

ENSAIO DE INICIAÇÃO DE TRINCA POR FLEXÃO ALTERNADA: DETECÇÃO PELA PERDA DE ESTANQUEIDADE

Polyana Barbosa de Paula, polyana_paula@outlook.com¹

José Felipe Dias, josefelipedias@gmail.com²

Ewerton Augusto de Sousa Nogueira, ewertonasnogueira@gmail.com²

Francis Faria Goulart, francis_goulart@outlook.com¹

Gustavo Rodrigues de Souza, souzagr@ufsj.edu.br¹

¹ Universidade Federal de São João Del Rei, DCTEF- Praça Frei Orlando, 170, 36307-352, São João Del Rei-MG, Brasil.

² Universidade de Itaúna, Faculdade de Engenharia Mecânica – Rodovia MG 431, Km 45, 35680-142, Itaúna-MG, Brasil

Resumo: Devido à necessidade de se avaliar os mecanismos de fadiga, principalmente a fase de iniciação da trinca, foi projetada e construída uma máquina de ensaios de fadiga por flexão alternada. No âmbito deste projeto realizou-se um estudo bibliográfico referente ao tema central Ensaio de iniciação de trincas por flexão alternada: detecção pela perda de estanqueidade. A partir daí foi feito um estudo sobre o método de simulação computacional, baseado na discretização de elementos, para a análise dos resultados obtidos através de cálculos analíticos e ensaios. Foi realizado um levantamento bibliográfico sobre as propriedades da fadiga do aço ABNT 1045, material que constitui os corpos de prova. Estes dados serão relevantes para os ensaios experimentais. Elaborou-se um modelo computacional utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF) a fim de simular os esforços internos gerados nos corpos de prova ao ser aplicado um deslocamento em sua extremidade.

Palavras-chave: Fadiga, Flexão Alternada, Trinca, Método dos Elementos Finitos, Simulação Computacional.

1. INTRODUÇÃO

Segundo (HIBELLER, 2010) o termo fadiga é dado ao rompimento e, posteriormente ruptura de um metal quando o mesmo passa a ser submetido a ciclos repetidos de tensão ou deformação. Este fenômeno é responsável por grande parte de falhas mecânicas ocorridas pelo rompimento de materiais.

Já (NORTON, 2000 e MANSUR, 2003) demonstram que a falha por fadiga se inicia devido a uma pequena trinca que pode ser originada durante o processo de fabricação do material ou desenvolver-se ao longo do tempo devido ao carregamento dinâmico da peça. O início da trinca possui pequena duração, e corresponde ao início de uma ou mais microtrincas, na maioria visíveis a olho nu, causadas por deformação plástica. Posteriormente, ocorre a propagação da trinca, que correspondente ao maior tempo de vida do metal. E por fim, ocorre a ruptura repentina, devido ao crescimento instável da trinca, podendo ocorrer de modo instantâneo.

O aço SAE 1045, que conta com 0,45 % de carbono em sua composição, é classificado como aço de médio teor de carbono com boas propriedades mecânicas, bem como boa usinabilidade e soldabilidade quando laminado a quente ou normalizado. Suas aplicações compreendem eixos, peças forjadas, engrenagens comuns, componentes estruturais de máquinas, dentre outros (FERREIRA e SÁ, 2005; CABALLERO, 2001). Devido sua ampla empregabilidade ele foi escolhido para o estudo em questão.

Para que se determine uma resistência segura para o aço sob carga repetida, é necessário que se especifique um limite abaixo do qual nenhuma evidência de falha possa ser detectada após a aplicação de uma carga durante certo número de ciclos, que pode ser denominada por Limite de Fadiga. O Limite de Fadiga pode ser obtido por meio de ensaios específicos (HIBELLER, 2010).

Dias (2012) elucida que durante a análise e o projeto da vida útil de um material é imprescindível o conhecimento da fase de iniciação de trinca. Se a fase de iniciação de trinca pode ser detectada, os mecanismos de fadiga podem ser melhor compreendidos e em consequência a falha pode ser minimizada ou evitada. A sensibilidade do método de detecção é um dos fatores de maior relevância para a escolha do ensaio mais adequado.

2. FORMULAÇÃO E DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

2.1. Descrição do Problema

Para a validação da máquina de ensaio de fadiga por flexão alternada construída, foram realizados vários ensaios em corpos de prova feitos em aço ABNT 1045. Juntamente com esses ensaios foram feitos modelos computacionais que simularam o comportamento do material no decorrer do carregamento.

A máquina utilizada nos ensaios de fadiga por flexão alternada foi projetada e construída por uma equipe da Universidade de Itaúna. A mesma possui uma base onde o elemento é fixado e outra extremidade, onde é aplicada uma carga oscilante, como pode ser observado na Fig. 1.

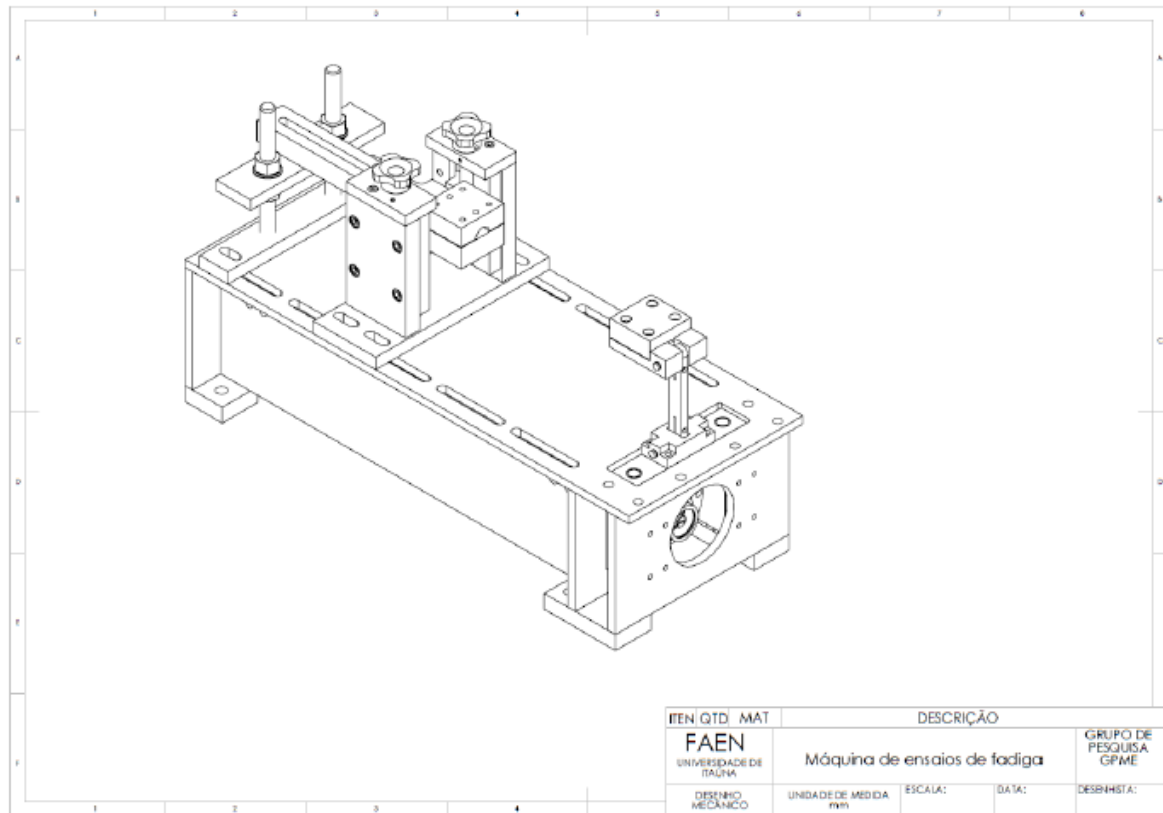


Figura 1. Modelo esquemático da máquina de ensaio de fadiga por flexão alternada.

Segundo Alvarenga (2006), o ciclo de tensões do ensaio, gerado no elemento ou corpo de prova é alternado porque o deslocamento v varia em função do $\cos \omega t$. A tensão obtida pelo movimento do excêntrico pode ser de tração ou compressão. A carga oscilante é induzida pelo deslocamento da extremidade livre do elemento por um sistema de biela com excêntrico regulável (Fig. 2), o que permite variar a flecha v na extremidade do corpo de prova.

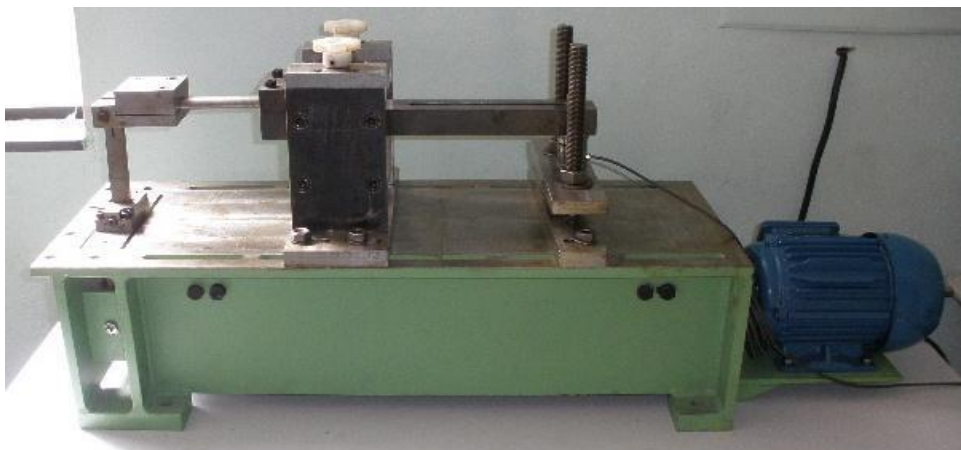


Figura 2. Máquina de fadiga por flexão alternada: vista frontal.

Para possibilitar a variação da velocidade do ensaio e uma maior versatilidade, foi implementado um equipamento que permite variar a rotação do motor. Também se adaptou um sistema que monitora o número de ciclos e interrompe o ensaio em um determinado número prefixado afim de que sejam realizados ensaios de fadiga com amplitude variável, tipo “Low – High” ou “High – Low”, representado na (Fig. 3).

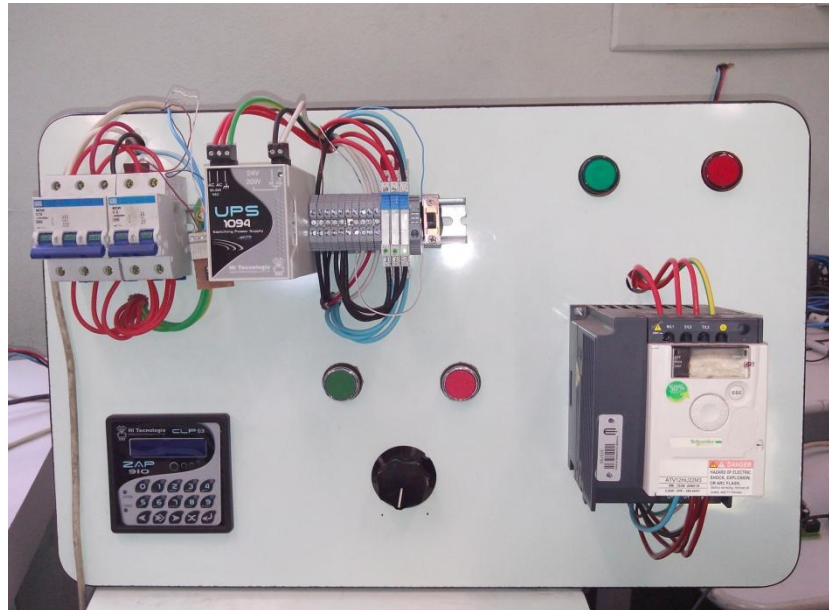


Figura 3. Sistema de controle de velocidade do motor e monitoramento do ensaio.

A máquina também conta com um sistema de desligamento do motor quando inicia-se uma trinca no corpo de prova. Uma célula de carga (Fig. 4) controla a carga aplicada e também acompanha a evolução desta carga com o número de ciclos.

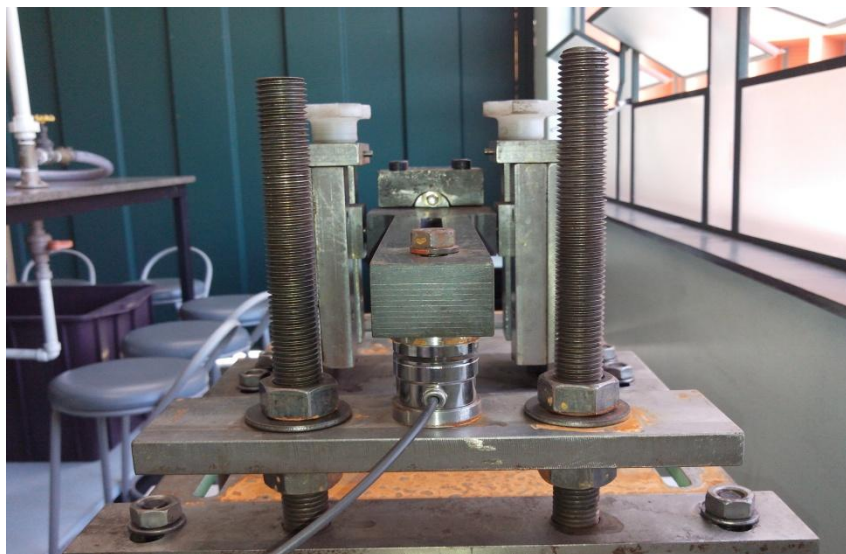


Figura 4. Detalhe da célula de carga.

Como a máquina será utilizada nos ensaios de fadiga por flexão alternada e o método de detecção da trinca será por perda de estanqueidade, foi colocado um sistema de desligamento do motor quando ocorrer o vazamento de gás através da trinca. A Figura 5 apresenta esquematicamente o sistema de interrupção do ensaio de fadiga.

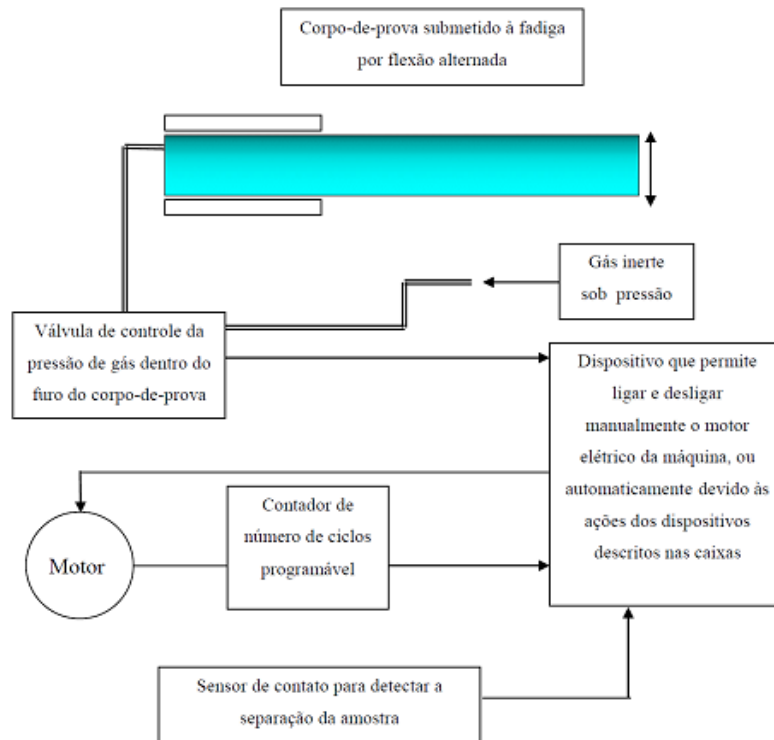


Figura 5. Representação esquemática do sistema de interrupção do ensaio de iniciação de trinca por fadiga por meio da perda de estanqueidade (DIAS, 2009).

2.1.1. Corpo de Prova

O corpo de prova utilizado nos ensaios foi criteriosamente escolhido. Além do material a ser empregado, o formato da peça também foi um ponto relevante a ser considerado, pois esse fator influencia diretamente nas propriedades geométricas do corpo e, conseqüentemente nos valores de tensão e ciclos de fadiga.

O material escolhido foi o aço ABNT 1045, devido ao fato de possuir disponibilidade de informações sobre o seu comportamento à fadiga: curvas S-N, σ -N e taxa de propagação de trinca por fadiga, e também pela sua ampla empregabilidade na indústria. Os corpos de prova foram trefilados e usinados. Desta forma é possível avaliar se o método de ensaio é capaz de detectar a influência do processo de trefilação na iniciação de trincas por fadiga. O formato e as dimensões do corpo são apresentados a seguir na Fig. 6.

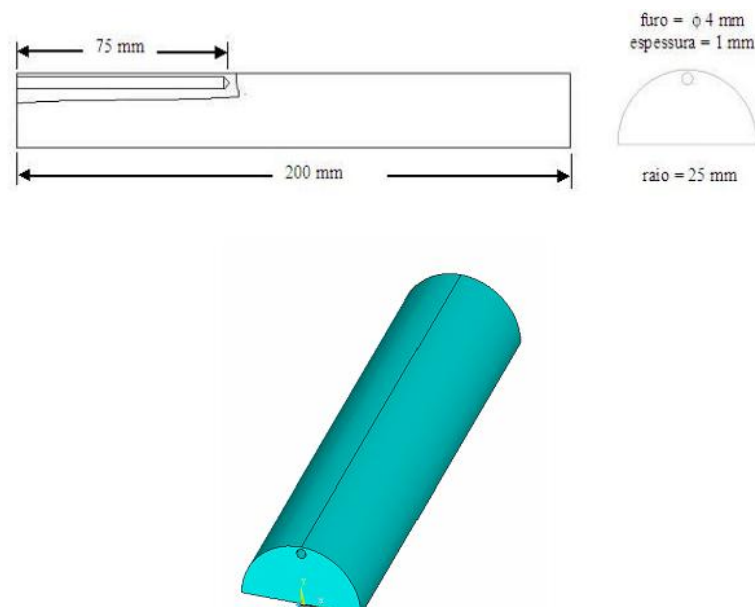


Figura 6. Corpo de prova a ser utilizado nos ensaios preliminares de iniciação de trinca (DIAS, 2009).

Após serem confeccionados, os corpos de prova passaram por um ensaio de tração. Os resultados obtidos estão na Tab. 1.

Tabela 1. Resultados do ensaio de tração do corpo de prova.

Resistência à Tração (MPa)	864,3
Limite de Escoamento (MPa)	802,5

2.2. Análises numéricas

A primeira etapa de uma modelagem computacional de fenômenos físicos, como relata Ribeiro (2004), é a identificação dos fatores que influenciam no problema de forma direta. Isto depende da escolha adequada dos princípios físicos e das variáveis dependentes e independentes que descrevem o problema, resultando em um modelo matemático constituído por um conjunto de equações diferenciais.

A modelagem do sistema foi feita com simulação do corpo de prova sem trinca no programa *Ansys* versão educacional 5.6. Este software é dividido em três ferramentas principais, que são descritas logo abaixo.

Na etapa do pré-processamento foi realizada a escolha do tipo de análise que se deseja realizar (como estrutural, térmica ou magnética). E também foi feita a escolha do elemento e a atribuição das propriedades geométricas de cada seção e das propriedades mecânicas dos materiais. Neste momento criou-se a geometria do modelo (nós e elementos) e foram aplicadas as condições de contorno (cargas, apoios e deformações).

Na segunda etapa, foi realizada a solução das variáveis pertinentes à análise estrutural. E na terceira etapa foi feita a análise dos resultados gerados pelo programa, tabelas e gráficos. Estes resultados foram comparados com os cálculos realizados analiticamente.

2.2.1. Cálculo analítico

A partir das equações de Resistência dos Materiais, foi realizado o cálculo analítico dos valores de tensão normal máxima do sistema em três diferentes pontos do corpo de prova (Fig. 7). O ponto **A** situa-se na extremidade do corpo de prova, o ponto **B** situa-se no início do furo e o ponto **C** a 25 mm do início do furo.

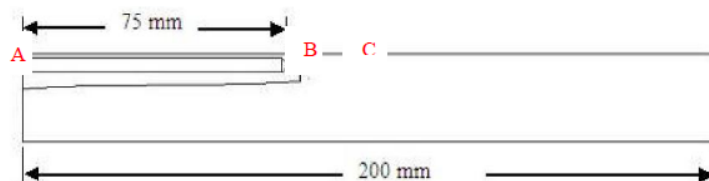


Figura 7. Pontos de referência sobre o corpo de prova.

Desta forma obteve-se: $\sigma_A = 471,9 \text{ MPa}$; $\sigma_B = 409,93 \text{ MPa}$; $\sigma_C = 318,62 \text{ MPa}$.

2.2.2. Modelagem do sistema

Primeiramente, foi feita a medição das peças da máquina e do corpo de prova, comparando-se tais valores com o desenho técnico da máquina. Então foi realizado o primeiro modelo do conjunto (Fig.8) utilizando apenas o elemento de viga *Beam 3*, que possui configuração bidimensional. O modelo é constituído por 13 nós e 12 elementos.



Figura 8. Primeiro modelo do sistema máquina-peça. Vista lateral.

A partir do primeiro modelo, foram integradas gradualmente partes da máquina até então se chegar ao modelo final, que está representado na Fig.9. Foram utilizados os elementos de viga *Beam 3*, que é um elemento para simulação em 2D, e *Beam 4*, que é um elemento para simulação em 3D. Cada elemento do modelo foi criado separadamente, uma vez que eles possuem características diferentes (material e propriedades geométricas).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O modelo (Fig. 9), embora tenha sido simplificado, apresentou valores de força cortante e tensão normal próximas dos valores obtidos analiticamente.

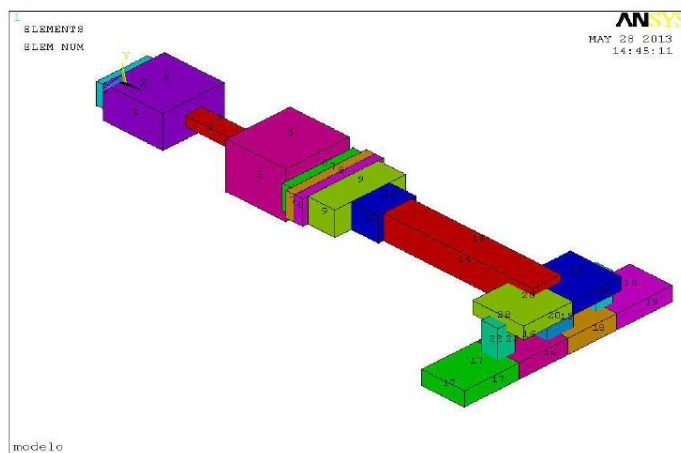


Figura 9. Modelo final do sistema máquina-peça tridimensional para simulação.

Na Tabela 2 estão listados os valores referentes aos esforços internos obtidos a partir da simulação completa do sistema. Comparando os resultados obtidos através do cálculo analítico e da modelagem do sistema podemos analisar a divergência dos resultados referente aos esforços internos.

Tabela 2. Divergência referente aos esforços internos calculados.

	Força cortante (N)	Tensão Normal (MPa)	Diferença percentual em relação à força cortante (%)	Diferença percentual em relação à tensão normal (%)
Modelo simples	1440,6	513,97	1,9	8,9
Modelo final	1437,8	512,96	1,7	8,7
Calculo analítico	1413,65	471,9	-	-

Ao observar os valores de força cortante e tensão normal nos dois modelos, pode-se considerar que a simulação converge para um valor mais próximo do cálculo analítico. Após calcularmos as diferenças percentuais entre modelo e cálculo analítico, podemos considerar o modelo válido.

4. CONCLUSÃO

Atualmente o estudo da fadiga em materiais metálicos e suas possíveis consequências é um dos assuntos mais promissores no ramo da engenharia. Para se obter um projeto mecânico satisfatório, que atenda aos requisitos de resistência e apresente boa durabilidade, é necessário conhecer os mecanismos de nucleação de trinca do material utilizado na confecção dos mesmos.

A utilização de programas de modelagem está sendo de grande auxílio no desenvolvimento de modelos. Através do Método dos Elementos Finitos vários projetistas tiveram a oportunidade de simularem seus projetos e avaliarem parâmetros físicos que possam influenciar no resultado final. O relatório apresentado será de grande importância para a validação da máquina de ensaio de fadiga por flexão alternada. Também poderá ajudar outros projetos de pesquisas que tenham como base a simulação computacional utilizando o princípio de discretização.

O emprego de áreas conjuntas como: mecânica, resistência dos materiais, ciência dos materiais, desenho mecânico, projeto mecânico e simulações computacionais foram de suma importância para a realização deste trabalho.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo auxílio financeiro para construção da máquina (Processo APQ-00357-09) e pela bolsa de iniciação científica, bem como pelo auxílio concedido através do programa Participação Coletiva em Evento Técnico e Científico.

6. REFERÊNCIAS

- Alvarenga Junior, A. “Acúmulo de danos por fadiga no aço SAE 9620”, 2001. 117 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Automotiva, Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Caballero, F.G. et al. “Modelling of kinetics of formation in steels with different initial microstructure”, 2001. ISIJ International. v.41, p. 1093-1102.
- Dias, J. F. “Ensaio de iniciação de trinca por flexão alternada: detecção pela perda de estanqueidade”, 2012. Itaúna: Universidade de Itaúna.
- Ferreira, J. L., Sá, M. V. “Análise experimental de vida à fadiga em componentes entalhados”, 2005, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília.
- Hibbeler, R. C. “Resistência dos materiais”. 7 ed. São Paulo: Pearson, 2010. 637p.
- Mansur, T. R. “Avaliação e desenvolvimento de modelos de determinação de acúmulo de danos por fadiga em aço estrutural”, 2003. 185 f. Dissertação (pós- graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Norton, R. L. “Projeto de máquinas: Uma abordagem integrada”. 2 ed. São Paulo: Bookman Cia Editora, 2000. 939p.
- Ribeiro, F. L.B. “Introdução ao método dos elementos finitos”. Rio de Janeiro: Notas de Aula, 2004. 93 p.

7. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

TEST OF INITIATION OF CRACKS BY ALTERNATING BENDING: DETECTION BY LOSS OF WATERTIGHTNESS

Polyana Barbosa de Paula, polyana_paula@outlook.com¹

José Felipe Dias, josefelipedias@gmail.com²

Ewerton Augusto de Sousa Nogueira, ewertonasnogueira@gmail.com²

Francis Faria Goulart, francis_goulart@outlook.com¹

Gustavo Rodrigues de Souza, souzagr@ufsj.edu.br¹

¹ Universidade Federal de São João Del Rei, DCTEF - 170 Frei Orlando Square, São João Del Rei, Minas Gerais, 36307-352, Brazil.

² Universidade de Itaúna, Faculty of Mechanical Engineering - MG 431 Highway, Km 45, 35680-142, Itaúna, Minas Gerais, Brazil.

Resumo: Due to the necessity of evaluating fatigue mechanisms, especially the crack initiation phase, an alternating bending fatigue testing machine was designed and built. In the scope of this project a bibliographic study was carried out referring to the central theme Test of initiation of cracks by alternating bending: detection by loss of watertightness. From there, a study was made on the computational simulation method, based on the discretization of elements, for the analysis of the results obtained through analytical calculations and tests. A bibliographic survey was carried out on the fatigue properties of steel ABNT 1045, material that constitutes the test specimens. These data will be relevant to the experimental trials. A computational model was developed using the Finite Element Method (FEM) in order to simulate the internal stress generated on the specimen when a displacement was applied at its end.

Keywords: Fatigue, Alternating Bending, Crack, Finite Element Method, Computational Simulation.