

ANÁLISE DE FADIGA COM MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS DE COMPONENTES DA SUSPENSÃO DE UM VEÍCULO FÓRMULA - SAE

COSTA FILHO, Robson, robsoncostaf1@gmail.com¹

PIMENTEL, Michéle Santos, michelespzaca@gmail.com¹

¹ Faculdades Integradas Pitágoras, Av. Profa. Aida Mainartina Paraíso, 80 - Ibituruna, Montes Claros - MG, 39408-007

Resumo: Os componentes automotivos usados em competições, necessitam de cuidados especiais em relação a segurança e confiabilidade de projetos, bem como agregar o mínimo de massa possível ao veículo. O aprofundamento nesses quesitos estão diretamente relacionados à disponibilidade de recursos financeiros, tecnológicos e teóricos. Este estudo propõe uma abordagem por meio de um levantamento bibliográfico, com a finalidade de obter conhecimento a respeito das considerações essenciais à análise estrutural das mangas de eixo de um veículo Fórmula. No decorrer de seu desenvolvimento, apresentou-se como fundamenta o conhecimento de dinâmica veicular, para obtenção dos valores das solicitações de cargas dinâmicas, compreensão das teorias de falha por fadiga, uma vez que os esforços são dinâmicos, e conhecimentos básicos do Método de Elementos Finitos (MEF), para realizar as simulações estruturais no software ANSYS 18.1. Desta maneira, objetivou-se angariar novos métodos de projetos para a equipe Fórmula-FIP, almejando um melhor desempenho e maior segurança para o próximo veículo a ser projetado, assim como maior precisão nos projetos. Obteve-se como principais resultados, a identificação de pontos de concentração de tensões em micro regiões da peça, o que provavelmente acarretará em falhas na estrutura cristalina nas primeiras solicitações, promovendo o surgimento de micro trincas. Tal acontecimento será agravado por dar-se em uma zona termicamente afetada pelo processo soldagem utilizado na fabricação. Portanto, sugere-se projetar a próxima manga de eixo fabricável por outros processos que não afetem as propriedades mecânicas do material, e possibilite uma distribuição de tensão mais uniforme no componente.

Palavras-chave: Mangas de Eixo, Análise Estrutural, Dinâmica Veicular, Fadiga, Método de elementos finitos.

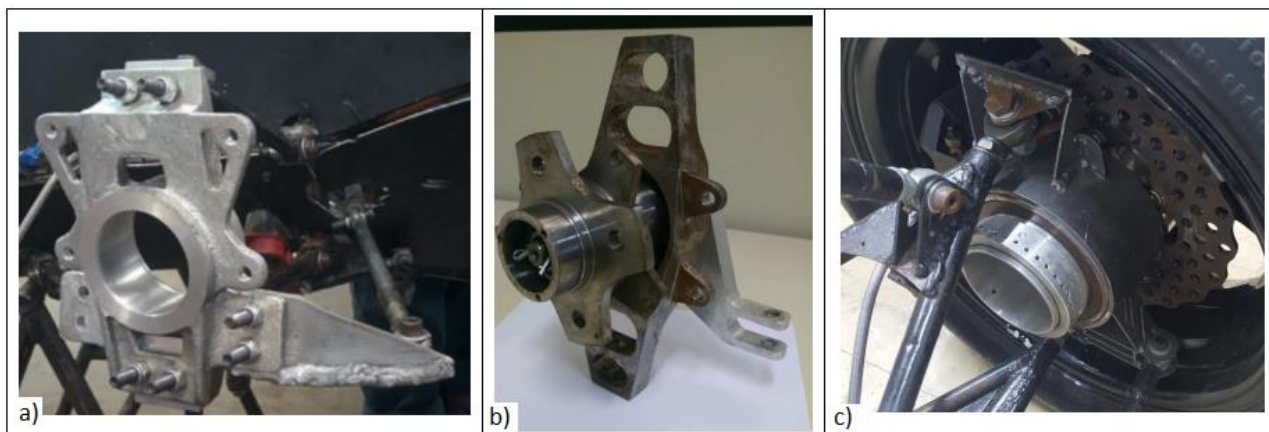
1. INTRODUÇÃO

No âmbito das competições automobilísticas, o uso de dinâmica veicular é de suma importância. Seus princípios possibilitam uma análise minuciosa do comportamento do veículo nas mais diversas condições de rodagem, gerando dados algébricos que são analisados nas transferências de cargas e esforços entre os componentes, no caso específico deste estudo, as mangas de eixo.

Segundo Klava (2003), as mangas de eixo são componentes responsáveis por estabelecer a conexão entre a suspensão, transmissão, direção e freio, sendo elas essenciais em um veículo. Além de possibilitar a conexão dos importantes componentes citados, sem que percam os graus de liberdade em relação ao movimento, a geometria da manga de eixo influencia diretamente na distribuição de tensão durante as solicitações, bem como nas variáveis cinemáticas, como os ângulos de camber, do pino mestre, convergência ou divergência das rodas, posição do centro instantâneo e centro de rolagem das suspensões, e na geometria da direção, alterando assim significativamente a dinâmica do veículo (Santos, 2016).

A figura 1 apresenta modelos de mangas de eixo que equipam carros de Fórmula SAE (FSAE). Os modelos apresentados são manufaturados por diferentes processos de fabricação: Fundição (a), Usinagem (b), Soldagem (c). A geometria, o processo de fabricação e o material a serem utilizados são definidos em relação aos objetivos da equipe perante ao objetivo final do veículo em relação a desempenho e custo de fabricação.

Compreendendo a importância do referido componente, entende-se como essencial a abordagem de métodos de projetos que tragam maior segurança para o veículo, uma vez que uma falha na manga de eixo compromete estruturalmente diversos componentes que trabalham em concomitância, além de gerar um eminente risco de acidente.

Figura 1 – Modelos de mangas de eixo fabricados por diferentes processos.

Fonte: a) Brito (2016); b) Santos (2016); c) Lima (2016). (Adaptadas)

2. OBEJETIVOS

Os componentes automotivos, principalmente no âmbito das competições, necessitam de cuidados especiais em relação à segurança e confiabilidade de projetos. Partindo desta consideração, o presente estudo objetiva a análise estrutural do projeto da manga de eixo traseira esquerda do veículo experimental da equipe Fórmula-FIP, com finalidade de possibilitar maior segurança de projeto para o veículo posterior. Sendo assim, entende-se como necessário estudar as cargas dinâmicas atuantes no componente, as devidas considerações em relação às falhas por fadiga, realizar simulações de cargas com MEF no *software ANSYS 18.1*, e ampliar a confiabilidade construtiva da peça, propondo a utilização de diferentes materiais e processos de fabricação no projeto do veículo que competirá no FSAE Brasil 2018. Visto que a manga de eixo estudada é simétrica ao mesmo componente do lado oposto, todas as considerações deste estudo são válidas para tanto para o componente do lado direito e esquerdo traseiro.

3. METODOLOGIA

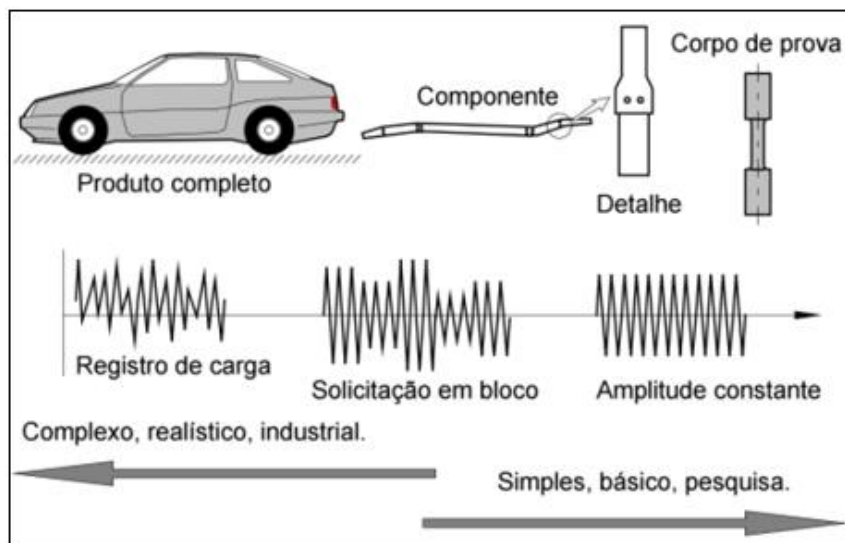
Realizou-se um levantamento bibliográfico, com a finalidade de obter conhecimento dos parâmetros de segurança utilizados no projeto de componentes automotivos de veículos que competem no Fórmula SAE, e assim analisar possíveis melhorias nos métodos de projeto da equipe Fórmula-FIP. Os estudos de Jawad e Polega (2002), Santos (2016), Brito (2016) e Lima (2016) foram a base para esta etapa. Obteve-se as reações de cargas no pneu pelas equações de transferência de carga lateral e longitudinal, e sendo estas as forças solicitantes nos componentes estruturais da suspensão, e na manga de eixo, com base nas teorias de dinâmica veicular, citadas na obra de Milliken e Milliken (1995), e apoiadas pelas obras de Reimpell (2002) e Smith (1978). Não foi conveniente citar as equações utilizadas nos cálculos devido à extensão que este trabalho tomaria, assim, este artigo apresenta apenas os resultados finais dos cálculos de transferência de carga e reações nos pneus.

Em relação às teorias de falha por fadiga, baseou-se o estudo na teoria de Goodman para fadiga de alto ciclo (FAC), explicada por Norton (2013), confrontada pelo estudo de Takahashi (2014), e a obra de Rosa (2002).

Rosa (2002) relata a necessidade da consideração dos coeficientes de fadiga no desenvolvimento de um novo produto, e ressalta a importância do conhecimento preciso das cargas atuantes, justificando que não faz sentido a análise aprofundada em relação à fadiga, uma vez que os carregamentos são provindos de uma avaliação equivocada ou superficial. Porém, em algumas ocasiões os carregamentos são significativamente imprevisíveis, ou as capacidades de aquisição de dados é inconsistente. Em argumentos que expressam ideias semelhantes às citadas, Norton (2013) afirma que para algumas classes de máquinas e equipamentos como aviões, navios e veículos terrestres, o número de ciclos durante a vida útil pode ser considerado de natureza quase aleatória, uma vez que as cargas são provindas de esforços como tempestades, buracos (veículos terrestres), decolagem e pouso (Aviões). Esta aleatoriedade de amplitude das cargas torna os resultados obtidos por meio de cálculos, e análises de softwares, não tão precisos como as complexas e dinâmicas situações da realidade. Tendo em vista esta situação, os fabricantes desta classe de equipamentos, realizam coletas de dados extensas, complexas e onerosas, em condições regulares de funcionamento em regime de testes controlados.

Com identificação da abrangência que a análise de falhas por fadiga pode ser realizada, como explícito no estudo de Takahashi (2014), e compreendendo assim, que vai muito além dos objetivos do presente trabalho, optou-se por utilizar a simplificação proposta por Rosa (2002), apresentada na Fig. 2, que considera a amplitude das tensões tendo uma variação constante.

Figura 2 – Graus de sofisticação que podem ser adotados em ensaios de fadiga, seja sobre a estrutura, seja sobre o carregamento.



Fonte: Rosa (2002).

Norton (2013) afirma que “os fatores significativos para o projeto de fadiga são a amplitude e o valor médio da onda de tensão-tempo (ou deformação-tempo) e o número total de ciclos de tensão/deformação a que a peça é submetida”. Rosa (2002) relata que é difícil um componente que esteja sob carregamento alternado, apresentar tensão média nula, pois até a tensão residual gerada pelos movimentos alternados influenciam no valor de tensão média. Norton (2013) segue a mesma vertente de ideias, afirmando que a tensão média quando difere do valor nulo, altera significativamente o ponto de falha do material, fazendo um mesmo componente romper a tensões inferiores a um carregamento puramente alternado. Gerken (1999, apud KLAVA 2003) analisa as mangas de eixo em relação aos carregamentos dinâmicos da seguinte maneira.

Tabela 1 – Tipos de carregamentos e tipos de fadiga.

Frenagem brusca	Fadiga com baixa frequência
Frenagem devido à reação ou reflexo	Fadiga com alta frequência
Curva com raio tendendo a zero	Fadiga com baixa frequência
Curva normal	Fadiga com alta frequência
Braço de direção	Fadiga com alta frequência
Buraco	Fadiga com baixa frequência

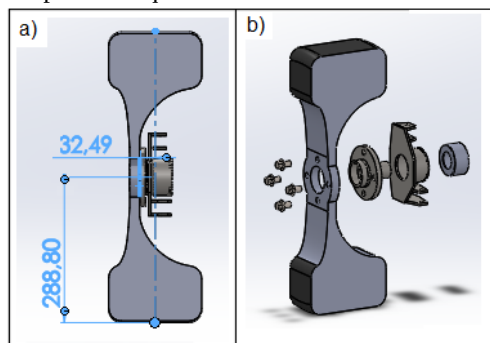
Fonte: Klava (2003) (Adaptado)

Após a comparação das informações da Tab. 1, tornou-se pertinente a abordagem do estudo pelo conceito de fadiga de alto ciclo, pois Rosa (2002), define um regime de alto ciclo para falhas por fadiga como um regime no qual a quantidade de ocorrências de deformações plásticas macroscópicas é insignificante, pois a maiorias das macrodeformações do componente são elásticas, e as plásticas ocorrem apenas em microrregiões na estrutura cristalina, gerando assim as microtrincas. O limite entre os regimes de baixo e alto ciclo não é determinado com exatidão, e pode variar em relação a cada abordagem, mas Norton (2013) afirma que um número de ciclos (N) de 10^3 , pode ser admitido como uma fronteira entre os dois regimes.

Sendo assim, analisou-se o projeto em relação à fadiga com a simplificação da amplitude, admitindo que as tensões médias (σ_{med}) sejam diferentes de zero, com $N > 10^3$ e o componente tendo uma vida finita. Devido à dificuldade de calcular a distribuição de tensões de Von Mises no componente por métodos analíticos e obter resultados consistentes nos pontos de concentração, mesmo com os métodos abordados por Norton (2013), tornou-se viável a utilização do método de elementos finitos (MEF) no *software ANSYS 18.1*, obtendo assim as tensões máximas (σ'_{Max}) e mínimas (σ'_{Min}) solicitantes, possibilitando o cálculo da Razão entre elas, e assim podendo dar início à análise de fadiga com MEF.

Modelou-se a manga de eixo no *software SolidWorks 2016*, conforme a geometria apresentada pelas figuras 3.a e 3.b, e posteriormente importou-se o arquivo para o *ANSYS 18.1*, continuando assim as etapas de pré-processamento da simulação usadas para definir as condições de contorno da situação estudada.

Figura 2 – Desenho da manga de eixo e dos componentes que trabalham em concomitância.

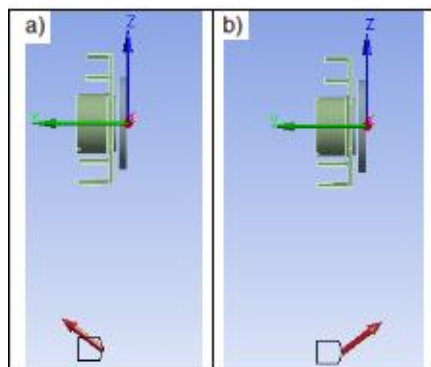


Fonte: Acervo dos autores (2017)

4. RESULTADOS

A condição de estudo que resultou as cargas, que geraram a σ'_{Max} na manga de eixo traseira esquerda, ocorreu em uma curva para a direita, com aceleração lateral de 1,3g, sem frenagem ($A_x = 0$), uma vez que a aceleração longitudinal gerada pela frenagem transfere a carga do eixo traseiro para o dianteiro, diminuindo assim a sollicitação na manga de eixo traseira, como comprovado nos cálculos de transferência de carga. Outro motivo que não viabiliza a consideração da frenagem na manga de eixo traseira é o fato dos freios traseiros serem *inboard*, ou seja, montados no chassi do veículo. Portanto, os valores de entrada para a simulação foram 1121 N para a força normal e 1457 N para a força lateral no pneu, originando o vetor resultante apresentado na figura 3a, já a figura 3b mostra o vetor resultante para a sollicitação que originou a tensão mínima e será devidamente abordada no decorrer do artigo.

Figura 3- Aplicação de cargas remotas no componente



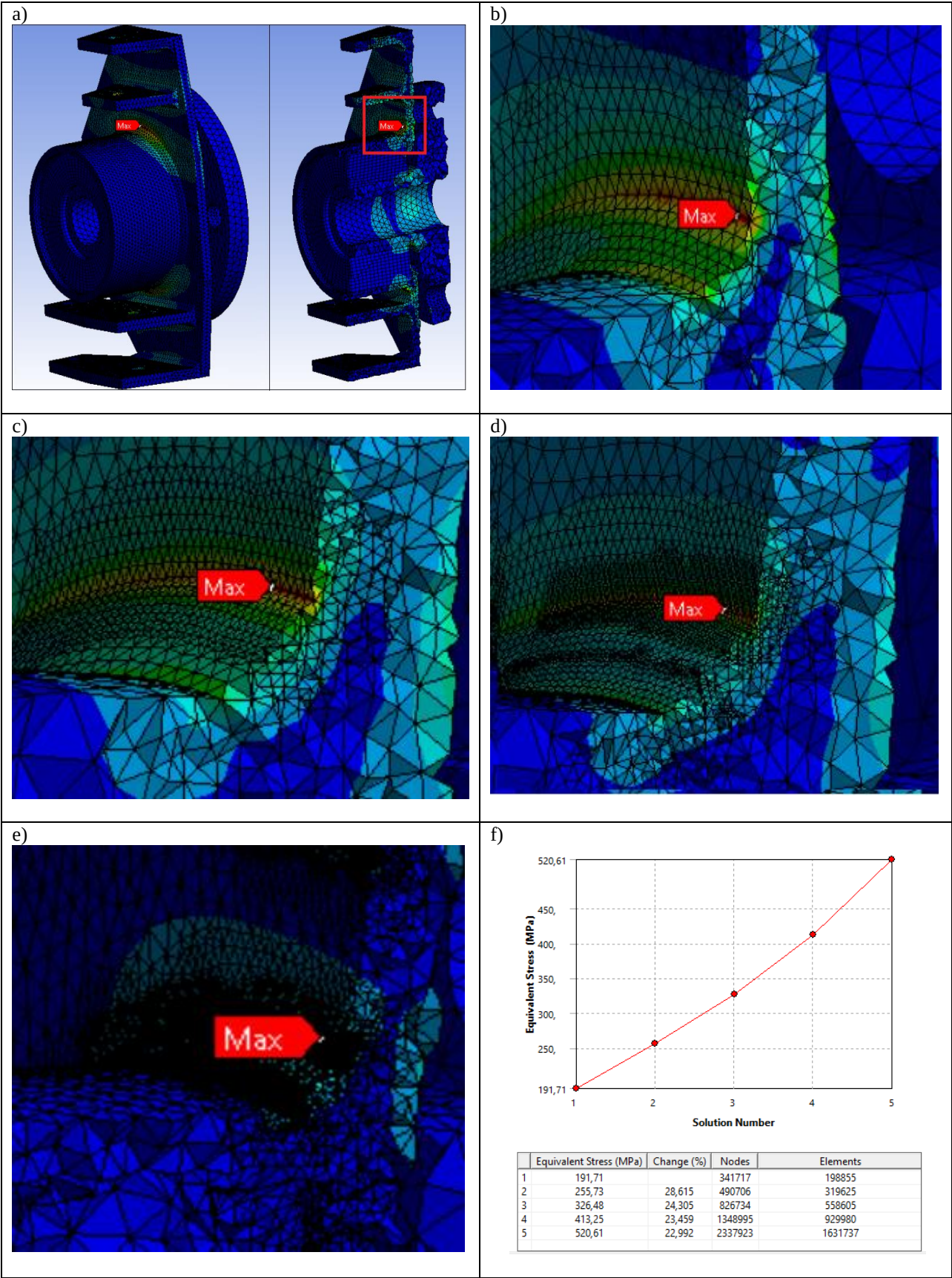
Fonte: Acervo dos Autores (2017)

A figura 4 apresenta os resultados das simulações na condição de sollicitação máxima, e é dividida em 6 subfiguras, tais que representam a sequência de passos necessários para a obtenção dos resultados, cada subfigura é brevemente explicada a seguir. A figura 4a mostra um corte vertical na peça, possibilitando assim a visualização interna da distribuição de tensão próximo à região da tensão máxima (σ'_{Max}) bem como análise dos diferentes *loops* de refinamento da malha. As figuras subsequentes 4(b; c; d; e) exibem um zoom das plotagens gráficas da distribuição de tensões na peça estudada. Por fim, a figura 4f mostra o gráfico de convergência da malha, que, por se tratar de um gráfico de tal tipo, cada ponto é como a intercessão da tensão máxima (eixo vertical) e *loop* de refinamento da malha (eixo horizontal). Portanto, mostra cada ponto 1 tem correspondência com a imagem da figura 4a, ponto 2 à figura 4b, ponto 3 à figura 4c, ponto 4 à figura 4d, e ponto 5 corresponde com a figura 4e.

Fabricou-se o componente pelo processo de soldagem TIG (*Tungsten Inert Gas*), utilizando o aço 1020 como metal de base, com metal de adição Er70s-3 (70KSI = 482MPa). Segundo Norton (2013) o limite de escoamento (S_y) do aço 1020 laminado a frio = 393 MPa, e o limite de ruptura (S_{ut}) = 469 MPa.

Com base nessas informações, é possível interpretar que no quarto *loop* de refinamento (Ponto 5), a $\sigma'_{Max} = 520$ MPa > 482 MPa (S_{ut} Metal de adição) > 469 MPa (S_{ut} Aço 1020), em uma região com área de aproximadamente 0,375 mm² e 0,035mm de profundidade superficial. Conforme Rosa (2002), quando $\sigma'_{Max} > S_{ut}$ em uma microrregião, a estrutura cristalina do metal é afetada, e ocorrem microtrincas. Norton (2013), alerta a respeito da velocidade de propagação que algumas trincas podem atingir, e cita situações com a ordem de 1 milha/s (1,6 km/s), fazendo o componente apresentar quebra instantânea, e exemplifica com os acidentes com o tanque de melaço em Boston, em janeiro de 1919, com navios do exército americano que literalmente se partiram ao meio na 2ª grande guerra, e com testes de foguetes na NASA, que se destruíram por propagação de trincas em alta velocidade.

Figura 4 – Resultados das simulações para obter a σ'_{Max} .

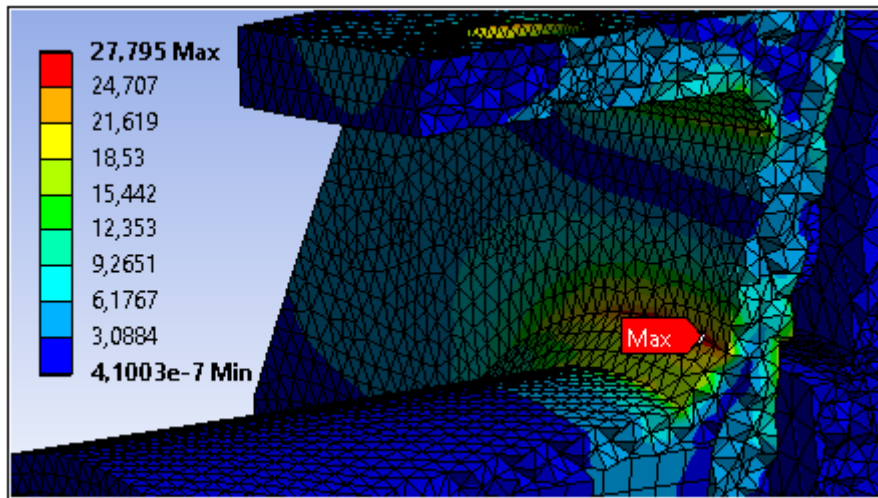


Fonte: Acervo dos Autores (2017)

Realizaram-se outras simulações, porém sem *loops* de convergência, com a intenção de obter-se uma noção do valor aproximado para as tensões mínimas de Von Mises (σ'_{Min}), e desta maneira gerar a plotagem gráfica da figura 5. A σ'_{Min} deu-se na condição que simula uma curva para a esquerda com mesma aceleração da curva para a direita ($A_y=1,3g$),

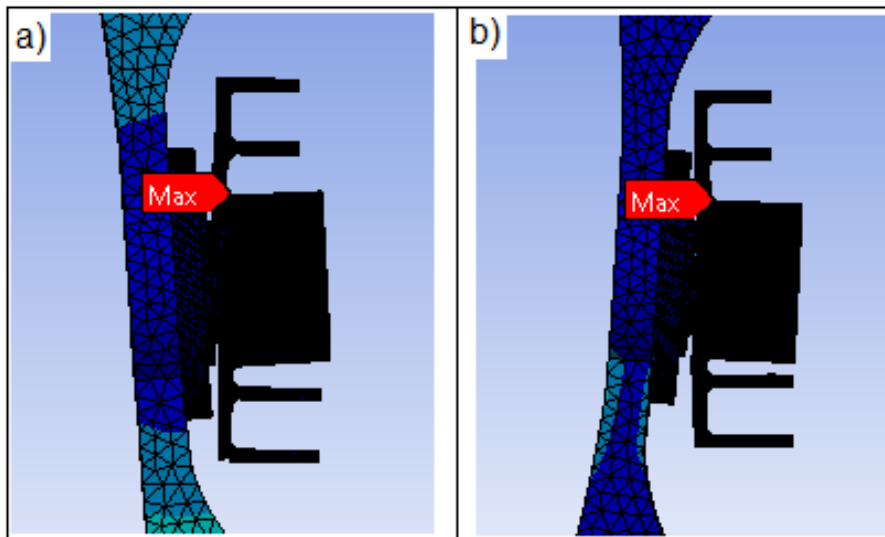
originando os dados de entrada para a força normal = 151 N e de força lateral = -196 N. Considerou-se o sinal negativo para a força lateral e para a σ'_{Min} , pois a direção de aplicação da força e de deformação do componente são opostas às das condições de σ'_{Max} , como mostrado na figura 6a e 6b.

Figura 5 - Resultados das simulações para obter a σ'_{Min} .



Fonte: Acervo dos Autores (2017)

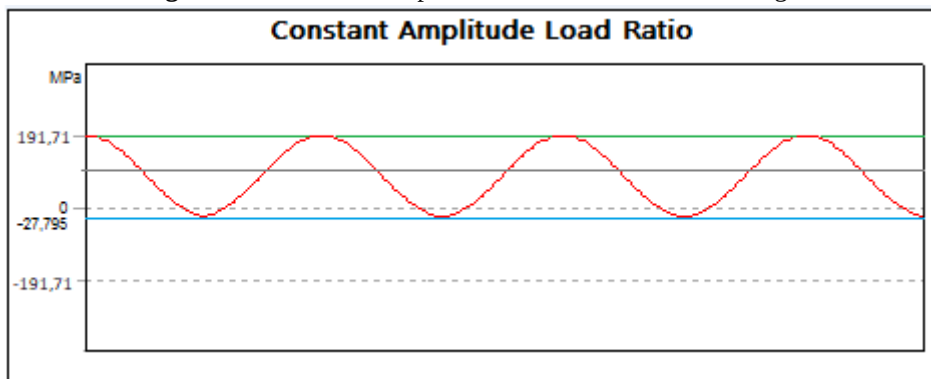
Figura 6 - a) Deformação na solicitação máxima (amplificada 50x);
b) deformação na solicitação mínima (amplificada 400x).



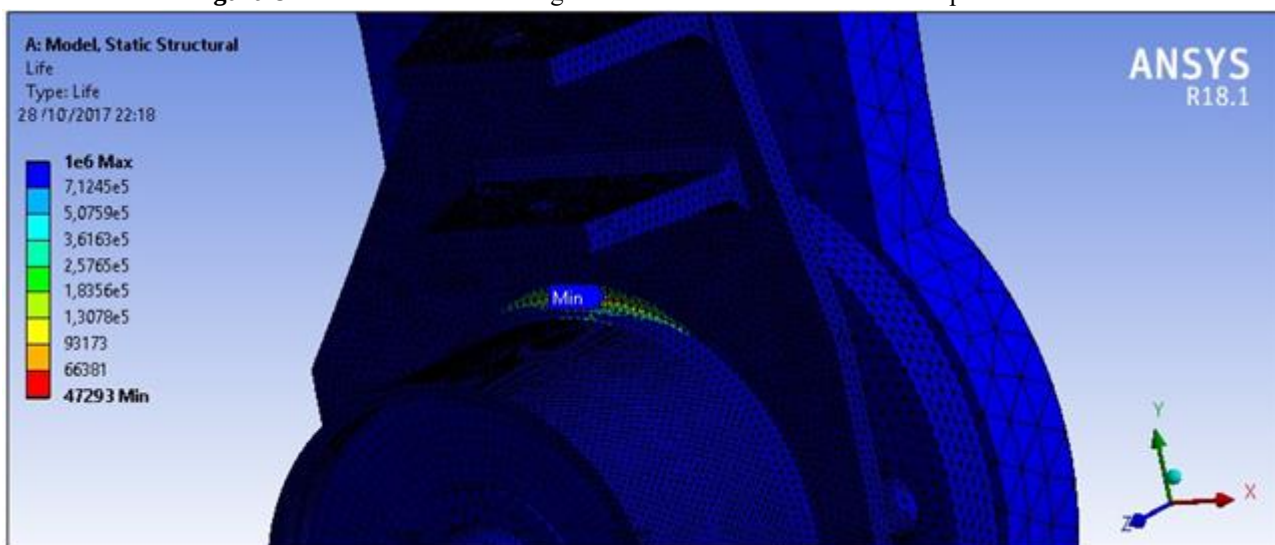
Fonte: Acervo dos Autores (2017).

Após a obtenção dos valores aproximados de σ'_{Min} e σ'_{Max} , tornou-se possível calcular a razão (R) entre as tensões pela fórmula $R = \sigma'_{Min} / \sigma'_{Max}$ apresentada por Norton (2013), obtendo o resultado $R = -0,144985$. Considerou-se o valor da σ'_{Max} obtida com a primeira malha (ponto 1 Fig.3a), e assim a σ'_{Max} e σ'_{Min} são resultados das mesmas condições de contorno em relação a malha. Usou-se o valor de R como dado de entrada para uma análise de fadiga com o MEF, baseado na curva de Goodman, com o ANSYS 18.1. A figura 7 exhibe o gráfico da amplitude constante em relação a R, que teve as cores realçadas e os valores numéricos modificados para Mpa, facilitando a compreensão, uma vez que o gráfico gerado pelo ANSYS 18.1 é plotado com valores em escala da variação fator de tensão.

Figura 7 – Gráfico de amplitude constante em razão da carga.



Fonte: Acervo dos Autores (2017)

Figura 8 – Ciclos de vida da manga de eixo traseira com σ' obtidas na primeira malha.

Fonte: Acervo dos Autores (2017)

A vida estimada para a manga de eixo traseira é dada em ciclos, e varia no componente em relação à distribuição de tensão, sendo o ponto de concentração o local onde a vida mínima é encontrada. Assim, os primeiros resultados de tensões em relação à convergência revelaram que o componente apresenta uma vida de 47293 ciclos, como mostrado na fig. 8. Porém, com os *loops* de refinamento da malha buscando a convergência dos resultados, as tensões são consideravelmente amplificadas, chegando à condição de $\sigma'_{\text{Max}} > S_{\text{ut}}$ em microrregiões que não são abrangidas pelas outras malhas. Esta condição indica um provável início de falha já no primeiro ciclo, comprovando a perigosa imprecisão e distorção de resultados por conta de tensões obtidas com uma malha sem convergência. Tem-se, assim, uma falsa sensação de segurança, visto que a peça possivelmente apresentará o surgimento de um entalhe não previsto, com velocidade de propagação não conhecida, podendo ocorrer uma quebra instantânea durante a primeira solicitação máxima.

5. CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo evidenciam que as mangas de eixo analisadas são inseguras estruturalmente, portanto, não podem ser utilizadas em situações de rodagem com o veículo em condições extremas. Porém, em situações de exposição sem rodagem atendem plenamente a necessidade da equipe. Mas como existe a necessidade de testes de rodagem com o veículo instrumentado, é necessário um novo projeto das mangas de eixo traseiras.

Para o novo projeto, aconselha-se a modelagem de uma geometria que evite pontos de concentrações de tensão. Desta maneira, não é viável a utilização do processo de fabricação por soldagem, uma vez que segundo Norton (2013), os pontos de solda em um componente são pontos de concentração de tensão interna devido a considerável variação de temperatura localizada e ao resfriamento não uniforme da região afetada. Almejando também a facilidade construtiva, e redução de massa, aconselha-se a concepção de um novo componente que possua geometria intercambiável, que possa ser construído em liga de alumínio de alta resistência, em uma peça inteiriça fabricada pelo processo de usinagem, eliminando pontos de concentração nas junções soldadas, e assim necessitando apenas de um único projeto para as 4 mangas de eixo, ao invés de dois como no caso estudado. Ainda quanto à redução de massa, o uso do Método de Otimização Topológica (MOT), aliado ao uso de materiais com menor densidade, apresenta-se também como uma boa hipótese a ser considerada para o próximo projeto. Em relação aos cálculos das cargas solicitantes, o uso de uma planilha

apresentou-se como eficiente, porém, aliá-la à utilização de softwares com análise dinâmica de multicorpos e abordagens teóricas mais aprofundadas que considerem modelagem matemática dos pneus, possibilitará a obtenção de resultados mais precisos aumentando consideravelmente a precisão do projeto.

Por fim, compreendendo a profundidade que uma análise precisa em relação à vida em fadiga de um componente, e a abordada no presente estudo, propõe-se a instrumentação do veículo, para a aquisição de valores mais precisos a respeito da amplitude e magnitude das solicitações, bem como aprofundar teoricamente no referido tema, pois diversas abordagens modernas de utilização de MEF em estudos de fadiga apresentaram o uso viável para equipes FSAE.

6. REFERÊNCIAS

- Brito, Fernando Stein. “Projeto e Fabricação de uma Manga de Eixo Intercambiável de Fórmula de Fórmula SAE em Alumínio Fundido” 2016. 27 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul- UFRGS, Porto Alegre, 2016
- Jawad, Badih A.; Polega, Brian D. “Design of Formula SAE Suspension Components.” Sae Technical Paper Series, Indianapolis, p.382-395, 2 Dec. 2002.
- Klava, Behno. “Desenvolvimento de etapas de análise e otimização estrutural de uma manga de eixo” 2003. 120 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina-UFSC, Florianópolis, 2003.
- Lima, Daniel Schwind Stussi “Projeto de cubo de roda e manga de eixo para protótipo de formula SAE” 2016.78 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Tem - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal Fluminense - UFF, Niterói, 2016.
- Milliken, William F.; Milliken, Douglas L. “Race Car Vehicle Dynamics.” Warrendale: SAE International, 1995.
- Norton, Robert L. “Projetos de Máquinas” Uma abordagem integrada. (4ed) Massachusetts: Bookman, 2013. 1055 p.
- Reimpell, Jornsens; Stoll, Helmut; Betzler., Juergen W. “The Automotive Chassi Engineering Principles.” Oxford: SAE International, 2002. Translated for the German by AGET Limited.
- Rosa, Edison da. “Análise de Resistência” Mecânica da Fratura e Fadiga. Florianópolis: Grant, 2002. 407 p.
- Santos, Rafael Kioemo Pfau. “Desenvolvimento de produto para sistema de suspensão de veículo de competição” 2016. 84 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Automotiva, Universidade Federal de Santa Catarina-UFSC, Joinville, 2016.
- Smith, Carroll. “Tune Two Win: The art of science of race car development and tuning” Aero Publishers, 1978.
- Takahashi, Bruno Ximenes. “Metodologia Moderna para Análise de Fadiga Baseada em Elementos Finitos de Componentes Sujeitos a Fadiga Uni e Multiaxial” 2014. 374 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo - Usp, São Paulo, 2014.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

8. AGRADECIMENTOS

Possuo um sentimento de gratidão especial para com meus pais que sempre me proporcionam oportunidades de progredir, os professores Bruno Maia, Henrique Oliva, Michéle Pimentel e Thais C. Figueiredo pelos ensinamentos compartilhados comigo durante a elaboração do presente estudo, o amigo Igor Higinio por disponibilizar seu tempo e computador para realização das simulações, e para com todos que contribuíram nas diversas etapas da minha vida, tais que influenciaram o interesse pelo tema, o desenvolvimento e a conclusão desse trabalho.

FATIGUE ANALYSIS WITH THE FINITE ELEMENT METHOD OF SUSPENSION COMPONENTS OF A VEHICLE FORMULA –SAE

COSTA FILHO, Robson, robsoncostaf1@gmail.com¹
PIMENTEL, Michéle Santos, michelespzaca@gmail.com¹

¹ Faculdades Integradas Pitágoras, Av. Profa. Aida Mainartina Paraíso, 80 - Ibituruna, Montes Claros - MG, 39408-007

Abstract. Automotive components used in competitions require special care in relation to project safety and reliability, as well as the minimum possible mass in the vehicle. These variables are directly related to the availability of financial, technological and theoretical resources. This study addresses an approach by means of a bibliographical research, in order to obtain knowledge about the considerations essential to the structural analysis of the upright of a Formula vehicle. In the course of its development, the knowledge of vehicle dynamics was presented as elementary, to obtain the values of the requests of dynamic loads, understanding the theories of fatigue failure, once the efforts are dynamic, and basic knowledge of the Finite Element Method (FEM), to perform the structural simulations in the ANSYS 18.1 software. In this way, the objective was to raise new project methods for the Formula-FIP team, aiming for better performance and greater safety for the next vehicle to be designed, as well as greater precision in the projects. It was obtained as main results, the identification of points of concentration of tensions in micro regions of the part, which will probably result in failures in the crystalline structure in the first callings, promoting the appearance of microcracks. Such an event will be aggravated by occurring in a zone thermally affected by the salting process used in the manufacture. Therefore, it is suggested to design the next upright so that it can be manufactured by other processes that do not affect the mechanical properties of the material.

Keywords: *Upright, Structural Analysis, Vehicle Dynamics, Fatigue, Finite Elements Method.*