DESENVOLVIMENTO DE MODELO COMPUTACIONAL PARA OTIMIZAÇÃO DE ENSAIOS DE FADIGA

João Pedro de Mello Maneze [1] (joao.maneze@engenharia.ufjf.br), Marcos Vinícius Rodrigues [2] (marcos.rodrigues@engenharia.ufjf.br)

[1] Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF); Departamento de Engenharia de Produção e Mecânica
[2] Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF); Departamento de Engenharia de Produção e Mecânica

RESUMO: *Neste estudo de caso foi desenvolvido e calibrado um modelo numérico no software de simulação computacional Ansys AIM baseado em ensaios de fadiga por flexão rotativa realizados na máquina de alta velocidade de R. R. Moore. O objetivo deste modelo é a complementação de ensaios de laboratório, através de simulações numéricas, visando a economia de tempo e recursos financeiros que podem ser onerosos no desenvolvimento e análise de viabilidade de projetos. Foi realizada uma modelagem computacional fiel ao protótipo utilizado na máquina de referência presente no laboratório da instituição de ensino. Para a análise, o corpo de provas foi discretizado por elementos finitos, foram estudados os tipos de elementos presentes no software, realizada uma análise de convergência de malha e por fim apresentados os resultados de vida à fadiga. O estudo foi contextualizado por curvas presentes nas normas de referência para diferentes condições ambientais aplicadas aos dutos de transporte de petróleo offshore.*

PALAVRAS-CHAVE: *FADIGA, ELEMENTOS FINITOS, OTIMIZAÇÃO.*

DEVELOPMENT OF COMPUTATIONAL MODEL FOR OPTIMIZATION OF FATIGUE TESTS

ABSTRACT: *In this case study, a numerical model was developed and calibrated in computer simulation software Ansys AIM based on rotational bending fatigue tests performed on R. R. Moore's high-speed machine. The objective of this model is the complementation of laboratory tests, to saving time and financial resources that can be costly in the development and feasibility analysis of projects. A computational field modeling of the prototype used in the reference machine present in the laboratory of the educational institution was performed. For an analysis, the body was discretized by finite elements, the types of elements present in the software were studied and an analysis of mesh convergence was performed. The study was contextualized by curves present in the reference standards for different environmental conditions applied to offshore oil transport pipelines.*

KEYWORDS: *FATIGUE, FINITE ELEMENTS, OPTIMIZATION.*

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.

1. INTRODUÇÃO

O objetivo do presente estudo é a utilização de modelos numéricos para complementar ensaios de fadiga realizados na máquina de flexão rotativa de alta velocidade de R. R. Moore apresentada na Figura 1.

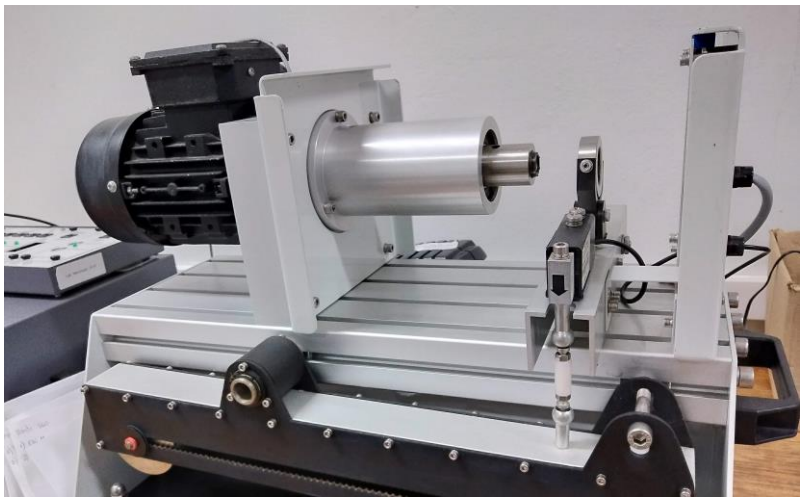

FIGURA 1. Máquina de flexão rotativa de alta velocidade SM-1090. Fonte: Próprio autor (2020)

Softwares CAE (Engenharia Auxiliada por Computador) permitem realizar, de forma otimizada, análises numéricas onde é possível prever erros e corrigi-los antes da fase de prototipagem ou produção em grande escala. Reduzem custos, uma vez que a simulação é mais acessível que realizações de ensaios e desenvolvimento de protótipos em fase inicial de projetos, além de que alterações no modelo podem ser efetuadas rapidamente diminuindo o tempo até modelos finais para validação prática. Em resumo, proporciona aumento de produtividade.

Uma das aplicações onde a fadiga é um dos modos de falha mais críticos, são os dutos offshore para transporte de petróleo. Estes dutos são constituídos basicamente de aço (dutos rígidos) ou em camadas intercaladas de aço e material polimérico (dutos flexíveis) como explicado nas normas DNVGL F204 (2005), API 17B (2002) e API 17J (2008). Na Figura 2 observa-se as camadas que compõem um duto flexível, a carcaça interna e armaduras podem sofrer com a corrosão do meio interno (fluidos e gases que transportam) e/ou do meio externo (água marinha) quando as camadas poliméricas externas se rompem com o passar do tempo e com acidentes de percurso, como apresentado em Fergestad et al. (2017).

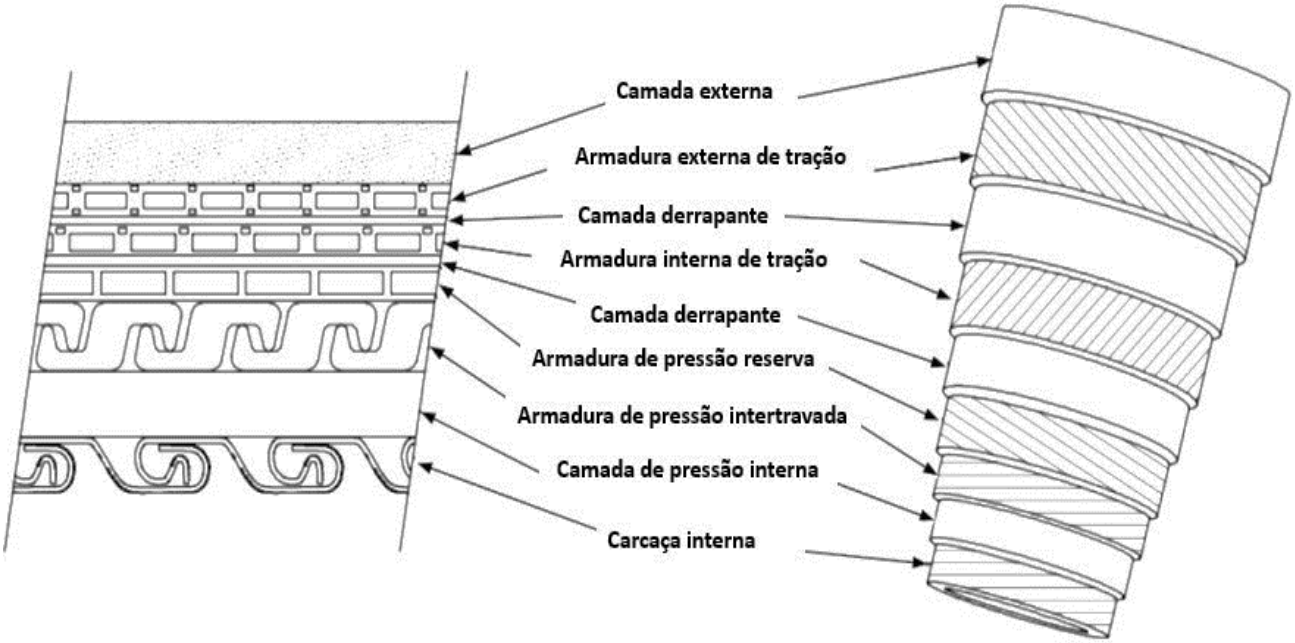

FIGURA 2. Camadas de um duto flexível. Fonte: Adaptado de API 17B (2002, p12)

Elevados investimentos da indústria são necessários para estudar e entender o fenômeno de fadiga destes dutos para evitar-se o rompimento dos mesmos durante sua fase operacional e consequente derramamento de óleo em alto mar. Além de testes em laboratório, que são grandes consumidores de tempo e dinheiro, uma alternativa é a utilização de modelos numéricos para simulação de fadiga utilizando-se curvas S-N existentes em normas regulamentadoras dos dutos de transporte de óleo e gás ou modelos de propagação de trincas. O objetivo deste trabalho é a construção de modelos numéricos capazes de complementar ou, em casos excepcionais, substituir testes em laboratório gerando uma grande economia de tempo e dinheiro e mantendo-se a qualidade de resposta.

O modelo escolhido para o estudo foi o corpo de prova usado em máquinas de fadiga comerciais como ilustrado na Figura 3, pois a partir de testes práticos, pode ser comparado com o modelo numérico de maneira mais simples e validado experimentalmente. Além disso, alterações podem ser feitas com facilidade e, após validação do modelo, é possível criar curvas S-N características a partir de uma curva S-N padrão com geometria virtual modificada (simulação de desgaste superficial devido à corrosão, criação de trincas artificiais ou eventuais danos superficiais para exemplificar concentradores de tensão) e assim propor curvas que já representem agravantes para vida em fadiga, como explica Budynas et al. (2011).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a análise de fadiga foi utilizado o software Ansys Discovery AIM e realizada a análise da tensão máxima de flexão utilizando um modelo tridimensional de acordo com o modelo real padronizado da máquina de testes de fadiga da marca VDAS modelo SM-1090, como apresentado na Figura 3.

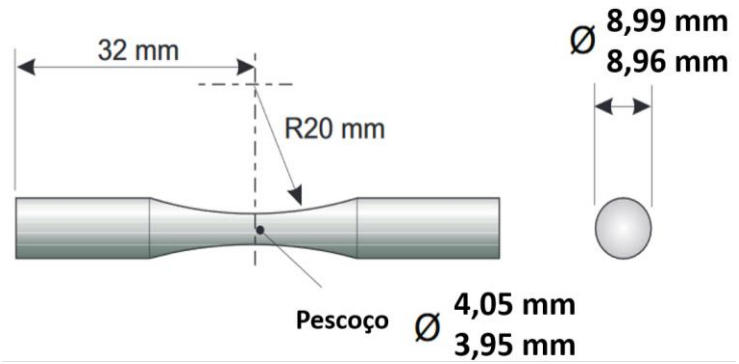

FIGURA 3. Corpo de prova padronizado no manual da máquina VDAS modelo SM-1090. Fonte: Adaptado do Manual de utilização VDAS (2016).

Antes de iniciar as simulações por elementos finitos foi calculada a tensão normal devido à flexão de forma manual visando validar o modelo virtual utilizado a partir da comparação das tensões normais encontradas. Foi utilizado no modelo o Aço ASTM A36 cuja tensão de escoamento é de 250 MPa e o limite de resistência à tração de 460 MPa de acordo com norma ASTM A36 e dados contidos na biblioteca de materiais do Ansys AIM.

O cálculo segue a metodologia presente no manual da máquina SM-1090 VDAS, e o modelo estrutural do problema é ilustrado na Figura 4.

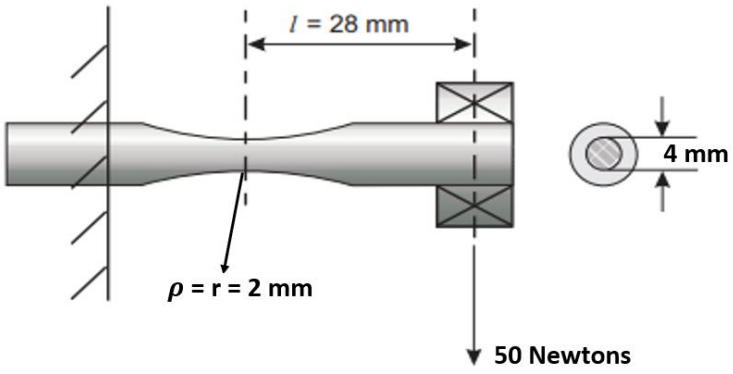

FIGURA 4. Representação das dimensões utilizadas e posição de aplicação do carregamento. Fonte: Adaptado do Manual de utilização VDAS (2016).

Foi utilizada uma força de 50 N (valor intermediário presente nas configurações da máquina de testes) aplicada a uma distância de 28 mm da seção analisada. Na relação a seguir "σ" é a tensão máxima na seção de interesse "r" é o raio da seção circular analisada, "ρ" é a distância do centro ao ponto de análise. A tensão máxima se dá no ponto mais afastado do centro da seção em que ρ = r = 2 mm, o momento fletor é calculado na seção de análise por "M = 50 N x 28 mm = 1400 N.mm" e, por fim calcula-se o momento de área "I_z" da seção na direção arbitrária. O cálculo da tensão é então obtido através das Equações 1 e 2, apresentadas em Hibbeler et al. (2005):

$$I_z = \frac{(\pi . r^4)}{4} \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{(M.\rho)}{I_z} \quad (2)$$

Após efetuar os cálculos obtêm-se um valor de σ = 222,82 MPa para tensão máxima na seção, concluída a modelagem fiel do corpo de prova da máquina de fadiga e realizado o cálculo manual da tensão, o modelo foi discretizado por elementos finitos.

2.1 Escolha do elemento para discretização

No Ansys Discovery AIM estão presentes os elementos Tetraedro e Hexaedro de primeira e segunda ordem. Para escolher o melhor elemento de três dimensões (adequado para corpos sólidos) e sua melhor classificação (1ª ou 2ª ordem) foi selecionado o que, após discretização do modelo com o número de nós fixado em vinte mil, apresentou menor degeneração, menor tempo de cálculo e tensão equivalente próxima à tensão calculada manualmente, a análise de desempenho e escolha dos elementos foi baseada no texto do autor Madenci, et al. (2015).

O número de nós foi fixado para estabelecer uma relação justa do poder computacional requerido com finalidade de comparação. Todos os elementos após determinada análise de malha tendem a convergir para uma tensão semelhante, porém de acordo com as características de cada elemento, um pode convergir com menos poder computacional do que outro e como o foco do presente estudo é produtividade, o desempenho na execução dos cálculos é muito relevante como apresentado em Madenci, et al. (2015). Quanto maior o número de nós no modelo maior a fidelidade no cálculo, porém, maior quantidade de nós exige maior poder computacional e no presente estudo sob condições fixas é comparado o uso de Tetraedros e Hexaedros e comparadas as tensões calculadas com a discretização de cada um. Na Figura 5, Hexaedro e Tetraedro de primeira ordem

estão representados acima e possuem um nó em cada vértice (hex8 e tet4), os elementos de segunda ordem estão abaixo (hex20 e tet10) e além dos nós em cada vértice possuem um nó intermediário em cada aresta.

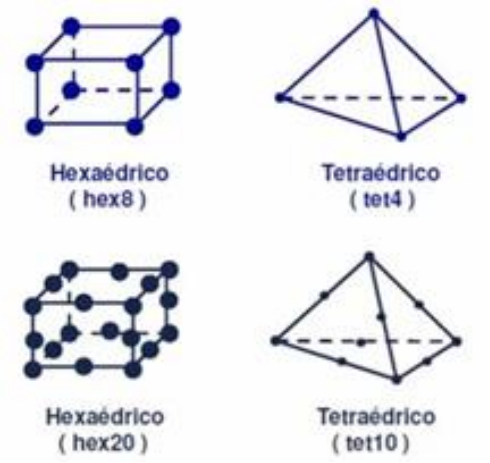

FIGURA 5. Elementos 3D presentes no Ansys AIM. Fonte: Blog iESSS (2020).

Para realizar a escolha do elemento ideal de acordo com a geometria do corpo de prova foram geradas malhas com degeneração (Critério Skewness) menor ou igual a 0,25 (elemento de excelente qualidade de acordo com a classificação Ansys AIM), ao manter nivelado o critério Skewness é possível comparar a efetividade de cada elemento na discretização do corpo de provas de fadiga. Elementos degenerados ocasionam resultados imprecisos na simulação, na Figura 6 são exemplificados elementos degenerados e regulares.

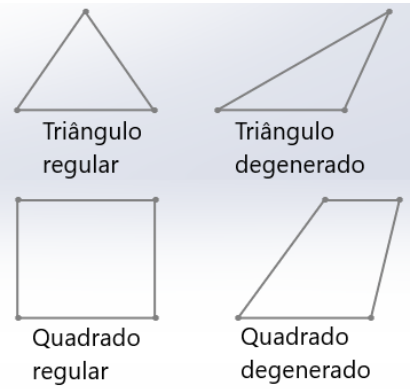

FIGURA 6. Exemplos de faces degeneradas e regulares. Fonte: Próprio Autor (2020).

Após análise das malhas geradas, é possível comparar na Tabela 1 o tempo de execução de cada simulação, número de elementos e de nós, degeneração média dos elementos na malha e tensão máxima apresentada em cada discretização.

Tabela 1. Tabela comparativa entre as malhas geradas.

Elementos	Tetraedro de 1ª	Tetraedro de 2ª	Hexaedro de 1ª	Hexaedro de 2ª
Tempo em segundos	70	49	50	46
Elementos	80876	11745	16199	3968
Nós	17161	18540	18620	18821
Degeneração média (Skewness)	0,2451	0,2324	0,1814	0,2311
Tensão em MPa	207,17	228,61	228,98	232,07

Fonte: Próprio Autor (2020).

Na Figura 7 pode-se observar um gráfico que ilustra o desempenho dos elementos na geometria analisada fixando-se o número de nós. Os elementos Tetraedro de segunda ordem e Hexaedro de primeira ordem geraram tensões mais próximas da tensão calculada manualmente com pequena diferença entre ambos, apresentaram tempo de cálculo semelhante porém o elemento Hexaédrico apresentou a menor degeneração com ampla vantagem para os demais, por tanto este último foi adotado pois discretizou com maior eficácia a geometria do modelo virtual. Todas as malhas foram geradas com elementos pouco degenerados. O elemento Hexaédrico de primeira ordem foi adotado então para os testes de fadiga.

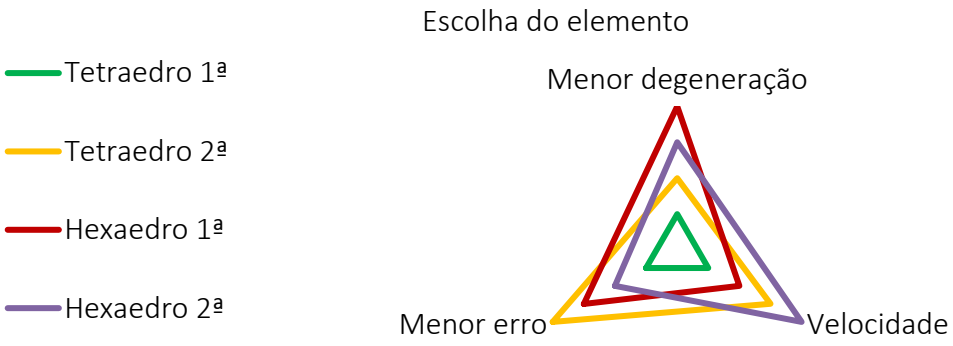

FIGURA 7. Gráfico que ilustra o comportamento dos elementos durante o comparativo. Fonte: Próprio Autor (2020).

Após optar pela discretização utilizando Hexaedros de primeira ordem, foi feito um estudo de convergência de malha para encontrar o número de elementos ideal para realização da análise, a convergência é apresentada na Figura 8.

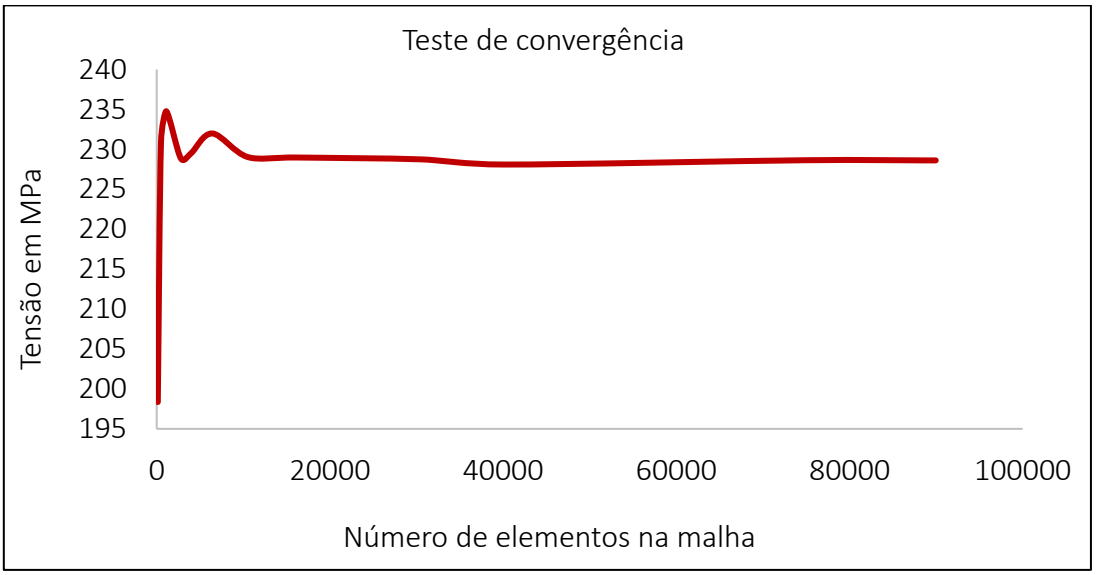

FIGURA 8. Estudo de convergência da malha hexaédrica. Fonte: Próprio Autor (2020).

A partir de dezesseis mil elementos a variação da tensão se manteve menor que 0,1% e conclui-se que a malha convergiu a partir deste número de elementos. Foi gerada então a malha final utilizada para analisar fadiga do corpo de provas.

3. ANÁLISE E RESULTADOS

Concluída a escolha do elemento de discretização e analisadas diversas malhas para a convergência, foi adotada a configuração final adequada. Na Figura 9 está disposta a malha e destacada a tensão máxima encontrada pelo software, esta mesma malha foi utilizada para as análises posteriores de vida à fadiga.

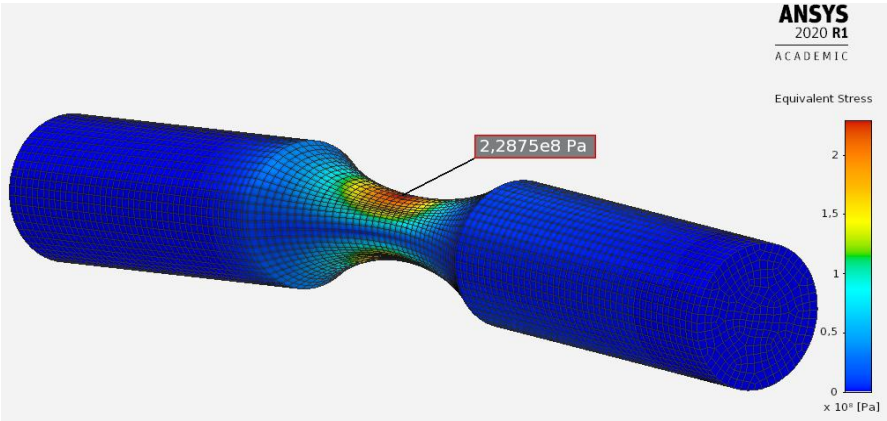

FIGURA 9. Simulação estrutural com discretização por Hexaedros de primeira ordem no Ansys AIM. Fonte: Próprio Autor (2020).

Foi possível prosseguir para a análise de fadiga após validar a tensão máxima encontrada no Ansys. O software permite aplicar curvas S-N que refletem o desgaste do aço com as condições de uso, os valores destas curvas estão descritos em DNVGL C203 (2016, p. 22) onde estão detalhados para três situações de exposição: Ar, proteção catódica na água do mar, e corrosão livre em estruturas banhadas. Utilizando cada uma das curvas S-N como entrada no Ansys AIM foi possível prever o número de ciclos em que a geometria do teste de fadiga rompe em cada condição descrita na norma. A curva S-N é dada pela Equação (3), têm-se que "log ā" é interceptação do eixo N logarítmico pela curva S-N, "N" representa o número de ciclos até a fratura para uma faixa de tensão Δσ, "m" fornece inclinação inversa negativa da curva S-N e por fim, "Δσ" é a faixa de tensão em MPa:

$$\log N = \log \bar{a} - m.\log(\Delta\sigma) \quad (3)$$

Os parâmetros "m" e "log ā" são apresentados na norma em questão e classificados de B a W, mas no presente estudo foram utilizadas somente as curvas B1 e B2 que se referem ao material base (aço) dos dutos de transporte de óleo de gás e número de ciclos menor ou igual a 10^7.

Os dados utilizados na análise estão descritos na Figura 10 para exposição ao Ar e Figura 11 para exposição à água do mar e proteção catódica.

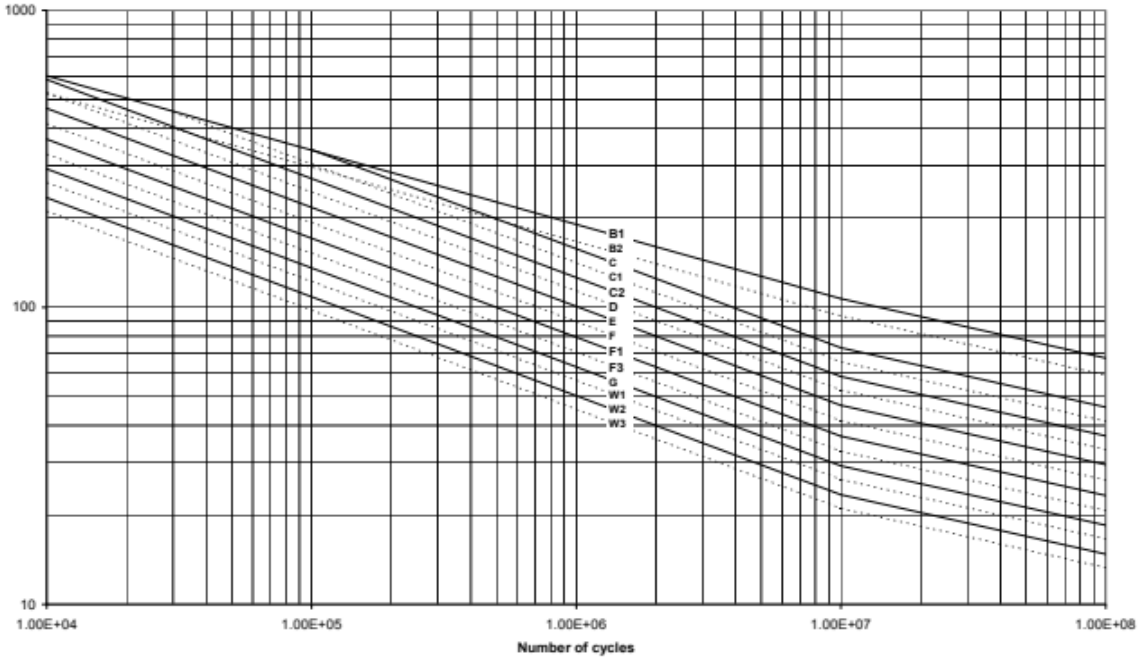

Figura 10: Curvas S-N para exposição ao ar. Fonte: DNVGL-RP-C203 (2016, p. 23)

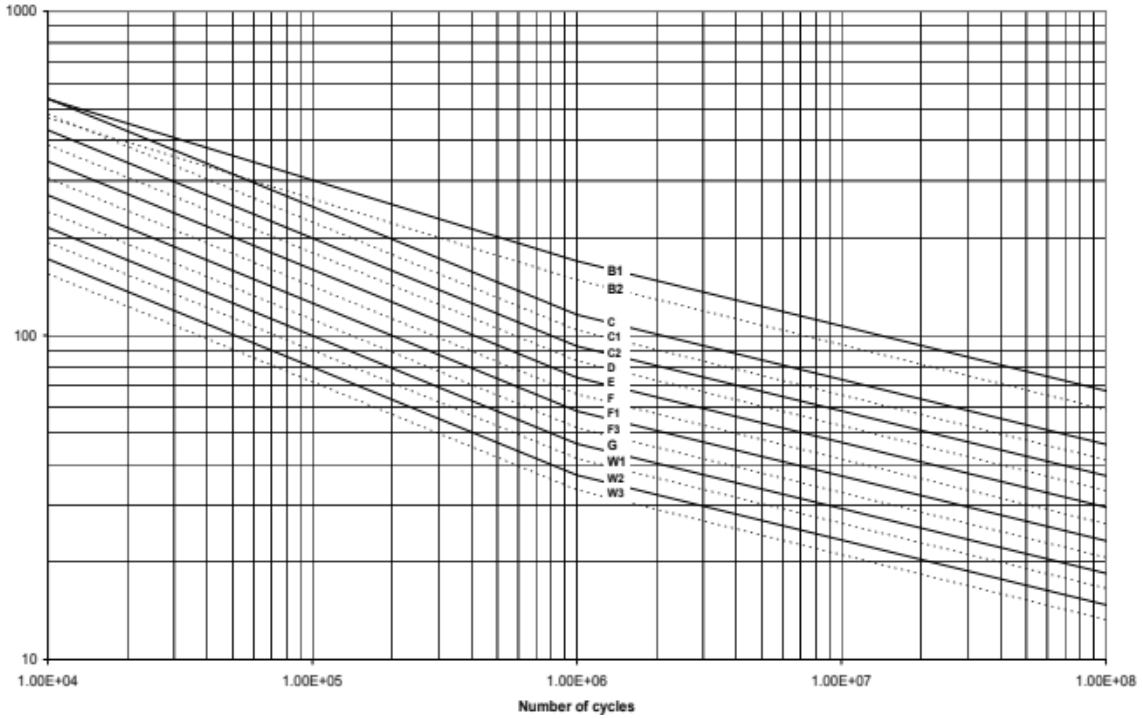

Figura 11: Curvas S-N para exposição à água do mar e proteção catódica. Fonte: DNVGL-RP-C203 (2016, p. 24)

Na Tabela 2 estão dispostos os resultados da simulação para exposição ao ar, na Tabela 3 os resultados analisados em água marinha e proteção catódica, por fim, na Tabela 4 estão dispostos os resultados para exposição da estrutura à corrosão livre e imersa em água marinha.

TABELA 2. Resultados de análise de fadiga para o ar.

Curva S-N	m	log a	Falha do corpo de prova em ciclos
B1	4	15,117	441053
B2	4	14,885	256413

Fonte: Próprio Autor (2020).

TABELA 3. Resultados de análise de fadiga para exposição à água marinha com proteção catódica.

Curva S-N	m	log a	Falha do corpo de prova em ciclos
B1	4	14,917	277313
B2	4	14,685	164547

Fonte: Próprio Autor (2020).

TABELA 4. Resultados de análise de fadiga para corrosão livre de estruturas banhadas.

Curva S-N	m	log a	Falha do corpo de prova em ciclos
B1	3	12,436	215634
B2	3	12,262	143913

Fonte: Próprio Autor (2020).

Como apresentado em DNVGL C203 (2016, p. 20), as piores condições foram reveladas através do número de ciclos que limitam a vida da amostra. Na primeira condição quando exposta ao ar obteve-se o maior número de ciclos, e na última situação onde os corpos foram banhados por água marinha, mas sem nenhum tipo de proteção, foi revelado o menor número de ciclos e menor resistência à fadiga. Abaixo estão presentes duas simulações da região crítica do corpo de prova utilizado no estudo. A Figura 12 revela o corpo de prova na condição de exposição ao ar (441053 ciclos até a falha) e a Figura 13 revela a zona crítica para o corpo de prova banhado em água do mar sem nenhuma proteção (143913 ciclos até a falha). Estes resultados estão coerentes com a norma de referência e as análises estão validadas.

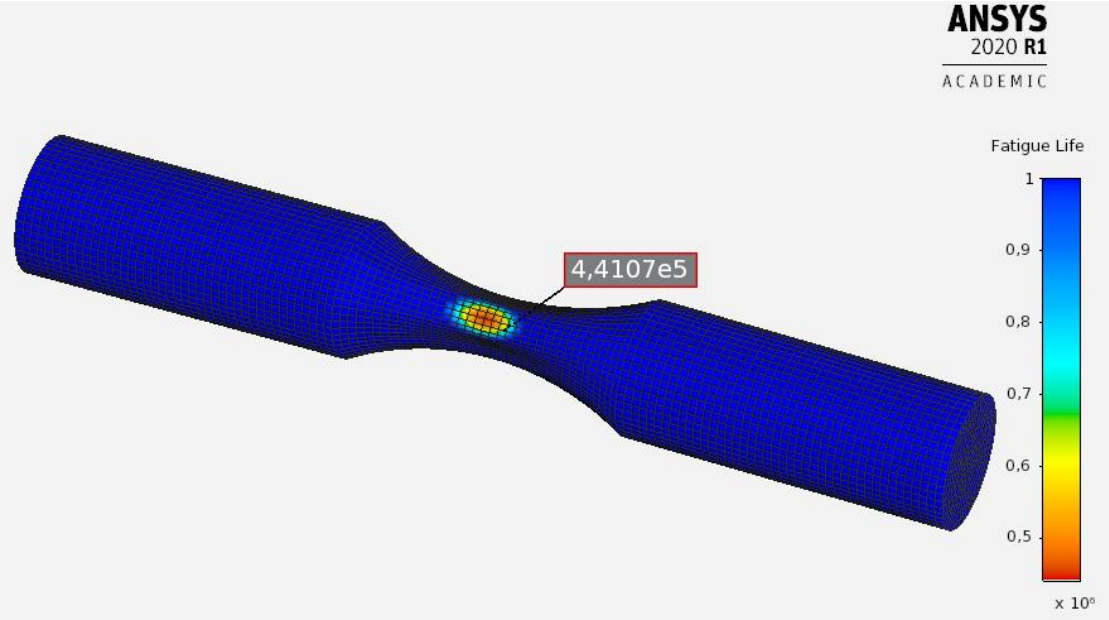

FIGURA 12. Região crítica da amostra exposta ao ar com vida de 441053 ciclos. Fonte: Ansys Discovery AIM 2020 R1 (2020).

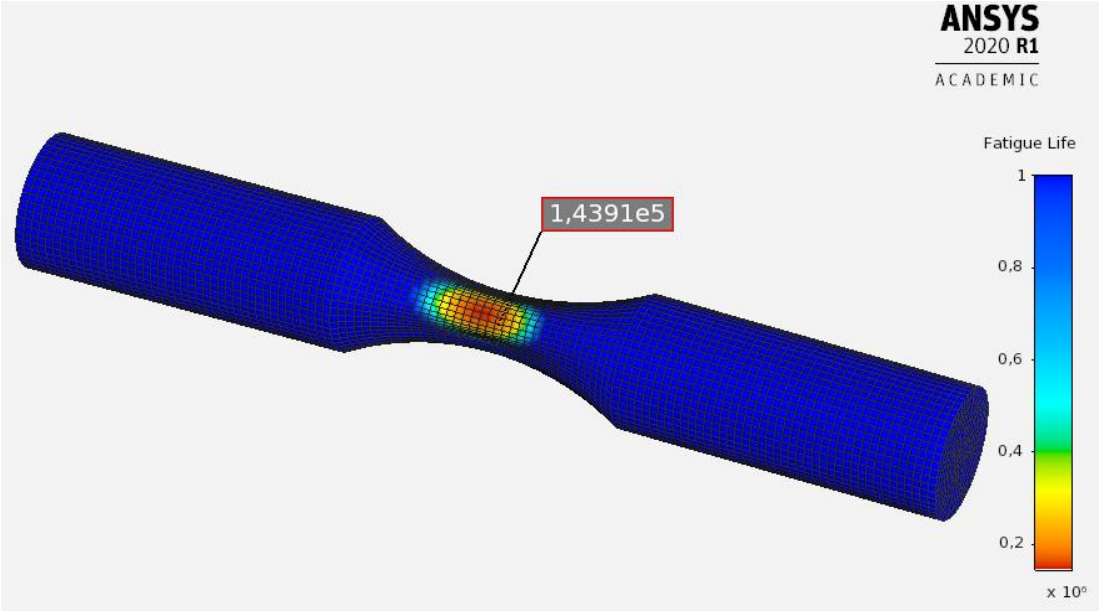

FIGURA 13. Região crítica da amostra submersa sem proteção contra corrosão com vida de 143913 ciclos. Fonte: Ansys Discovery AIM 2020 R1 (2020).

4. CONCLUSÕES

A partir dos resultados apresentados, pode-se concluir que é possível utilizar simulações numéricas para auxiliar ensaios de laboratório na obtenção das curvas S-N, sendo os resultados coerentes com situações críticas descritas pelas normas e validado o modelo estrutural que replica a máquina de testes. Desta forma, custos e prazos são minimizados na obtenção de novas curvas S-N quando o material está sujeito às condições ainda não catalogadas em normas atuais. Ensaios práticos podem ser realizados com maior objetividade conhecendo previamente os resultados esperados.

Como continuidade deste estudo, no intuito de obter-se um modelo numérico pronto para o auxílio de ensaios em laboratório e adequado para representar a falha estrutural ao atingir-se determinado número de ciclos, deve ser realizada uma modelagem detalhada na formação e propagação de trincas, bem como a realização de ensaios para validação do estudo e controle estatístico das novas curvas S-N obtidas.

REFERÊNCIAS

AMARAL, Luiz; Preparação de modelos para geração de malhas, 2016. Disponível em: https://www.esss.co/blog/preparacao-de-modelos-para-geracao-de-malhas/. Acesso em: 20 de Novembro de 2020.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Recommended Practice 17B - Flexible Pipe, API, 2002.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Recommended Practice 17J - Specification for Unbonded Flexible Pipe, API, 2008.

BUDYNAS, Richard G.; KEITH, Nisbett J. Elementos de máquinas de Shigley, 2011.

DET NORSKE VERITAS. Recommended Practice C203 - Fatigue Design of Offshore Steel Structures, DNVGL, 2016.

DET NORSKE VERITAS. Recommended Practice F204 - Riser Fatigue, DNVGL, 2005.

FERGESTAD, D; LTVEIT, S. A. Handbook on Design and Operation of Flexible Pipes, Technical Report. 2017.

HIBBELER, Russel C. Estática: Mecânica para Engenharia. Pearson Education do Brasil, 2005.

MADENCI, Erdogan; GUVEN, Ibrahim. The Finite Element Method and Applications in Engineering using ANSYS®. Springer, 2015.

AGRADECIMENTOS

À UFJF por permitir a participação do discente João Pedro de Mello Maneze como Voluntário no Programa de Iniciação Científica, o que possibilitou o desenvolvimento deste trabalho.

Ao suporte da empresa ANSYS por contribuir com o aprendizado e formação de futuros profissionais. Para análise estrutural e de fadiga utilizando o método dos elementos finitos foi usado o software ANSYS DISCOVERY AIM 2020 R1 com licença acadêmica gratuita e limitação de 100 mil nós para geração da malha do corpo discretizado. Para modelagem CAD foi utilizado o software ANSYS DISCOVERY SPACECLAIM 2020 R1 também com licença acadêmica gratuita.