinadas facilmente.
2 a 2,5	Para materiais cujas propriedades sejam conhecidas em termos de médias, operados em ambientes comuns e sujeitos a cargas e tensões que possam ser determinadas.
2,5 a 3	Para materiais pouco testados ou materiais frágeis sujeitos a condições ambientais, cargas e tensões médias.
3 a 4	Para materiais não-testados utilizados sob condições médias de ambientes, de cargas e de tensões

3 a 4 Também para materiais cujas propriedades sejam bem conhecidas e que devam ser utilizados em ambientes incertos ou sujeitos a tensões incertas.

---

Os fatores estabelecidos na Tabela 2.6 são aceitáveis e devem ser aplicados ao limite de resistência à fadiga do material. Fatores acima de 2 são aceitáveis, porém, um fator de impacto deve ainda ser incluído no projeto. Para materiais frágeis, em casos que o limite de resistência é utilizado como valor máximo teórico, os fatores apresentados devem ser aproximadamente dobrados [37].

Os critérios de falha descritos nos próximos subtópicos são usados para analisar a influência das tensões no veio.

### 2.7.1 Critério de falha de Goodman modificado

A abordagem do critério de falha de Goodman modificado considera a resistência última do material e o limite de resistência à fadiga. Entretanto, não leva em conta a possibilidade de falha por escoamento no primeiro ciclo [42]. Mesmo assim, é um critério bastante utilizado, por ser simples e menos conservador que o critério de Soderberg [17].

De acordo com Budynas e Nisbett [36], o fator de segurança por Goodman é dado pela equação (2.22), e a falha por escoamento no primeiro ciclo pode ser verificada usando a tensão máxima de Von Mises, conforme equações (2.23) e (2.24).

$$n = \left( \frac{\sigma'_a}{S_e} + \frac{\sigma'_m}{S_{ut}} \right)^{-1} \quad (2.22)$$

$$\sigma'_{m\acute{a}x} = ((\sigma_m + \sigma_a)^2 + 3 * (\tau_m + \tau_a)^2)^{0,5} \quad (2.23)$$

$$n_y = \frac{S_y}{\sigma'_{m\acute{a}x}} \quad (2.24)$$

Sendo que  $n_y$  o fator de segurança, que é o resultado da comparação entre a tensão máxima pela resistência de escoamento do material,  $S_y$ .

### 2.7.2 Critério de falha de Soderberg

O critério de Soderberg considera o limite de resistência à fadiga ao longo da linha de tensão e a tensão de escoamento do material ao longo da linha de tensão média. Essa abordagem

leva em conta a possibilidade de falha por escoamento no primeiro ciclo, sendo mais segura e conservadora do que o critério anterior [42]. Seu fator de segurança é dado por:

$$n = \left( \frac{\sigma'_a}{S_e} + \frac{\sigma'_m}{S_y} \right)^{-1} \quad (2.25)$$

### 2.7.3 Outros critérios

Além dos dois critérios citados anteriormente, Goodman e Soderberg, há ainda os critérios de Linha Elíptica da Sociedade Norte-Americana de Engenheiros Mecânicos (ASME) e de Gerber. Ambos são menos conservadores, possibilitando uma redução do material ou tamanho do veio, porém devem ser usados com cuidado, visto que não são muito contemplados na literatura mais recente e oferecem maiores riscos de falha [17]. Ainda, o critério da ASME é dado pela norma ASME B106. 1M-1985, esta que foi retirada e descontinuada pela própria sociedade [43], logo, ela não será utilizada neste trabalho para fins de cálculo ou comparação. O critério da ASME, a título de curiosidade, é descrito pela equação (2.26), e o de Gerber pela (2.27) [32], [42].

$$n = \left( \frac{n * \sigma'_a}{S_e} + \frac{n \sigma'_m}{S_y} \right)^{-1} \quad (2.26)$$

$$n = \left( \frac{8 * a}{\pi * d^3 * S_e} * \left\{ 1 + \left[ 1 + \left( \frac{2 * B * S_e}{A * S_{ut}} \right)^{0,5} \right] \right\} \right)^{-1} \quad (2.27)$$

Onde:

$$A = \left( 4 * (k_f * M_a)^2 + 3 * (K_{fs} * T_a)^2 \right)^{0,5} \quad (2.28)$$

$$B = \left( 4 * (k_f * M_m)^2 + 3 * (K_{fs} * T_m)^2 \right)^{0,5} \quad (2.29)$$

Para uma comparação mais clara dos critérios, pode-se analisar a Figura 2.25.

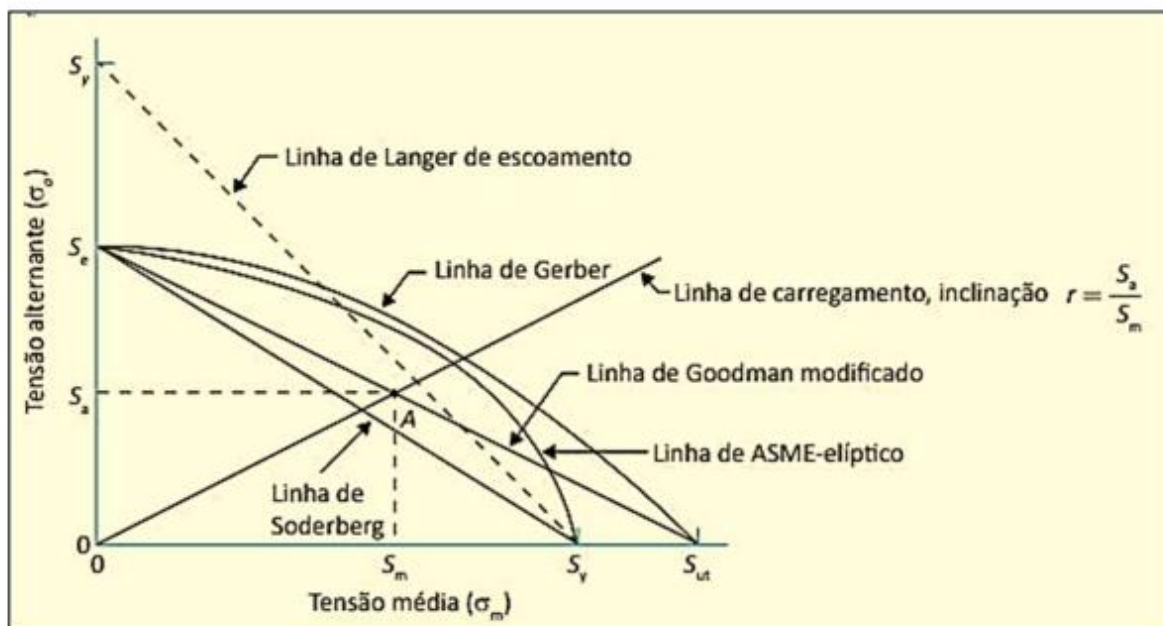


Figura 2.25: Representação gráfica dos critérios de falha [17].

Tendo como referência a linha de Langer de escoamento, pode-se ver que o critério de Soderberg é mais conservador e seguro do que o de Goodman, o primeiro sempre respeitará a zona onde pode haver falha por escoamento, diferente do segundo, que em alguns pontos ultrapassa a linha. Gerber, está na maior parte do tempo acima da linha de escoamento, o que mostra o porquê não é tão contemplado pela literatura como os dois anteriores.

Pelas equações dadas, percebe-se que é preciso identificar os momentos e esforços que atuam num determinado intervalo do veio, para este trabalho, será considerado que o usuário já possui esses valores, seja por desenho ou modelagem assistido por computador (CAD/CAE) ou cálculos próprios.

Ainda sobre critérios para encontrar o fator de segurança, um que não será usado a título de cálculo para esse trabalho, mas sim de comparação no momento do estudo de caso, é a diretriz técnica desenvolvida pelo Conselho Alemão de Pesquisa em Engenharia (FKM), ou, método-FKM. Este começou a ser mais utilizado fora da Alemanha após 2003, ano em que foi publicado a edição em inglês [44].

A orientação do método-FKM faz uma dupla distinção: entre avaliação estática e de fadiga por um lado, e por outro entre o uso de tensão nominal (normalmente proveniente de cálculos analíticos) ou tensão local (fornecido pelo método dos elementos finitos). Cada tipo de tensão, como momento e torsão, é tratado individualmente e são combinados apenas na última etapa, em “graus de utilização” individuais. O gradiente de tensão em pontos de concentração

é levado em consideração e suaviza os picos de tensões locais no cálculo da fadiga. O limite de fadiga é dado como uma proporção da resistência estática final, para cada tipo de material [45].

Na Figura 2.26, é mostrada uma representação gráfica similar à Figura 2.25, porém agora apenas com o método de Goodman, Gerber, Soderberg e FKM.

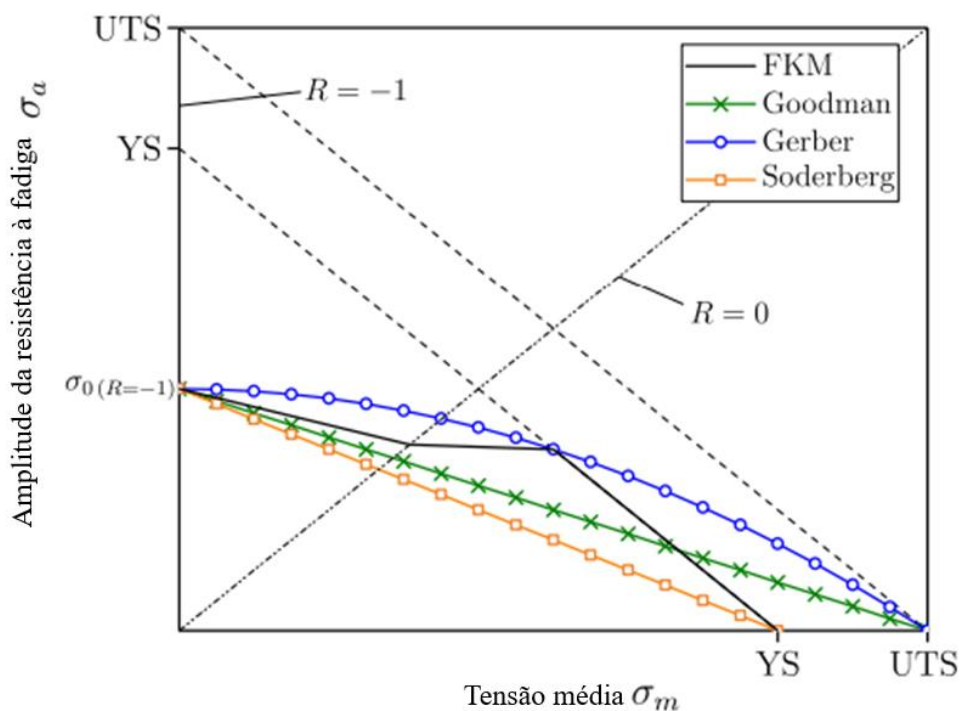


Figura 2.26: Representação gráfica dos critérios de falha com o método-FKM [46].

Agora a linha de Langer de escoamento é dada no ponto “YS”, pode-se ver que o critério de Soderberg continua como o mais conservador e seguro, seguido pelo de Goodman que, na maioria dos pontos, está abaixo da linha do método-FKM. Para tensões médias altas a relação entre esses critérios se inverte e Goodman passa a ser menos conservador do que FKM.

Uma diferença básica entre os critérios pode ser vista de acordo com a dependência do método. As abordagens de Goodman, Gerber e Soderberg são relacionadas a tensão de escoamento do material, ou melhor, ao limite de resistência à tração. Já a diretriz do método-FKM propõe um fator de sensibilidade à tensão média dependente do material [46].

Esse trabalho irá calcular o fator de segurança com base nos métodos de Goodman, Soderberg e Gerber, na análise do estudo de caso uma comparação de resultados será feita com o valor obtido em outro trabalho que utilizou o método-FKM.

## 2.8 REPRODUÇÃO NA FORMA ALGÉBRICA DE CURVAS EXPERIMENTAIS NO

### EDITOR DE FOLHAS DE CÁLCULO

Folhas de cálculo estão sendo cada vez mais utilizados como uma popular ferramenta computacional e uma poderosa plataforma para realizar cálculos. O seu uso na engenharia permite a análise rápida de diversas possibilidades na resolução de um problema, dentro da engenharia mecânica tem-se uma grande gama de problemas que se beneficiam do uso dessa ferramenta, que traz agilidade e confiabilidade [47].

Além de seu uso na prática, também vem sendo usada cada vez mais para facilitar e encurtar processos com objetivo didático-pedagógico, deve-se tomar cuidado, no entanto, com a análise dos resultados para saber se a folha está condizente e adequada para a aplicação [48].

Para obter os valores, de forma aproximada, relacionados às Figura 2.16 a Figura 2.21, é utilizado as folhas de cálculo propostas por Carvalho Neto [17]. Os seus resultados já foram validados pelo autor, por mais que ele sugira no trabalho melhorar os coeficientes de correlação dos gráficos.

## 2.9 LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO

O programa base do qual foi escrito o presente neste trabalho, foi desenvolvido utilizando a linguagem Python por Carvalho Neto [17], é importante entendermos o que levou o autor a escolher essa linguagem e porque ela foi mantida.

Python, sendo uma linguagem *open-source*, ou código aberto, é muito conhecida e utilizada na área de projetos de engenharia mecânica, é tida como direta, clara e instintiva de se usar. Isso se deve a ser uma linguagem simples, com grande capacidade de absorver informação e se adaptar, possuindo ricas bibliotecas livres para todo e qualquer usuário [49].

A distribuição utilizada por Carvalho Neto foi a Anaconda, com o Python 3.7. Como o próprio autor disse, a Anaconda é ótima para programação científica, já possui alguns pacotes instalados e ambientes de trabalho para editar o código. Porém, a distribuição utilizada neste trabalho foi o PyCharm com o Python 3.9. O motivo foi relacionado a aprendizagem mais rápida e facilidade de trabalho com Django, um *framework* de desenvolvimento rápido para

web, que é escrito em Python e foi utilizado para fazer a aplicação online presente neste trabalho.

Dois *frameworks*, ou estruturas, que possibilitam programar com Python para fazer uma aplicação web são o Flask e o Django. Cada um desses tem suas vantagens e desvantagens, o primeiro é tido como mais simples e flexível, já o segundo possui algumas funcionalidades a mais e uma integração maior com bibliotecas, além de ser mais escalável e permitir projetos e aplicações mais complexos [50]. Então, por não ter total certeza das funcionalidades que a aplicação usaria, foi escolhido trabalhar com Django.

Sobre os *frameworks*: eles são um conjunto de classes e interfaces que cooperam entre si, tendo o objetivo de facilitar o desenvolvimento de uma categoria específica de software. Uma característica particular é a capacidade de inversão de controle, ou seja, o controle do fluxo do programa está no *framework* e não no código de aplicação do desenvolvedor, isto é, o *framework* que chama os métodos definidos pelo usuário e não o contrário [51].

A versão 1.0 do Django foi lançada em 2008 e atualmente encontra-se na versão 3.2.6, que é a utilizada neste trabalho. O Django é um *framework* web de alto nível em Python, que possibilita desenvolvimento rápido, seguro e reutilizável de um website, além de ser gratuito e com uma comunidade ativa, com já muita documentação relacionada à estrutura, com opções de suporte gratuito ou pago [52].

Caracterizado como muito versátil, o Django funciona com outros *frameworks* e pode fornecer conteúdo em vários formatos (HTML, XML – *eXtensible Markup Language*, JSON – *JavaScript Object Notation*, entre outros). Também oferece autenticação de usuário, proteção contra injeção de SQL - *Structured Query Language*, falsificação de solicitação entre websites e outras opções de segurança. Sua arquitetura é baseada em componentes, o que facilita a manutenção e compreensão do código [51], [53].

O padrão utilizado pelo Django é MTV (*Model-Template-View*), aonde *Model* é a camada de acesso aos dados, *Template* define como os dados devem ser apresentados ao usuário e *View* é a camada que descreve quais dados devem ser apresentados [51], [52].

Para ilustrar o caminho usual percorrido em uma programação utilizando Django, tem-se a Figura 2.27. Antes de interpretar a figura, um arquivo escrito em Python tem a extensão de arquivo como “.py”, para arquivos escritos na linguagem HTML é “.html”.

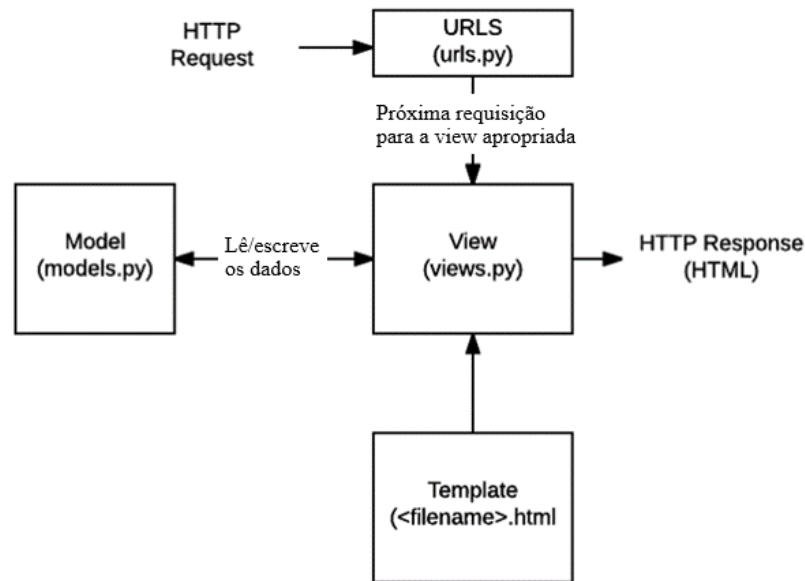


Figura 2.27: Representação do caminho percorrido em uma programação utilizando Django [52].

Seguindo o caminho proposto na Figura 2.27, o usuário faz uma requisição pelo navegador (*HTTP request*), utilizando uma rota (contida no arquivo *urls.py*) é executado um método das *Views* (em *views.py*), que utiliza os *Models* para acessar o banco de dados, ler e retornar as informações para o próprio *Views*. O resultado é renderizado pela camada de *Template* (a camada, ou melhor, a forma como as informações e a página são apresentadas ao usuário, está em *<filename>.html*), então, por fim, é dado ao usuário a resposta, renderizado para navegador (que é o *HTTP Response*). Django se refere a sua organização como *MVT*, que tem muitas similaridades com uma mais familiar para a programação, que é a *Model View Controller (MVC)* [52], [53].

## 2.10 INTERFACES ONLINE

Já há alguns anos, a rápida proliferação e onipresença de dispositivos móveis e computadores forçou a engenharia a adaptar rapidamente a sua abordagem no desenvolvimento de novos softwares e aplicações. Esse crescimento trouxe novos desafios aos desenvolvedores, como criar uma interface acessível para a usuários, com diferentes níveis de conhecimento, e trabalhar com a complexidade de fornecer aplicativos em várias plataformas móveis [54].

Entendendo esses desafios e necessidades, princípios, técnicas, conceitos e regras heurísticas são desenvolvidos e aplicados, buscando que as páginas e interfaces online não

causem conflito ou confusão ao usuário. Por exemplo, a norma ISO 9241 (Ergonomia da interação homem-sistema) propõe critérios para medir a usabilidade, avaliando os seguintes pontos do produto (seja ele um website, aplicativo ou sistema): características necessárias em seu contexto de utilização; agilidade resultada no trabalho, garantia de alcance dos resultados esperados e satisfação gerada [55].

Buscando que a interface seja inclusiva e intuitiva, é recomendado que o produto tenha palavras e títulos que façam sentido ao usuário-alvo da aplicação, evitando campos sem contexto ou nomenclaturas não muito utilizadas. Para aplicações maiores, é importante também dar aos usuários uma forma de explorar visualmente e navegar por todo o conteúdo sem o sentimento de que se perdeu no caminho, tendo dificuldades em voltar ao início ou a um passo anterior. Indiferente do tamanho da aplicação, vale oferecer acesso rápido e fácil para itens individuais, minimizando o número de cliques, além de não sobrecarregar de informação a tela, buscando adereços visuais para facilitar caso haja alguma navegação especial, como menus, botões e listas [56].

Quando é analisado o potencial de aplicações online, tem-se que aumentou conforme avanços relacionados a *machine learning* (aprendizado de máquina), que estimularam o interesse no setor de tecnologia da informação na integração de recursos de inteligência artificial (IA) em softwares e serviços. Seja para mineração ou análise de dados, a engenharia como um todo se beneficia e muito com essa integração [57].

### 3. ASPECTOS METODOLÓGICOS

Esta seção apresenta as etapas que devem ser realizadas para atingir a automatização dos cálculos relacionados com a resistência à fadiga de um veio e a elaboração de um programa web de fácil utilização. O levantamento bibliográfico necessário para o desenvolvimento foi feito com base em livros como: Elementos de Máquinas de *Shigley* [32] e Projetos de Máquinas [33], artigos e teses, nacionais e internacionais, da área de projeto mecânico.

Para assuntos relacionados com o funcionamento de linguagens de programação, além de teses e trabalhos na área, foram utilizados fóruns e páginas oficiais referentes aos softwares usados, como: *MDN Web Docs (Mozilla Developer Network)* [46], a própria página da *Django Software Foundation* [53] e cursos como o *CS50's Web Programming with Python and Javascript* disponível em [58] e da plataforma “Curso em Vídeo”, disponível em [59], também a plataforma para programadores e desenvolvedores *GitHub* [60]. O uso destes cursos, fóruns e plataformas para aprender sobre programação e tirar dúvidas, se mostraram de fundamental importância para esse trabalho, principalmente por serem de livre acesso.

O trabalho é iniciado tendo o código e estrutura desenvolvidos por Neto em [17] disponíveis na plataforma *GitHub*, o primeiro passo então é entender os cálculos envolvidos e o funcionamento e lógica por trás do código, estudando e avaliando a sua adaptação para o Django. Todo o código desenvolvido neste trabalho também está disponível no *GitHub*, no repositório do autor deste trabalho, disponível em [61].

O código segue a recomendação de que os dados básicos, como tipo de entalhe, acabamento superficial do veio, tipo de carregamento e a confiabilidade, sejam solicitados logo no início e de forma sequencial, para evitar conflitos por parte do programador. Como os dados vão ser enviados todos juntos no momento do clique no botão “submeter”, se manteve a recomendação de deixá-los em ordem, tanto por organização como maior facilidade para o usuário. Na página inicial, estruturas como botões e caixa de seleção foram usados para garantir que o usuário coloque somente os dados necessários, funções em *JavaScript* são usadas para mostrar ou esconder campos de acordo com as escolhas prévias, deixando o programa interativo e diminuindo possíveis erros, dando a chance de inserir as informações corretas quando preciso. Além de uma opção para escolher o idioma que a página será mostrada, podendo selecionar entre português e inglês.

Para realizar o cálculo, há um arquivo na pasta do projeto escrito totalmente em Python, que é baseado no código original de Neto [17], intitulado como *functions.py*. A lógica e as funções são muito similares, diferindo em como os dados são lidos na página inicial, recebidos pelo arquivo em Python e mostrados na página do resultado, além de algumas estruturas de verificação terem sido retiradas, como *while*, porém o funcionamento deste arquivo e a sua descrição nos parágrafos seguintes, fora alguns pontos destacados como diferentes, são retirados diretamente do trabalho de Neto [17]. O código presente no arquivo “*function.py*” está anexado no apêndice.

Para os fatores de concentração de tensão dos diferentes entalhes de um veio em relação aos seus diâmetros, Neto [17] adaptou os dados dos gráficos das Figuras 2.15, 2.16, 2.17, 2.18, 2.19 e 2.20 utilizando um editor de folhas de cálculo, obtendo funções que foram implementadas no código. Com algumas ressalvas, os coeficientes de correlação destas funções foram validados pelo autor em seu trabalho, portanto, também serão usados neste.

Sendo assim, uma função maior  $K_t$ , por exemplo, vai selecionar o gráfico a ser utilizado a depender da situação dada pelo usuário na página inicial, e então calcular o valor de  $K_t$  na mesma coordenada horizontal das duas curvas mais próximas do ponto dado e interpolar os valores linearmente, conforme a distância dos pontos à curva. O processo para encontrar  $K_{ts}$  é análogo. Para  $q$  e  $q_s$ , serão utilizadas as equações 2.9 e 2.10 também como funções. Para os fatores  $K_f$  e  $K_{fs}$  temos as equações 2.7 e 2.8. Depois, são definidas função para todas as componentes das tensões normais e de cisalhamento, das componentes de Von Mises e da sua tensão máxima, pelas equações 2.17, 2.18, 2.20, 2.21 e 2.23, respectivamente. Em seguida, é definido uma função para calcular a resistência à fadiga, primeiro tem-se uma condicional para  $S'_e$ , como na equação 2.1, e então os fatores de correção  $k_a$ ,  $k_b$ ,  $k_c$ ,  $k_d$  e  $k_e$  são definidos como funções que dependem dos parâmetros de entrada especificados na seção 2.4.1. Como este trabalho não tem como objetivo principal fazer um estudo detalhado de como fatores diversos alteram a resistência à fadiga, o fator de efeitos diversos,  $k_f$ , é tido como 1. Tendo todos os dados necessários, é calculado o limite de resistência à fadiga conforme Equação 2.2.

Por fim, uma tabela será mostrada ao usuário de acordo com a sua decisão final, se deseja os fatores de segurança para determinado diâmetro ou os diâmetros de acordo com cada critério para um fator de segurança conhecido. Para o programa deste trabalho, será dado apenas essas duas opções ao usuário, que serão apresentadas em tabelas, junto com sugestões automáticas de qual critério levar em consideração e possíveis pontos de mudança no projeto.

Se a escolha foi referente aos fatores de segurança para determinado diâmetro, os fatores de Goodman, Von Mises, Soderberg e Gerber podem ser implementadas como nas equações 2.22, 2.24, 2.25 e 2.27, respectivamente. Cada função faz uso das outras, anteriormente definidas, como parâmetros para o seu funcionamento, as funções então são definidas por todas as variáveis usadas nas funções anteriores. Uma função será definida para decidir qual critério vai ser sugerido, a depender da relação entre o fator de Goodman e o de Von Mises: se o primeiro for maior que o segundo, há risco de falha estática e o programa sugere Soderberg, explicando ao usuário o motivo, caso contrário, Goodman pode ser usado.

Caso o usuário deseje obter uma sugestão de diâmetro para a seção analisada do veio, com base em um valor de fator de segurança definido por ele, as equações 2.22, 2.24, 2.25 e 2.27 são implementadas de forma que o diâmetro por cada critério possa ser calculado. O programa pode escolher o melhor diâmetro entre Goodman e Soderberg, baseado na mesma relação entre Goodman e Von Mises dita anteriormente: se o diâmetro sugerido por Goodman for menor que o de Von Mises, há o risco de falha estática e o diâmetro escolhido pelo programa é o de Soderberg, explicando o motivo ao usuário. Caso contrário, Goodman é selecionado e sugerido, deixando claro que o risco de falha estática foi considerado para a escolha. A lógica de decisão para o que será sugerido ao usuário pode vista de forma esquematizada na Figura 3.1. Junto com a decisão, o resultado ainda traz sugestões relacionadas ao material, acabamento ou mudança no valor do fator de segurança.

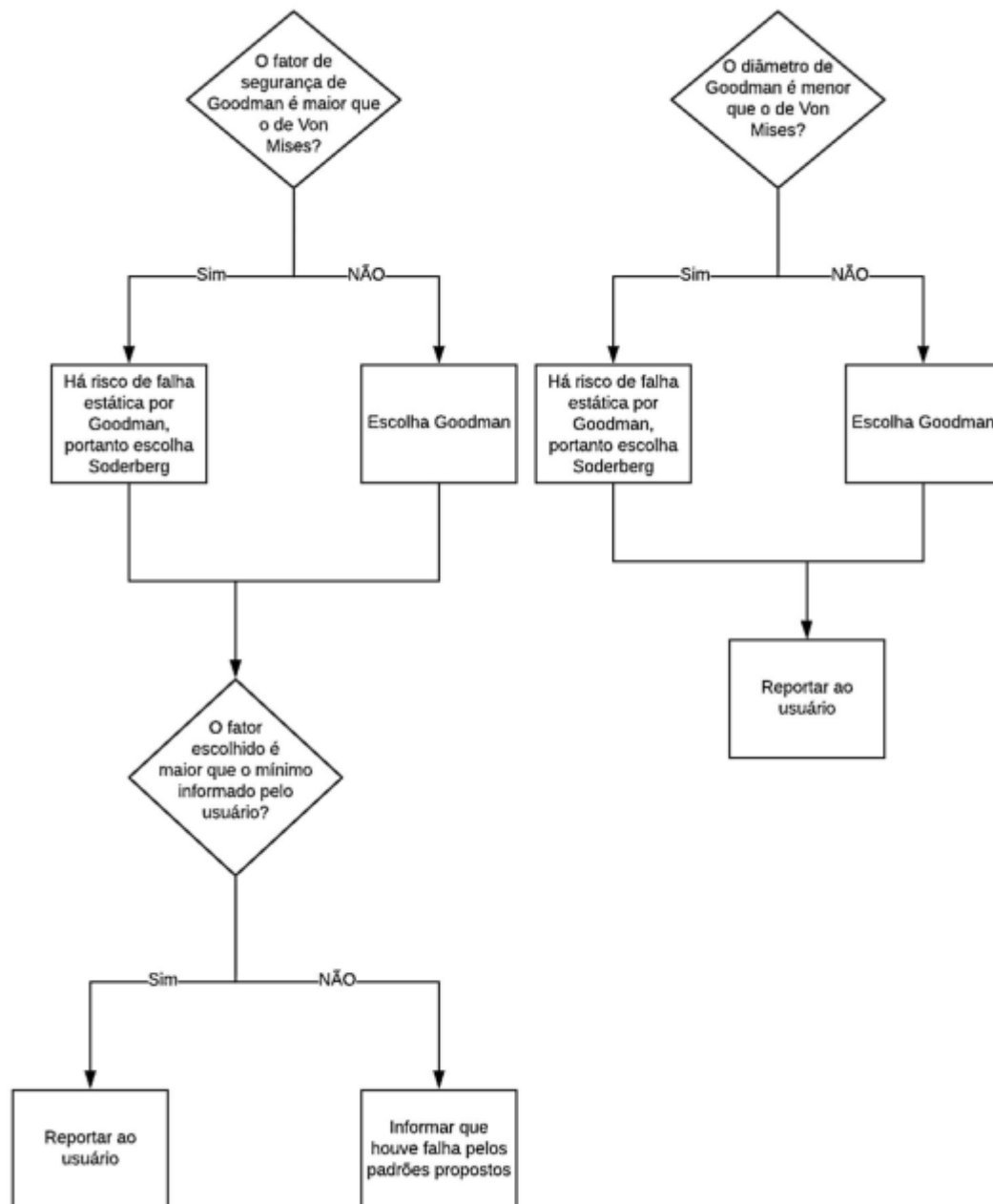


Figura 3.1: Funções de decisão automática para fator de segurança e diâmetro [17].

Para a adaptação do programa para o Django, começou-se a usar a linguagem Python em células de programação do PyCharm. Para criar um projeto com o Django, utiliza-se o comando “*Django-admin startproject ‘nome do projeto’*”, tendo o projeto iniciado, é criado o aplicativo com o comando “*python manage.py startapp ‘nome do aplicativo’*”. Isso cria um diretório com alguns arquivos padrões para o funcionamento da aplicação.

Como dito anteriormente, para este projeto mais alguns arquivos foram criados para que o programa cumpra a lógica, entre elas “*functions.py*” (com seu funcionamento explicado

neste mesmo capítulo) e os arquivos escritos em *html* responsáveis pela aparência e como o usuário vai inserir as informações. No código referente à página inicial, toda escolha é tratada como um número, estes são recebidos pelo arquivo *views.py* e enviados ao *functions.py* de forma que este consiga entender a informação e realizar os cálculos necessários, com o resultado o *views.py* recebe a informação e faz o papel de enviar para a página final, que mostra os resultados de acordo com as escolhas iniciais. Uma representação gráfica pode ser observada na Figura 3.2, onde ilustra o caminho percorrido e os arquivos responsáveis em cada fase do processo.

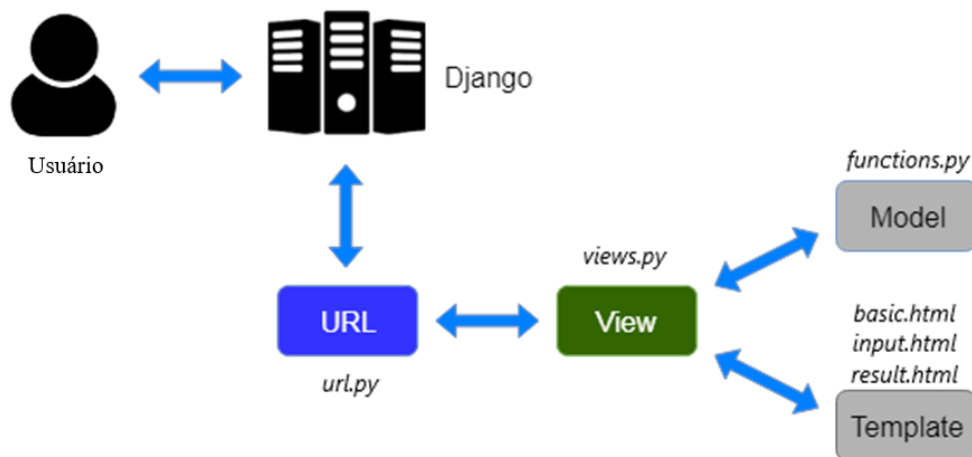


Figura 3.2: Lógica para um programa com o Django [62].

Vale lembrar que há outros arquivos necessários para o funcionamento do programa, mas que não estão listados na Figura 3.2.

Um exemplo da relação entre os arquivos: se a opção escolhida para o formato do ressalto for “Arredondamento no ressalto”, o valor do ressalto vai ser tratado como 1, esse valor é recebido no *views.py* e uma relação o transforma em número inteiro, garantindo que o programa irá entender a informação. *Functions.py* entende que se trata de um arredondamento no ressalto e continua o cálculo para esta situação, devolvendo o valor referente a isso para o *views* encaminhar o resultado à página final.

Para garantir que os dados de entrada sejam somente os necessários à situação do usuário, a página inicial, escrita em *html*, conta com funções em *JavaScript* que deixam o programa interativo, mostrando ou ocultando os campos conforme cada escolha, por exemplo: se o usuário informar que o veio está em equilíbrio, as caixas referentes a componente alternada do torque e a componente média do momento fletor são ocultadas, e ainda se a única carga que o veio estiver sofrendo for flexão, o usuário apenas terá o campo da componente alternada do

momento fletor para preencher. Isso evita que dados desnecessários confundam o usuário e tragam resultados com erros.

Para isso, funções e estruturas de verificação são usadas, como é o caso de botões do tipo *select*, que limitam a somente uma escolha para aquele grupo, além de uma função em *JavaScript* para ocultar ou mostrar as opções seguintes. Para campos que um valor numérico tem que ser inserido, o tipo de caixa é de um número, logo, se uma letra ou algum algarismo diferente de um numérico for inserido, o programa não segue adiante. Cada caixa ou botão escolhido encaminha um valor, funções com estruturas *if/else* definem como o valor é lido e como o programa deve seguir.

Junto com o resultado, sugestões serão feitas de acordo com algumas situações previamente estabelecidas na memória do programa, sejam elas relacionadas a um fator de segurança alto ou baixo. A depender da situação, pode ser sugerido mudança de material, acabamento, diminuir ou aumentar o diâmetro, diminuir ou aumentar o fator de segurança, entre outras. A Figura 3.3 ilustra de forma esquematizada e geral como será o funcionamento do programa.

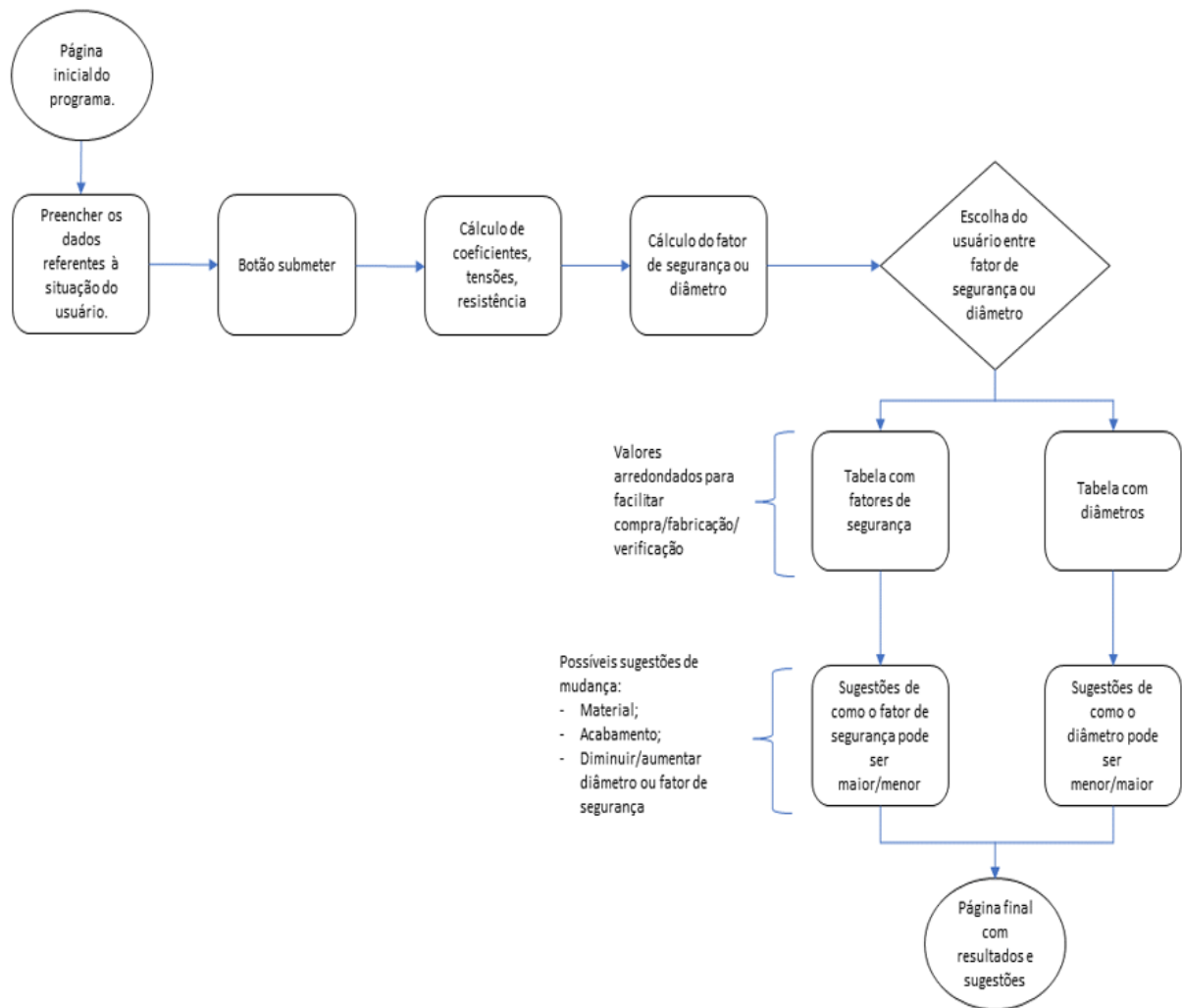


Figura 3.3: Funcionamento do programa web.

Após todas as equações e estruturas implementadas, o programa será testado com o mesmo estudo de caso utilizado por Neto [17] para verificar se o código está funcionando corretamente. Outras situações são testadas em ambos os programas como forma de comparação e análise, buscando combinações que por algum motivo possam encontrar algum problema de lógica, caso aconteça, o código é analisado passo a passo para encontrar a causa raiz da anomalia.

Com o programa já testado e funcionando corretamente, o estudo de caso deste trabalho irá analisar um veio de alta velocidade de uma caixa de engrenagens projetada e dimensionada por Joana Mêda de Sousa em seu trabalho “*Design of a 2.0 MW wind turbine planetary gearbox*” [63]. Neste, a autora projetou e dimensionou uma caixa de engrenagens capaz de se adaptar à baixas rotações e alto torque das lâminas de um aerogerador sob condições de velocidade variável. Serão usadas as medidas do veio rápido desse trabalho, em uma seção de concentração de tensões, para calcular o seu fator de resistência à fadiga e, se necessário,

sugerir recomendações para o projeto do veio. Os mesmos cálculos então serão feitos manualmente, para comparar o tempo investido para o cálculo manual e o cálculo usando o programa.

## 4. CONCEPÇÃO E DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Neste capítulo, uma demonstração do uso do programa é feita utilizando um veio de alta velocidade como estudo de caso. Na sequência, é feita a comparação entre resultados com diferentes métodos para cálculo do fator de segurança e, por último, uma análise na diferença de tempo investido para os mesmos cálculos, porém de forma manual.

### 4.1 DEMONSTRAÇÃO DO USO EM ESTUDO DE CASO

Para poder usar o programa precisamos inicialmente dos dados de entrada do veio, obtidos em [63] e apresentados na Tabela 4.1:

Tabela 4.1 - Dados de entrada [63].

<b>Material</b>	<b>Aço 18CrNiMo7-6 Cementado</b>
Formato do ressalto	Arredondamento no ressalto
Diâmetro da seção vizinha (mm)	138
Raio de entalhe (mm)	5
Acabamento	Laminado a quente
Equilíbrio	Em equilíbrio
Tipo de carga sofrida	Flexão e torção
Componente alternada do momento fletor (Nm)	19397,8
Componente média do torque (Nm)	-0,1
Confiabilidade (%)	50
Temperatura (°C)	20
Diâmetro da seção analisada (mm)	125
Tensão última do material (MPa)	1200
Tensão de escoamento (MPa)	850
Função do programa	Critérios para fator de segurança
Fator de segurança mínimo	1,35

Destes, é importante salientar alguns pontos. O acabamento foi considerado “Laminado a quente” devido ao material passar por um tratamento térmico de endurecimento e cementação.

A confiabilidade escolhida geralmente é de 50%, visto que a maioria das equações apresentadas no Capítulo 2 são obtidas através de médias de dados experimentais.

Sobre o veio analisado, segue a Figura 4.1:

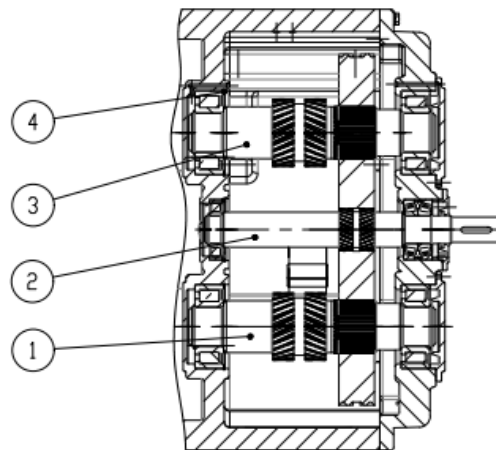


Figura 4.1: Veio de alta velocidade e elementos adjacentes [63].

O veio analisado é o veio de alta velocidade (2) de uma caixa de velocidades de três estágios de transmissão, ele pode ser visto acima do veio inferior intermediário (1), abaixo do veio superior intermediário (3) e do anel interno de retenção (4).

A parte a ser analisada do veio de alta velocidade, e que os dados constam na Tabela 4.1, é a seção transversal C-C ilustrada na Figura 4.2.

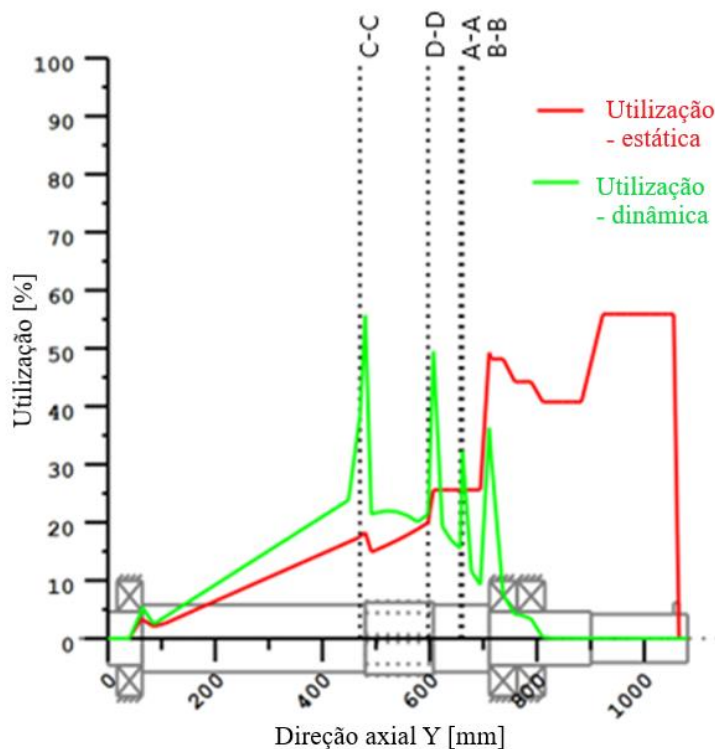


Figura 4.2: Seções do veio de alta velocidade e sua utilização. Adaptado de [63].

O gráfico presente na Figura 4.2 foi obtido com o auxílio do software *KissSoft* [64] junto ao Método-FKM [65]. As linhas verde e vermelha são referentes à utilização do ponto para forças estáticas e dinâmicas, respectivamente. Para este veio, uma carga estática alta pode ocorrer em um processo de parada ou partida, enquanto uma carga dinâmica é relacionada à resistência à fadiga do elemento, durante o funcionamento do equipamento. Olhando para a “utilização - dinâmica” (grau de utilização para fadiga), a utilização em cada ponto é obtida a partir de uma relação da amplitude da tensão nominal pela amplitude da tensão permitida da resistência à fadiga naquele ponto. Ainda, segundo o guia FKM, o ponto de referência a ser analisado é o ponto crítico da seção transversal que observa o maior grau de utilização [65].

No trabalho [63] existem observações destacando que em seções que a utilização estática for maior do que a dinâmica, a verificação da força estática é obrigatória. Além disso, neste estudo de caso, a seção escolhida para análise é a C-C, devido a ser o ponto que apresenta maior utilização para fadiga (utilização dinâmica), chegando a 63,445%. Devido a utilização estática ser menor do que a dinâmica, não será feita a verificação da força estática.

Em uma situação que não seja possível obter um gráfico, ou uma relação, de utilização para cada seção do veio, ou ainda outra forma de análise das seções críticas, é necessária uma análise do diagrama de corpos para encontrar o torque e momento fletor máximo no veio. Isso

é possível fazendo o desenho manual dos diagramas de esforços internos ou utilizando um software CAE/CAD.

A utilização de cada seção, é descrita na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Utilização de cada seção [63].

Seção transversal	Estático (%)	Fadiga (%)
A-A	42.750	57.403
B-B	42.750	26.508
C-C	29.014	63.445
D-D	33.253	36.400
Uso máximo (%)	[A]	63.445

Tendo os dados de entrada em mãos, o programa pode ser utilizado.

O primeiro passo é escolher em que idioma a página irá trabalhar, como mostra a Figura 4.3. Para esse estudo, a página será mostrada em português.

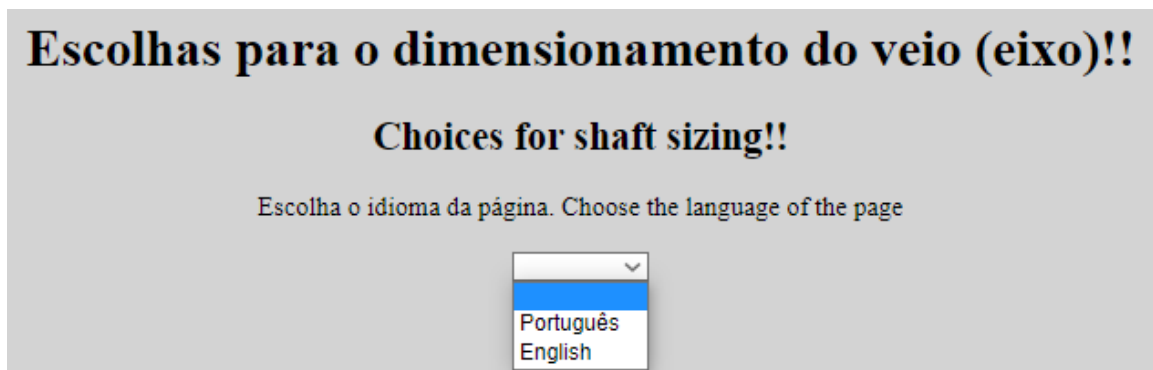


Figura 4.3: Escolha de idioma.

Agora é necessário escolher o formato do ressalto e inserir as informações necessárias para cada caso, como mostra a Figura 4.4. Aqui, o diâmetro da seção vizinha corresponde ao “D” das Figuras 2.16 e 2.17, o raio desejado para o entalhe ao “r”, o diâmetro da seção, “d”, vai ser inserido posteriormente, na Figura 4.6.

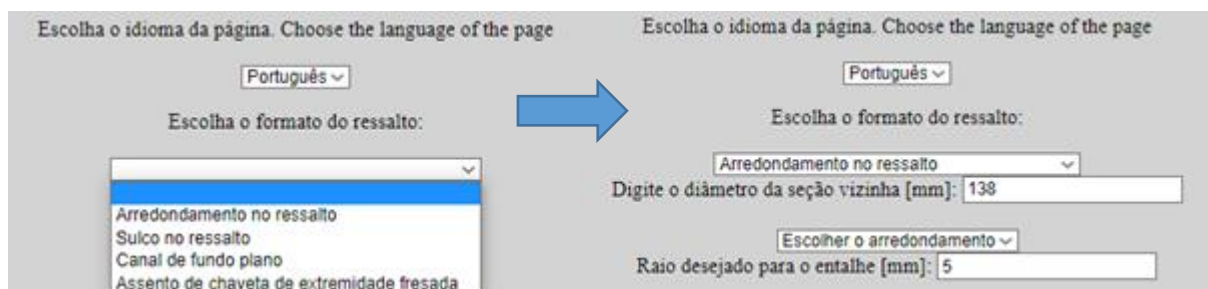


Figura 4.4: Escolha do formato do ressalto.

Em seguida, é escolhido o acabamento, as escolhas para carga sofrida, se o veio está em equilíbrio e as componentes das cargas atuantes. Como é mostrado na Figura 4.5.

The image shows a software interface with two panels. The left panel has three dropdown menus: 'Escolha o acabamento do veio:', 'Tipo de carga sofrida:', and 'Seu eixo está em equilíbrio?'. Below them is a text input field labeled 'Digite a componente das cargas que o veio está sofrendo:'. The right panel has the same three dropdown menus, but the second is set to 'Flexão e Torção.' and the third is set to 'Sim.'. Below them are two text input fields: 'Digite a componente alternada do momento fletor [Nm]: 19398' and 'Digite a componente média do torque [Nm]: 0'. A blue arrow points from the left panel to the right panel.

Figura 4.5: Escolha de acabamento, carga, equilíbrio e componentes.

As opções para que tipo de componente inserir variam conforme a combinação das informações em “Tipo de carga sofrida” e “Seu eixo está em equilíbrio?”. Para uma combinação de “Flexão e Torção” e “Eixo em não-equilíbrio” todas as componentes devem ser inseridas, ou seja, precisaríamos dos valores das componentes alternada e média do momento fletor e do torque. Pelo trabalho de [63], é dito que o veio recebe a componente alternada do momento fletor e a componente média do torque, ou seja, um eixo em equilíbrio que sofre de flexão e torção, a situação que é desejada para um veio de transmissão. Para este ponto, o valor do torque é zero devido à sua posição. O programa precisa de valores inteiros nessa seção, então eles foram arredondados.

Os próximos dados apresentados na Figura 4.6 são referentes a: confiabilidade, temperatura, diâmetro da seção (“d” presente nas Figuras 2.16 e 2.17), tensão última do material, tensão de escoamento e o que o programa irá calcular, se são os fatores de segurança ou os diâmetros de um veio para cada critério, para esse estudo de caso, é verificado a primeira opção e é pedido o fator mínimo tolerável.

The image shows a software interface with two columns of input fields. A blue arrow points from the left column to the right column, indicating a transition from initial values to selected values.

Field Label	Initial Value	Selected Value
A confiabilidade:	[Empty]	50%
Temperatura:	[Empty]	20°C
Diâmetro da seção analisada, ou sua estimativa inicial [mm]:	0	125
Tensão última do material [MPa]:	0	1200
Tensão de escoamento [MPa]:	0	850
O que você precisa que o programa calcule?	Tabela com os resultados de todos os critérios para fator de segurança.	Tabela com os resultados de todos os critérios para fator de segurança.
Fator de segurança, ou o seu mínimo tolerável:	[Empty]	1

Figura 4.6: Escolha dos últimos dados de entrada.

Tendo os campos necessários já preenchidos, ao clicar no botão “submeter / *submit*” o programa segue para a página com os resultados, como mostra a Figura 4.7.

<b>Resultados / Results</b>	
<b>Formato do ressalto / Shoulder Fillet:</b>	Arredondamento no ressalto
<b>Acabamento / Treatment:</b>	Laminado a quente
<b>Carga / Load:</b>	Flexão e torção
<b>Equilíbrio / Equilibrium:</b>	Em equilíbrio
<b>Diâmetro, ou estimativa, da seção / Diameter, or it estimative:</b>	125 mm
<b>Tensão última / Ultimate tensile stress [MPa]:</b>	1200
<b>Tensão de escoamento / Yield strenght [MPa]:</b>	850
<b>Critério / Criteria</b>	<b>Resultado / Result</b>
<b>Goodman:</b>	0.96
<b>Soderberg:</b>	0.96
<b>Gerber:</b>	0.96
<b>Von Mises:</b>	4.26
<b>Análise do programa / Program Analysis</b>	
O valor adotado para o fator de segurança depende da aplicação e da literatura usada, de maneira geral, este programa recomenda valores entre 2 e 2.5. A decisão final é do projetista ou engenheiro responsável.	
<b>Recomendação / Recommendation</b>	
O fator de segurança de Goodman é indicado. Falha por escoamento no primeiro ciclo de Von Mises foi verificado e Goodman foi aprovado! Verificar as sugestões do programa.	
<b>Sugestões / Suggestions</b>	
O fator de segurança é muito baixo, há o risco de falha por fadiga. Sugere-se as seguintes opções: aumentar o diâmetro, trocar para um material com mais resistência, acabamento com maior dureza superficial.	

Figura 4.7: Resultados encontrados.

Na Figura 4.7 primeiro temos informações a respeito do veio, isso é importante para o usuário confirmar se as informações condizem com a situação do elemento mecânico. Em seguida, os resultados de todos os critérios são apresentados e, logo após, comentários do próprio programa acerca do seu funcionamento e dos resultados encontrados. Para a “Análise do programa”, é dito que ele recomenda fatores de segurança entre 2 e 2,5, a relação das suas

sugestões e do valor do fator de segurança foi desenvolvida seguindo Juvinall em [37], como mostrado no Capítulo 2.7.

Agora, seguindo para as “Recomendações”, é dito que a falha por escoamento foi verificada e o critério indicado é o de Goodman, com um resultado de 0,96, porém, é preciso ver as sugestões do programa para entender se esse valor é suficiente ou não.

Em “Sugestões”, a análise do programa é que se trata de um valor muito baixo, há o risco de falha por fadiga e sugestões de como aumentar o fator de segurança são dadas ao usuário. Sabendo que estamos analisando um veio rápido de um aerogerador, a sugestão do programa de aumentar o fator de segurança vai ser seguida e uma das opções dadas vão ser utilizadas. Em termos de geometria, temos que o diâmetro pode ser aumentado, já para o material, o aço que está sendo usado pode ser trocado ou, ainda, o seu acabamento. Como parte do projeto de caixa de velocidades, esse veio possui relações geométricas com outros componentes, alterar o seu diâmetro pode não ser o ideal, visto que outros componentes também podem precisar de alteração.

A escolha então é de testar outro tipo de tratamento para o material, como mostrado no Capítulo 2.5, tratamentos do tipo “Usinado ou Laminado a frio” ou “Retificado” contribuem com maior dureza superficial para o material do que o usado, que foi “Laminado a quente”. Na Figura 4.8 é mostrado o resultado para os mesmos parâmetros iniciais da Tabela 4.1, porém com acabamento “Usinado ou Laminado a frio”.

<b>Resultados / Results</b>	
Formato do ressalto / Shoulder Fillet:	Arredondamento no ressalto
Acabamento / Treatment:	Usinado ou Laminado a frio
Carga / Load:	Flexão e torção
Equilíbrio / Equilibrium:	Em equilíbrio
Diâmetro, ou estimativa, da seção / Diameter, or it estimative:	125 mm
Tensão última / Ultimate tensile stress [MPa]:	1200
Tensão de escoamento / Yield strenght [MPa]:	850
Critério / Criteria	Resultado / Result
Goodman:	1.87
Soderberg:	1.87
Gerber:	1.87
Von Mises:	4.26
Análise do programa / Program Analysis	
O valor adotado para o fator de segurança depende da aplicação e da literatura usada, de maneira geral, este programa recomenda valores entre 2 e 2.5. A decisão final é do projetista ou engenheiro responsável.	
Recomendação / Recommendation	
O fator de segurança de Goodman é indicado. Falha por escoamento no primeiro ciclo de Von Mises foi verificado e Goodman foi aprovado! Verificar as sugestões do programa.	
Sugestões / Suggestions	
Um fator de segurança entre 1.5 e 2 é indicado para materiais bem conhecidos sob condições razoavelmente constantes com cargas e tensões determinadas facilmente. Para maior segurança, sugere-se aumentar o fator de segurança para acima de 2, para isso, tem as seguintes opções: aumentar o diâmetro, trocar para um material com mais resistência, acabamento com maior dureza superficial.	

Figura 4.8: Resultados para acabamento usinado ou laminado a frio.

Chegamos em um resultado de 1,87 para Goodman, um valor melhor, porém ainda abaixo da faixa indicada pelo programa. A sugestão é que fatores de segurança entre 1,5 e 2, são indicados “para materiais bem conhecidos sob condições razoavelmente constantes com cargas e tensões determinadas facilmente”. A decisão final de se é necessário aumentar ainda mais o fator de segurança, cabe ao engenheiro ou projetista responsável, considerando as condições de operação de um aerogerador, um novo acabamento vai ser utilizado para verificar os efeitos no valor do fator. Segue a Figura 4.9, alterando apenas o acabamento para “Retificado”.

<b>Resultados / Results</b>	
Formato do ressalto / Shoulder Fillet:	Arredondamento no ressalto
Acabamento / Treatment:	Retificado
Carga / Load:	Flexão e torção
Equilíbrio / Equilibrium:	Em equilíbrio
Diâmetro, ou estimativa, da seção / Diameter, or it estimative:	125 mm
Tensão última / Ultimate tensile stress [MPa]:	1200
Tensão de escoamento / Yield strenght [MPa]:	850
<b>Critério / Criteria</b>	<b>Resultado / Result</b>
Goodman:	2,34
Soderberg:	2,34
Gerber:	2,34
Von Mises:	4,26
<b>Análise do programa / Program Analysis</b>	
O valor adotado para o fator de segurança depende da aplicação e da literatura usada, de maneira geral, este programa recomenda valores entre 2 e 2.5. A decisão final é do projetista ou engenheiro responsável.	
<b>Recomendação / Recommendation</b>	
O fator de segurança de Goodman é indicado. Falha por escoamento no primeiro ciclo de Von Mises foi verificado e Goodman foi aprovado! Verificar as sugestões do programa.	
<b>Sugestões / Suggestions</b>	
Um fator de segurança entre 2 e 2.5 é o indicado para materiais conhecidos e em ambientes comuns com cargas e tensões que podem ser determinadas. É a faixa indicada por este programa para situações em geral.	

Figura 4.9: Resultado para acabamento retificado.

Para esse caso, o fator de segurança indicado é o de Goodman que resulta em 2,34, esse sim dentro da faixa indicada pelo programa. Vale ressaltar que a decisão final se este é um valor aceitável, ou não, cabe ao engenheiro ou projetista responsável, assim como avaliar quais alterações são aceitáveis, para esse caso, como o veio possui interdependência com outros componentes, alterar o seu diâmetro ou ressalto pode não ser viável, então entra a possibilidade de alterar o acabamento para um polimento retificado, mesmo sendo um processo caro. Situações mais adversas pedem fatores de segurança mais conservadores, que garantam segurança para o funcionamento do mecanismo, assim como situações mais conhecidas e constantes, podem receber um fator de segurança menor. Caso o valor ultrapassasse a faixa de 2 a 2,5, sugestões para diminuí-lo, visando um menor custo de fabricação, seriam indicadas para o usuário.

Para visualizar de maneira mais fácil os efeitos do acabamento no fator de segurança deste veio, segue a Tabela 4.3 com os valores para cada acabamento.

Tabela 4.3 - Fator de segurança para cada acabamento.

<b>Acabamento</b>	<b>Fator de segurança por Goodman</b>
Retificado	2,34
Usinado ou Laminado a frio	1,87
Laminado a quente	0,96
Forjado	0,64

Seguindo as recomendações do programa, para manter a geometria do veio e ter um fator de segurança dentro da faixa recomendável, seria preciso mudar o acabamento do material, resultado diferente do encontrado pela autora em [63], onde o valor encontrado do fator de segurança para o limite de resistência à fadiga utilizando o método-FKM foi de 2,13. Considerado como 157,6% o valor da segurança necessária, tida como 1,35.

É importante destacar que os valores obtidos por cada critério foram os mesmos, isto ocorreu devido ao veio sofrer apenas a componente alternada do momento fletor, isto leva a uma simplificação nos cálculos que resulta nos mesmos resultados. Se a componente alternada do torque, ou a média tanto do torque como do momento fletor, estivessem atuando, estes valores seriam diferentes. Como exemplo, a Figura 4.10 simula a mesma situação que levou ao resultado mostrado na Figura 4.9, porém agora com um valor da componente média do torque igual a 10000 *Nm* e o programa mostrando o resultado em inglês.

<b>Resultados / Results</b>	
Formato do ressalto / Shoulder Fillet:	Shoulder fillet
Acabamento / Treatment:	Ground
Carga / Load:	Bending and Torsion
Equilíbrio / Equilibrium:	In equilibrium
Diâmetro, ou estimativa, da seção / Diameter, or it estimative:	125 mm
Tensão última / Ultimate tensile stress [MPa]:	1200
Tensão de escoamento / Yield strenght [MPa]:	850
Critério / Criteria	Resultado / Result
Goodman:	2.08
Soderberg:	1.99
Gerber:	2.31
Von Mises:	4.05
Análise do programa / Program Analysis	
The value adopted for the safety factor depends on the application and the literature used, for this program the range recomended is between 2 and 2.5. The final decision rests with the responsible designer or engineer.	
Recomendação / Recommendation	
Goodman's safety factor is indicated. Failure by yielding was checked using Von Mises and Goodman passed! Check program suggestions.	
Sugestões / Suggestions	
A safety factor between 2 and 2.5 is suitable for known materials and in common environments with loads and stresses that can be determined. It is the range indicated by this program for general situations.	

Figura 4.10: Resultado em inglês simulando componente média do torque.

É possível notar que agora os valores seguem diferentes. Isto foi apenas para ilustrar um cenário em que há mais de uma componente atuando, neste caso, a componente alternada do momento fletor junto com a componente média do torque, o cenário comum para um veio em equilíbrio.

## 4.2 COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS PARA DIFERENTES MÉTODOS

O método de cálculo é diferente entre o critério usado em [63] e os utilizados no programa desenvolvido neste trabalho. Verificando a Figura 2.26, é possível ver que em boa parte da faixa de valores que os critérios atuam, Goodman segue sendo mais conservador do que o FKM, sabendo que a falha por escoamento foi verificada, é possível dizer que para esses resultados, o primeiro método está em uma região mais conservadora do que o segundo. Isso por si pode explicar o porquê da diferença nos valores encontrados.

Para as mesmas condições, os valores destoaram de 0,96 para Goodman e 2,13 para FKM, uma diferença significativa e que chama a atenção pelo primeiro estar em uma faixa não segura, logo, não indicada para uso, e o segundo ser 157,6% do mínimo necessário indicado pelo próprio método. Alterando o acabamento para “usinado ou laminado a frio” ou “retificado”, os valores por Goodman ficam mais próximos do valor obtido pelo método-FKM para o acabamento “laminado a quente”, os valores podem ser vistos na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Fatores de segurança para FKM e Goodman.

<b>Método</b>	<b>Acabamento</b>	<b>Fator de segurança</b>
FKM	Laminado a quente	2,13
Goodman	Retificado	2,34
Goodman	Usinado ou Laminado a frio	1,87
Goodman	Laminado a quente	0,96

Vale destacar que os valores diferentes devem ser levados em considerações como alertas e não necessariamente comparados de forma direta. Enquanto os critérios de Goodman e Soderberg vem de uma literatura mais consolidada e conservadora, o método-FKM é mais recente e pode trazer análises também importante para o elemento mecânico. A escolha de qual resultado levar em consideração é do engenheiro ou projetista, o importante é que todos os passos e normas de cada critério sejam respeitados para que o resultado condiga com a sua metodologia, além de levar em consideração as condições de operação do veio em questão para uma decisão em relação a sua geometria ou material.

### 4.3 OTIMIZAÇÃO DO TEMPO INVESTIDO PARA O CÁLCULO

Pode-se agora estabelecer uma metodologia para comparação do tempo e esforço necessários para a realização do dimensionamento, ou análise do fator de segurança, do projeto mecânico de um veio por ambos os métodos: o caminho tradicional manual e o automatizado pela aplicação desenvolvida neste trabalho.

Para essa comparação, é seguido o estudo de caso descrito anteriormente nesta seção, iniciando com o acabamento “laminado a quente”, é calculado o tempo para verificar o fator de segurança do elemento mecânico e aplicar possíveis mudanças buscando um novo resultado. O tempo para cada estágio foi medido sem considerar interrupções de qualquer tipo. Para o caminho manual, a linha de cálculo descrita do capítulo 2.4 ao 2.7 deste trabalho foi usada, junto com um bloco de anotações e o software Microsoft Excel para os cálculos.

No fim, realiza-se uma comparação entre o tempo de cálculo pelo método manual e pelo método automatizado, para cada uma das fases do fluxograma representado na Figura 4.11:

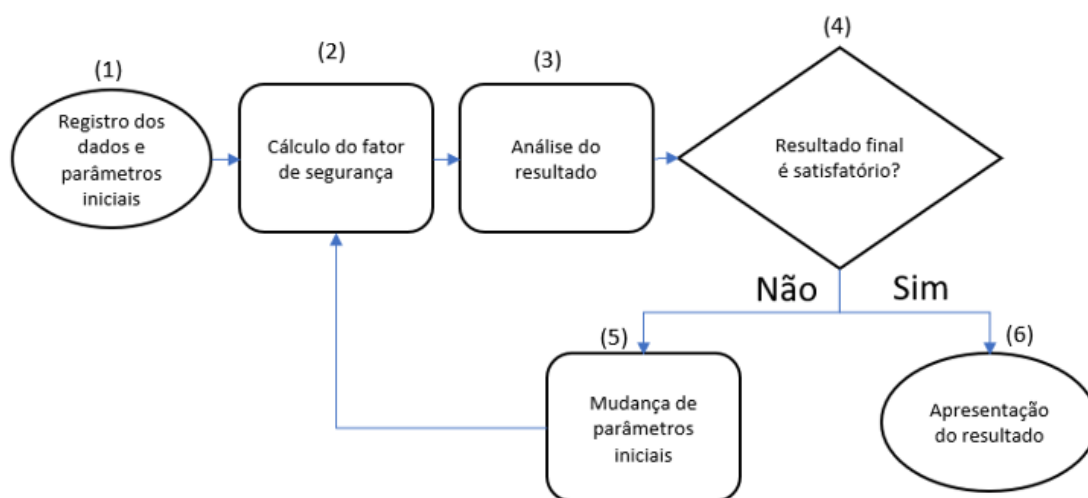


Figura 4.11: Etapas para cálculo manual e automatizado.

Destas, a primeira etapa, “Registro dos dados e parâmetros iniciais” e a de número cinco, “Mudança de parâmetros iniciais” não foram cronometradas e não estão na comparação de tempo investido. É considerado que para as duas situações o engenheiro, projetista ou estudante, já tem todos os dados registrados antes de prosseguir para a fase seguinte, que é referente ao “Cálculo do fator de segurança”. Também, a etapa 6, “Apresentação do resultado”, não entra na comparação de tempo, pois o usuário pode ou não usar a página final da aplicação para este fim. Na Tabela 4.5 é possível verificar o tempo, em segundos, para cálculo manual em diferentes etapas.

Tabela 4.5 – Tempo necessário para cálculo manual em diferentes etapas.

<b>Fase</b>	<b>Etapas</b>	<b>Atividade</b>	<b>Tempo (s)</b>
1	2	Cálculo do fator de segurança	1189
2	3	Análise do resultado	30
3	5	Mudança de parâmetros	---
4	2	Cálculo do fator de segurança com novos parâmetros	500
5	3	Análise do resultado	30
6	5	Mudança de parâmetros	---
7	2	Cálculo do fator de segurança com novos parâmetros	480
8	3	Análise do resultado	30
9	6	Apresentação do resultado	---
<b>Tempo total</b>			<b>2259</b>

Então, já com os dados iniciais, inicia o primeiro cálculo do fator de segurança. Este leva o maior tempo de todas as etapas, é preciso verificar os fatores para cálculo do limite a resistência à fadiga,  $Se$ , obter os valores de  $k_t$ ,  $k_{tS}$ ,  $q$  e  $q_s$  a partir dos gráficos das Figuras Figura 2.16: Veio cilíndrico maciço com raio de arredondamento no ressalto sob torção e Figura 2.17, Figura 2.22 e Figura 2.23, respectivamente. Calcular  $K_f$  e  $K_{fs}$  e as tensões resultantes, que, para essa situação, é apenas a tensão referente à componente alternada do momento fletor,  $\sigma_a$ . Tendo em mãos os resultados, os valores dos fatores de segurança para cada critério são obtidos e, assim como apresentado na Figura 4.7, é entendido que se chegou a um resultado baixo e que o veio precisa de melhorias.

Na fase 2, referente a “Análise do resultado”, o fator por *Goodman* é escolhido, porém decide-se alterar o acabamento do veio para “Usinado ou laminado a frio”. O tempo necessário para a fase 4, a segunda rodada de cálculos, apenas com um acabamento diferente, é mais rápida do que a primeira. Isto se dá devido a mudança alterar o valor de  $Se$  e os valores finais para cada critério, agilizando o processo. A análise ainda é de que o veio precisa de um fator de segurança maior, é decidido alterar mais uma vez o acabamento do veio, agora para “Retificado”. O tempo para a fase 7 é muito próximo da rodada anterior de cálculos.

Após analisar e verificar que o resultado obtido é satisfatório, o processo para cálculo manual é encerrado.

Agora, na Tabela 4.6 é possível verificar o tempo, em segundos, para cálculo automatizado em diferentes etapas.

Tabela 4.6 - Tempo necessário para cálculo automatizado em diferentes etapas.

<b>Fase</b>	<b>Etapas</b>	<b>Atividade</b>	<b>Tempo (s)</b>
1	2	Cálculo do fator de segurança	29
2	3	Análise do resultado	20
3	5	Mudança de parâmetros	---
4	2	Cálculo do fator de segurança com novos parâmetros	28
5	3	Análise do resultado	20
6	5	Mudança de parâmetros	---
7	2	Cálculo do fator de segurança com novos parâmetros	28
8	3	Análise do resultado	20
9	6	Apresentação do resultado	---
<b>Tempo total</b>			<b>145</b>

Para o processo automatizado, não há diferença expressiva para as diferentes rodadas de cálculo, a análise do resultado é facilitada devido às sugestões e recomendações dadas pelo programa, além de já ter uma tela para apresentação do resultado.

Com a Tabela 4.7, há uma comparação direta em quanto tempo foi investido para cálculo por cada caminho, além da redução do tempo necessário.

Tabela 4.7 - Economia de tempo para análise do fator de segurança.

<b>Método</b>	<b>Tempo (s)</b>	<b>Redução de tempo (x)</b>
Manual	2259	-
Automatizado	145	15,57

Observando a Tabela 4.7, nota-se que o caminho automatizado é 15,57 vezes mais rápido do que o manual. Se a comparação fosse em minutos, enquanto o método manual precisou de quase 38, o automatizado levou pouco mais do que dois. Algumas etapas possuem tempos muito parecidos, como é o caso da análise do resultado, mas mesmo nelas as sugestões e recomendações da aplicação auxiliaram para uma tomada de decisão mais rápida, se fosse necessário alguma alteração e o que fazer após isso. A maior discrepância acontece na primeira rodada de cálculos, o ato de buscar valores de maneira visual em gráficos e realizar todos os

passos necessários, requer muita atenção. Além de que erros comuns, como desatenção ou mesmo erros durante os cálculos, que podem atrasar ou resultar em um valor diferente do real.

A facilidade de alterar os parâmetros iniciais ficou nítida, a diferença de tempo seria ainda maior caso fosse escolhido alterar o diâmetro da seção, isto aconteceria porque em todas as rodadas de cálculo todos os fatores sofreriam alteração. Para obter uma comparação e análise mais justa, seria interessante que diferentes pessoas realizassem os cálculos para veios em diferentes situações. Vale ressaltar que essa diferença poderia ser menor para um projetista com experiência, com algum processo do cálculo já otimizado.

## 5. CONCLUSÃO

O problema proposto, neste trabalho, é a criação de uma aplicação web que seja capaz de realizar os cálculos dos diâmetros, com o fator de segurança de um veio em relação a sua resistência à fadiga, de forma iterativa, com uma interface amigável para o usuário, seja um engenheiro, projetista ou estudante da área afim. Como forma de demonstrar o funcionamento da aplicação, o estudo de caso deve incluir os resultados para o fator de segurança, com a análise proveniente deste, para uma seção crítica de um veio de alta velocidade de um aerogerador.

Entendida a importância do correto dimensionamento de um veio para o projeto de toda a estrutura de uma torre eólica, em relação ao seu comportamento, foi então verificado que há a necessidade de calcular a sua resistência à fadiga e fazer a análise desse resultado. O momento e o torque fazem parte das principais cargas sofridas por um veio de transmissão, junto ainda da carga cisalhante e de flexão, porém essas duas últimas não entraram na linha de cálculo deste trabalho, por não serem relevantes perante uma análise de falha. Com o sistema de transmissão detalhado, ficou ainda mais evidente o que uma falha por fadiga, em qualquer um dos veios, pode acarretar ao aerogerador, seja um desalinhamento no veio do rotor ou uma falha total na caixa de velocidades.

Buscando então desenvolver uma aplicação online, que realizasse os cálculos e análises necessários, a implementação do código foi feita utilizando um *framework web* em Python e Django. Seguindo o padrão MTV (*Model-Template-View*), uma página inicial para inserir os dados referentes ao veio foi criada, buscando que a inserção ocorresse de forma organizada, intuitiva e prática. Isso foi possível escrevendo essa página na linguagem *html*, com escolhas postas como botões e listas para facilitar o acesso ao usuário, visto na Figura 4.4, e utilizando funções em *JavaScript*, que pretendem delimitar os campos que possuíam alguma correlação de acordo com escolhas anteriores, visível na Figura 4.5.

A maneira que os dados são trabalhados é com um arquivo escrito em Python, seguindo a linha de cálculo e funções descritas no capítulo 2 deste trabalho. Vale destacar que a literatura acadêmica também usa a análise da energia de distorção segundo o método da ASME elíptica, mas no presente trabalho desconsiderasse esse cálculo, visto que a norma ASME B106. 1M-1985 foi descontinuada em 1994 [43] e a própria ASME ainda não disponibiliza nenhuma outra que possa substituí-la.

O código traz um modelo prático e seguro de análise de fadiga em um veio, junto com novas funcionalidades para otimizar o tempo do usuário e agilizar a tomada de decisões, com os campos de “análise”, “recomendação” e “sugestões”, como vistos na Figura 4.8.

Com o estudo de caso, ficou evidente a facilidade que o programa trouxe para situações em que é preciso analisar e alterar o projeto de um veio. Com um tempo 15 vezes menor do que seria necessário se o cálculo fosse manual, como mostrado na Tabela 4.7, a aplicação cumpre o seu papel de otimizar o tempo do usuário e ainda lhe proporciona possíveis caminhos para mudanças no projeto, com análises e sugestões baseados em uma literatura já consolidada, além de trazer a possibilidade de verificar várias combinações possíveis e o que cada uma acarreta para o veio. Vale mencionar, ainda, a praticidade que o usuário teria para apresentar e discutir o projeto.

Comparar os resultados de vários métodos, reforça que a aplicação deve ser usada como ferramenta para auxiliar o usuário na sua tomada de decisões, seja ele um estudante, projetista ou engenheiro. Resultados diferentes são alertas, que, apesar do procedimento ser confiável e fazer a análise de falha por fadiga em veios, mostram que um julgamento humano é imprescindível, cada projeto tem as suas particularidades e exigências que pedem uma análise própria.

Futuros trabalhos podem incrementar a aplicação com novas funcionalidades, como: a possibilidade de alterar os dados de entrada na página de resultados, não sendo necessário que o usuário volte a página inicial e tenha que preencher todos os campos de novo; incrementar a análise com cálculo das frequências de vibração do veio e deflexão, ou também da força cisalhante atuante; inserir uma biblioteca com materiais e seus valores, para trazer uma facilidade maior tanto na inserção de dados como na alteração do material; e até levar para uma aplicação *mobile*.

Por fim, é importante destacar como cresce cada vez mais a importância de automatizar o tempo de um profissional da engenharia, principalmente para procedimentos manuais e repetitivos. A aplicação ainda traz a facilidade de verificar, rapidamente, como mudanças no material ou na geometria afetam a resistência à fadiga de um veio, algo que pode ser usado não apenas na indústria, mas também na academia, para educadores e estudantes da área.

## REFERÊNCIAS

- [1] L. V. dos Santos, “Análise de falha por fadiga em eixo de motores para sistemas de arrefecimento,” p. 122, 2008, [Online]. Available: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3151/tde-10112008-110146/en.php>.
- [2] R. R. R. Abrahão, C. Bittencourt, K. M. Tsuruta, and R. S. L. Rade, “Fadiga de materiais - uma revisão bibliográfica,” 2008.
- [3] Y. Liu and T. Ishihara, “Fatigue failure accident of wind turbine tower in taikoyama wind farm,” *Eur. Wind Energy Assoc. Annu. Conf. Exhib. 2015, EWEA 2015 - Sci. Proc.*, 2015.
- [4] P. Tchakoua, R. Wamkeue, M. Ouhrouche, F. Slaoui-Hasnaoui, T. A. Tameghe, and G. Ekemb, “Wind turbine condition monitoring: State-of-the-art review, new trends, and future challenges,” *Energies*, vol. 7, no. 4, pp. 2595–2630, 2014, doi: 10.3390/en7042595.
- [5] N. Galarza-Urigoitia *et al.*, “Predictive maintenance of wind turbine low-speed shafts based on an autonomous ultrasonic system,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 103, no. April, pp. 481–504, 2019, doi: 10.1016/j.engfailanal.2019.04.048.
- [6] A. A. Awea, “Standard for Design and Specifications of Gearboxes for Wind Turbines,” no. March, 2010.
- [7] D. Nunez L, “Análise da resistência à flexão e ao crateramento de uma engrenagem cilíndrica de dentes retos: avaliação da eficácia da norma ANSI/AGMA 2101-D04,” 2020.
- [8] S. O. Afolabi, B. I. Oladapo, C. O. Ijagbemi, A. O. M. Adeoye, and J. F. Kayode, “Design and finite element analysis of a fatigue life prediction for safe and economical machine shaft,” *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 8, no. 1, pp. 105–111, 2019, doi: 10.1016/j.jmrt.2017.10.007.
- [9] I. Souflas, A. Pezouvanis, and K. M. Ebrahimi, “Health monitoring system for transmission shafts based on adaptive parameter identification,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 104, pp. 673–687, 2018, doi: 10.1016/j.ymsp.2017.11.023.
- [10] E. D. C. Nova, “Detecção De Avarias Na Caixa De Engrenagens De Aerogeradores,” 2014.
- [11] R. F. Mesquita Brandão, “Neutro à terra,” 2011.
- [12] T. Howard, “Development of a Novel Bearing Concept for Improved Wind Turbine Gearbox Reliability,” The University of Sheffield, 2016.

- [13] M. Wasilczuk, R. Gawarkiewicz, and B. Bastian, “Analysis of Failures of High Speed Shaft Bearing System in a Wind Turbine,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 295, no. 1, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/295/1/012023.
- [14] C. Jun, H. Cunfu, L. Yan, Z. Yang, and X. Longyang, “Method for evaluation of surface crack size of wind turbine main shaft by using ultrasonic diffracted waves,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 29, no. 7, 2020, doi: 10.1088/1361-665X/ab82ed.
- [15] M. Gauravkumar Bharatbhai, “Failure Mode and Effect Analysis of Repower 5M Wind Turbine,” *Int. J. Adv. Res. Eng.*, vol. 2, no. 5, pp. 2394–2444, 2015.
- [16] H. Li, H. Díaz, and C. Guedes Soares, “A failure analysis of floating offshore wind turbines using AHP-FMEA methodology,” *Ocean Eng.*, vol. 234, no. May, 2021, doi: 10.1016/j.oceaneng.2021.109261.
- [17] A. P. CARVALHO NETO, “Automatização de análise de fadiga em eixos de transmissão para tomada de decisões na fase de projeto,” no. June, p. 69, 2020, doi: 10.13140/RG.2.2.32140.54403.
- [18] R. H. Leal, “Automatização do projeto de um sistema motor alimentado a gaseificação da madeira Automatização do projeto de um sistema motor alimentado a gaseificação da madeira,” 2020.
- [19] L. Akira Ferreira da Costa, “Automatização do projeto de ancoragem de terminações de dutos flexíveis marinhos,” 2019.
- [20] A. J. Muminovic, I. Saric, and N. Repcic, “Numerical analysis of stress concentration factors,” *Procedia Eng.*, vol. 100, no. January, pp. 707–713, 2015, doi: 10.1016/j.proeng.2015.01.423.
- [21] M. Pasqualetti, R. Righter, and P. Gipe, “History of Wind Energy,” *Encycl. Energy*, no. September 2014, pp. 419–434, 2004.
- [22] “WindEurope.” <https://windeurope.org>.
- [23] D. de Souza Machado, J. Cavalcanti Fadul, A. Reiche Bacelar, and S. C. Salles Nascimento, “Direção-Geral de Energia e Geologia,” 2005, [Online]. Available: <https://www.dgeg.gov.pt/pt/>.
- [24] “Plano Nacional Energia e Clima.” <https://www.portugalenergia.pt/setor-energetico/bloco-3/>.
- [25] “Portal Energia - Energias renováveis.” <https://www.portal-energia.com>.
- [26] “Windpower Engineering & Development.” <https://www.windpowerengineering.com>.
- [27] M. Ragheb and A. M. Ragheb, *Fundamental and Advanced Topics in Wind Power*.

- InTech, 2011.
- [28] S. R. Silva, “Curso de Especialização em Energia Eólica: Tecnologia em Aerogeradores,” 2013.
- [29] M. Pasqualetti and P. Gipe, “History of Wind Energy,” 2004, [Online]. Available: <https://www.iberwind.pt>.
- [30] D. Victor, M. Fernandes, D. Jorge, A. Mendes, D. Victor, and M. Fernandes, “Modelação de Torre Eólica : Controlo e Desempenho,” 2013.
- [31] R. F. Silva, “Emulação de uma turbina eólica e controle vetorial do gerador de indução rotor gaiola de esquilo para um sistema eólico,” 2012.
- [32] R. G. Budynas and J. K. Nisbett, “Elementos de Máquinas de Shigley - Projeto de Engenharia Mecânica.” p. 1073, 2011, [Online]. Available: <http://mechfamilyhu.net/download/uploads/mech145022803743.pdf>.
- [33] R. L. Norton, *Projeto de Máquinas - Uma abordagem integrada*, 4th ed. 2013.
- [34] A. Kurek, T. Łagoda, and M. Kurek, “Stress gradient as a size effect in fatigue life determination for alternating bending,” *Int. J. Fatigue*, p. 106461, 2021, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2021.106461.
- [35] E. da Rosa, *Análise de Resistência Mecânica. Mecânica da Fratura e Fadiga. .*
- [36] R. G. Budynas and J. K. Nisbett, *Shigley’s Mechanical Engineering Design*, 9th ed. 2011.
- [37] R. C. Juvinall and K. M. Marshek, “Projeto de componentes de máquinas,” p. 500, 2008.
- [38] F. P. Beer and R. J. JR, *Resistência dos Materiais - 3 Edição*. 1995.
- [39] J. A. Bannantine, J. J. Comer, and J. L. Handrock, *Fundamentals of metal fatigue analysis*, vol. 27, no. 05. 1990.
- [40] A. J. Muminovic, I. Saric, and N. Repcic, “Analysis of stress concentration factors using different computer software solutions,” *Procedia Eng.*, vol. 69, pp. 609–615, 2014, doi: 10.1016/j.proeng.2014.03.033.
- [41] R. C. Hibbeler, *Resistência dos Materiais*, 5th ed. 2004.
- [42] A. A. Adekunle, S. B. Adejuyigbe, and O. T. Arulogun, “Development of CAD software for shaft under various loading conditions,” *Procedia Eng.*, vol. 38, no. Icmoc, pp. 1962–1983, 2012, doi: 10.1016/j.proeng.2012.06.239.
- [43] American Society of Mechanical Engineers, “List of Withdrawn & Discontinued ASME Standards,” 2021.
- [44] B. X. Takahashi, “Metodologia moderna para análise de fadiga baseada em Elementos

- Finitos de componentes sujeitos a Fadiga uni e multiaxial,” Universidade de São Paulo, 2014.
- [45] S. Kœchlin, “FKM Guideline: Strengths, Limitations and Experimental Validation,” *Procedia Eng.*, vol. 133, pp. 309–319, 2015, doi: 10.1016/j.proeng.2015.12.674.
- [46] M. Schuscha, M. Horvath, M. Leitner, and M. Stoschka, “Notch stress intensity factor (NSIF)-based fatigue design to assess cast steel porosity and related artificially generated imperfections,” *Metals (Basel)*, vol. 9, no. 10, 2019, doi: 10.3390/met9101097.
- [47] S. A. Oke, “Spreadsheet applications in engineering education: A review,” *Int. J. Eng. Educ.*, vol. 20, no. 6, pp. 893–901, 2004.
- [48] D. de Souza Machado, J. Cavalcanti Fadul, A. Reiche Bacelar, and S. C. Salles Nascimento, “Desenvolvimento e utilização de planilhas eletrônicas para engenharia: Um potencial didático-pedagógico.”
- [49] G. Kumar, V. Singh, and M. Thombre, “Importance of Learning Python Programming in the Field of Mechanical Engineering,” vol. 01, no. 12, pp. 16–18, 2020.
- [50] D. Ghimire, “Comparative study on Python web frameworks: Flask and Django,” no. May, pp. 1–40, 2020, [Online]. Available: <http://www.theseus.fi/handle/10024/339796>.
- [51] I. de Souza Solique, “Estudo comparativo das tecnologias de desenvolvimento de sistemas WEB: Polymer, Django e Meteor,” UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MATO GROSSO DO SUL, 2018.
- [52] “Django Introduction.” <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Learn/Server-side/Django/Introduction>.
- [53] “Getting started with Django.” <https://www.djangoproject.com/start/>.
- [54] J. Dehlinger and J. Dixon, “Mobile application software engineering: Challenges and research directions,” *Proc. Work. Mob. Softw. Eng.*, pp. 29–32, 2011, [Online]. Available: [http://www.mobileseworkshop.org/papers/7\\_Dehlinger\\_Dixon.pdf](http://www.mobileseworkshop.org/papers/7_Dehlinger_Dixon.pdf).
- [55] J. J. Leonardi, “Importância da engenharia de usabilidade na computação,” 2015.
- [56] R. Walton, “Looking for answers: A usability study of online finding aid navigation,” *Am. Arch.*, vol. 80, no. 1, pp. 30–52, 2017, doi: 10.17723/0360-9081.80.1.30.
- [57] S. Amershi and et al., “Software Engineering for Machine Learning: A Case Study,” [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8804457>.
- [58] B. Yu and D. J. Malan, “CS50’s Web Programming with Python and JavaScript,” 2020. <https://cs50.harvard.edu/web/2020/>.
- [59] G. Guanabara, “Curso em vídeo.” <https://www.cursoemvideo.com>.

- [60] “GitHub.” <https://github.com/about>.
- [61] “Repositório GitHub Lucas Huber Pissaia.” <https://github.com/lucaspissaia/dimensionamentoveio>.
- [62] “Django MVT.” <https://www.javatpoint.com/django-mvt>.
- [63] J. M. Sousa, “Design of a 2.0 MW wind turbine planetary gearbox,” p. 317, 2017.
- [64] “KISSsoft.” <https://www.kisssoft.com/pt>.
- [65] Forschungskuratorium Maschinenbau (FKM), *FKM Guideline: Analytical Strength Assessment*. 2003.

## APÊNDICE

```
import math
import numpy as np

log = np.log

def Language1(Language):
    return Language

### Informações que vão ser escritas na página de resultados
def Ressalto1(ressalto):
    if ressalto == 1:
        Ressalto2 = "Arredondamento no ressalto"
    elif ressalto == 2:
        Ressalto2 = "Sulco no ressalto"
    elif ressalto == 3:
        Ressalto2 = "Canal de fundo plano"
    else:
        Ressalto2 = "Assento de chaveta de extremidade fresada"
    return Ressalto2
inforessalto = Ressalto1(ressalto)

def Acab1(acabamento):
    if acabamento == 2:
        Acab2 = "Retificado"
    elif acabamento == 1:
        Acab2 = "Usinado ou Laminado a frio"
    elif acabamento == 3:
        Acab2 = 'Laminado a quente'
    else:
        Acab2 = 'Forjado'
    return Acab2
infoacabamento = Acab1(acabamento)

def Carga1(carga):
    if carga == 1:
        Carga2 = "Flexão pura"
    elif carga == 2:
        Carga2 = "Torção pura"
    else:
        Carga2 = "Flexão e torção"
    return Carga2
infocarga = Carga1(carga)

def Equill1(equilibrio):
    if equilibrio == 'y':
```

```

    Equil2 = "Em equilibrio"
else:
    Equil2 = "Em não-equilibrio"
return Equil2
infoequil = Equil1(equilibrio)

def Ressaltolen(ressalto):
    if ressalto == 1:
        Ressalto2 = "Shoulder fillet"
    elif ressalto == 2:
        Ressalto2 = "Grooved round bar"
    elif ressalto == 3:
        Ressalto2 = "Flat-bottom groove"
    else:
        Ressalto2 = "End-mill keyseat r/d = 0.02"
    return Ressalto2
inforessalto = Ressaltolen(ressalto)

def Acablen(acabamento):
    if acabamento == 2:
        Acab2 = "Ground"
    elif acabamento == 1:
        Acab2 = "Machined or cold-drawn"
    elif acabamento == 3:
        Acab2 = 'Hot-rolled'
    else:
        Acab2 = 'As-forjed'
    return Acab2
infoacabamento = Acablen(acabamento)

def Cargalen(carga):
    if carga == 1:
        Carga2 = "Pure bending"
    elif carga == 2:
        Carga2 = "Pure torsion"
    else:
        Carga2 = "Bending and Torsion"
    return Carga2
infocarga = Cargalen(carga)

def Equillen(equilibrio):
    if equilibrio == 'y':
        Equil2 = "In equilibrium"
    else:
        Equil2 = "In non-equilibrium"
    return Equil2
infoequil = Equillen(equilibrio)

def Diamvizinha(D):
    return int(D)

def Sut1(TensaoUlt):
    return int(TensaoUlt)

```

```

def n1(nseg):
    return float(nseg)

    rr = int(Raioentalhe)
    Sut = Sut1(TensaoUlt)
    acabamentoo = int(Acab)
    carga = int(Carga)
    temperatura = int(Temp)
    confiabilidade = int(Conf)
    d = int(Diam)
    Sut = int(TensaoUlt)
    eq = str(equilibrio)
    D = int(Dvizinha)
    dinside = int(Dsulco)
    a = int(Larguracanal)
    t2 = int(t)
    Ma = Altmomento
    Mm = int(Mediamomento)
    Tm = int(Mediatorque)
    Ta = int(Alttorque)

    n = n1(nseg)

#####

def reta(x0, y0, x1, y1, x):
    return (y0 + (y1 - y0) * (x - x0) / (x1 - x0))

def Fig1(rDd, rrd):
    result109 = 0.8299 * (rrd ** (-0.165))
    result12 = 0.8013 * (rrd ** (-0.235))
    result133 = 0.8522 * (rrd ** (-0.232))
    result2 = 0.8148 * (rrd ** (-0.2688))
    if (rDd <= 1.09):
        result = result109
    elif (rDd <= 1.2):
        result = reta(1.09, result109, 1.2, result12, rDd)
    elif (rDd <= 1.33):
        result = reta(1.2, result12, 1.33, result133, rDd)
    elif (rDd <= 2):
        result = result = reta(1.33, result133, 2, result2, rDd)
    else:
        result = result2
    return result

# In[116]:

def Fig2(rDd, rrd):
    result102 = 0.917 * (rrd ** (-0.2039))
    result105 = 0.9223 * (rrd ** (-0.2292))
    result11 = 0.9040 * (rrd ** (-0.2511))
    result15 = 0.8729 * (rrd ** (-0.2922))
    result3 = 0.8936 * (rrd ** (-0.3107))
    if (rDd <= 1.02):

```

```

        result = result102
    elif (rDd <= 1.05):
        result = reta(1.02, result102, 1.05, result105, rDd)
    elif (rDd <= 1.1):
        result = reta(1.1, result11, 1.05, result105, rDd)
    elif (rDd <= 1.5):
        result = reta(1.5, result15, 1.1, result11, rDd)
    elif (rDd <= 3):
        result = reta(1.5, result15, 3, result3, rDd)
    else:
        result = result3
    return result

def Fig3(rDd, rrd):
    result102 = 0.9932 * (rrd ** (-0.2006))
    result105 = 0.9731 * (rrd ** (-0.2593))
    result15 = 0.9579 * (rrd ** (-0.3201))
    if (rDd <= 1.02):
        result = result102
    elif (rDd <= 1.05):
        result = reta(1.02, result102, 1.05, result105, rDd)
    elif (rDd <= 1.5):
        result = reta(1.5, result15, 1.05, result105, rDd)
    else:
        result = result15
    return result

def Fig4(rDd, rrd):
    result102 = 0.9872 * (rrd ** (-0.1196))
    result105 = 0.9632 * (rrd ** (-0.1587))
    result13 = 0.8667 * (rrd ** (-0.2522))
    if (rDd <= 1.02):
        result = result102
    elif (rDd <= 1.05):
        result = reta(1.02, result102, 1.05, result105, rDd)
    elif (rDd <= 1.3):
        result = reta(1.3, result13, 1.05, result105, rDd)
    else:
        result = result13
    return result

def Fig5(rrt, rat):
    result003 = -0.8134 * log(rat) + 8.6878
    result004 = -0.7040 * log(rat) + 7.7962
    result005 = -0.6386 * log(rat) + 7.1864
    result007 = -0.5793 * log(rat) + 6.3311
    result010 = -0.4445 * log(rat) + 5.5212
    result015 = -0.4971 * log(rat) + 4.9092
    result020 = -0.4534 * log(rat) + 4.5660
    result040 = -0.5045 * log(rat) + 3.8376

```

```

result060 = -0.6052 * log(rat) + 3.6449
result1 = -0.7237 * log(rat) + 3.5022
if rrt <= 0.03:
    result = result003
elif rrt <= 0.04:
    result = reta(0.03, result003, 0.04, result004, rrt)
elif rrt <= 0.05:
    result = reta(0.05, result005, 0.04, result004, rrt)
elif rrt <= 0.07:
    result = reta(0.05, result005, 0.07, result007, rrt)
elif rrt <= 0.10:
    result = reta(0.10, result010, 0.07, result007, rrt)
elif rrt <= 0.15:
    result = reta(0.10, result010, 0.15, result015, rrt)
elif rrt <= 0.2:
    result = reta(0.2, result020, 0.15, result015, rrt)
elif rrt <= 0.4:
    result = reta(0.2, result020, 0.4, result040, rrt)
elif rrt <= 0.6:
    result = reta(0.6, result060, 0.4, result040, rrt)
elif rrt <= 1:
    result = reta(0.6, result060, 1, result1, rrt)
else:
    result = result1
return result

```

```

def Fig6(rrt, rat):
    result003 = -0.0871 * log(rat) + 4.6640
    result004 = -0.1608 * log(rat) + 4.2970
    result006 = -0.1608 * log(rat) + 3.7970
    result010 = -0.2552 * log(rat) + 3.2393
    result020 = -0.2244 * log(rat) + 2.6760
    if rrt <= 0.03:
        result = result003
    elif rrt <= 0.04:
        result = reta(0.03, result003, 0.04, result004, rrt)
    elif rrt <= 0.06:
        result = reta(0.06, result006, 0.04, result004, rrt)
    elif rrt <= 0.1:
        result = reta(0.06, result006, 0.1, result010, rrt)
    elif rrt <= 0.2:
        result = reta(0.1, result010, 0.20, result020, rrt)
    else:
        result = result020
    return result

```

```

def q(Sut, r):
    Neuber = 0.246 - 0.308e-2 * (Sut / 6.89) + 0.151e-4 * (Sut / 6.89) ** 2
    - 0.267e-7 * (Sut / 6.89) ** 3
    Neuber *= 25.4 ** 0.5
    return (1 / (1 + Neuber / (r ** 0.5)))

```

```

def qs(Sut, r):
    Neuber = 0.190 - 2.51e-3 * (Sut / 6.89) + 1.35e-5 * (Sut / 6.89) ** 2 -
    2.67e-8 * (Sut / 6.89) ** 3
    Neuber *= 25.4 ** 0.5
    return (1 / (1 + Neuber / (r ** 0.5)))

##in1 e in2
def valorin1(ressalto, d, D, rr, dinside, t2):
    if ressalto == 1:
        in1 = D / d
    elif ressalto == 2:
        in1 = d / (d - 2 * dinside)
        D = d
    elif ressalto == 3:
        in1 = rr / t2
    else:
        in1 = 3000
    return in1

def valorin2(ressalto, d, r, dinside, a, t2):
    if ressalto == 1:
        in2 = r / d
    elif ressalto == 2:
        in2 = r / (d - 2 * dinside)
    elif ressalto == 3:
        in2 = a / t2
    else:
        in2 = 3000
    return in2

def Kt(ressalto, in1, in2):
    if ressalto == 1:
        Kt = Fig2(in1, in2)
    elif ressalto == 2:
        Kt = Fig3(in1, in2)
    elif ressalto == 3:
        Kt = Fig5(in1, in2)
    else:
        Kt = 2.14
    return Kt

def Kts(ressalto, in1, in2):
    if ressalto == 1:
        Kts = Fig1(in1, in2)
    elif ressalto == 2:
        Kts = Fig4(in1, in2)
    elif ressalto == 3:
        Kts = Fig6(in1, in2)
    else:

```

```

        Kts = 3
    return Kts

def Kf(Sut, r, ressalto, in1, in2):
    return (1 + q(Sut, r) * (Kt(ressalto, in1, in2) - 1))

def Kfs(Sut, r, ressalto, in1, in2):
    return (1 + qs(Sut, r) * (Kts(ressalto, in1, in2) - 1))

    Kfsresult = Kfs(Sut, r, in1, valorin2)

def oa(Sut, r, ressalto, in1, in2, Ma, d):
    return (32 * Kf(Sut, r, ressalto, in1, in2) * Ma / (np.pi * ((d / 10)
** 3)))

def om(Sut, r, ressalto, in1, in2, Mm, d):
    return (32 * Kf(Sut, r, ressalto, in1, in2) * Mm / (np.pi * ((d / 10)
** 3)))

def ra(Sut, r, ressalto, in1, in2, Ta, d):
    return (16 * Kfs(Sut, r, ressalto, in1, in2) * Ta / (np.pi * ((d / 10)
** 3)))

def rm(Sut, r, ressalto, in1, in2, Tm, d):
    return (16 * Kfs(Sut, r, ressalto, in1, in2) * Tm / (np.pi * ((d / 10)
** 3)))

def oal(Sut, r, ressalto, in1, in2, Ma, d, Ta):
    return (oa(Sut, r, ressalto, in1, in2, Ma, d) ** 2 + 3 * ra(Sut, r,
ressalto, in1, in2, Ta, d) ** 2) ** 0.5

def oml(Sut, r, ressalto, in1, in2, Mm, d, Tm):
    return (om(Sut, r, ressalto, in1, in2, Mm, d) ** 2 + 3 * rm(Sut, r,
ressalto, in1, in2, Tm, d) ** 2) ** 0.5

def omax(Sut, r, ressalto, in1, in2, Ma, d, Mm, Ta, Tm):
    return ((om(Sut, r, ressalto, in1, in2, Mm, d) + oa(Sut, r, ressalto,
in1, in2, Ma, d)) ** 2 + 3 * (
        rm(Sut, r, ressalto, in1, in2, Tm, d) + ra(Sut, r,
ressalto, in1, in2, Ta, d)) ** 2) ** 0.5

def Sel(Sut):
    if Sut <= 1400:

```

```
        Sel = 0.5 * Sut
    else:
        Sel = 700
    return Sel

def ka(Sut, acabado):
    if acabado == 1:
        a = 4.51
        b = -0.265
    elif acabado == 2:
        a = 1.58
        b = -0.085
    elif acabado == 3:
        a = 57.7
        b = -0.718
    elif acabado == 4:
        a = 272
        b = -0.995
    return (a * Sut ** b)

def kb(d):
    if d >= 2.79 and d <= 51:
        kb = 1.24 * d ** -0.107
    elif d >= 51 and d <= 254:
        kb = 1.51 * d ** -0.107
    elif d > 254:
        kb = 0.60
    return kb

def kc(carga):
    if carga == 1:
        kc = 1
    elif carga == 2:
        kc = 0.59
    elif carga == 3:
        kc = 1
    return kc

def kd(temperatura):
    if temperatura == 20:
        kd = 1
    elif temperatura == 50:
        kd = 1.01
    elif temperatura == 100:
        kd = 1.02
    elif temperatura == 150:
        kd = 1.025
    elif temperatura == 200:
        kd = 1.02
    elif temperatura == 250:
        kd = 1
    elif temperatura == 300:
        kd = 0.975
    elif temperatura == 350:
        kd = 0.943
```

```

elif temperatura == 400:
    kd = 0.9
elif temperatura == 450:
    kd = 0.843
elif temperatura == 500:
    kd = 0.768
elif temperatura == 550:
    kd = 0.672
elif temperatura == 600:
    kd = 0.549
return kd

def ke(confiabilidade):
    if confiabilidade == 50:
        ke = 1
    elif confiabilidade == 90:
        ke = 0.897
    elif confiabilidade == 95:
        ke = 0.868
    elif confiabilidade == 99:
        ke = 0.814
    elif confiabilidade == 99.9:
        ke = 0.753
    elif confiabilidade == 99.99:
        ke = 0.702
    elif confiabilidade == 99.999:
        ke = 0.659
    elif confiabilidade == 99.9999:
        ke = 0.62
    return ke

kf = 1

def Se(Sut, acabamento, d, carga, temperatura, confiabilidade):
    return Sel(Sut) * ka(Sut, acabamento) * kb(d) * kc(carga) *
kd(temperatura) * ke(confiabilidade)

# Resultados dos critérios para fator de segurança e diâmetro

def Goodman(Sut, r, ressalto, in1, in2, Ma, d, Ta, acabamento, carga,
temperatura, confiabilidade, Mm, Tm):
    return (oal(Sut, r, ressalto, in1, in2, Ma, d, Ta) / Se(Sut,
acabamento, d, carga, temperatura,
                                                                    confiabilidade)
+ oml(Sut, r, ressalto, in1, in2, Mm, d,
Tm) / Sut) ** -1

def nvm(Sut, r, ressalto, in1, in2, Ma, d, Mm, Ta, Tm, Sy):
    return Sy / omax(Sut, r, ressalto, in1, in2, Ma, d, Mm, Ta, Tm)

def Soderberg(Sut, r, ressalto, in1, in2, Ma, d, Ta, Mm, Tm, acabamento,
carga, temperatura, confiabilidade, Sy):
    return (oal(Sut, r, ressalto, in1, in2, Ma, d, Ta) / Se(Sut,

```

```

acabamento, d, carga, temperatura,
                                                                    confiabilidade)
+ oml(Sut, r, ressalto, in1, in2, Mm, d,
Tm) / Sy) ** -1

'''def ASME(d, Kf, Ma, Se, Kfs, Ta, Mm, Tm, Sy, Sut, r, ressalto, in1, in2,
acabamento, carga, temperatura,
        confiabilidade):
    return (1 / 1000) * ((16 / (np.pi * d ** 3)) * (4 * (
        Kf(Sut, r, ressalto, in1, in2) * Ma / Se(Sut, acabamento,
d, carga, temperatura, confiabilidade)) ** 2 + 3 * (Kfs(Sut, r, ressalto,
in1, in2) *
        Ta / Se(Sut, acabamento,
d, carga, temperatura, confiabilidade)) ** 2 + 4 * (Kf(Sut, r, ressalto, in1,
in2) * Mm / Sy) ** 2 + 3 * (Kfs(Sut, r, ressalto, in1, in2) * Tm / Sy) **
2) ** (1 / 2)) ** (-1)
'''

def AGerber(Sut, r, ressalto, in1, in2, Ma, Ta):
    return (4 * (Kf(Sut, r, ressalto, in1, in2) * Ma) ** 2 + 3 * (Kfs(Sut,
r, ressalto, in1, in2) * Ta) ** 2) ** 0.5

def BGerber(Sut, r, ressalto, in1, in2, Mm, Tm):
    return (4 * (Kf(Sut, r, ressalto, in1, in2) * Mm) ** 2 + 3 * (Kfs(Sut,
r, ressalto, in1, in2) * Tm) ** 2) ** 0.5

def Gerber(Sut, r, ressalto, in1, in2, Ma, Ta, Mm, Tm, acabamento, d,
carga, temperatura, confiabilidade):
    if AGerber(Sut, r, ressalto, in1, in2, Ma, Ta) == 0:
        return "Devido a ser torção pura para um veio em equilíbrio, não
foi possível calcular o coeficiente de Gerber."
    else:
        return (1 / 1000) * ((8 * AGerber(Sut, r, ressalto, in1, in2, Ma,
Ta) / (
            np.pi * Se(Sut, acabamento, d, carga, temperatura,
confiabilidade) * d ** 3)) * (1 + (1 + (
                2 * BGerber(Sut, r, ressalto, in1, in2, Mm, Tm) *
Se(Sut, acabamento, d, carga, temperatura,
confiabilidade) / (
                    AGerber(Sut, r, ressalto, in1, in2, Ma, Ta)
* Sut)) ** 2) ** 0.5)) ** (-1)

def Gerberen(Sut, r, ressalto, in1, in2, Ma, Ta, Mm, Tm, acabamento, d,
carga, temperatura, confiabilidade):
    if AGerber(Sut, r, ressalto, in1, in2, Ma, Ta) == 0:
        return "Due to pure torsion for a shaft in equilibrium, it wasn't
possible to calculate the Gerber coefficient."
    else:
        return (1 / 1000) * ((8 * AGerber(Sut, r, ressalto, in1, in2, Ma,
Ta) / (
            np.pi * Se(Sut, acabamento, d, carga, temperatura,
confiabilidade) * d ** 3)) * (1 + (1 + (
                2 * BGerber(Sut, r, ressalto, in1, in2, Mm, Tm) *
Se(Sut, acabamento, d, carga, temperatura,

```

```

confiabilidade) / (
    AGerber(Sut, r, ressalto, in1, in2, Ma, Ta)
* Sut)) ** 2) ** 0.5)) ** (-1)

def fator(n, Sut, r, ressalto, in1, in2, Ma, d, Ta, acabamento, carga,
temperatura, confiabilidade, Mm, Tm, Sy):
    if Goodman(Sut, r, ressalto, in1, in2, Ma, d, Ta, acabamento, carga,
temperatura, confiabilidade, Mm, Tm) <= ηvm(
        Sut, r, ressalto, in1, in2, Ma, d, Mm, Ta, Tm, Sy) > n:
        resposta = Goodman(Sut, r, ressalto, in1, in2, Ma, d, Ta,
acabamento, carga, temperatura, confiabilidade, Mm, Tm)
    elif Goodman(Sut, r, ressalto, in1, in2, Ma, d, Ta, acabamento, carga,
temperatura, confiabilidade, Mm, Tm) > ηvm(
        Sut, r, ressalto, in1, in2, Ma, d, Mm, Ta, Tm, Sy) > n:
        resposta = Soderberg(Sut, r, ressalto, in1, in2, Ma, d, Ta, Mm, Tm,
acabamento, carga, temperatura, confiabilidade, Sy)
    else:
        resposta = n
    return resposta

def fatordeseg(n, Sut, r, ressalto, in1, in2, Ma, d, Ta, acabamento, carga,
temperatura, confiabilidade, Mm, Tm, Sy):
    if Goodman(Sut, r, ressalto, in1, in2, Ma, d, Ta, acabamento, carga,
temperatura, confiabilidade, Mm, Tm) <= ηvm(
        Sut, r, ressalto, in1, in2, Ma, d, Mm, Ta, Tm, Sy) > n:
        resposta = "O fator de segurança de Goodman é indicado. Falha por
escoamento no primeiro ciclo de Von Mises foi verificado e Goodman foi
aprovado! Verificar as sugestões do programa."
    elif Goodman(Sut, r, ressalto, in1, in2, Ma, d, Ta, acabamento, carga,
temperatura, confiabilidade, Mm, Tm) > ηvm(
        Sut, r, ressalto, in1, in2, Ma, d, Mm, Ta, Tm, Sy) > n:
        resposta = "O fator de Goodman falhou na checagem de falha por
escoamento, Soderberg é indicado! Verificar as sugestões do programa."
    else:
        resposta = "Todos os fatores indicam falha por fadiga do material,
de acordo com seu mínimo tolerável. Verificar as sugestões do programa."
    return resposta

def fatordesegen(n, Sut, r, ressalto, in1, in2, Ma, d, Ta, acabamento,
carga, temperatura, confiabilidade, Mm, Tm, Sy):
    if Goodman(Sut, r, ressalto, in1, in2, Ma, d, Ta, acabamento, carga,
temperatura, confiabilidade, Mm, Tm) <= ηvm(
        Sut, r, ressalto, in1, in2, Ma, d, Mm, Ta, Tm, Sy) > n:
        resposta = "Goodman's safety factor is indicated. Failure by
yielding was checked using Von Mises and Goodman passed! Check program
suggestions."
    elif Goodman(Sut, r, ressalto, in1, in2, Ma, d, Ta, acabamento, carga,
temperatura, confiabilidade, Mm, Tm) > ηvm(
        Sut, r, ressalto, in1, in2, Ma, d, Mm, Ta, Tm, Sy) > n:
        resposta = "Soderberg's safety factor is indicated, since Von Mises
indicates failure by yielding for Goodman's safety factor! Check program
suggestions."
    else:
        resposta = "All the safety factor point to a fatigue failure,
according with your tolerable minimum safety factor value. Check program
suggestions."
    return resposta

def infofatordeseg(n, Sut, r, ressalto, in1, in2, Ma, d, Ta, acabamento,

```

```

carga, temperatura, confiabilidade, Mm, Tm, Sy):
    if 1 >= fator(n, Sut, r, ressalto, in1, in2, Ma, d, Ta, acabamento,
carga, temperatura, confiabilidade, Mm, Tm, Sy):
        resposta = "O fator de segurança é muito baixo, há o risco de falha
por fadiga. Sugere-se as seguintes opções: aumentar o diâmetro, trocar para
um material com mais resistência, acabamento com maior dureza superficial."
        elif 1 <= fator(n, Sut, r, ressalto, in1, in2, Ma, d, Ta, acabamento,
carga, temperatura, confiabilidade, Mm, Tm, Sy) < 1.5:
            resposta = "Um fator de segurança entre 1 e 1.5 é indicado para
materiais excepcionalmente confiáveis sob condições controladas com cargas
e tensões determinadas facilmente. Sugere-se aumentar o fator de segurança,
para isso, tem as " \
                "seguintes opções: aumentar o diâmetro, trocar para um
material com mais resistência, acabamento com maior dureza superficial."
            elif 1.5 <= fator(n, Sut, r, ressalto, in1, in2, Ma, d, Ta, acabamento,
carga, temperatura, confiabilidade, Mm, Tm, Sy) <= 2:
                resposta = "Um fator de segurança entre 1.5 e 2 é indicado para
materiais bem conhecidos sob condições razoavelmente constantes com cargas
e tensões determinadas facilmente. Para maior segurança, sugere-se aumentar
o fator de segurança para acima de 2," \
                    " para isso, tem as seguintes opções: aumentar o
diâmetro, trocar para um material com mais resistência, acabamento com
maior dureza superficial."
            elif 2 <= fator(n, Sut, r, ressalto, in1, in2, Ma, d, Ta, acabamento,
carga, temperatura, confiabilidade, Mm, Tm, Sy) <= 2.5:
                resposta = "Um fator de segurança entre 2 e 2.5 é o indicado para
materiais conhecidos e em ambientes comuns com cargas e tensões que podem
ser determinadas. É a faixa indicada por este programa para situações em
geral."
            elif 2.5 < fator(n, Sut, r, ressalto, in1, in2, Ma, d, Ta, acabamento,
carga, temperatura, confiabilidade, Mm, Tm, Sy) <= 3:
                resposta = "Um fator de segurança entre 2.5 e 3 é o indicado para
materiais não-testados sob condições médias de ambientes, de cargas e
tensões. De acordo com a sua situação, ele pode ter um valor menor, essa
decisão é do projetista ou do engenheiro responsável." \
                    "Com algumas mudanças, o veio (eixo) pode ter o seu
custo de fabricação reduzido, para isso, sugere-se as seguintes opções:
diminuir o diâmetro, trocar para um material com menor resistência,
acabamento superficial de menor dureza."
            elif 3 < fator(n, Sut, r, ressalto, in1, in2, Ma, d, Ta, acabamento,
carga, temperatura, confiabilidade, Mm, Tm, Sy):
                resposta = "Um fator de segurança maior do que 3 é indicado para
materiais não-testados sob condições médias de ambientes, de cargas e
tensões. De acordo com a sua situação, ele pode ter um valor menor, essa
decisão é sua." \
                    "Com algumas mudanças, o veio (eixo) pode ter o seu
custo de fabricação reduzido, para isso, sugere-se as seguintes opções:
diminuir o diâmetro, trocar para um material com menor resistência,
acabamento superficial de menor dureza."
        else:
            resposta = ".."
    return resposta

def infofatordeesegen(n, Sut, r, ressalto, in1, in2, Ma, d, Ta, acabamento,
carga, temperatura, confiabilidade, Mm, Tm, Sy):
    if 1 >= fator(n, Sut, r, ressalto, in1, in2, Ma, d, Ta, acabamento,
carga, temperatura, confiabilidade, Mm, Tm, Sy):
        resposta = "The safety factor is too low, there is risk of fatigue
failure. The following options are suggested: increase the diameter, change

```

```

to a material with more resistance, treatment with greater surface
hardness."
    elif 1 <= fator(n, Sut, r, ressalto, in1, in2, Ma, d, Ta, acabamentoo,
carga, temperatura, confiabilidade, Mm, Tm, Sy) < 1.5:
        resposta = "A safety factor between 1 and 1.5 is indicated for
exceptionally reliable materials under controlled conditions with easily
determined loads and stresses. It is suggested to increase the safety
factor value," \
            " the following options are suggested: increase the
diameter, change to a material with more resistance, treatment with greater
surface hardness."
    elif 1.5 <= fator(n, Sut, r, ressalto, in1, in2, Ma, d, Ta, acabamentoo,
carga, temperatura, confiabilidade, Mm, Tm, Sy) <= 2:
        resposta = "A safety factor between 1.5 and 2 is indicated for
well-know materials under fairly constant conditions with easily determined
loads and stresses. For better safety, it is suggested to increase the
safety factor value above 2, " \
            "for this, you have the following suggetions: increase
the diameter, change to a material with more resistance, treatment with
greater surface hardness. "
    elif 2 <= fator(n, Sut, r, ressalto, in1, in2, Ma, d, Ta, acabamentoo,
carga, temperatura, confiabilidade, Mm, Tm, Sy) <= 2.5:
        resposta = "A safety factor between 2 and 2.5 is suitable for known
materials and in common environments with loads and stresses that can be
determined. It is the range indicated by this program for general
situations."
    elif 2.5 < fator(n, Sut, r, ressalto, in1, in2, Ma, d, Ta, acabamentoo,
carga, temperatura, confiabilidade, Mm, Tm, Sy) <= 3:
        resposta = "A safety factor between 2.5 and 3 is suitable for
untested materials under average environment, load and stress conditions.
According on your situation, it may have a lower value, but that is a
decision that the designer or engineer should take it." \
            "With some changes, the shaft can have its manufacturing
cost reduced, for this, the following options are suggested: reduce the
diameter, change to a material with less resistance, treatment with lower
surface hardness"
    elif 3 < fator(n, Sut, r, ressalto, in1, in2, Ma, d, Ta, acabamentoo,
carga, temperatura, confiabilidade, Mm, Tm, Sy):
        resposta = "A safety factor bigger than 3 is indicated for untested
materials under average environment, loads and stresses conditions.
According on your situation, it may have a lower value, but that is a
decision that the designer or engineer should take it." \
            "With some changes, the shaft can have its manufacturing
cost reduced, for this, the following options are suggested: reduce the
diameter, change to a material with less resistance, treatment with lower
surface hardness"
    else:
        resposta = ".."
    return resposta

def dGoodman(n, r, ressalto, in1, in2, acabamentoo, d, carga, temperatura,
confiabilidade, Ma, Kfs, Ta, Mm, Tm, Se, Sut):
    return 10 * ((1 / Se(Sut, acabamentoo, d, carga, temperatura,
confiabilidade)) * (
        4 * (Kf(Sut, r, ressalto, in1, in2) * Ma) ** 2 + 3 * (
            Kfs(Sut, r, ressalto, in1, in2) * Ta) ** 2) ** 0.5 + (1
/ Sut) * (
        4 * (Kf(Sut, r, ressalto, in1, in2) * Mm) **
2 + 3 * (

```

```

                Kfs(Sut, r, ressalto, in1, in2) * Tm) **
2) ** (1 / 2)) * (16 * n / np.pi) ** (1 / 3)

def dSoderberg(n, Sut, acabamento, d, carga, temperatura, confiabilidade,
r, ressalto, in1, in2, Ma, Ta, Mm, Tm, Se,
                Sy):
    return 10 * (((1 / Se(Sut, acabamento, d, carga, temperatura,
confiabilidade)) * (
        4 * (Kf(Sut, r, ressalto, in1, in2) * Ma) ** 2 + 3 * (
            Kfs(Sut, r, ressalto, in1, in2) * Ta) ** 2) ** 0.5 + (1
/ Sy) * (
                4 * (Kf(Sut, r, ressalto, in1, in2) * Mm) **
2 + 3 * (
                    Kfs(Sut, r, ressalto, in1, in2) * Tm) **
2) ** (1 / 2)) * (16 * n / np.pi) ** (1 / 3)

def dvm(n, Sut, r, ressalto, in1, in2, Ma, Ta, Mm, Tm, Sy):
    return (((1 / ((np.pi * (Sy / n)) ** 2)) * ((32 * Kf(Sut, r, ressalto,
in1, in2) * (Mm + Ma)) ** 2 + 3 * (
        16 * Kfs(Sut, r, ressalto, in1, in2) * (Tm + Ta) ** 2)) **
(1 / 6)) * 10

'''def dASME(n, Sut, r, ressalto, in1, in2, Ma, acabamento, d, carga,
temperatura, confiabilidade, Ta, Mm, Tm, Sy):
    return 10 * ((16 * n / np.pi) * (4 * (
        Kf(Sut, r, ressalto, in1, in2) * Ma / Se(Sut, acabamento,
d, carga, temperatura,
                confiabilidade))
** 2 + 3 * (
                    Kfs(Sut, r, ressalto, in1,
in2) * Ta / Se(Sut, acabamento, d, carga,
temperatura,
confiabilidade)) ** 2 + 4 * (
                    Kf(Sut, r, ressalto, in1,
in2) * Mm / Sy) ** 2 + 3 * (
                    Kfs(Sut, r, ressalto, in1,
in2) * Tm / Sy) ** 2) ** 0.5) ** (1 / 3)'''

def dGerber(Sut, r, ressalto, in1, in2, Ma, Ta, Mm, Tm, n, acabamento, d,
carga, temperatura, confiabilidade):
    if AGerber(Sut, r, ressalto, in1, in2, Ma, Ta) == 0:
        return 'Devido a ser torção pura para um veio em equilíbrio, não
foi possível calcular o diâmetro por Gerber.'
    else:
        return 10 * ((8 * n * AGerber(Sut, r, ressalto, in1, in2, Ma, Ta) /
(
            np.pi * Se(Sut, acabamento, d, carga, temperatura,
confiabilidade))) * (1 + (1 + (
                2 * BGerber(Sut, r, ressalto, in1, in2, Mm, Tm) *
Se(Sut, acabamento, d, carga, temperatura,
confiabilidade) / (
                    AGerber(Sut, r, ressalto, in1, in2, Ma, Ta)
* Sut)) ** 2) ** 0.5)) ** (1 / 3)

```

```

def diameter(n, r, ressalto, in1, in2, acabamento, d, carga, temperatura,
confiabilidade, Ma, Ta, Mm, Tm, Sy, Sut):
    if dGoodman(n, r, ressalto, in1, in2, acabamento, d, carga,
temperatura, confiabilidade, Ma, Kfs, Ta, Mm, Tm, Se,
                Sut) >= dvm(n, Sut, r, ressalto, in1, in2, Ma, Ta, Mm, Tm,
Sy):
        d = "O valor sugerido é o diâmetro de Goodman, falha de escoamento
foi checada pelo critério de Von Mises e Goodman foi aprovado. Verificar as
sugestões do programa."
    else:
        d = "Há risco de falha por escoamento, portanto, o diâmetro
sugerido é o pelo critério de Soderberg. Verificar as sugestões do
programa."
    return d

def diameteren(n, r, ressalto, in1, in2, acabamento, d, carga, temperatura,
confiabilidade, Ma, Ta, Mm, Tm, Sy, Sut):
    if dGoodman(n, r, ressalto, in1, in2, acabamento, d, carga,
temperatura, confiabilidade, Ma, Kfs, Ta, Mm, Tm, Se,
                Sut) >= dvm(n, Sut, r, ressalto, in1, in2, Ma, Ta, Mm, Tm,
Sy):
        d = "The suggested value is the diameter by Goodman, failure by
yielding was checked using Von Mises' criteria and Goodman was approved.
Check program suggestions."
    else:
        d = "Soderberg's diameter is suggested, since Von Mises indicates
failure by yielding for Goodman's diameter. Check program suggestions."
    return d

def infogeralptd():
    return "Os critérios usados para o cálculo são conhecidos na literatura
e indústria, ASME e Gerber são mais recentes e menos conservadores, logo, a
análise é feita entre Goodman e Soderberg."
def infogeralend():
    return "The criterias used for the calculus are well know in the
literature and industry, ASME and Gerber are more recently and less
conservatives, so the analysis is between Goodman and Soderberg."
def infogeralptn():
    return "O valor adotado para o fator de segurança depende da aplicação
e da literatura usada, de maneira geral, este programa recomenda valores
entre 2 e 2.5. A decisão final é do projetista ou engenheiro responsável."
def infogeralenn():
    return "The value adopted for the safety factor depends on the
application and the literature used, for this program the range recomended
is between 2 and 2.5. The final decision rests with the responsible
designer or engineer."

```