

EQUIPAMENTO DE BAIXO CUSTO COM TECNOLOGIA 100% NACIONAL PARA ENSAIO DE FADIGA POR FLEXÃO ROTATIVA¹

LOW COST EQUIPMENT WITH 100% NATIONAL TECHNOLOGY FOR FATIGUE TESTING BY ROTATING FLEXION

Frederico Murilo Wlassak¹

Mario Wolfart Junior¹

Marcelo de Jesus Cevey Osorio¹

Mateus Ritter Pasini¹

Diego Rodolfo Simões de Lima¹

Aloysio Arthur Becker Fogliatto¹

¹Instituto Federal Catarinense – Campus Luzerna

RESUMO: Componentes metálicos com funções estruturais devem manter-se íntegros durante toda sua vida útil. Para atingir tais objetivos, é necessário efetuar Avaliações de Integridade Estrutural (AIE) e Previsões de Vida Residual (PVR) periodicamente. O estudo das propriedades dos materiais é fundamental para o desenvolvimento de novos componentes, sendo que uma importante propriedade é a resistência à fadiga, que prevê a vida útil do material em análise. Para ser definida resistência à fadiga, o material deve ser submetido a ensaios cíclicos de tensão alternada, onde o ciclo de tensão máxima e mínima são iguais em magnitude. Os valores de ciclos de tensão suportados pelo corpo de prova são representados por N, sendo registrados pelo equipamento utilizado nesse tipo de ensaio. O limite de resistência do material à fadiga σ -n representa o valor máximo suportado por um material em um determinado número de ciclos antes de sua ruptura. A forma como os resultados são apresentados se dá pela curva σ -N, (WÖHLER, 1852-1869). Neste trabalho, foi desenvolvido com recursos próprios um equipamento pioneiro para ensaio de fadiga por flexão rotativa, com tecnologia 100% nacional, e realizada sua validação por meio de ensaios em corpos de prova confeccionados em aço AISI 1020 conforme a norma ASTM-E-606. Após a finalização dos ensaios foi levantada curva σ -N. Os ensaios e o desenvolvimento do equipamento foram realizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos e Metalúrgicos, do IFC Luzerna. Os resultados do equipamento apresentam curvas σ -N similares à literatura, e posteriormente o mesmo será utilizado para o desenvolvimento de pesquisas.

Palavras-Chave: Fadiga Mecânica; Flexão rotativa; Curva de Wöhler; Inovação de Produto.

ABSTRACT: Metallic components with structural functions must remain intact throughout their useful life. To achieve these objectives, it is necessary to carry out Structural Integrity Assessments (AIE) and Residual Life Predictions (PVR) periodically. The study of material properties is essential for the development of new components, and an important property is fatigue resistance, which predicts the useful life of the material under analysis. In order to define resistance to fatigue, the material must be subjected to cyclic alternating stress tests, where the maximum and minimum stress cycles are equal in magnitude. The values of stress cycles supported by the specimen are represented by N, being recorded by the equipment used in this type of test. The fatigue resistance limit of the material σ -n represents the maximum value supported by a material in a given number of cycles before failure. The way the

¹ Este artigo se baseia em texto apresentado preliminarmente no 8º *Inovtec* - Seminário de Inovação e Tecnologia do IFSul, realizado entre 5 e 7 de novembro de 2019, em Sapucaia do Sul, RS.

results are presented is given by the σ -N curve, (WÖHLER, 1852-1869). In this work, a pioneering equipment for testing fatigue by rotary bending was developed with own resources, using 100% national technology, and its validation was carried out through tests on test specimens made of AISI 1020 steel in accordance with the ASTM-E-606 standard. . After the completion of the tests, a σ -N curve was created. The tests and development of the equipment were carried out at the Mechanical and Metallurgical Tests Lab, at IFC Luzerna, Brazil. The results of the equipment present σ -N curves similar to the literature, and later it will be used for the development of research.

Keywords: Mechanical Fatigue; Rotary Bending; Wöhler Curve; Product Innovation.

INTRODUÇÃO

A palavra fadiga, do latim “*fatigare*”, significa “cansar, estar cansado”, e descreve as falhas de materiais que sofreram carregamentos cíclicos.

A ocorrência de falhas mecânicas vem sendo enfrentada pelo homem desde o início da utilização de ferramentas para o trabalho. Mas, atualmente sendo agravadas devido a alta produtividade e desempenho almejado em estruturas e componentes mecânicos modernos, trazendo trágicas consequências em decorrência dessas falhas. Contudo, com avanços tecnológicos de análises de mecanismos de falhas, tem-se diminuído estes riscos potenciais.

Falhas catastróficas são péssimos para a economia. Um estudo econômico estimou que fraturas por fadiga nos Estados Unidos em 1978 geraram um gasto de aproximadamente USD 119 bilhões anuais, cerca de 4% do PIB americano. Também estimou que se a tecnologia anual fosse aplicada na época, o gasto seria reduzido para aproximadamente USD 35 bilhões, e se maiores investimentos na área de pesquisa sobre estas falhas o valor seria reduzido para aproximadamente USD 28 bilhões.(ANDERSON, T. L., 1995).

A determinação da vida de componentes submetidos a fadiga é uma etapa essencial no dimensionamento de projetos. No ano de 1985 o voo JAL-123 colidiu em uma montanha após perder a cauda, deixando ao total 520 vítimas fatais. Segundo relatório efetuado pelo governo japonês, a inspeção falhou em identificar a fadiga mecânica dos rebites utilizados para unir os painéis da fuselagem da cauda, as quais foram substituídas 7 anos antes do acidente. Até os dias atuais este é conhecido como o segundo pior acidente da aviação civil.

O primeiro estudo sobre fadiga em materiais metálicos foi desenvolvido por W. Albert por volta de 1829, porém, A. Wöhler foi o primeiro a aplicar carregamentos de flexão rotativa, e de torção, por volta do período de 1852 - 1869, em Berlim. Também responsável por desenvolver o primeiro método de ensaio de fadiga por flexão rotativa e a curva de Wöhler (σ -N). Bauschinger, por volta de 1871-1886 desenvolveu um extensômetro com espelho de sensibilidade igual a 10^{-6} e conduziu estudos sobre a tensão-deformação inelástica, propondo assim um “limite elástico natural” cíclico abaixo do qual nunca iria ocorrer fadiga.

Em 1903 Ewing e Humfrey descobriram as linhas de deslizamento, trinca de fadiga e o crescimento da trinca até a falha. Em 1910 Basquin desenvolveu a lei exponencial para testes de fadiga, (lei de Basquin). Griffith desenvolveu em 1921, um critério de falha e relacionou a fadiga ao crescimento da trinca. Paris em 1961 publicou a lei da mecânica da fratura de Paris para o crescimento de trincas na fadiga.

O objetivo deste artigo é apresentar o desenvolvimento de equipamento para ensaio de fadiga por flexão rotativa e sua validação por meio de ensaios de fadiga

em corpos de prova (CP) confeccionados em aço AISI 1020, conforme a norma ASTM E 606, com a realização do levantamento da curva σ -N segundo a norma ASTM A 370 após a realização dos ensaios.

MATERIAIS E MÉTODOS

Este artigo é fruto de um projeto de Desenvolvimento Tecnológico que incluía entre seus objetivos originais a determinação dos parâmetros fundamentais do Ensaio de Fadiga, para posteriormente passar-se ao projeto do Equipamento, propriamente dito.

Ensaio de Fadiga

Fadiga por flexão rotativa utiliza a forma de tensão alternada, onde o ciclo de tensão mínimo e máximo são iguais em magnitude. A tensão máxima ($\sigma_{\text{máx}}$), é o maior valor da tensão no ciclo, e a tensão mínima ($\sigma_{\text{mín}}$), é o menor valor. Intervalo de tensão (σ_r) é a diferença entre $\sigma_{\text{máx}}$ e $\sigma_{\text{mín}}$; amplitude de tensão (σ_a), é a metade de σ_r ; tensão média (σ_m), é a média entre $\sigma_{\text{máx}}$ e $\sigma_{\text{mín}}$.

O valor de ciclos de tensão suportado pelo corpo de prova até a fratura é plotado por N, esse número é contabilizado pelo equipamento de ensaio de fadiga por flexão rotativa, representando o limite de ciclos para iniciar e propagar a trinca através do material até romper-se. Caso não ocorra rompimento, o valor de N representa o limite de resistência a fadiga do material.

O limite de resistência do material à fadiga, σ_n , é o valor máximo suportado por um material num determinado número de ciclos sem romper. Já o limite de fadiga, σ_l , é definido como valor limite de tensão, abaixo da qual, o material pode suportar valores infinitos de tensões regulares.

A forma de apresentação dos resultados são obtidas pela curva σ -N, (WÖHLER, 1852 - 1869), onde se obtém o gráfico de tensão (σ), por número de ciclos (N), necessárias para a fratura. Nota-se que quanto menor a $\sigma_{\text{máx}}$ maior será N, e vice versa. Verifica-se que para aços existe um patamar correspondente ao limite de fadiga do material, porém ligas não-ferrosas em geral não apresentam tal patamar. Para casos que apresenta-se este patamar, o ensaio deve ser seguido até 10 milhões de ciclos, para casos em que não se apresenta o patamar, o ensaio deve ser levado até 50 milhões de ciclos.

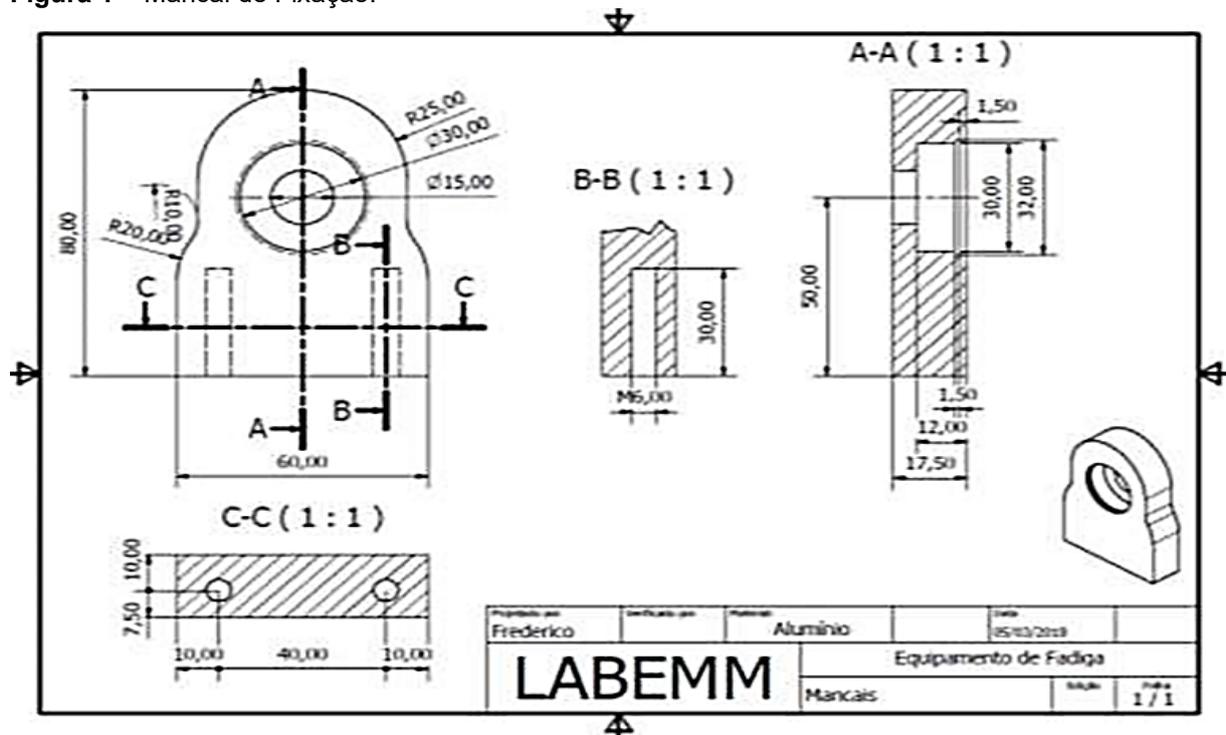
Como a ruptura por fadiga depende de inúmeros fatores e para se traçar um diagrama σ -N é necessária uma grande quantidade de corpos de prova (CP), segundo as normas ASTM E 739-10 e ASTM E 606; são necessários 10 CP, a curva σ -N deve ser traçada como uma linearização de diversos pontos ou mesmo uma faixa que engloba todos os pontos espalhados. Os pontos são determinados pela $\sigma_{\text{máx}}$ aplicada sobre o corpo de prova e o número de ciclos N necessários até a ruptura.

Desenvolvimento do Equipamento

O equipamento foi desenhado utilizando o Software Autodesk Inventor, para o planejamento dos componentes mecânicos, assim como a geração dos desenhos de fabricação das peças a serem usinadas.

Para construção da estrutura foi utilizado aço AISI 8620. Para a confecção dos mancais, bases e blocos foram utilizados alumínio Al 7075. Para o eixo de fixação foi utilizado aço AISI 4340.

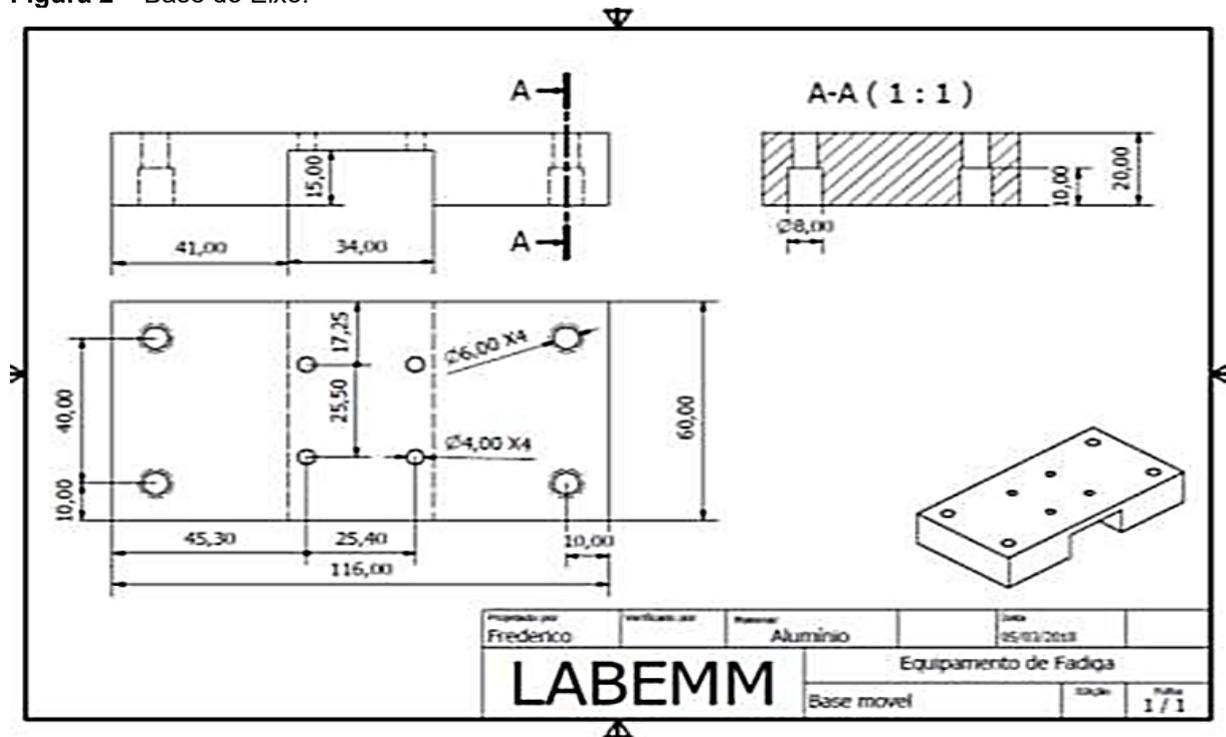
A Figura 1 apresenta o desenho técnico utilizado para a confecção dos mancais responsáveis pela sustentação dos blocos, tanto do motor quanto do eixo.
Figura 1 – Mancal de Fixação.



Fonte: Os autores (2022).

A Figura 2 apresenta o projeto para a base do eixo, que suporta os mancais e é fixada sobre o rolamento linear para evitar cargas parasitas sobre o corpo de prova que está sendo ensaiado.

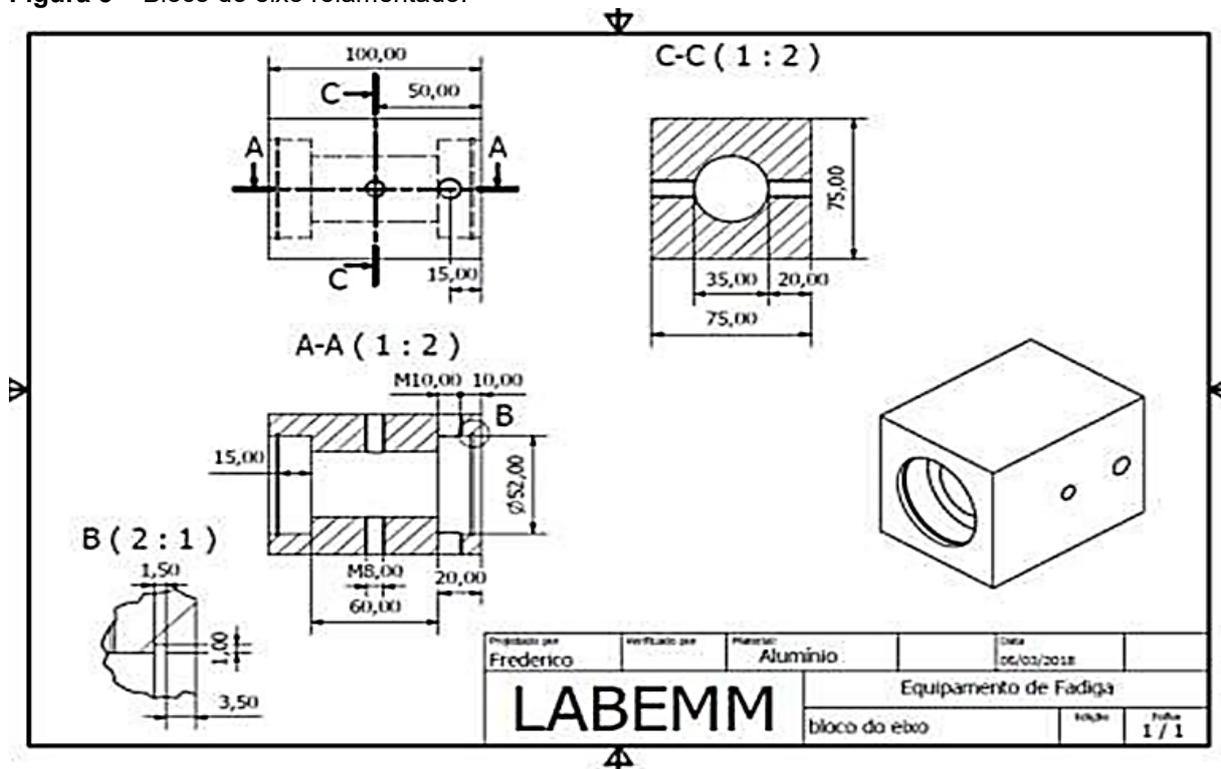
Figura 2 – Base do Eixo.



Fonte: Os autores (2022).

A Figura 3 apresenta o desenho técnico para a usinagem do bloco do eixo rolamentado, e a Figura 4, o projeto para confecção do bloco onde é fixo o motor.

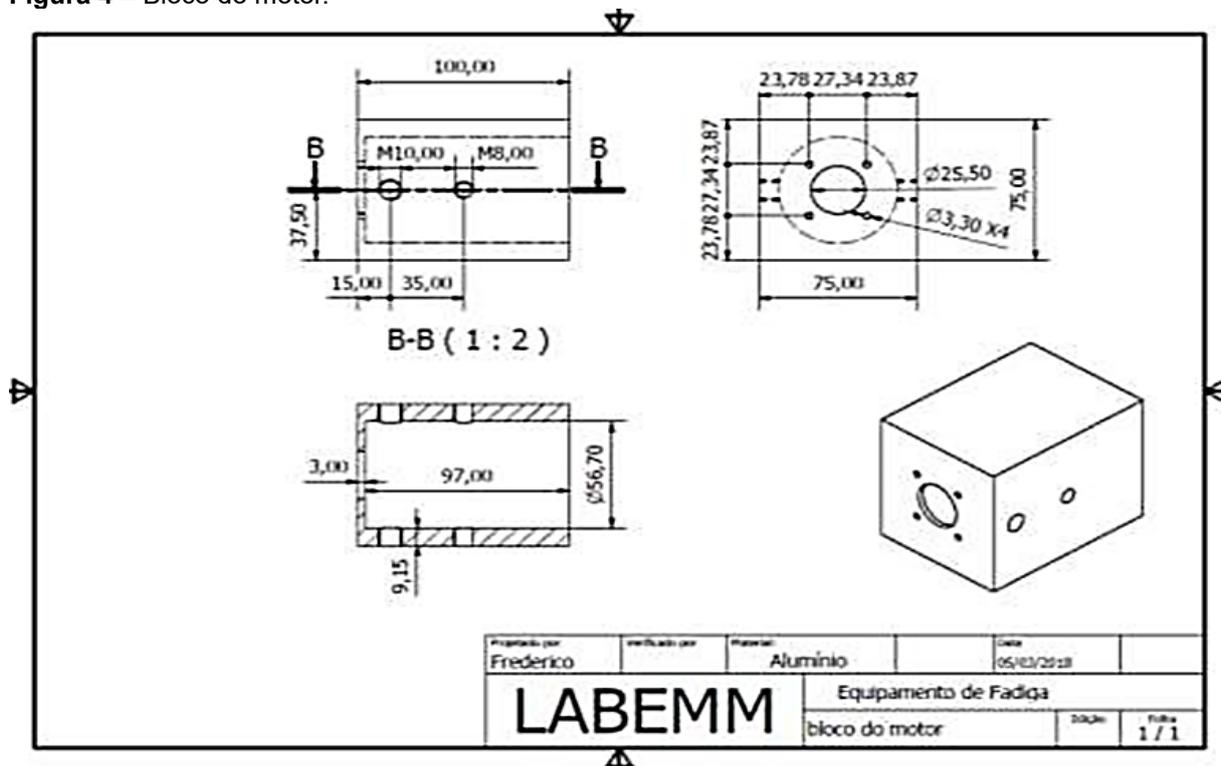
Figura 3 – Bloco do eixo rolamentado.



Fonte: Os autores (2022).

Para evitar a perda de desempenho, o CP é fixo diretamente no motor.

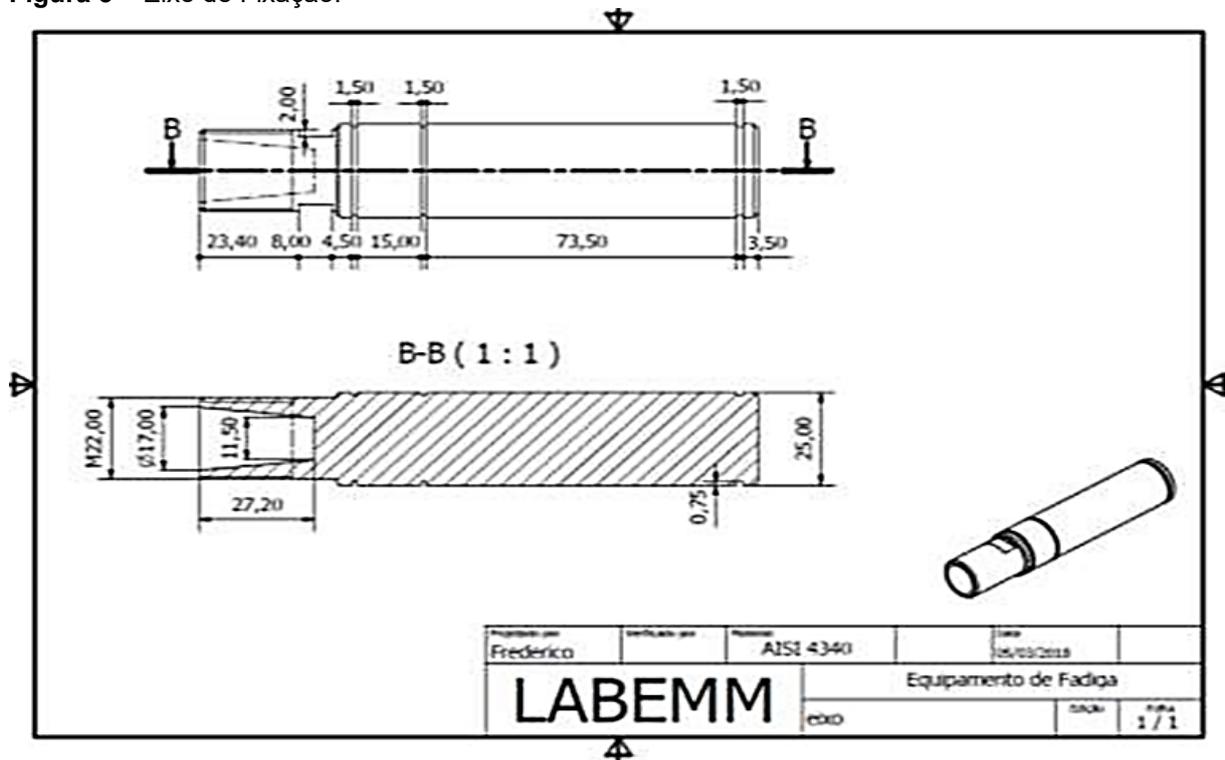
Figura 4 – Bloco do motor.



Fonte: Os autores (2022).

Na Figura 5 está representado o desenho técnico do eixo de fixação para os corpos de prova.

Figura 5 – Eixo de Fixação.



Fonte: Os autores (2022).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a usinagem de todos os componentes, ocorreu a montagem do equipamento, como demonstrado na Figura 6.

Figura 6 – Equipamento para ensaio de fadiga por flexão rotativa.

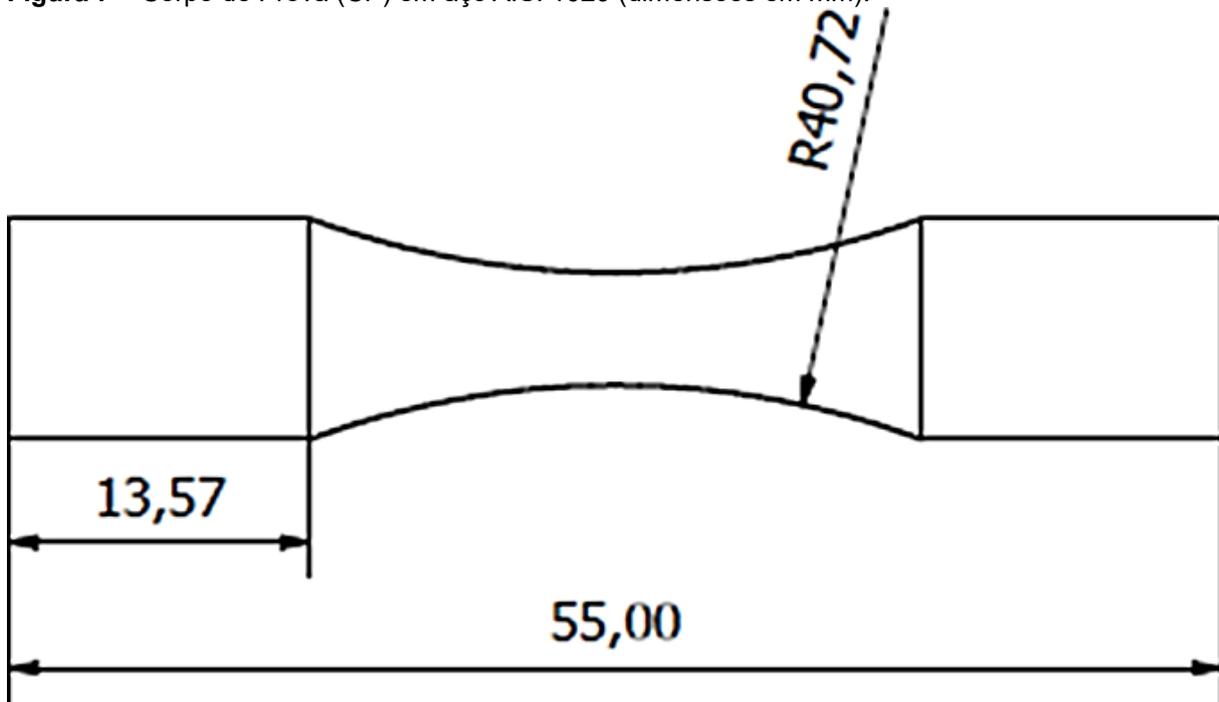


Fonte: Os autores (2022).

Em seguida, iniciou-se o processo de validação do mesmo, executando ensaios de fadiga por flexão rotativa em corpos de prova produzidos em aço AISI

1020 conforme a norma ASTM E 606, demonstrados na Figura 7.

Figura 7 – Corpo de Prova (CP) em aço AISI 1020 (dimensões em mm).



Fonte: Os autores (2022).

A Tabela 1 a seguir apresenta os corpos de prova utilizados para o ensaio, constando valores de ciclos e tensões utilizadas.

Tabela 1. Resultados dos ensaios Ensaio de Fadiga em Corpos de Prova (CP) em Aço AISI 1020

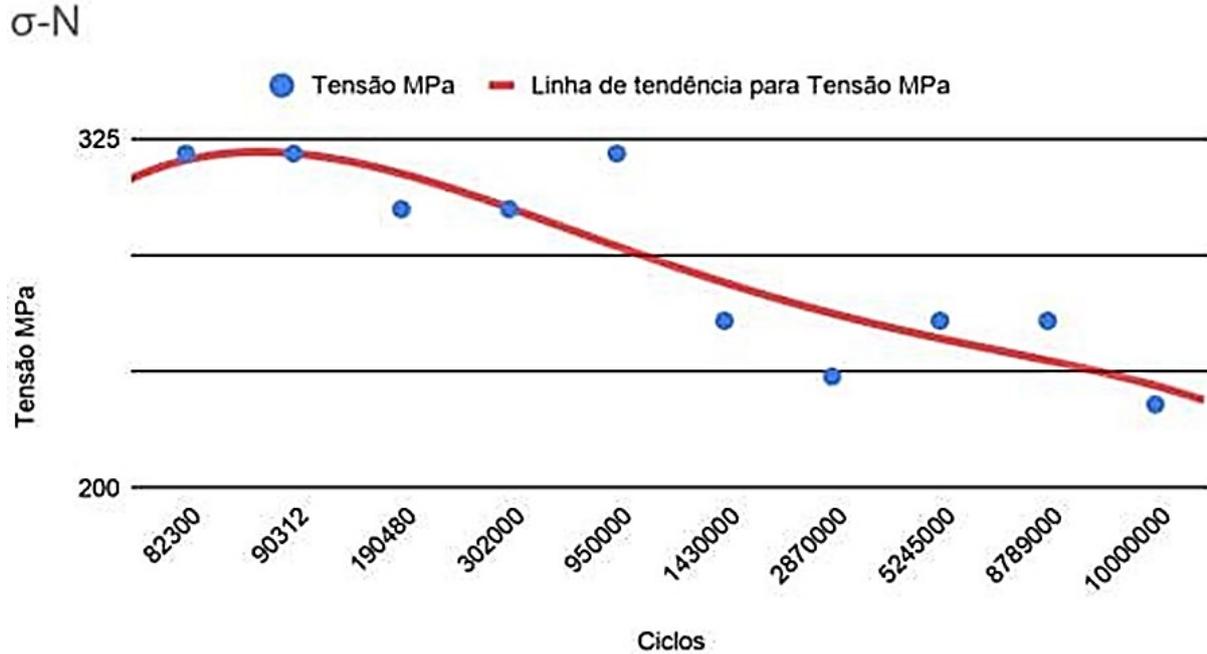
CP	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	CP8	CP9	CP10
Tensão (Mpa)	320	320	300	300	320	260	240	260	260	230
Ciclos	8×10^4	9×10^4	10^5	3×10^5	9×10^5	10^6	2×10^6	5×10^6	8×10^6	10^7

Fonte: Os autores (2022).

Para que um aço atinja seu limite de resistência a fadiga, este deve atingir valores de ciclos acima de 10^7 conforme especificado nas normas ASTM E 606 e ASTM E 739-10. Para cada valor de tensão utiliza-se um corpo de prova, caso ocorra rompimento, o ensaio é interrompido os valores são gravados dando início a outro ensaio, com tensão menor que a anterior até que se atinja uma carga em que não ocorra rompimento.

A curva de Wöhler, apresentada no gráfico da Figura 8 a seguir, conforme a norma ASTM E 739, contém comparações dos valores obtidos pelos ensaios realizados no equipamento desenvolvido pelo projeto e valores padronizados de resistência a fadiga do aço AISI 1020.

Figura 8 – Curva de Wöhler σ -N dos ensaios realizados



Fonte: Os autores (2022).

Segundo a norma ASTM A 321 a resistência a fadiga média do aço AISI 1020 para corpos de prova padronizados é de aproximadamente 200 a 250 MPa.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo teve como seu objetivo principal apresentar o desenvolvimento de um equipamento para ensaio de fadiga por flexão rotativa, além de sua validação por meio de ensaios de fadiga em corpos de prova (CP) confeccionados em aço AISI 1020, conforme norma ASTM E 606, e da posterior realização do levantamento da curva σ -N segundo a norma ASTM A 370, após os ensaios.

Após a conclusão da montagem do equipamento e a realização de ensaios de fadiga por flexão rotativa em aço AISI 1020, constatou-se que o equipamento atende as especificações normalizadas para o ensaio segundo a norma ASTM E 606 e ASTM E 739-10, apresentando valores condizentes com o especificado conforme a norma ASTM A 321, para valores de resistência a fadiga. Assim, o equipamento está apto para a realização de ensaios voltados à pesquisa e estudo dos materiais.

O equipamento atualmente se encontra no Instituto Federal Catarinense, Campus Luzerna, no Laboratório de Ensaios Mecânicos e Metalúrgicos, para possíveis melhorias de desempenho, podendo ser utilizado em diversos projetos de ensino, pesquisa e extensão.

Espera-se que, a partir deste primeiro protótipo funcional, a tecnologia de fabricação de equipamentos para ensaio de fadiga por flexão rotativa se dissemine, contribuindo para a qualidade dos produtos das indústrias metal-mecânicas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Federal Catarinense, *campus* Luzerna, por permitir a realização do projeto descrito, agradecendo especialmente à equipe do Laboratório de Ensaios Mecânicos e Metalúrgicos, Labemm, pela intensa

colaboração no desenvolvimento do equipamento, e na confecção dos corpos de prova utilizados na etapa de validação.

REFERÊNCIAS

ASM. Asm International. **Fatigue**. Elements of Metallurgy and Engineering Alloys, 2008 Disponível em: <http://www.asminternational.org/documents/10192/1849770/05224G_Chapter14.pdf> Acesso em: 13/08/2019.

ASM. Asm International. **Handbook Fatigue and fracture**. 19. ed. Ohio: ASM International, 1996.

ASTM. **Astm A370-19e1**, Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.

ASTM. **Astm E466-07**, Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007.

ASTM. **Astm E606 / E606M-12**, Standard Test Method for Strain-Controlled Fatigue Testing, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.

ASTM. **Astm E739-10(2015)**, Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress- Life (S-N) and Strain-Life (ϵ -N) Fatigue Data, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.

BANNATINE, Julie A.; COMER, Jess J. HANDROCK, James I. **Fundamentals of metal fatigue analysis**. EUA, Pretince Hall, 1990.

CALLISTER, William D. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. 7ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CDMUNICAS. **Contruzione di Macchine**. Fatica 2p. Disponível em <<http://www.cdmunicas.it/notes/PEM/2016/L9%20-%20fatica%20parte%202.pdf>>. Acesso em: 10/08/2019.

DIETER, G. E. **Metalurgia mecânica**. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1981.

FREDEL, Márcio C. **Propriedades mecânicas: ensaios fundamentais – vol 1**. Florianópolis, 2015.

GARCIA, Amauri; SPIN, Jaime A.; SANTOS, Carlos A. dos. **Ensaio dos materiais**. 2.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012

INSPEÇÃO DE EQUIPAMENTOS: ESTUDOS DE CASO. Caso 073: Fadiga Mecânica – Voo JAL-123 (1985), 2014. Disponível em <<http://inspecaoequipto.blogspot.com.br/2014/05/caso-073-fadiga-mecanica-vo-jal123.html>>. Acesso em: 20/07/2019.

ISO. International Organization for Standardization. **ISO 1143:2010**: Metallic materials – Rotating bar bending fatigue testing. Genebra, 2010.

ISO. International Organization for Standardization. **ISO 12107:2012**: Metallic materials — Fatigue testing — Statistical planning and analysis of data. Genebra, 2012.

NORTON, R.L. **Projeto de máquinas**: uma abordagem integrada. 2.ed. Porto Alegre: Bookman (Grupo A), 2004.

SOBRE OS AUTORES

Frederico Murilo Wlassak – Bolsista (*Estudante de Bacharelado em Engenharia Mecânica, IFC; Técnico em Mecânica, IFC, 2019*), Laboratório de Ensaios Mecânicos e Metalúrgicos, LABEMM, Instituto Federal Catarinense, Luzerna, wlassak.f@gmail.com.

Mario Wolfart Jr. – Orientador. (*Doutor em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, UFRGS, 2002*), Professor do Curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica e Coordenador do Laboratório de Ensaios Mecânicos e Metalúrgicos, LABEMM, Instituto Federal Catarinense, Luzerna, mario.wolfart@ifc.edu.br.

Marcelo de Jesus Cevey Ozorio, – (*Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais, UTFPR, 2020; Especialização em Engenharia de Produção, UNOESC, 2015*), Professor do Curso de Bacharelado em Eng^a Mecânica, Instituto Federal Catarinense, Luzerna marcelo.ozorio@ifc.edu.br.

Mateus Ritter Pasini – (*Bacharel em Engenharia Mecânica, IFC, 2020, Técnico em Mecânica, SENAI/SC, 2013*). Estudante do Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, PPGE3M, UFRGS. Técnico em Mecânica do Instituto Federal Catarinense, Luzerna, mateus.pasini@ifc.edu.br.

Diego Rodolfo Simões de Lima – (*Doutor em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, UFRGS, 2012*), Professor do Curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica, Instituto Federal Catarinense, Luzerna, diego.Lima@ifc.edu.br.

Aloysio Arthur Becker Fogliatto, (*Doutor em Engenharia Mecânica, UFSC, 2018*), Professor do Curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica, Instituto Federal Catarinense, Luzerna, aloyisio.fogliatto@ifc.edu.br.