



A INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE USINAGEM NO TEMPO DE VIDA DE FADIGA EM SEMIEIXOS DE PROTÓTIPOS TIPO BAJA

*The Influence of the machining process on the fatigue lifetime
of half shafts on baja type prototypes*

Vitória G. C. Salles ^{1*} e Pablo M. M. Pires ^{2*}

¹ Universidade Federal de São João del Rei (UFSJ), São João del Rei – MG.

² Equipe Komiketo BAJA – UFSJ.

*Autor correspondente: goncalvesvitoria3@aluno.ufsj.edu.br, pires.pablo@equipekomiketobaja.com.br

RESUMO

As falhas mecânicas em componentes ocorrem em sua maioria devido a cargas que variam no tempo, o que caracteriza a fadiga, que se tornou a mais comum a nível industrial, sendo responsável por mais de 70% das falhas. O termo fadiga é utilizado porque esse tipo de falha ocorre normalmente após um longo período sob tensões repetitivas ou ciclos de deformações. Este estudo busca analisar de maneira concisa e sistêmica o fenômeno de fadiga aplicado a uma determinada falha inesperada de um componente da transmissão (semieixo) do protótipo desenvolvido por membros de uma equipe de competição de BAJA, Equipe Komiketo Baja – UFSJ. O dimensionamento e as análises estruturais foram feitas em paralelo com experimentações computacionais de métodos numéricos, as quais foram de imediato satisfatórias quando analisado a influência de estrias como altos concentradores de tensões localizadas. O estudo vai além da criticidade de distribuição de tensões em estrias, mostrando o quanto o processo de usinagem é relevante na área estrutural, uma vez que este pode provocar falhas induzidas por erro de fabricação e uma redução drástica no tempo de vida de peças essenciais para protótipos do tipo Mini Baja.

Palavras-chave: Fadiga, BAJA, Usinagem, Falhas mecânicas.

ABSTRACT

Mechanical failures in components mostly occur due to time-varying loads, which characterize fatigue, the most common cause at the industrial level, accounting for over 70% of failures. The term fatigue is used because this type of failure usually occurs after a long period under repetitive stresses or deformation cycles. This study aims to concisely and systematically analyze the phenomenon of fatigue as applied to an unexpected failure of a transmission component (driveshaft) in the prototype developed by members of the BAJA competition team, Komiketo Baja Team – UFSJ. The design and structural analyses were carried out in parallel with computational experiments using numerical methods, which were immediately satisfactory in analyzing the influence of splines as high stress concentrators. The study goes beyond the criticality of stress distribution in splines, demonstrating the relevance of the machining process in the structural area, as it can cause failures induced by manufacturing errors and significantly reduce the lifespan of essential parts for Mini Baja prototypes.

Keywords: Fatigue, BAJA, Machining, Mechanical failures.

1. Introdução

O termo fadiga pode ser definido como um processo pelo qual mudanças progressivas e localizadas ocorrem no material sujeito a tensões ou deformações cíclicas [1]. Além disso, a fadiga é de natureza catastrófica e geralmente não demonstra muitos indicadores da sua presença, ocorrendo a fratura de forma repentina e sem nenhum aviso prévio.

A falha por fadiga em componentes mecânicos tem início nos pontos mais críticos, onde há a presença de microtrincas oriundas de processos de fabricação/manufatura que se propagam diante de regiões concentradoras de tensões, como furos, ranhuras, quinas e outros tipos de descontinuidades na geometria. Estas microtrincas podem ser caracterizadas como externas ou internas, sendo o primeiro caso oriundo do processo de usinagem ou geometria da peça; já o segundo caso, este mais raro, está diretamente ligado a singularidades e descontinuidades da microestrutura cristalina do material [2].

Objeto de estudo deste trabalho, os eixos de transmissão, são utilizados para transmissão de potência e/ou torque através de engrenagens, polias, chavetas, embreagens ou rodas dentadas.

Além das cargas estáticas, os eixos estão submetidos a uma série de carregamentos dinâmicos que podem levar a falha por fadiga, que se tornou a causa mais comum de falhas em eixos de máquinas rotativas, iniciando-se a partir de uma trinca nos pontos de concentração de tensão, como estrias ou rasgos de chaveta.

No presente caso, um semi-eixo traseiro de um protótipo off road, pertencente a uma equipe de competição BAJA SAE veio a falhar de maneira repentina durante um teste do veículo. O componente foi fabricado em torno convencional e as estrias feitas em fresa CNC, ambos processos feitos pelos próprios membros da equipe, o que gerou diversas imperfeições, tanto no corpo da peça quanto na região das estrias, fator preocupante pois elas por si só já são grandes concentradores de tensão em componentes mecânicos.

Como pode-se perceber na figura 1, inúmeras marcas de desgastes e ranhuras, oriundas do processo de fabricação, caracterizam a região com diversos concentradores de tensão, além da possibilidade de haver microtrincas, as quais podem comprometer a integridade da peça.

Ademais, fica claro a localidade do ponto crítico onde a trinca se inicia e, posteriormente, se

propaga, gerando um processo de falha por fadiga.



Figura 1. Falha no Semi-eixo.

1.1. Objetivo Geral

No presente trabalho, objetiva-se compreender o comportamento do fenômeno da fadiga aplicado a componentes expostos à carregamentos dinâmicos em protótipos do tipo BAJA. No mais, busca-se entender e demonstrar o quão impactante fenômenos secundários como qualidade de manufatura, acabamento superficial e montagem dos componentes podem influenciar no tempo de vida das peças. Exemplificando com o semi-eixo apresentado no contexto dessa obra, visto que o componente falhou repentinamente após poucas horas de rodagem, de forma que há a hipótese de que a falha por fadiga foi induzida por um mau processo de fabricação.

1.2. Objetivo Específico

Os métodos utilizados para análise da falha envolvem:

- Descrever o dimensionamento do componente, por meio de métodos analíticos e com auxílio de Softwares;
- Validar o Fator de Segurança de fadiga por meio de simulações computacionais;
- Inserir no modelo um entalhe na região crítica das estrias;
- Analisar por meio do método de elementos finitos;
- Comparar os resultados finais.

2. Metodologia

O sistema de Powertrain do protótipo de Mini BAJA KB09 é formado pelo motor Briggs & Stratton® OHV Vanguard Model 19 de 10HP. Para relação primária, temos uma CVT (Continuously Variable

Transmission)), do modelo Gaged® GX9 e para transmissão secundária temos um sistema de redução por engrenagens.

Para a transmissão final de força, foi utilizado um semi-eixo rígido, escalonado. Sua conexão com a caixa de redução é feita por uma junta tripóide deslizante, fixada por meio de estrias, já a saída para roda é feita por meio de uma homocinética, também contando com o interior estriado.

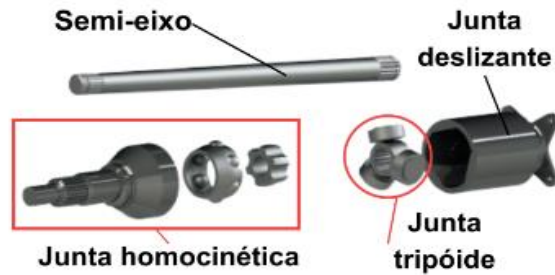


Figura 2. Driveline traseiro esquerdo.

O projeto do semi-eixo é feito com base no torque final máximo, que é calculado a partir da seguinte equação:

$$T_{\text{máx}} = T_m * R_{\text{cvt}} * E_{\text{cvt}} * R_r. \quad (1)$$

Onde **T_{máx}** é o Torque final máximo; **T_m** o Torque do motor; **R_{cvt}** a Relação máxima desenvolvida pela CVT; **E_{cvt}** a Eficiência da CVT e por fim **R_r** sendo a Relação do sistema de redução.

Levando em consideração que o componente em questão está sempre sujeito a alteração do torque, e buscando uma maior precisão em seu dimensionamento, foi feita a aquisição de dados utilizando um sensor indutivo PNP e rodas fônicas, para captação da curva de relação da CVT por rpm.



Figura 3 e 4. Captação da Curva Característica da CVT.

A partir disso, diversos materiais foram estudados a fim de caracterizá-los em aspectos como densidade, resistência e valor. No processo de seleção, foi utilizado a metodologia de ASHBY [3] em conjunto com o Software Ansys® Granta EduPack, para maximizar a resistência, minimizar a massa e priorizar o menor custo. Além disso, fatores como afinidade com tratamentos térmicos, disponibilidade no mercado e facilidade de usinagem foram analisados por meio do método comparativo.

Logo o material escolhido foi o AÇO SAE 8640, com enfoque no processo de têmpera, o qual consiste em aquecer o mesmo até a temperatura superior à zona crítica, próxima à 1100°C, até que haja a transformação de sua microestrutura na fase austenítica e posteriormente resfriamento rápido, submergindo o corpo em água, a fim de evitar quaisquer transformações/modificações térmicas indesejadas (ferrita, cementita, perlita). Podemos concluir que o mesmo trata-se de um material com propriedades mecânicas bem características. As propriedades químicas gerais do aço utilizado na fabricação do semi-eixo estão descritas a seguir:

	ELEMENTO	CONCENTRAÇÃO (%)
AÇO AISI 8640	Cromo (Cr)	0,40 - 0,60
	Níquel (Ni)	0,40 - 0,70
	Molibdênio (Mo)	0,15 - 0,25
	Manganês (Mn)	0,75 - 1,00
	Carbono (C)	0,38 - 0,43
	Silício (Si)	0,15 - 0,30
	Enxofre (S)	0,04 (máx.)
	Fósforo (P)	0,035(máx.)
	Ferro (Fe)	Restante (100 - elementos)

Figura 5. Composição química Aço SAE 8640.

No dimensionamento, visa-se garantir a confiabilidade das peças, desta forma foi definido o fator de segurança ideal com base na Metodologia de Collins [4], como pode ser visto na Figura 6, e tolerâncias/ajustes para o de projeto do componente [5].

Em conjunto, utilizou-se o Software KISSsoft® que nos permite efetuar uma modelagem fiel do componente, e como dados de entrada utilizamos o torque máximo, o espectro de cargas da nossa CVT e a curva de torque potência do motor, além das propriedades do material utilizado. Como resultados obtivemos dados como Tensão máxima suportada, o fator de segurança real estático e de fadiga, além da

vida útil, em horas, do componente.

Semi-Eixo	
RATING FACTOR	RN
Exatidão das Condições de Contorno	-1
Precisão dos Cálculos de Tensões e Fatores de Severidade	-3
Condições de Resistência à Falha do Material Selecionado Segundo o Modo de Falha Adequado	-2
Necessidade de Restrição de Custo	1
Necessidade de Restrição de Massa	1
Necessidade de Restrição de Espaço	0
Gravidade das Consequências em Caso de Falha Hipotética	4
Qualidade de Fabricação	3
Condições de Operação	2
Qualidade das Inspeções/Manutenções	-2
FATOR TOTAL (t) =	
3	
RESULTADOS	
FATOR DE SEGURANÇA DE COLLINS	2,96

Figura 6. Fator de Segurança por Collins.

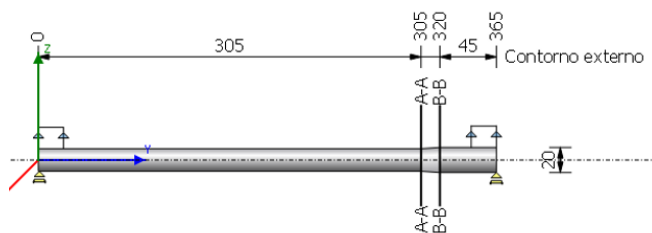


Figura 7. Modelagem do componente no KISSsoft.

O dimensionamento das estrias do componente também é feito pelo Software, optou-se por estrias de dentes retos à 45° [6] considerando o diâmetro do eixo, do cubo a espessura dos dentes e as cargas a qual o componente está sujeito.

Por fim temos a geometria final da peça, com a parte mais à esquerda do semi-eixo, a qual fica coberta por uma coifa homocinética com 18mm.

Já do lado direito, com 20mm de diâmetro, onde o semieixo é preso em uma trizeta, e esta, por sua vez, presa a uma tulipa que é acoplada ao eixo do redutor.



Figura 8. Modelo em CAD do componente.

Em seguida, visou-se analisar e validar a vida útil e a resistência à fadiga do componente [7], por meio do Método de Elementos Finitos, utilizando o Software Altair HyperLife®.

Os primeiros estudos em relação ao comportamento de materiais metálicos a esforços

cíclicos foram feitos por Wöhler [8] em 1860, trabalhando com eixos que estavam sujeitos a flexão rotativa. Os diagramas de Wöhler (curvas S - N), representam os resultados obtidos nos ensaios de fadiga, baseado no registro da tensão aplicada (S) em função do número de ciclos (N) para a ruptura [9].

O software utilizado contém uma gama de curvas para os materiais mais comuns na indústria, nos permitindo utiliza-las nas análises realizadas e aplicar os fatores de correção de acordo com a realidade de nosso componente. A curva S-N do Aço SAE 8640 utilizada pode ser vista na Figura a seguir.

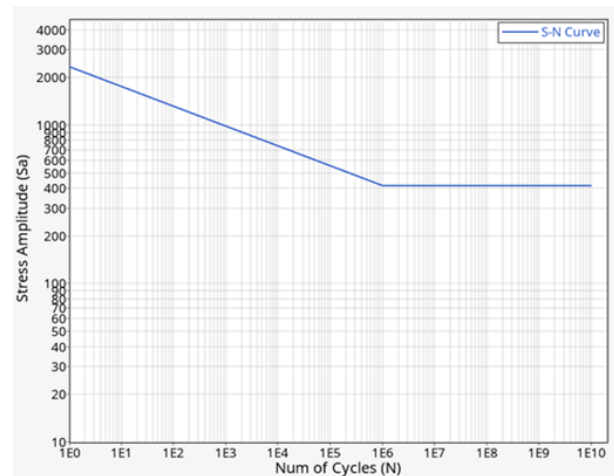


Figura 9. Curva S-N Aço SAE 8640.

Com o modelo e o projeto do componente validado, após cerca de 18 horas de rodagem a peça falhou de maneira repentina durante um teste do protótipo, em uma pista a qual simula a prova de enduro em competições das quais a equipe expõe o carro ao uso mais extremo possível, possuindo diversos obstáculos como: valas, rampas, sobreposição de pneus, aclives e valetas alternadas.

Mais precisamente, no momento que antecedeu tal falha, o protótipo havia acabado de transpor um obstáculo de pneus preenchidos com terra em seu interior, o qual passa de maneira abrupta, exemplificado na figura 10.

Logo, foi aplicada a metodologia de Análise de Falhas no componente, definindo modos de falhas e soluções com o auxílio da ferramenta FMEA (Análise de Modos de Falha e seus Efeitos) [10]. Primeiramente, vale ressaltar que, por meio de apoio bibliográfico em algumas obras, afirmamos a possibilidade de falha por fadiga induzida por erros no processo de fabricação da peça, usinagem convencional feita por membros da

equipe; haja vista que nunca antes - 12 anos de existência da equipe - havia ocorrido este tipo de falha.



Figura 10. Protótipo do tipo Mini Baja transpondo obstáculo.

3. Resultados

Utilizando a equação 1 e considerando o Torque máximo do motor como 2,04 kgf.m, a Relação máxima desenvolvida pela CVT como 3.7, a Eficiência de 85% da CVT e a Relação do sistema de redução de 8.1-1, chegamos ao torque final máximo de 51,96 kgf.m

Com a captação em pista da curva característica da CVT utilizada no protótipo em conjunto com a curva de Torque e Potência do motor, disponibilizado pelo próprio fabricante, foi feito o mapeamento do espectro de relações da CVT. As curvas utilizadas podem ser vistas nas figuras a seguir.

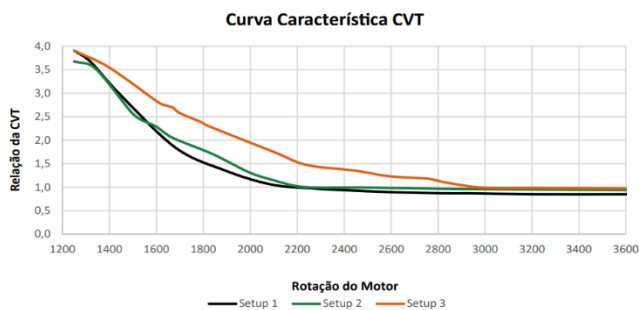


Figura 11. Curva característica da CVT.

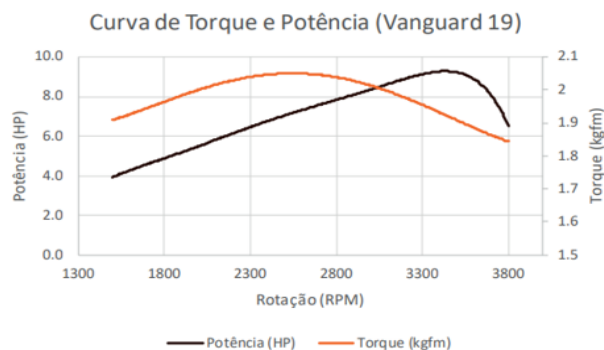


Figura 12. Curva de Torque e Potência do Motor.

Com os dados adquiridos, obteve-se a porcentagem de trabalho da CVT em cada relação, garantindo maior precisão da variação do torque final, que se equivale ao torque no componente analisado. Os resultados podem ser vistos na imagem 13.

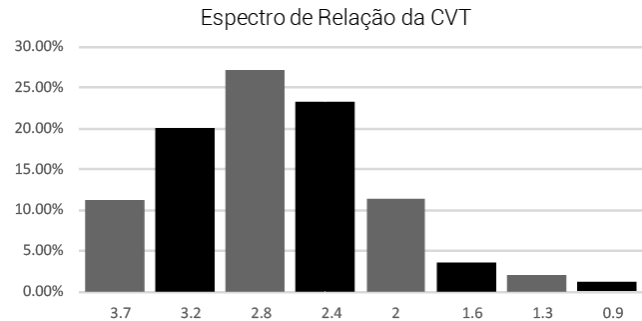


Figura 13. Espectro de Cargas da CVT.

Dessa forma deu-se início ao desenvolvimento do componente, com o auxílio do Software KISSsoft, e os resultados obtidos podem ser vistos na Tabela 1.

Tabela 1. Resultados KISSsoft.

/	Semi-eixo	Estrias
F.S estático	1.69	1.95
F.S fadiga	3.11	-
Deflexão	0.77µm	-

A análise de fadiga por elementos finitos foi feita tendo como base o resultado de uma análise linear estática considerando um carregamento unitário, visto que o método utilizado pelo software HyperLife é o de Sobreposição Linear, que realiza a multiplicação do carregamento da análise linear com o adicionado para a análise de fadiga.

Através dos diagramas da Figura 14, é possível observar as linhas de diferentes critério de falha para análises de fadiga, onde a cima dos limites demarcados ocorrerá falha, já nas zonas cobertas por seus respectivos critérios são áreas onde operações com cargas variáveis poderão ocorrer sem falha por fadiga, considerando-se vida infinita para o componente.

Nota-se que o critério de Soderberg garante a confiabilidade até mesmo contra a falha por escoamento, porém é o mais conservador dentre os três apresentados, pois apresenta a menor região segura contra falha por fadiga.

Já o critério modificado de Goodman é menos conservador que o critério de Soderberg e não

considera a falha por escoamento do material, pois afirma que a falha ocorrerá quando a tensão resultante atingir a resistência à fadiga do material [11], após ser corrigida pela tensão média, sendo necessário verificar o escoamento do material separadamente, no entanto, é muito bem aceito, devido principalmente a facilidade de aplicação e análise.

Crítérios que definem melhor as regiões de probabilidade de falha por fadiga são representados por parábolas como o de Gerber, porém sua aplicação é a mais complexa dentre os três critérios [12].

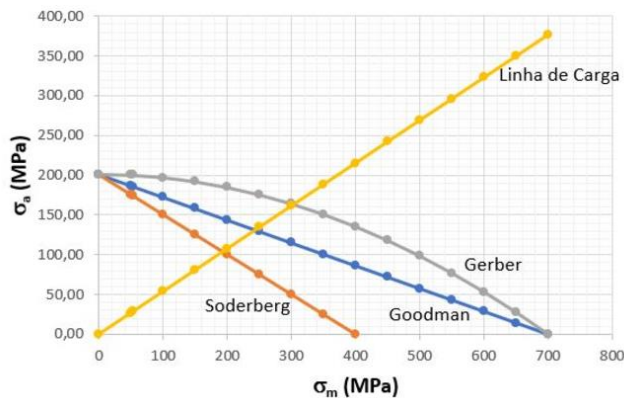


Figura 14. Diagrama dos critérios de falhas por fadiga.

Logo, o critério utilizado para análise do semi-eixo foi o de Goodman modificado, e com o output da linear estática e o histórico de carregamentos realizado a partir do espectro de cargas da CVT, pela sobreposição obtemos o fator de segurança para linha de Goodman.

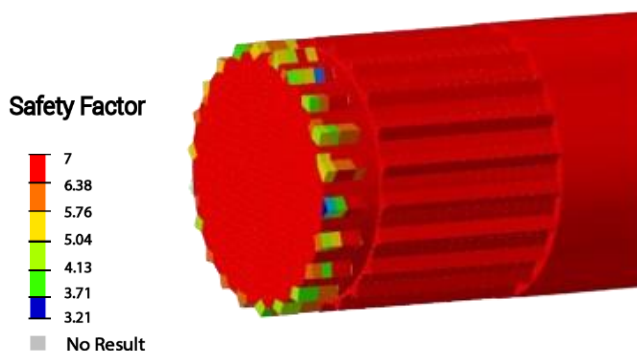


Figura 15. FS por Goodman pelo HyperLife.

O menor fator de segurança encontrado é de 3.21, em alguns pontos das estrias, devido principalmente a consideração do engaste dessa região. Porém ainda é superior ao fator de segurança ideal de Collins, definido previamente como 2.96. Validando

nosso componente para durabilidade.

Com o componente dimensionado levando em consideração o caso crítico estático e a análise de fadiga garantindo um fator de segurança aceitável contra a falha [13]. Era esperado que o componente suportasse as 200 horas de rodagem estipuladas como vida útil de nosso protótipo, porém, após 18 horas de rodagem, em um dos testes da equipe o componente falhou repentinamente, como mostra a figura 16.



Figura 16. Falha do Semi-eixo.

O resultado da aplicação da ferramenta FMEA pode ser visto abaixo:

Descrição da peça	SEMI-EIXO
Material	SAE 8640
Falha	Ruptura do componente
Efeito	Impossibilita o protótipo a rodar
Severidade	10
Causa	Fadiga induzida por erro de fabricação
Ocorrência	1
Deteção	10
Risco	100
Ação	Fabricar um novo componente
Responsáveis	PWT e Usinagem
Prazo	Até 10 dias.

Figura 17. FMEA do Semi-eixo.

Como complemento da ferramenta FMEA para análise da falha, podemos ver a evolução da falha no

componente e características indicativas do processo de falha por fadiga, como a presença das marcas de praia

valor da tensão foi de 234MPa, para próximo de 562MPa.

Além disso a análise por meio do HyperLife utilizando a mesmo CAD com a presença do entalhe, porém com um carregamento unitário teve como resultado o FS de 0.83. Indicando, por meio do critério de Goodman, que o componente falharia por fadiga.

4. Conclusões

No presente trabalho, foi apresentado diversos conceitos a respeito de falhas mecânicas por meio do fenômeno da fadiga, com foco a componentes expostos à carregamentos dinâmicos em protótipos do tipo BAJA.

No mais, foi explorado todo o ciclo de dimensionamento de um componente da equipe de competição Komiketo Baja, demonstrando a captação de dados de entrada, o processo de dimensionamento e validação utilizando de softwares. Onde obtivemos resultados positivos para garantir a confiabilidade da peça, porém, obteve-se uma fratura frágil com poucas horas de rodagem. Logo, foi observado que a falha seria por fadiga, devido principalmente a grande presença de marcas de praia no componente.

A peça em questão é de manufatura dos próprios integrantes da equipe, sendo usinada em torno convencional e as estrias feitas em fresa convencional. Com isso, observou-se que a trinca se propagou a partir de uma pequena ranhura localizada em meio as estrias, que se devia a um erro no processo de usinagem do componente que não era considerado no dimensionamento do mesmo.

O quão impactante fenômenos secundários como a qualidade de manufatura e acabamento superficial foi analisado por meio de simulações envolvendo o método de elementos finitos, comparando a tensão máxima em uma análise linear estática do componente, sem e com a presença de um entalhe. Além de comparar o Fator de segurança de fadiga nos mesmos casos, onde fica explícito o quanto um mau processo de fabricação pode afetar a vida útil de um componente.

No mais, a próxima análise a ser feita seria do acompanhamento da trinca, sendo o componente sujeito ao carregamento variável captado previamente, verificando o avanço da trinca e se caso tenha um componente novamente sujeito a erros de manufatura, o quanto o mesmo suporta rodar no protótipo até falhar por fadiga.

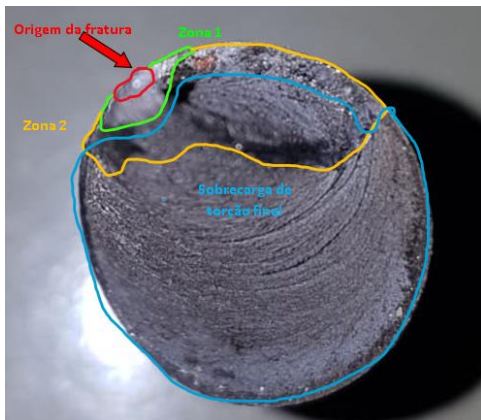


Figura 18. Caracterização da Falha por Fadiga no componente.

Visando analisar o impacto de um entalhe na região das estrias, pois como pode ser visto na figura 1, foi onde se iniciou a propagação da trinca no componente estudado. Realizou-se uma análise linear estática [14], considerando o engaste na região das estrias e a aplicação do torque máximo no corpo da peça. E outra considerando essas mesmas condições de contorno, porém com a presença do entalhe. Os respectivos resultados podem ser vistos nas figuras 19 e 20.

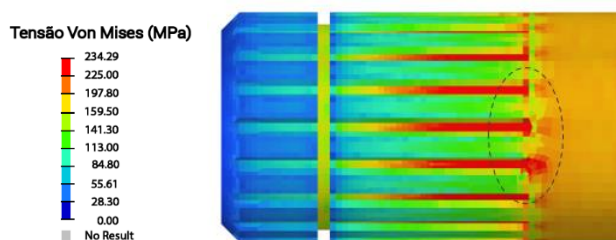


Figura 19. Resultado da Linear Estática.

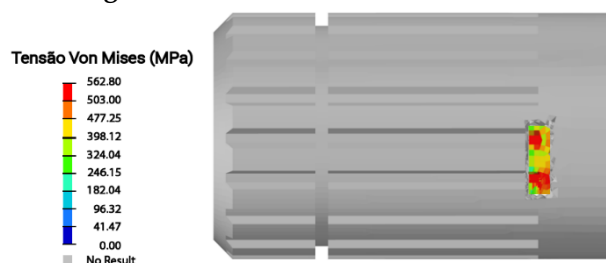


Figura 20. Resultado da Linear Estática com Entalhe.

Os resultados apresentados mostram o impacto de uma mínima falha de acabamento superficial, aumentando em cerca 119% a tensão máxima obtida, o

5. Agradecimentos

Gostaria de começar agradecendo a todos os integrantes da equipe Komiketo Baja, em especial aos do setor de Cálculo Estrutural, que me receberam ainda no primeiro período da faculdade e foram fundamentais para minha evolução dentro da engenharia. A todos meus amigos e familiares por todo apoio de sempre, sem vocês nada seria possível. E por fim ao meu orientador, Professor Maurício, pois acreditou no meu potencial e não desistiu do projeto mesmo em meio a todas dificuldades.

Referências

- [1] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E-1823-96: "Relating to Fatigue and Fracture Testing."
- [2] CALLISTER, William D.; RETHWISCH, J. D. G. CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS: UMA INTRODUÇÃO. 8. ed. [S.l.]: LTC, 2010. p. 1-845.
- [3] ASHBY, Michael F.: Materials Selection in Mechanical Design. 4. ed. Oxford: Butterworth Heinemann, 2011. Cap. 16. p. 417-438.
- [4] COLLINS, J. A." PROJETO MECÂNICO DE ELEMENTOS DE MAQUINAS – UMA PERSPECTIVA DE PREVENÇÃO DE FALHAS". 1a EDIÇÃO, EDITORA LTC. Rio de Janeiro, 2006, p235-248.
- [5] NBR 6158: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6158: Sistemas de Tolerâncias e Ajustes. Brasil 1995.
- [6] R. L. Norton, Projeto de máquinas. bookman editora, 2013.
- [7] John M. Barsom, Stanley T. Rolfe Fracture and fatigue control in structures: applications of fracture mechanics , 3 rd ed.
- [8] Dang Van, K. and Paradopoulos, I., 2014. High-Cycle Metal Fatigue. Vienna: Springer Wien.
- [9] Lee, Y.-L. (2005) Fatigue testing and analysis theory and Practice. Amsterdam: Elsevier Butterworth-Heinemann.
- [10] Pereira, G. R.; Menezes, M. A.; Baldissera, A.; Roque, C. B. Aplicação da metodologia FMEA no projeto do conjunto de powertrain de um veículo baja SAE. In: XXXIV Congresso de Iniciação Científica da Unesp, 2022, Ilha Solteira -SP. Disponível em: < www.even3.com.br/Anais/XXXIVCICUNESP/607103-APLICACAO-DA-METODOLOGIA-FMEA-NO-PROJETO-DO-CONJUNTO-DE-POWERTRAIN-DE-UM-VEICULO-BAJA-SAE>. Acesso em: 26 de outubro de 2023.
- [10] Rosa, Edson. Análise de Resistência Mecânica – Mecânica da Fratura e Fadiga. UFSC, 2002.
- [11] JOSÉ EDUARDO SALGUEIRO LIMA. Determinação dos coeficientes de segurança pelo método S-N através das curvas de Goodman, Soderberg e Gerber. Disponível em: file:///C:/Users/User/Desktop/thiago_assumpcao,+685-2051-1-RV.pdf. Acesso em: 13 ago. 2024.
- [12] HIBBELER, R.C. Resistência dos Materiais, 7 ed, EDITORA PEARSON, São Paulo, 2009.
- [13] Yan, Lawrence Tack Wen Análise estrutural utilizando o método de elementos finitos de componentes do veículo Baja SAE submetidos a esforços de fadiga / L.T.W. Yan. – São Paulo, 2011.