Unisanta Science and Technology, **2022, 1, August**
Published Online 2022 Vol.11 Nº1 http://periodicos.unisanta.br/index.php/sat)

UNISANTA
Science and Technology
ISSN 2317-1316

Importância da corrosão nos sistemas de arrefecimento de caminhões 'fora de estrada'

Marcelo Moura[1], Nestor Ferreira de Carvalho[1]

[1]**UNISANTA**– Universidade Santa Cecília – Pós-Graduação *lato sensu* em Engenharia da Confiabilidade
Rua Oswaldo Cruz, 266 - Santos-SP, Brasil - CEP: 11045-100

E-mail*:* marcelo.ufsj@gmail.com
Received July, 2022

Resumo: Motores são os componentes de maior valor em caminhões fora de estrada e, devido a isso, grande parte das atividades de manutenção focam em preservar suas funções, bem como as dos subsistemas que interagem diretamente com o mesmo, tal como o sistema de arrefecimento. Sabendo que a água, utilizada como principal fluido de transferência de calor nos sistemas de arrefecimento, tem sua parcela de participação nos processos químicos e biológicos que acarretam problemas relacionados a corrosão nesses equipamentos, torna-se necessário um processo robusto de manutenção para evitar falhas relacionadas a perda de material e trincas em partes do motor. Esse trabalho tem por objetivo mostrar os mecanismos causadores dos problemas de corrosão, além de mostrar ações efetivas de mitigação sendo aplicadas na mina de Moatize, em Moçambique, com a ajuda de análises tribológicas e seguimento de normas.

Palavras chave: Corrosão; Motores de Caminhão; Análise de Falhas.

Importance of corrosion in off-road truck cooling systems

Abstract: Engines are the most valuable components in off-road trucks, and due to this, most maintenance activities focus on preserving their functions, as well as those of the subsystems that interact directly with them, such as the cooling system. Knowing that water, used as the primary heat transfer fluid in cooling systems, plays a part in the chemical and biological processes that cause problems related to corrosion in this equipment, a robust maintenance process is necessary to avoid related failures. Loss of material and cracks in engine parts. This work aims to show the mechanisms causing corrosion problems, in addition to showing practical mitigation actions being applied at the Moatize mine in Mozambique, with the help of tribological analyses and compliance with standards.

Keywords: Corrosion; Truck Engines; Failure Analysis.

1. Introdução

Segundo Faria [1], a água tem diversas características e fatores que a fazem ser um excelente agente arrefecedor:

1. É encontrado normalmente em larga escala;
2. De fácil manuseio e de uso seguro;
3. Tem a capacidade de absorver grande quantidade de calor por unidade de volume, principalmente se comparado ao ar;
4. Não se expande ou comprime significantemente dentro de escalas de temperaturas determinadas.

Sistemas de arrefecimento controlam temperaturas e pressões através da transferência de calor de equipamentos durante seu funcionamento, tendo a água como principal agente receptor desse calor, retirando o necessário para o funcionamento eficiente de motores. A água, contudo, é um meio eletrolítico e transporta íons de um anodo para um catodo, proporcionando a ocorrência da corrosão.

Copyright © 2022 ISESC.

A corrosão, por sua vez, é um processo eletroquímico no qual o metal retorna ao seu estado óxido natural. A corrosão causa perda de material e trincas nas paredes de tubulações e cilindros de motores de forma a provocar vazamentos de fluidos.

Sabendo que custo de um motor de um equipamento 'fora de estrada' pode passar facilmente da casa de 1 milhão de dólares, uma trinca em um dos cilindros do mesmo é capaz de gerar um enorme prejuízo financeiro, além de um grande tempo de parada.

Esse contexto mostra a importância de um processo robusto de gestão da corrosão, de modo que esta seja devidamente endereçada à medida que sinais sejam identificados em análises laboratoriais tribológicas do líquido de arrefecimento, evitando-se trincas e fraturas.

O presente artigo tem o objetivo descrever detalhadamente como ocorre a corrosão dentro de um motor de caminhão e seu sistema de arrefecimento, bem como mostrar técnicas que podem ser utilizadas para gestão do processo e prevenção de falhas.

2. Manutenção de Caminhões 'Fora de Estrada'

Caminhões 'fora de estrada' são utilizados em mineradoras para movimentação de materiais em minas. Segundo a Caterpillar [2], a temperatura de queima de diesel no interior de um de seus motores fora de estrada pode atingir 1927° Celsius. Desse calor, apenas 33% são efetivamente convertidos em movimento do motor, 30% são expelidos pelo escapamento, 7% são irradiados para a atmosfera diretamente das superfícies do motor e, finalmente, 30% precisam ser dissipados pelo sistema de arrefecimento.

Assim, o sistema de arrefecimento precisa remover o excedente de energia térmica (30% do total) gerado pelo funcionamento do motor de maneira a mantê-lo na temperatura de operação ideal. Para isso é empregado um fluido chamado líquido de arrefecimento, que nada mais é que uma mistura de água e alguns aditivos, incluindo inibidores de corrosão e etilenoglicol. Este último tem a função aumentar a temperatura de ebulição.

A Figura 1 mostra a configuração básica de um sistema de arrefecimento típico de motor de caminhão 'fora de estrada' através do qual o líquido de arrefecimento flui, cumprindo sua função, conforme a sequência descrita a seguir:

1. Em operação normal, a bomba de água força a circulação do líquido de arrefecimento através do arrefecedor do óleo do motor e depois em direção ao bloco do motor.
2. Em seguida, o líquido de arrefecimento passa através do bloco do motor e para o cabeçote ou cabeçotes de cilindro e vai para as áreas quentes.

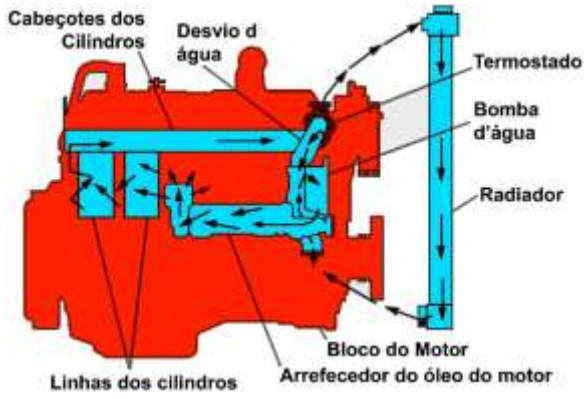


Figura 1. Configuração típica de um sistema de arrefecimento de um motor de combustão interno de um caminhão 'fora de estrada', adaptado de [3].

3. Depois de passar pelo cabeçote ou pelos cabeçotes de cilindro, o líquido de arrefecimento vai para o alojamento do termostato.
4. Quando o motor está frio, os termostatos impedem o fluxo de líquido para o radiador e retornam o líquido de arrefecimento para a bomba de água.
5. À medida que a temperatura do líquido de arrefecimento se torna mais quente, os termostatos começam a abrir e permitem algum fluxo de líquido de arrefecimento para o radiador.
6. O termostato abre-se para manter a temperatura correta do motor; a proporção da abertura do termostato e a porcentagem do fluxo do líquido de arrefecimento para o radiador depende da temperatura do líquido de arrefecimento que, por sua vez, é determinada pela carga no motor e pela temperatura do ar externo.
7. O ventilador empurra e puxa o ar através do radiador e ao redor dos tubos e das aletas que se estendem da parte superior até a parte inferior do radiador.
8. Quando o líquido de arrefecimento quente passa pelos tubos no radiador, o fluxo de ar ao redor dos tubos e das aletas abaixa a temperatura do líquido de arrefecimento.
9. O líquido de arrefecimento, então, retorna para a bomba de água, fechando o ciclo.

2.1. Corrosão nos Sistemas de Arrefecimento

A manutenção correta do sistema de arrefecimento é um item primordial no ciclo de vida de um motor diesel de equipamentos 'fora de estrada'. Um dos problemas mais comuns apresentado pelo sistema de arrefecimento

Copyright © 2022 ISESC

está relacionado à corrosão, uma vez que a água, que é o componente majoritário do líquido de arrefecimento, é um meio eletrolítico que transporta íons entre anodos e catodos, provocando perda de material por corrosão [1]. A corrosão causa perda de material l, na forma uniforme ou na forma de *pitting* que podem levar a vazamentos generalizados ou localizados, respectivamente. Neste sentido, pode-se considerar três tipos de ataques corrosivos:

1. Generalizado, quando acontece a corrosão uniformemente distribuída sobre toda a superfície metálica;
2. Galvânico, no qual dois metais diferentes estão em contato, e o metal mais ativo sofre corrosão rapidamente;
3. *Pitting*, corrosão de pontos localizados (*pites*) que pode perfurar as paredes das tubulações, provocando vazamentos, a curto prazo, como ilustrado na Figura 2.



Figura 2. Ilustração do mecanismo de corrosão por Pites em uma superfície de aço, adaptado de [4].

Ainda de acordo com Faria [1], as características da água que afetam a corrosão são:

- Oxigênio e outros gases dissolvidos: o oxigênio dissolvido na água é essencial para a reação catódica ocorrer, através da transferência de elétrons do metal.
- Sólidos dissolvidos e suspensos: através do aumento da condutividade elétrica da água, os maiores exemplos são os cloretos e sulfetos.
- Potencial Hidrogenado (alcalinidade ou acidez): a acidez da água pode dissolver mais metais e superfícies metálicas, já a água mais alcalina favorece a formação de camadas de proteção à corrosão, chamada de passivação.
- Velocidade de fluxo do fluido: quanto maior a velocidade de passagem da água, maior será a corrosão, devido a maior velocidade de transferência de oxigênio e íons até a superfície metálica e a remoção da passivação; quando a velocidade é baixa, depósitos de sólidos em suspensão podem estabelecer células de corrosão localizadas, aumentado a possiblidade de formação de *pitting*.
- Temperatura: quanto maior a temperatura da água, menos oxigênio dissolvido haverá e o impacto da corrosão será menor, principalmente nos sistemas de água de resfriamento.
- Atividade microbiológica: a proliferação de microrganismos na água promove a formação a formação de *pitting*.

3. Metodologia

Os dados utilizados no presente estudo vêm da mina de carvão de Moatize, localizada no interior de Moçambique, na África. A mina conta com uma frota de 77 caminhões fora de estrada e é parte de um investimento de 8 bilhões de dólares por parte da mineradora Vale, sendo constituído ainda por uma ferrovia e porto. O modelo analisado nesse estudo foi o Caterpillar 793D, um caminhão com 7,6 m de largura, 12,8 m de comprimento e 6,4m de altura, com capacidade de carga de 218 t e equipado com um motor de 2.415 HP. Esse modelo tem reservatórios de líquido de arrefecimento com capacidade de 973 litros e está ilustrado na Figura 3.



Figura 3. Foto ilustrando a parte frontal de um caminhão 'fora de estrada' Caterpillar modelo 793D.

Uma amostra do líquido de arrefecimento foi obtida através da válvula de amostragem, localizada na parte inferior esquerda do motor. É necessário que esta amostra seja obtida quando o motor estiver frio e

Copyright © 2022 ISESC

operando em marcha lenta (baixa). De acordo com o Sistema de informação de serviço da fabricante [3], a periodicidade de coleta recomendada é de 250 h. Assim como feito para os óleos lubrificantes, a amostra é extraída com a utilização de um pequeno frasco dedicado para essa finalidade, bem como um pequeno tubo que deve ser conectado ao sistema ilustrados na Figura 4.



Figura 4. Exemplo de um kit de amostragem de líquido do sistema de arrefecimento.

Essa amostra é, posteriormente, enviada para um laboratório para análise tribológica. Entre os itens avaliados nesta análise, estão:

- Condutividade elétrica,
- Concentração de nitrito (ppm),
- Percentual de glicol,
- Ponto de congelamento,
- Ponto de ebulição,
- Cor e Aparência,
- pH,
- Formação de espuma,
- Análise visual de partículas (macroscopia),
- Contaminação por óleo e
- Presença de partículas.

Para o caso de partículas, também é seguido a norma ISO 4406 [5], conhecida internacionalmente por estabelecer parâmetros técnicos que expressam o nível de contaminação de óleos e fluidos, bem como, especificar o nível de limpeza de óleo exigido para componentes de sistema hidráulicos, lubrificantes e de combustão. A Figura 5 mostra a tabela que descreve a associação entre a quantidade de partículas e os respectivos códigos descritivos empregados pela norma ISO 4406 [5].

Conforme visto anteriormente, o Potencial Hidrogenado (alcalinidade ou acidez), é uma das principais características da água que afetam a velocidade da corrosão. A acidez-alcalinidade de uma mistura de arrefecimento é determinada pelo seu pH.

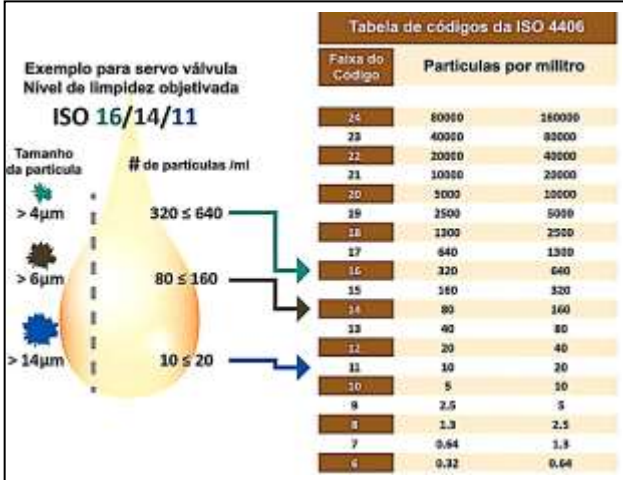


Figura 5. Exemplo adaptado a partir da Norma ISO 4406, adaptado de [6].

O nível de pH, variando de 1 a 14, indica o grau de acidez ou alcalinidade e a corrosividade de um fluido. No caso de sistemas de arrefecimento, o nível de pH deve ser mantido entre 8,5 e 10,5. Segundo a Caterpillar [2], quando o nível de pH está acima 11,0 (meio cáustico), a solução de arrefecimento provoca corrosão nas ligas de alumínio e de cobre por quebra de passivação. Valores de pH inferiores a 7,0 (meio ácido), aumenta a taxa de corrosão de maneira significativa nas ligas ferrosas e não ferrosas.

Portanto uma solução de arrefecimento não deve apresentar valores de pH abaixo de 7,0 (meio ácido) ou acima de 11,0 (meio cáustico). Conforme ilustrado na Figura 6, esta faixa reduz a taxa de corrosão dos componentes do motor, evitando a corrosão cáustica e ácida [6]..

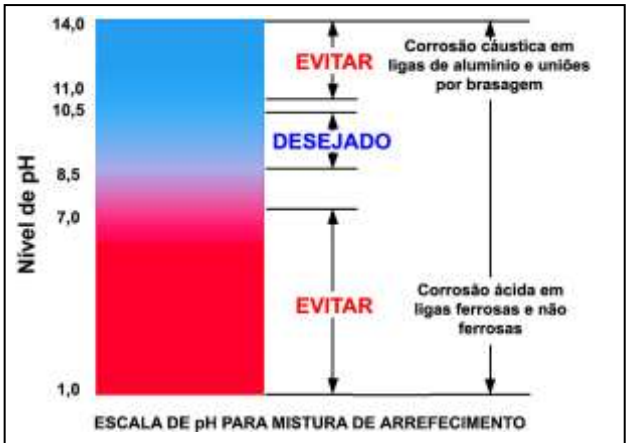


Figura 6. Escala de PH para o líquido de arrefecimento com indicação do intervalo desejado, adaptado de [6].

Copyright © 2022 ISESC

Todos os dados das diversas análises realizadas com o líquido de arrefecimento foram compilados e formam o relatório fornecido pelo laboratório para a empresa dona do ativo, seguindo a normatização exigida. Tais resultados serão discutidos a seguir.

4. Resultados e Discussão

A figura 7 mostra a análise laboratorial das últimas 6 amostras do líquido de arrefecimento do motor de um caminhão CAT 793. A análise dos dados do laboratório fornece informação sobre a corrosão no sistema, bem como outros dados importantes como presença de partículas e outros elementos. É possível notar que a presença desses dados possibilita que ações sejam tomadas a cada preventiva e o resultado e efetividade das mesmas seja reavaliado na preventiva seguinte.

Com ações balizadas pelas análises tribológicas de óleo e líquido de arrefecimento e acompanhamento diário preditivo, a mina de Moatize não teve nenhuma falha de motor relacionada a corrosão nos últimos anos. Além de vazamentos, a principal falha a ser monitorada com esse acompanhamento do sistema de arrefecimento é a corrosão da parede do cilindro, que é o resultado da ação combinada de cavitação-erosão e corrosão.

Essencialmente, durante o curso normal de operação do motor, a parede do cilindro flexiona causando pequenas bolhas de ar se formarem no lado da parede onde fica o líquido de arrefecimento. A cavitação ocorre quando essas bolhas se rompem ou implodem e removem o filme de proteção passiva da parede do cilindro, formado pelos aditivos inibidores de corrosão, conforme o mecanismo esquematizado na Figura 8. Uma vez que o filme de proteção é removido pela ação do colapso das bolhas (cavitação), a corrosão fica livre para desenvolver, conforme ilustrando na Figura 8.a.

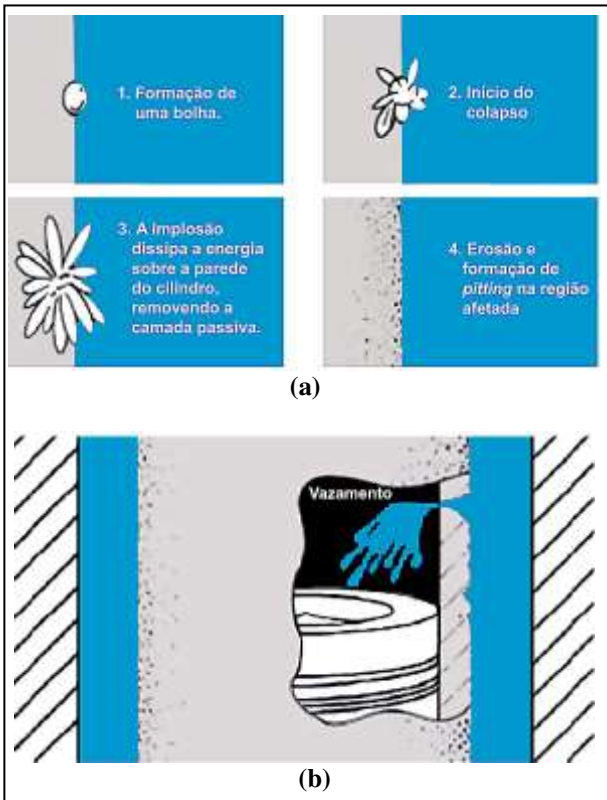


Figura 8. Progresso de cavitação e Pitting na parede de um cilindro de motor, adaptado de [2].

Caso a quebra do filme passivo isso não seja tratada a tempo, o *pitting* atua como um ponto de concentração de tensões e após algum tempo inicia-se uma trinca que se propaga, possibilitando a passagem de líquido de arrefecimento para a câmara de combustão o que gera grandes danos ao motor, conforme mostra a Figura 8.b.

Tabela 1. Análise laboratorial de amostras de líquido de arrefecimento de um caminhão 793 da Mina de Moatize, em Moçambique.

SPECTROCHEMICAL ANALYSIS PPM — Elements

LAB NO.	SAMPLE DRAWN	Iron	Aluminum	Lead	Copper	Tin	Silicon	Boron	Sodium	Potassium	Molybdenum	Phosphorus	Zinc	Calcium	Magnesium
0037	04/05/22	45 *	8	<1	1	<1	5	1	>9999	173	1	5	1	101 *	4 *
0012	06/04/22	2	4	1	1	<1	17	<1	4761	19	<1	3	<1	43 *	11 *
0031	05/03/22	85 *	2	1	2	<1	32	8	4349	519	16	50	1	50 *	10 *
0007	06/02/22	46 *	7	1	1	<1	15	<1	3847	23	1	7	1	33 *	8 *
7584	12/08/21	37 *	7	<1	<1	<1	6	<1	3200	78	1	7	<1	26 *	5 *
5511	07/07/21	13	4	<1	<1	<1	7	<1	116	19	<1	3	<1	9 *	17 *

SAMPLE INFORMATION

LAB NO.	SAMPLE DRAWN	UNIT TIME	FLUID TIME	UOM	FILTER CHG.	LUBE SERVICE
0037	04/05/22	54410	450	HR	No	S
0012	06/04/22	53960	501	HR	No	C
0031	05/03/22	53456	500	HR	No	S
0007	06/02/22	52993	595	HR	No	S
7584	12/08/21	2000	50496	HR	No	S
5511	07/07/21	49882		HR	No	S

FLUID PROPERTIES/CONTAMINANTS

Nitrites	Color	Clarity	pH	Freeze Pt. °F	Antifreeze %	Hardness	Odor	Magnetic Precipitate	Conductivity µS	Oil	Non-Magnetic Precipitate	Foam	Fuel
<250	Red	Clear	8.36	-42	56	268.0 *	None	None		None	None	Slight *	None
<250	Red	Clear	7.40	-33	52	152.0 *	None	None		None	None	None	None
<250	Red	Cloudy	7.60	-32	52	167.0 *	None	Moderate Flakes *		None	Moderate Flakes *	Slight *	None
<250	Red	Clear	7.73	-3 *	38 *	114.0 *	None	Low Chunks		None	Low Chunks	None	None
<250	Dark Red	Cloudy	8.26	-3 *	38 *	84.0 *	None	Low Chunks	2350	None	Low Chunks	None	None
<250	Red	Cloudy	7.17	1 *	35 *	92.0 *	None	Low Chunks	1127	None	Low Chunks	None	None

Copyright © 2022 ISESC

A Figura 9 mostra uma foto real desse tipo de falha, com vista na parte externa e pelo metal da camisa, mostrando a evolução do *pitting* neste componente. Para mitigar os riscos desses tipos de falha e de outros relacionados a corrosão, a mina de Moatize, em conjunto com a análise dos relatórios tribológicos, também faz o uso de água destilada nos sistemas de arrefecimento de todos os equipamentos. Com essa prática, reduz-se a presença de sólidos dissolvidos e suspensos, bem como microrganismos que poderiam acelerar o processo. Isso, associado ao uso regular de aditivos inibidores de corrosão, mantem o filme de proteção da superfície dos componentes e trabalha-se de forma proativa na confiabilidade dos equipamentos.

5. Conclusões

A água tem diversas características e propriedades que a faz ser reconhecida e utilizada como principal e melhor veículo de transferência de calor em motores de equipamentos móveis. Contudo, a água também tem sua parcela de participação nos processos químicos e biológicos que acarretam problemas relacionados a corrosão nesses equipamentos, podendo comprometer negativamente a operacionalidade e gerando até mesmo o aparecimento de trincas nos pontos onde existir concentração de tensões. Consequentemente, geram-se altos custos financeiros para a manutenção dos mesmos. Por isso, torna-se imprescindível um processo robusto de gestão da corrosão para manter o fluido dentro das especificações técnicas e normas aplicáveis.

Assim, da mesma forma que com o óleo lubrificante dos equipamentos, o contínuo acompanhamento através da análise de amostras coletadas em manutenções preventivas, bem como a utilização de aditivos, reduz a probabilidade de aparecimento de falhas.

Esse processo feito de forma contínua e com o conhecimento técnico adequado, torna a operação dos equipamentos confiáveis e dá previsibilidade à manutenção.

Referências

1 FARIA J. **Sistema de controle e tratamento da água de arrefecimento de motores**. Rio de Janeiro: Marinha do Brasil, 2013, 38p.

2 CATERPILLAR, 2008. **Know your Cooling System**. Peoria (EUA): Caterpillar, 2008, 78p.

3 CATERPILLAR SIS - **Service Information System**, 2022. [Online] Disponível na internet via WWW URL: https://sis2.cat.com/#/detail?keyword=arrefecimento&infoType=13&serviceMediaNumber=SPBU6250&serviceIeSystemControlNumber=i00059150&tab=service. Acessado em 24 de Maio de 2022.

4 OFFSHORE MAGAZINE. **Pitting and crevice corrosion of offshore stainless steel tubing**. 2022. [Online] Disponível na internet via WWW URL: https://www.offshore-mag.com/business-briefs/equipment-engineering/article/16761447/pitting-and-crevice-corrosion-of-offshore-stainless-steel-tubing. Acessado em 21 de Maio de 2022.

5 ISO 4406:2021. **Hydraulic Fluid Power - Fluids - Method for Coding the Level of Contamination by Solid Particles**. Fourth edition. Geneva (Switzerland): International Organization for Standardization [ISO]. 2021.

6 TARHAN, H. **Hydraulic Fluid Cleanliness**. [Online] Disponível na internet via WWW URL: https://www.linkedin.com/pulse/hydraulic-fluid-cleanliness-halil-tarhan/. Acessado em 20 de Junho de 2022.

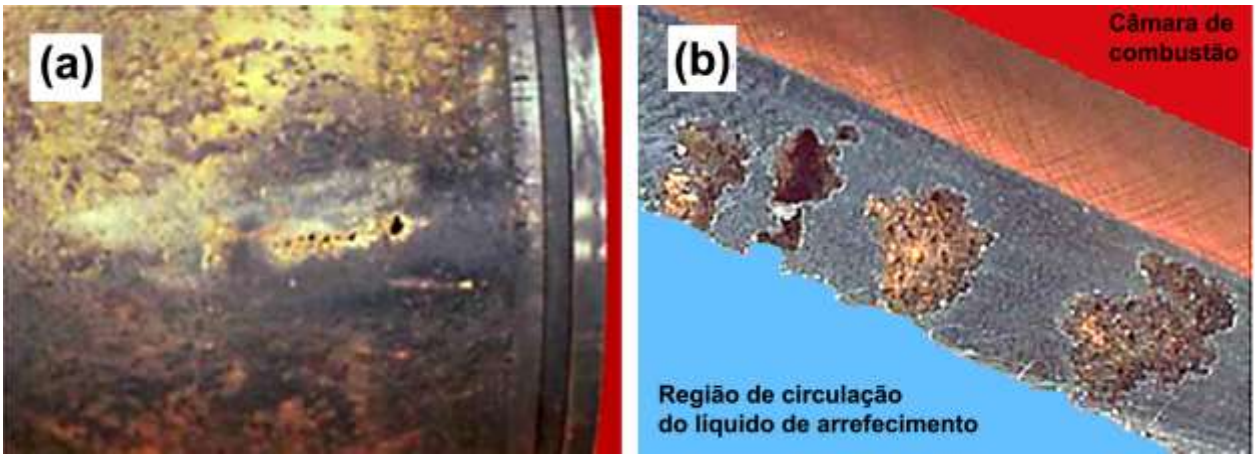


Figura 9. Ilustrações da ocorrência de *pitting* do líquido de arrefecimento no cilindro de um motor de caminhão 'fora de estada' (a) como vista na parede externa da camisa e (b) evolução do *pitting* no interior do metal da camisa.

Copyright © 2022 ISESC