

# ANÁLISE DE FALHA DO VIRABREQUIM DE UM MOTOR MONOCILINDRO DE CICLO OTTO\*

*William Lemos Bevilaqua<sup>1</sup>  
Afonso Reguly<sup>2</sup>  
Inácio da Fontoura Limberger<sup>3</sup>  
Luciano Caldeira Vilanova<sup>4</sup>  
Fernando Mariano Bayer<sup>5</sup>*

## Resumo

No presente trabalho foi realizada uma análise para se determinar as possíveis causas da falha catastrófica e anormal de um virabrequim de motor de combustão interna de ciclo Otto de 25 cm<sup>3</sup>. A região da falha teve a sua composição química, microestrutura e microdureza avaliadas. Os resultados obtidos indicam que a falha ocorreu por fadiga. Múltiplas trincas nuclearam na superfície próxima ao filete do mancal de apoio, devido a uma região de transição de acabamento de superfície. Essa condição reduziu o limite de resistência a fadiga do material.

**Palavras-chave:** Virabrequim; Análise de falha; Fadiga.

## FAILURE ANALYSIS OF SINGLE CYLINDER OTTO ENGINE CRANKSHAFT

### Abstract

In the present work was performed the main causes of catastrophic and unusual failure of single cylinder Otto internal combustion engine 25 cm<sup>3</sup>. Chemical composition, microstructure and microhardness was evaluated in the fracture zone. Results indicates failure was due to fatigue. Multiple cracks nucleation near in the fillet surface main journal, probably by transition region of surface finish. This condition reduces the material fatigue endurance limit.

**Keywords:** Crankshaft; Failure Analysis; Fatigue.

<sup>1</sup> *Tecnólogo em Fabricação Mecânica, Professor no Departamento de Mecânica do Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil.*

<sup>2</sup> *D. Engenheiro Metalúrgico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Departamento de Metalurgia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.*

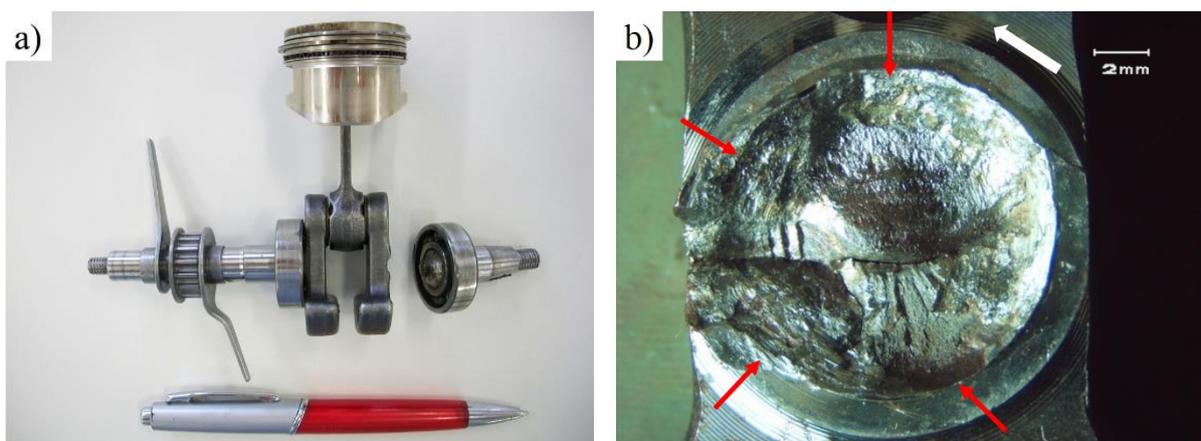
<sup>3</sup> *D. Engenheiro Mecânico, Professor no Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil.*

<sup>4</sup> *D. Engenheiro Mecânico, Diretor do Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, Departamento de Mecânica, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil.*

<sup>5</sup> *M. Engenheiro Mecânico, Professor no Departamento de Mecânica, Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil.*

## 1 INTRODUÇÃO

Virabrequins são componentes fundamentais em motores de combustão interna, geralmente fabricados em aço forjado ou ferro fundido. As solicitações mecânicas existentes, tendo em vista o cenário atual, no qual motores de baixa cilindrada e turbo alimentados procuram agregar o máximo em torque e baixo consumo de combustível, levam esses componentes a exigir ao máximo em tecnologia de materiais. Mesmo sendo um elemento superdimensionado para cargas estáticas, as solicitações alternadas resultantes da combustão e as próprias forças inerciais, o tornam extremamente sensíveis a nucleações de trincas de fadiga, oriundas de defeitos metalúrgicos, de acabamento ou geometria. Devido a extrema importância tecnológica, com ênfase em correção ou melhoria de projetos, análises de falhas em virabrequins são temas extensamente abordados pela literatura em geral, especialmente em motores de ciclo Diesel. Em muitos casos de quebras em virabrequins, as principais causas são vazamentos de óleo, sobrecarga, desalinhamento, acabamento de superfície, acondicionamento incorreto e óleo adulterado [1]. Os principais sítios de nucleação de trincas em virabrequins geralmente tem lugar no filete do pino dos mancais de apoio principais, no filete do moente e em furos de lubrificação [2]. Falhas em virabrequins de pequenos motores de ciclo Otto não são comuns, devido as solicitações mecânicas serem menores e a inércia dos componentes não tão significativas como nos motores de ciclo Diesel. Por outro lado a alta velocidade de trabalho geralmente situada entre 5000 e 7000 rpm<sup>-1</sup>, os tornam extremamente susceptíveis a nucleação de trincas em pontos críticos de tensão, já que vibrações devido à alta velocidade de trabalho somado a um mínimo desalinhamento podem ser tão prejudiciais para a resistência a fadiga do que um alto carregamento mecânico. Tendo isso vista, neste trabalho foi realizada uma análise de falha em um virabrequim de um pequeno motor de combustão interna de ciclo Otto de 25 cm<sup>3</sup> à gasolina (Fig.1), o fabricante foi omitido. O propulsor falhou durante operação em regime de rotação constante de 5000 rpm<sup>-1</sup>. Para constatar as possíveis causas da falha, foi realizada a caracterização da composição química, microestrutura, dureza e análise da fratura por microscopia eletrônica de varredura.



**Figura 1.** (a) Visão geral da falha no virabrequim; (b) aspecto macrográfico da fratura (setas vermelhas indicam possíveis pontos de nucleação e sentido de propagação das trincas - seta branca indica o sentido de rotação do componente).

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Análise Fractográfica

A zona da fratura e outros aspectos gerais como pontos de iniciação foram observados em uma lupa estereoscópica. O micromecanismo de falha foi examinado em microscópio eletrônico de varredura Shimadzu. O raio de concordância do filete do mancal de apoio foi verificado em sua seção transversal, e mensurado com auxílio de um software de análise de imagem. O valor do raio obtido foi comparado de acordo com a recomendação de projeto descrito na Eq. 1 [4]:

$$\frac{r}{M} = 0,05 \quad (1)$$

Onde,  $r$  é o raio do filete do mancal de apoio (mm) e  $M$  é o diâmetro do mancal de apoio (mm).

### 2.2 Caracterização do Material

A composição química do material do virabrequim foi obtida em um espectrômetro de emissão óptica e os resultados são apresentados na Tab. 1 em comparação com material 40CrMnMo. Alguns elementos como Mn, Cr e Mo não estão em conformidade com a especificação do material.

**Tabela 1.** Composição química (% em peso)

	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	P	S
Amostra	0,45	0,17	0,83	0,12	0,02	0,016	0,01	0,03
40CrMnMo	0,37- 0,45	0,17- 0,37	0,90- 1,20	0,90- 1,20	0,03	0,20- 0,30	0,035	0,035

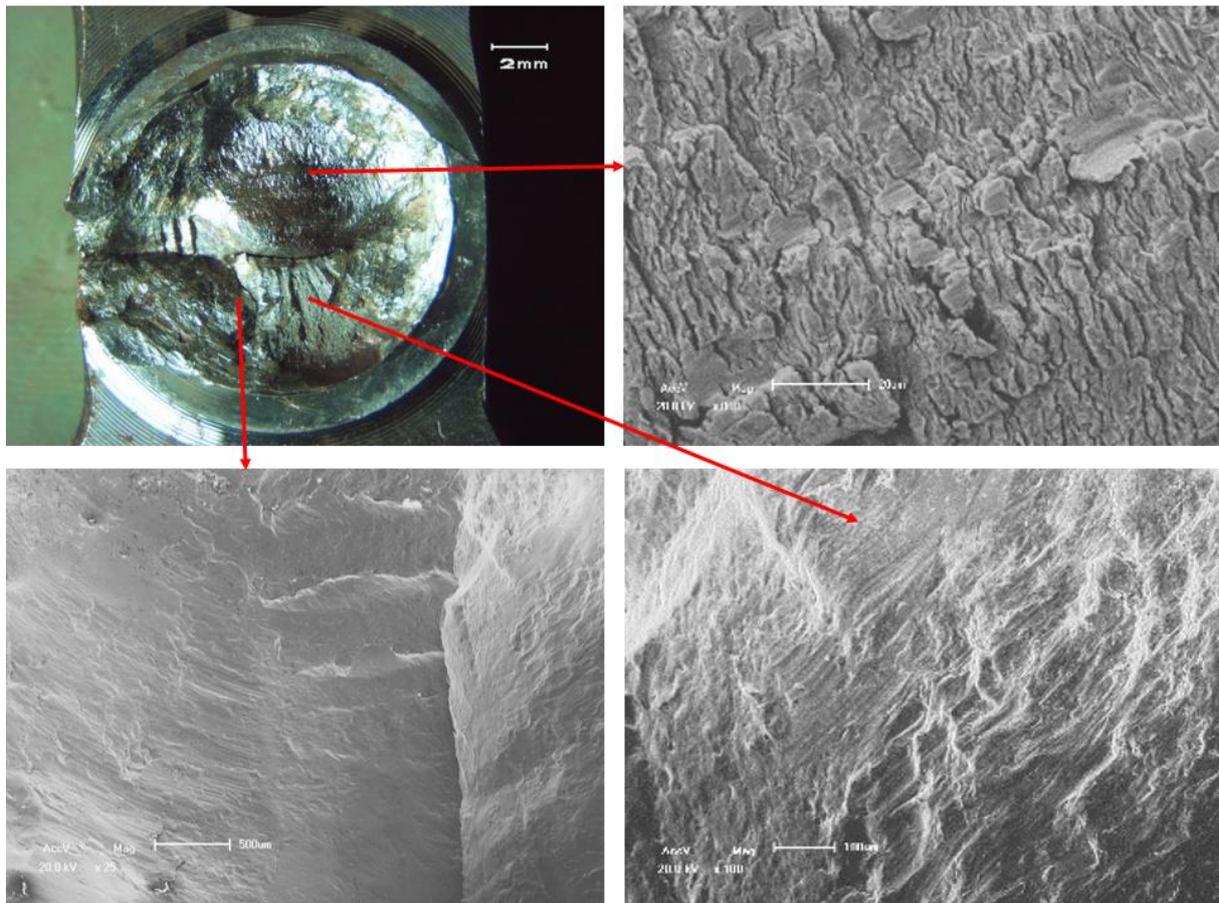
A microestrutura da seção transversal próximo a fratura foi avaliada em um microscópio óptico Olympus. Os reagentes utilizados foram nital 2 e 5% respectivamente. O perfil de microdureza Vickers foi aferido com uma carga de 300 g no núcleo até a região da fratura no contrapeso do virabrequim com passos de 0,2 mm.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Análise Fractográfica

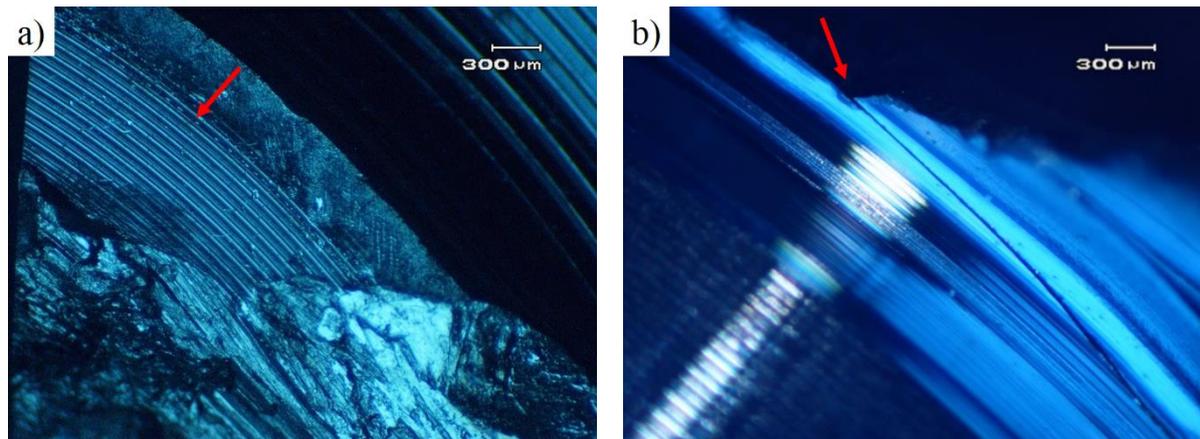
A Fig.2 apresenta a visão geral da zona fraturada com as microfractografias das regiões indicadas pelas setas. Verifica-se por esta figura que o tipo de carregamento que promoveu a falha foi flexão reversa. Marcas de praia são claramente visíveis, indicando que o modo de falha predominante foi por fadiga. Marcas de sargento também podem ser localizadas, evidenciando que as trincas propagaram-se em diferentes planos. As crateras localizadas no interior da fratura são resultado da incidência de múltiplas trincas, que propagaram-se até aproximadamente 50% da seção transversal. A região das bordas da fratura apresentam deformação plástica, essa deformação não foi promovida pelo processo de fadiga, mas sim após a fratura

do componente, devido a choques mecânicos com outras partes móveis, ocultando assim, os pontos exatos de nucleação das trincas.



**Figura 2.** Microfractografias eletrônicas de varredura, revelando estrias de fadiga em diferentes pontos na superfície de fratura.

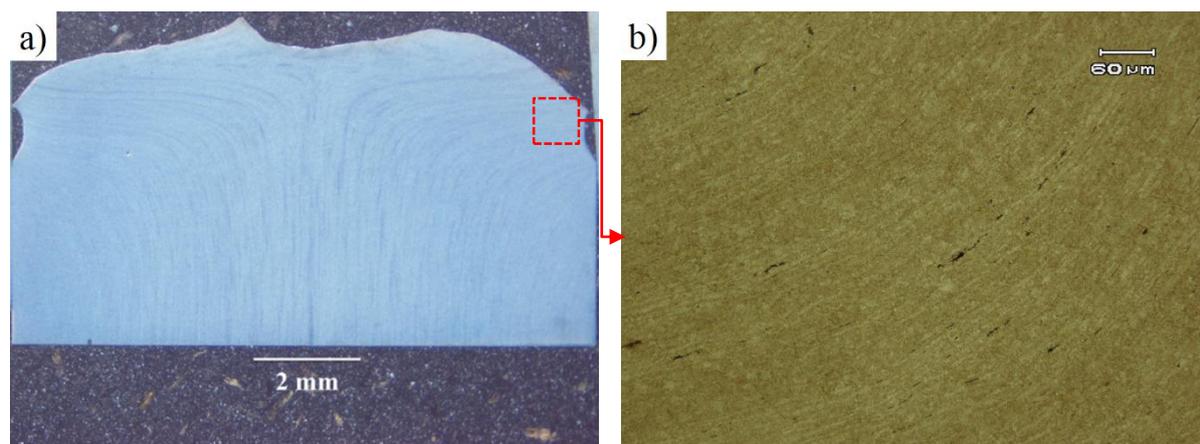
A Fig. 3 apresenta a observação da região do filete junto ao contrapeso. Na Fig. 3(a), a região indicada pela seta, verifica-se inúmeras marcas circulares, possivelmente remanescentes da usinagem final do componente. Embora não estejam presentes diretamente no filete, elas concentram um alto fator de tensões sobre essa região. A usinagem e especialmente a retífica final necessitam de cuidados especiais para evitar uma falha prematura do virabrequim [3]. Pela Fig. 3(b) é possível identificar uma trinca propagando exatamente entre a região de transição de acabamento de superfície logo acima do raio de concordância. Essa é uma forte evidência que essa região com acabamento inadequado pode ter comprometido fortemente a resistência a fadiga do componente. Por meio de seccionamento transversal e preparação macrográfica, a dimensão do raio de concordância do mancal de apoio foi aferido através de um software de análise de imagem, apresentando um valor médio de  $(0,36 \pm 0,01)$  mm. Nenhuma informação do fabricante foi obtida a respeito da especificação do valor de projeto do raio de concordância. Com base no diâmetro do mancal (12 mm), o valor recomendado para a dimensão do raio do filete pode ser calculado pela Eq. 1 em aproximadamente 0,60 mm, ou seja, quase o dobro do valor medido no virabrequim.



**Figura 3.** (a) Aspecto do filete apresentando marcas de usinagem remanescentes; (b) Trinca localizada próxima a região do filete.

### 3.2 Caracterização do Material

Na Fig.4 (a), pela macrografia é possível notar que o material possui um fibramento, oriundo do processo de conformação mecânica. A orientação desse fibramento torna-se desfavorável próximo a região do filete, pois os esforços resultantes sofridos pelo componente estão direcionados no mesmo sentido do fluxo, onde a propagação de trincas é facilitada. Na Fig. 4(b) é apresentada uma micrografia da região detalhada na Fig. 4 (a), com alta densidade de inclusões alongadas entre o fibramento, muito próximo a região do filete. O material do virabrequim é bastante sensível a defeitos metalúrgicos nas regiões do filete [3]. O fibramento é um concentrador de inclusões não metálicas e microsegregações, se o grau de redução no forjamento for muito intenso, isso pode criar condições desfavoráveis em etapas posteriores a conformação, tais como usinagem, tratamento térmico ou tratamento de endurecimento superficial. Adicionalmente o bandeamento presente da microestrutura deixa claro que após a conformação nenhum tratamento térmico eficiente de normalização foi executado para refinar a estrutura.

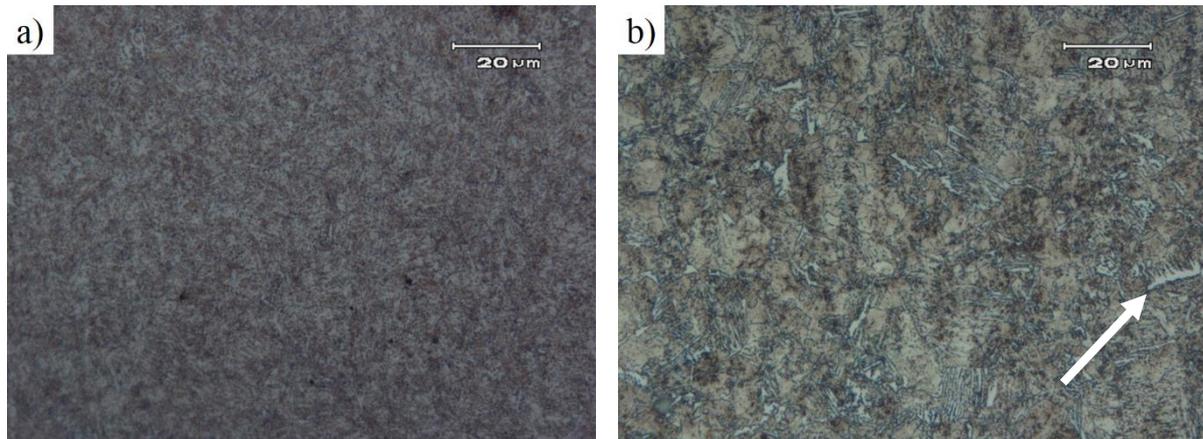


**Figura 4.** (a) Macrografia da seção transversal do mancal de apoio fraturado; (b) Micrografia da região indicada em (a), revelando um grande número de inclusões não metálicas alongadas entre o fibramento próximo ao raio do filete.

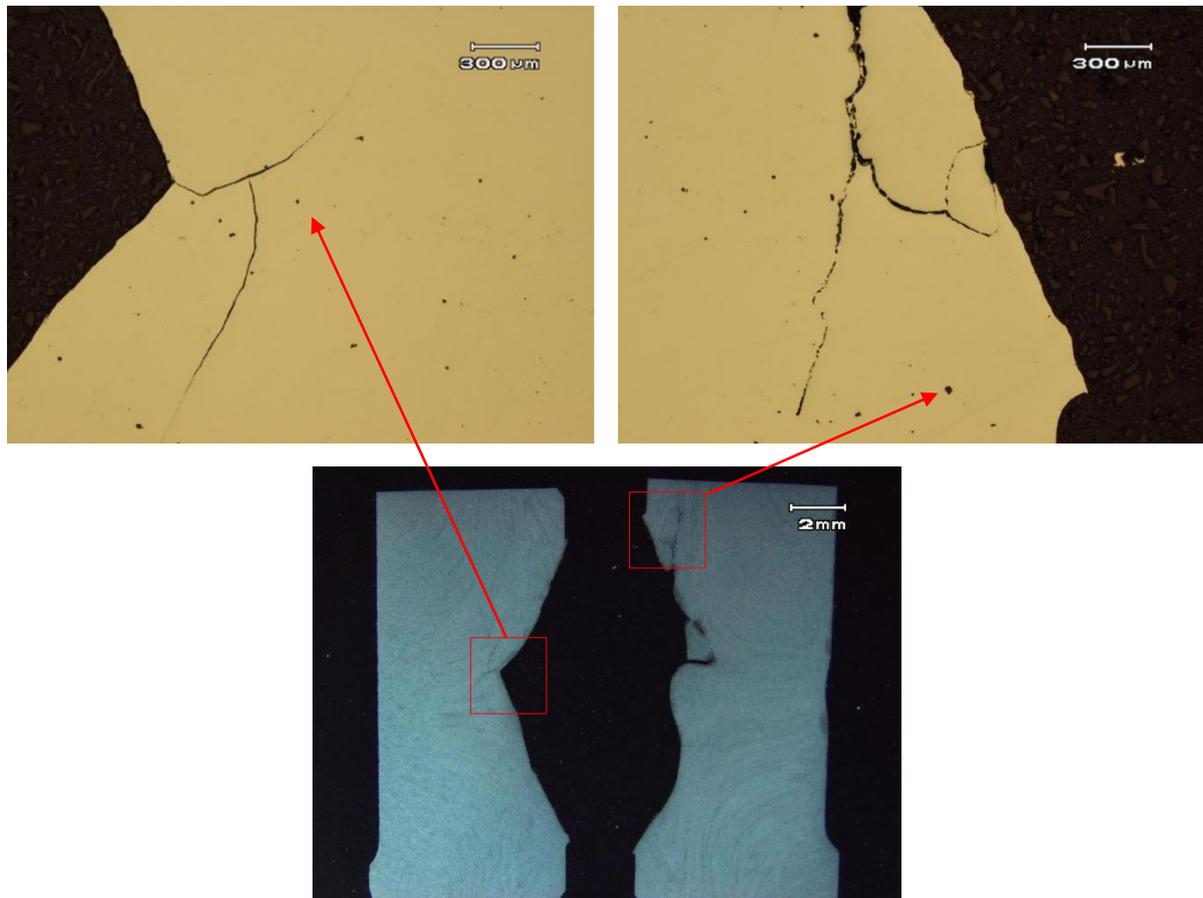
Amostras das seções transversais do mancal de apoio e do contrapeso do virabrequim foram preparadas pelos métodos padrões de metalografia e são apresentadas nas Fig. 5, Fig. 6 e Fig. 7. Na Fig. 5(a) é apresentada a microestrutura

constituente do mancal de apoio próximo ao raio do filete, formada por martensita revenida. Atentando para a Fig.5(b) um ataque com reagente químico mais concentrado revela uma grande quantidade de placas intergranulares de ferrita de Widmanstätten. A literatura em geral não aborda a ferrita de Widmanstätten como prejudicial para as propriedades mecânicas dos aços. Bhadeshia [6] comenta que a propagação de trincas é defletida a cada encontro com as diferentes orientações das placas de ferrita acicular, isso dá origem a propriedades mecânicas superiores em especial tenacidade. Ossa [4], comenta que a presença de ferrita acicular nos contornos de grão pode induzir uma redução de dureza localizada do material, reduzindo o limite de resistência a fadiga, o qual juntamente com a redução de tenacidade pode diminuir drasticamente a vida útil do componente. A morfologia de Widmanstätten, é observada dentro de uma faixa limitada de teores de carbono e temperatura de transformação. Também é associada a grãos grosseiros em aços forjados superaquecidos com um controle da taxa de resfriamento nem tão rápida nem tão lenta [5]. Componentes como virabrequins são conformados em temperaturas relativamente altas de austenitização. As inúmeras inclusões não metálicas já mostradas na Fig. 4(b) por exemplo, atuam como sítios de nucleação e crescimento da ferrita de Widmanstätten. Embora essa microestrutura seja considerada como desejável em geral, temos que considerar que em pontos de concentração de tensão, a alta tenacidade da microestrutura nem sempre pode diminuir a taxa de propagação de trincas no material, se forem consideradas trincas curtas na superfície do filete do virabrequim por exemplo, a taxa de crescimento das trincas podem ser altas, dependendo da orientação da ferrita. Embora existam diversas opiniões em desrespeito a essa microestrutura e seus efeitos nas propriedades mecânicas dos aços, possivelmente a presença de inclusões e ferrita de Widmanstätten próximo ao filete do componente reduziu a resistência a fadiga nessa região. Nenhuma informação a respeito do processo de tratamento térmico do componente foi obtida. Na Fig. 6 é mostrada a macrografia da seção transversal do contrapeso com regiões demarcadas e ampliadas em detalhes. É possível notar que existe uma grande quantidade de inclusões juntamente as trincas. Essas trincas seguem mesmo sentido do fibramento. Na Fig. 7 é apresentada a microestrutura do contrapeso com e sem ataque químico. Na Fig. 7(a) foram identificadas inclusões alinhadas próximas a região da fratura em sentido paralelo ao fibramento do material. Em materiais com fluxo de grãos, a resistência a nucleação e propagação de trincas é maior no sentido normal do fluxo [5], levando isso em conta, como o alinhamento de inclusões está entre o fibramento e em mesmo sentido, essa condição facilitaria a propagação de trincas, o que constitui um agravante para resistência a fadiga. Existem diferenças marcantes entre as microestruturas do mancal de apoio Fig. 5 e o contrapeso Fig. 7 (b), pois nesta última a microestrutura apresenta maior fibramento. Em certas regiões a ferrita está formado bandas (Fig. 7(b) indicado pela seta). Ferrita equiaxial também foi encontrada, essa morfologia é prejudicial as propriedades mecânicas, já que trincas podem percorrer rapidamente as placas. Em virabrequins é comum a indução de tensões residuais compressivas em regiões críticas por meio de tratamento térmico ou pelo processo de roletamento, contudo nenhum dos métodos citados foram identificados na região do filete. De acordo com Becker [7] o roletamento induz tensões compressivas residuais aumentando a dureza superficial promovendo um aumento da resistência a fadiga. A não-conformidade da composição química do material em termos de Cr, Mn e Mo já apresentados na Tab. 1, poderia afetar sensivelmente a temperabilidade deste

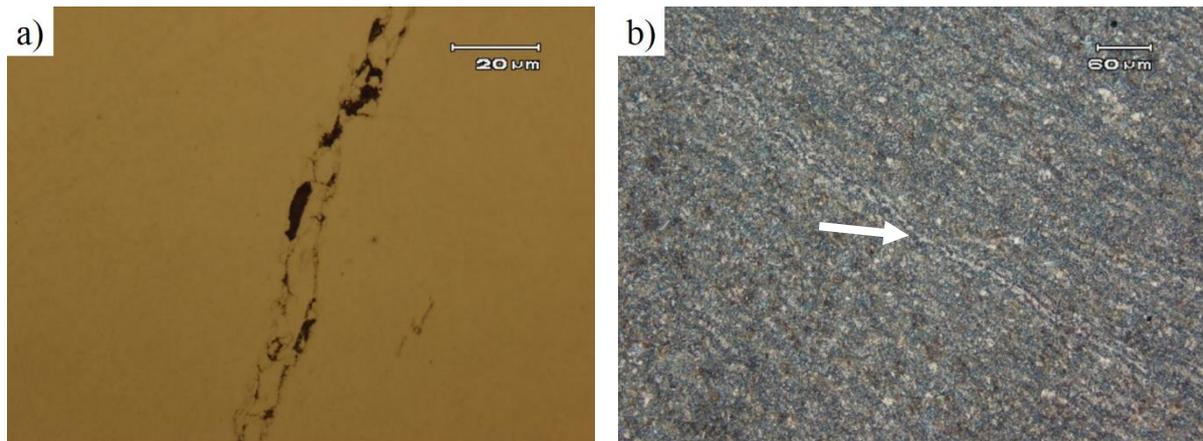
material, contudo nenhuma discussão mais aprofundada pode ser feita em relação a isso, devido a dureza especificada no projeto do componente não ser conhecida.



**Figura 5.** (a) Microestrutura da seção transversal do mancal de apoio próximo ao raio de concordância constituída por martensita revenida, ataque nital 2%; (b) mesma região, ataque nital 5% revelando placas intergranulares de ferrita de Widmanstätten (indicada pela seta).

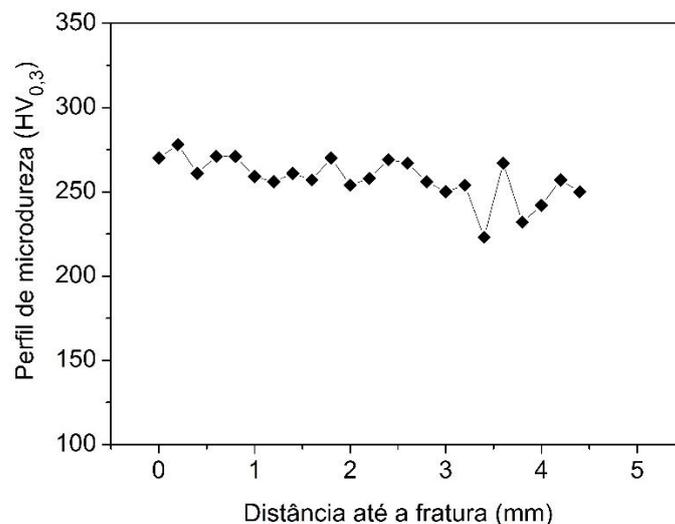


**Figura 6.** Macrografia da seção transversal do contrapeso fratura mostrando em detalhe regiões com altas concentrações de inclusões.



**Figura 7.** (a) alinhamento de inclusões no contrapeso localizadas próximo à fratura (sem ataque); (b) Microestrutura próximo ao raio de concordância no contrapeso (seta indica o bandejamento da ferrita), ataque nital 2%.

O resultado da medição do perfil de microdureza é apresentado na Fig. 8. A dureza média de 260 HV<sub>0,3</sub> é baixa para uma estrutura martensítica, esse valor é resultado da presença de ferrita em grande quantidade na microestrutura. Geralmente em virabrequins com esse material a dureza média ficaria em torno de 300 Vickers [8], contudo é muito dependente do tratamento térmico realizado. A queda de dureza mostrada no perfil se deve possivelmente, ao bandejamento da ferrita na estrutura [9]. Nenhuma camada endurecida superficialmente foi localizada.



**Figura 8.** Perfil de microdureza Vickers da seção transversal do contrapeso.

#### 4 CONCLUSÃO

As análises realizadas no virabrequim levam as seguintes conclusões:

A falha ocorreu por fadiga. Múltiplas trincas nuclearam na superfície próxima ao filete do mancal de apoio, devido a marcas remanescentes do processo de usinagem, que aumentaram o fator de concentração de tensões nessa região. A causa principal da falha é atribuída a essa superfície não apresentar retífica final. A grande densidade de inclusões não-metálicas e a orientação das linhas de fluxo do material próximo ao raio do filete, atuaram como planos favoráveis a propagação de trincas. Alguns fatores a serem considerados para prevenção de futuras falhas incluem um melhor controle no processo de conformação com subsequente

tratamento térmico do componente, para otimizar a orientação do fibramento próximo a regiões críticas, além do aumento do valor do raio do filete e melhor acabamento de superfície do mesmo. A não-conformidade da composição química do material poderia afetar sensivelmente a temperabilidade do mesmo, contudo nenhuma relação direta com a falha pode ser relacionada a este fato, devido a dureza especificada no projeto do componente não ser conhecida.

## REFERÊNCIAS

- 1 Kareem B. Evaluation of failures in mechanical crankshafts of automobile based on expert opinion. *Case Studies in Engineering Failure Analysis*. 2015;3:25–33.
- 2 Fonte M, Li B, Reis L, Freitas M. Crankshaft failure analysis of a motor vehicle. *Engineering Failure Analysis*. 2013;35:147–52.
- 3 Pandey RK. Failure of diesel engine crankshafts. *Engineering Failure Analysis*. 2003;10:165–75.
- 4 Charles Fayette Taylor. *The Internal combustion Engine in Theory and Practice: Vol. 2 - 2nd Edition, Revised design: Combustion, fuels, materials*. 2nd Edition. MIT Press; 1985.
- 5 Bhadeshia HKDH, Honeycombe SR. *Steels: Microstructure and Properties (Third Edition)*. Elsevier; 2006.
- 6 Ossa EA, Palacio CC, Paniagua MA. Failure analysis of a car suspension system ball joint. *Engineering Failure Analysis*. 2011;18(5):1388–94.
- 7 Becker WT, Shipley RJ. *ASM Metals Handbook Volume 11, Failure Analysis and Prevention*. Ohio, America: ASM International. 2002.
- 8 Çevik G, Gürbüz R. Evaluation of fatigue performance of a fillet rolled diesel engine crankshaft. *Engineering Failure Analysis*. 2013;27:250–61.
- 9 Wang C, Zhao C, Wang D. Analysis of an unusual crankshaft failure. *Engineering Failure Analysis*. 2005;12:465–73.