

ANÁLISE DE FALHA EM UM EIXO DE CAIXA DE CÂMBIO¹

Marcelo Sartori²

Antônio Ricardo Stadlander³

Marcio Levi Kramer de Macedo⁴

Lawrence Borges⁵

Afonso Reguly⁶

Resumo

A caixa de câmbio ou transmissão é um item fundamental dos veículos automotores cuja função é transmitir a rotação do motor para o diferencial e rodas do veículo e permitir que a relação de transmissão entre o motor e as rodas varie de acordo com a velocidade do veículo, garantindo melhor performance do motor. Assim, a integridade deste componente é de suma importância para a segurança e confiabilidade dos componentes automotivos. Devido a isto, os componentes da caixa de câmbio são inspecionados minuciosamente antes e após cada etapa construtiva para assegurar a inexistência de defeitos que possam levar a uma falha prematura de toda a transmissão. O presente artigo visa avaliar a possível origem de defeito superficial encontrado em um componente de uma caixa de câmbio. Foram utilizadas várias técnicas de caracterização mecânica e metalúrgica, usualmente empregadas em análise de falha, tais como análise da superfície de fratura, análise via microscopia eletrônica de varredura, análise metalográfica e ensaios de dureza. Os resultados das análises revelam a presença de uma trinca anterior ao processo de tratamento térmico, com características de origem na etapa de laminação, estando presente na matéria prima utilizada na fabricação do componente.

Palavras-chave: Análise de falha; Eixo; Caixa de câmbio.

FAILURE ANALYSIS IN A SHAFT GEARBOX

Abstract

The gearbox or transmission is a fundamental part of the motor vehicle whose function is to transmit motor rotation to the differential and wheels and allow the transmission ratio between the engine and the wheels varies with vehicle speed, ensuring better performance of the engine. Thus, the integrity of this component is very important to the safety and reliability of automotive components. Because of this, the components of the gearbox are inspected carefully before and after each constructive step to ensure the absence of defects that can lead to premature failure of the entire transmission. This article aims to assess the possible origin of surface defect found in a component of a gearbox. Were used various techniques of mechanical and metallurgical characterization, commonly used in failure analysis, such as analysis of the fracture surface, analysis via scanning electron microscopy, metallographic analysis and hardness tests. The results of the analyzes carried out revealed the presence of a crack before the heat treatment process, with characteristics of source in the stage of lamination, being present in the feedstock used in manufacturing the component.

Keywords: Failure analysis; Shaft; Gearbox.

¹ Contribuição técnica ao 68^o Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Engenheiro metalúrgico. Mestrando. Ciência e Tecnologia dos Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, RS, Brasil.

³ Engenheiro metalúrgico. Doutorando. UFRGS

⁴ Engenheiro metalúrgico. Doutor UFRGS

⁵ Engenheiro Mecânico. Engenheiro Trainee. Sultécnica Indústria Mecânica. Cachoeirinha, RS, Brasil.

⁶ Engenheiro Metalúrgico. Professor Doutor. PPGE3M / UFRGS

1 INTRODUÇÃO

A caixa de câmbio ou transmissão é um item fundamental dos veículos automotores cuja função é transmitir a rotação do motor para o diferencial e rodas do veículo, ou seja, disponibilizar a força motriz apropriada para cada condição de locomoção, visando garantir uma melhor performance do motor.⁽¹⁾ A Figura 1 é um desenho esquemático apresentando uma caixa de transmissão manual de cinco velocidades na qual indica a localização dos eixos analisados (indicado pela elipse). A numeração de 1 até 5 indicam as engrenagens correspondentes às marchas do veículo e R corresponde a marcha Ré.

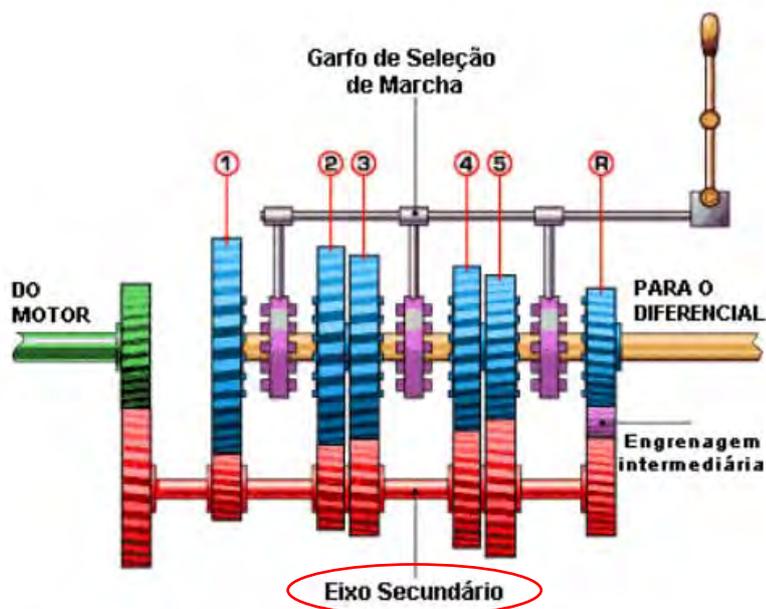


Figura 1. Imagem esquemática de uma caixa de câmbio de câmbio indicando a localização do eixo analisado.⁽²⁾

Para garantir a segurança e confiabilidade dos componentes automotivos os componentes da caixa de câmbio são inspecionados minuciosamente antes e após cada etapa construtiva para assegurar a inexistência de defeitos que possam levar a uma falha prematura de toda a transmissão. Para tal, foram utilizadas várias técnicas de caracterização mecânica e metalúrgica, usualmente empregadas em análise de falha, tais como análise da superfície de fratura, análise via microscopia eletrônica de varredura, análise metalográfica, ensaios de dureza dentre outros, pois permitem, através de conhecimentos básicos, identificar os motivos pelos quais a falha ocorreu e, dessa forma, evitar futuros problemas operacionais.⁽³⁾

Deste modo, o presente trabalho visa avaliar a possível origem de um defeito superficial observado em componentes de uma caixa de câmbio.

2 MATERIAL E MÉTODOS

As amostras conforme recebidas para análise de falha são apresentadas na imagem da Figura 2. Trata-se de duas amostras de eixos, utilizados em caixas de câmbio de veículos automotores, cujo material corresponde a um aço SAE 4140. Para a confecção do eixo, o material é adquirido na forma de barras, obtida pelo processo

de trefilação, passando posteriormente pelas etapas de usinagem, tratamento térmico de têmpera por indução e retífica. Os componentes apresentaram falha na forma de uma trinca longitudinal, detectada na inspeção efetuada após a operação de retífica. As trincas situam-se na região do componente de maior diâmetro, conforme destacado na Figura 2.

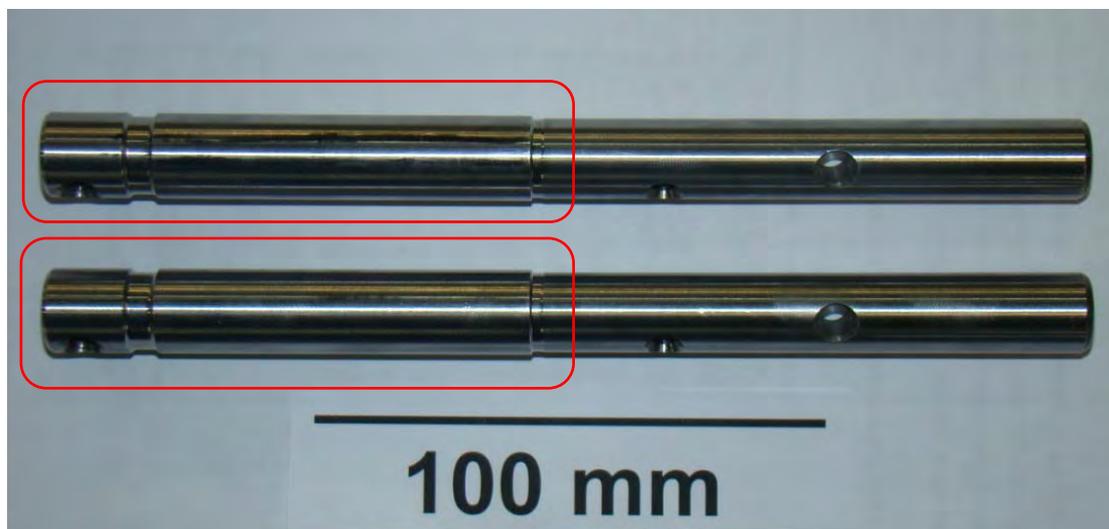


Figura 2. Amostras de eixos conforme recebidas para análise.

A metodologia empregada na realização do trabalho consistiu na metodologia padrão de análise de falha, que compreende a análise visual, análise em lupa de baixo aumento, análise via microscopia eletrônica de varredura (MEV), análise metalográfica e ensaio de dureza.

Primeiramente realizou-se uma análise visual e ensaio não destrutivo por líquido penetrante (LP), de modo a identificar a localização exata da trinca no componente, nas quais foram obtidas imagens através de câmera digital. Para avaliar os prováveis mecanismos de falha associados à trinca, uma das amostras foi submetida a um seccionamento na região da trinca (região de maior diâmetro), através de um corte longitudinal diametralmente oposto à trinca seguido da aplicação de esforços (sobrecarga) de maneira a obter-se a abertura da trinca, para as análises subseqüentes. Após este procedimento, a amostra contendo a superfície da trinca foi avaliada através de lupa de baixo aumento a fim de identificar as características superficiais. Em seguida, a amostra foi submetida a análise via MEV e espectrometria de dispersão de energia (EDS) para identificação de possíveis micromecanismos de falha e caracterizar a região do defeito.

Para a análise metalográfica, foram retiradas duas amostras do eixo remanescente mediante corte transversal, sendo uma amostra na região submetida ao tratamento térmico de têmpera por indução e outra amostra na extremidade de menor diâmetro, em uma região não temperada (não tratada termicamente). Esta análise também foi efetuada na secção transversal do eixo submetido à abertura da trinca por sobrecarga.

As amostras foram preparadas segundo procedimentos padrões de metalografia, de acordo com a norma ABNT NBR 13284⁽⁴⁾ que incluem embutimento, lixamento e polimento. Para revelar a microestrutura, as amostras foram submetidas à ataque químico com o reativo Nital 2%, seguindo a norma ABNT NBR 8108.⁽⁵⁾ As amostras foram analisadas em um microscópio ótico (MO) marca Olympus modelo BX 51M com as micrografias obtidas através de câmera digital acoplada ao microscópio.

A medição de dureza foi realizada na secção transversal do componente utilizando-se um microdurômetro da marca Struers, modelo Duramim, na escala Vickers (HV), com carga de 0,2 kgf, segundo a norma ABNT NBR NM188.⁽⁶⁾

3 RESULTADOS

3.1 Inspeção Visual e Ensaio por Líquido Penetrante

Para identificação das trincas presentes, as amostras foram submetidas a ensaio por líquido penetrante. Este ensaio destacou a presença de trinca longitudinal conforme apresentado pela Figura 3.

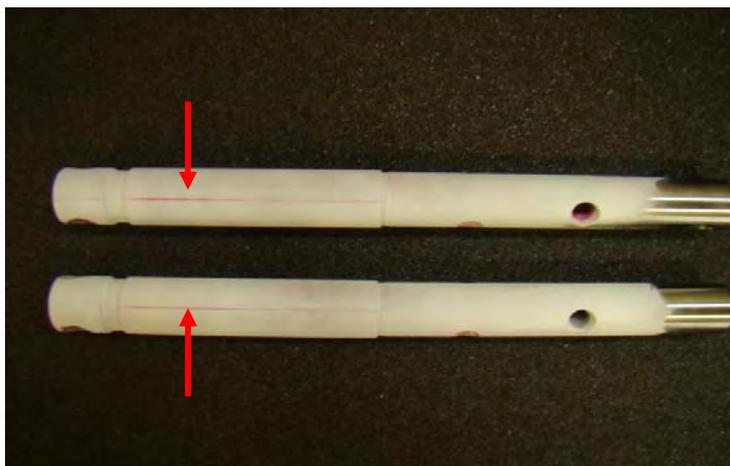


Figura 3. Imagem em câmera digital apresentando as amostras após o ensaio com líquido penetrante, destacando as trincas observadas (setas).

Para visualização dos prováveis mecanismos associados à trinca, uma das amostras foi seccionada, sendo retirada a extremidade com maior diâmetro. Em seguida foi efetuado um corte longitudinal diametralmente oposto à trinca. Após, a amostra foi submetida a uma sobrecarga, de maneira a obter-se a abertura da trinca para as análises subsequentes. A Figura 4 apresenta uma imagem em câmera digital evidenciando a amostra após este procedimento. Nesta figura estão destacadas as características superficiais observadas.

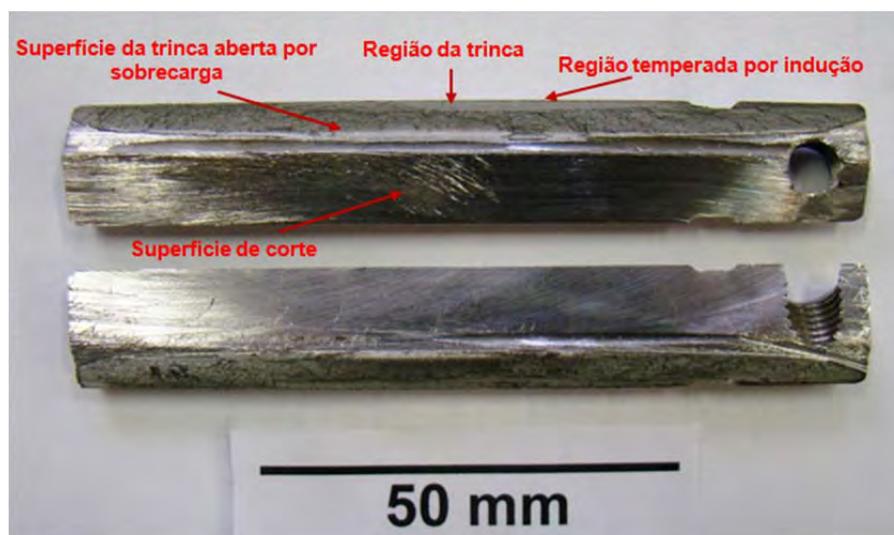


Figura 4. Imagem em câmera digital apresentando a amostra após abertura da trinca.

3.2 Análise em Lupa de Baixo Aumento

Após a abertura da trinca, a superfície desta foi inicialmente inspecionada através de lupa de baixo aumento, a fim de se verificar as características superficiais. As Figuras 5 e 6 apresentam imagens representativas mostrando as características observadas.

Na Figura 5 observa-se a superfície de corte (região inferior da imagem); uma superfície mais rugosa, resultante da sobrecarga para os esforços de abertura da trinca e em seguida uma região mais lisa, correspondente à camada temperada por indução. A última camada, de tonalidade mais escura, representa a trinca detectada inicialmente no componente. A Figura 6 mostra com mais detalhes a superfície da trinca (indicado pelas setas).

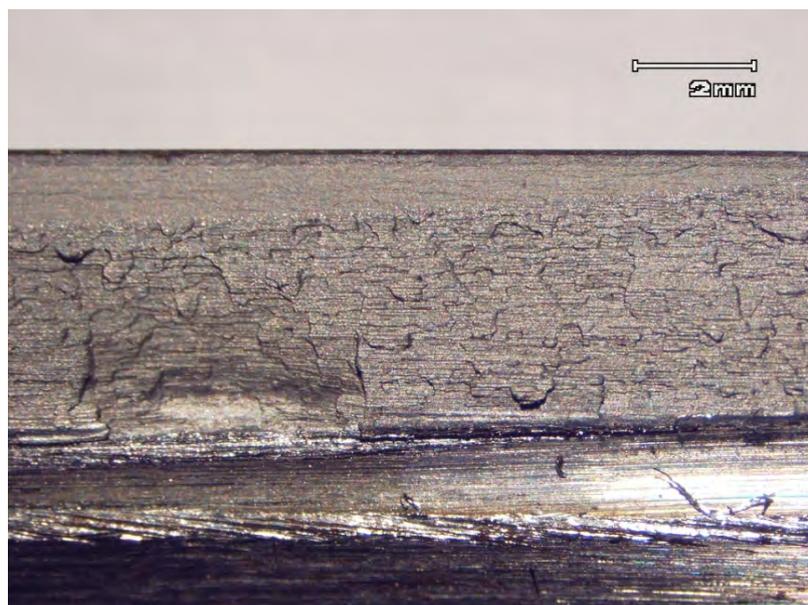


Figura 5. Imagem obtida através de lupa de baixo aumento apresentando componente após a abertura da trinca.

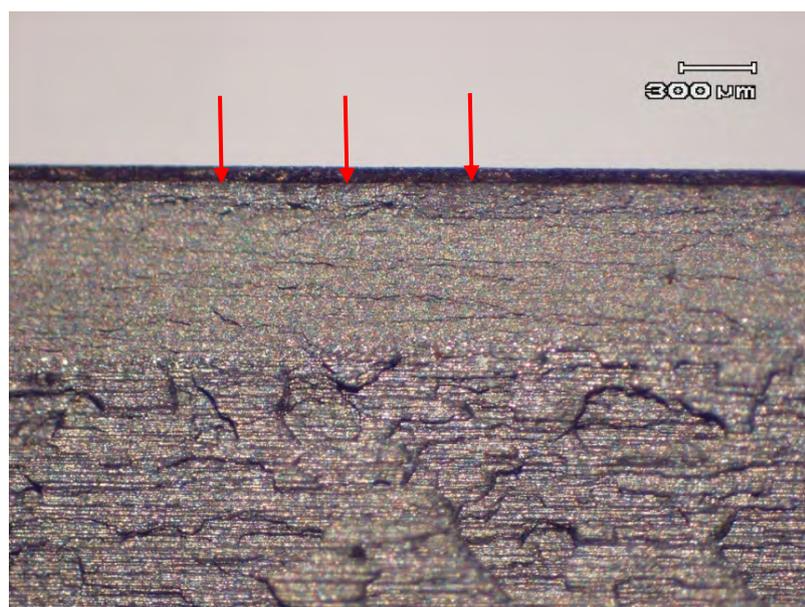


Figura 6. Imagem obtida em lupa de baixo aumento detalhando a superfície da trinca (camada de tonalidade mais escura, indicada pelas setas).

3.3 Análise via MEV/EDS

Após a abertura da trinca, a amostra observada nas Figuras 5 e 6, foi submetida à limpeza superficial da trinca em banho de acetona e agitação ultrassônica. Esta amostra foi analisada via MEV e, adicionalmente, foi efetuada a análise química da superfície da trinca através de Espectrometria de Dispersão de Energia (EDS), de modo a caracterizar a região do defeito.

Na análise via MEV observou-se que a superfície da trinca, inicialmente detectada através do ensaio não destrutivo por líquido penetrante, mostrou-se com uma morfologia diferenciada e com a presença de óxidos como se verifica mais detalhadamente na Figura 8 e Figura 11.

A análise via EDS destas regiões mostrou, além do elemento Ferro, a presença significativa dos elementos Oxigênio, Alumínio, Silício e Cálcio. Estes elementos indicam a presença de inclusões de óxidos e silicatos, sendo que a presença do elemento Cálcio é típica do tratamento de inclusões, indicando que esta trinca possa estar associada à presença destas inclusões.

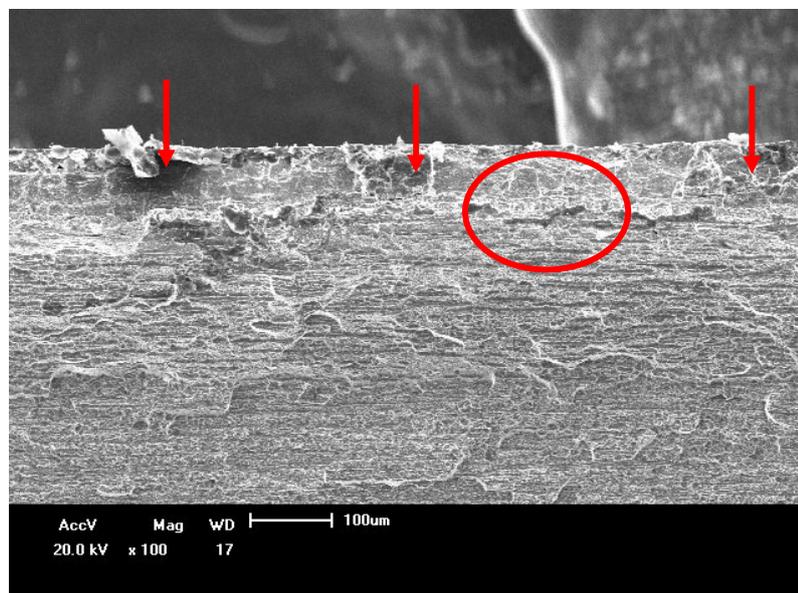


Figura 7. Imagem da superfície da trinca obtida via MEV. As setas indicam a trinca detectada inicialmente no componente. A elipse indica região de análise apresentada na Figura 6.

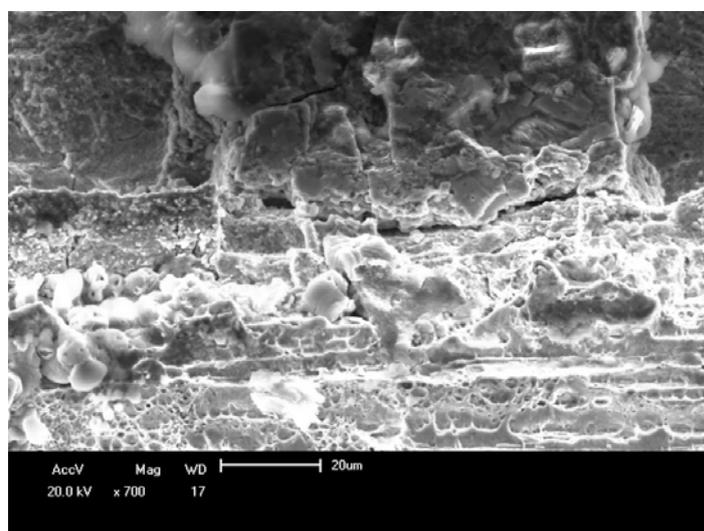


Figura 8. Imagem obtida via MEV detalhando a superfície destacada pela elipse na Figura 7.

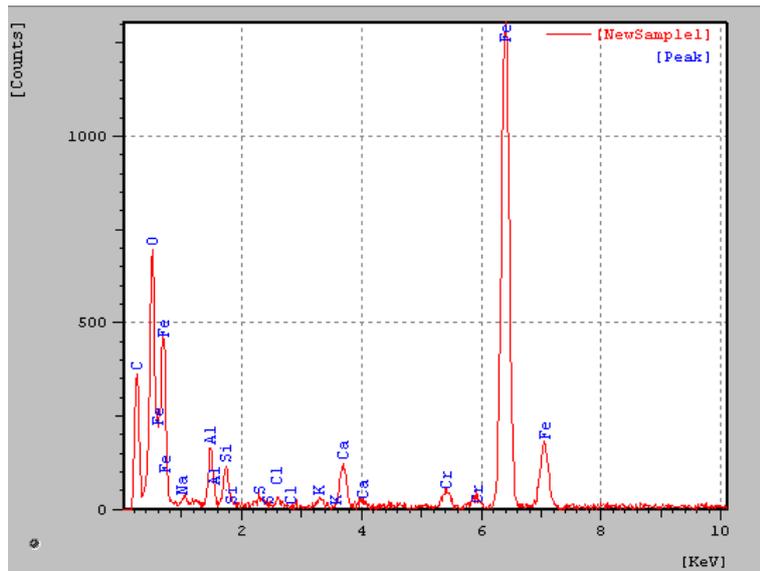


Figura 9. Gráfico de dispersão de energia da análise efetuada na área apresentada pela Figura 8.

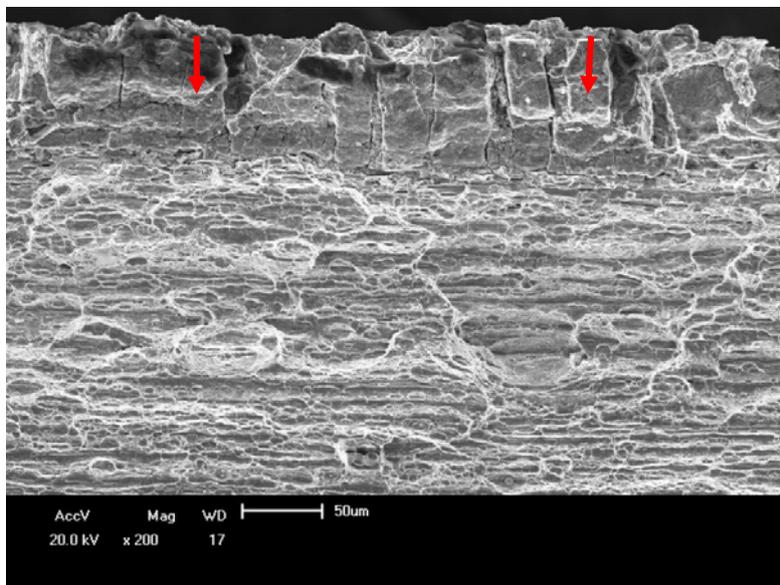


Figura 10. Imagem via MEV em outra região da amostra apresentando superfície da trinca (setas).

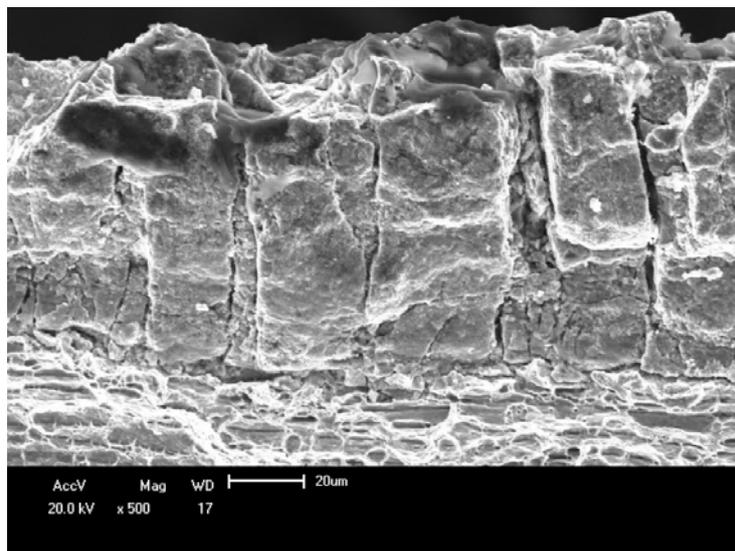


Figura 11. Imagem via MEV, em maior aumento, detalhando morfologia da superfície da trinca.

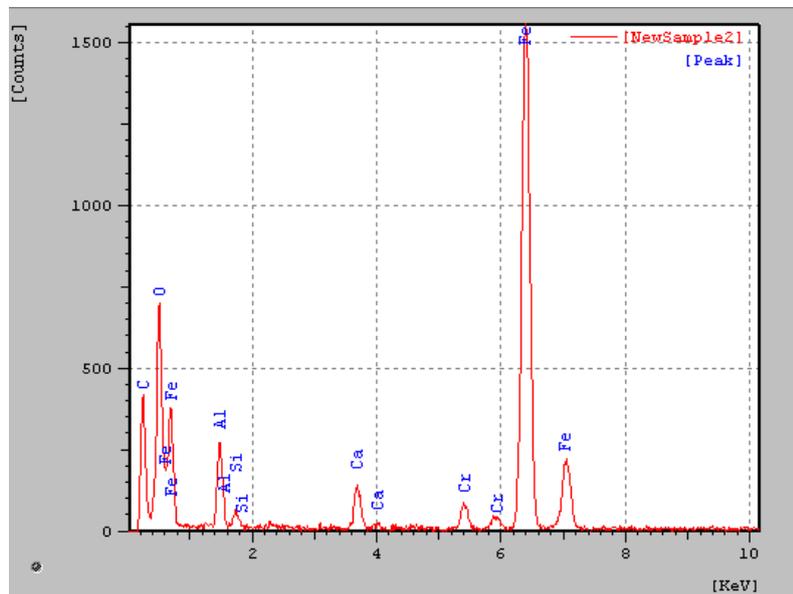


Figura 12. Gráfico de dispersão de energia da análise efetuada na área apresentada pela Figura 11.

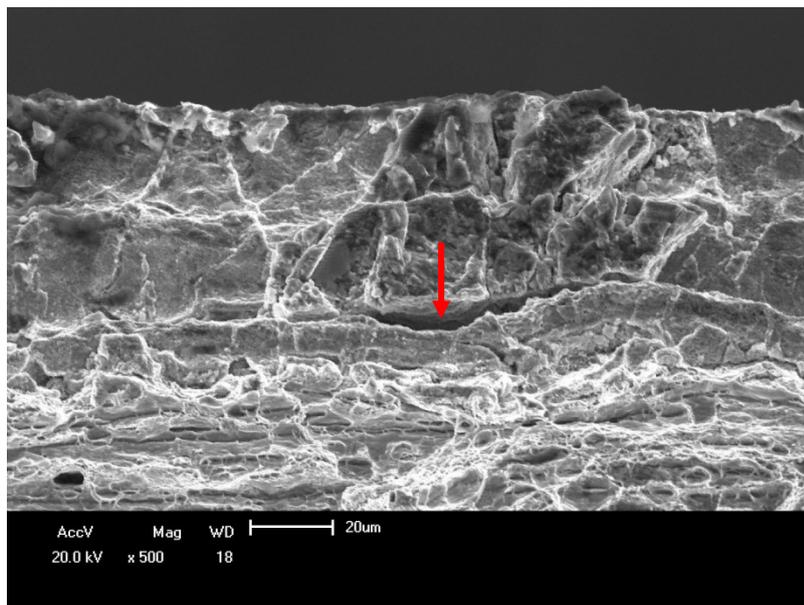


Figura 13. Imagem via MEV detalhando propagação subsuperficial da trinca (indicado pela seta).

Para efeitos comparativos efetuou-se também uma análise via EDS na superfície da trinca (aberta devido aplicação da sobrecarga) a qual indicou somente a presença de picos significativos dos elementos Ferro e Cromo (Figura 15).

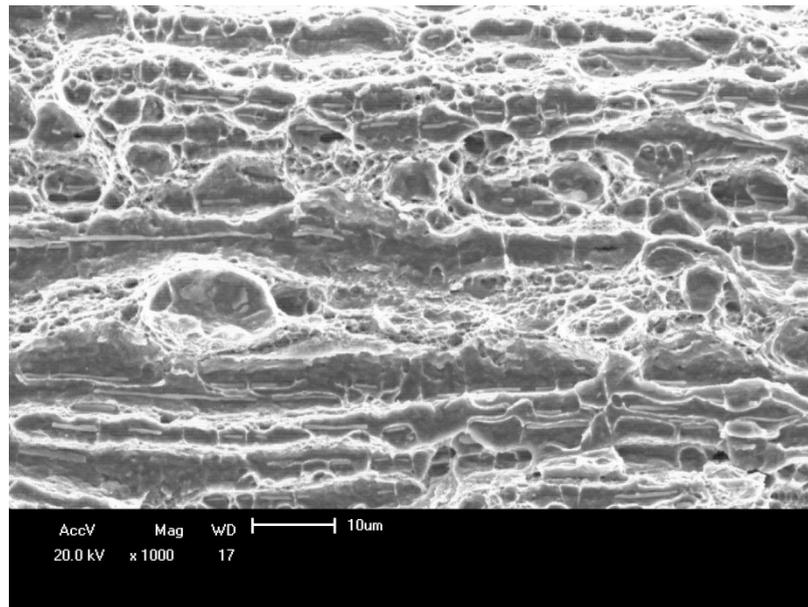


Figura 14. Imagem via MEV da superfície resultante da abertura da trinca. Região para análise comparativa via EDS.

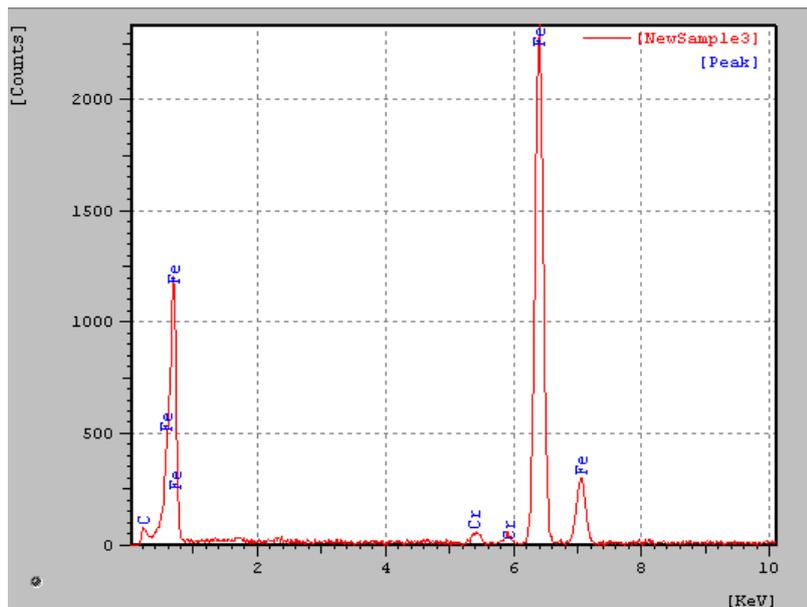


Figura 15. Gráfico de dispersão de energia da análise efetuada sobre a área apresentada pela Figura 14.

3.4 Análise Metalográfica

A imagem da Figura 16 apresenta uma micrografia em menor aumento na qual evidencia a presença da camada temperada por indução, cuja espessura é de aproximadamente 1,2 mm. Observa-se a presença da trinca na região superior da imagem.

A micrografia da Figura 16-B exibe a trinca, em maior aumento, na qual se pode observar que esta atinge uma profundidade de aproximadamente 80 μm .

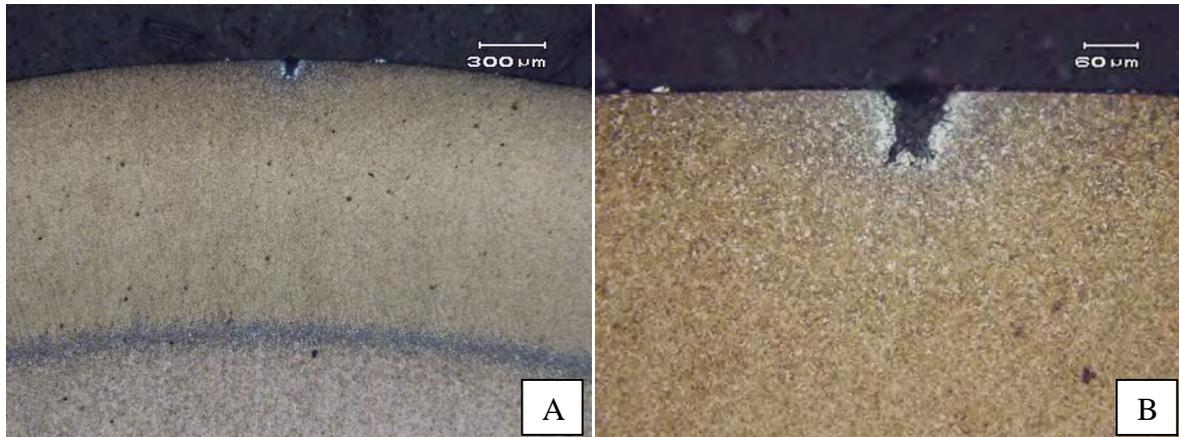


Figura 16: Micrografia em MO apresentando camada temperado componente (imagem A) e a presença da trinca, em maior ampliação (Imagem B).

A Figura 17 apresenta micrografias em maiores ampliações detalhando a microestrutura observada nas vizinhanças da trinca. Nestas observa-se a presença de descarbonetação e de óxidos globulares dispersos (Imagem B).

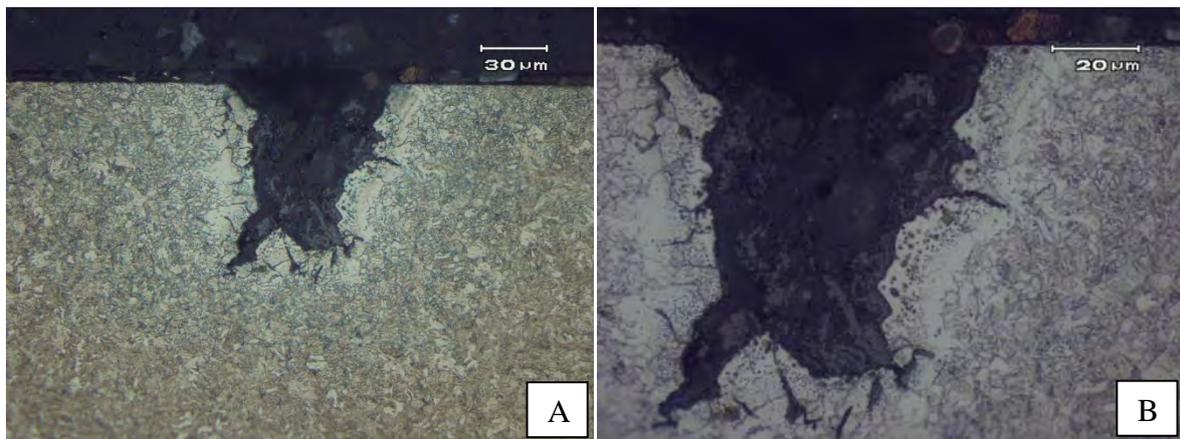


Figura 17. Micrografias detalhando a trinca apresentada na Figura 16. À imagem B evidencia, em maior ampliação, a região descarbonetada com presença de óxidos globulares dispersos.

Na amostra obtida na região de menor diâmetro e sem a camada temperada por indução não foi observada a presença de trinca. Considerando-se a pouca profundidade da trinca observada, é provável que esta tenha sido removida pelo processo de usinagem. A microestrutura observada nesta região é refinada e composta por martensita revenida, não apresentando indícios de descarbonetação. As imagens da Figura 18 apresentam micrografias representativas da microestrutura observada nas proximidades da superfície.

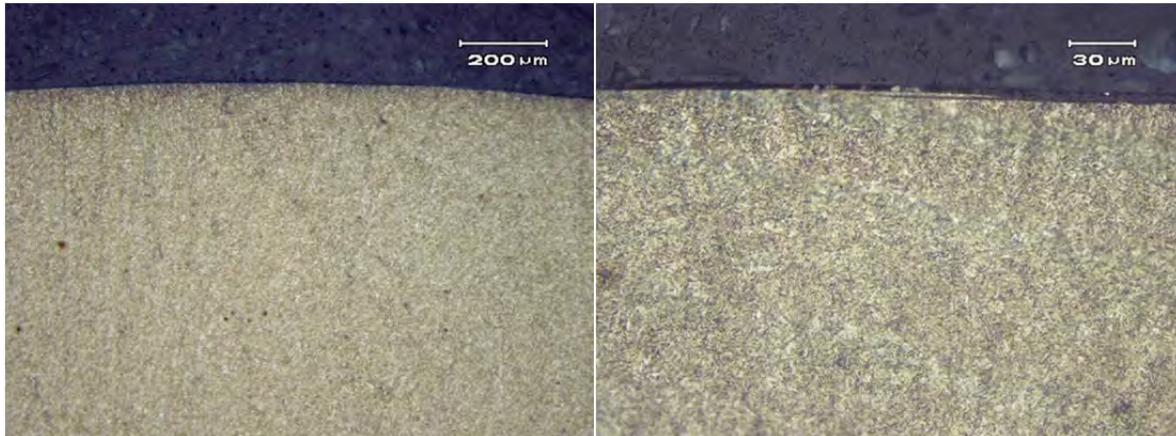


Figura 18: Micrografias representativas das características observadas nas proximidades da superfície na região não tratada termicamente.

Também foi efetuada uma análise metalográfica na secção transversal da amostra inicialmente observada via MEV.

A Figura 19 e 20 apresenta micrografias representativas das características observadas na secção transversal da amostra a qual foi submetida à abertura da trinca, obtidas antes e após ataque químico, respectivamente. Pode-se observar que a trinca atinge uma profundidade aproximada de 80µm. Em maior ampliação (Imagem B da Figura 19) também podem ser observados óxidos globulares dispersos nas vizinhanças da trinca.

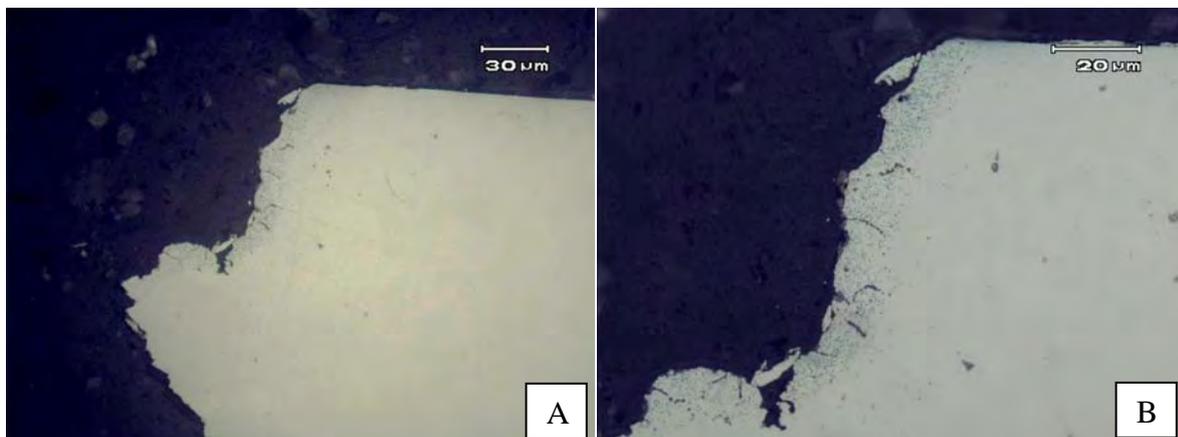


Figura 19. Micrografias da secção transversal da amostra após a abertura da trinca. Sem ataque químico.

A Figura 20 apresenta micrografias obtidas após o ataque químico. Nota-se a presença de uma região descarbonetada nas vizinhanças da trinca.

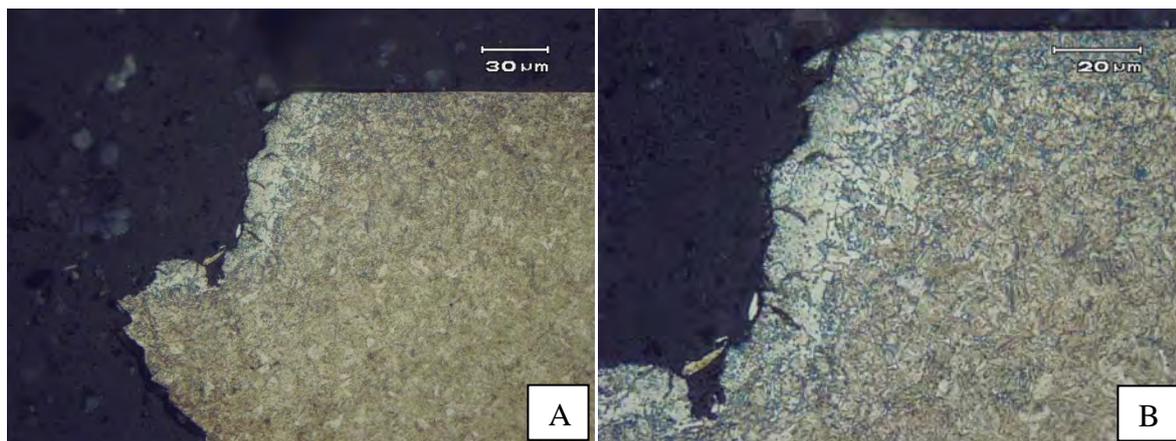


Figura 20. Micrografias apresentando microestrutura nas proximidades da trinca após a abertura. Ataque: Nital 2%. A imagem B destaca a região da trinca em maior ampliação.

3.5 Ensaio de Microdureza

Foi efetuado um perfil de microdureza Vickers (HV) com as indentações tendo origem nas proximidades da superfície e em direção ao centro do componente, com espaçamento 0,2 mm entre cada indentação. Os resultados deste ensaio são apresentados na Figura 21. Observa-se que a dureza na superfície atingiu valores em torno de 650 HV e estabilizou-se com valores em torno de 290 HV após aproximadamente 1,4 mm.

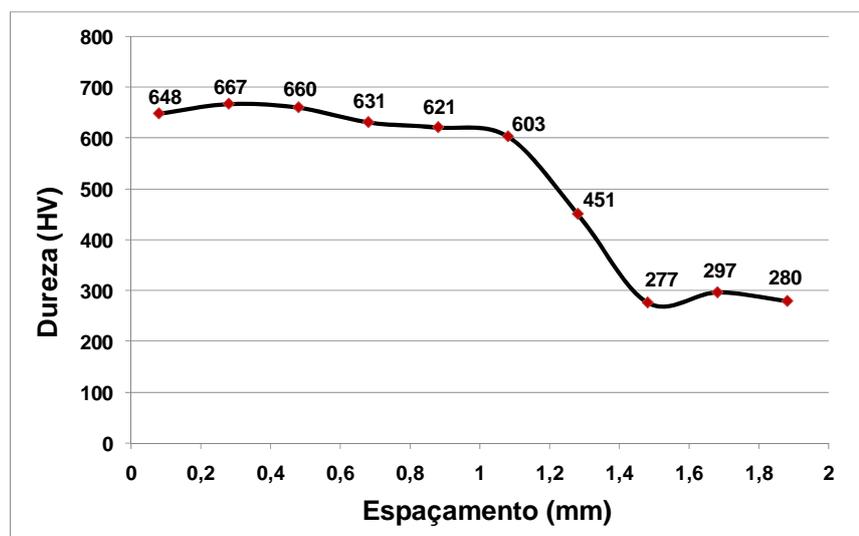


Figura 21. Resultado do ensaio de perfil de microdureza HV.

Adicionalmente foi efetuado um ensaio de microdureza HV a aproximadamente meio raio da secção transversal do componente, sendo realizadas cinco indentações aleatoriamente distribuídas na superfície da amostra. A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 1. Resultados do ensaio de dureza Vickers (HV).

Ensaio	1	2	3	4	5	Média	Incerteza de Medição
Amostra	313	306	297	280	315	302,2	17,9

Nota: A incerteza expandida relatada (U) é baseada em uma incerteza padronizada combinada multiplicada por um fator de abrangência $k = 2,0$, fornecendo um nível de confiança de aproximadamente 95%.

3 DISCUSSÃO

A inspeção visual e através de líquido penetrante indicou a presença de uma trinca longitudinal, em ambas as amostras do eixo, localizada na extremidade de maior diâmetro.

A análise da superfície desta trinca em lupa de baixo aumento, após a sua abertura, indicou uma trinca pouco profunda. A análise efetuada via MEV e EDS indicam a presença de uma camada de óxidos aderida à superfície da trinca, contendo teores significativos dos elementos Alumínio, Silício e Cálcio, além do Oxigênio e Ferro.

A análise metalográfica na região temperada por indução indicou uma camada composta por martensita revenida atingindo uma profundidade aproximada de 1,2 mm. Pode-se confirmar este valor através do perfil de microdureza, no qual se verifica uma maior dureza do material nesta região. A microestrutura abaixo desta camada como também a observada na amostra retirada em região não temperada por indução mostrou-se composta por martensita revenida.

A análise metalográfica em ambos os eixos avaliados indicou que a trinca atingiu uma profundidade aproximada de 80 μ m. A microestrutura nas proximidades da trinca mostrou-se semelhante em ambos os eixos analisados. Foi observada a presença de uma camada descarbonetada a partir da trinca com ramificações e dispersão de óxidos globulares nas suas proximidades.

O ensaio de perfil de microdureza indicou uma dureza superficial em torno de 650 HV, estabilizando-se em torno de 290 HV após uma profundidade aproximada de 1,4 mm. A dureza do material a meio raio da secção transversal do componente apresentou valores de 302 \pm 18 HV.

4 CONCLUSÃO

Os resultados das análises efetuadas indicam a presença de uma trinca anterior ao processo de tratamento térmico, e com características de origem nas etapas de laminação (ou trefilação), estando presente na matéria prima utilizada na fabricação do componente.

Agradecimentos

Ao CNPq e Capes pelo financiamento de bolsas de estudo e pesquisa.

REFERÊNCIAS

- 1 COSTA, G. P. A Bíblia do Carro. Transmissão. Disponível em: <<http://www.oficinaecia.com.br/bibliadocarro/transmissao.html>>. Acesso em: 04 de Março 2013.
- 2 BRAIN, M. Como Funcionam as Transmissões Manuais. Disponível em: <http://carros.hsw.uol.com.br/transmissoes-manuais.htm>. Acesso em: 08 de Março 2013.
- 3 A. REGULY, I. LIMBERGER, S. GRIZA, M. KRAMER E T. STROHAECKER – Fadiga e Análise de Falha – Escola de Engenharia – UFRGS – sem 2004/02.
- 4 Norma Técnica ABNT NBR 13284:1995
- 5 Norma Técnica ABNT NBR 8108:1983
- 6 Norma Técnica ABNT NBR NM ISO 6507-3:2008.
- 7 Metals Handbook – Fractography and Atlas of Fractographs – ASM American Society for Metals - volume 9 - 8^o edição 1974.