

INVESTIGAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO DE EIXOS DE TRANSMISSÃO UTILIZADOS EM EMBARCAÇÕES TIPO RABETA: ESTUDO EM CARREGAMENTO ESTÁTICO E DINÂMICO

Jean Valdir Uchoa Teixeira (IFPA) E-mail: jvuteixeira@gmail.com

Fernanda Malato Praxedes (IFPA)E-mail: fmpraxedes@gmail.com

Elza Monteiro Leão Filha (IFPA) E-mail: elza.filha@ifpa.edu.br

Resumo: No presente trabalho foi realizado o estudo do comportamento mecânico em carregamento estático e dinâmico de eixos de aço carbono utilizados em embarcações de pequeno porte do tipo rabeta, típicas da região amazônica. O material analisado foi obtido do comércio local, sendo em seguida cortados e usinados conforme as dimensões para o ensaio de fadiga, além da realização da caracterização microestrutural do material, assim como avaliação da dispersão dos resultados conforme a metodologia de Weibull. Os resultados obtidos em quatro condições de cargas impostas foram plotados em um gráfico de tensão X quantidade de ciclos, onde observou-se uma transição das condições de fadiga de baixo ciclo para alto ciclo nas tensões abaixo de 150 MPa, assim como foi comprovada a validade dos dados obtidos através da análise da distribuição de Weibull. Complementarmente, a análise metalográfica acusou a presença de material exógeno na composição básica do aço, indicando que os resultados mecânicos podem ter sido afetados pela qualidade do material dos eixos.

Palavras-chave: Embarcação, Metal, Eixo, ensaios mecânicos.

Investigation of the mechanical performance of transmission axes used in raft-type vessels: Study on static and dynamic loading

Abstract: In the present work, the mechanical in static and dynamic loading behavior of carbon steel shafts used in small tail-type vessels typical of the Amazonian region was studied. The analyzed material was obtained from the local shop and then cut and machined according to the dimensions for the fatigue test, besides the performance of the microstructural characterization of the material, as well as evaluation of the dispersion of the results according to the Weibull methodology. The results obtained in four imposed load conditions were plotted on a voltage graph tension X amount of cycles, where a transition from the low cycle fatigue conditions to the high cycle occur to the stresses below 150 MPa was observed, as was the purchase the validity of the data obtained by analyzing the Weibull distribution. In addition, the metallographic analysis indicated the presence of exogenous material in the basic steel composition, indicating that the mechanical results may have been affected by the quality of the material of the axes.

Keywords: Vessel, Metal, Shaft, mechanical tests.

1. Introdução

A região amazônica se destaca por apresentar uma grande quantidade de rios, os quais se caracterizam como principal meio de acesso à regiões afastadas dos centros urbanos onde residem pequenas comunidades chamadas ribeirinhas. Tais comunidades dependem do uso de embarcações de pequeno porte como principal meio de locomoção, seja familiar ou comunitária, para a cidade, trabalho, escola e postos de saúde.

Os barcos do tipo rabetas se apresentam como um importante meio para a manutenção da qualidade de vida na comunidade, visto que não apenas aumentam a autonomia destas famílias, afetando significativamente a renda familiar, uma vez que se tornam uma ferramenta

de trabalho para a pesca, atividade tipicamente adotada por esta população (CAETANO; SILVA, 2016; PAULA; FERNANDES; FERNANDES, 2016). Estas embarcações consistem em canoas com um motor que transmite o movimento para eixos que realizam o trabalho do sistema de transmissão, sendo estes elementos geralmente compostos por ligas de aço ao carbono (HIDENBURGO et al., 2009).

Estas embarcações são construídas em pequenas oficinas, com base no conhecimento repassado entre gerações e sem controle de qualidade do material utilizado, o que gera constantes falhas em serviço, reduzindo a vida útil das embarcações e tornando-se assim uma problemática que precisa ser explorada e resolvida (CORRÊA; CONSTRUÇÃO, 2016), principalmente a falha prematura do eixo de transmissão, geralmente fabricados em aço carbono.

Os aços com baixo teor de carbono são amplamente utilizados na indústria, com percentual de C variando entre 0,05% e 0,30%, baixo custo de produção e versatilidade de aplicação (SELVAMANI et al., 2015; SELVAMANI; PALANIKUMAR, 2014), sendo constituído por uma microestrutura de matriz ferrítica com agrupamentos de perlita (VIGRAMAN; NARAYANASAMY; RAVINDRAN, 2012). Devido a estas características eles são utilizados para fabricação dos eixos de rabeta, estando sujeito a um conjunto de esforços dinâmicos em serviço.

Estes esforços cíclicos levam a fratura prematura do material, em tensões na região elástica, abaixo do que seria requerido em condições de carregamento permanente, sendo necessário não só conhecer as propriedades do eixo em carregamento estático, como também quando sujeitos a carregamentos dinâmicos, quando a fratura ocorre por fadiga.

Nos eixos de transmissão de aço carbono (como no caso das rabetas) os esforços atuantes, tanto de rotação quanto flexão geram tensões trativas e compressivas que se alternam no decorrer de cada ciclo de carregamento. Tais variações geram trincas a partir de defeitos superficiais, inclusões subsuperficiais ou áreas com elevada rugosidade, os quais crescem progressivamente culminando na fratura do material (DE LACERDA et al., 2017; GRAD et al., 2012).

Com base no que foi exposto, o objetivo desta pesquisa é avaliar os eixos de aço com baixo teor de carbono utilizados em comunidades ribeirinhas do Pará como eixo nas embarcações do tipo rabeta. Como o objetivo de auxiliar estas comunidades, fornecendo informações sobre o material utilizada, foram realizadas análises estáticas e dinâmicas, as quais visam simular as condições de trabalho do material, além de estudo metalográfico e fractográfico dos eixos.

2. Metodologia

Para a realização desta pesquisa foram utilizados corpos de prova retirados de eixos de aço carbono comercializados na cidade de Belém-PA, os quais foram cortados e usinados no laboratório de usinagem do Instituto Federal do Pará. A composição do material foi identificada por meio de fluorescência de raios X realizada no equipamento BRUKER.

Para a avaliação microestrutural, uma amostra foi lixada até granulometria de 1200#, sendo em seguida polida com pasta de diamante de 3 μ m por 60 minutos e posteriormente atacada com nital 3% por 10 segundos. Para a obtenção das imagens utilizou-se microscópio Carl Zeiss AXIO LAB e o software ZEISS 2.0.

Para averiguar as propriedades mecânicas do material sob carga estática foi realizado o ensaio de tração de corpo de prova seguindo a norma ASTM 8E/8. Utilizou-se o equipamento EMIC, com velocidade de deslocamento 2 mm/min até a ruptura, obtendo-se as tensões de escoamento e máxima do material.

O ensaio de carregamento dinâmico realizado foi de fadiga por flexão rotativa simples, o qual simula o sistema de cargas atuantes sobre o eixo das rabetas. Foram utilizados 4 níveis de tensão para a obtenção da curva S x N, com 5 replicadas para cada condição.

Posteriormente as superfícies de fratura foram analisadas por microscopia ótica no equipamento AXIO Carl Zeiss e microscopia eletrônico de varredura Vega 3 da TESCAN.

Complementarmente, também foi realizada a análise estática, seguindo a distribuição de probabilidade de Weibull, com o objetivo de obter a probabilidade de falha com o aumento do número de ciclos

3. Resultados e Discussão

A composição química do aço utilizado nas embarcações é mostrada na Tabela 1, onde é possível perceber que se trata de um aço ao carbono com médio teor de C, com presença de Alumínio em 0,20% e manganês em 1,08%, os quais podem ser provenientes do processo de refino do aço (JUNIOR, 2013). O teor de manganês da amostra se encontra acima do especificado para aços de baixo e médio carbono utilizados na literatura (HYUK; SOO, 2017; VIGRAMAN; NARAYANASAMY; RAVINDRAN, 2012), sendo um elemento que altera a ductilidade e dureza do material, o que pode influenciar na resposta a fadiga do material (SALDARRIAGA, 2008).

Fe	Mn	Si	Al	C
98,00%	1,08%	0,38%	0,20%	0,34%

Tabela 1 – Composição química dos eixos.

Duas micrografias com ampliação de 100 e 200 vezes (Figura 1) foram obtidas, nas quais podem ser observadas uma microestrutura bifásica composta por ferrita e perlita, além da presença de inclusões, as quais possivelmente são intermetálicos de silício, alumínio e manganês. Estes compostos intermetálicos podem favorecer, quando em pequena quantidade a dureza do material, e consequentemente favorecer a propagação de trinca no processo de fadiga, como relatado na literatura (CHAN, 2010; SAKAI et al., 2016).

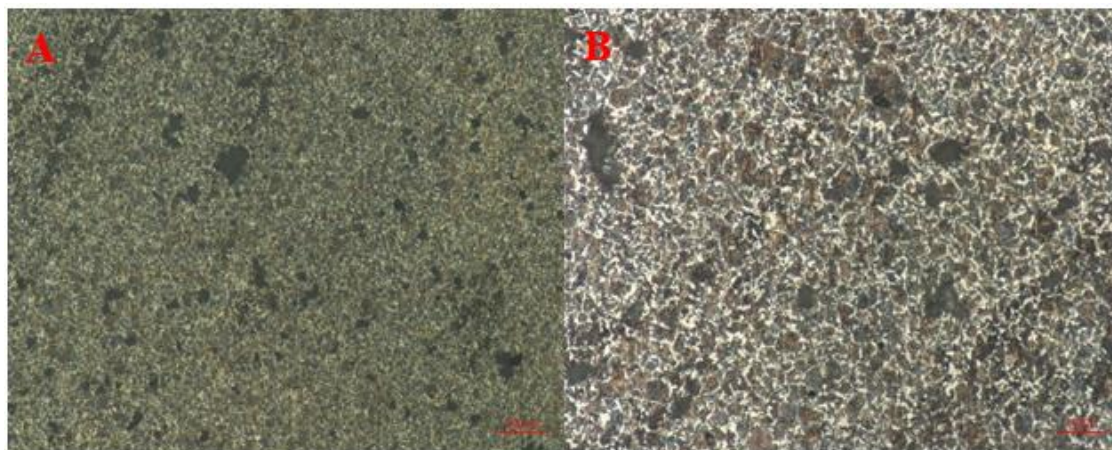


Figura 1 – Micrografia do eixo com aumento de 100X (A) e 200X (B).

A partir do ensaio de tração foi possível obter o gráfico tensão versus deformação para o aço em estudo, conforme pode ser visto na Figura 2. Com base nas informações obtidas foi possível determinar a tensão limite de escoamento em 810,40MPa e tensão máxima suportada pelo material em 856,46 MPa. A partir destes dados foi realizado o desenho experimental do ensaio de fadiga, sempre se mantendo na região elástica do material.

Devido ao tipo de carregamento exigido do material, as informações obtidas apenas em ensaio estático não são suficientes para compreender o comportamento dos eixos, tendo em vista que este material está sujeito a variações no seu carregamento entre os períodos de

operação, além da alternância de tensões trativas e compressivas na seção do material devido a sua rotação. Portanto, para uma melhor compreensão do eixo de rabeta, foi realizado o ensaio de fadiga por flexão rotativa em corpos de prova usinados e lixados, conforme procedimentos adotados em pesquisas prévias disponíveis na literatura (HYUK; SOO, 2017; LUKE et al., 2011; MOČKO, 2014; WAGNER et al., 2016).

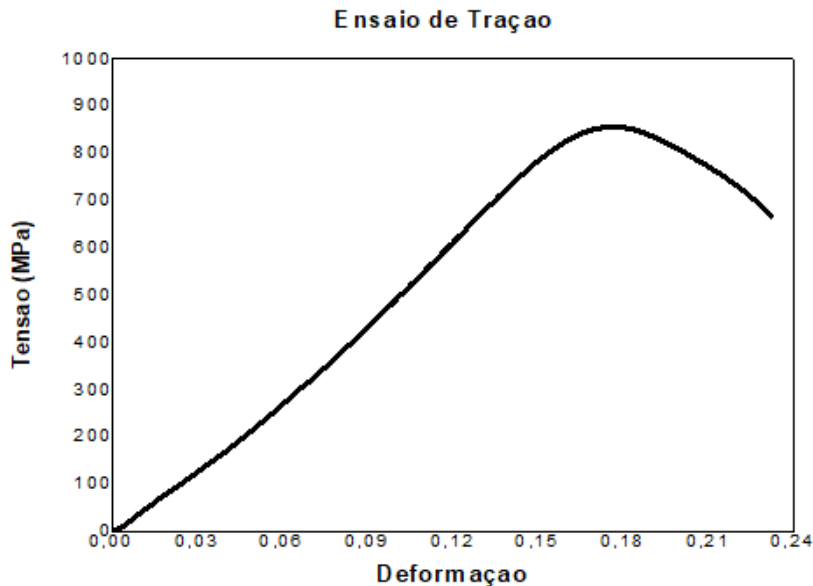


Figura 2 – Gráfico Tensão X Deformação do eixo utilizado nas rabetas.

A Figura 3 apresenta o gráfico S x N do ensaio de fadiga realizado no material, além da curva corrigida a partir do fator de influência do acabamento superficial. Por meio do gráfico podemos observar que apesar de mesmo abaixo da tensão limite de escoamento do material, ainda ocorrerá fratura prematura, com número de ciclos abaixo de 10^5 com tensões acima de 150 MPa para o eixo como comercializado, sendo este valor aproximadamente 18,5 % da tensão de escoamento. Estes valores estão abaixo dos encontrados na literatura para aços de médio teor de carbono, sendo obtido ciclos acima de 10^5 com tensão de 360 MPa (AVILÉS et al., 2013).

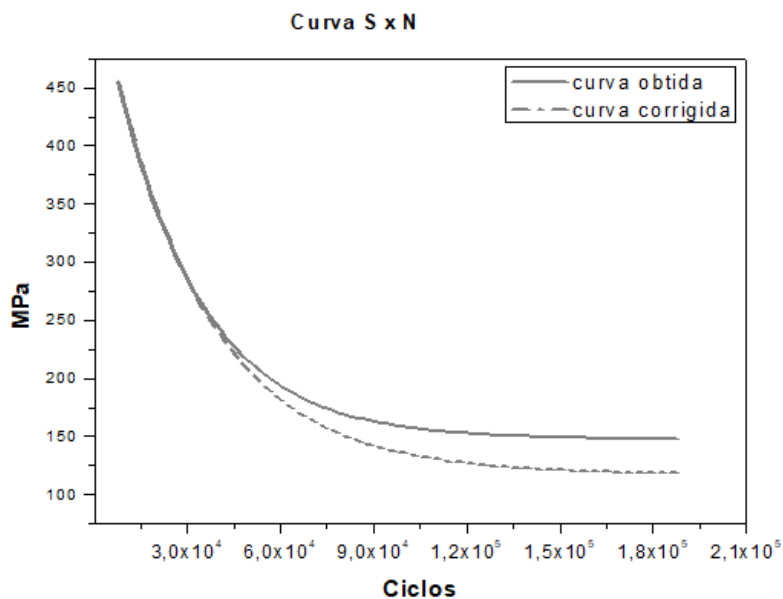


Figura 3 – Gráfico S x N do eixo de rabeta com superfície lixada e não tratada.

O baixo desempenho do material pode estar associado a presença de inclusões presentes no seu interior (Figura 1), as quais agem como concentradores de tensão, conforme já foi evidenciado por Sun e colaboradores (SUN et al., 2013), Saberifar e colaboradores (SABERIFAR et al., 2012) e Alisson & Pandkar (ALLISON; PANDKAR, 2018), favorecendo o processo de propagação de trinca até sua fase instável e consequente fratura (WEISS; LAVI, 2016).

Devido a dispersão de resultados inerente ao ensaio de fadiga, além da presença de inclusões que podem interferir na confiabilidade do resultado obtido foi adotada a distribuição de Weibull e seu critério de distribuição de falha (MOHAMMAD et al., 2014). A Figura 4 apresenta o gráfico de probabilidade de falha em função do número de ciclos, no qual pode-se perceber uma variação da quantidade de ciclos em que a probabilidade passa a ser superior a 50%, este valor corresponde a 8 mil, 22 mil, 35 mil e 136 mil, para 450 MPa, 350 MPa, 250 MPa e 150 MPa respectivamente. Os valores obtidos para este aço estão abaixo dos encontrados por Mohammad e colaboradores (MOHAMMAD et al., 2014), que obteve a probabilidade de falha do aço 1045 sob fadiga em tensões acima de 480 MPa.

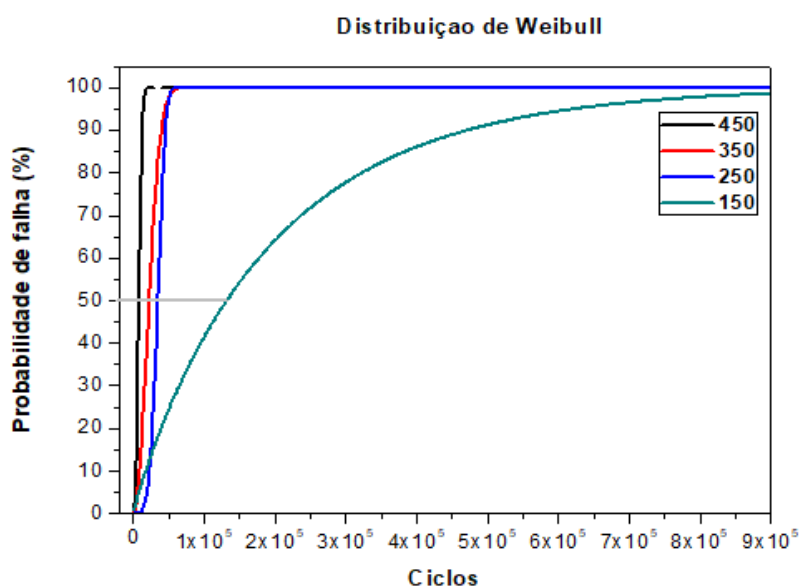


Figura 4 – Gráfico S x N do eixo de rabeta com superfície lixada e não tratada.

Com o objetivo de compreender os fenômenos envolvidos na fratura por fadiga dos eixos, a superfície de cada condição utilizada nesta pesquisa foi avaliada por meio de estereoscopia e microscopia eletrônica de varredura. As imagens obtidas estão são apresentadas na Figura 5.

Na amostra 5-A, submetida a tensão de 450 MPa, pode-se perceber a presença de múltiplos pontos de nucleação superficial de trinca, indicados pelas setas brancas. A superfície de fratura apresenta duas zonas distintas, com sua transição delimitada pelas setas brancas no interior do material, sendo a primeira de propagação instável, caracterizada pela área rugosa que se inicia nas bordas e vai em direção ao centro, terminando na zona de rompimento, caracterizada pela presença de dimples, como pode ser observado na imagem do MEV, típico de fratura dúctil, a qual está associada com o ponto de ruptura abrupta do material pela elevação da tensão na sessão útil (AVILÉS et al., 2013).

Na amostra submetida a tensão de 350 MPa (Figura 5-B), pode-se perceber pontos de nucleação superficial de trincas, além de vazios próximos a superfície, indicados pelas setas próximas à superfície, o que provavelmente facilitou a propagação de trinca no material.

Também pode-se notar a presença de três zonas distintas, sendo a primeira caracterizada pelo aspecto liso, por onde as trincas nucleadas se propagaram de forma estável, característica de cargas cíclicas em eixos submetidos a tensões na região elástica (OGAWA et al., 2017).

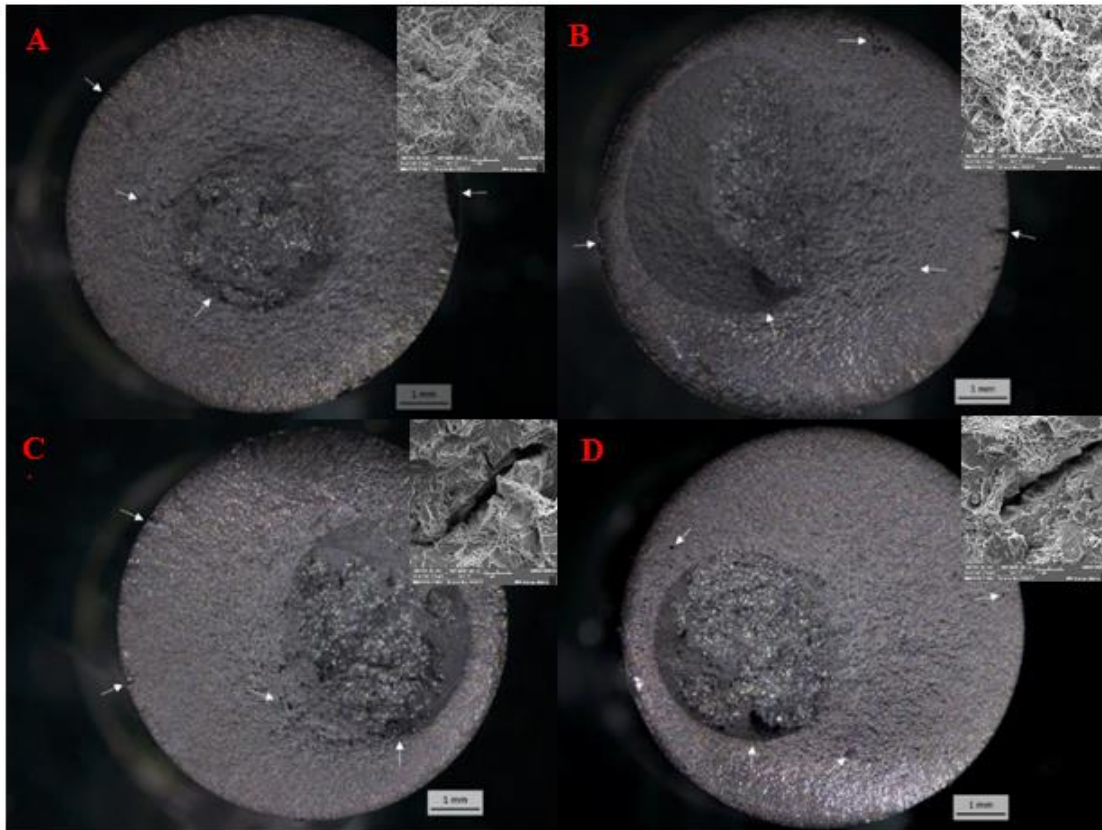


Figura 5 – Gráfico S x N do eixo de rabeta com superfície lixada e não tratada.

Assim como no eixo submetido a tensão de 450 MPa, neste, há a presença de uma região de propagação instável, caracterizada pela região rugosa. a região de fratura abrupta é a terceira zona presente no material, localizada fora do centro, ela também se caracteriza pela presença de dimples, com aspecto similar á a figura 5-A, como pode ser observado na microscopia eletrônica de varredura.

Nas tensões abaixo de 350 MPa, pode-se notar a presença de uma zona bem delimitada de deformação plástica, com aspecto liso nas extremidades das amostras das figuras 5-C e 5-D, evidenciando um maior tempo de propagação estável de trinca, com conseqüente maior vida útil do material em serviço. Estes resultados sugerem que a falha por fadiga em períodos em curtos períodos de uso está relacionada a baixa resistência a fadiga dos eixos, tendo em vista que os resultados experimentais estão abaixo dos encontrados na literatura para aços ao carbono com até 0,4% de C (HYUK; SOO, 2017; MOHAMMAD et al., 2014).

4. Conclusão

Este trabalho teve por objetivo avaliar os eixos utilizados por embarcações de comunidades ribeirinhas do estado do Pará, e com base nos resultados obtidos pode-se concluir que:

- Os eixos comercializados possuem estrutura típica de aço médio teor de carbono, com a presença de inclusões, as quais possivelmente interferem no desempenho mecânico do material em serviço.

- O material apresenta baixo desempenho do ensaio de fadiga por flexão rotativa, com falha em baixo ciclo em 450 MPa, 350 MPa e 250 MPa, com probabilidade de falha alcançando valores de 10^5 apenas em 150 MPa.
- Apesar da baixa quantidade de ciclos, o material apresentou superfície de fratura típica de falha por fadiga, com aumento gradual da zona de propagação estável, conforme a diminuição da tensão aplicada.

Referências

- ALLISON, B.; PANDKAR, A. CRITICAL FACTORS FOR DETERMINING A FIRST ESTIMATE OF FATIGUE LIMIT OF BEARING STEELS. INTERNATIONAL JOURNAL OF FATIGUE, AUGUST, 2018
- AVILÉS, R. ET AL. INFLUENCE OF LOW-PLASTICITY BALL BURNISHING ON THE HIGH-CYCLE FATIGUE STRENGTH OF MEDIUM CARBON AISI 1045 STEEL. INTERNATIONAL JOURNAL OF FATIGUE, v. 55, p. 230–244, 2013.
- CAETANO, V. N. S.; SILVA, A. N. DESENVOLVIMENTO E EDUCAÇÃO NO MARAJÓ: ESTUDO DE CASO NO MUNICÍPIO DE BREVES (MARAJÓ/PARÁ/BRASIL). REVISTA GEOAMAZÔNIA, v. 4, n. 7, p. 120–137, 2016.
- CHAN, K. S. ROLES OF MICROSTRUCTURE IN FATIGUE CRACK INITIATION. INTERNATIONAL JOURNAL OF FATIGUE, v. 32, n. 9, p. 1428–1447, 2010.
- CORRÊA, E. D. J. A.; CONSTRUÇÃO. CONSTRUÇÃO NAVAL ARTESANAL E A METAMORFOSE DO TRABALHO, CAPITAL NA AMAZÔNIA: UM ESTUDO SOBRE CONSTRUTORES DE EMBARCAÇÕES DE MADEIRA EM IGARAPÉ-MIRI (PA). 2016. UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, 2016.
- DE LACERDA, J. C. ET AL. EVOLUTION OF THE SURFACE ROUGHNESS OF A LOW CARBON STEEL SUBJECTED TO FATIGUE. INTERNATIONAL JOURNAL OF FATIGUE, v. 102, p. 143–148, 2017.
- GRAD, P. ET AL. MECHANISM OF FATIGUE CRACK INITIATION AND PROPAGATION IN THE VERY HIGH CYCLE FATIGUE REGIME OF HIGH-STRENGTH STEELS. SCRIPTA MATERIALIA, v. 67, n. 10, p. 838–841, 2012.
- HIDENBURGO, I. ET AL. EMBARCAÇÕES PESQUEIRAS DO RESERVATÓRIO DA USINA HIDRELÉTRICA DE TUCURUÍ (PARÁ, BRASIL) BOL. TÉC. CIENT. CEPNOR.
- HYUK, S.; SOO, C. RELATIONSHIP BETWEEN MECHANICAL PROPERTIES AND HIGH-CYCLE FATIGUE STRENGTH OF MEDIUM-CARBON STEELS. MATERIALS SCIENCE & ENGINEERING A, v. 690, n. FEBRUARY, p. 185–194, 2017.
- JUNIOR, R. V. S. INFLUÊNCIA DE MICROLIGANTES NA USINABILIDADE E PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO 1045. 2013. UNIVERSIDADE PRESBITERIANA MACKENZIE RAFAEL, 2013.
- LUKE, M. ET AL. FATIGUE CRACK GROWTH IN RAILWAY AXLES: ASSESSMENT CONCEPT AND

- VALIDATION TESTS. *ENGINEERING FRACTURE MECHANICS*, v. 78, n. 5, p. 714–730, 2011.
- MOČKO, W. THE INFLUENCE OF STRESS-CONTROLLED TENSILE FATIGUE LOADING ON THE STRESS-STRAIN CHARACTERISTICS OF AISI 1045 STEEL. *MATERIALS AND DESIGN*, v. 58, p. 145–153, 2014.
- MOHAMMAD, M. ET AL. PREDICTING THE FATIGUE LIFE OF THE SAE 1045 STEEL USING AN EMPIRICAL WEIBULL-BASED MODEL ASSOCIATED TO ACOUSTIC EMISSION PARAMETERS. *MATERIALS AND DESIGN*, v. 54, p. 1039–1048, 2014.
- OGAWA, Y. ET AL. UNIFIED EVALUATION OF HYDROGEN-INDUCED CRACK GROWTH IN FATIGUE TESTS AND FRACTURE TOUGHNESS TESTS OF A CARBON STEEL. *INTERNATIONAL JOURNAL OF FATIGUE*, v. 103, p. 223–233, 2017.
- PAULA, A.; FERNANDES, S.; FERNANDES, A. S. A (IN) ACESSIBILIDADE NOS TRANSPORTES E AS PESSOAS COM DEFICIÊNCIA DA COMUNIDADE RIBEIRINHA DA AMAZÔNIA PARAENSE. *REVISTA COCAR*, v. 10, n. 19, p. 140–264, 2016.
- ROSA, E. DA. ANÁLISE DE RESISTÊNCIA MECÂNICA DE PEÇAS E COMPONENTES ESTRUTURAIS (MECÂNICA DA FRATURA E FADIGA). 2002
- SABERIFAR, S. ET AL. THE INTERACTION BETWEEN NON-METALLIC INCLUSIONS AND SURFACE ROUGHNESS IN FATIGUE FAILURE AND THEIR INFLUENCE ON FATIGUE STRENGTH. *MATERIALS AND DESIGN*, v. 35, p. 720–724, 2012.
- SAKAI, T. ET AL. A REVIEW ON FATIGUE FRACTURE MODES OF STRUCTURAL METALLIC MATERIALS IN VERY HIGH CYCLE REGIME. *INTERNATIONAL JOURNAL OF FATIGUE*, v. 93, p. 339–351, 2016.
- SALDARRIAGA, P. A. C. ESTUDO DOS CAMPOS DE TENSÃO GERADOS POR INCLUSÕES DURANTE O PROCESSO DE TORNEAMENTO EM AÇOS ABNT 1045 UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS. 2008.
- SELVAMANI, S. T. ET AL. ANALYSIS OF FRICTION WELDING PARAMETERS ON THE MECHANICAL METALLURGICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF AISI 1035 STEEL JOINTS, 2015.
- SELVAMANI, S. T.; PALANIKUMAR, K. OPTIMIZING THE FRICTION WELDING PARAMETERS TO ATTAIN MAXIMUM TENSILE STRENGTH IN AISI 1035 GRADE CARBON STEEL RODS. *MEASUREMENT*, v. 53, p. 10–21, 2014.
- SUN, C. ET AL. EFFECTS OF INCLUSION SIZE AND STRESS RATIO ON FATIGUE STRENGTH FOR HIGH-STRENGTH STEELS WITH FISH-EYE MODE FAILURE. *INTERNATIONAL JOURNAL OF FATIGUE*, v. 48, p. 19–27, 2013.
- VIGRAMAN, T.; NARAYANASAMY, R.; RAVINDRAN, D. MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTY EVALUATION OF DIFFUSION-BONDED JOINTS MADE BETWEEN SAE 2205

STEEL AND AISI 1035 STEEL. MATERIALS AND DESIGN, v. 35, p. 156–169, 2012.

WAGNER, D. ET AL. SURFACE CRACK INITIATION MECHANISM FOR BODY CENTERED CUBIC MATERIALS IN THE GIGACYCLE FATIGUE DOMAIN. INTERNATIONAL JOURNAL OF FATIGUE, v. 93, p. 292–300, 2016.

WEISS, M. P.; LAVI, E. FATIGUE OF METALS - WHAT THE DESIGNER NEEDS? INTERNATIONAL JOURNAL OF FATIGUE, v. 84, p. 80–90, 2016.