

Manoel Fernandes de Oliveira Filho  
Leonardo Chagas da Silva

# **ENSAIOS TRIBOLÓGICOS COM BIODIESEL**

**ADITIVADO COM  
GLICERINA**

Manoel Fernandes de Oliveira Filho  
Leonardo Chagas da Silva

# **ENSAIOS TRIBOLÓGICOS COM BIODIESEL**

**ADITIVADO COM  
GLICERINA**

**Editora chefe**

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

**Editora executiva**

Natalia Oliveira

**Assistente editorial**

Flávia Roberta Barão

**Bibliotecária**

Janaina Ramos

**Projeto gráfico**

Camila Alves de Cremo

Ellen Andressa Kubisty

Luiza Alves Batista

Nataly Evilin Gayde

Thamires Camili Gayde

**Imagens da capa**

iStock

**Edição de arte**

Luiza Alves Batista

2024 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2024 Os autores

Copyright da edição © 2024 Atena

Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição-Não-Comercial-NãoDerivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo do texto e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o *download* da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

**Conselho Editorial**

**Ciências Exatas e da Terra e Engenharias**

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Profª Drª Alana Maria Cerqueira de Oliveira – Instituto Federal do Acre

Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Profª Drª Ana Paula Florêncio Aires – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná

Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia

Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará

Prof. Dr. Fabrício Moraes de Almeida – Universidade Federal de Rondônia

Profª Drª Glécilla Colombelli de Souza Nunes – Universidade Estadual de Maringá

Profª Drª Iara Margolis Ribeiro – Universidade Federal de Pernambuco

Profª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho

Prof. Dr. Juliano Bitencourt Campos – Universidade do Extremo Sul Catarinense

Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande

Profª Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá

Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora

Profª Drª Maria José de Holanda Leite – Universidade Federal de Alagoas

Prof. Dr. Miguel Adriano Inácio – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Prof. Dr. Milson dos Santos Barbosa – Universidade Tiradentes

Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte

Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba

Prof. Dr. Nilzo Ivo Ladwig – Universidade do Extremo Sul Catarinense

Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas

Profª Dr Ramiro Picoli Nippes – Universidade Estadual de Maringá

Profª Drª Regina Célia da Silva Barros Allil – Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí

Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista



## Ensaio tribológico com biodiesel e adição de glicerina

**Diagramação:** Ellen Andressa Kubisty  
**Correção:** Maiara Ferreira  
**Indexação:** Amanda Kelly da Costa Veiga  
**Revisão:** Os autores  
**Autores:** Manoel Fernandes de Oliveira Filho  
 Leonardo Chagas da Silva

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)	
048	<p>Oliveira Filho, Manoel Fernandes de            Ensaio tribológico com biodiesel e adição de glicerina /            Manoel Fernandes de Oliveira Filho, Leonardo Chagas            da Silva. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2024.</p> <p>Formato: PDF            Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader            Modo de acesso: World Wide Web            Inclui bibliografia            ISBN 978-65-258-2335-5            DOI: <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.355240603">https://doi.org/10.22533/at.ed.355240603</a></p> <p>1. Engenharia tribológica. I. Oliveira Filho, Manoel            Fernandes de. II. Silva, Leonardo Chagas da. III. Título.            CDD 621.892</p>
Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166	

**Atena Editora**  
 Ponta Grossa – Paraná – Brasil  
 Telefone: +55 (42) 3323-5493  
[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)  
[contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)

## DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao conteúdo publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que o texto publicado está completamente isento de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.

## DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access*, *desta forma* não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce*, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.

O bico injetor é um importante componente do sistema de injeção do motor diesel responsável pela atomização do combustível, por uma combustão eficaz e uma baixa emissão de poluentes, a qual afeta diretamente o meio ambiente e o sistema cardiovascular humano. Os padrões limítrofes de emissões veiculares definidos pela legislação ambiental são crescentemente rigorosos, como o PROCONVE P7, no Brasil e a Euro 6, na União Européia e restringem o tamanho do material particulado e NOx. O objetivo deste trabalho foi investigar e compreender os mecanismos de desgaste de materiais frágeis e dúcteis que se submetem à ação de um atomizador do tipo *Common Rail*, erosão, cavitação, aderência, adesão e corrosão. Também foi pesquisado a introdução da Glicerina na composição do biodiesel, desenvolveu-se um método sistemático para avaliar biocombustíveis diesel, com aditivos ou obtido em postos, o seu processo de atomização e sua interação com dois materiais estruturais, um quimicamente ativo, cobre eletrolítico e um quimicamente inerte, vidro de óxido de silício. Um dispositivo equipado com uma câmara de atomização de alta pressão (HPSC), um dispositivo de ensaio de bico injetor e uma câmera CCD foram usados na avaliação do processo de atomização. Nesta, foram ensaiados quatro fluidos: Ultrasene (fluido padrão da máquina TM 507); B6 aditivado com tensoativos; B6 com tensoativos e água e B6 com tensoativos, água e glicerina.

Técnicas de análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e EDS foram usadas para avaliar os danos resultantes nos materiais submetidos à atomização após 150 horas. Para cada fluido ensaiado foi utilizado um bico injetor novo e os jatos atomizados por cada bico (novo e após ensaios) foram filmados com câmera CCD (resolução de 10 kfps). Posteriormente esses bicos foram analisados por MEV e EDS. Observaram-se partículas metálicas com áreas entre 0,5 e 50,0  $\mu\text{m}^2$ . Evidências de desgaste por aderência, adesão, corrosão, erosão e cavitação foram observadas no bico injetor, devido ao processo de atomização dos fluidos.

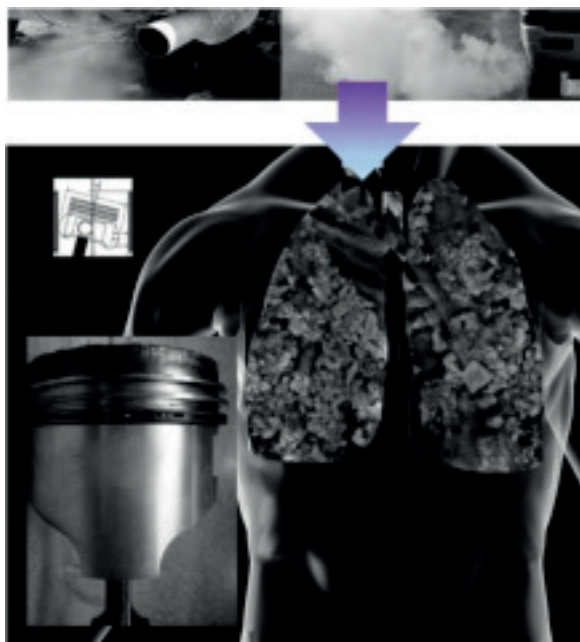
<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>1</b>
1.1 HIPÓTESES .....	6
1.2.1 Objetivo Geral .....	6
1.2.2 Objetivos Específicos .....	6
<b>CAPÍTULO 2 .....</b>	<b>9</b>
2.1 A TRIBOLOGIA E MECANISMOS DE DESGASTE .....	9
2.2 ASPECTOS GERAIS SOBRE OS COMBUSTÍVEIS .....	19
2.2.1 Combustíveis .....	19
2.2.2 Óleo Diesel .....	21
2.3 BIODIESEL .....	24
2.4 PROCESSO DE ATOMIZAÇÃO DE UM FLUIDO .....	25
2.5 GERAÇÃO DE PARTICULADOS SÓLIDOS PM EMITIDOS POR UM MOTOR DIESEL .....	31
<b>CAPÍTULO 3 .....</b>	<b>32</b>
3. METODOLOGIA .....	32
3.1 ENSAIOS EM BANCADA DIESEL INJECTOR TEST – TM 507 .....	32
3.2 INSTRUMENTAÇÃO DO EQUIPAMENTO DIESEL INJECTOR TEST – TM 507 ...	33
3.3 ENSAIOS NO DISPOSITIVO DE ENSAIO DE BICO INJETOR COMMON RAIL ..	36
3.4 OBTENÇÃO DE IMAGENS DOS JATOS ATOMIZADOS POR CÂMERA CCD ..	38
3.5 EQUIPAMENTOS USADOS NO DISPOSITIVO E NA BANCADA DE ENSAIOS.....	39
3.6 COMBUSTÍVEIS E REAGENTES .....	39
3.7.1 Formulação dos Combustíveis Microemulsionados .....	40
3.8 COMBUSTÍVEIS ANALISADOS .....	40
3.8.1 Aquisição do Biodiesel e sua Aditivação .....	40
3.8.2 Caracterizações dos Combustíveis .....	40
<b>CAPÍTULO 4 .....</b>	<b>45</b>
4.1 DESGASTE E IDENTIFICAÇÃO DOS SEUS MECANISMOS NOS ALVOS DE VI-	

DRO E COBRE SUBMETIDOS À ATOMIZAÇÃO POR INJETORES <i>COMMON RAIL</i> ..	45
4.1.1 Imagens das Texturas das Superfícies dos Alvos de Vidro e Cobre Sub-	
metidos ao Fluido Ultrasene 4113 .....	45
4.1.2 Imagens das Texturas das Superfícies dos Alvos de Vidro e Cobre Sub-	
metido ao Combustível B6 + Tensoativos .....	49
4.1.3 Imagens das Texturas das Superfícies dos Alvos de Vidro e Cobre Sub-	
metidos ao Combustível B6 + Tensoativos + Água .....	51
4.1.1 Imagens das Texturas das Superfícies dos Alvos de Vidro e Cobre Sub-	
metidos ao Combustível B6 + Tensoativos + Água + Glicerina.....	57
4.2 CORROSIVIDADE AO COBRE .....	61
3. MEV DOS BOCAIS DOS BICOS INJETORES <i>COMMON RAIL</i> ANTES E APÓS OS	
PROCESSOS DE ATOMIZAÇÃO DOS FLUIDOS.....	63
3.1 Comparação das Superfícies dos Paraboloides dos Bicos Injetores Novo e Após	
150 h de Atomização do Fluido Ultrasene 4113 .....	63
4.3.2 Principais Tipos de Falhas em Sistemas <i>Common Rail</i> .....	65
4.3.3 Superfícies dos Bocais dos Bicos Injetores Após Ensaio de Atomização	
no Dispositivo de Ensaio de Bico Injetor <i>Common Rail</i> .....	65
3.3.3 Desgaste de Bicos Após 20 h de Atomização do Combustível B6 + Ten-	
soativos + Água.....	77
4.3.4 Sobre os Ensaio em Dispositivo de Ensaio de Bico Injetor <i>Common</i>	
<i>Rail</i> .....	81
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>83</b>
<b>SOBRE OS AUTORES .....</b>	<b>83</b>

# CAPÍTULO 1

Os MCIs (Motores de Combustão Interna) têm sido associados desde os anos 1970 à principal fonte de poluição ambiental nas principais metrópoles do mundo – esta é a mensagem repassada pela imagem da Figura 1.1.

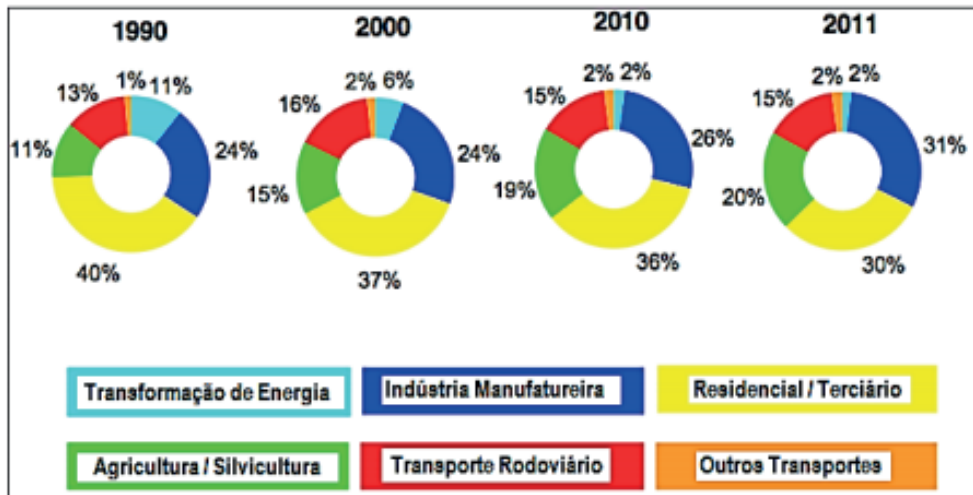
Figura 1.1 – Visualização conceptual retratando o senso coletivo das populações dos grandes centros urbanos que atribuem as causas de diversas patologias pulmonares aos particulados sólidos PM emitidos por MCIs



Fonte: OLIVEIRA FILHO *et al.* (vol. A, 2015)

O imaginário popular, os médicos pneumologistas e a OMS (Organização Mundial da Saúde) arraigaram-se às versões primitivas dos motores diesel. Loïc Chauveau, em artigo sobre partículas finas que poluem a França metropolitana publicado em 14 de março de 2014, no sítio eletrônico Ciências e Futuro – Natureza (*Science et Avenir - Nature*), apresenta um quadro das emissões atmosféricas na França, Quadro 1.1.

Quadro 1.1 – Emissões atmosféricas na França metropolitana por setor para partículas PM<sub>10</sub> (10 µm) em milhares de toneladas em função de diferentes setores, baseado no Relatório do CITEPA



Fonte: Adaptado de CHAUVEAU (2014)

Partículas micrométricas poluentes que são danosas à saúde humana e ao ambiente possuem diferentes geometrias e origens distintas.

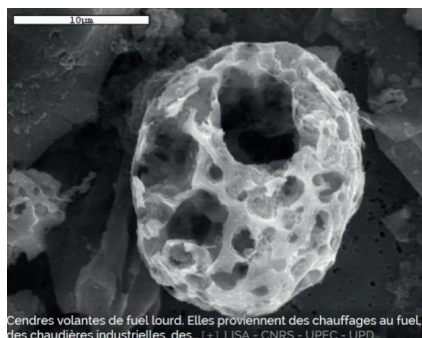
O tamanho das partículas está diretamente associado ao seu potencial para causar problemas à saúde, sendo que quanto menores os materiais particulados, maiores os danos à saúde. As partículas finas passam mais tempo em suspensão na atmosfera comparativamente com partículas maiores, estas, podem ser transportadas por grandes distâncias o que aumenta seu potencial de causar impactos nos indivíduos.

Os materiais particulados finos se depositam nos brônquios terminais e alvéolos, agravando problemas respiratórios e podendo causar mortes. (IBALD-MULLI *et al.*, 2002).

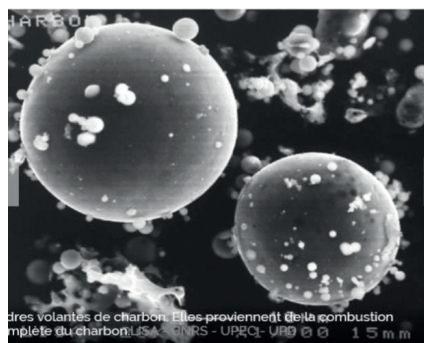
Algumas dessas partículas podem ser assimiladas a partir da visualização da Figura 1.2, de uma investigação europeia recente, obtidas em Chauveau (2014).



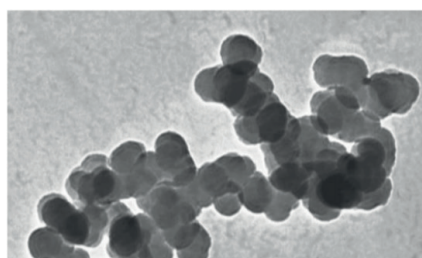
Figura 1.2 – Morfologias e origem de diversas partículas finas que poluem o ambiente



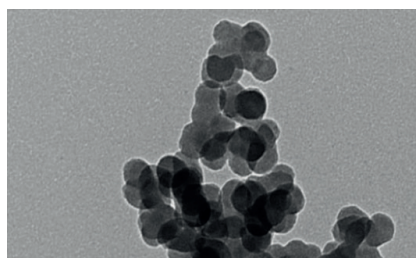
(a) Cinzas de combustíveis pesados (por ex. de caldeiras industriais)



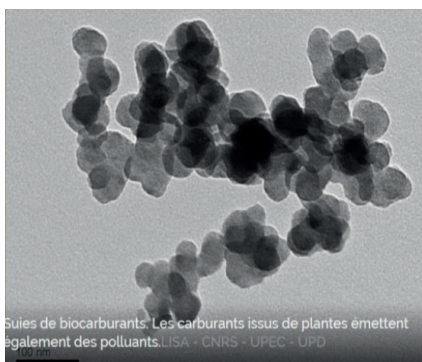
(b) Cinzas da combustão incompleta do Carbono



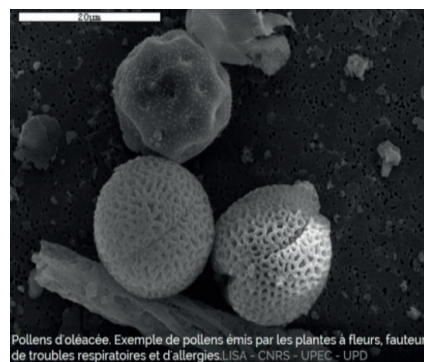
(c) Partículas emitidas por motor diesel (Fuligem)



(d) Partículas emitidas por aviões (Motores acionados a querosene)



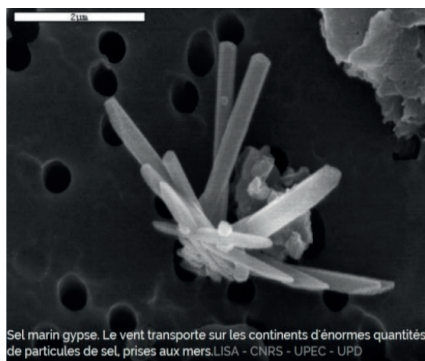
(e) Fuligens de biocombustíveis (fortemente alergênicas)



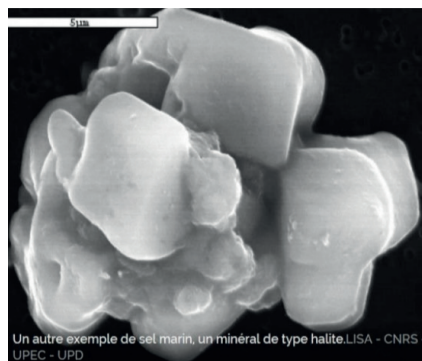
(f) Pólenes de plantas oleaginosas

(g) Partículas de aerossóis desérticos (areias transportadas pelos ventos do deserto do Saara até Roma e Paris, por exemplo)

(h) Partículas de outros aerossóis desérticos



(i) Partículas tipo bastonete de gipsita, gesso (sulfato de cálcio hidratado, vindo do mar)



(j) Partículas micrométricas de halita (sal-gema, um tipo de sal marinho)

Fonte: Adaptado de CHAUVEAU (2014b)

Nanomateriais avançam dia a dia. Na Suíça, o professor Michael Riediker, do grupo de pesquisa Partículas e Saúde do Institute for Work and Health, em Lausanne, tem investigado os efeitos de nanomateriais sobre a saúde humana, temas que vêm sendo discutidos em fóruns como a 11<sup>th</sup> International Particle Toxicology Conference, de 26 a 30 de setembro de 2016, em Singapura, do qual o professor é o *chairman* e onde o terceiro tema para discussão é relativo às partículas emitidas por motores a combustão. Os dois primeiros são particulados de incêndios florestais e nanopartículas engenheiradas.

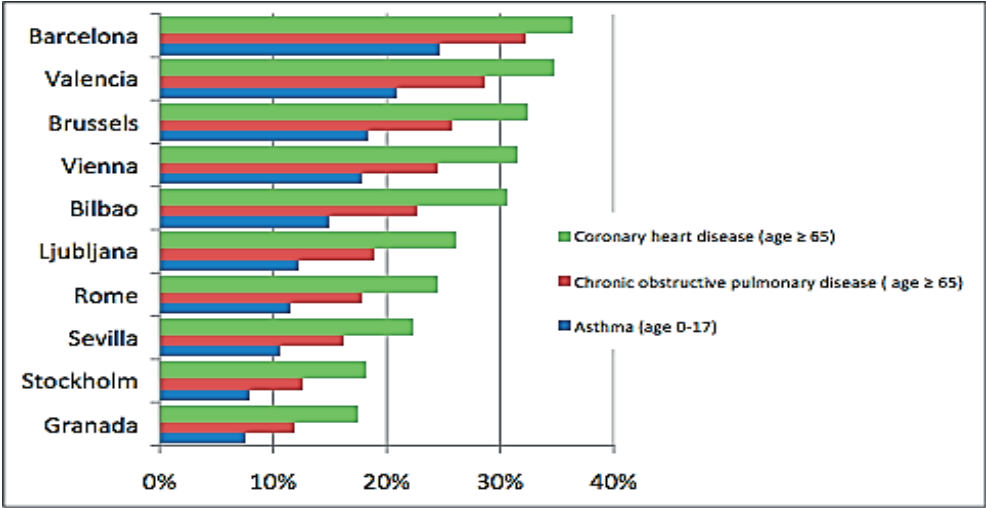
Os últimos anos da década de 1990 foram marcados por progressos tecnológicos e enrijecimento da legislação ambiental na Europa e no Brasil. Isso tem provocado uma redução significativa nos poluentes dos veículos novos. Duas décadas após, a melhoria dos filtros para partículas, associadas às emissões de motores diesel, assegurou um nível comparável àquele dos veículos a gasolina, apesar desses avanços haverem sido anulados pelo crescimento das frotas veiculares. A Figura 1.2 mostra que a emissão de finas partículas no segmento agrícola passou de 11 % para 20 %, de 1990 a 2012, e o da indústria, de 24 % para 31 %.

Segundo Challengers (2015), a norma Euro 6c, também denominada Euro 6.2, começará a vigorar em 2017 e isto tem instigado os fabricantes a inovar. A montadora coreana Hyundai já anunciou um novo motor que satisfaz à Euro 6c, um veículo de motor turbocomprimido a três cilindros. A empresa química alemã BASF anunciou um novo catalisador a quatro vias; a fabricante francesa de equipamentos automotivos e de controle de emissões Faurecia a qual (afirma ser líder mundial nesse segmento) anunciou um novo filtro para reter partículas emitidas por motores a gasolina e a montadora alemã Mercedes-Benz já introduziu em um dos seus modelos de série um novo filtro de partículas.

De acordo com o estudo europeu da APHEKOM em Perez *et al.* (2013), os que habitam em um raio central de 150 metros do eixo de circulação de dez mil veículos ou

mais por dia representam de 15 a 30 % dos novos casos de asma infantil e, em proporções similares, das patologias crônicas respiratórias e cardiovasculares nos adultos de 65 anos ou mais (Figura 1.3). Segundo este estudo, essas doenças representam um custo anual de  $\approx$  300 milhões de euros.

Figura 1.3 – As cores verdes (doenças cardíacas), azul (asma) e vermelha (doenças pulmonares) representam os percentuais respectivos das populações que residem próximo aos grandes eixos rodoviários das grandes cidades europeias

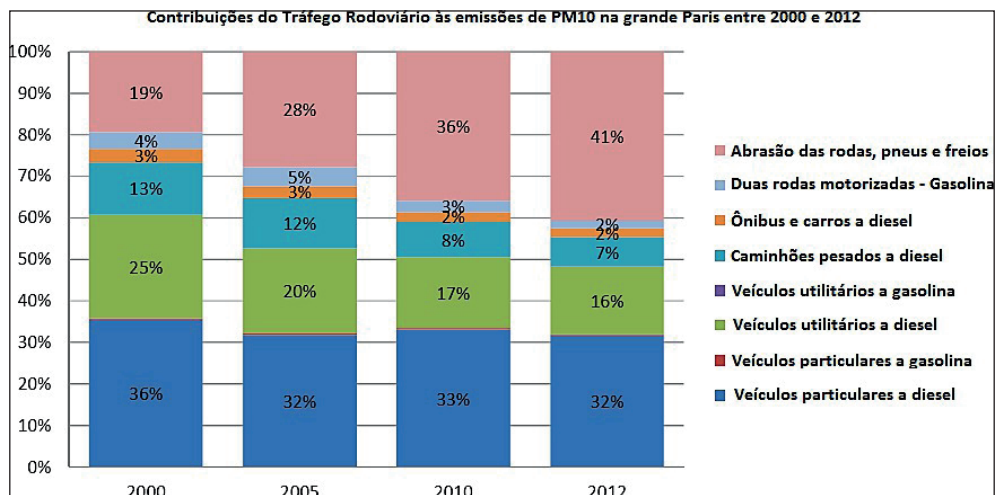


Fonte: PEREZ *et al.* (2013)

que estabelece o limite de poluição por partículas sólidas  $PM_{2.5}$  ( $2,5 \mu m$ ) aos níveis máximos de  $25 \mu g/m^3$  (média de 24 horas) e de  $10 \mu g/m^3$  (média anual), enquanto tais valores de poluição por partículas sólidas de  $PM_{10}$  ( $10 \mu m$ ) são toleráveis níveis máximos de  $50 \mu g/m^3$  (média de 24 horas) e de  $20 \mu g/m^3$  (média anual). Os habitantes de Pequim respiraram, em média, em 2013, um ar composto por  $90 \mu g/m^3$  e, durante vários dias em janeiro de 2014, esse valor majorou-se uma ordem de grandeza, atingindo picos de até  $900 \mu g/m^3$ . Na França são  $80 \mu g/m^3$ . Tais dados constam do Relatório do CITEPA-França, disponibilizados no sítio eletrônico do Science et Avenir, (CHAUVEAU, 2016).

Surpreendentemente, o desgaste abrasivo de rodas, pneus e pastilhas de freios foi responsável, de 2000 a 2012, em Paris, por 41 % das emissões de  $PM_{10}$  pelo setor de transporte rodoviário. O gráfico da Figura 1.4 foi elaborado pelo órgão ambiental AIRPARIF, em seu inventário regional divulgado em dezembro de 2014, Figura 1.5.

Figura 1.4 – Contribuições da abrasão das rodas, pneus e freios e outros itens do Tráfego Rodoviário às emissões de  $PM_{10}$  na grande Paris, França.



Fonte: Gráfico adaptado de AIRPARIF (2014)

Figura 1.5 – Inventário regional das emissões na grande Paris, França



Fonte: AIRPARIF (2014)

Segundo o jornal Le Monde (2015), de 25 de janeiro 2015, recente avaliação do Instituto de Engenharia do Ambiente da Universidade Técnica de Berlim, o desgaste das pastilhas de freio, provocado pela frenagem veicular, lança no meio-ambiente cerca de 20 % do conjunto de partículas emitidas pelo tráfego rodoviário. O INSA (2016) de Lyon estima que esse desastre produza na França, anualmente, 20 mil toneladas de pó.

Soluções veiculares acionadas eletricamente ou através de células a combustível demandam freios, o que alivia a carga de vilão atribuída aos motores diesel. Esta Tese investiga os mecanismos de desgaste de bicos injetores (tipo *Common Rail*) após atomizações de diferentes fluidos realizadas em um dispositivo de ensaio de bico injetor (sob pressões entre 350 a 1400 bar) e em bancada dinamométrica (sob pressão de 200 bar).

## 1.1 HIPÓTESES

Para a formalização das hipóteses desta Tese, decidiu-se investigar experimentalmente:

(a) A lubricidade e a atomização desses combustíveis em bancada apropriada. (c) Os mecanismos de desgaste provocados em alvos frágeis e dúcteis pelos jatos incidentes utilizando biocombustíveis.

(d) O desgaste dos bocais atomizadores, após dezenas de horas de atomização a 800 bar por um bico injetor diesel *Common Rail* novo, ensaiado em bancada.

Formularam-se cinco hipóteses:

**H1.** Os tensoativos utilizados como aditivo ao B6 majoram o consumo, mas melhora a combustão.

**H2.** Há produção e transporte de materiais particulados  $PM_{2,5}$ , e  $PM_{10}$  e nanométricos pelos gases de escape para todos os combustíveis ensaiados.

**H3.** A lubricidade do combustível melhora com o uso dos aditivos utilizados.

**H4.** A atomização em bicos *Common Rail* produz desgaste erosivo e cavitativo nos materiais frágeis e dúcteis no seu entorno associado à corrosão nos materiais metálicos.

**H5.** O comprimento e a velocidade média dos jatos atomizados por cada um dos bocais de um bico variam e o seu desgaste é influenciado pelo combustível e seus aditivos.

### 1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver um método sistemático para avaliar biocombustíveis diesel, o seu processo de atomização e sua interação com materiais estruturais que exibem comportamento frágil ou dúctil, seus mecanismos de desgaste e a morfologia e dimensões de materiais particulados integrantes da combustão em motor do ciclo diesel.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

a) Caracterizar os combustíveis biodiesel empregados;

b) Elaborar uma bancada para ensaio de atomização de bico *Common Rail* que possibilite analisar mecanismos de desgaste e registrar fotograficamente o perfil dos jatos atomizados;

c) Realizar ensaios em motor monocilíndrico de 5 cv para inspecionar visualmente o desgaste das peças envolvidas no processo de combustão;

d) Realizar ensaios de lubricidade em bancada de HFRR para avaliar os biocombustíveis empregados;

- e) Identificar os mecanismos de desgaste do bico injetor;
- f) Avaliar a morfologia da superfície e os mecanismos predominantes de desgaste de materiais frágeis e dúcteis submetidos aos jatos incidentes resultantes do processo de atomização a alta pressão.

# CAPÍTULO 2

## A TRIBOLOGIA E MECANISMOS DE DESGASTE

Desde a Antiguidade, o ser humano aprendeu a fazer fogo a partir da fricção entre dois pedaços de madeira. O atrito e o fogo constituíram pilares importantes ao desenvolvimento tecnológico da Humanidade. Hutchings, 2016, afirma que, no entorno de 1.500 dC, Leonardo da Vinci deixou escrita a associação da lubrificação com um baixo atrito e, do fogo, com um elevado atrito:

The action of friction is divided into parts of which one is simple and all the others are compound. Simple is when the object is dragged along a plain smooth surface without anything intervening; this alone is the form that creates fire when it is powerful, that is it produces fire, as is seen with water-wheels when the water between the sharpened iron and this wheel is taken away. The others are compound and are divided into two parts; and the first is when any greasiness of any thin substance is interposed between the bodies which rub together; and the second is when other friction is interposed between this as would be the friction of the axles of *the wheels*. (HUTCHINGS, 2016).

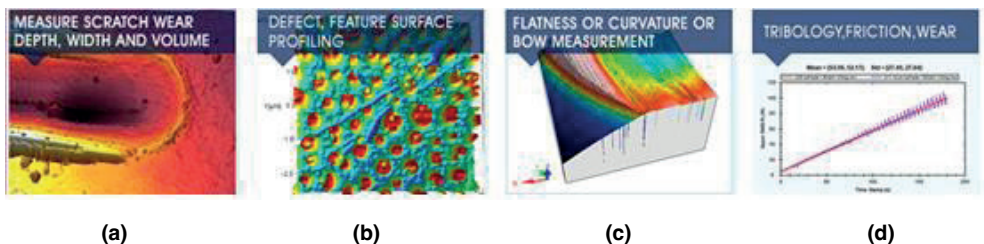
Hutchings, 2016, afirma ainda que Leonardo da Vinci já ressaltava que o “atritar junto” conduzia ao desgaste das peças que interagiam mecanicamente entre si:

(...) *the noun he used for “friction” was “confregazione”, derived from the verb “confregare” meaning “to rub together”, and not the modern Italian term “attrito”. In most instances “confregazione” can be translated as “friction”, but in some cases Leonardo was clearly referring to the act of rubbing which then led to wear. (HUTCHINGS, 2016).*

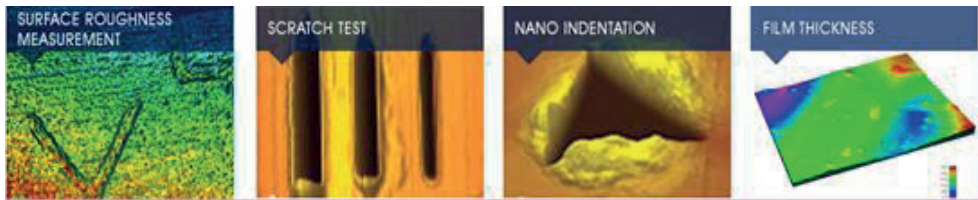
Um exemplo útil do controle do fogo, na tecnologia dos últimos cem anos, é aquele dos motores a combustão interna. E, na análise desses motores, a Tribologia tem sido um importante vetor considerado desde que o objetivo seja o seu aprimoramento.

A Figura 2.1 ilustra algumas aplicações atuais da Tribologia, todas associadas ao conceito da “*confregazione*” de que tratou Leonardo da Vinci.

Figura 2.1 – Exemplos do escopo investigativo da Tribologia. (a) Medida de um risco esclerométrico – profundidade, largura e volume; (b) Perfilometria da superfície, textura e defeitos; (c) Medida de desvios de planicidade, curvatura ou raio de concordância; (d) Ensaios tribológicos em laboratório investigando atrito e desgaste; (e) Rugosímetro e a medida da rugosidade e ondulação; (f) Ensaios esclerométricos com energia de deformação variável; (g) Nano-indentação e (h) Medição da espessura de filme fino







(e)

(f)

(g)

(h)

Fonte: RTEC INSTRUMENTS (2013)

LIMA, 2010, afirma que:

Em motores de combustão interna, **o desgaste corrosivo** deve-se a reações triboquímicas (devido a misturas ar/combustível) na face de contato anel/cilindro. A presença de enxofre no combustível aumenta o desgaste corrosivo. Este desgaste ocorre sempre que as superfícies em contato se encontram em um ambiente corrosivo. O deslizamento entre as superfícies provoca a remoção do filme protetor formado, facilitando assim o ataque corrosivo destas superfícies pelo meio.

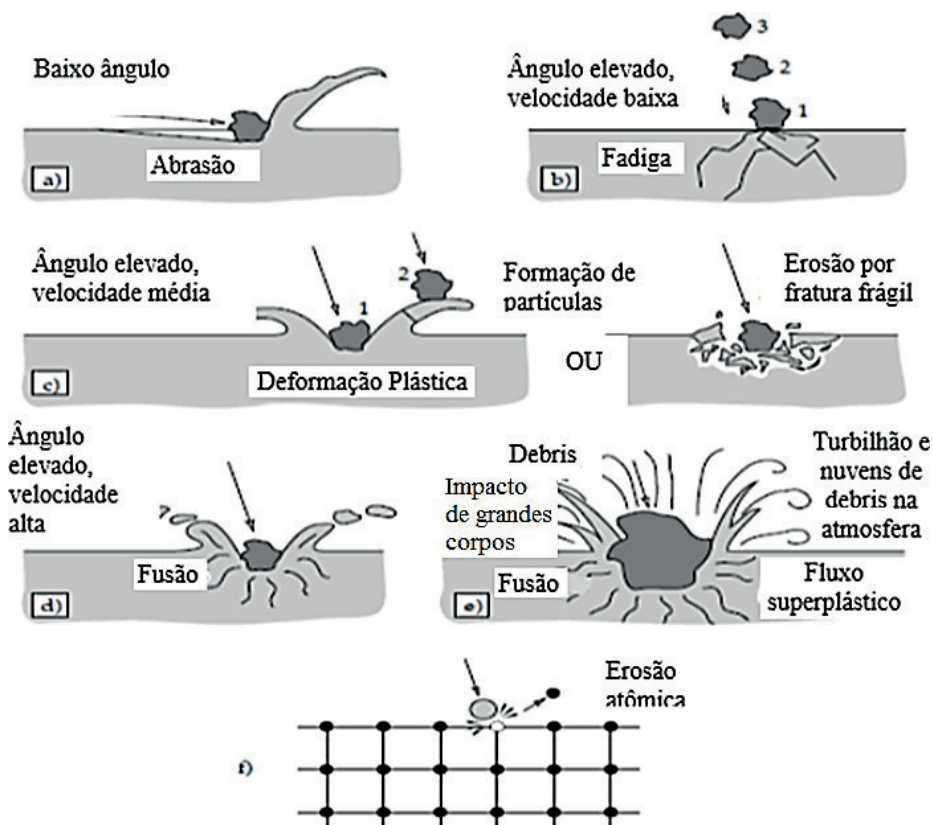
A **cavitação** é um mecanismo de desgaste caracterizado por microcavidades decorrentes da formação e subsequente colapso, dentro de um líquido e próximo à parede que o confina, de bolhas contendo vapor, gás ou ambos. A cavitação resulta de uma redução localizada da pressão hidrostática, produzida seja pela movimentação de líquido (escoamento) seja por uma superfície sólida (vibração). A cavitação é um mecanismo de desgaste por fadiga, ou seja, o material é sujeito a forças cíclicas desenvolvidas em decorrência de sucessivos colapsos de bolhas gerando, nas paredes do material, micro-cavidades.

**Erosão por partículas sólidas** é a perda de material resultante de repetidos impactos de partículas sólidas, contidos em gás ou líquidos a velocidades significativas. O mecanismo é regido pela formação de crateras oriundas da deformação plástica causadas pelo impacto que sólidas partículas promovem a superfície do metal, sendo que a princípio os metais são endurecidos na região de atuação da deformação plástica. (LIMA, 2010).

A Figura 2.2 ilustra a erosão por partículas duras investigadas pela Tribologia e os mecanismos de danos provocados pela erosão por partículas sólidas ao atingirem um alvo.



Figura 2.2 – Erosão promovida por partículas incidentes a (a) ângulos rasantes, equivalendo à abrasão; (b) ângulos próximos a 90° e velocidade de incidência baixa promovem fadiga e (c) à velocidade média (esquerda), deformação plástica ou fratura frágil (à direita) com formação de debris. (d) ângulos próximos a 90° e velocidade de incidência alta que promovem fusão do material do alvo. (e) impacto de grandes corpos promovem fusão localizada e nuvem de debris lançados ao meio-ambiente. (f) erosão em escala atômica



Fonte: Adaptado de LIMA (2015, vol. A)

Os mecanismos de desgaste erosivo assemelham-se ao desgaste abrasivo (Figura 2.1(a)) unicamente no caso de colisão de partículas em baixo ângulo de incidência em relação ao alvo. Ângulo de 90° ou flutuações de  $\pm 40^\circ$  neste valor de incidência da partícula no alvo depende da sua energia cinética, da velocidade de impacto da partícula,  $V_{ip}$ , podendo promover:

1. **dano por fadiga** (baixa  $V_{ip}$ ), Figura 2.1(b);
2. **deformação plástica**, evidenciando *dimples*, Figura 2.1(c, à esquerda); ou 3. **formação de debris** associados à **fratura frágil**, Figura 2.1(c, à direita) (ambas à média  $V_{ip}$ );
4. **fusão**, (alta  $V_{ip}$ ), Figura 2.1(d), **em que a pequena massa da partícula incidente é incubada pelo material do alvo**;

5. **fusão** e um fluxo superplástico (alta  $V_{ip}$ ), Figura 2.1(e), em que a massa considerável da partícula incidente também gera debris rechaçados em uma nuvem ao meio-ambiente; e
6. **erosão em escala atômica**.

A Figura 2.3 ilustra os três mecanismos de desgaste abrasivo, por corte (“*cutting*”), por formação de proa (“*prow formation*”) e por sulcamento (“*grouoving, ploughing*”).

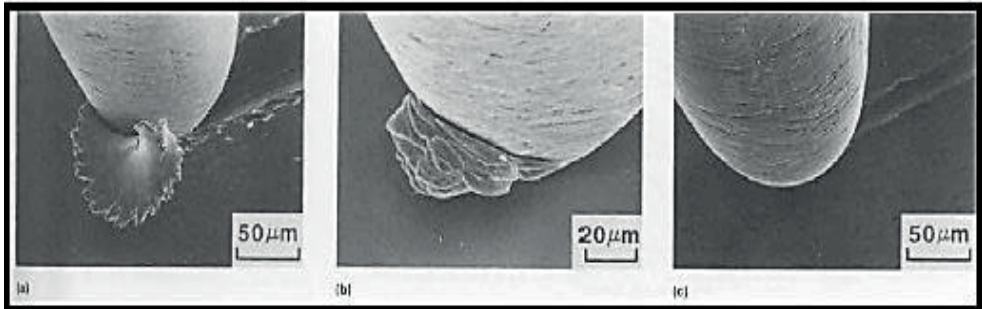
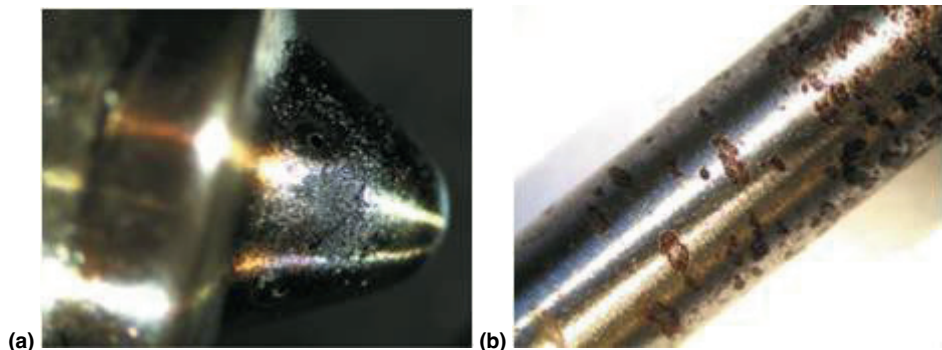


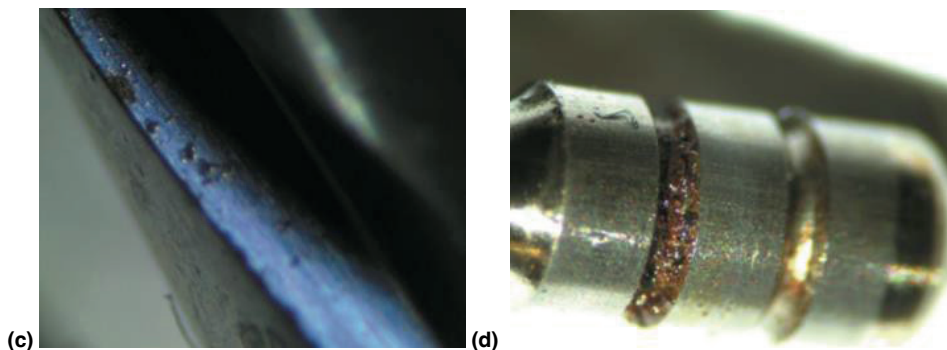
Figura 2.3 – Morfologia do desgaste abrasivo por (a) corte, (b) formação de proa, (c) sulcamento

Fonte: LIMA (2015)

Abramek, Stoeck e Osipowicz (2015) investigaram o **desgaste corrosivo** incidente sobre elementos de um sistema de injeção diesel *Common Rail* e a perda gradual ou total da sua funcionalidade, Figura 2.4. Em primeiro lugar, consideraram que os pares tribológicos e anisotropias localizadas no material original conduzem à corrosão nos subconjuntos do sistema de injeção que trabalham em contato direto com o combustível. Em segundo lugar, as células galvânicas formadas e que produzem reações de redução e de oxidação em presença de eletrólitos.

Figura 2.4 – Fotos ilustrativas de desgaste em bicos injetores *Common Rail* evidenciando o seu entorno com corrosão por pite: (a) bocal produzido pela Bosch; (b) agulha fabricada pela Denso; (c) agulha fabricada pela Delphi e (d) cabeça da agulha fabricada pela Delphi





Fonte: ABRAMEK, STOECK e OSIPOWICZ (2015)

Esses autores consideram também que ocorre o desgaste severo quando a taxa de formação de óxidos e hidróxidos devidos à corrosão é mais alta do que a taxa de desgaste associada aos demais mecanismos de desgaste da superfície. Relativamente aos combustíveis biodiesel, esses autores consideram que possuem um elevado grau de oxidação, tendência à polimerização, higroscopicidade, formação de depósitos e maior degradação microbiológica.

A corrosão do cobre em ambiente contendo oxigênio e enxofre foi investigado recentemente por Ma *et al.*, 2014. Nove distintas cores integram regiões bem definidas por produtos que podem ser formados em função de distintos pH e potenciais elétricos desenvolvidos no meio, mapeados no diagrama de Pourbaix da Figura 2.5. Tais produtos caracterizam-se, nos casos de nanopartículas de cobre interagentes com o enxofre e o oxigênio investigadas por Ma *et al.*, 2014, por estruturas amorfas e cristalinas que se desenvolvem durante o processo de sulfetização associado a diferentes mecanismos, como dissolução e precipitação, Figura 2.6.

Figura 2.5 – Diagrama de Pourbaix do sistema Cu-O-S desenvolvido por MA *et al.* (2014) destacando-se as cores e os diferentes produtos  $\text{Cu}_x\text{S}_y$  que podem ser formados sob diferentes condições de sulfetização, pH e potencial redox

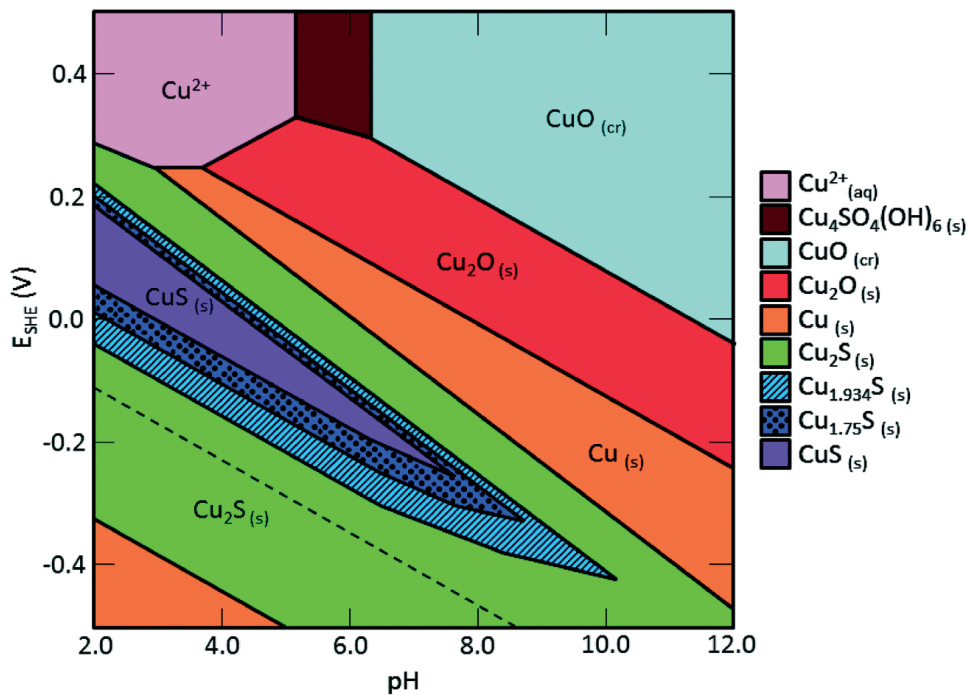
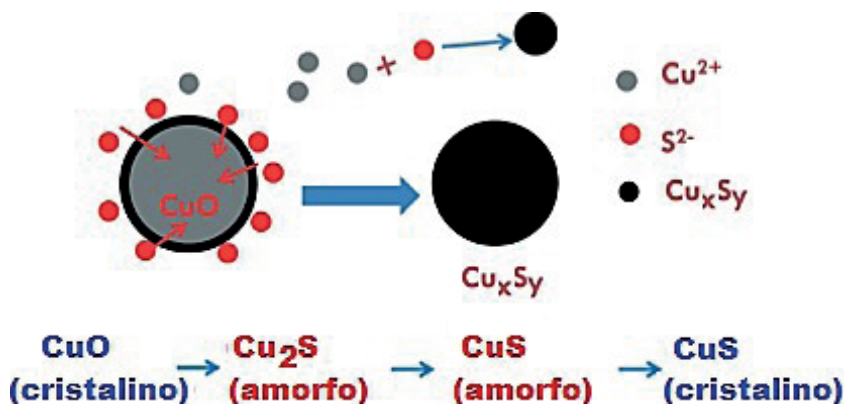


Figura 2.6 – Processo de sulfetização sólido-fluido acompanhado por formação em menor escala de dissolução-precipitação de pequenos clusters de  $\text{Cu}_x\text{S}_y$  de nanopartículas de CuO



Fonte: MA *et al.* (2014)

Neste último caso, importa visualizarem-se formas e cores, como os diferentes matizes decorrentes da sulfetização de óxido de cobre por meio de diferentes relações molares enxofre/cobre, como discutido por Ma *et al.* (2014) de cujo artigo foi extraída a imagem da Figura 2.4.

Tons de violeta associam-se ao  $\text{Cu}_2^{+}(\text{aq})$ , marrom,  $\text{Cu}_4\text{SO}_4(\text{OH})_6(\text{s})$ , azul celeste,  $\text{CuO}(\text{cr})$ , verde,  $\text{Cu}_2$ , roxo,  $\text{CuS}(\text{s})$  e assim por diante, como expostos na legenda da Figura 2.5, que contém um diagrama de Pourbaix, em que se associa um potencial químico, medido em pH e um potencial elétrico, medido em Volts, de elementos químicos que interagem com um metal. Neste caso, os elementos químicos são o oxigênio e o enxofre e o elemento químico metálico, o cobre.

Oliveira Filho (2011), em sua dissertação de mestrado, apresentou evidências do desgaste de um motor diesel BD 5.0 que utilizava diesel puro, blendas de biodiesel de soja e de girassol, contaminadas, ou não, por água destilada, submetido a ensaios dinamométricos.

Na Figura 2.7 apresentam-se evidências de **mecanismos de desgaste adesivo, oxidativo e abrasivo**, associados, ou não, aos **depósitos de colônias de carbonização**, oriundos do combustível ou do óleo lubrificante, nas paredes das superfícies circunferenciais do pistão, (a), (b), (c), (d), dispostas a 90 graus, à altura da sua cabeça, em função de (1) tolerâncias dimensionais, desvios de forma e de posição do pistão acoplados às solicitações termomecânicas e (2) da sua rigidez diferencial relativamente à posição do pino do pistão, o qual, em serviço, é animado por um movimento alternado (*“reciprocating”*).

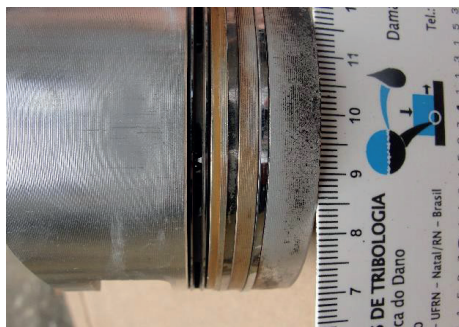
A basculação microscópica de um pistão no interior do cilindro (Figura 2.7(e)) é uma função:

- (1) da textura superficial, tolerâncias, desvios de forma e posição, (que podem implicar em uma folga radial no par pistão - cilindro, designada por *“slap”*);
- (2) da cinemática e dinâmica do sistema tribológico pistão - cilindro – pino do pistão - biela;
- (3) das solicitações termomecânicas e hidrodinâmicas (associadas, por exemplo, a eventuais danos por *clogging* no bocal do bico injetor) envolvidas nesse sistema e os consequentes estados de tensões e deformações atuantes;
- (4) dos materiais, suas propriedades térmicas e mecânicas, de modo a compatibilizar – ou não - tais tensões e deformações;
- (5) número de ciclos;
- (6) dano acumulado ao longo da vida em serviço.

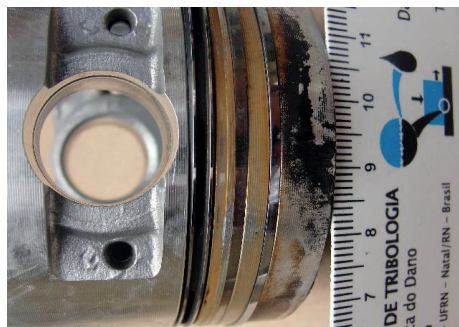
Perfis da saia do pistão vêm sendo simulados para otimizar o atrito e o desgaste no par tribológico pistão - cilindro, como no estudo de Panayi, Diaz e Schock (2009), através de um método que compara a resposta da superfície externa do pistão aos resultados da simulação.



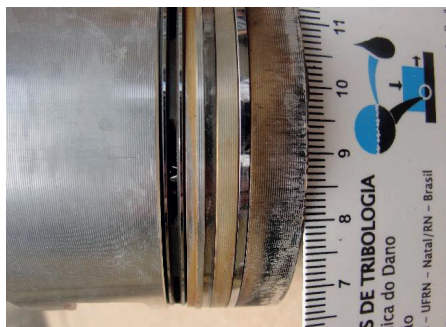
Figura 2.7 – Desgaste adesivo diferencial em quatro superfícies circunferenciais (a), (b), (c), (d), distantes 90 graus, uma da outra, na parede lateral do pistão do motor estacionário, em função do abaulamento da geratriz do pistão e da sua rigidez diferencial, relativamente à posição do pino do pistão; (e) Basculamento do pistão no interior do cilindro, função da folga radial, “slap”, que pode provocar danos por desgaste abrasivo como na imagem (f)



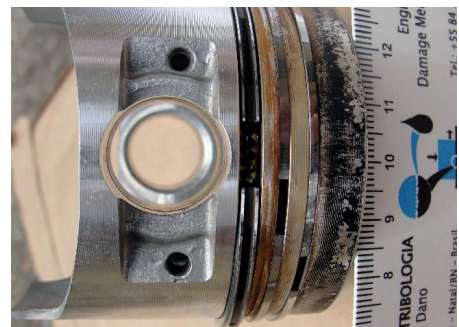
(a) 0 grau



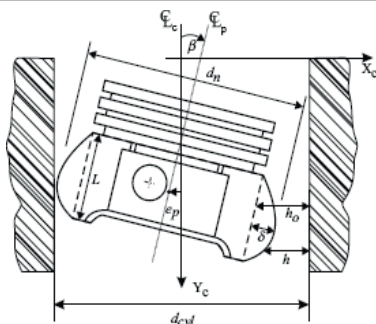
(b) 90 graus



(c) 180 graus



(d) 270 graus



(e) Fonte: PANAYI, DIAZ e SCHOCK (2009)



(f) *Piston Slap*. Fonte: FASTV6 (2007)

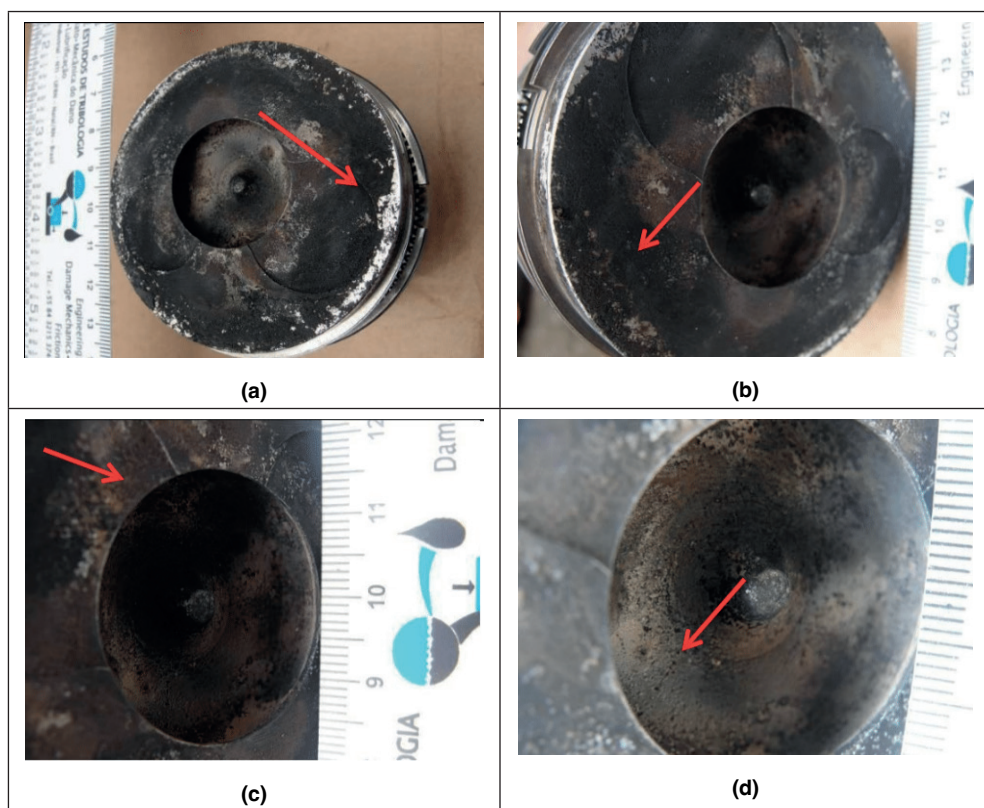
Fonte: OLIVEIRA FILHO (2011)

Alguns dos principais mecanismos de desgaste evidenciados por Oliveira Filho (2011) foram:

- (1) **adesivo**, das colônias de carbonização superficiais resultantes da combustão aderidas à superfície da cabeça do pistão e à superfície da câmara de combustão;
- (2) **oxidativo**, relativo à triboquímica da combustão e sua interação com o material da cabeça do pistão e à superfície da câmara de combustão;
- (3) **abrasivo**, função das partículas duras dos óxidos  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Si}_2\text{O}_2$  e  $\text{SiC}$  desenvolvidas, desprendidas e que promoveram a abrasão na parede do pistão, comprovado nas Figura 2.7(a) e 2.7(c).

Nas Figuras 2.8, 2.9 e 2.10 podem ser observadas texturas resultantes dos **mecanismos de desgaste**, aqui evidenciados por depósitos de filmes e/ou pela coloração.

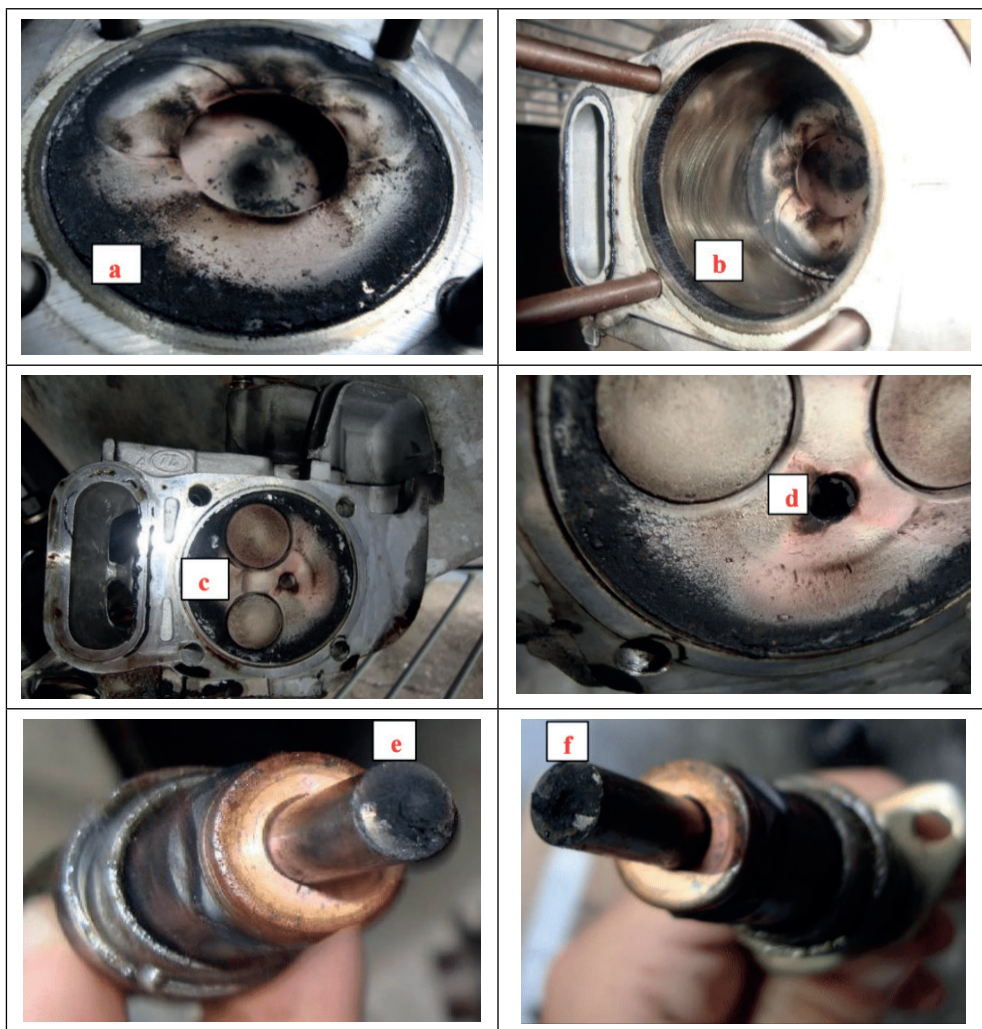
Figura 2.8 – Formação de colônias de carbonização superficiais resultantes da combustão aderidas à superfície da cabeça do pistão e câmara de combustão



Fonte: OLIVEIRA FILHO (2011)

A morfologia de partes importantes do MCI (Motor de Combustão Interna), originalmente concebido para utilizar óleo diesel fóssil e que utilizou desde o óleo diesel até diversas misturas de biodiesel, inclusive incorporando contaminação com água destilada e que são apresentadas nas Figuras 2.7 e 2.8.

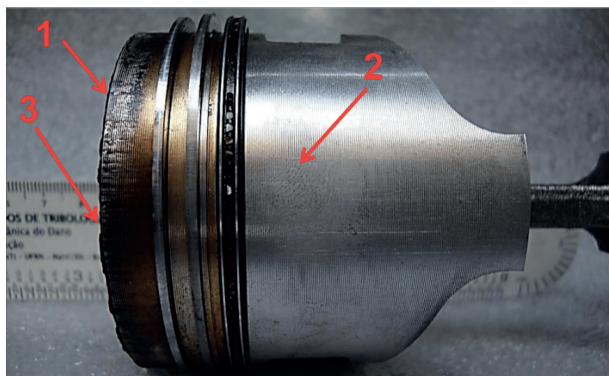
Figura 2.9 – (a) Distribuição circunferferencial e radial do desgaste adesivo por colônias de carbonização e desgaste oxidativo resultantes da combustão e que constituem a textura da superfície da cabeça do pistão e da câmara de combustão; (b) cilindro do motor Branco BD 5.0, com a sua parede interna apresentando os sulcos de usinagem por brunimento; (c) superfícies do cabeçote e válvulas de admissão e escape; (d) superfície do cabeçote, evidenciando o desgaste no entorno da sede do bico injetor e (e) e (f) superfícies do bico injetor evidenciando o desgaste adesivo



Fonte: OLIVEIRA FILHO (2011)



Figura 2.10 – Detalhamento de evidências associadas aos mecanismos de desgaste (1) corrugação na borda da cabeça do pistão, (2) desgaste abrasivo dos sulcos de usinagem do pistão (3) depósitos de carbonização na cabeça do pistão



Fonte: OLIVEIRA FILHO (2011)

As Figuras 2.9 e 2.10 demonstram evidências de regime de desgaste moderado do motor, ratificando a boa lubricidade do biodiesel, como relatado por Farias e colaboradores, 2010, de acordo com Oliveira Filho (2011).

Entretanto, o bico injetor apresentou evidências de *clogging* por desgaste adesivo severo, através da deposição de materiais no seu bocal, implicando na necessidade da sua limpeza após um intervalo, a ser investigado, de horas em serviço. Há registros, na literatura, de que há, adicionalmente, desgaste erosivo e por cavitação-corrosão, Kasetsart *et al.*, 2010, de acordo com Oliveira Filho (2011).

## 2.2 ASPECTOS GERAIS SOBRE OS COMBUSTÍVEIS

Neste item foi feita uma abordagem sobre o elemento principal para o funcionamento dos MCIs, que são os combustíveis. Foram também analisadas, as propriedades e as características físico-químicas do diesel e do biodiesel utilizados para o funcionamento dos motores de ignição por compressão (ICO).

### 2.2.1 Combustíveis

O combustível é a matéria prima utilizada para produzir calor, energia ou luz. A queima ou combustão é uma reação química na qual os elementos constituintes do combustível se combinam com o oxigênio do ar. Para que ocorra a queima de um combustível é necessário que este atinja uma temperatura definida, chamada de temperatura de ignição. Os combustíveis podem estar nos estados sólido, líquido ou gasoso nas condições ambientais.

Os principais combustíveis sólidos naturais são a madeira e os produtos de sua decomposição natural, turfa e carvão. Para que um sólido possa ter valor como combustível é necessário que tenha um poder calorífico elevado e queime com facilidade, com ou sem chama.

No Brasil, o carvão como fonte de energia não é muito utilizado, visto que a produção de energia é proveniente de fontes hidráulicas. No caso do carvão vegetal, existe um maior controle com relação a sua utilização, visto que seu consumo provoca um desmatamento considerável das florestas; mesmo assim, a lenha participa com 8,3 % da matriz energética nacional. (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2013).

O combustível líquido tem certas vantagens em comparação com os sólidos. Geralmente possui maior poder calorífico, mais facilidade e economia de armazenagem e fácil controle de consumo. No Brasil os combustíveis líquidos são obtidos a partir do petróleo e da biomassa. Os mais usados são: gasolina, querosene, óleo diesel e álcool. Já com relação aos combustíveis gasosos pode-se citar o gás natural e o gás liquefeito de petróleo (GLP), como os principais componentes da matriz energética.

Leontsinis (1988) diz que um bom combustível para motores diesel deverá apresentar características que permitam uma boa partida, aquecimento uniforme, aceleração suave e operação suave do motor. Não deve apresentar problemas de detonação e corrosão e deve minimizar o desgaste e a produção de fumaça.

Além destes, o combustível também deve promover a limpeza dos injetores e da câmara de combustão e permitir longa vida aos filtros. Deve proporcionar a máxima autonomia possível em termos de consumo e, por fim, evitar a excessiva diluição do óleo lubrificante.

Assim, os combustíveis para motores diesel devem estar de acordo com especificações técnicas que venham a garantir um desempenho satisfatório dos motores, com o custo mais baixo possível de sua adequabilidade para os vários tipos de motores em suas diferentes condições de operação.

Dentre as especificações técnicas exigidas de um bom combustível destinado aos motores de ignição por compressão, a seguir são destacadas aquelas que estão mais diretamente relacionadas ao objetivo principal deste trabalho de pesquisa.

Inversamente, espera-se que o espaço ocupado pelo etanol e biodiesel nessa matriz aumente significativamente, vez que um dos maiores desafios da sociedade contemporânea é o desenvolvimento de novos combustíveis e fontes de energia que possam substituir esses derivados, independentemente de sua oferta atual e futura.

As principais forças mobilizadoras para esse desenvolvimento passam pela racionalização do uso dos recursos naturais disponíveis, seja no seu aspecto energético, econômico, social ou ambiental. Dentro desse contexto, este capítulo procura caracterizar os combustíveis ou biocombustíveis envolvidos nesse processo.

## 2.2.2 Óleo Diesel

Combustível derivado do petróleo, constituído basicamente por hidrocarbonetos, o óleo diesel é um composto formado principalmente por átomos de carbono, hidrogênio e em baixas concentrações por enxofre, nitrogênio e oxigênio e selecionados de acordo com as características de ignição e de escoamento adequadas ao funcionamento dos motores diesel. O combustível é um produto inflamável, medianamente tóxico, volátil, límpido, isento de material em suspensão e com odor forte e característico.

O óleo diesel é utilizado em motores de combustão interna e ignição por compressão (ciclo diesel) empregados nas mais diversas aplicações, tais como: automóveis, furgões, ônibus, caminhões, pequenas embarcações marítimas, máquinas de grande porte, locomotivas, navios e aplicações estacionárias (geradores elétricos, por exemplo). (PETROBRAS, 1012).

O óleo diesel ocupa posição de destaque na matriz de combustíveis veiculares do país, mesmo com a proibição de uso em veículos leves. Há, porém, tendência futura de queda da participação do óleo combustível e do gás liquefeito de petróleo para o uso industrial.

Este é constituído por uma mistura de hidrocarbonetos com ponto de ebulição entre 200 e 360 °C, oriundo da destilação do petróleo, através de processos de síntese ou craqueamento catalítico a baixas temperaturas. Normalmente este combustível é obtido por destilação atmosférica e a vácuo. Tem poder calorífico médio (ou calor de combustão) de 10.688 kcal/kg. (CARDOSO *et al.*, 2006).

Poder calorífico de um combustível é definido como a quantidade de calor despreendida durante a sua combustão estequiométrica. Durante a combustão de certa massa de combustível, a água é produzida pela oxidação do hidrogênio e passa a fazer parte dos produtos da combustão. Caso a água gerada como produto da combustão se encontre na fase vapor, a quantidade de calor liberada no processo é chamada Poder Calorífico Inferior (PCI). Se a água formada na combustão é totalmente condensada para a fase líquida, a energia liberada pelo combustível é o Poder Calorífico Superior (PCS). A diferença entre o PCS e o PCI é a entalpia de vaporização da água formada na combustão (GARCIA, 2002).

Na medição do PCS e do PCI, faz-se necessário estabelecer condições padronizadas de pressão e temperatura, nas quais o ensaio é realizado ou o resultado é apresentado. Geralmente, adota-se 1 atm. e 20°C como condições padrões para os reagentes e produtos após a combustão, e neste caso, denomina-se poder calorífico à pressão constante (HEYWOOD, 1988).

A energia contida no diesel combustível não é controlada durante a sua obtenção. O valor do seu poder calorífico inferior será variável e dependerá da refinaria na qual é produzido, da época do ano e da fonte de petróleo utilizada como matéria-prima. Todas estas variáveis afetam a composição do combustível. Óleo diesel com altas porcentagens de aromáticos tende a ter altos conteúdos de energia por litro, ainda que os aromáticos

tenham baixos poderes caloríficos por quilograma. Sua alta densidade compensa o seu baixo conteúdo energético quando se leva em consideração a massa do combustível. Isto tem importância especial quando se trata de motores diesel, porque o combustível é fornecido volumetricamente para o motor.

Em condições ideais, todo o carbono combustível diesel queimaria transformando-se em dióxido de carbono e todo o hidrogênio queimaria transformando-se em vapor de água. Em muitos casos, virtualmente, todo o combustível segue este caminho. Contudo, se o combustível tiver enxofre, este será oxidado, transformando-se em dióxido e trióxido de enxofre. Estes óxidos de enxofre podem reagir com o vapor de água, formando ácido sulfúrico e outros componentes sulfatados. Estes sulfatos podem formar partículas na exaustão e elevar o nível de particulados nessa mesma exaustão.

Em 1993, Agência Americana de Proteção Ambiental (EPA) estabeleceu que o diesel americano pudesse conter no máximo 500 ppm de enxofre. Isto correspondeu a uma redução de dez vezes o teor da mencionada substância, contribuindo grandemente para a redução de partículas na exaustão. Em 2006, a EPA estabeleceu uma nova redução do enxofre para 15 ppm. Isto eliminará o enxofre como componente fornecedor de particulados na exaustão e permitirá a introdução de tratamentos catalíticos de gases em motores diesel. Portanto, como visto acima, o enxofre é altamente nocivo para os catalisadores e limita as opções disponíveis para o controle das emissões dos motores no futuro.

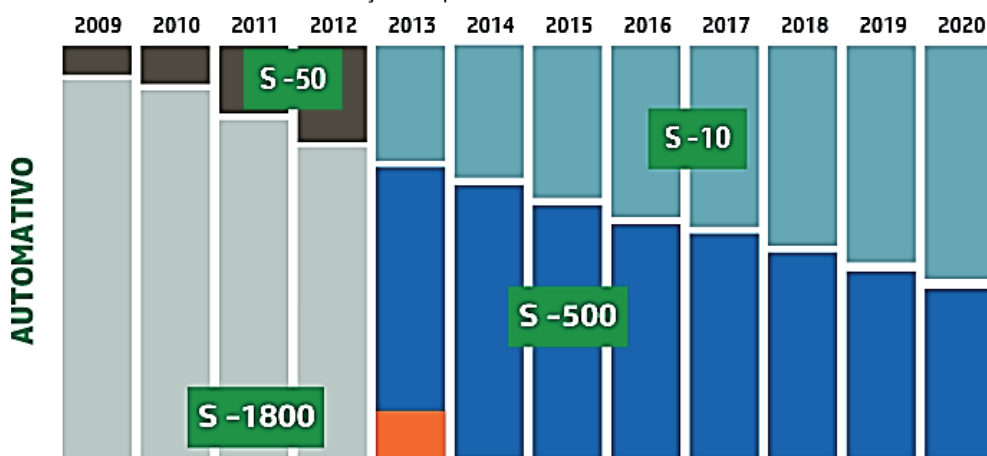
No Brasil, os novos limites de emissão para veículos leves e pesados a serem cumpridos pelas montadoras e que entraram em vigência a partir de 2012, exigem adequação dos combustíveis e, por essa razão, se discute atualmente com a ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis), os refinadores de petróleo e as montadoras de veículos, as especificações necessárias ao atendimento dos requisitos ambientais que incluam, no mínimo, a redução dos teores de enxofre na gasolina para 50 ppm, até o final de 2010, e para 10 ppm no óleo Diesel para 2013, segundo o IEA (2009) publicado pelo Departamento de Energia dos EUA.

O regulamento técnico ANP N° 5/2010, através da Resolução da ANP N° 52 de 29 de dezembro de 2010 classifica o óleo diesel marítimo em dois tipos, de acordo com a viscosidade A (DMA) ou B (DMB). Para o DMA a viscosidade a 40 °C fica na faixa de 1,5 a 6 mm<sup>2</sup>/s e para o DMB, também a 40 °C tem-se como valor máximo aceito 11 mm<sup>2</sup>/s.

As determinações das características dos produtos serão feitas mediante o emprego de Normas Brasileiras (NBR), da Associação Brasileira de Normas Técnicas – (ABNT), ou de normas da Sociedade Americana para Ensaios e Materiais (ASTM – *American Society for Testing and Materials*).

O Diesel S-10 é o diesel com teor de enxofre máximo de 10 mg/kg (ou ppm); o Diesel S-10 tem número de cetano de 48, contra 42 do Diesel S-500/1800 e 46 do Diesel S-50. O número de cetano mede a qualidade de ignição. Além disso, possui uma faixa estreita de variação da massa específica (820 a 850 kg/m<sup>3</sup>), e uma curva de destilação com a temperatura dos 95 % evaporados de no máximo 370 °C. De acordo com a Petrobras (2012), a presença do S10 será sempre crescente como demonstrado no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 – Variação da qualidade do Diesel no Brasil 2009/2020



**OBS: Proporções fictícias, meramente ilustrativo**

Fonte: PETROBRAS (2012)

No entanto, outras fórmulas moleculares são também usadas. Por exemplo, de acordo com Ferguson e Kirkpatrick (2001), pode-se escrever para óleo diesel:  $C_{14,4}H_{24,9}$ . Produzido a partir da refinação do petróleo, o óleo diesel é formulado através da mistura de diversas correntes como querosene, gasóleos, nafta pesada, diesel leve e diesel pesado, provenientes das diversas etapas de processamento do óleo bruto. As proporções destes componentes no óleo diesel são aquelas que permitem enquadrar o produto final dentro das especificações previamente definidas e que são necessárias para permitir um bom desempenho do produto, além de minimizar o desgaste nos motores e componentes e manter a emissão de poluentes gerados na queima do produto, em níveis aceitáveis.

Sua fórmula molecular varia de acordo com o tipo de diesel; no entanto, em se tratando da combustão do combustível líquido, é conveniente exprimir a composição em termos de um único hidrocarboneto, embora ele seja uma mistura de vários hidrocarbonetos. Segundo Van Wylen, Sonntag e Claus Borgnakke (1998), o óleo diesel é usualmente considerado como duodecano  $C_{12}H_{26}$ .

O óleo diesel comum ou comercial, utilizado universalmente, embora atenda aos requisitos básicos em termos de características físicas e químicas, requer cuidados quanto ao manejo e utilização. A água, presente em maior ou menor concentração é o principal contaminante e deve sempre ser removida, por centrifugação ou filtragem especial com decantadores.

Como os componentes das bombas e bicos injetores são construídos com folgas adequadas à lubrificação pelo próprio óleo diesel, a presença de água os danifica imediatamente.

Além de água, todo óleo diesel tem certo teor de enxofre, que não pode ser removido, do qual resultam, após a combustão, compostos nocivos à saúde. Apresentam algumas propriedades do diesel e biodiesel (combustível produzido a partir de óleos de origem vegetal ou animal e álcool).

Os hidrocarbonetos não queimados e os óxidos nítricos (reação do ar com o nitrogênio a pressões e temperaturas elevadas) podem causar problemas nas vias respiratórias superiores. Existe uma preocupação mundial com relação à emissão destes gases tóxicos liberados pelo escapamento dos motores, e vem sendo objeto de padronização e normatização para a proteção ambiental.

## 2.3 BIODIESEL

O Biodiesel, segundo Li, Tian e Xu (2012), requer investigações aprofundadas sobre o seu uso em motores diesel, apesar de se constituir na mais promissora alternativa ao diesel fóssil, apesar das suas desvantagens relativas às propriedades às baixas temperaturas, as quais requerem o uso de aditivos, e majoração nas emissões de NOx.

Há um esforço nacional para o desenvolvimento tecnológico na área de sistemas mecânicos que utilizam o biodiesel. Considerado obsoleto, vilão e poluidor das grandes cidades pelos órgãos ambientais, os motores Diesel têm integrado, nestas duas primeiras décadas do Século XXI, a maioria dos sistemas de mobilidade nos países industrializados do mundo.

O desenvolvimento de tecnologias aplicadas nos MCIs propiciou resultados como aumento de potência específica, vida em serviço, redução de consumo específico de combustível, aplicação de novos materiais, diminuição das emissões de poluentes, melhoria de dirigibilidade e aumento da eficiência de conversão de combustível.

A introdução de biocombustíveis no mercado traz consigo discussões quanto à sua viabilidade técnica e econômica, uma vez que a viabilidade ambiental se torna a sua principal característica.

No contexto mundial, vários países, como Alemanha, Espanha e Turquia, entre outros vêm, nas últimas décadas, disseminando a cultura da utilização de biocombustíveis, de forma concomitante com os outros combustíveis utilizados pelo mercado, como por exemplo: diesel e gasolina. Pesquisas recente desenvolvidas na Índia comprovam a alta viabilidade do uso de biodiesel de origem vegetal, com características e potencial econômico dependente da planta original, como destaca o trabalho de Borugadda e Goud (2012).

Combustíveis fósseis são energéticos exauríveis e o desenvolvimento dos combustíveis renováveis, desde o óleo de amendoim utilizado pioneiramente por Rudolf Diesel em seu motor original, tornam-se mais carentes de investigação científica. No Brasil, a Empresa de Pesquisa Energética – EPE (2014) demonstra em seu relatório anual que,

no ano de 2014, o segmento de transporte em valores absolutos, liderou o crescimento da demanda energética no ano de 2013, agregando 4,1 milhões de tonelada equivalente de petróleo, onde o consumo agregado do setor cresceu à expressiva taxa de 5,2 %.

Segundo Menani (2005), nos anos de 2003 e 2004, percebeu-se um acirramento do efeito estufa, em virtude dos altos níveis de gás carbônico emitidos na queima dos combustíveis fósseis, fato esse que tem provocado mudanças climáticas que afetam toda população.

Tendo como principal objetivo o controle de emissões de gases do efeito estufa, especificamente o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), é um compromisso de nações desenvolvidas à ameaça de mudanças climáticas globais, servindo como forte motivação para a conservação de energia em motores e, a pesquisa de novos combustíveis. Esse processo em evolução culmina atualmente com a procura de motores mais versáteis e eficientes, podendo utilizar diferentes energéticos como, biocombustíveis e gás natural. Alguns autores, como Taylor (1995) e relatórios americanos sobre o desenvolvimento de novos veículos, tais como o “*Review of the Research Program of the Partnership for a New Generation of Vehicles: Seventh Report*” da National Academies Press - NAP (2001) mencionam o binômio eficiência - emissões como norteador de estudos para a obtenção de máquinas otimizadas.

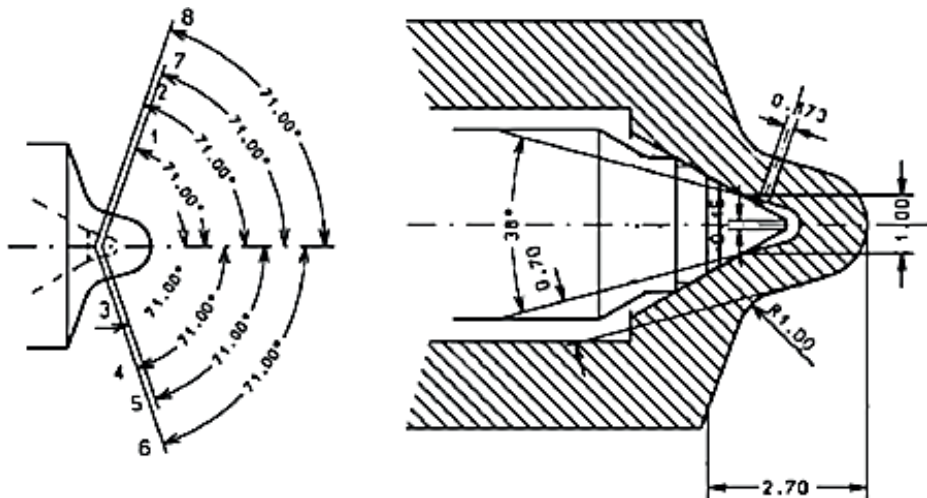
Devido ao grande número de veículos automotivos nos grandes centros urbanos, o consumo de combustíveis fósseis e as contaminações atmosféricas associadas, têm atingidos níveis alarmantes. Para contornar os efeitos do grande volume de combustíveis fósseis utilizados, têm sido introduzidos na matriz energética os biocombustíveis, sendo os principais o etanol e o biodiesel. Estes combustíveis podem ser utilizados em misturas com a gasolina, como também com o diesel mineral.

## 2.4 PROCESSO DE ATOMIZAÇÃO DE UM FLUIDO

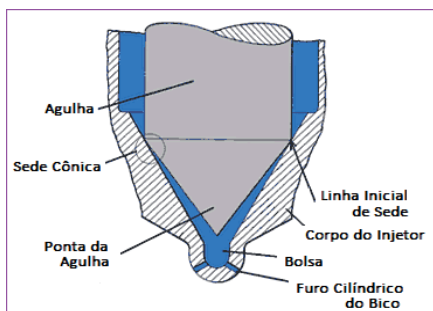
Os processos de injeção e atomização dos combustíveis fósseis convencionais situam-se entre os conhecimentos cientificamente consolidados na área de transferência de massa e de combustão investigados desde o pós Guerra Mundial II e sintetizados por Spalding, 1974. Desde então, estuda-se a emissão de poluentes decorrentes do uso de motores diesel. Nestes, o papel do bico injetor e seus componentes, Figura 2.11(a), 2.11(b), tem merecido crescente atenção e desenvolvimento.

A literatura tribológica tem sido farta em evidências do desgaste de bicos por erosão, cavitação, aderência, adesão e corrosão. A presente Tese se destina a contribuir no desenvolvimento desses e de conteúdos correlatos, considerando o uso de biodiesel e dos fluidos usados nas chamadas HPSC (câmara de atomização de alta pressão - *high pressure spray chamber*), Figura 2.11(c). Um perfil de jato atomizado é esboçado na Figura 2.12.

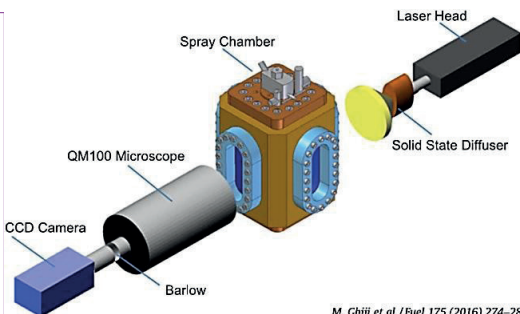
Figura 2.11 – (a) Bico injetor Bosch *Common Rail*, 8 furos cilíndricos para atomização do combustível diesel – esboço da geometria de um bico e dimensões. (b) Bico e agulha de um injetor de combustível diesel. (c) Câmara de atomização de combustível e sistema de aquisição



(a) Fonte: QIU *et al.* (2016)



(b) Fonte: PARRISH JR (1976)

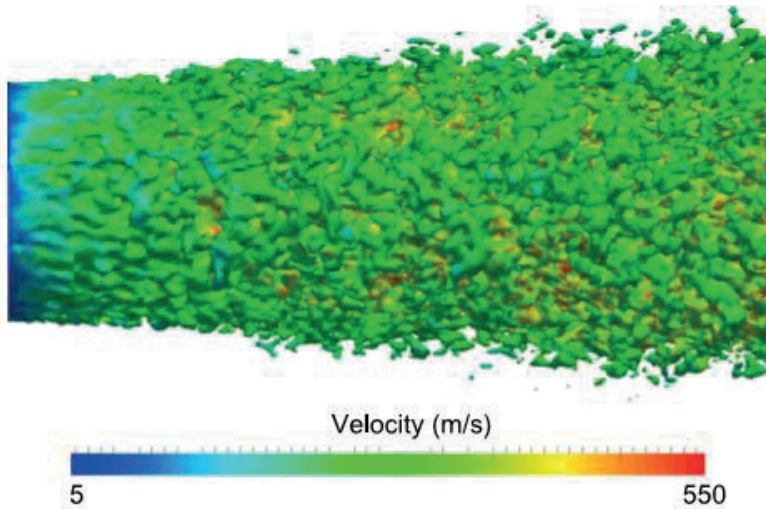


M. Ghiji *et al.* / Fuel 175 (2016) 274–286

(c) Fonte: GHIJI *et al.* (2016)



Figura 2.12 – Atomização (1.200 bar) de combustível diesel e respectiva variação icônica de velocidade de um jato de combustível diesel a jusante do bico



Fonte: GHJJI *et al.* (2016)

São complexos os movimentos assumidos por um fluido combustível ejetado através de um bocal micrométrico pressurizado entre 800 e 2.000 bar, como acontece com um bico injetor diesel do tipo *Common Rail*. Tais movimentos dependem da pressão nominal de atomização e da pressão a jusante do bocal, denominada de contrapressão, a qual é promovida contra cada bocal de injeção que integra um sistema de atomização.

Segundo Qiu *et al.*, 2016, a pressão e a contrapressão associadas ao processo de atomização por um bico injetor induzem três períodos distintos nesse processo: (1°) período sem cavitação, em que há um declínio da contrapressão, o jato cresce sob um coeficiente de descarga constante – constatado numericamente; (2°) período com cavitação local, em que a contrapressão continua caindo, bolhas iniciais surgem na borda superior do furo de entrada do bocal, a vazão em massa aumenta continuamente e o coeficiente de descarga mantém-se constante; e (3°) período com supercavitação, quando a energia cinética da turbulência aumenta a velocidade do líquido, o fluxo interno no bocal assume uma onda de choque, a contrapressão exerce pouca influência sobre a vazão em massa no bocal, mas o coeficiente de descarga diminui, reduz-se a contrapressão, bolhas desenvolvem-se na entrada do furo do bocal, migram para a saída e constituem seções de interfaces de líquido e mistura líquido vapor, mantendo o fluxo de entrada estável. As vazões em massa mantem-se no mesmo valor após o choque, mesmo que a contrapressão continue a diminuir.

Deshmukh e Ravikrishna, em artigo publicado em 2011, afirmam que o desempenho e as emissões de um motor diesel são uma função da atomização do combustível utilizado, a qual depende da viscosidade, massa específica e tensão superficial. Nos combustíveis

renováveis biodiesel, complementam os autores, além de estas propriedades variarem com as diversas oleaginosas, a rota de processamento e as colheitas, eles apresentam maiores dificuldades para a atomização por majorarem as perdas friccionais e abaixarem as taxas de injeção relativamente ao diesel fóssil.

Esses autores apresentam as três equações a seguir. A Equação (2.1) determina RT, a penetração da ponta do jato atomizado.

$$RT = R_0 [\alpha + \sqrt{2 - \sqrt{2} \zeta^{-1/4} \eta^{1/2} (\bar{t} + \tau)^{1/2}}]$$

onde  $\alpha$  e  $\tau$  são constantes adimensionais,  $R_0$  é um parâmetro da modelagem que depende do comprimento do jato até a atomização, função da massa específica do gás. A variável  $\bar{t} = R_0/U_j$  é descrita como sendo um tempo escalonado, onde a velocidade de injeção é

$U_j = C_d \sqrt{2\Delta P/\rho}$  e  $\zeta$ , e  $\eta$  são determinados pela Equação (2.2):

$$\zeta = \frac{\rho_o(\Delta p \gamma_o + \rho_o)}{\Delta p^2 \gamma_o^2}, \quad \eta = 2 + \frac{2\rho_o}{\Delta p \gamma_o} \quad (2.2)$$

$R_0$  é um parâmetro da modelagem que depende do comprimento do jato até a atomização (Equação (2.3)), função da massa específica do gás.

$$\frac{R_0}{D_{bocal}} = 2,5 \left( \frac{\rho}{\rho_o} \right)^{1/2} \quad (2.3)$$

Onde  $D_{bocal}$  é o diâmetro do bocal atomizador.

A Equação (2.1) tem sido usada teoricamente, com bom ajuste experimental, para determinar a penetração da ponta do jato atomizado para massa específica do gás entre 1,1 kg/m³ e 60 kg/m³.

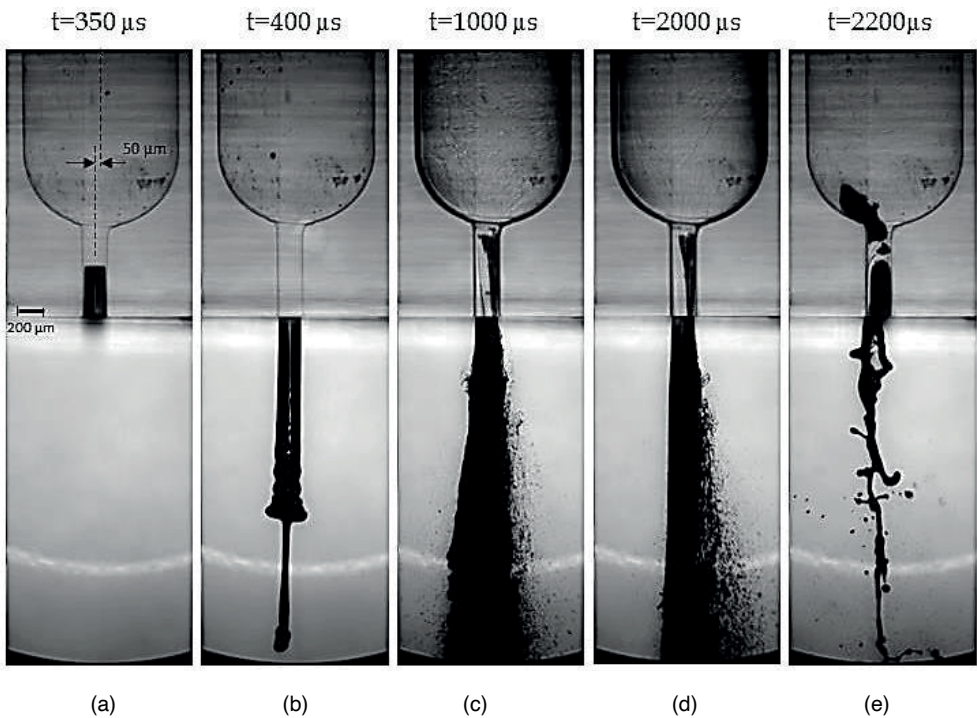
A modelagem de um processo de atomização de um combustível tem avançado muito desde as modelagens iniciais consolidadas por Spalding (1974) e após a utilização do software CFD, que Spalding visualizou e ajudou a iniciar seu processo de concepção, juntamente com seu orientando Patankar, na Universidade de Cambridge, Inglaterra. Apesar disto e para lastrear, ratificar e refinar as modelagens desenvolvidas, Deshmukh e Ravikrishna (2011) asseguram que a literatura tem demandado estudos experimentais sobre *sprays* de cada combustível biodiesel para melhorar a eficiência do motor e mitigar suas emissões.

A cavitação, geralmente associada às desvantagens de gerar ruído, vibração e dano, pode desempenhar um papel benéfico em sistemas de injeção de combustível, ao melhorar a sua atomização ou reduzir o entupimento de bocais, destacam Mauger *et al.* (2014).

Esses autores conceberam um sistema de microcanal (200 a 400  $\mu\text{m}$ , pressurizado)

bidimensional, transparente, fabricado com material polimérico para visualizar as mudanças de fase líquido-vapor e as variações de massa específica associada à turbulência, Figuras 2.13, 2.14 e 2.15. Os mapas de massa específica fornecem informação significativa (mas, menos precisa) e podem ser interpretados como mapas de pressão. A partir dessas imagens, extraem informações sobre o comprimento do jato e sua velocidade média, a partir das informações contidas no trinômio imagem-espaco-tempo.

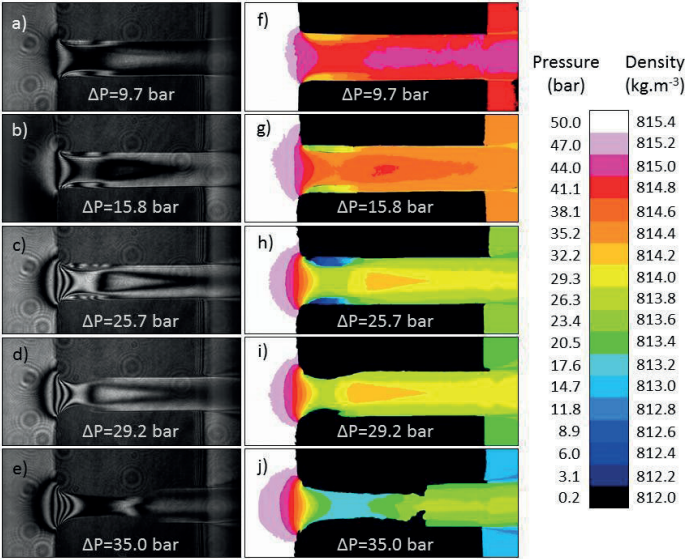
Figura 2.13 – Evolução de um jato atomizado a partir do seu confinamento em uma bolsa e um microcanal fabricados em material polimérico transparente, concebidos para pressurizar um biodiesel aditivado e investigar a evolução do processo de atomização do combustível, mudanças de fase em função das relações espaco-tempo, medição do comprimento e velocidade do jato. (a) levantamento da agulha, aspiração de uma bolha de ar (b) início da injeção de biodiesel (c, d) bolsa de cavitação e formação do spray (e) final da injeção



Fonte Adaptado de MAUGER *et al.* (2014)

Figura 2.14 – Evolução de um jato pressurizando um biodiesel a diferentes pressões para investigar

a evolução do processo de atomização do fluido. À esquerda, imagens interferométricas e, à direita, reconstrução de campos da densidade de massa específica num escoamento por um canal em 2D com redução crescente de pressão  $\Delta P$  de cima para baixo, desprezando as variações de temperatura



Fonte: Adaptado de MAUGER *et al.* (2010)

Figura 2.15 – Evolução de um jato de biodiesel pressurizado evidenciando-se o processo do mecanismo da cavitação: a) escoamento laminar b) turbulência causando instabilidade no escoamento c) início da cavitação no escoamento d) colapso das bolhas criadas pelas ondas de pressão f) formação do vapor de cavitação g) ocorrência do descolamento da bolha



Fonte: MAUGER *et al.* (2010)

## 2.5 GERAÇÃO DE PARTICULADOS SÓLIDOS PM EMITIDOS POR UM MOTOR DIESEL

REIF, 2009, investigou problemas associados com injetores *Common Rail* utilizados por motores diesel para uso náutico, na faixa de potência entre 500 e 1500 kW por cilindro, com vistas à redução de emissões com material particulado através da majoração da pressão de injeção do combustível a 3.000 bar. O autor destaca que dois tópicos são os mais relevantes, a fadiga dos materiais e problemas de vedação.

Em relação à fadiga dos materiais, ela é influenciada principalmente pelo valor médio de estresse, o acabamento de superfície, as tensões residuais na superfície, o tamanho da peça, corrosão e a temperatura. Com o aumento da pressão de injeção de 3.000 bar, ocorre em seguida, um aumento de forças normais sobre as superfícies de vedação pistão-alojamento (corpo da porta injetora), levando-os a deformar-se e perder a capacidade de vedação.

## CAPÍTULO 3

### 3. METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados os métodos experimentais de ensaio e de análise, os materiais, os dispositivos e equipamentos utilizados e/ou desenvolvidos.

#### 3.1 ENSAIOS EM BANCADA DIESEL INJECTOR TEST – TM 507

Para correlacionar atomização e desgaste do injetor e dos alvos, uma bancada foi adquirida comercialmente denominada Diesel Injector Test - TM-507 (da Tecnomotor, São Carlos-SP, Brasil), Figura 3.1. Ela se dedica ao processo de limpeza e calibração de bicos injetores que são utilizados no sistema de injeção diesel do tipo *Common Rail*.

Essa bancada promove, em laboratório, um processo de atomização de um fluido não inflamável, Ultrasene este substitui o combustível, mas executa o ensaio de modo similar ao que se processa durante a injeção em um motor diesel comandado por uma ECM (*Engine Control Module*) em um veículo. Durante o ensaio, um *software* de controle é utilizado e, através de uma interface, aciona o injetor com sinais elétricos, permitindo variações nas variáveis: pressão, tempo de injeção e temperatura.

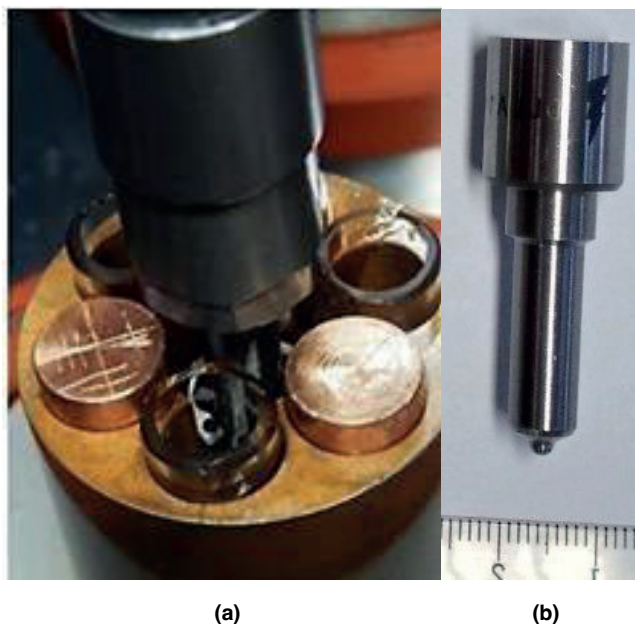
Um dispositivo porta-ponta do bico injetor foi desenvolvido e confeccionado como mostrado na Figura 3.2 e, obviamente montado no **Dispositivo de Ensaio de Bico Injetor Common Rail** com o objetivo de sediar o bico injetor e seis alvos. A simetria, a equidistância e a rigidez para fazerem face à elevada pressão do fluido atomizado foram necessárias e suficientes para assegurar alvos geometricamente bem posicionados do início ao fim dos ensaios de atomização.

Figura 3.1 – Bancada para ensaio *Diesel Injector Test* TM 507 *Common Rail*, na condição como adquirida comercialmente





Figura 3.2 – (a) Vista, em perspectiva, do dispositivo montado com a ponta do injetor *Common Rail* posicionada na zona central, circundado por seis alvos alternados de vidro e de cobre; (b) ponta do bico injetor



Uma contribuição deste trabalho, que lhe assegura o requerido ineditismo e inovação, foi o **desenvolvimento do “Dispositivo de Ensaio de Bico Injetor *Common Rail*” e do procedimento de ensaio**, investigação do jato durante atomização do fluido produzido pelo bico sobre os alvos e, conseqüentemente, os mecanismos de desgaste dos bicos e dos alvos. Mecanismos estes que foram descritos por Hutchings, 1992.

Como pode ser verificado na Figura 3.2(a), o dispositivo desenvolvido assegura equidistância entre os alvos (de vidro e de cobre) e os confina com a ponta do bico injetor.

### 3.2 INSTRUMENTAÇÃO DO EQUIPAMENTO DIESEL INJECTOR TEST – TM 507

Para a realização de ensaios acelerados de desgaste do bico injetor, foram executadas atualizações e mudanças no software de controle original da máquina TM 507, alterando-se principalmente o tempo de ensaio, obtendo o máximo de tempo e minimizando-se as paradas, tornando-o controlado pelo operador, não mais pela máquina.

Esta etapa e as subseqüentes foram desenvolvidas em parceria com trabalhos em andamento do doutorando Jarbas dos Santos Medeiros, mestrando Fábio César Miranda de Oliveira e dos bacharéis em Ciência e Tecnologia da UFRN, Daniel Mousinho Lago, Antônio Adalberto Cavalcante Moreira Filho e Silvio Batista Soares Neto.

Além de alterações virtuais, para aquisição de informações, foram feitas alterações físicas por meio da incorporação de instrumentos, utilizando sensores e módulos para captura de dados, como descritos no Quadro 3.1:

Quadro 3.1 – Componentes da instrumentação da bancada

<b>Aparelho</b>	<b>Marca</b>	<b>Modelo</b>
<b>Sensor de emissão acústica</b>	Physical Acoustics	SH6
<b>Osciloscópio</b>	Instrustar®,	ISDS205B
<b>Sensor de vibração</b>	Brüel & Kjær	4397
<b>Termopar do tipo K</b>	-	-
<b>Decibelímetro</b>	Skill-Tec	Skdec-02
<b>Módulos de aquisição de sinais</b>	National Instruments® LabView®	NI 9205, NI 9211, NI 9234

Adotou-se o método desenvolvido por Medeiros (2002) e, assim, foi acoplado à máquina um decibelímetro, o mais próximo do injetor a ser ensaiado, para coletar a assinatura do NPS (Nível de Pressão Sonora), em dB, referente à evolução do dano no injetor, nos alvos ou em ambos.

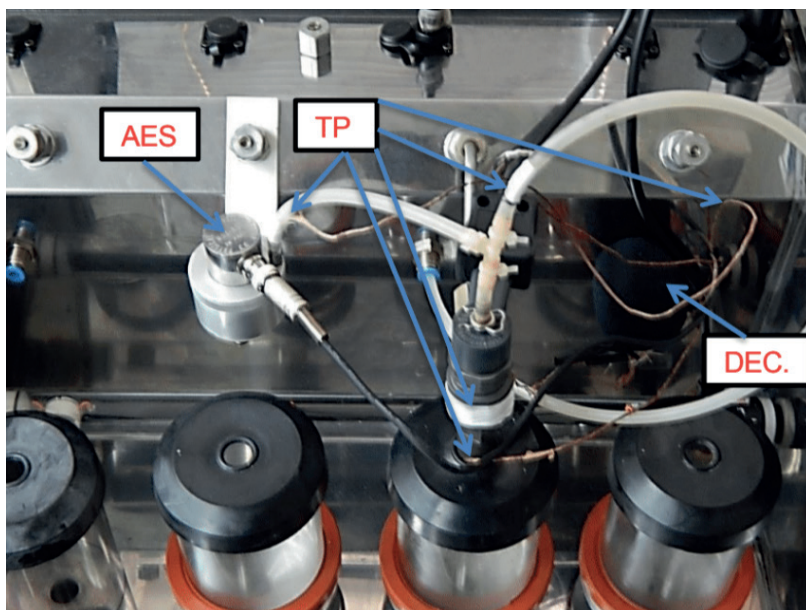
A experiência de cinco décadas do autor desta Tese na área de MCIs contribuiu para a montagem dessa bancada, cuja instrumentação integra outro trabalho. Tais equipamentos constituem a instrumentação da bancada e seus dados estão sendo coletados na Tese do Eng. Jarbas dos Santos Medeiros, daí seus resultados não constarem deste documento.

Um sensor EA (emissão acústica) foi utilizado para monitorar possíveis sinais de frequência na faixa de 100 kHz a 900 kHz, decorrentes de possível colapso e danos no acionamento do injetor, como também da presença de turbulência do escoamento nessa faixa de frequência. Para nível pressão sonora (NPS), um decibelímetro foi instalado em paralelo à linha de retorno de combustível, obtendo sinais de frequências na ordem de até 8 kHz.

Os cinco termopares es foram instalados e posicionados nos pontos mais críticos do ponto de vista tribológico do circuito: Ponteira do bico, corpo do bico, retorno do bico, retorno para o sensor de EA e ambiente. Por último, o acelerômetro foi posicionado na direção de acionamento da agulha do bico injetor, objetivando monitorar e detectar possíveis alterações no movimento de abertura e fechamento. O posicionamento dos sensores é mostrado na Figura 3.3.

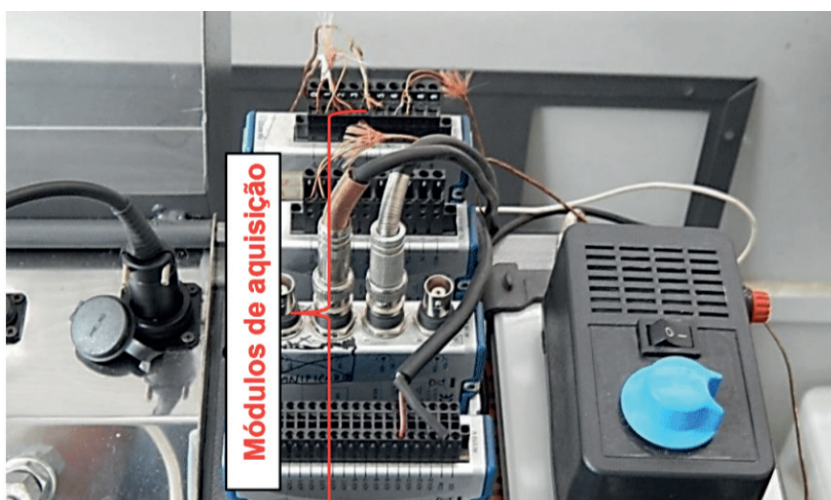


Figura 3.3 – Montagem dos sensores no Dispositivo para Bico Injetor *Common Rail*



Esses dispositivos foram conectados aos seus respectivos módulos, como se pode ver na Figura 3.4. Montagem para coleta de dados do Dispositivo para Bico Injetor *Common Rail*, de aquisição de sinais da National Instruments® associados ao *software* LabView®.

Figura 3.4 – Montagem para coleta de dados do *Dispositivo de Ensaio de Bico Injetor Common Rail*



Para medição de temperatura através dos termopares, utilizou-se o módulo de entrada NI 9211. No caso do acelerômetro, foi usada a entrada analógica 16-bit NI 9205 e para o decibelímetro, o de entrada analógica CA/CC NI 9234.

O sensor de emissão acústica, por sua vez, por trabalhar com uma frequência de amostragem mais elevada, trabalhou conectado ao osciloscópio ISDS205B da Instrustar®, o qual foi programado em C++ para criar uma rotina de aquisição de dados.

### **3.3 ENSAIOS NO DISPOSITIVO DE ENSAIO DE BICO INJETOR *COMMON RAIL***

Para cada ensaio de atomização realizado, foi utilizado um injetor novo fabricado pela Bosch do Brasil, de referência DLLA 148 P1067 do tipo *Common Rail*. No primeiro ensaio foi usado o fluido Ultrasene 4113, que é recomendado pelo fabricante do equipamento para o processo de limpeza e calibração do bico injetor. Nos demais ensaios, utilizaram-se os combustíveis que estão em processo de desenvolvimento pelo grupo de pesquisa coordenado pelo Prof. Dr. Eduardo Lins de Barros Neto, do laboratório do NUPEG II/UFRN, o qual se dedica ao estudo do reaproveitamento da glicerina para aplicação nos motores do ciclo Diesel.

As atomizações produzidas pelo bico injetor *Common Rail* incidiram sobre dois tipos de materiais representativos dos diversos materiais estruturais que integram uma câmara de combustão em um motor ICO, sendo os alvos:

- a) um material dúctil e quimicamente reativo (cobre eletrolítico);
- b) um material frágil e quimicamente inerte (vidro de óxido de silício).

Para estudar os mecanismos de desgaste nesses materiais associados à atomização dos fluidos relacionados abaixo, através do uso de um bico injetor do tipo “*Common Rail*” utilizou-se o Dispositivo de Ensaio de bico Injetor *Common Rail* e, os respectivos fluidos conforme mostrado abaixo:

- 1) **Ultrasene (dispositivo de ensaios);**
- 2) **B6 + Tensoativos;**
- 3) **B6+ Tensoativos + H<sub>2</sub>O;**
- 4) **B6+ Tensoativos + H<sub>2</sub>O + Glicerina;**
- 5) **B7.**

O primeiro ensaio foi realizado durante 150 h não sequencial, o fluido utilizado foi o Ultrasene 4113 não inflamável fabricado pela Ypiranga. Por ser inflamável, reduziu-se o tempo do segundo ensaio, o qual foi realizado durante 20 h descontínuas, em um ensaio exploratório, onde o combustível utilizado foi B6 + tensoativos, esse tempo foi mantido para o terceiro ensaio, 20 h descontínuas, em que o combustível utilizado foi B6 + tensoativos +

H<sub>2</sub>O. Após cada ensaio realizado, o Dispositivo de Ensaio era submetido ao processo de lavagem para eliminar qualquer tipo de impurezas, o fluido utilizado era o B7.

Assegurado o êxito do método e dos dispositivos desenvolvidos, programou-se para o quarto ensaio de 150 h, o mesmo tempo do primeiro ensaio. Neste caso, porém, utilizou-se o combustível B6 + tensoativos + H<sub>2</sub>O + glicerina. Entretanto, ao completar 62 h de funcionamento não sequencial, o bico injetor entrou em colapso e, conseqüentemente, o ensaio foi paralisado. Esses dados acham-se resumidos na Tabela 3.1.

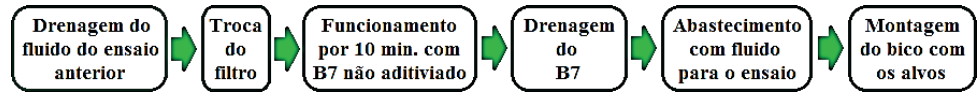
Tabelas 3.1 – Combustíveis ensaiados e parâmetros de ensaios

Fluido	Tempo de ensaio programado	Pressão de injeção	Tempo de injeção	Frequência de injeção
Ultrasene	150 h			
B6 + tensoativos	20 h	800 bar	700 $\mu$ s	18 Hz
B6 + tensoativos + água				
B6 + tensoativos + água + glicerina	150 h (*)			

(\*) O bico injetor colapsou ao tempo de 62 h de funcionamento descontinuo

Para realização dos ensaios no Dispositivo de Ensaio de Bico Injetor *Common Rail*, foram uniformizados os procedimentos de preparação para o funcionamento com cada fluido, eliminando-se desta forma os possíveis riscos de contaminação (mistura) entre os fluidos e eliminação de possíveis partículas que pudessem a vir interferir nos resultados. O procedimento é descrito no fluxograma da Figura 3.5.

Figura 3.5 – Fluxograma contendo a sequência do procedimento para ensaio no Dispositivo de Ensaio de Bico Injetor *Common Rail*



O procedimento adotado para utilização dos componentes (testemunhas – bico injetor e termopar – do processo de atomização e os alvos de vidro e de cobre) fixados no dispositivo obedeceu a uma sequência e a um critério de referência para quatro ensaios realizados no Dispositivo de Ensaio de Bico Injetor *Common Rail*. Tal procedimento pode ser visualizado no fluxograma da Figura 3.6.

Figura 3.6 – Fluxograma com a sequência dos procedimentos para utilização dos alvos no Dispositivo de Ensaio de Bico Injetor *Common Rail*

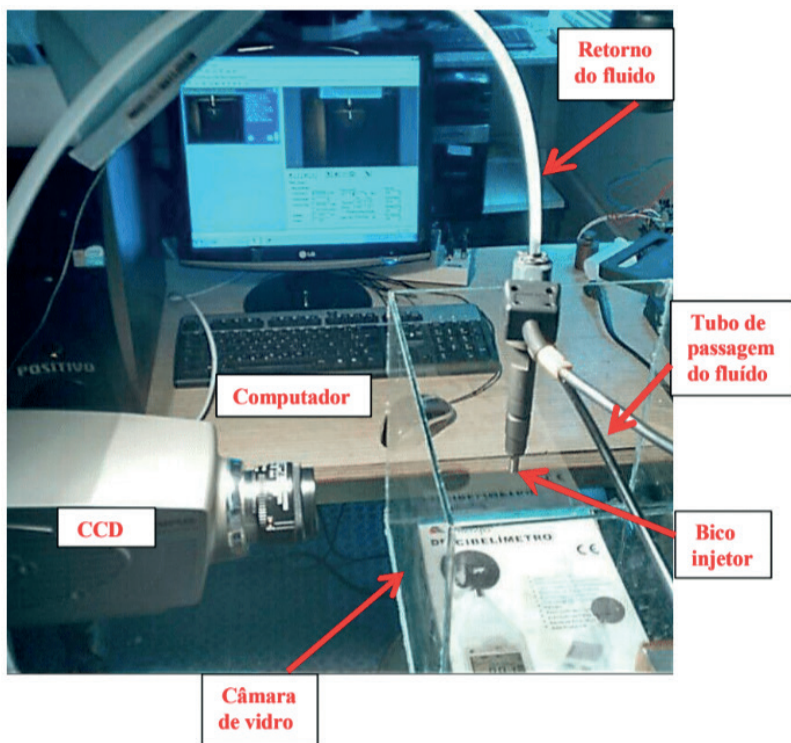


### 3.4 OBTENÇÃO DE IMAGENS DOS JATOS ATOMIZADOS POR CÂMERA CCD

Visando obter respostas dos perfis de atomização dos bicos injetores quando novos e depois de ensaiados (no Dispositivo de Ensaio de Bico Injetor *Common Rail*), foi montado um **Dispositivo de Aquisição de Imagens dos Jatos Atomizados**, Figura 3.7, composto por: Câmera de vídeo CCD i - Speed3; Dispositivo de Ensaio de Bico Injetor *Common Rail*; câmara de vidro e computador.

O Dispositivo de Aquisição de Imagens dos Jatos Atomizados foi conectado ao Dispositivo de Ensaio de Bico Injetor *Common Rail*. Para isso, o bico injetor foi inserido na câmara de vidro, a qual objetivou conter a nuvem de atomização expelida pelo bico e facilitar a visualização dos jatos atomizados. Um tubo de aço, acoplado ao bico, foi usado para a passagem do fluido a ser atomizado.

Figura 3.7 – Aquisição de imagens do jato atomizado pelo bico com uma câmera CCD



A aquisição das imagens do jato atomizado pelo bico foi feita com uma câmera CCD (a uma taxa de aquisição de 10 mil quadros (*frames*) por segundo ( $10^4$  fps), cujo objetivo foi filmar o processo de atomização dos bicos e, a seguir, discretizar as fotografias, obtendo-se o delineamento do jato atomizado em duas pressões: mínima de 350 bar e máxima de 1.400 bar específicas do equipamento. Esses resultados estão mapeados no Apêndice B.

As filmagens foram feitas com o fluido de ensaio Ultrasene 4113 em todos os bicos para não haver variações na dinâmica do jato da injeção, devido à diferença das propriedades físico-químicas dos diferentes combustíveis ensaiados.

### 3.5 EQUIPAMENTOS USADOS NO DISPOSITIVO E NA BANCADA DE ENSAIOS

Os principais equipamentos utilizados durante o desenvolvimento desta tese estão apresentados no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 – Equipamentos utilizados no desenvolvimento desta tese

Equipamentos	Modelo	Marca
<i>Diesel Injector Test</i>	TM 507	Tecnomotor
Rugosímetro portátil	Surtronic 25	Taylor Hobson
Osciloscópio digital dois canais	ISDS205B	Instrustar
Medidor de corrosividade	K25319	Koehler
Módulo de entrada analógica 16-bit	NI 9205	National Instruments
Módulo de entrada de termopares	NI 9211	National Instruments
Módulo de entrada analógica CA/CC	NI 9234	National Instruments
Câmera de alta velocidade	i-Speed 3	Olympus
Sensor de emissão acústica	SH6	Physical Acoustics
Câmera termográfica	TKTI 10	Minipa

### 3.6 COMBUSTÍVEIS E REAGENTES

Os combustíveis e reagentes utilizados nesta tese não foram submetidos a processos de purificação, entretanto, foram tomadas precauções com objetivos de evitar possíveis processos de contaminação. Na Tabela 3.3, listam-se os combustíveis e reagentes utilizados, suas fontes e purezas.

Fluidos/Reagentes	Fonte	Pureza
Ultrasene 4113	Ypiranga	-
Diesel B6	Posto BR	-
Diesel S10	Petrobras BR (Guamaré-RN)	Sem aditivos
Biodiesel de algodão	Petrobras BR (Guamaré-RN)	-
Água Destilada	Comercial	-
Tensoativo R4	Oxitenos S/A Indústria e Comércio	-
Tensoativo R6	Oxitenos S/A Indústria e Comércio	-
Glicerina	Synth	99,5%

### 3.7.1 Formulação dos Combustíveis Microemulsionados

As microemulsões foram preparadas utilizando os seguintes reagentes: diesel mineral S10 (10 ppm de enxofre e 6 % de biodiesel), os tensoativos chamados de R4 e R6 e solução aquosa de glicerina. A formulação foi obtida da seguinte forma: foram adicionados 1,75 % (volume da blenda) de tensoativo R4 + 1,75 % (volume da blenda) de tensoativo R6 + 4,0 mL de água destilada para cada 100 mL do diesel puro. Os sistemas foram mantidos sob agitação mecânica sendo então adicionada a solução aquosa de glicerina até o ponto de turbidez.

## 3.8 COMBUSTÍVEIS ANALISADOS

### 3.8.1 Aquisição do Biodiesel e sua Aditivação

Na execução dos ensaios foram utilizados três tipos de combustíveis, sendo eles, o B6 adquirido através de compra no posto da rede Petrobras na cidade de Natal/RN, diesel S10 e biodiesel (algodão) doado pela RPCC da Petrobras.

A tais combustíveis adicionaram-se: a) aditivos; b) água destilada; c) glicerina, fornecido pelo Núcleo de Pesquisa em Petróleo e Gás II (NUPEG II da Engenharia Química UFRN). No equipamento, Dispositivo de Ensaio de Bico Injetor *Common Rail* utilizou-se o fluido padrão Ultrasene 4113 e, os três combustíveis que foram ensaiados no motor.

As características físico-químicas dos aditivos estão disponíveis na ficha de informações e de segurança de produto químico (FISPQ) de cada, Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Principais propriedades físico-químicas dos aditivos utilizados

Propriedade	Aditivo R4	Aditivo R6
Ponto de Fulgor	Em copo aberto: aproximadamente 245°C.	Em copo aberto: aproximadamente 240°C.
Viscosidade	A 25°C: 200 a 250 mPa.s	A 25°C: 200 a 250 mPa.s
Índice de acidez	1,0 máx. (mg KOH/g)	1,0 máx. (mg KOH/g)
Índice de hidroxila	110 – 122	134 - 149

Segundo informação do fabricante dos produtos ULTRANEX NP 40 e ULTRANEX NP 60 utilizados na composição dos três combustíveis, é uma mistura de natureza química de poliéteres alquil-fenil-glicólicos. Estes foram chamados de aditivo R4 e R6.

### 3.8.2 Caracterizações dos Combustíveis

A norma ASTM D975 (2016) especifica diversos métodos de ensaios para obtenção das propriedades do combustível diesel. A caracterização dos B6 e B6 aditivado foi realizada nos Laboratórios de Combustíveis e Lubrificantes (LCL) do departamento de Química e do



Núcleo de Pesquisa em Petróleo e Gás II (NUPEG II) através de métodos da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT e da *American Society for Testing and Materials* - ASTM, conforme as especificações da Regulamento Técnico N° 2/2006 da Resolução ANP N° 15 (2006), no Laboratório do Grupo de Estudo de Tribologia e Integridade Estrutural (GET), todos eles da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN.

#### *3.8.2.1 Índice de Cetano*

Para obtenção do índice de cetano foi realizado de acordo com a norma ASTM D613 (2016), a partir da densidade e da temperatura de destilação de 10%, 50% e 90% do produto de um volume de amostra de 100 mL.

#### *3.8.2.2 Teor de Enxofre*

Para determinação do teor de enxofre foi adotada a norma ASTM D5453 (2016). Na realização das análises das amostras, foi utilizado o Espectrômetro por Fluorescência de Ultravioleta (FUV), modelo TS 3000 de marca Thermo Scientific.

Para cada análise o equipamento necessita de um volume de 20  $\mu\text{L}$  da amostra. Essa amostra é inserida em um tubo de combustão a alta temperatura, onde o enxofre é oxidado em dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ) numa atmosfera rica em oxigênio.

A água produzida durante processo da combustão das amostras foi removida e os gases resultantes da combustão foram expostos à radiação ultravioleta. O  $\text{SO}_2$  absorveu energia da radiação, foi convertido em dióxido de enxofre excitado ( $\text{SO}_2^*$ ). A radiação emitida pelo  $\text{SO}_2^*$ , ao retornar ao estado fundamental, foi detectada por um fotomultiplicador e o sinal resultante medido como a concentração de enxofre. O tempo total da análise foi de 6 minutos por amostra.

#### *3.8.2.3 Massa Específica a 20 °C*

Para realização desse ensaio, foi utilizado o densímetro digital de bancada Anton Paar D4500M, considerando a aplicação da norma ASTM D4052 (2015). O método avalia através de uma amostra de 2 mL de biodiesel, a alteração que ocorre com a frequência de oscilação provocada pela variação da massa do tubo, esta é comparada com os dados originais de calibração, para determinar a massa específica do biodiesel. Decorrido o tempo de equilíbrio, o equipamento forneceu o resultado a 20 °C.

#### *3.8.2.4 Ponto de Fulgor*

A determinação do ponto de fulgor foi realizada através da aplicação da norma ASTM D93 (2016), onde se utiliza o equipamento automático de vaso fechado Pensky-Martens, marca TANAKA, modelo APM-7, no qual consiste em aquecer uma cuba fechada, feita de latão, localizada dentro do equipamento, com aproximadamente 75 mL da amostra, esta



é agitada a 100 rpm. O calor foi direcionado para a cuba de teste em intervalos regulares (a cada 1 °C), com a interrupção simultânea da agitação, até ser detectado o início da combustão. O resultado foi corrigido para a pressão de 101,3 kPa.

3.8.2.5 Viscosidade Cinemática a 40 °C

A Viscosidade Cinemática expressa à resistência oferecida pelo biodiesel ao escoamento. Seu controle visa garantir um funcionamento adequado do sistema de injeção e permitir uma perfeita atomização do biodiesel e, além de preservar as características de lubricidade do biodiesel. A viscosidade do combustível nos motores de ciclo diesel exerce elevada influência sobre a forma do jato vaporizado. Todos os componentes do sistema de injeção estão intrinsicamente ligados a essa propriedade, pois o próprio óleo é quem faz a lubrificação dos componentes, garantindo a durabilidade da vida em serviço do sistema.

A determinação experimental da viscosidade cinemática é efetuada pela medição do tempo de escoamento de um volume de biodiesel, fluindo sob gravidade, através de um viscosímetro capilar de vidro calibrado, obedecendo aos parâmetros da norma ASTM D445 (2015), a temperatura aplicada é de 40 °C. De acordo com Capana (2008), a faixa de viscosidade do óleo para operação em motores, varia entre 2,0 e 5,0 cSt em temperaturas de trabalho de 80 °C a 95 °C.

3.8.2.6 Método de Ensaio de Corrosividade do Cobre

A norma ASTM D130 (2012) define o método do ensaio de corrosividade ao cobre como a interação entre uma barra de cobre e os produtos de petróleo com que interage físicoquimicamente, resultando em compostos de cobre de diversas cores, as quais são comparadas com um padrão constante dessa norma e associado à intensidade das reações produzidas, como mostra a Figura 3.9. A Norma ASTM D130 (2012) estabelece um método de ensaio padronizado para investigar a corrosividade do cobre por produtos do petróleo.



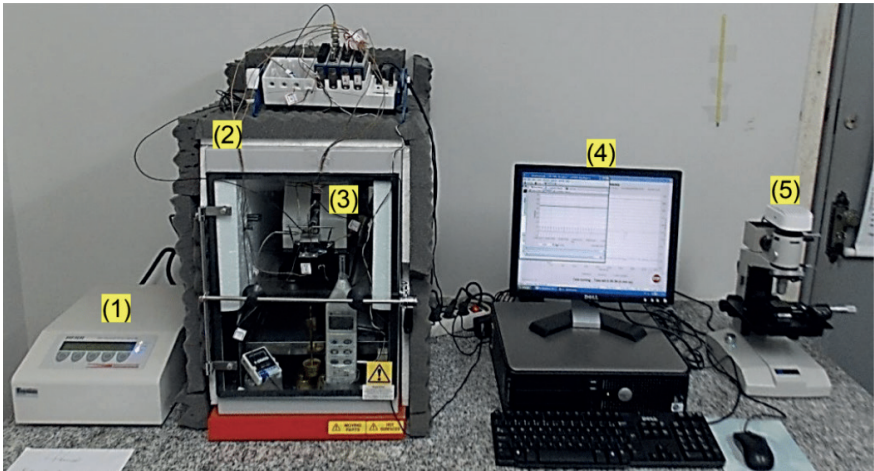
Figura 3.9 – Índices de corrosividade e suas respectivas cores segundo a ASTM D130

O ensaio de corrosividade ao cobre foi realizado no laboratório NUPEG II da UFRN, seguindo as recomendações da norma ASTM D130 (2012). No equipamento Koehler modelo K25319, as lâminas de cobre, específicas para o teste foram previamente lixadas com lixas d'água de várias granulometrias e polidas com carbetto de silício, sendo então imersas em amostras das formulações de combustíveis e mantidas na temperatura de 50 °C por um período de 3 horas. Decorrido o tempo do ensaio, as lâminas eram retiradas, lavadas e comparavam-se suas colorações com o padrão de cores da referida norma.

3.8.2.7 Ensaios de Lubricidade

A lubricidade dos fluidos foi avaliada através de ensaios, em duplicatas, na bancada HFRR (da PCS Instruments), Figura 3.10, disponível no Laboratório de Tribologia e Integridade Estrutural da UFRN. O ensaio HFRR é um ensaio tribológico lubrificado, no qual se executa movimento alternado sob alta frequência de uma esfera sobre um plano (ambos de aço AISI 52100), segundo as condições estabelecidas pela norma ASTM D6079 (2016), as quais estão descritas na Tabela 3.5.

Figura 3.10 – Bancada HFRR para avaliação de lubricidade dos fluidos



Fonte: FARIAS (2015)

Tabela 3.5 – Condições de ensaio em bancada HFRR

Parâmetro	Condição
Materiais	Aço 52100 (esfera e disco)
Carga	2 N
Temperatura	60 °C
Duração	75 minutos
Frequência	50 Hz

A sua configuração, mostrada na Figura 3.10, é composta por: (1) unidade eletrônica; (2) cabine de controle de temperatura e umidade; (3) unidade mecânica; (4) computador com software HFRPC; e (5) microscópio óptico para magnitude de 100 vezes. Os componentes (2) e (3) foram conectados à unidade eletrônica, e os componentes (1) e (5) estão interligados ao computador pelas suas interfaces.

## CAPÍTULO 4

Neste capítulo são apresentados os resultados relacionados às texturas das superfícies desgastadas dos alvos submetidos ao processo de atomização e a identificação dos mecanismos de desgaste. Para alcançar este objetivo foi necessária a concepção e a construção do Dispositivo de Ensaio de Bico Injetor *Common Rail*. Análises por MEV dos bicos injetores *Common Rail* também foram realizadas antes e após os ensaios nesse dispositivo.

### 4.1 DESGASTE E IDENTIFICAÇÃO DOS SEUS MECANISMOS NOS ALVOS DE VIDRO E COBRE SUBMETIDOS À ATOMIZAÇÃO POR INJETORES *COMMON RAIL*

Vidros possuem texturas de superfície que podem ser tão lisas quanto se queiram. O processo de atomização de um fluido monofásico, ao colidir com uma superfície quimicamente inerte, como um tubo cilíndrico de vidro de óxido de silício, é intrinsecamente complexo e nada trivial. Se esse fluido for multifásico, como aquele que compõe um combustível biodiesel aditivado e se for atomizado para colidir com uma superfície quimicamente ativa, como uma parede cilíndrica maciça de cobre, essa complexidade se intensifica.

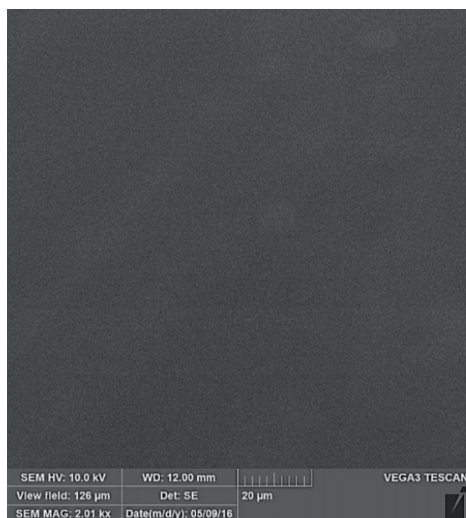
Os alvos frágeis de vidro e os dúcteis de cobre, instalados no Dispositivo de Ensaio de Bico Injetor *Common Rail*, foram submetidos a jatos atomizados dos fluidos: Ultrasene 4113, B6 + Tensoativos, B6 + Tensoativos + Água e B6 + Tensoativos + Água + Glicerina.

Nos tópicos seguintes são apresentadas imagens (obtidas através de MEV – SE – e de fotografias) das texturas das superfícies dos alvos vidro e de cobre evidenciando-se a intensidade e os principais mecanismos de desgaste provocados pela interação com os fluidos supracitados.

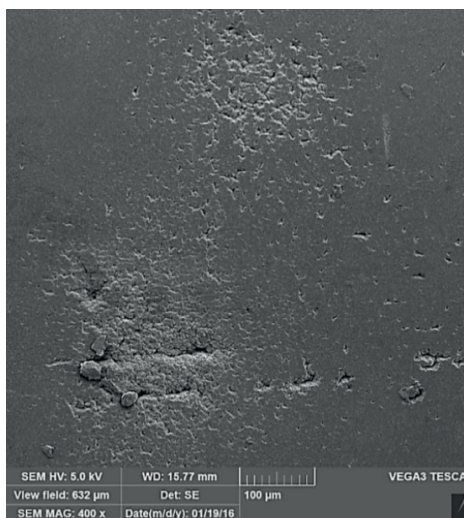
#### 4.1.1 Imagens das Texturas das Superfícies dos Alvos de Vidro e Cobre Submetidos ao Fluido Ultrasene 4113

A Figura 4.1 apresenta as imagens, obtidas por MEV (SE), das superfícies dos alvos de vidro, onde se verificam as diferenças entre as superfícies do alvo (a) nova e (b) desgastada após 150 h de atomização do fluido Ultrasene 4113 pelo injetor *Common Rail*.

(a) superfície nova – 2000 x

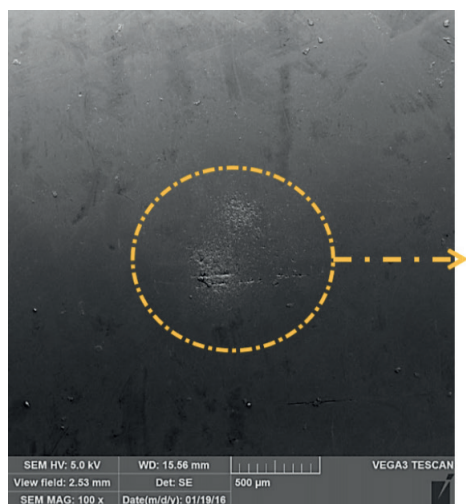


(b) superfície atomizada – 400 x

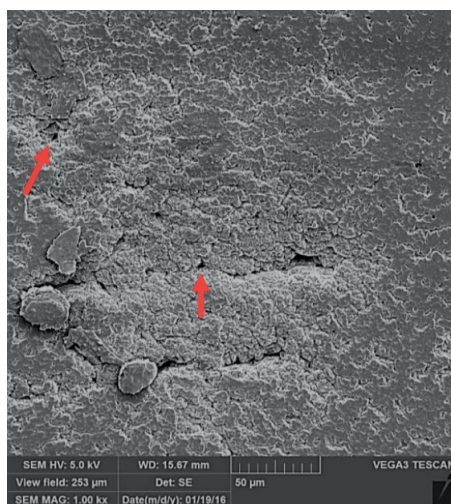


Na Figura 4.2 são exibidas imagens, MEV (SE), da superfície desgastada do alvo de vidro após 150 h de jateamento com fluido Ultrasene 4113, onde são verificadas ocorrências de micropites (cavitação) dentro da escara de desgaste erosivo, estão indicados pelas setas de cor vermelha.

Figura 4.2 – Imagens, MEV (SE), da superfície desgastada do alvo de **vidro** após 150 h de atomização do fluido Ultrasene 4113



(a) 100 x



(b) 1000 x

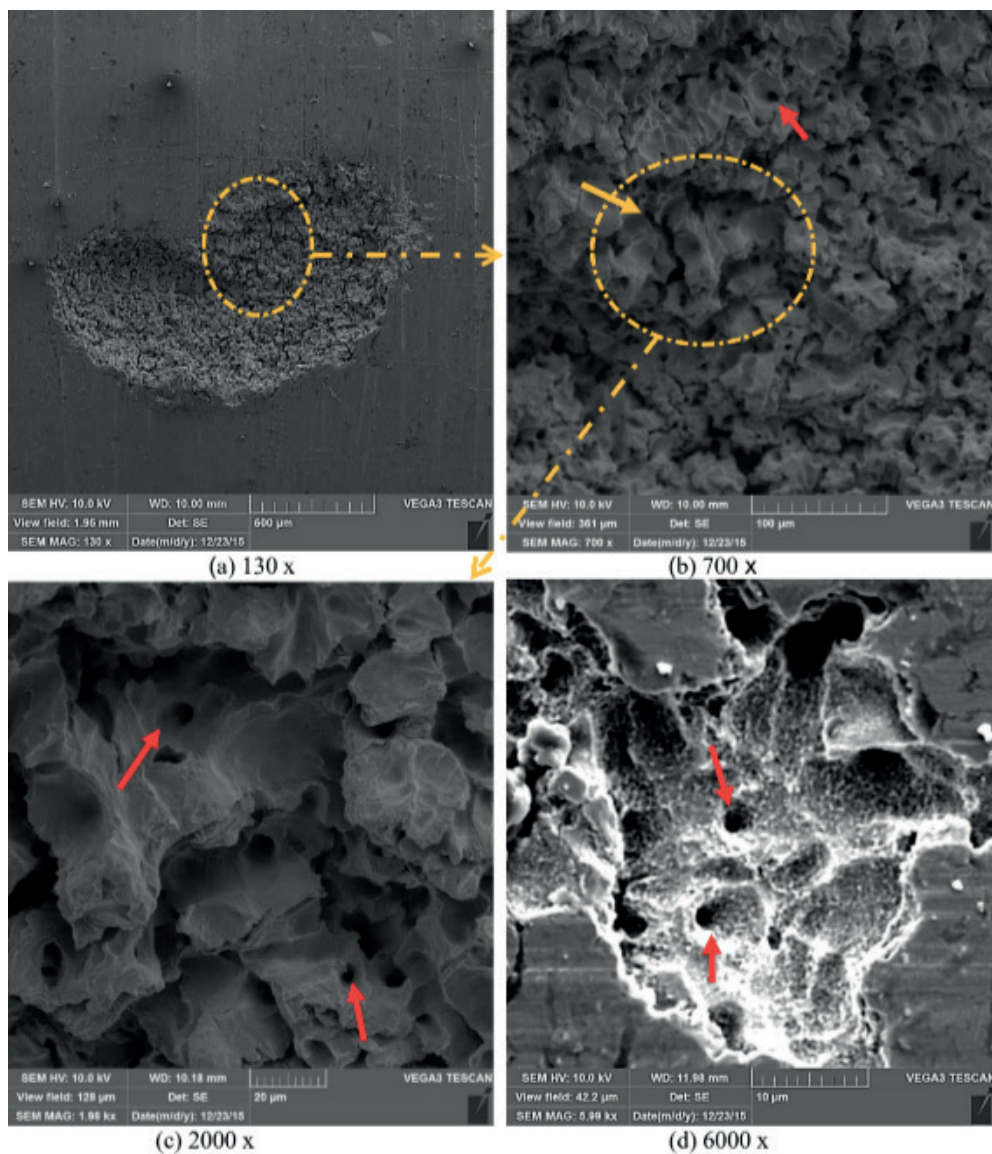
Enquanto o vidro é inerte quimicamente ao contato com subprodutos do petróleo, o cobre reage fisicoquimicamente quando submetido a jatos atomizados destes fluidos. A Figura 4.3 apresenta imagens, obtidas por MEV (SE), dos alvos de cobre após 150 h de jateamento com fluido Ultrasene 4113 pelo injetor *Common Rail*.

As setas de cor vermelha apontam para evidências de micropites (Figura 4.3b-d), cujos diâmetros medem entre 2 e 4  $\mu\text{m}$  (régua de 20  $\mu\text{m}$ , Figura 4.3c). Já a seta de cor amarela indica deformação plástica e fratura frágil na superfície erodida e cavitada do alvo de cobre (Figura 4.3b).

Pode-se verificar na superfície do alvo de cobre (Figura 4.3(d)), a presença de micropites (sinalizadas por setas vermelhas) dentro das escaras de desgaste erosivo, como também a presença de desgaste corrosivo, cuja textura desta superfície difere das demais (Figura 4.3(a-c)).



Figura 4.3 – Imagens, MEV (SE), das escaras impressas nos alvos de  **cobre**  após 150 h de atomização do fluido Ultrasene 4113



A partir da análise das superfícies da Figura 4.3, pode-se constatar a reatividade entre o cobre e o fluido Ultrasene 4113. Tal reatividade contribuiu, principalmente, na intensificação do desgaste com formação de escaras e micropites, pelos respectivos mecanismos de desgaste erosivo e cavitativo, além do desgaste corrosivo (Figura 4.3(d)).



### 4.1.2 Imagens das Texturas das Superfícies dos Alvos de Vidro e Cobre Submetido ao Combustível B6 + Tensoativos

Ao analisar a superfície do alvo de vidro submetida à atomização do combustível B6 + Tensoativos, identifica-se a predominância do desgaste adesivo, cujas camadas de material depositado estão indicadas nas imagens, obtidas por MEV (SE), da Figura 4.4. A Tabela 4.1 mostra os percentuais, em peso, dos pontos P1, P2 e P3 (indicados na Figura 4.4(c)) e P4, P5 e P6 (vistos na Figura 4.4(d)) que foram obtidos por microanálise química EDS.

Figura 4.4 – Imagens, MEV (SE), da textura da superfície do alvo de **vidro** pelo jato atomizado combustível do B6 + Tensoativos

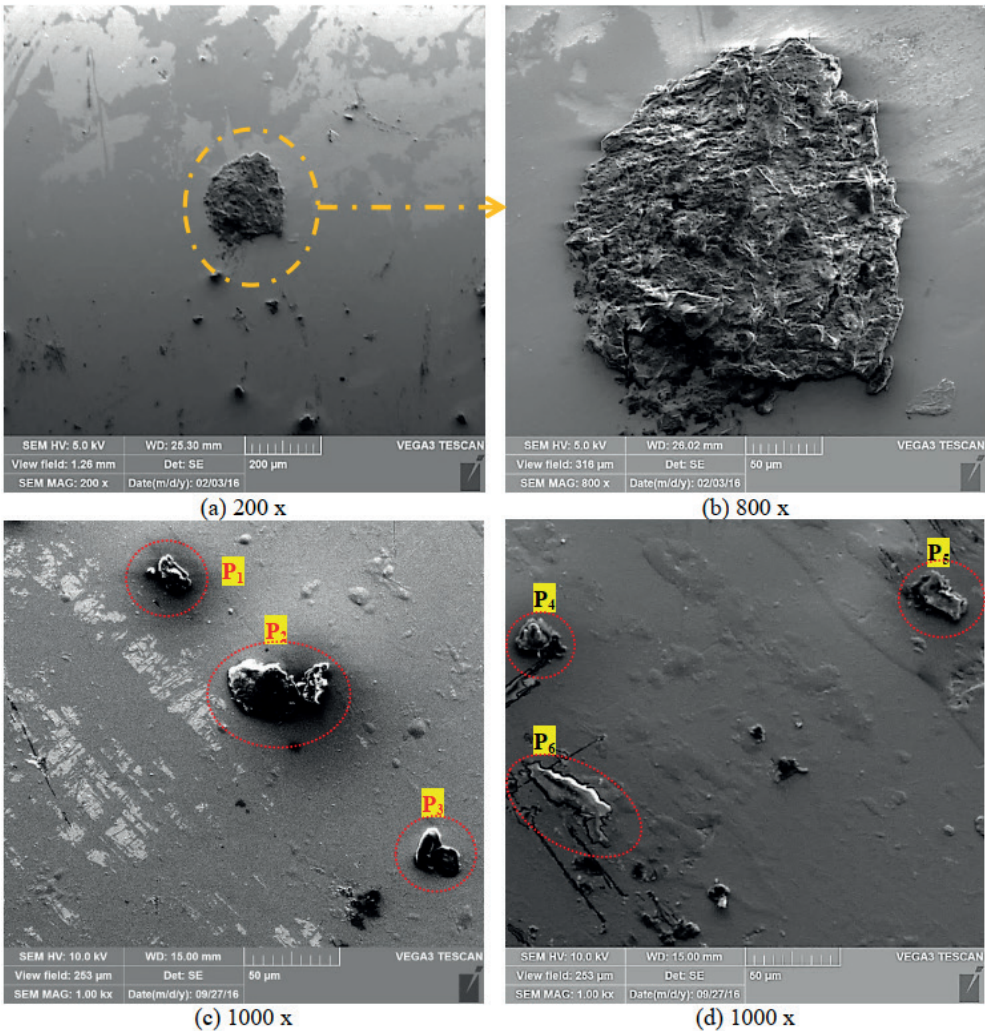


Tabela 4.1 – Percentual (em peso) dos elementos químicos do material aderido à superfície do alvo de vidro e identificado pelos pontos nas Figuras 4.4c e 4.4d

Peso (%)		Elementos químicos					Peso (%)		Elementos químicos					
Pontos		C	O	Al	Si	Cl	Pontos		C	O	Al	Si	S	Cl
P1		9,89	50,78	1,56	37,50	0,26	P4		ND*	62,43	1,29	35,59	ND*	0,69
P2		61,09	36,11	0,85	0,33	1,63	P5		71,69	25,28	ND*	0,56	0,65	1,80
P3		14,75	48,97	1,17	34,77	0,34	P6		19,49	49,20	0,97	30,15	ND*	0,19

\*ND = Não detectado

A Figura 4.5 apresenta a superfície desgastada do alvo de cobre após 20 h de atomização do combustível B6 + tensoativos.

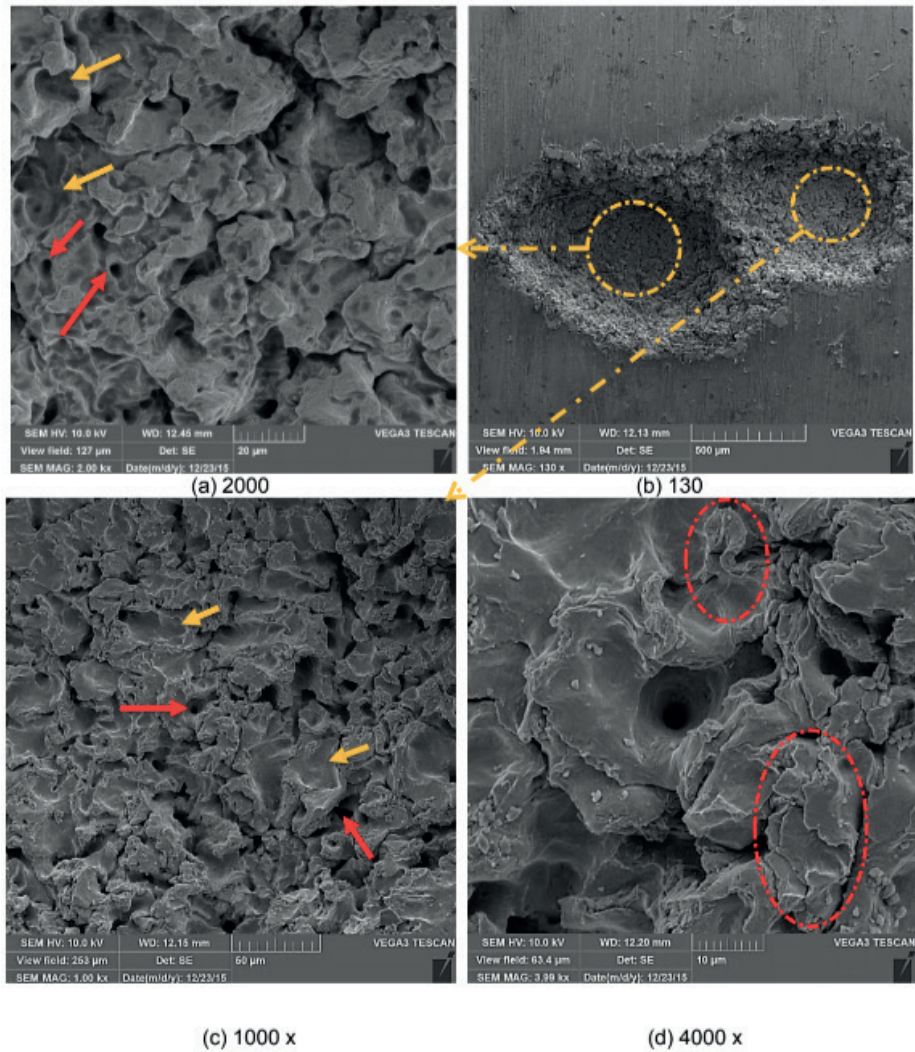


Figura 4.5 – Imagens, MEV (SE), da escara impressa no alvo **cobre** pelo jato atomizado do combustível B6 + Tensoativos

Observa-se na textura das imagens apresentadas na Figura 4.5 que a reatividade do cobre com este combustível, por apenas 20 h, foi maior que com o fluido Ultrasene (tempo de atomização foi de 150 h). Sendo assim, o combustível B6 + Tensoativos gerou, consequentemente, um desgaste mais severo (com diâmetro e profundidade maiores de escara) na região atomizada, conforme pode ser visto na Figura 4.5(b). Além disto, sobressaíram os micropites (apontados por setas vermelhas) e as escaras de desgaste erosivo (setas amarelas), Figura 4.5(a-c), e deformações plásticas identificadas na Figura 4.5(d), as quais estão sinalizadas por elipses em vermelho.

#### 4.1.3 Imagens das Texturas das Superfícies dos Alvos de Vidro e Cobre Submetidos ao Combustível B6 + Tensoativos + Água

As Figuras 4.6 e 4.7 mostram fotos das superfícies cilíndricas do alvo de vidro detalhando suas geratrizes (G1, G2, G3 e G4) após ser submetido ao processo de atomização (a 800 bar) do combustível B6 + tensoativos + água, por um bico injetor *Common Rail* durante 20 h cumulativas e descontínuas.

Figura 4.6 – Fotos das geratrizes do alvo de **vidro** após atomização do combustível B6 + Tensoativos + Água

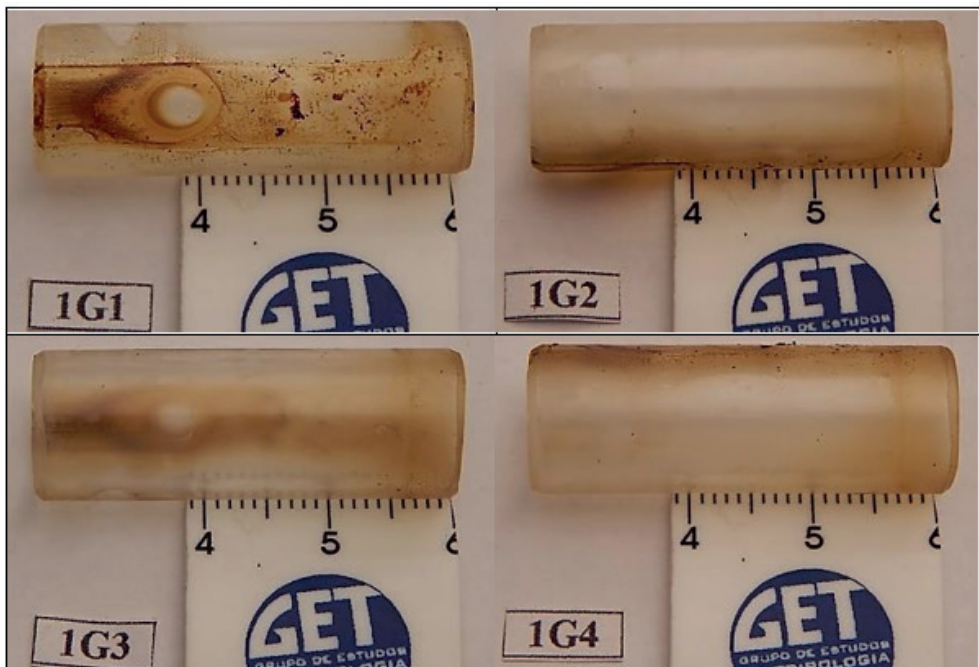
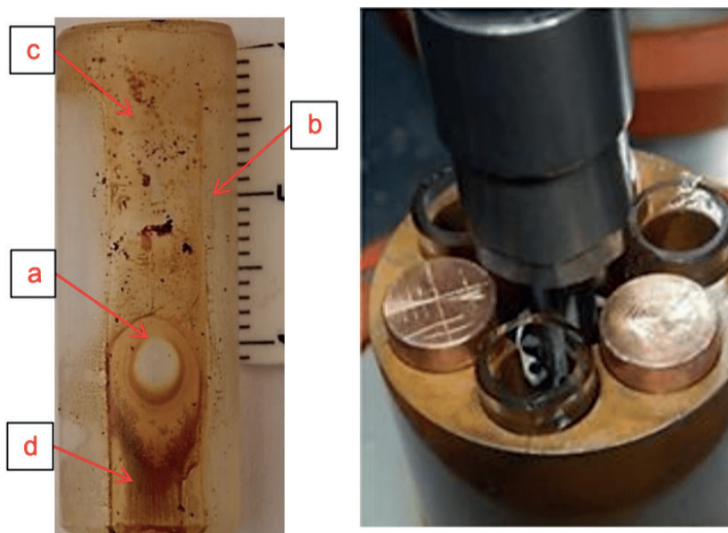




Figura 4.7 – À esquerda, identificação das zonas da geratriz (G1) do alvo de **vidro** (visto na Figura 4.6) e, à direita, foto do dispositivo porta-bico injetor

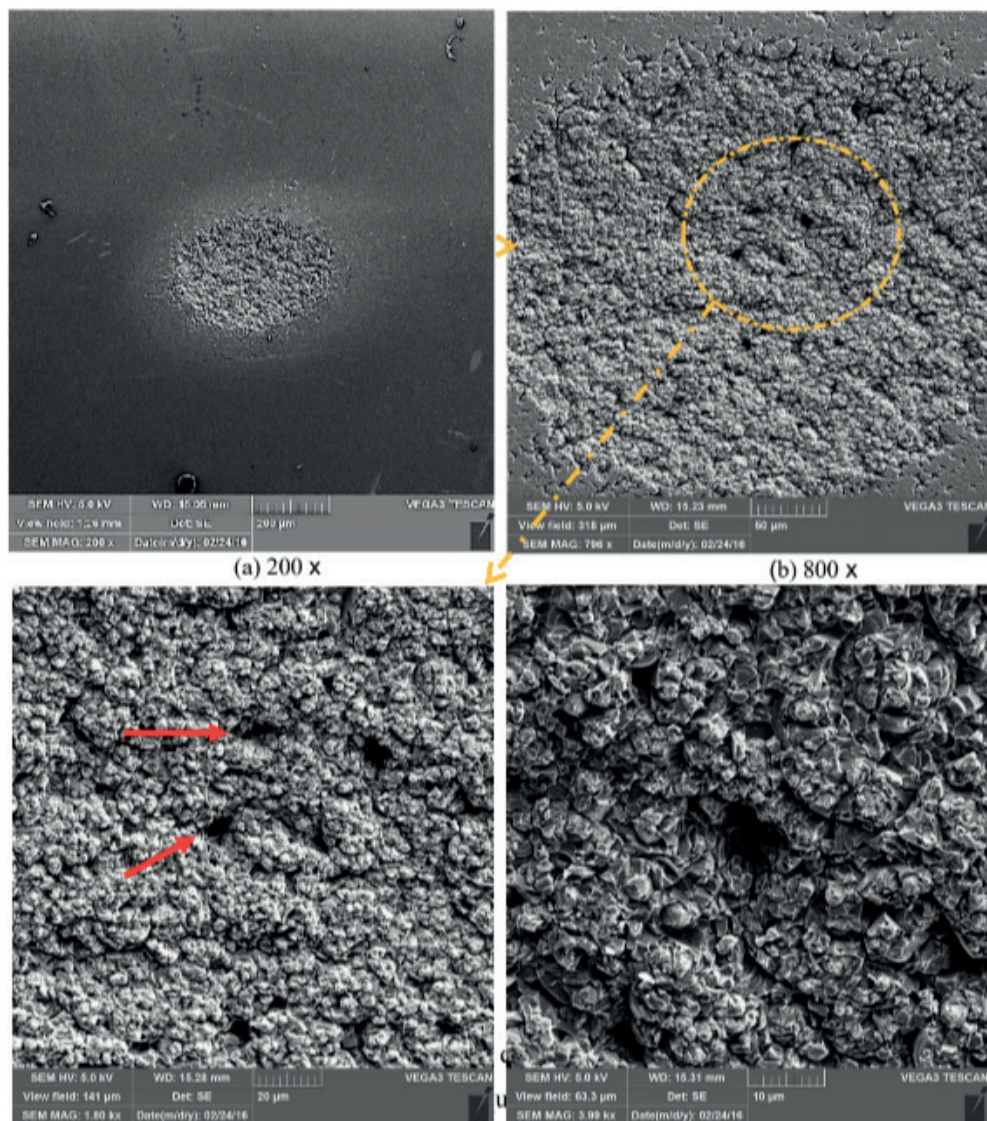


A partir da inspeção da superfície do alvo na geratriz 1 (Figura 4.6 - 1G1), depreende-se que há distintas zonas, indicadas na Figura 4.7, as quais são: (a) um “olho de peixe”, produzido pelo fluxo fluídico com presença de vórtices e do sinergismo erosão-cavitação devido ao processo de atomização do B6 + tensoativos + água por 20 h; (b) linhas de fluxo do fluido que são o *footprint* dos vórtices; (c) evidências do desgaste adesivo remanescente de parte do fluido que polimerizou e aderiu à superfície polida do vidro; (d) vestígio de produtos cuprosos. Tais produtos difundidos na superfície do vidro (Figura 4.7, à esquerda) foram ativados pela pressão, temperatura e concentração do fluido e pela proximidade com os alvos de cobre (Figura 4.7, à direita).

Na Figura 4.8, obtidas por MEV (SE), é possível observar a escara impressa na superfície do alvo de vidro após 20 h de jateamento do combustível B6 + Tensoativos + Água. As setas em vermelho indicam micropites (cavitação).

As texturas das superfícies cilíndricas do alvo de cobre e o detalhamento das suas geratrizes (G1, G2, G3 e G4) estão presentes nas fotografias das Figuras 4.9 a 4.12. Nestas geratrizes é possível analisar a influência do processo de atomização (a 800 bar) do combustível B6 + tensoativos + água, por um bico injetor *Common Rail*, durante 20 h cumulativas e descontínuas sobre a superfície do alvo de cobre.

Figura 4.8 – Imagens, MEV (SE), da escara impressa no alvo de **vidro** após atomização do combustível B6 + Tensoativos + Água



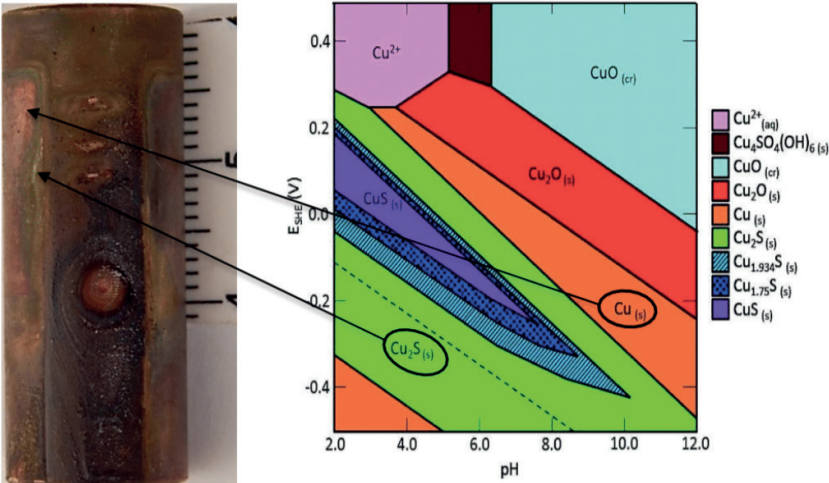
Na Figura 4.10 é visualizado, à esquerda, o desgaste corrosivo através de evidências da formação de produtos cuprosos ( $\text{Cu}_x\text{S}_y$ ), os quais foram desenvolvidos no meio em função de diferentes condições de sulfetização, pH e potencial redox. À direita é apresentado o diagrama do sistema Cu-O-S (diagrama de Pourbaix) que foi usado para correlacionar estes produtos formados a partir das reações químicas produzidas nas superfícies do alvo de cobre, conforme seu padrão de cor característica e indicação pelas setas. Tais produtos caracterizam- se, nos casos de nanopartículas de cobre interagentes com o enxofre e o oxigênio, por estruturas amorfas e cristalinas que se desenvolvem durante o processo de

sulfetização associado a diferentes mecanismos, como dissolução e precipitação, conforme Figura 2.6.

Figura 4.9 – Fotos das superfícies das geratrizes (G1, G2, G3 e G4) do alvo de **cobre** submetido à atomização do combustível B6 + Tensoativos + Água



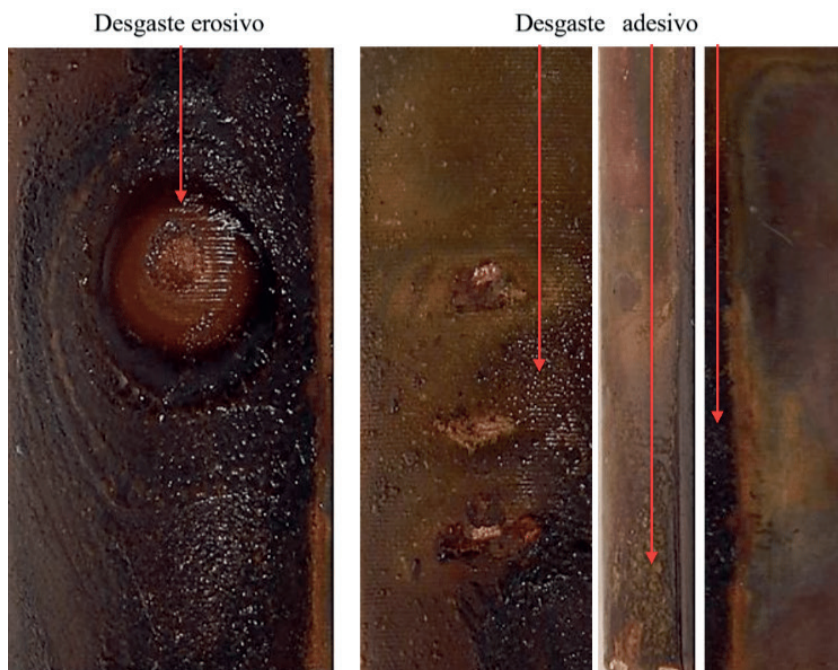
Figura 4.10 – À esquerda, geratriz 1 do alvo de **cobre** (Figura 4.6 – G1) evidenciando o *desgaste corrosivo*, e, à direita, diagrama de Pourbaix com indicação de  $\text{Cu}_x\text{S}_y$





A Figura 4.11 apresenta o detalhamento da superfície do alvo de cobre, através de fotos com ampliações em quatro regiões distintas, obtidas a partir da Figura 4.10 (à esquerda). Ao se observar a região supracitada, percebem-se as linhas de fluxo, a escara do desgaste erosivo por jato atomizado de fluido incidente, os vórtices e evidências do desgaste adesivo, onde todos eles localizam-se na geratriz 1 (à jusante ao fluido incidente).

Figura 4.11 – Detalhes da geratriz 1 na superfície do alvo de **cobre** (Figura 4.10) objetivando visualizar as linhas de fluxo, o desgaste adesivo e a escara de desgaste erosivo



As fotos exibidas na Figura 4.12 tratam-se das superfícies, (a) à montante e (b) à jusante, de um segundo alvo de cobre, submetido aos mesmos parâmetros de ensaios experimentados pelo alvo da Figura 4.9. Nestas superfícies denota-se a presença dos mesmos fenômenos ocorridos na superfície do primeiro alvo; todavia, o segundo alvo apresentou, também, o desgaste corrosivo (superfície do alvo à montante), este corroborado por diversas cores das superfícies dos compostos do sistema Cu-O-S no diagrama de Pourbaix (Figura 2.5). Portanto, pode-se constatar a reatividade entre o cobre e os integrantes do B6, isto é, o oxigênio e o enxofre, e entre o cobre e o fluido Ultrasene 4113, cuja reação destes últimos também resultou no mecanismo de desgaste corrosivo. Portanto, o *desgaste corrosivo* é inerentemente comprovado pelas cores impressas nas superfícies à montante e à jusante do jato incidente atomizado, associadas aos produtos químicos gerados pelo sistema cobre, oxigênio e enxofre.

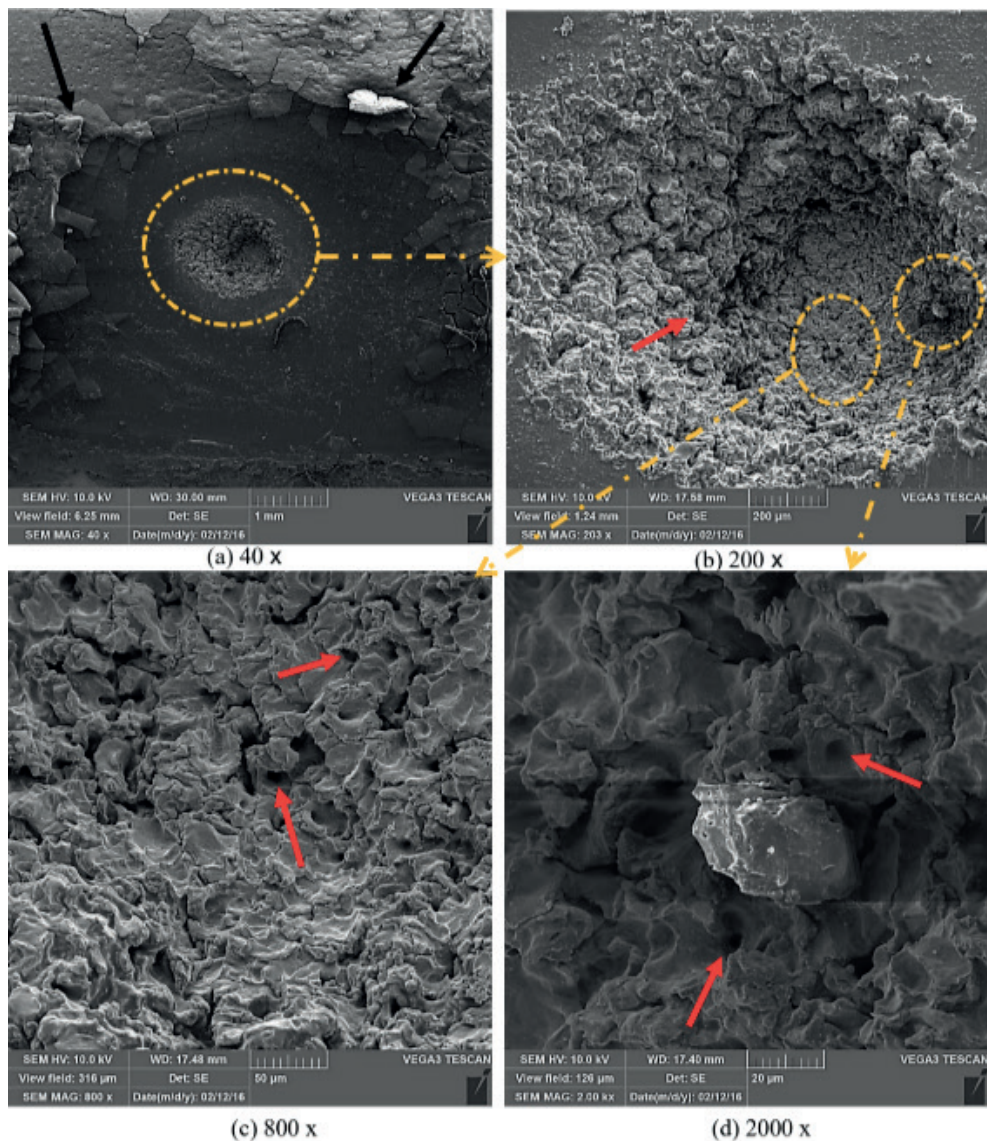


Figura 4.12 – Fotos das superfícies (à montante e à jusante) do alvo de **cobre** após atomização do combustível B6 + Tensoativos + Água (800 bar) com evidências de linhas de fluxo do fluido, escara do desgaste erosivo, vórtices e de desgaste adesivo e corrosivo



As imagens, obtidas por MEV (SE), da textura da superfície do alvo de cobre, após 20 h de jateamento do combustível B6 + Tensoativos + Água, são mostradas na Figura 4.13. As setas de cor vermelha apontam para os micropites formados pelo mecanismo de desgaste cavitativo. Analisando-se as imagens da Figura 4.13(a), compreende-se que a “borra” resultante do *desgaste adesivo*, sinalizada por setas de cor preta, circundante à escara de desgaste erosivo, tem sua morfologia associada à hidrodinâmica do fluido colidindo com as paredes que o confinam, sendo fruto dos fenômenos de transporte e respectivos desdobramentos cumulativos desenvolvidos a partir do jato incidente de combustível.

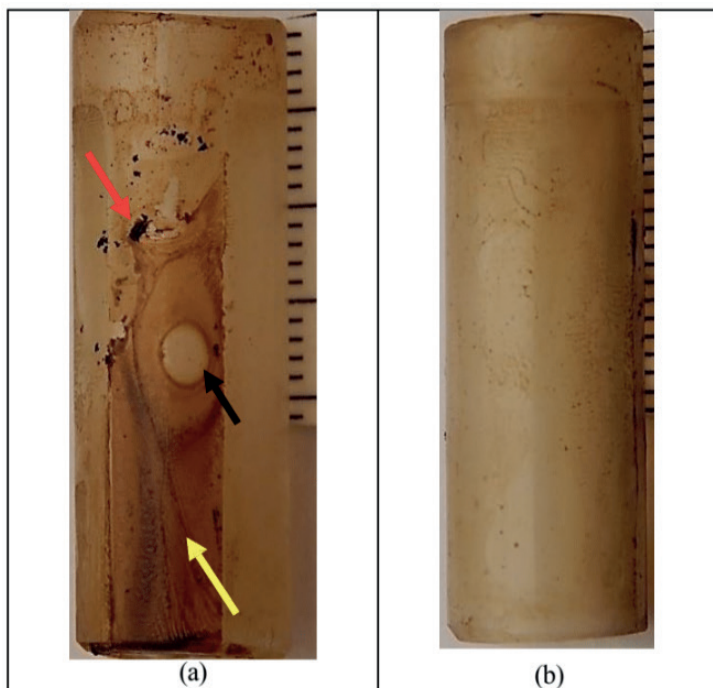
Figura 4.13 – Imagens, MEV (SE), da escara impressa no alvo de **cobre** pelo jato atomizado do combustível B6 + Tensoativos + Água



#### 4.1.1 Imagens das Texturas das Superfícies dos Alvos de Vidro e Cobre Submetidos ao Combustível B6 + Tensoativos + Água + Glicerina

As Figuras 4.14, 4.15 e 4.16 referem-se, respectivamente, às imagens das superfícies cilíndricas dos alvos de vidro e cobre após atomização do combustível B6 + tensoativos + água + glicerina utilizando bico injetor *Common Rail* e pressão do jato incidente a 800 bar durante 62 horas cumulativas e descontínuas.

Figura 4.14 – Fotos da superfície cilíndrica de um alvo de **vidro** (a) à montante e (b) à jusante após atomização do combustível B6 + Tensoativos + Água + Glicerina

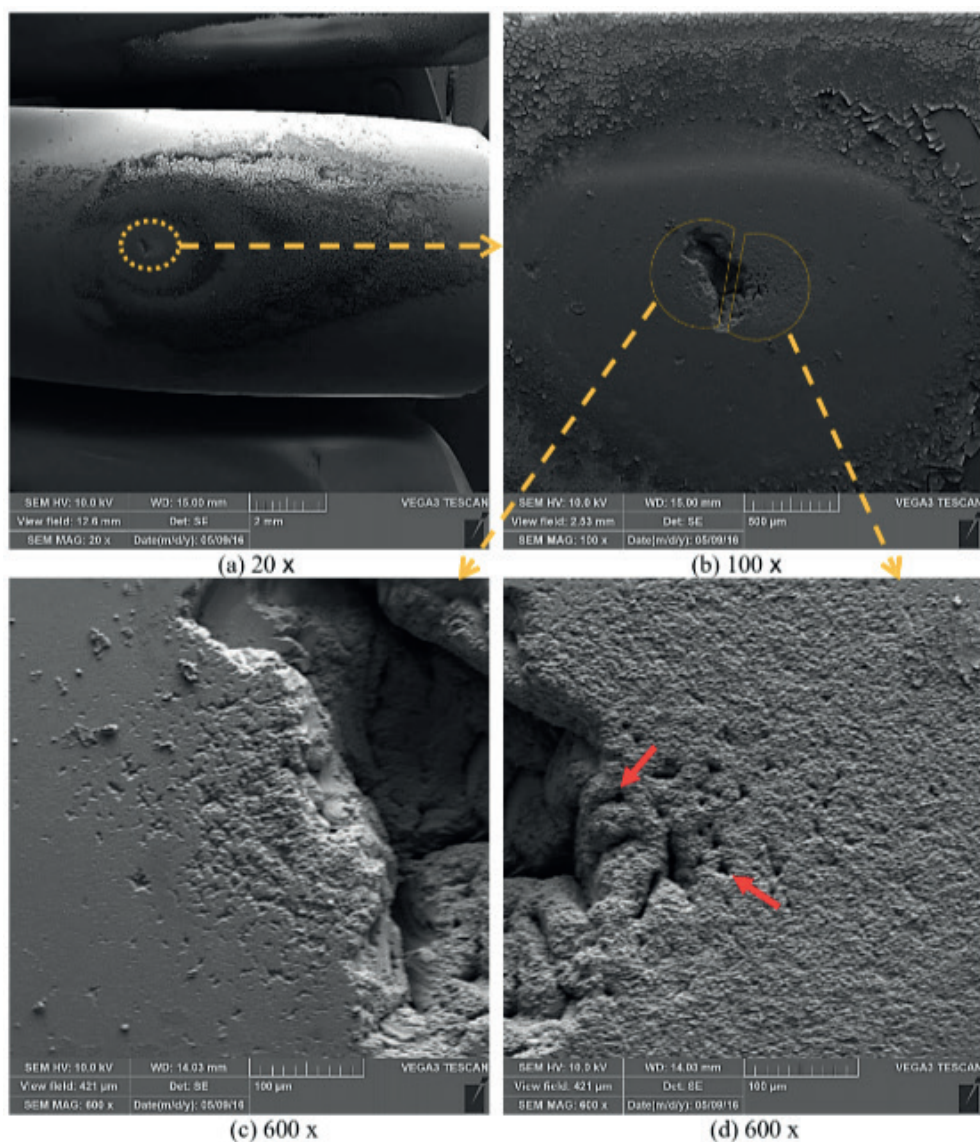


Nas fotos exibidas na Figura 4.14 observa-se um alvo de vidro, (a) à montante e (b) à jusante, após atomização do combustível B6 + tensoativos + água + glicerina. Verifica-se, mais uma vez, a presença do “olho de peixe” que circunda a escara decorrente do processo erosivo-cavitativo (apontada pela seta preta), linhas de fluxo (seta amarela) impressas pelos vórtices e, a presença do desgaste adesivo resultante da polimerização do material aderido ao alvo de vidro.

Ao analisar as imagens obtidas por MEV (SE) da superfície do alvo de vidro, percebe-se que o vidro mostrou-se quimicamente inerte e não reagiu com os fluidos estudados, os quais foram submetidos ao processo de atomização. Contudo, conforme é observado na Figura 4.15, a superfície polida de vidro apresenta escara de desgaste erosivo e micropites gerados pelo mecanismo de desgaste cavitativo. Assemelham-se pelo menos dois impactos por gotícula pulverizada na parede do vidro, aumentando assim a erosão.



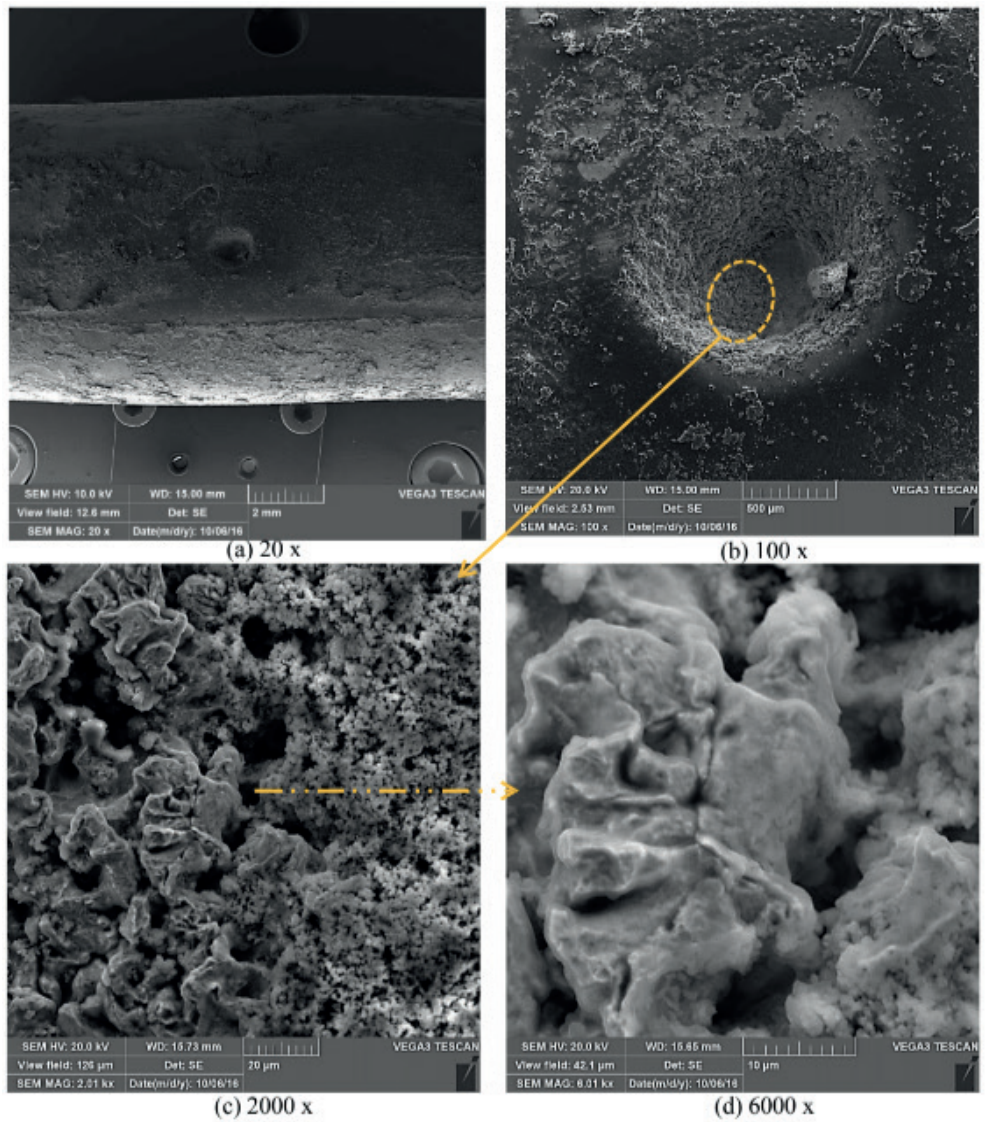
Figura 4.15 – Imagem, MEV (SE), da textura da superfície do alvo de **vidro** após 62 h de jateamento com combustível B6 + Tensoativos + Água + Glicerina: (b) escara de erosão com detalhes (c) da severidade do desgaste e (d) dos micropites (setas vermelhas)



Na Figura 4.16 são exibidas as imagens, MEV (SE), da superfície à montante do alvo de cobre após atomização do combustível B6 + Tensoativos + Água + Glicerina. Com base na análise das superfícies dos alvos de cobre e comparando as escaras das Figuras 4.3(a), 4.5(b) e 4.13(a) sob influência da atomização dos respectivos fluidos Ultratene 4113, B6 + Tensoativos, B6 + Tensoativos + Água e B6 + Tensoativos + Água + Glicerina, pode-se verificar que o combustível aditivado promove uma maior erosão, a qual pode

estar relacionada com as nanopartículas do combustível aditivado, principalmente, nos casos dos combustíveis B6 + tensoativos + água e B6 + tensoativos + água + glicerina.

Figura 4.16 - Imagens, MEV (SE), da escara impressa no alvo de **cobre** pelo jato atomizado do combustível B6 + Tensoativos + Água + Glicerina

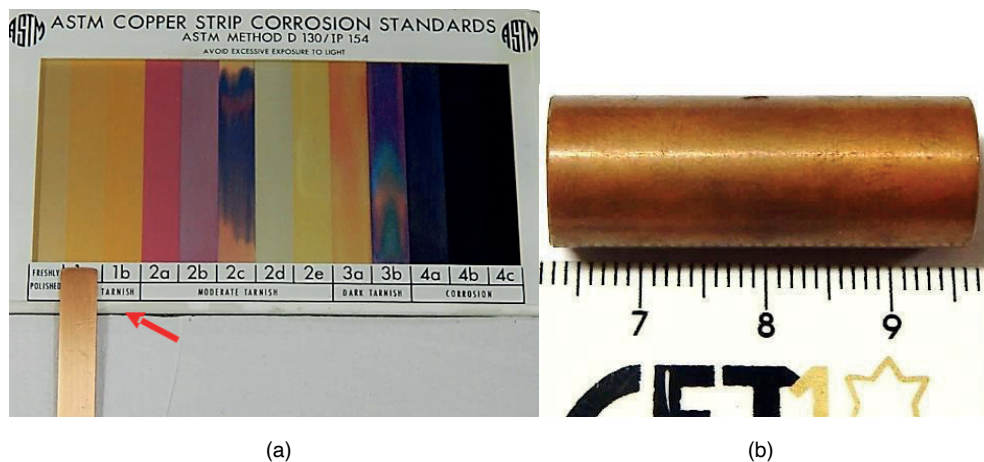


Resumidamente, os mecanismos de desgaste adesivo, cavitativo, erosivo e corrosivo foram confirmados, de uma forma geral, por: cores e formas das superfícies dos alvos de cobre submetidas ao processo de atomização dos fluidos; depósitos de carbonização ou borra; escaras resultantes do processo triboquímico desenvolvido pelos jatos incidentes dos fluidos sobre as superfícies metálicas do alvo de cobre. Estes mecanismos de desgaste estão associados ao sistema metal-oxigênio-enxofre, aos fenômenos de transporte e respectivos desdobramentos cumulativos.

## 4.2 CORROSIVIDADE AO COBRE

Os resultados de corrosividade ao cobre dos fluidos utilizados são mostrados a seguir, e são comparados aos alvos utilizados na bancada dinamométrica e no Dispositivo de Ensaio de Bico Injetor *Common Rail*. A Figura 4.17 apresenta uma lâmina de cobre que foi submetida ao ensaio de corrosividade ao cobre, imersa no combustível B6 + tensoativos. A baixa corrosividade ao cobre deste fluido (1a) corrobora com o aspecto da superfície do alvo de cobre após 20 h de atomização do fluido B6 + Tensoativos, Figura 4.17(b).

Figura 4.17 – Lâmina de cobre após ensaio corrosividade com fluido B6 + Tensoativos



Como pode ser visto nas Figuras 4.18(a) e 4.18(b), o resultado do ensaio de corrosividade apresentou uma baixíssima corrosividade após o período de três horas. Contudo, ao observar o cilindro de cobre submetido ao mesmo fluido em um ensaio de 20 h não contínuas, fica evidente a formação de vários óxidos de cobre, caracterizados pelo valor de corrosividade igual a 1b (Figura 4.18(a)) e pelas diferentes cores presentes (Figura 4.18(b)).

Na Figura 4.19 observa-se uma lâmina de cobre (a) após ensaio de corrosividade por 3 h no combustível B6 + tensoativos + água + glicerina e um alvo de cobre (b) após



ter sido submetido a jatos deste combustível durante 20 h não contínuas. Mais uma vez, observou-se uma divergência entre os resultados de corrosividade ao cobre e o estado dos alvos de cobre cilíndricos após os ensaios.

Figura 4.18 – (a) Lâmina de cobre após ensaio de corrosividade ao cobre e (b) superfície da geratriz G4 do alvo de **cobre** após atomização do fluido B6 + Tensoativos + Água;

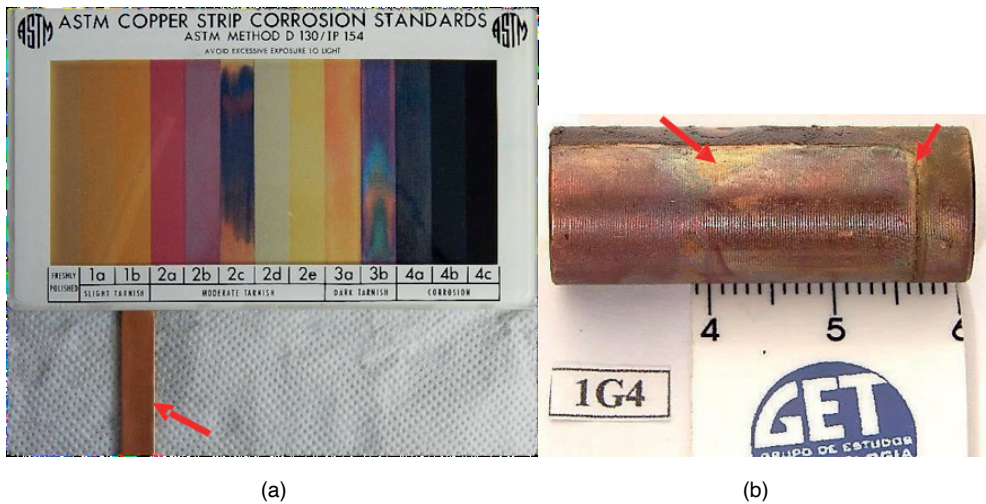
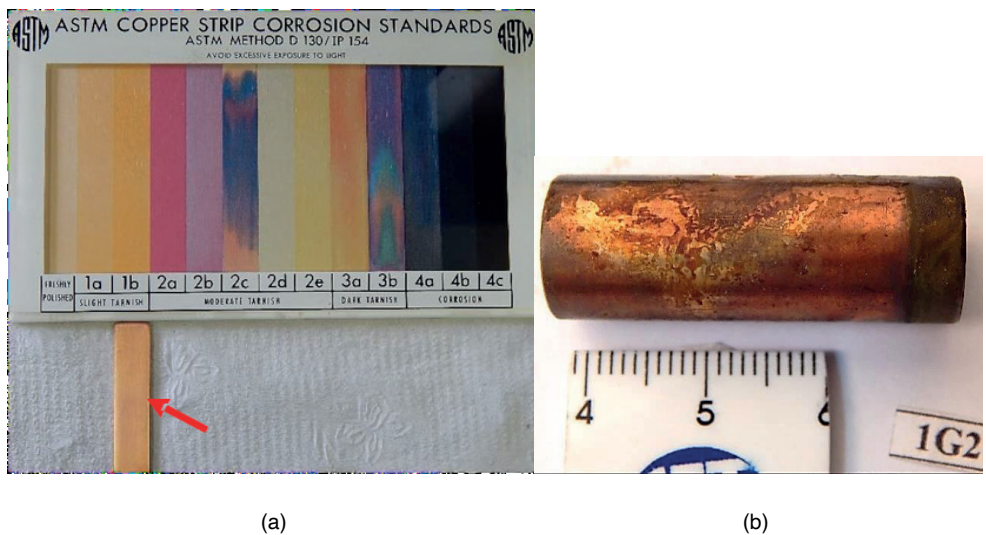


Figura 4.19 – (a) lâmina de cobre após ensaio de corrosividade ao cobre e (b) superfície da geratriz (G2) do alvo de **cobre** após atomização do fluido B6 + Tensoativos + Água + Glicerina



Comparando os resultados obtidos dos ensaios realizados com as lâminas de cobre, observa-se nitidamente o baixo nível de corrosividade. Entretanto, quando esse fluido foi atomizado sobre a superfície do alvo de cobre, notou-se a formação de vários óxidos de



cobre como observado na Figura 4.19(b). Em função da discrepância entre os resultados obtidos pelo valor obtido no ensaio de corrosividade ao cobre (1b) e o aspecto da superfície alvo de cobre, gera a incerteza quanto à utilização da norma ASTM D130 (2012) para os ensaios em novos combustíveis.

### 3. MEV DOS BOCAIS DOS BICOS INJETORES *COMMON RAIL* ANTES E APÓS OS PROCESSOS DE ATOMIZAÇÃO DOS FLUIDOS

As imagens seguintes, obtidas através de MEV (SE), referem-se às superfícies dos bocais dos bicos injetores *Common Rail*, contendo seis bocais (orifícios) atomizadores equidistantes, na condição nova e após processo de atomização dos fluidos estudados aplicados no dispositivo de ensaio de bicos injetores *Common Rail*.

Os seis orifícios atomizadores de cada bico injetor são referenciados, pelo sistema do ponteiro indicador das horas em um relógio, nas posições 1 h, 3 h, 5 h, 7 h, 9 h e 11 h.

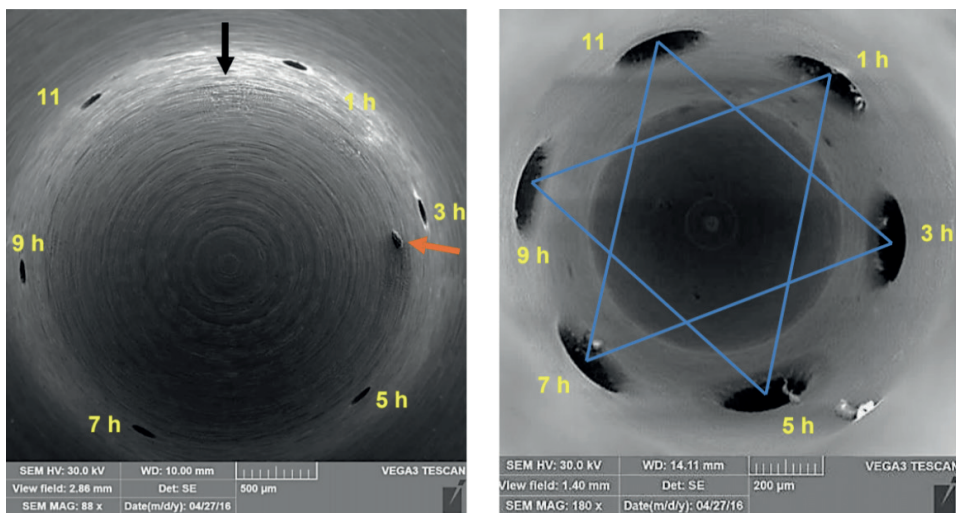
#### 3.1 COMPARAÇÃO DAS SUPERFÍCIES DOS PARABOLOIDES DOS BICOS INJETORES NOVO E APÓS 150 H DE ATOMIZAÇÃO DO FLUIDO ULTRASENE 4113

A partir das imagens das Figuras 4.20 e 4.21 podem ser analisadas as morfologias e texturas das superfícies externas e internas das calotas parabólicas dos respectivos bicos injetores *Common Rail* novo e após 150 h acumuladas e descontínuas de ensaios de atomização a 800 bar, do fluido Ultrasene 4113.

A textura do bico novo, Figura 20 (a), apresenta superfície retificada com um rebolo de forma. Há evidência de trepidação ou *chatter*, indicada pela seta preta, durante a fabricação do bico injetor. *Chatter* é fenômeno vibracional que ocorre em usinagens e depende dos parâmetros da usinagem, da afiação da ferramenta de corte, da rigidez da máquina e do material que está sendo usinado. Percebe-se, ainda, nesta superfície, a formação de colônias de óxido metálico na direção 3 h do bocal, sinalizadas pela seta laranja. A origem desta colônia de óxidos pode estar relacionada ao condicionamento desse componente em relação ao seu tempo de prateleira.

Analisando-se a Figura 4.21(a) referente à superfície do paraboloide externo do bico após 150 h de atomização, conclui-se que a sua morfologia e textura aparentemente se preservaram, contudo houve evidências de desgaste adesivo e corrosivo, respectivamente assinalados pelas setas de cores amarela e vermelha.

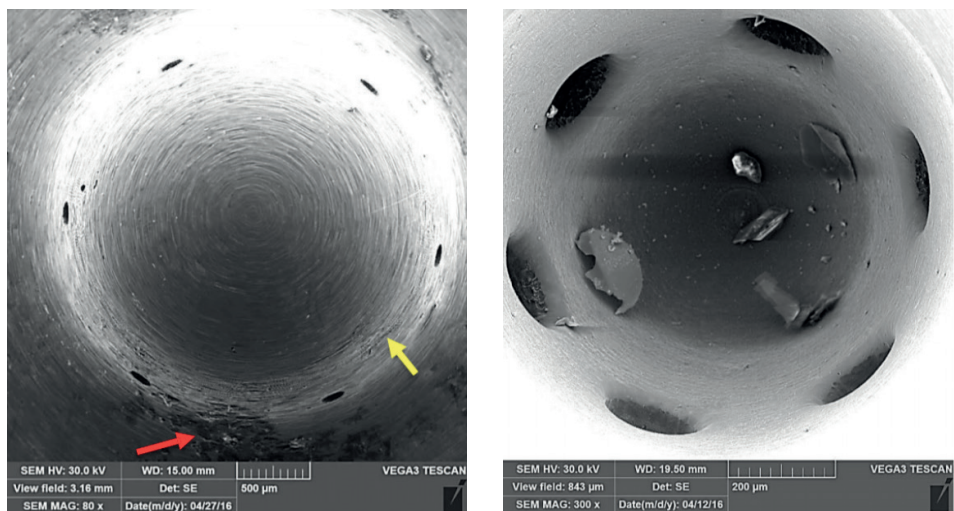
Figura 4.20 – Imagens, MEV (SE), das superfícies (a) externa e (b) interna do paraboloide do bico injetor *Common Rail* novo. A estrela de seis pontas a 60 graus evidencia a equidistância dos bocais



(a) Superfície externa convexa do bico: 88 x

(b) Superfície interna côncava do bico: 180x

Figura 4.21 – Imagens, MEV (SE), das superfícies (a) externa e (b) interna do paraboloide do bico injetor *Common Rail* após 150 h de ensaio de atomização do fluido Ultrasene 4113



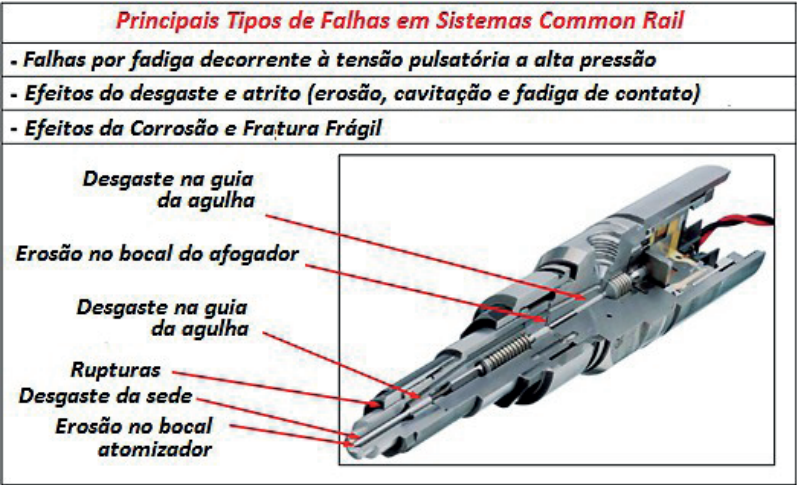
(a) Superfície externa convexa do bico: 80 x

(b) Superfície interna côncava do bico: 300 x

4.3.2 Principais Tipos de Falhas em Sistemas *Common Rail*

O bico injetor é um componente do sistema de injeção de combustível que está sujeito a diversas falhas. A Figura 4.22 apresenta os principais mecanismos de dano que atuam em sistemas de injeção *Common Rail*. São eles: o desgaste na guia da agulha, a erosão no bocal do afogador, erosão no bocal atomizador, cavitação e fadiga de contato.

Figura 4.22 – Efeitos tribológicos sobre um sistema *Common Rail*

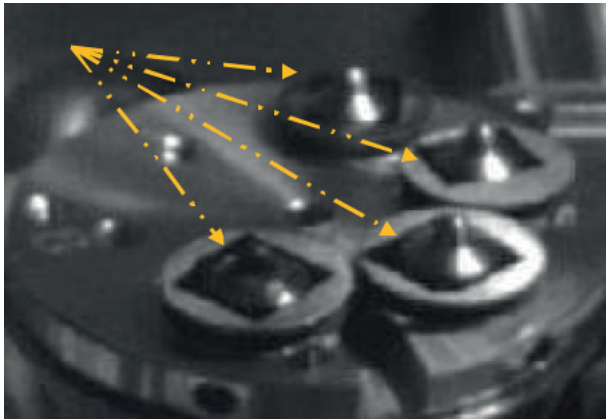


Fonte: Adaptado de GUTIERREZ (2012)

4.3.3 Superfícies dos Bocais dos Bicos Injetores Após Ensaio de Atomização no Dispositivo de Ensaio de Bico Injetor *Common Rail*

As imagens de MEV, e microanálise química EDS, que se seguem dizem respeito ao desgaste nos bocais dos injetores após atomização de diversos fluidos, inflamáveis, ou não, como o que diz respeito à erosão no bocal, o qual está indicado pela seta na Figura 4.23.

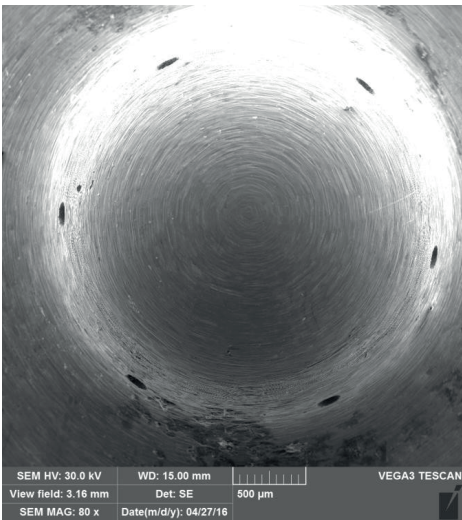
Figura 4.23 – Partes seccionadas dos bocais de quatro bicos injetores *Common Rail* posicionados na câmara de análise do MEV



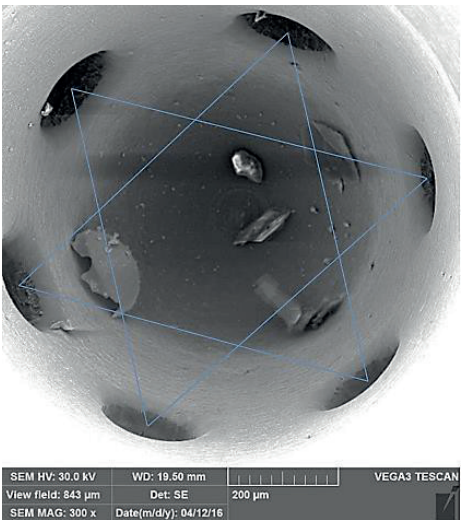
4.3.3.1 Desgaste de Bicos Após 150 h de Atomização do Fluido Ultrasene 4113

Iniciam-se as imagens das Figuras 4.24 a 4.30, com a resposta dos bocais à ação da atomização do fluido Ultrasene 4113 no dispositivo de ensaio de bico injetor *Common Rail*.

Figura 4.24 – Imagens, MEV (SE), das superfícies externa e interna indicando os seis bocais de um bico injetor após 150 h de atomização do fluido Ultrasene 4113



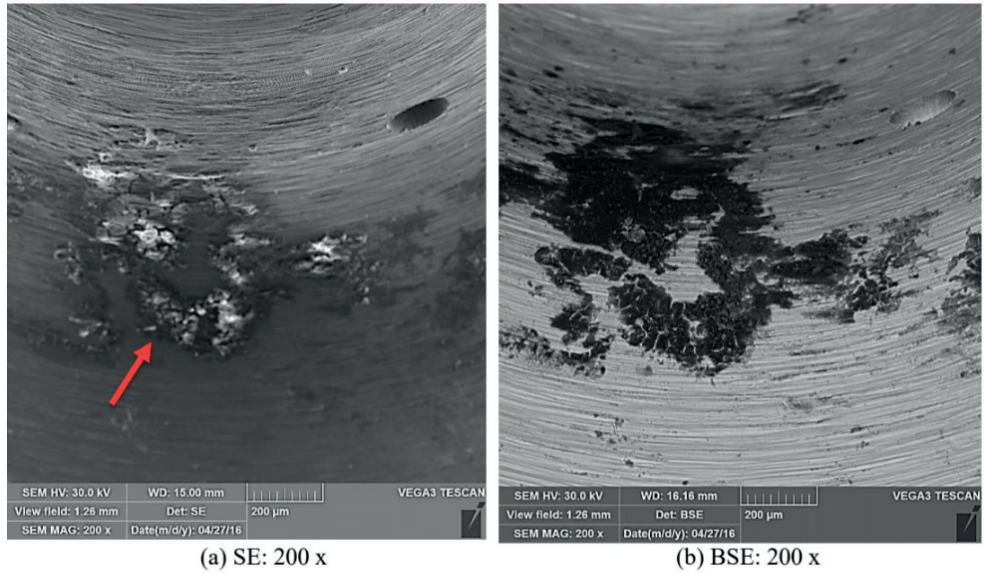
(a) Superfície externa convexa do bico: 80 x



(b) Superfície interna côncava do bico: 300 x

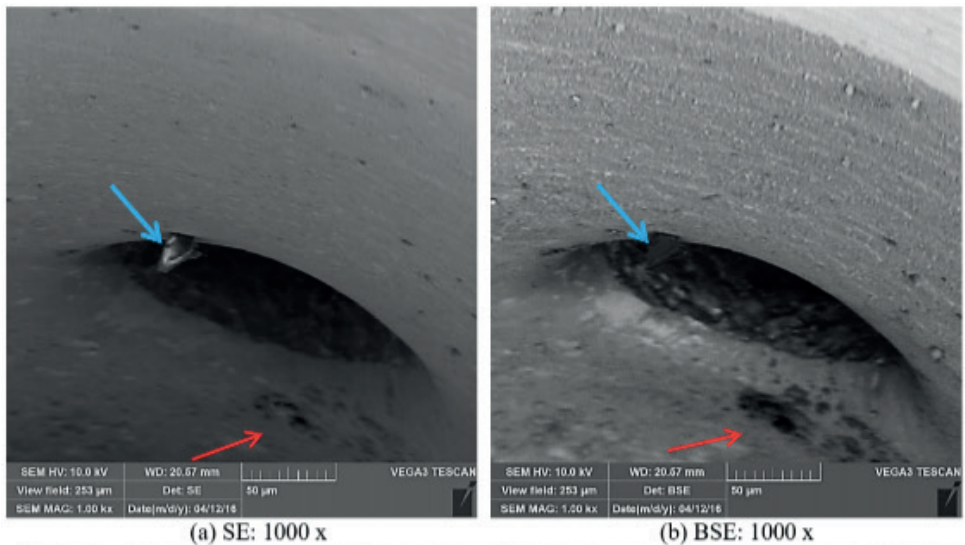


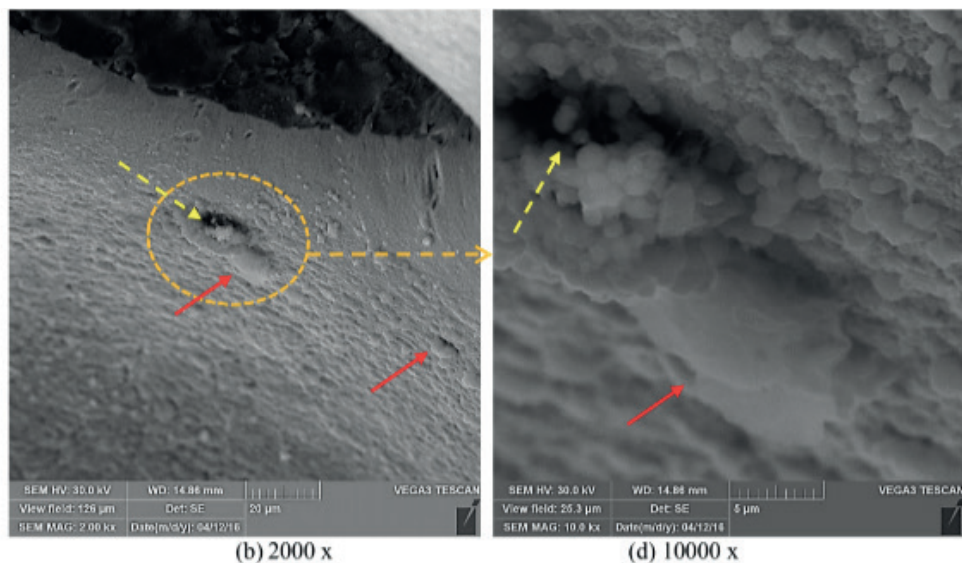
Figura 4.25 – Imagens de MEV das superfícies externa do bico, entre 5 h e 7 h, com desgaste corrosivo após 150 h de atomização do fluido Ultraseine 4113



A Figura 4.24 apresenta imagens das superfícies externa e interna, obtidas por MEV (SE), nas quais são identificados: (a) o desgaste corrosivo e (b) pites micrométricos e partículas de inclusões na parede da bolsa existente no bico após 150 h de atomização.

Figura 4.26 – Imagens de MEV da textura da parede interna do bocal na posição 1 h. Em (a) há evidências de inclusão de partícula na borda superior do bocal, indicadas por seta azul, e pites e micropites sinalizados por seta vermelha. (c) Parte inferior do bocal, onde se observam *dimples*, *micro-spalling* (setas vermelhas), pite (seta amarela) ampliados em (d)



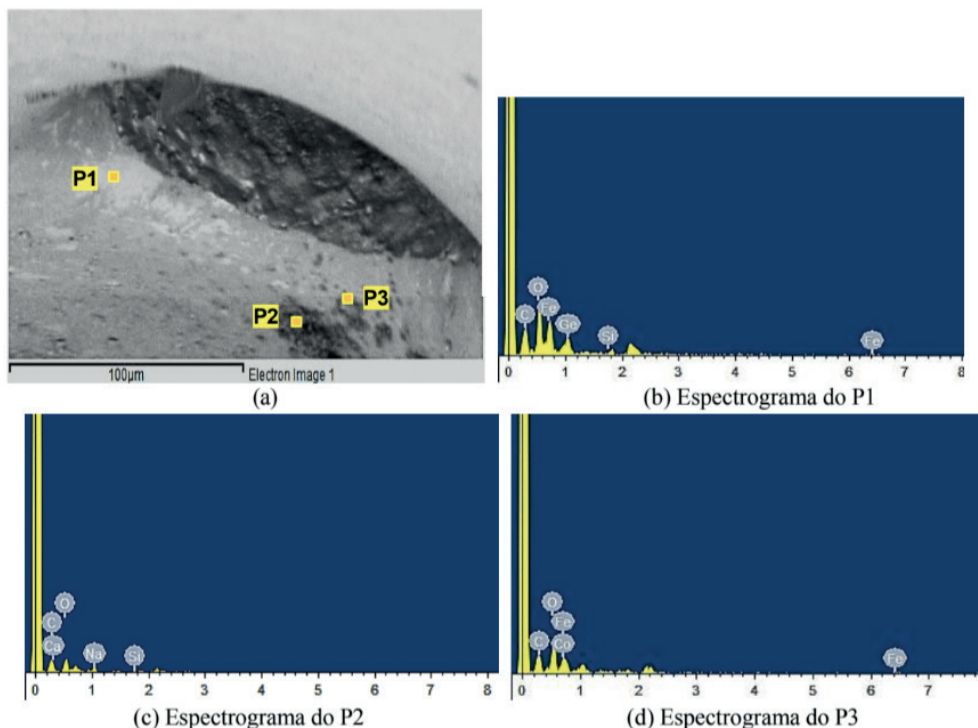


Nas Figuras 4.25 a 4.29 são apresentadas imagens, MEV (SE e BSE), dos bocais de um bico injetor conforme posicionamento em estrela, indicado na Figura 4.24(b). O desgaste corrosivo, na zona entre 5 h e 7 h nas imagens de MEV (SE e BSE) da Figura 4.25, foi gerado pela reação do fluido atomizado com o material do bico.

Através da análise da superfície interna do bico injetor *Common Rail* pode verificar os principais mecanismos de desgaste atuantes e sua intensificação, os quais são influenciados pelo meio (tipo de fluido atomizado, pressão de injeção, temperatura, etc.).

A Figura 4.26 exibe as imagens de MEV (SE e BSE) da superfície da parede interna do bocal na posição 1 h, onde são identificados: (a) inclusão de partícula na borda superior do bocal, (b) pites e micropites, (c) textura característica de erosão com evidência de pites e *dimples* e desgaste por *micro-spalling* (ou microlascamento) e (d) ampliação da região dos pites e *micro-spalling* vistos na Figura 4.26(c).

Figura 4.27 – (a) Imagem, MEV (BSE), de um bocal de bico injetor *Common Rail* após 150 h de ensaio com fluido Ultrasene 4113, revelando-se os elementos químicos nos espectrogramas dos pontos (b) P1, (c) P2 e (d) P3 através de microanálise EDS



A textura característica de erosão torna-se mais evidente na imagem ampliada da Figura 4.26(d). A linha amarela evidencia um pite resultante do sinergismo entre os mecanismos de desgaste por fadiga de contato, erosão, corrosão e cavitação.

O desgaste por *micro-spalling*, observado na Figura 4.26(c-d), é um mecanismo de desgaste resultante da combinação entre fadiga de contato, devido à elevada pressão de contato exercida pelo fluido que escoia pressurizado na região à montante do bocal de atomização, conforme constatado por Medeiros (2002).



Figura 4.28 – Imagens, MEV (SE), da textura da parede interna do bocal na posição 3 h evidenciando (a) o desgaste erosivo (seta vermelha) e (b) um risco esclerométrico (seta azul)

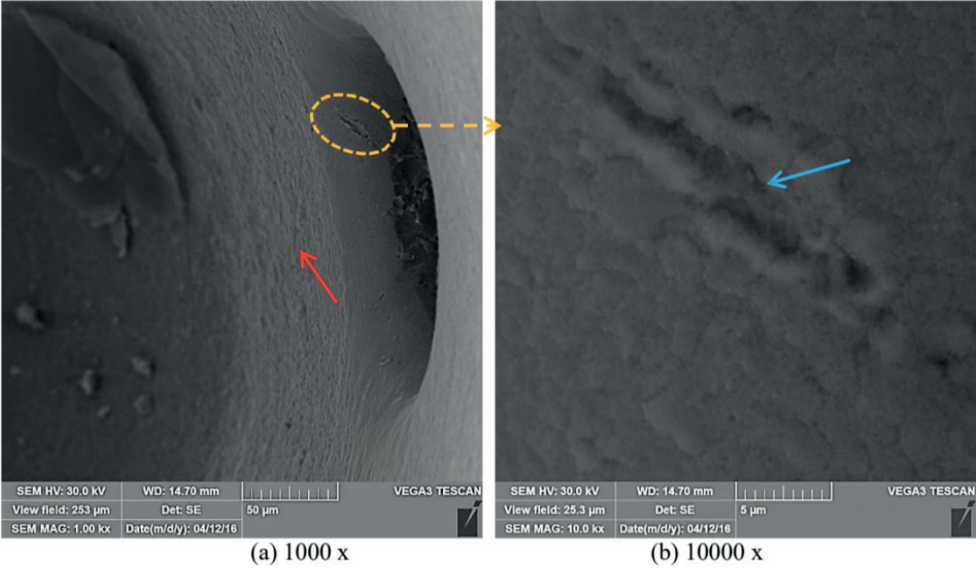


Figura 4.29 – Imagem, MEV (SE), da superfície da parede interna do bocal na posição 5 h evidenciando a textura gerada pelo desgaste erosivo, seta vermelha. Um risco esclerométrico, indicado por seta em azul, denota o desgaste abrasivo devido à pressão na bolsa do bico

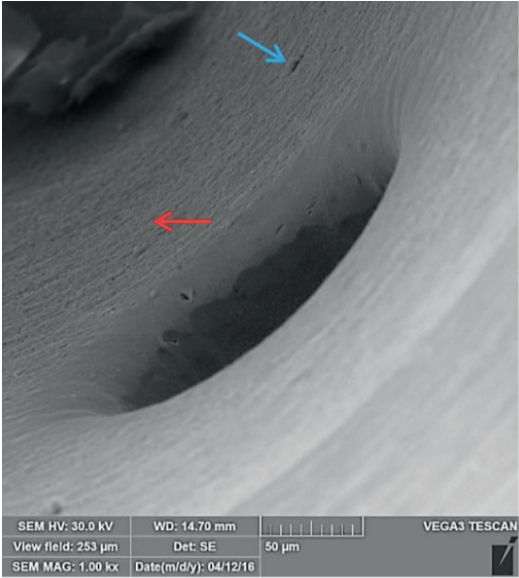
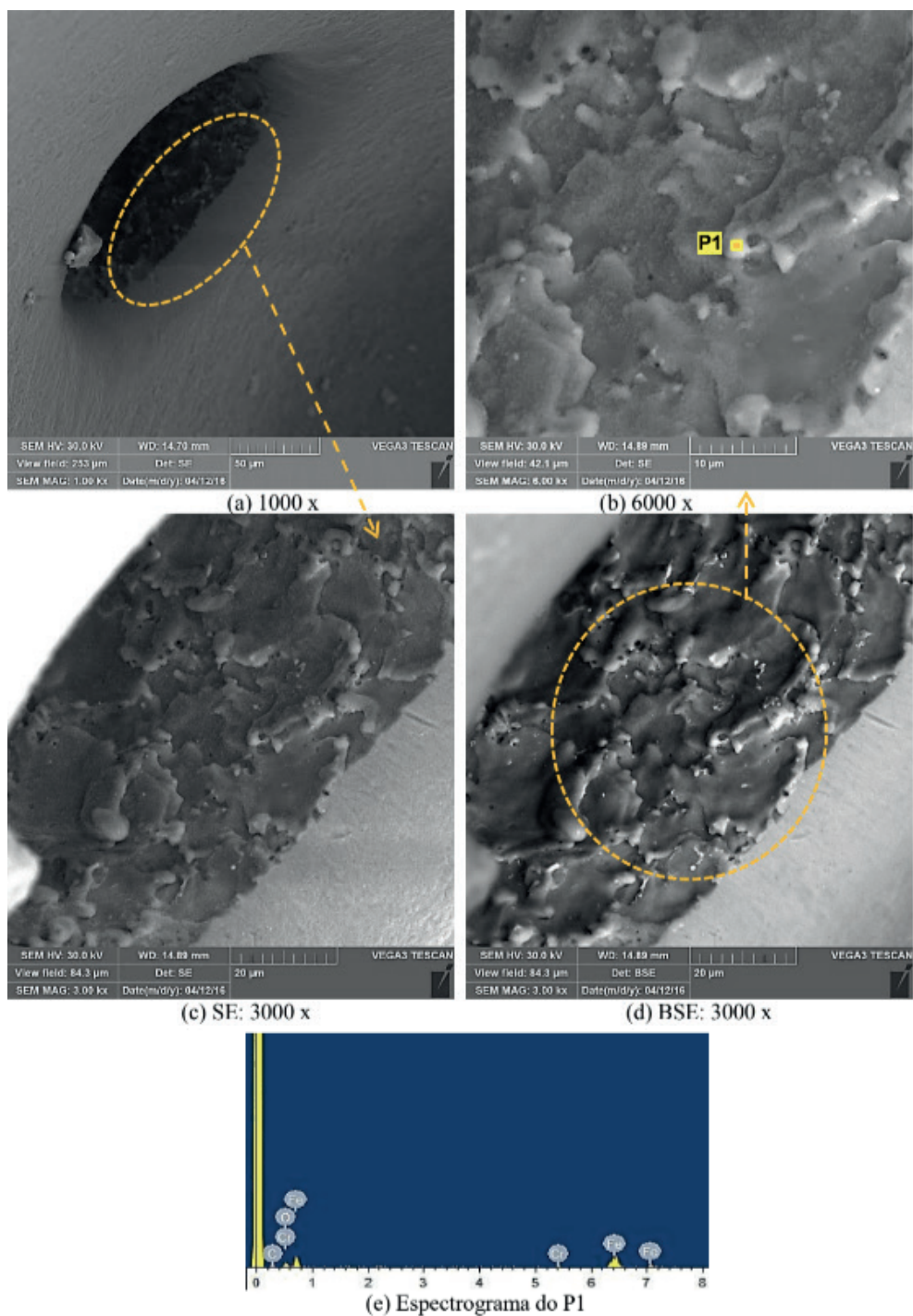


Figura 4.30 – Imagem de MEV da superfície da parede interna do bocal na posição 11 h (a).

Nas superfícies, obtidas pelos detectores SE (c) e BSE (d), há vestígios de micropites e ausência de inclusões. A composição química de P1 (b) é vista através do espectrograma (e)



A Figura 4.27(a) apresenta a superfície do bocal na posição 1 h com indicação dos respectivos pontos P1 (C, O, Fe, Si e Ge), P2 (C, O, Ca, Si e Na) e P3 (C, O, Fe e Co), cujos espectrogramas de (b), (c) e (d) foram obtidos através de microanálise química EDS.

As imagens da Figura 4.28(a) e 4.29 referem-se às superfícies internas dos bocais nas respectivas posições 3 h e 5 h, onde são observadas texturas típicas provocadas pelo desgaste erosivo, indicado pela seta em vermelho. Verifica-se uma zona elíptica enegrecida e uma segunda elipse cinza, circunscrita, de 20 - 30  $\mu\text{m}$ , sugerindo um revestimento interno no parabolóide que forma a ponta do bico.

O risco esclerométrico, ampliado na Figura 4.28(b), pode ter sido provocado pelo deslizamento de uma partícula de inclusão dura que se deslocou aproximadamente 20  $\mu\text{m}$ , com cerca de 3  $\mu\text{m}$  de largura. Já o risco esclerométrico na Figura 4.29 pode ter sido gerado por desgaste abrasivo através da pressão de atomização atuante na bolsa existente no bico.

A Figura 4.30 apresenta imagens obtidas por MEV (a) da superfície da parede interna do bocal na posição 11 h. As imagens em (c) e (d) referem-se à textura do interior do bocal, cujas marcas foram formadas pelo processo de fabricação do bico. Nota-se nestas superfícies que há vestígio de micropites; além disto, a análise da coloração da superfície (d), obtida por MEV (BSE), permite denotar ausência de inclusões. A região P1 (b) foi analisada através do espectrograma em (e), cujos elementos químicos encontrados são: C, O, Cr, e Fe.

De um modo geral, a obtenção de imagens com o detector BSE proporcionou uma análise da superfície do bico com maior nitidez, identificação e caracterização dos mecanismos e de partículas de inclusões, pites e micropites.

#### *4.3.3.2 Desgaste de Bicos Após 20 h de Atomização do Combustível B6 + Tensoativos*

As Figuras 4.31 a 4.37 dizem respeito às imagens, obtidas por MEV (SE), das superfícies dos bocais de um injetor *Common Rail* após 20 h, acumuladas e descontinuas, de atomização do combustível B6 + Tensoativos.

Na Figura 4.31, pode-se visualizar as texturas externa e interna contendo os seis bocais, os quais não estão igualmente espaçados. Ainda são verificadas marcas de pites micrométricos na superfície interna do bico injetor, Figura 4.31(b).

Figura 4.31 – Imagens, MEV (SE), das superfícies (a) externa e (b) interna com visualização dos seis bocais de um bico injetor 20 h de atomização do combustível B6 + Tensoativos

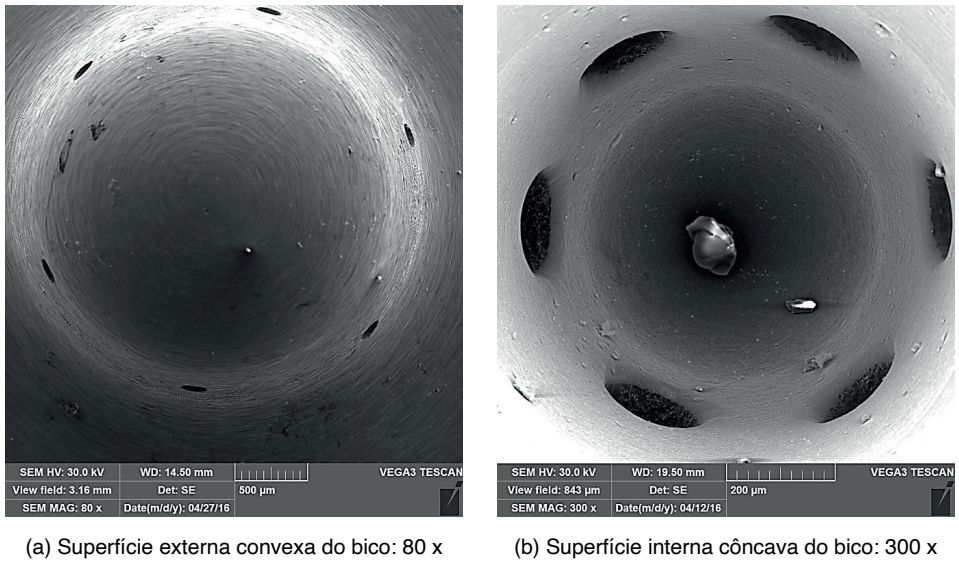


Figura 4.32 – Imagens de MEV do bocal localizado a 1 h. (a) Há vestígios de desgaste na borda inferior gerando (b) o sulcamento e (c) espectrograma do ponto P1

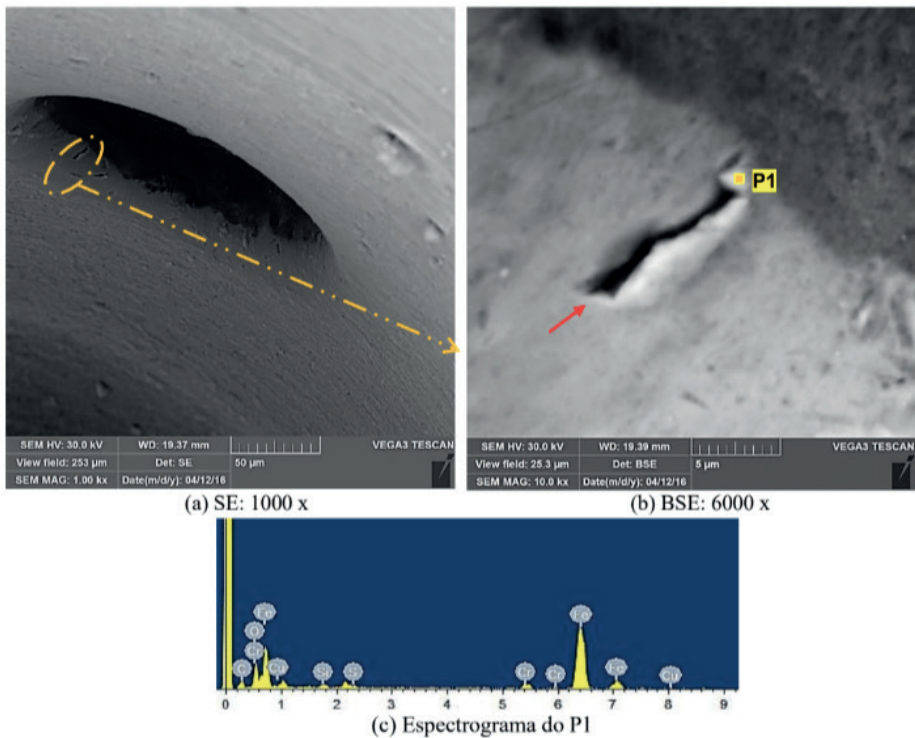




Figura 4.33 – Imagem, MEV (SE), da superfície do bocal na posição 3 h, cuja espessura da parede interna tem de 20 a 30  $\mu\text{m}$ . Os micropites tem diâmetro de  $\approx 2 \mu\text{m}$

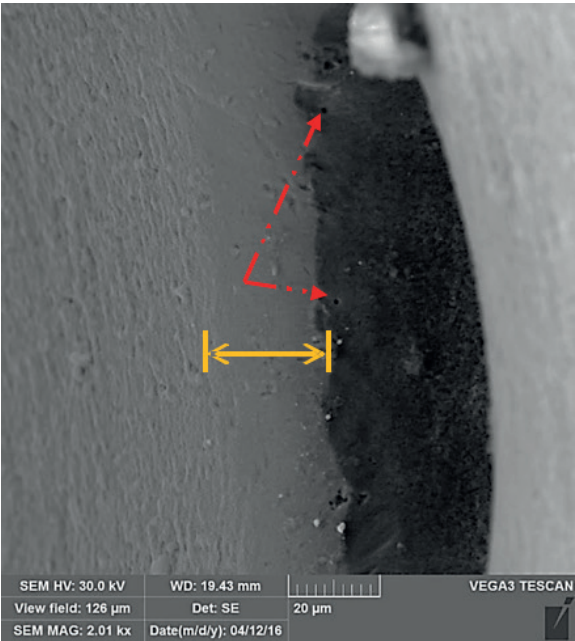
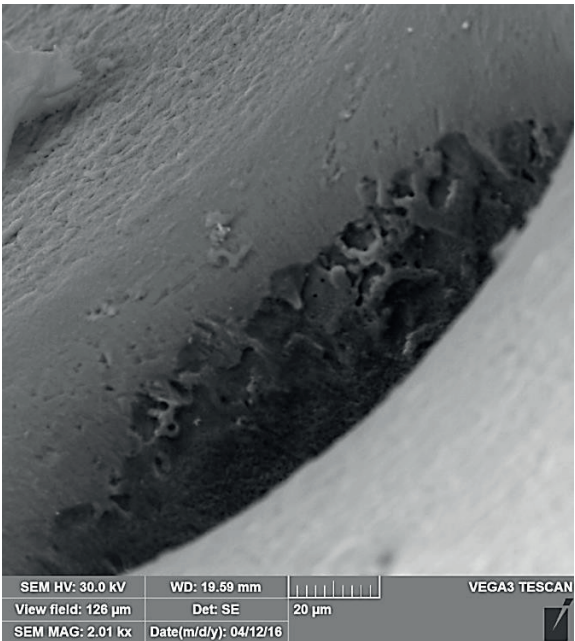


Figura 4.34 – Imagem, MEV (SE), superfície interna do bocal na posição 5 h, cuja textura dá indícios dos mecanismos de desgaste erosivo, corrosivo e cavitativo



As imagens da Figura 4.32 correspondem à superfície interna do bocal localizado na posição 1 h. Verificam-se, na Figura 4.32(a), evidências do desgaste abrasivo na borda inferior do bocal com presença de riscos ou sulcamento. Os sulcos formados nesta região surgem, provavelmente, devido ao deslocamento de uma partícula dura no substrato da parede do bico. Tal fenômeno também foi visto na Figura 4.37 (bocal na posição 11 h).

A Figura 4.32(b) é uma ampliação da área do sulcamento, cujo ponto P1 é identificado por EDS. No espectrograma da Figura 4.32(c) são determinados os seguintes elementos químicos de P1: C, O, Fe, Cr, Si, Cu e S.

Figura 4.35 – Imagem, MEV (SE), superfície interna do bocal na posição 7 h com evidências de micropites, riscos abrasivos e erosão na parede interna da bolsa

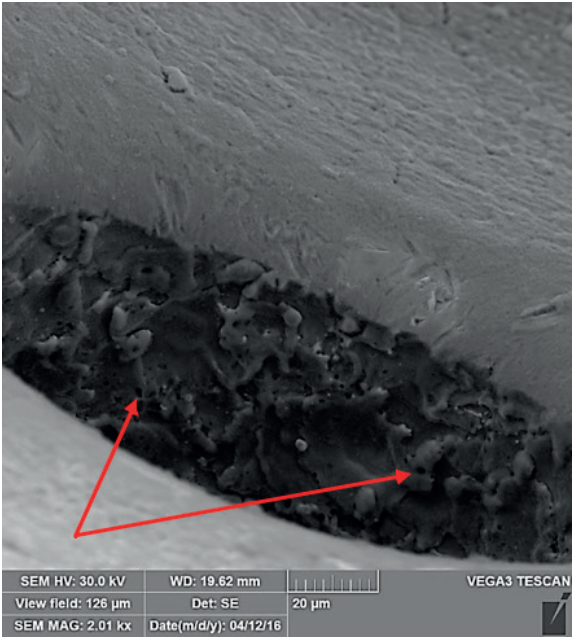


Figura 4.36 – Imagem, MEV (SE), superfície interna do bocal na posição 9 h indicando o abaulamento na zona circunferencial de entrada do bocal

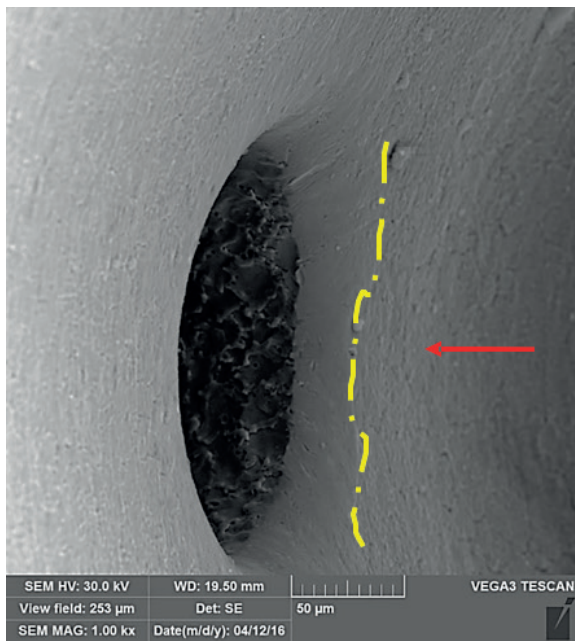
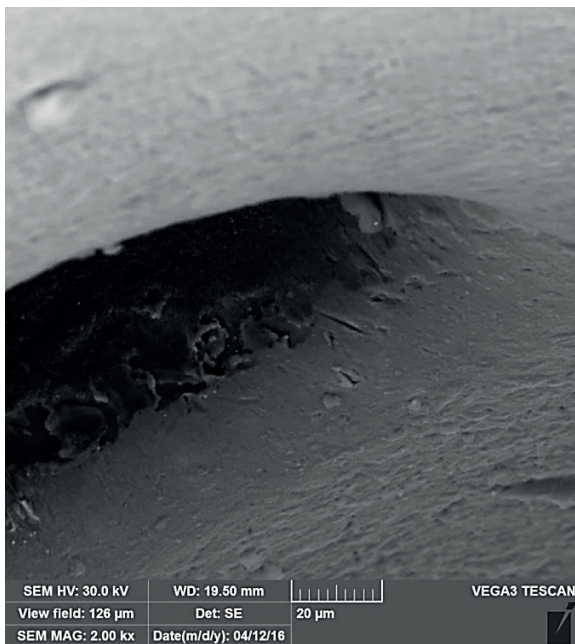


Figura 4.37 – Imagem, MEV (SE), superfície interna do bocal na posição 11 h evidenciando micropites e sulcos abrasivos





Na maioria das superfícies desses bocais pode-se constatar a formação de micropites, principalmente os das posições 3 h, 5 h, 7 h e 11 h, à jusante da borda de entrada do bocal. Os micropites são resultantes do sinergismo entre a erosão e a cavitação. Eles possuem diâmetro aproximado de  $2\text{ }\mu\text{m}$ , como assinalado por setas vermelhas na Figura 4.33.

Além dos mecanismos de desgaste supracitados, a atomização do combustível B6 + Tensoativos também proporcionou o desenvolvimento do desgaste corrosivo (Figura 4.34) e do desgaste erosivo, presentes nas superfícies das Figuras 4.34 e 4.35, sendo este último denotado com maior evidência por textura característica da parede interna da bolsa do bico.

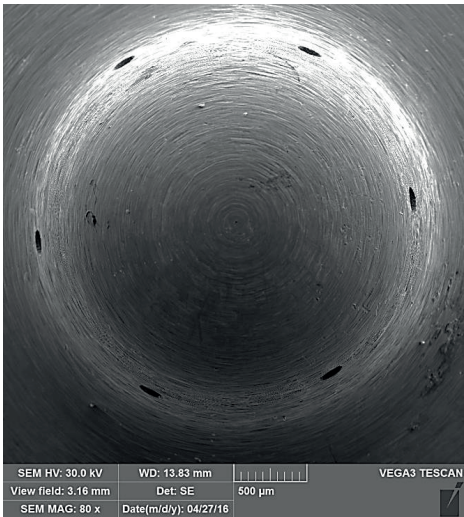
Analisando-se a camada correspondente à borda ou parede interna do bocal (superfície da Figura 4.33, por exemplo), é possível notar que se trata de um revestimento cuja espessura situa-se entre  $20\text{ }\mu\text{m}$  e  $30\text{ }\mu\text{m}$ . Contudo, ainda se permite verificar um leve abaulamento desta camada na zona circunferencial de entrada do bocal na posição 9 h, conforme Figura 4.36.

### 3.3.3 Desgaste de Bicos Após 20 h de Atomização do Combustível B6 + Tensoativos + Água

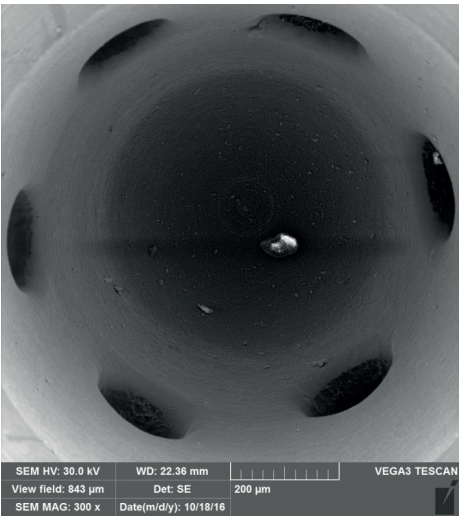
Nas Figuras 4.38 e 4.39 encontram-se as superfícies obtidas por MEV (SE e BSE) da extremidade de um bico injetor *Common Rail* após 20 h de atomização do combustível B6 + Tensoativos + Água com pressão de 800 bar.

A Figura 4.38 apresenta as texturas das superfícies (a) externa e (b) interna da extremidade de bico injetor, onde se verificam (a) camadas de colônias de óxidos formados na parede externa e (b) a não equidistância entre os seis bocais.

Figura 4.38 – Imagens, MEV (SE), das superfícies (a) externa e (b) interna com vista dos seis bocais de um bico injetor após 20 h de atomização do combustível B6 + Tensoativos + Água

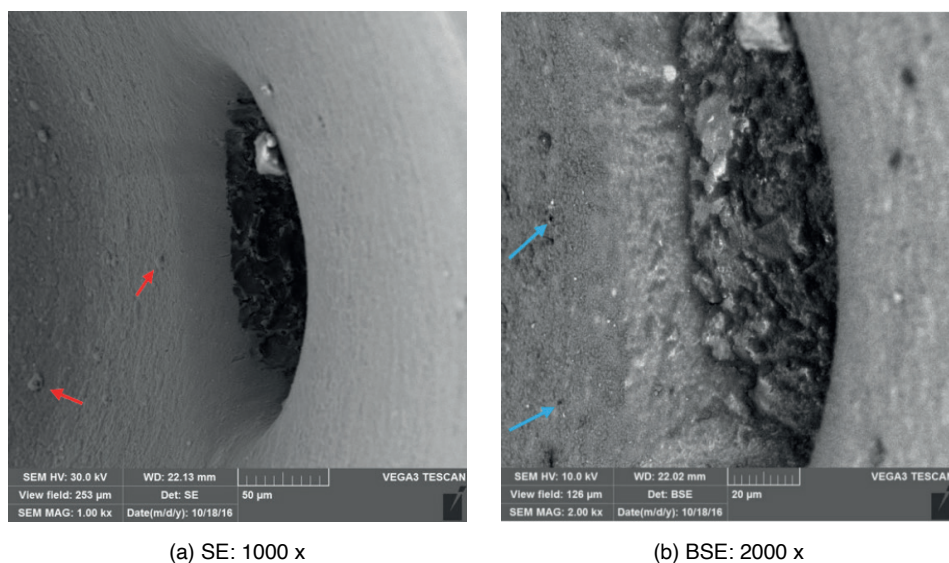


(a) Superfície externa convexa do bico: 80 x



(b) Superfície interna côncava do bico: 300 x

Figura 4.39 – Imagens de MEV da superfície interna do bocal na posição 3 h evidenciando (a) partícula na borda superior do bocal, *micro-spalling* (setas vermelhas) juntamente com o desgaste erosivo na textura da parede à esquerda e (b) micropites, indicados por setas em azul



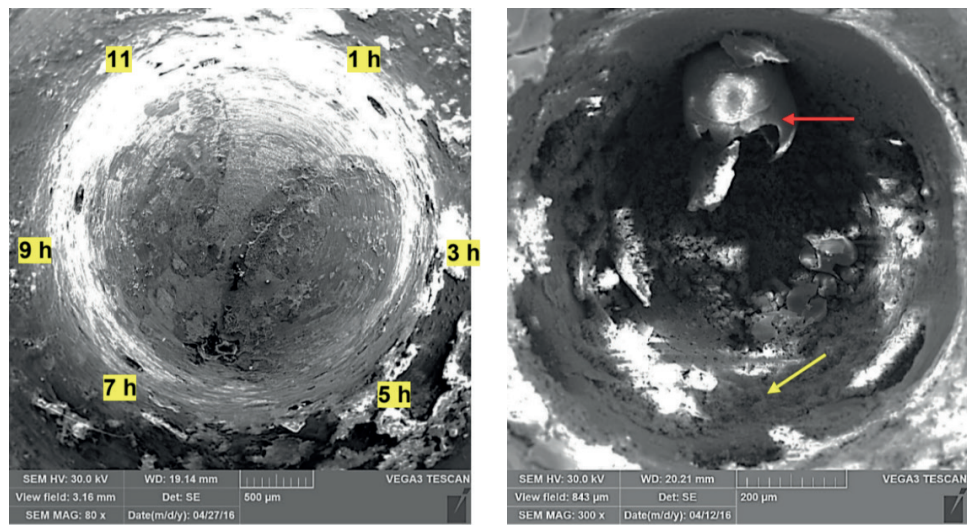
A Figura 4.39 apresenta imagens das superfícies interna do bocal na posição 3 h, ampliadas e obtidas por MEV (SE e BSE), nas quais são observados (a) *micro-spallings*, desgaste erosivo, mais evidente pela textura da parede à esquerda do bocal, e (b) micropites na periferia do bocal, resultantes do sinergismo entre os mecanismos de desgaste por cavitação e erosão.

O *micro-spalling* é gerado pelas partículas que fraturam, principalmente, a superfície da camada de revestimento da parede interna. Tanto os *micro-spallings*, quanto os micropites surgem devido à ação dos mesmos mecanismos de dano ou desgaste.

#### 4.3.3.4 Desgaste de Bicos Após 62 h de Atomização do Combustível B6 + Tensoativos + Água + Glicerina

As imagens das superfícies (a) externa e (b) interna de um bico injetor *Common Rail* foram obtidas por MEV (SE), as quais são apresentadas nas Figuras 4.40 e 4.41. As texturas geradas nestas superfícies sofreram influência da atomização do combustível B6 + Tensoativos + Água + Glicerina por 62 h acumuladas e descontínuas.

Figura 4.40 – Imagens, MEV (SE), das superfícies (a) externa e (b) interna de um bico injetor após 62 h de atomização do combustível B6 + Tensoativos + Água + Glicerina

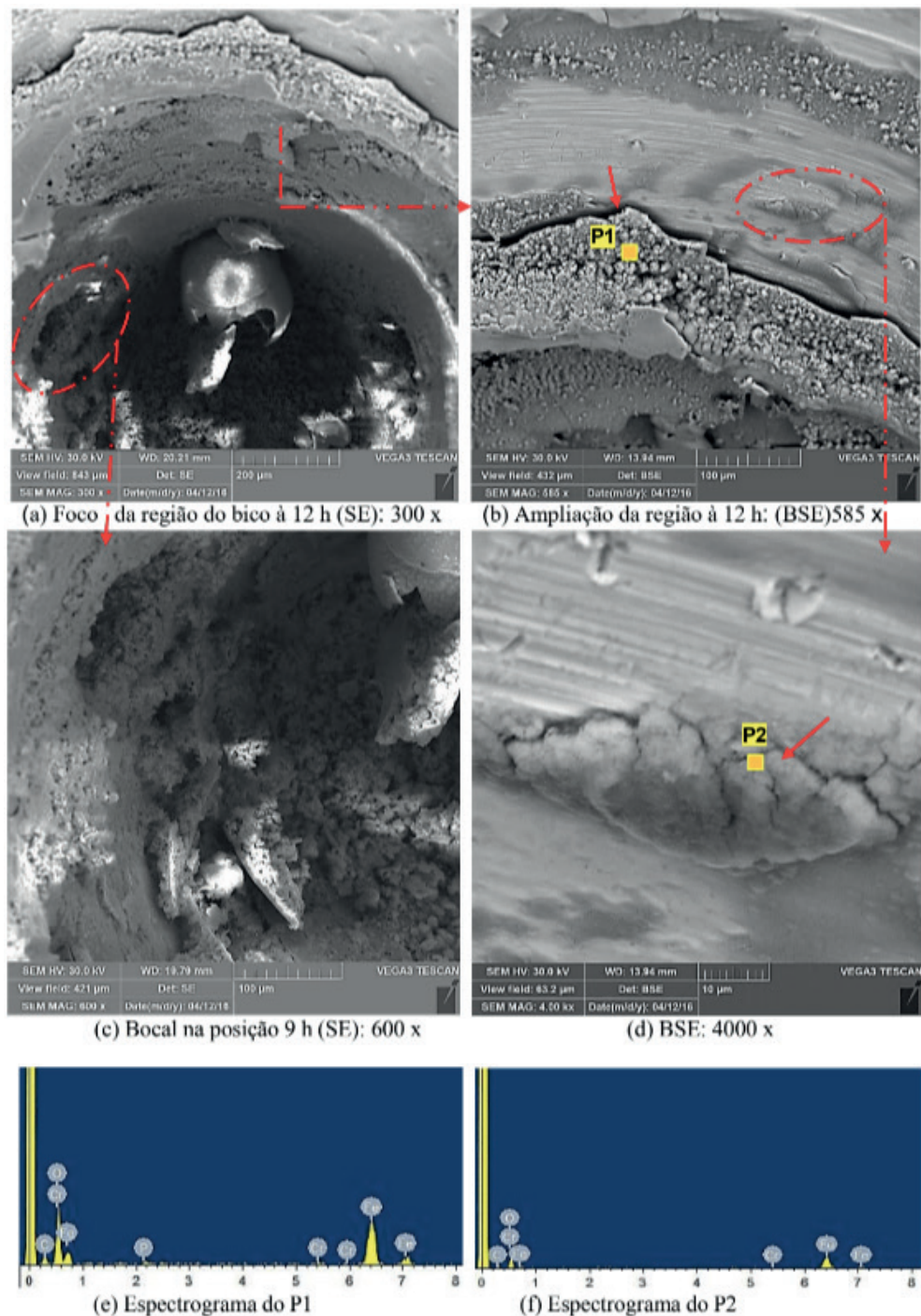


(a) Superfície externa convexa do bico: 80 x

(b) Superfície interna côncava do bico: 300 x



Figura 4.41 – Imagens de MEV da superfície interna superior do bico (a) visualizando-se a obstrução do bocal a 11 h. Em (b) mostra a fratura frágil na camada óxida, cuja ampliação em (d) permite observar microtrincas. (c) A ampliação do bocal na posição 9 h revela desgastes erosivo e oxidativo. (e) e (f) são espectrogramas dos respectivos pontos P1 e P2



Comparando-se os aspectos da intensidade dos danos presentes nas superfícies dos bicos submetidos à atomização dos quatro fluidos estudados, nota-se que o combustível que contém a glicerina contribuiu para um desgaste mais severo e, conseqüentemente, pior condição de trabalho do bico injetor. Isto também foi verificado quando os alvos de vidro e cobre foram analisados.

Dentre os mecanismos de desgaste atuantes e identificados, principalmente na superfície interna do bico injetor mostrada na Figura 4.40(b), destacam-se o desgaste erosivo e o desgaste corrosivo severo com formação de densas camadas de óxidos (indicada pela seta vermelha), as quais foram mais intensas na bolsa do bico, cujo bocal na posição 11 h encontra-se obstruído.

A partir das análises das imagens exibidas na Figura 4.41, verificam-se em (a) evidências dos mecanismos de desgastes erosivo e oxidativo severos detalhados em (b) e (c), os quais colaboram substancialmente para a degradação das paredes internas do bico. Em (b) é mostrada a região superior da superfície na posição 12 h, a qual revela, a partir da ampliação em (b), a fratura frágil de uma cama óxida e (d) com presença de microtrincas noutras camadas óxidas que estão em processo expansivo, na iminência de se desprender.

Os pontos P1 (C, O, Fe, Cr, e P) e P2 (C, O, Fe, Cr) indicados nas camadas óxidas da Figura 4.41 foram identificados por EDS nos espectrogramas mostrados nas Figuras 4.41(e) e 4.41(f), respectivamente. A presença dos elementos químicos C, Fe, Cr, Si, são de origem do bico injetor. O Cu é oriundo do alvo de cobre, enquanto o S faz parte da composição do combustível.

Assim, pode classificar o fluido B6 + Tensoativos + Água + Glicerina como não adequado para seu uso nos motores diesel como combustível, muito embora a sua lubricidade tenha sido superior a dos demais fluidos.

#### **4.3.4 Sobre os Ensaios em Dispositivo de Ensaio de Bico Injetor *Common Rail***

- a. A concepção, a modelagem, a construção e o ensaio incluindo o aparato “*Porta-Alvo*” trouxeram inovação e ineditismo para ser utilizado como ferramenta no desenvolvimento de novos trabalhos.
- b. Os mecanismos de desgaste cavitativo, erosivo, adesivo, corrosivo, por fadiga de contato ficaram evidentes. A particularidade está relacionada com a evidência da presença do desgaste cavitativo, no material quimicamente inerte (vidro). Isto pôde ser observado por desprendimentos de material na forma de ‘pites’ na superfície do vidro.
- c. O método para avaliar os mecanismos de desgaste através de análise por MEV e EDS demonstrou que os micropites identificados nos materiais alvos da atomização, quimicamente ativos e inertes, assemelharam-se em forma e dimensões, demonstrando assim que o mecanismo da cavitação-erosão superou o da cavitação-erosão-corrosão.

- d. As microanálises através de microanálise de EDS foram úteis na caracterização da composição dos elementos químicos presentes na superfície interna dos bocais dos bicos injetores, detectando-se, quando da adição do biodiesel aditivado, a presença de elementos químicos adicionais à condição dos bocais “novos”.
- e. Os ensaios no Dispositivo de Ensaio de Bico Injetor *Common Rail*, mostraram-se satisfatórios do ponto de vista de funcionamento dos combustíveis ensaiados. No entanto, quando utilizado o B6 + tensoativos + H<sub>2</sub>O + glicerina, o processo foi interrompido em função do colapso ocorrido no injetor. Colapso este atribuído ao potencial poder de oxidação da composição do combustível, tornando o injetor inutilizado pelo desgaste severo e a formação de óxidos em seu bocal.



# BIBLIOGRAFIA

ABRAMEK, K. F.; STOECK, T.; OSIPOWICZ, T. Statistical evaluation of the corrosive wear of fuel injector elements used in common rail systems. *Journal of Mechanical Engineering*, vol. 61, n° 2, 2015, pp. 91-98.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS – ANP. Regulamento técnico N° 5/2010. Resolução ANP No 52, 29/12/2010. DOU: 30/12/2010. 2015.

\_\_\_\_\_. **Regulamento técnico N° 2/2006**. Resolução ANP N° 15, 17/07/2006. DOU: 19/07/2006.

AIRPARIF. Inventaire regional des émissions em Ile-de-France. Année de Référence 2012 – Éléments Synthétiques. 2016. Disponível em: <[http://www.airparif.asso.fr/\\_pdf/publications/inventaire-emissions-idf-2012-150121.pdf](http://www.airparif.asso.fr/_pdf/publications/inventaire-emissions-idf-2012-150121.pdf)>. Acesso em: 05 jun. 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **ASTM D93** - 16: Standard test methods for flash point by pensky-martens closed cup tester. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016. Disponível em: <[www.astm.org](http://www.astm.org)>. Acesso em: 14 jun. 2016.

\_\_\_\_\_. **ASTM D130** - 12: Standard test method for corrosiveness to copper from petroleum products by copper strip test. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012. Disponível em: <[www.astm.org](http://www.astm.org)>. Acesso em: 14 jun. 2016.

\_\_\_\_\_. **ASTM D445** - 15a: Standard test method for kinematic viscosity of transparent and opaque liquids (and calculation of dynamic viscosity). ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015. Disponível em: <[www.astm.org](http://www.astm.org)>. Acesso em: 14 jun. 2016.

\_\_\_\_\_. **ASTM D613** - 16e1: Standard test method for cetane number of diesel fuel oil. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016. Disponível em: <[www.astm.org](http://www.astm.org)>. Acesso em: 14 jun. 2016.

\_\_\_\_\_. **ASTM D975** - 16: Standard specification for diesel fuel oils. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016. Disponível em: <[www.astm.org](http://www.astm.org)>. Acesso em: 14 jun. 2016.

\_\_\_\_\_. **ASTM D4052** - 15: Standard Test Method for density, relative density, and api gravity of liquids by digital density meter. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015. Disponível em: <[www.astm.org](http://www.astm.org)>. Acesso em: 14 jun. 2016.

\_\_\_\_\_. **ASTM D5453** - 16e1: Standard test method for determination of total sulfur in light hydrocarbons, spark ignition engine fuel, diesel engine fuel, and engine oil by ultraviolet fluorescence. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016. Disponível em: <[www.astm.org](http://www.astm.org)>. Acesso em: 14 jun. 2016.

\_\_\_\_\_. **ASTM D6079** - 11(2016): Standard test method for evaluating lubricity of diesel fuels by the High-Frequency Reciprocating Rig (HFRR). ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016. Disponível em: <[www.astm.org](http://www.astm.org)>. Acesso em: 14 jun. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR ISO 1585**. Veículos rodoviários – Código de ensaio de motores - Potência líquida efetiva. ABNT/CB- 005 Automotivo. 1996, 26 p.

BORUGADDA, V. B.; GOUD, V. Biodiesel production from renewable feedstocks: Status and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 16, n° 7, setembro, 2012, pp. 4763-4784.

CHALLENGERS. Particules: l'essence et l'hybride pires que le Diesel. Automobile. Dossiers. 2015. Disponível em: <[http://www.challenges.fr/automobile/dossiers/particules-l-essence-et-l-hybride-pire-que-le-diesel\\_12344](http://www.challenges.fr/automobile/dossiers/particules-l-essence-et-l-hybride-pire-que-le-diesel_12344)>. Acesso em: 20 nov. 2015.

CHAUVEAU, L. Particules fines: Qui sont les responsables?. Nature & Environnement. Science et Avenir. 2014. Disponível em: <<http://www.sciencesetavenir.fr/nature-environnement/20140314.OBS9855/particules-fines-qui-sont-les-responsables.html>>. Acesso em: 12 fev. 2015.

CARDOSO, J. J. F.; COSTA, A. A.; ALMEIDA, M. A. P.; MELO, C. K.; CARDIAS, H.T. C. Caracterização do biodiesel metílico produzido a partir de óleo babaçu e suas misturas com o diesel de petróleo. In: I CONGRESSO DA REDE BRASILEIRA DE TECNOLOGIA DO BODIESEL. 2006, Brasília. Anais... Brasília: RBTB, 2006, pp. 302-307.

DESHMUKH, D.; RAVIKRISHNA, R. V. Experimental studies on high-pressure spray structure of biofuels. **Atomization and Sprays**, vol. 21, n° 6, 2011, pp. 467-481.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. EPE disponibiliza o Relatório Final do Balanço Energético Nacional – BEN 2014. 2014. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/Estudos/Paginas/Balan%C3%A7o%20Energ%C3%A9tico%20Nacional%20E2%80%9320BEN/EPedispobilizaoRelat%C3%B3rioFinaldoBalan%C3%A7oEnerg%C3%A9ticoNacional%E2%80%9320BEN2014.asp>>. Acesso em: 31 dez 2014.

INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES DE LYON – INSA. 2016.

Disponível: <<https://www.insa-lyon.fr/>>. Acesso em: 21 ago. 2016 LE MONDE. Le diesel n'est pas seul responsable de la pollution automobile. 2015.

Disponível em: <[http://www.lemonde.fr/planete/article/2015/01/19/le-diesel-n-est-pas-seul-responsable-de-la-pollution-automobile\\_4558887\\_3244.html](http://www.lemonde.fr/planete/article/2015/01/19/le-diesel-n-est-pas-seul-responsable-de-la-pollution-automobile_4558887_3244.html)>. Acesso em: 15 mar. 2016.

FARIAS, A. C. M. Lubricidade de biodiesel e sua associação com a vibração e nível de pressão sonora oriundos do contato esfera-plano sob deslizamento alternado. Tese de Doutorado. 2015. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2015, 166 p.

FASTV6. My custom V6 4.2 delk performance motor. 1st FASTV6 . Illinois, 2007. Disponível em: <<http://www.1fastv6.com/Dieselectomy/>>. Acesso em: 24 nov. 2014.

FERGUSON, C. R.; KIRKPATRICK, A. T. Internal combustion engines: Applied thermosciences. 2ª edição, Ed. Wiley, 2001, 384 p.

GARCIA, R. Combustíveis e combustão industrial. Rio de Janeiro: Interciência, 2002, 202 p. 120

GHIJI, M.; GOLDSWORTHY, L.; BRANDNER, P. A.; GARANIYA, V.; HIELD, P. Numerical and experimental investigation of early stage diesel sprays. Fuel, vol 175, julho, 2016, pp. 274-286.

GUTIERREZ, M. Impact of the fuel Injection systems on the maritime and industrial requirements by the community. 2012. DUAP AG., Herzogenbuchsee, Switzerland, 35 p. Disponível: <<https://higherlogicdownload.s3.amazonaws.com/SNAME/e10ad46f-35fe-4b7d-a4cf-3da678bacc3f/UploadedImages/duap.pdf>>. Acesso em: 13 mar. 2014.

HEYWOOD, J. B. Internal combustion engine fundamentals. Ed. McGraw-Hill International, 1988, 930 p.

HUTCHINGS, I. M. Leonardo da Vinci's studies of friction. *Wear*, vol. 360-361, n° 15, agosto, 2016, pp. 51-66.

HUTCHINGS, I. M. **Tribology**: Fiction and wear of engineering materials. Cambridge: Edward Arnold, UK, 1992, 106 p.

LE MONDE. Le diesel n'est pas seul responsable de la pollution automobile. 2015. Disponível em: <[http://www.lemonde.fr/planete/article/2015/01/19/le-diesel-n-est-pas-seul-responsable-de-la-pollution-automobile\\_4558887\\_3244.html](http://www.lemonde.fr/planete/article/2015/01/19/le-diesel-n-est-pas-seul-responsable-de-la-pollution-automobile_4558887_3244.html)>. Acesso em: 15 mar. 2016.

LEONTISINIS, E. Óleo Diesel. In: Curso de informação sobre combustíveis e combustão. 11a ed., Rio de Janeiro: IBP, 1988, p. 65-77.

LI, Y.; TIAN, G.; XU, H. Application of biodiesel in automotive diesel engines. In: FANG, Zheng. Biodiesel – Feedstocks, production and applications. **InTech - Science, Technology and Medicine** open access publisher. ISBN 978-953-51-0910-5, dezembro, 2012.

LIMA, É. C. C. Mecanismos de desgaste, história térmica e ciclo de vida de componentes de um motor de combustão interna de aeromodelo. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2 volumes, 2010.

LIMA, É. C. C. Mecanismos de desgaste no pino, na cabeça do pistão na abóbada interna do cabeçote de um motor de combustão interna. In: MEDEIROS, J. T N. (editor). **TRIBLook** - volume A. Natal-RN-Brasil, Editora Universitária da UFRN, 2015. pp. 221-243.

MA, R.; STE GEMEIER, J.; LEVARD, C.; DALE, J. G.; NOACK, C. W., YANG, T.; BROWN JR., G. E.; LOWRY, G. V. Sulfidation of copper oxide nanoparticles and properties of resulting copper sulfide. *Environ. Science: Nano*, abril, vol. 1, 2014, 1, 347 - 357.

MAUGER, C.; MÉÈS, L.; MICHARD, M.; LANCE, M. Velocity measurements based on shadowgraph-like image correlations in a cavitating microchannel flow. **International Journal of Multiphase Flow**, vol. 58, 2014, pp. 301-312.

MAUGER, C.; MÉÈS, L.; MICHARD, M.; VALETTE, S. Experimental investigation of cavitating flow in 2D and 3D transparent diesel nozzle models. In: **International Conference and Exhibition Diesel Engines: Facing the competitiveness challenges**. 2010, Rouen, France.

MEDEIROS, J.T.N. **Fadiga de contato de discos metálicos não conformes submetidos a ensaio a seco de rolamento cíclico**. Tese de doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), São Paulo/SP, 2 volumes, 2002.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Balanço Energético Nacional 2013. 2013. Empresa de Pesquisa Energética. Disponível em: <<https://ben.epe.gov.br>>. Acesso em: 13 set. 2014.

NATIONAL ACADEMIES PRESS – NAP. Review of the Research Program of the Partnership for a New Generation of Vehicles: Seventh Report. 17th Report, Washington, D.C. (2001)

OLIVEIRA FILHO, M. F.; SILVA, L. C., LAGO, D. M.; MEDEIROS, J. T. N. Inspeção visual de motor estacionário de 5 hp após ensaios utilizando Biodiesel. In: MEDEIROS, JTN (editor). TRIBLook – volume A. Natal-RN-Brasil, Natal: Editora Universitária da UFRN, 2015. pp. 245-261.

OLIVEIRA FILHO, M. F. Análise da sensibilidade do biodiesel B5 em frotas de transporte coletivo com motorização diesel. Dissertação de Mestrado. . Programa de Pós- Graduação em Engenharia Mecânica. Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2011. 82 p.

MENANI, R. No passado e no presente, sempre uma alternativa. **Revista Biodiesel e Agronegócios**. Ed. Letra Boreal, vol. 1, nº 1, 2005.

PEREZ, L.; DECLERCQ, C.; IÑIGUEZ, C.; AGUILERA, I. et al. Chronic burden of near-roadway traffic pollution in 10 European cities (APHEKOM network). *European Respiratory Journal*. vol. 42, 2013, pp. 594-605.

PETROBRAS. Manual técnico Diesel S-50. 2012. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br>>. Acesso em: 15/10/2013.

QIU, T.; SONG, X.; LEI, Y. LAI, M.-C. Influence of inlet pressure on cavitation flow in diesel nozzle. *Applied Thermal Engineering*, vol. 109, part. A., agosto, 2016, pp. 364-372.

REIF, Z. High pressure common rail injector problem analysis. **Advanced Engineering**, vol. 3, 2009, pp. 103-116.

RTEC INSTRUMENTS. Tribology Applications. 2013. Products. Aplicaciones. RTEC Instruments. Disponível em: <<http://www.rtec-instruments.com/applications.htm>>. Acesso em: 03 mar. 2014.

SPALDING, D. B. A method for computing steady and unsteady flows possessing discontinuities of density. CHAM Report 910/2, Londres, 1974.

VAN WYLEN, G.; SONNTAG, R.; BORGNAKKE, C. **Fundamentos da Termodinâmica Clássica**. 5ª ed., São Paulo: Ed. Edgard Blücher, 1998, 244 p.





**LEONARDO CHAGAS DA SILVA** - Formado como Técnico em Mecânica Industrial pelo Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN), em 2010, com ênfase em Desenho técnico mecânico; Motores de combustão interna; Usinagem mecânica convencional. Engenheiro Mecânico formado pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), em 2012, com destaque na avaliação de manutenção e consumo de combustível em frotas de transporte coletivo. Possui o título de Mestre em Engenharia Mecânica pela UFRN (2015), com ênfase em Tribologia de motores de combustão interna e suas emissões. Concluiu o Doutorado em Engenharia Mecânica pela UFRN (2020), com expertise em ciências tribológicas, na relação entre alguns materiais que compõe o subsistema de injeção de combustível do tipo Common Rail - combustíveis - tratamento de superfície para melhoramento por meio de plasma. Atualmente técnico de laboratório do IFRN. Área de atuação em MCI, combustíveis e emissões, tratamento de superfície por meio de plasma, projetos mecânicos.

**MANOEL FERNANDES DE OLIVEIRA FILHO** - Professor Titular do IFRN. Possui graduação em engenharia mecânica pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN (1983) e especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho pela UFRN (1987). É mestre (2011) e doutor (2016) em Engenharia Mecânica pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFRN. Atualmente desenvolve pesquisa na área de Motores de Combustão Interna, Tribologia e Uso de Biodiesel.



# ENSAIOS TRIBOLÓGICOS COM BIODIESEL

ADITIVADO COM  
GLICERINA

 [www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)  
 [contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)  
 [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)  
 [www.facebook.com/atenaeditora.com.br](https://www.facebook.com/atenaeditora.com.br)

# ENSAIOS TRIBOLÓGICOS COM BIODIESEL

ADITIVADO COM  
GLICERINA

 [www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)  
 [contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)  
 [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)  
 [www.facebook.com/atenaeditora.com.br](https://www.facebook.com/atenaeditora.com.br)