



**PPGEM**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**ANÁLISE DO DESGASTE DE PARES TRIBOLÓGICOS  
METÁLICOS LUBRIFICADOS COM ÓLEO DE RÍCINO OU  
MINERAL**

**JACIANA SILVA DE SANTANA**

**NATAL -RN, ABRIL DE 2011**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**ANÁLISE DO DESGASTE DE PARES TRIBOLÓGICOS  
METÁLICOS LUBRIFICADOS COM ÓLEO DE RÍCINO OU  
MINERAL**

**JACIANA SILVA DE SANTANA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

**Orientador:** Prof. Dr. João Telésforo Nóbrega de Medeiros

**Co-Orientador:** Prof. Dr. Cleiton Rubens Formiga Barbosa

**NATAL - RN**

**2011**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**ANÁLISE DO DESGASTE DE PARES TRIBOLÓGICOS METÁLICOS  
LUBRIFICADOS COM ÓLEO DE RÍCINO OU MINERAL**

**JACIANA SILVA DE SANTANA**

**Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de**

**MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**sendo aprovada em sua forma final.**

---

**JOÃO TELÉSFORO NÓBREGA DE MEDEIROS – Orientador**



**PPGEM**



Seção de Informação e Referência  
Catalogação da Publicação na Fonte. UFRN / Biblioteca Central Zila Mamede

Santana, Jaciana Silva de.

Análise do desgaste de pares tribológicos metálicos lubrificadas com óleo de rícino ou mineral / Jaciana Silva de Santana. – Natal, RN, 2011.

147 f. : il.

Orientador: João Telésforo Nóbrega de Medeiros.

Co-orientador: Cleiton Rubens Formiga Barbosa.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

1. Desgaste – Dissertação. 2. Tribologia – Dissertação. 3. Óleo de Rícino – Dissertação. 4. Óleo SAE40 – Dissertação. 5. Lubrificação - Dissertação. I. Medeiros, João Telésforo Nóbrega de. II. Barbosa, Cleiton Rubens Formiga. III. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. IV. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 620.193.95

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

## DEDICATÓRIA

*Agradeço a Deus por permitir mais uma vitória em minha vida e por ter me concebido uma família magnífica, a qual dedico todo o êxito deste trabalho. Assim, dedico ao meu pai **Antonio** e a minha mãe **Yolanda** puras fontes de sabedoria, aos meus irmãos **Marcos**, **Everton** e **Janaina** com quem estou aprendendo a arte da paciência. Agradeço por me ensinarem a nunca desistir e a nunca desanimar diante de um obstáculo.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a meu Orientador, Prof. Dr. João Telésforo Nóbrega de Medeiros pela credibilidade, ensinamentos da área de elementos de máquinas e tribologia, e oportunidade de ingresso e contribuições no desenvolvimento da pesquisa. Ao Prof. Dr. Cleiton Rubens Formiga Barbosa, co-orientador, pelo incentivo e discussão do trabalho.

Às doutorandas MSc. Janaina Silva de Santana, minha querida irmã, e a minha amiga a MSc. Aline Cristina Mendes de Farias pelo companheirismo e contribuições no desenvolvimento do trabalho. Ao MSc. Marcos Silva de Santana, meu irmão e conselheiro, pela ajuda quanto à configuração do equipamento utilizado nos ensaios tribológicos.

Ao Prof. Dr. Luiz Guilherme Meira de Souza, pela amizade e palavras sinceras e de incentivo à superação. Ao Grupo de Estudos de Tribologia e Integridade Estrutural – GET, no qual participei no período de outubro de 2003 a julho de 2005 como aluna de graduação e no período de 2007 até os dias de hoje como aluna de mestrado. À Délia, secretária do GET, pela amizade, carinho e gentileza sempre presentes.

Aos integrantes do GET, especialmente ao graduando em engenharia mecânica Jarbas Santos Medeiros, pela colaboração quanto à instalação do programa de aquisição de dados vibracionais e ao mestrando Fernando Nunes da Silva por me ensinar a utilizar o programa de análises de DRX.

Aos funcionários do Laboratório de Máquinas Operatrizes do NTI/UFRN, principalmente ao Técnico Elmar Damasceno, pela grandiosa colaboração nas etapas de confecção dos corpos-de-prova e, também, pelo empréstimo de algumas de suas ferramentas de trabalho.

Ao Coordenador do Curso de Engenharia Elétrica, Prof. Dr. Caio Dorneles Cunha, pelo empréstimo do inversor de frequência pertencente ao Laboratório de Máquinas e Controle do NTI/UFRN.

Ao Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Barra e seu graduando em engenharia de materiais Igor Jefferson Cabral Araújo, pela utilização do microscópio óptico do Laboratório de Caracterização de Materiais.

Ao Técnico do Laboratório de Tecnologia de Tensoativos e de Processos de Separação do NIT/UFRN, MSc. João Batista Sousa Costa, pela colaboração na realização dos ensaios físico-químicos dos óleos lubrificantes.

Ao Prof. Dr. Carlos Alberto Paskocimas, por permitir a utilização do forno Mufla, para tratamentos térmicos, pertencente ao Laboratório de Cerâmica.

Ao Prof. Dr. Valter José Fernandes Júnior, Laboratório de Combustíveis e Lubrificantes da UFRN e à sua Técnica, Camila Gisele Damasceno Peixoto, pela dedicação, atenção e execução de ensaios de ponto de fulgor e viscosidade dos lubrificantes. Ao Professor Walter Link, ao Técnico Raiff Costa Ramalho e ao aluno de graduação em Engenharia Mecânica Tiago Pires Gurgel integrante do Laboratório de Metrologia da UFRN.

À instituição Universidade Federal do Rio Grande do Norte, pela oportunidade de formação social e intelectual prestadas à sociedade e preparação de seus formados para o mercado de trabalho. Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM, pela oportunidade dada à realização do meu mestrado e pelo apoio financeiro das análises de MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura).

À Agência Nacional de Petróleo e Gás Natural e Biocombustíveis – ANP por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP pela ajuda financeira em forma de bolsa de estudo num período de 24 meses e ao Prof. Dr. Carlos Magno de Lima, pela coordenação prestada.

Muito Obrigada.

Que Deus abençoe a todos.

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>I</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>VI</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....</b>	<b>VII</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS .....</b>	<b>VIII</b>
<b>RESUMO X</b>	
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>XI</b>
<b>1. Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1. OBJETIVO GERAL.....	3
1.1.1. Objetivos Específicos .....	3
1.2. PRODUÇÃO CIENTÍFICA.....	4
<b>2. Revisão Bibliográfica.....</b>	<b>5</b>
2.1. PRINCÍPIOS DA TRIBOLOGIA.....	5
2.2. O ATRITO .....	5
2.2.1. Tipos de Atrito.....	8
2.3. O DESGASTE.....	9
2.3.1. Tipos de Desgaste.....	10
2.4. NATUREZA DA SUPERFÍCIE .....	12
2.5. EMISSÃO ACÚSTICA E VIBRACIONAL.....	15
2.6. LUBRIFICAÇÃO .....	16
2.6.1. Equação de Reynolds .....	18
2.6.2. Lei de Newton para Fluidos Viscosos .....	19
2.6.3. Regimes de Lubrificação .....	20
2.6.4. Rodopio no óleo Lubrificante.....	24
2.7. PROPRIEDADES DOS LUBRIFICANTES .....	25
2.7.1. Viscosidade.....	25
2.7.2. Relação entre Viscosidade e Temperatura.....	28
2.7.3. Massa Específica .....	29
2.7.4. Ponto de Fulgor .....	29
2.7.5. Acidez.....	30
2.7.6. Ponto de Névoa e Ponto de Fluidez.....	30

2.8. PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS LUBRIFICANTES .....	30
2.8.1. Calor Específico .....	30
2.8.2. Condutividade Térmica .....	31
2.8.3. Difusividade Térmica .....	32
2.9. ÓLEO MINERAL .....	32
2.10. ÓLEO GRAXO.....	33
2.11. NÚMERO DE PECLLET .....	33
<b>3. Materiais e Métodos .....</b>	<b>36</b>
3.1. OS METAIS .....	36
3.1.1. Aço AISI 1045.....	37
3.1.2. Liga de Alumínio 6261 .....	37
3.1.3. Bronze TM-23 .....	39
3.2. OS ÓLEOS .....	39
3.2.1. Óleo SAE 40.....	40
3.2.2. Óleo de Rícino .....	40
3.3. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS METÁLICOS .....	43
3.3.1. Análise Metalográfica.....	43
3.3.2. Medidas de Rugosidade e Ondulação.....	46
3.3.3. Medidas de Dureza .....	47
3.4. CARACTERIZAÇÃO DOS ÓLEOS LUBRIFICANTES .....	49
3.4.1. Viscosidade.....	49
3.4.2. Massa específica .....	51
3.4.3. Ponto de Fulgor .....	52
3.4.4. Acidez.....	54
3.5. A MÁQUINA DE ENSAIO TRIBOLÓGICO .....	55
3.5.1. Ensaio Tribológicos .....	59
<b>4. Resultados e Discussão .....</b>	<b>61</b>
4.1. ESTIMATIVA DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS LUBRIFICANTES .....	61
4.2. ESTIMATIVA DO NÚMERO DE PECLLET .....	62
4.3. CALOR DISSIPADO, NÍVEL DE PRESSÃO SONORA E RESPOSTA VIBRACIONAL DO SISTEMA. ....	66
4.4. TAXA DE DESGASTE. ....	79
4.5. IMAGENS OBTIDAS POR MEV.....	81
<b>5. Conclusões .....</b>	<b>93</b>

<b>6. Sugestões.....</b>	<b>94</b>
<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>95</b>
<b>Apêndice A .....</b>	<b>100</b>
Portaria ANP N°129-1999.....	100
<b>Apêndice B .....</b>	<b>106</b>
MAPEAMENTO DO NÍVEL DE PRESSÃO SONORA .....	106
<b>Apêndice C .....</b>	<b>108</b>
CALIBRAÇÃO DOS TERMOPARES.....	108
<b>Apêndice D .....</b>	<b>111</b>
Tratamento Térmico do aço AISI 1045.....	111
<b>Apêndice E .....</b>	<b>112</b>
Rugosidade (Ra, Rq) e Ondulação (Wa, Wq) dos corpos-de-prova em $\mu\text{m}$ .....	112
(a) Pinos de Aço AISI 1045 Temperado e Revenido. ....	112
(b) Pinos de Alumínio 6261. ....	114
(c) Pinos de Bronze TM-23. ....	116
<b>Apêndice F.....</b>	<b>119</b>
RUGOSIDADE (RA, RQ) E ONDULAÇÃO (WA, WQ) DOS CONTRACORPOS EM $\mu\text{M}$ .....	119
(a) Hastes de Aço AISI 1045 Temperado e Revenido.....	119
<b>Apêndice G .....</b>	<b>126</b>
PROPRIEDADES TÉRMICAS DE LUBRIFICANTES .....	126
<b>Apêndice H.....</b>	<b>127</b>
TAXA DE DESGASTE .....	127

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema da força de atrito atuando em um bloco. ....	6
Figura 2 – Diagrama esquemático ilustrando o modelo de Coulomb para o atrito de deslizamento (HUTCHINGS, 1992). ....	7
Figura 3 – Modelo de Atrito por Crescimento de Junção (Adaptado de HUTCHINGS, 1992). ....	7
Figura 4 – Esquema dos modos de desgaste abrasivo (a) a dois-corpos e (b) a três-corpos (Adaptado de HUTCHINGS, 1992). ....	11
Figura 5 – Textura da superfície [Adaptado de Anônimos (1985), ANSI/ASME <i>Apud BHUSHAN (2001)</i> ]. ....	13
Figura 6 – Esquema de um perfil de rugosidade (Adaptado de BHUSHAN, 2001). ....	14
Figura 7 – Diagrama esquemático da aplicação de sensores em comparação com o nível de precisão [DORNFELD (1999) <i>Apud JUN (2004)</i> ]. ....	15
Figura 8 – Contato Conforme representado em (a) e Contato Não – Conforme representado em (b) (ASM HANDBOOK, v. 18, 1992). ....	17
Figura 9 – Equilíbrio de um elemento infinitesimal. ....	19
Figura 10 – Superfície em movimento (MARGUITU, 2001). ....	20
Figura 11 – Formas do regime de lubrificação (Adaptado de BHUSHAN, 2001). ....	21
Figura 12 – Curva de Stribeck [Adaptado de BHUSHAN, 2001]. ....	22
Figura 13 – Limite de carga e velocidade para um mancal (DOWSON, 1997). ....	25
Figura 14 – Classificação API para nível de desempenho de motores Diesel (Fonte: <a href="http://www.lubrificantes.net">www.lubrificantes.net</a> ) ....	28
Figura 15 – Viscosidade Dinâmica versus Temperatura para alguns óleos SAE [STACHOWIAK e BATCHELOR (1996)]. ....	29
Figura 16 – Geometrias de contato circular, quadrado e linear [STACHOWIAK e BATCHELOR (1996)]. ....	34
Figura 17 – Perfil de temperatura friccional para baixos e altos números de Peclet [STACHOWIAK e BATCHELOR (1996)]. ....	35
Figura 18 – Hastes de aço AISI 1045. ....	36
Figura 19 – Pinos de aço AISI 1045, bronze TM-23 e alumínio L6261. ....	37
Figura 20 – Aspecto visual da turbidez dos óleos de rícino e SAE 40 utilizados. ....	40

<b>Figura 21 – Fruto da Ricinus Communis.....</b>	<b>41</b>
<b>Figura 22 – Representação esquemática do método de lixamento (ROHDE, 2010). .....</b>	<b>43</b>
<b>Figura 23 – Imagem de MO do aço AISI 1045 sem tratamento térmico, apresentando uma microestrutura predominantemente perlítica. Ataque: Nital 2%. .....</b>	<b>44</b>
<b>Figura 24 – Imagem de MO do aço AISI 1045 após têmpera e revenido, apresentando microestrutura martensítica. Ataque: Nital 2%.....</b>	<b>44</b>
<b>Figura 25 – Imagem de MO da liga de alumínio 6261, apresentando fase do composto intermetálico de FeAl<sub>3</sub> (partículas escuras). Ataque: Keller.....</b>	<b>45</b>
<b>Figura 26 – Imagem de MO do bronze TM-23, apresentando nódulos de óxidos de cobre Cu<sub>2</sub>O (partículas escuras). Ataque: Ácido acético (acidez volátil = 4,4%). .....</b>	<b>45</b>
<b>Figura 27 – Rugosímetro Taylor Hobson Precision Surtronic 25.....</b>	<b>46</b>
<b>Figura 28 – Contra-corpo: zonas S1, S2, ..., S9 após torneamento e lixamento (a), em cujas geratrizes às direções 12h, 3h, 6h, 9h (b), foram tomadas as medidas de rugosidade e ondulação.....</b>	<b>46</b>
<b>Figura 29 – Durômetro de marca Panambra.....</b>	<b>48</b>
<b>Figura 30 – Viscosímetro modelo TVB 445.....</b>	<b>50</b>
<b>Figura 31 – Viscosidade cinemática dos óleos SAE para motores [Adaptado de STACHOWIAK e BATCHELOR (1996)]......</b>	<b>51</b>
<b>Figura 32 – Densímetro marca Anton Paar DMA 4500M.....</b>	<b>52</b>
<b>Figura 33 – Aparelho Petrotest. ....</b>	<b>53</b>
<b>Figura 34 – pHmetro Digimed DM-23.....</b>	<b>54</b>
<b>Figura 35 – Equipamento de ensaio tribológico revestido com isopor. ....</b>	<b>56</b>
<b>Figura 36 – Equipamento de ensaio tribológico revestido com isopor e espuma acústica D45 (a), e visão geral do equipamento em funcionamento (b).....</b>	<b>56</b>
<b>Figura 37 – Decibelímetro Impac SL – 4012.....</b>	<b>57</b>
<b>Figura 38 – Detalhe do contato entre corpo-de-prova e contracorpo.....</b>	<b>58</b>
<b>Figura 39 – Critério de severidade de vibração normalizado (manual da TEKNIKAO). .....</b>	<b>58</b>
<b>Figura 40 – Propriedades térmicas dos lubrificantes (a) calor específico, (b) condutividade térmica e, (c) difusividade térmica.....</b>	<b>62</b>
<b>Figura 41 – Mapa de desgaste para aços na configuração pino-sobre-disco na condição não lubrificada (HUTCHINGS, 1992). .....</b>	<b>65</b>

<b>Figura 42 – Mapa de desgaste para carga de 9N.....</b>	<b>65</b>
<b>Figura 43 – Mapa de desgaste para carga de 20N.....</b>	<b>66</b>
<b>Figura 44 – Gráfico do aquecimento a 3 mm do contato, (a) em função das janelas temporais e (b) correlação exponencial, para carga de 9N, corpo-de-prova de alumínio 6261 lubrificadas com óleo de rícino e óleo SAE 40. ....</b>	<b>67</b>
<b>Figura 45 – Gráficos (a) do nível de pressão sonora (NPS) e (b) velocidade global de vibração (VGV), para carga de 9N e corpo-de-prova de alumínio 6261 lubrificado com óleo de rícino e óleo SAE 40.....</b>	<b>68</b>
<b>Figura 46 – Gráfico do aquecimento a 3 mm do contato, (a) em função das janelas temporais e (b) correlação exponencial, para carga de 9N, corpo-de-prova de bronze TM-23 lubrificado com óleo de rícino e óleo SAE 40. ....</b>	<b>69</b>
<b>Figura 47 – Gráficos (a) do nível de pressão sonora (NPS) e (b) velocidade global de vibração (VGV), para carga de 9N e corpo-de-prova de bronze TM-23 lubrificado com óleo de rícino e óleo SAE 40.....</b>	<b>70</b>
<b>Figura 48 – Gráfico do aquecimento a 3 mm do contato, (a) em função das janelas temporais e (b) correlação exponencial, para carga de 9N, corpo-de-prova de aço AISI 1045 lubrificado com óleo de rícino e óleo SAE 40.....</b>	<b>71</b>
<b>Figura 49 – Gráficos (a) do nível de pressão sonora (NPS) e (b) velocidade global de vibração (VGV), para carga de 9N e corpo-de-prova de aço AISI 1045 lubrificado com óleo de rícino e óleo SAE 40.....</b>	<b>72</b>
<b>Figura 50 – Gráfico do aquecimento a 3 mm do contato, (a) em função das janelas temporais e (b) correlação exponencial, para carga de 20N, corpo-de-prova de alumínio 6261 lubrificadas com óleo de rícino e óleo SAE 40. ....</b>	<b>74</b>
<b>Figura 51 – Gráficos (a) do nível de pressão sonora (NPS) e (b) velocidade global de vibração (VGV), para carga de 20N e corpo-de-prova de alumínio 6261 lubrificado com óleo de rícino e óleo SAE 40.....</b>	<b>75</b>
<b>Figura 52 – Gráficos do aquecimento a 3 mm do contato, (a) em função das janelas temporais e (b) correlação exponencial, para carga de 20N, corpo-de-prova de bronze TM-23 lubrificadas com óleo de rícino e óleo SAE 40.....</b>	<b>76</b>
<b>Figura 53 – Gráficos (a) do nível de pressão sonora (NPS) e (b) velocidade global de vibração (VGV), para carga de 20N e corpo-de-prova de bronze TM-23 lubrificado com óleo de rícino e óleo SAE 40.....</b>	<b>77</b>

<b>Figura 54 – Gráfico do aquecimento a 3 mm do contato, (a) em função das janelas temporais e (b) correlação exponencial, para carga de 20N, corpo-de-prova de aço AISI 1045 lubrificadas com óleo de rícino e óleo SAE 40. ....</b>	<b>78</b>
<b>Figura 55 – Gráficos, (a) NPS e (b) velocidade global de vibração, para carga de 20N e corpo-de-prova de aço AISI 1045 lubrificado com óleo de rícino e óleo SAE 40.....</b>	<b>79</b>
<b>Figura 56 – Gráfico da Taxa de Desgaste para carga de 9N de óleos de Rícino e SAE 40. ....</b>	<b>80</b>
<b>Figura 57 – Taxa de Desgaste para carga de 20N e óleos de Rícino e SAE 40.....</b>	<b>81</b>
<b>Figura 58 (a) – Imagens obtidas por MEV para carga de 9N utilizando óleo de Rícino e corpo-de-prova de Alumínio 6261.....</b>	<b>81</b>
<b>Figura 58 (b) e (c) – Imagens obtidas por MEV para carga de 9N utilizando óleo de Rícino e corpo-de-prova de Alumínio 6261.....</b>	<b>82</b>
<b>Figura 59 (a) – Imagens obtidas por MEV para uma carga de 9N utilizando óleo SAE 40 e corpo-de-prova de Alumínio 6261. ....</b>	<b>83</b>
<b>Figura 60 (b) e (c) – Imagens obtidas por MEV para carga de 9N utilizando óleo SAE 40 e corpo-de-prova de Alumínio 6261. ....</b>	<b>84</b>
<b>Figura 61 – Imagens obtidas por MEV para carga de 9N utilizando óleo de Rícino e corpo-de-prova de Bronze TM-23.....</b>	<b>85</b>
<b>Figura 62 – Imagens obtidas por MEV para carga de 9N utilizando óleo SAE 40 e corpo-de-prova de Bronze TM-23.....</b>	<b>85</b>
<b>Figura 63 – Imagens obtidas por MEV para carga de 9N utilizando óleo de Rícino e corpo-de-prova de aço AISI 1045.....</b>	<b>86</b>
<b>Figura 64 – Imagens obtidas por MEV para carga de 9N utilizando óleo SAE 40 e corpo-de-prova de aço AISI 1045.....</b>	<b>87</b>
<b>Figura 65 – Imagens obtidas por MEV para carga de 20N utilizando óleo de Rícino e corpo-de-prova de Alumínio 6261. ....</b>	<b>88</b>
<b>Figura 66 – Imagens obtidas por MEV para carga de 20N utilizando óleo SAE 40 e corpo-de-prova de Alumínio 6261.....</b>	<b>88</b>
<b>Figura 67 – Imagens obtidas por MEV para carga de 20N utilizando óleo de Rícino e corpo-de-prova de Bronze TM-23.....</b>	<b>89</b>
<b>Figura 68 – Imagens obtidas por MEV para carga de 20N utilizando óleo SAE 40 e corpo-de-prova de Bronze TM-23.....</b>	<b>90</b>

<b>Figura 69 – Imagens obtidas por MEV para carga de 20N utilizando óleo de Rícino e corpo-de-prova de aço AISI 1045.....</b>	<b>91</b>
<b>Figura 70 – Imagens obtidas por MEV para carga de 20N utilizando óleo SAE 40 e corpo-de-prova de aço AISI 1045.....</b>	<b>92</b>
<b>Figura (A): Vista de topo da máquina de ensaio, demonstrando a região de posicionamento do decibelímetro.....</b>	<b>106</b>
<b>Figura (B): Decibelímetro na região 5.....</b>	<b>106</b>
<b>Figura (C): Forno para calibração de termopares por comparação.....</b>	<b>108</b>
<b>Figura (D): Calibrador digital de temperatura de bloco seco, marca Presys T-350P....</b>	<b>109</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> – Poluentes atmosféricos, <i>apud</i> CIMM (2010).....	<b>1</b>
<b>Tabela 2</b> – Classificação SAE para viscosidade (MARGHITU, 2001).....	<b>27</b>
<b>Tabela 3</b> – Classificação os óleos lubrificantes (HILSDORF <i>et al.</i> , 2004).....	<b>32</b>
<b>Tabela 4</b> – Equivalência entre normas para ligas de alumínio (BUZINELLI, 2000).....	<b>38</b>
<b>Tabela 5</b> – Elementos de composição das ligas de alumínio (ASHBY e JONES, 1998).....	<b>38</b>
<b>Tabela 6</b> – Composição do óleo de rícino [EMBRAPA <i>Apud</i> PERES, (2008)]. .....	<b>42</b>
<b>Tabela 7</b> – Propriedade físico-químicas do óleo do de rícino. ....	<b>42</b>
<b>Tabela 8</b> – Valor médio e desvio padrão da rugosidade e ondulação dos materiais metálicos em $\mu\text{m}$ .....	<b>47</b>
<b>Tabela 9</b> – Valores médios de dureza HRB, HRC e HB do aço AISI 1045. ....	<b>49</b>
<b>Tabela 10</b> – Valores médios de dureza Brinell do alumínio 6261 e bronze TM-23.....	<b>49</b>
<b>Tabela 11</b> – Valores de viscosidade cinemática do óleo de rícino e óleo SAE 40. ....	<b>50</b>
<b>Tabela 12</b> – Valores de viscosidade dinâmica do óleo de rícino e óleo SAE 40.....	<b>51</b>
<b>Tabela 13</b> – Valores médios de massa específica do óleo de rícino e óleo SAE 40.....	<b>52</b>
<b>Tabela 14</b> – Ponto de fulgor do óleo de rícino.....	<b>53</b>
<b>Tabela 15</b> – Ponto de fulgor do óleo SAE 40. ....	<b>54</b>
<b>Tabela 16</b> – Acidez do óleo de rícino e do óleo SAE 40.....	<b>55</b>
<b>Tabela 17</b> – Parâmetro dos Ensaio de Deslizamento. ....	<b>59</b>
<b>Tabela 18</b> – Número de Peclet para o óleo de rícino com carga de 9N.....	<b>63</b>
<b>Tabela 19</b> – Número de Peclet para óleo SAE 40 com carga de 9N. ....	<b>63</b>
<b>Tabela 20</b> – Número de Peclet para o óleo de rícino com carga de 20N.....	<b>63</b>
<b>Tabela 21</b> – Número de Peclet para o óleo SAE 40 com carga de 20N. ....	<b>64</b>
<b>Tabela (A)</b> – Nível de pressão sonora para revestimento com isopor e para revestimento com isopor e espuma acústica D45.....	<b>107</b>
<b>Tabela (B)</b> – Calibração Termopar TP 13. ....	<b>109</b>
<b>Tabela (C)</b> – Calibração Termopar TP 14. ....	<b>110</b>
<b>Tabela (D)</b> – Calibração Termopar TP 15 .....	<b>110</b>
<b>Tabela (E)</b> – Valores obtidos para o óleo de rícino. ....	<b>126</b>
<b>Tabela (F)</b> – Valores obtidos para o óleo SAE 40.....	<b>126</b>
<b>Tabela (G)</b> – Valores obtidos para o cálculo da taxa de desgaste para carga de 9N.....	<b>127</b>
<b>Tabela (H)</b> – Valores obtidos para o cálculo da taxa de desgaste para carga de 20N.....	<b>128</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>AISI</b>	- American Iron and Steel Institute
<b>ANP</b>	- Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
<b>ANSI</b>	- American National Standards Institute
<b>API</b>	- American Petroleum Institute
<b>ASME</b>	- American Society of Mechanical Engineers
<b>ASTM</b>	- American Society for Testing and Materials
<b>DIN</b>	- Deutsches Institut für Normung
<b>DRX</b>	- Energia Dispersiva de Raios-X
<b>HB</b>	- Dureza Brinell
<b>HRB</b>	- Dureza Rockwell B
<b>HRC</b>	- Dureza Rockwell C
<b>MEV</b>	- Microscópio Eletrônico de Varredura
<b>MO</b>	- Microscópio Óptico
<b>NPS</b>	- Nível de Pressão Sonora
<b>Ra</b>	- Rugosidade Aritmética Média
<b>RMS</b>	- Root Mean Square
<b>RPM</b>	- Rotação por Minuto
<b>Rq</b>	- Rugosidade Média Quadrática (ou Rrms – root mean square)
<b>Rt</b>	- Rugosidade Total
<b>SI</b>	- Sistema Internacional de Unidades
<b>SAE</b>	- Society of Automotive Engineers
<b>SiC</b>	- Carboneto de Silício
<b>VGv</b>	- Velocidade Global de Vibração
<b>Wa</b>	- Ondulação Aritmética Média
<b>Wq</b>	- Ondulação Média Quadrática

## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
<b>2.2</b>	<b>O Atrito</b>	–
$\mu$	- Coeficiente de Atrito	(Adimensional)
$F$	- Força de Atrito	$N$
$N$	- Carga Normal	$N$
$\tau$	- Tensão Cisalhante	$Pa, N/m^2$
$P$	- Carga Normal	$N$
$W$	- Carga Normal Constante	$N$
<b>2.3</b>	<b>O Desgaste</b>	–
$\kappa$	- Taxa de Desgaste Específica	$m^2/N$
$v$	- Volume do Material Desgastado	$m^3$
$W$	- Carga Normal Aplicada	$N$
$L$	- Distância de Deslizamento Total	$m$
<b>2.4</b>	<b>Natureza da Superfície</b>	–
$x$	- Comprimento de Varredura	$mm$
$z$	- Altura do Perfil	$mm$
<b>2.6.2</b>	<b>Lei de Newton para Fluidos Viscosos</b>	–
$S$	- Espessura do Filme Lubrificante	$m$
$F$	- Força de Deformação do Filme	$N$
$v$	- Velocidade Linear	$m^2/s$
$\tau$	- Tensões Cisalhantes	$Pa, N/m^2$
$y$	- Distância da Superfície	$M, cm, mm$
$\mu$	- Viscosidade Dinâmica ou Absoluta	$Cp, Pl$
<b>2.6.3</b>	<b>Regimes de Lubrificação</b>	–
$\eta$	- Viscosidade	$Pa.s$
$S$	- Número de Sommerfeld	(Adimensional)
$N$	- Velocidade Angular	$rps$
$p$	- Pressão Média de Contato	$Pa$
$h_{min}$	- Espessura do Filme Lubrificante	$mm, \mu m$
$\lambda$	-Relação entre Espessura do Filme Lubrificante e a Rugosidade	–
<b>2.7.1</b>	<b>Viscosidade</b>	–

$\mu$	- Viscosidade Dinâmica	$cP, Pl, Pa.s$
$\tau$	- Tensão Cisalhante	$N/m^2$
$D$	- Taxa de Cisalhamento	$s^{-1}$
$\rho$	- Massa Específica	$Kg/m^3, g/cm^3, Kg/L$
$\nu$	- Viscosidade Cinemática	$mm^2/s, cSt$
<b>2.8.1</b>	<b>Calor Específico</b>	–
$\sigma$	- Calor Específico	$kJ/Kg.K$
$\theta$	- Temperatura de Interesse	$^{\circ}C$
$S$	- Densidade Relativa	$^{\circ}C$
<b>2.8.2</b>	<b>Condutividade Térmica</b>	–
$K$	- Condutividade Térmica	$W/m.K$
$\theta$	- Temperatura de Interesse	$^{\circ}C$
$S$	- Densidade Relativa	$^{\circ}C$
<b>2.8.3</b>	<b>Difusividade Térmica</b>	–
$\chi$	- Difusividade Térmica	$m^2/s$
$K$	- Condutividade Térmica	$W/m.K$
$\rho$	- Massa Específica	$Kg/m^3$
$\sigma$	- Calor Específico	$kJ/Kg.K$
<b>2.9.4</b>	<b>Número de Peclet</b>	–
$U$	- Velocidade de um sólido	$m/s$
$a$	- Dimensão do Contato	$m$
$\chi$	- Difusividade Térmica	$m^2/s$
$L$	- Número de Peclet	–
<b>3.3.3</b>	<b>Medida de Dureza</b>	–
$F$	- Carga Aplicada	$Kgf$
$D$	- Diâmetro da Esfera	$mm$
$d$	- Diâmetro de Impressão	$mm$

## RESUMO

Avaliou-se, neste trabalho, o desempenho tribológico de um óleo biodegradável de rícino em comparação ao óleo comercial SAE 40, através do desgaste lubrificado de metais existentes no mercado, alumínio 6261, bronze TM-23 e aço trefilado AISI 1045 temperado e revenido. Os ensaios foram realizados em um tribômetro de deslizamento concebido para explorar o desgaste dos corpos-de-prova metálicos. A carga normal aplicada no contato foi de 9 N e 20 N, a velocidade relativa e a distância de deslizamento foram, respectivamente 0,83 m/s e 6 Km, determinados após ensaios exploratórios iniciais. O aquecimento do sistema, devido ao atrito de deslizamento, foi monitorado utilizando termopares tipo K, localizados a  $3,0\pm 0,5$  mm de distância do contato. O monitoramento complementar foi realizado através de sensores que medem o nível de pressão sonora (NPS) e a velocidade global de vibração (VGV) do sistema. Os materiais metálicos foram previamente caracterizados através de medidas de rugosidade, dureza, análise metalográfica e DRX. Medidas de massa específica, viscosidade, ponto de fulgor e acidez foram realizadas para caracterizar os óleos lubrificantes. Os mecanismos de desgaste das superfícies metálicas foram analisados por Microscopia Óptica (MO) e Eletrônica de Varredura (MEV). Os resultados de aquecimento a 3 mm do contato apresentam melhores resultados para o óleo de rícino.

**Palavras-chave:** Tribologia, Desgaste, Lubrificação, Óleo de Rícino, Óleo SAE 40.

## ABSTRACT

In this study was evaluated the tribological performance of biodegradable ricin oil compared to the commercial oil SAE 40 through the test lubricated wear of metals existing in the market, such as aluminum 6261, bronze TM-23 and AISI 1045 steel quenched and tempered. All tests were performed in a tribometer sliding wear designed to explore the wear of the metallic sample. The normal load applied in this work was 9N and 20N, the relative velocity and sliding distance were respectively 0.83 m/s and 6 Km, both determined after initial exploratory experiments. The heating system due the sliding friction was monitored using thermocouples type K, located to  $3\pm 0,5$  mm from the contact. Additional monitoring was performed through of sensors that measure the sound pressure level (NPS) and the global speed of vibration (VGV) to the system. Metallic materials were previously characterized through measures of roughness, hardness, metallographic analysis and DRX. Density measurements, viscosity, flash point and acidity were performed to characterize the oil lubricants. The wear mechanisms on metal surfaces were analyzed by optic (OM) and scanning electron microscopy (SEM). The results of heating at 3 mm from the contact show better results for the ricin oil.

**Keywords:** Tribology, Wear, Lubrication, Ricin Oil, SAE 40 Oil.

## 1. INTRODUÇÃO

Pressões por parte de ambientalistas têm estimulado pesquisas visando à extensão do campo de aplicação dos óleos vegetais. Os resíduos de óleo lubrificante de origem fóssil descartados no meio ambiente provocam impactos negativos, tais como: contaminação dos corpos de água e do solo por metais pesados, com os conseqüentes danos á saúde da população (PETROBRAS, 2009).

Segundo Stoeterau (2004), essa preocupação ecológica surgiu nos anos 90, e teve seus reflexos na tribologia, onde a necessidade por sistemas ainda mais eficientes, principalmente no sentido de redução de emissão de poluentes, emissão de ruído e consumo de lubrificantes, levaram ao desenvolvimento de lubrificantes e sistemas de lubrificação ecologicamente corretos.

Diante de várias fontes causadoras de poluição oriundas do petróleo, verifica-se também que algumas estão relacionadas ao sistema automotivo. A **Tabela (1)**, lista alguns dos principais poluentes atmosféricos.

**Tabela 1** – Poluentes atmosféricos, *apud* CIMM (2010).

<b>Denominação</b>	<b>Característica</b>	<b>Fontes Principais</b>
SO <sub>2</sub> (dióxido de enxofre)	Poluente mais característico dos aglomerados industriais. Produto da combustão dos fluidos-óleos e do carvão.	Atividades industriais. Queima de óleos combustíveis de veículos automotores.
NO <sub>x</sub> (óxidos de nitrogênio)	Gás emitido principalmente por motores de veículos automobilísticos.	Atividades industriais. Veículos Automotores.
Poeira e Fumaça negra	Partículas sólidas em suspensão no ar (carbono emitido na forma livre), provenientes da combustão ou de certos processos industriais. Os veículos diesel respondem pela emissão de fumaça negra.	
CO (Monóxido de carbono)	Proveniente essencialmente do funcionamento de veículos motores a explosão.	Veículos Automotores.
Pb (chumbo)	Metal tóxico emitido pela reação de aditivos no combustível.	

As condições de lubrificação influenciam fortemente na interação dos componentes e, conseqüentemente, comprometem a vida útil do sistema. Neste sentido, a utilização de óleos lubrificantes em sistemas mecânicos tem a finalidade de reduzir o atrito, e, atuar contra a aceleração do desgaste (BHUSHAN, 2001).

Além das exigências relacionadas à sua função de lubrificar o sistema, os óleos lubrificantes, do ponto de vista ambiental, devem ser biodegradáveis e, por isso, a busca por recursos renováveis é cada vez mais importante e necessária para garantir a segurança energética e a proteção ambiental (AGARWAL *et al.*, 2008).

A biodegradação é a capacidade metabólica de microorganismos em mineralizar ou transformar contaminantes orgânicos em substâncias não nocivas, que são então integrados ao ciclo biogeoquímicos naturais (MARGESIN e SCHINNER, 2001).

Devido à facilidade de adaptação da planta *ricinus communis* (mamona) ao clima nordestino do Brasil (semi-árido) e necessidade da diversificação e ampliação da matriz energética de forma a atender as demandas de mercado, o governo tem incentivado seu cultivo por meio de ações diretas, como: financiamento bancário, de empresas estatais e de economia mista. Dessa forma, o cultivo dessa planta cumpriria os papéis de produção energética e de geração de renda também para famílias pobres de zonas semi-áridas (SOUZA *et al.*, 2007).

Visando à aplicação de óleos biodegradáveis como lubrificantes em substituição aos óleos minerais, foi estudado o comportamento tribológico do óleo de rícino, oriundo de fonte vegetal (planta *ricinus communis*), comparando-se ao do óleo SAE 40 utilizado em motores diesel.

As hipóteses investigada deste trabalho são:

- 1- ***“a viscosidade do óleo lubrificante influi não linearmente na lubricidade e no desgaste de um par tribológico metal-metal submetido a um contato conforme ou não conforme de deslizamento”***.
- 2- ***“as assinaturas dos sinais do aquecimento do contato, velocidade global de vibração, nível e pressão sonora e mecanismos de desgaste dos materiais são respostas tribológicas que da natureza do contato”***.

Além desta introdução, o presente trabalho está subdividido em seis Capítulos, sete apêndices. O Capítulo 2 apresenta uma ***Revisão Bibliográfica*** dos conceitos tribológicos. No Capítulo 3 são apresentados os ***Materiais e Métodos*** utilizados no desenvolvimento do trabalho. No Capítulo 4 são apresentados os ***Resultados e Discussão*** dos ensaios tribológicos

realizados. Nos Capítulos 5 e 6 são apresentadas, respectivamente, as *Conclusões* e as *Sugestões de trabalhos futuros*, seguidos da *Bibliografia* citada ao longo do trabalho. O *Apêndice A* apresenta a portaria da ANP, N° 129, de julho de 1999, para a especificação de análises físico-químicas. O *Apêndice B* contém os dados de nível de pressão. O *Apêndice C* contém os dados de calibração dos termopares, o *Apêndice D* foi especificado o método de tratamento térmico utilizado nos aços AISI 1045 e no *Apêndice E* e *F* são apresentadas as tabelas de rugosidade e ondulação dos corpos-de-prova e contracorpos, respectivamente. O *Apêndice G* apresenta as propriedades térmicas de lubrificantes e os valores calculados da taxa de desgaste são apresentados no *Apêndice H*.

## **1.1. Objetivo Geral**

Investigar o desempenho tribológico de dois óleos lubrificantes, um vegetal e um mineral, através de ensaios metal-metal, em laboratório, na configuração cilindro-plano.

### **1.1.1. Objetivos Específicos**

1. Realizar ensaios acelerados, em bancada de desgaste por deslizamento, em pares tribológicos metal – metal sob condições lubrificadas;
2. Analisar a história térmica, acústica e vibracional do contato para avaliar o desempenho do óleo lubrificante vegetal em relação ao óleo mineral;
3. Identificar os principais mecanismos de desgaste desenvolvidos nas superfícies dos sólidos integrantes dos pares tribológicos estudados.

## 1.2. Produção Científica

A presente proposta de estudo proporcionou o desenvolvimento de trabalhos científicos que promoveram o amadurecimento das idéias iniciais, bem como forneceu a possibilidade de interação com temas correlatos. Os trabalhos foram:

1- *Estudo tribológico de óleos biodegradáveis de coco e de rícino através de ensaios abrasivos*. Publicado nos anais do IX Congresso Ibero americano de Engenharia Mecânica – CIBIM 2009. O mesmo foi publicado na revista Holos (ISSN 1807 1600), 2010.

2- *Os Combustíveis Verdes do Brasil – Avaliação da Lubricidade do Óleo Biodiesel B5 e Óleos Vegetais de Coco e Mamona*. Publicados nos anais do Congresso Nacional de Engenharia Mecânica – CONEM 2010.

3- *Comparative Analysis of the Tribological Performance of Biodegradable Ricin Oil*. International Congress of Mechanical Engineering – Publicados nos anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica – COBEM 2011.

4- *Performance Analysis of Oil of Cashewnuts as Lubricant*. International Congress of Mechanical Engineering – Publicados nos anais do Congresso Nacional de Engenharia Mecânica – COBEM 2011.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Princípios da Tribologia

As máquinas transmitem potência entre seus componentes em movimento, o que promovem o atrito e desgaste dos mesmos. No entanto, a tribologia é essencialmente preocupada com a minimização do atrito e desgaste, e é formalmente descrita como a “*ciência da interação das superfícies em movimento relativo*” (SMITH, 1994).

De acordo com Hutchings (1992), os lubrificantes são utilizados para reduzir a força friccional e promover uma maior durabilidade das superfícies devido a redução do desgaste.

### 2.2. O Atrito

O atrito é a resistência ao movimento entre corpos. A palavra atrito é oriunda do *latim Fricare*, que significa esfregar. Os corpos em questão podem ser um gás e um sólido (atrito aerodinâmico), ou um líquido e um sólido (atrito líquido), ou o atrito pode ser devido ao processo de dissipação da energia interna com um corpo (atrito interno) (ASM HANDBOOK, v. 18, 1992).

O atrito ocorre do contato das asperezas, usualmente atribuídos a uma ou duas causas: (1) abrasão, onde uma superfície dura (ou partícula dura) promove o sulcamento do contracorpo; ou (2) adesão, onde o contato entre as asperezas gera união adesiva (SMITH, 1994).

As leis experimentais fundamentais que regem o atrito de corpos sólidos foram descritas por Coulomb, que as formulou em 1875. Parte de seu trabalho foi constituído por Leonardo da Vinci e Amonton (1699) (ASM HANDBOOK, v. 18, 1992). As três leis gerais de atrito são expressas:

- 1- A força de atrito é independente da área de contato aparente;
- 2- A força de atrito é proporcional a carga normal aplicada;
- 3- A força de atrito é independente da velocidade de deslizamento.

O atrito é comumente representado pelo coeficiente de atrito, e este corresponde à razão entre a força de atrito e a carga (*Eq.1*). O coeficiente de atrito depende da natureza dos corpos em contato e do estado de acabamento e lubrificação da superfície.

$$\mu = \frac{F}{N} \quad (1)$$

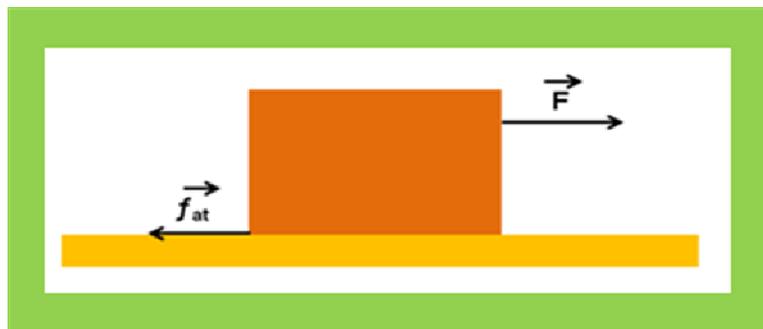
Onde:

$\mu$  = coeficiente de atrito (adimensional),

$F$  = força de atrito,

$N$  = carga normal aplicada na superfície.

A força de atrito (*Fig.1*) é a força tangencial que deve ser superada para que um corpo sólido deslize sobre o outro. Ela atua no plano da superfície e é proporcional a força normal da superfície (ASM HANDBOOK, v. 18, 1992).

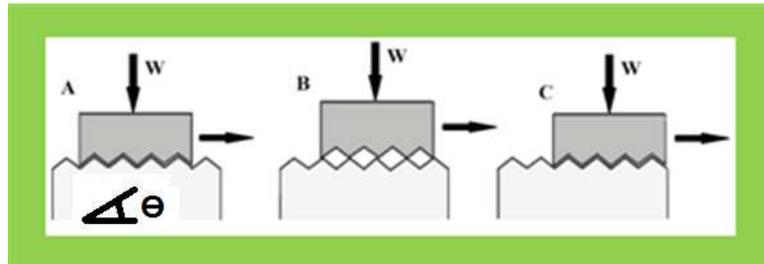


**Figura 1 – Esquema da força de atrito atuando em um bloco.**

Coulomb percebeu que as superfícies não são idealmente planas, e sim formadas por asperezas (com estrutura de picos e vales), propondo que as mesmas poderiam ser uma fonte geradora de força de atrito [(DOWSON (1979); BOWDEN e TABOR (1964) *Apud* BHUSHAN (2001)].

No modelo de atrito da *Figura (2)*, denominado de modelo de Coulomb, a ação das asperezas em forma de dentes de serra promove a separação das superfícies quando elas deslizam da posição A para a posição B, nesta fase do movimento o trabalho feito pela força de atrito contra a carga normal é  $\mu$ , ou seja,  $\tan \theta$ . Na próxima fase do movimento, da posição B para a posição C, percebe-se que o modelo falha, uma vez que a carga normal realiza

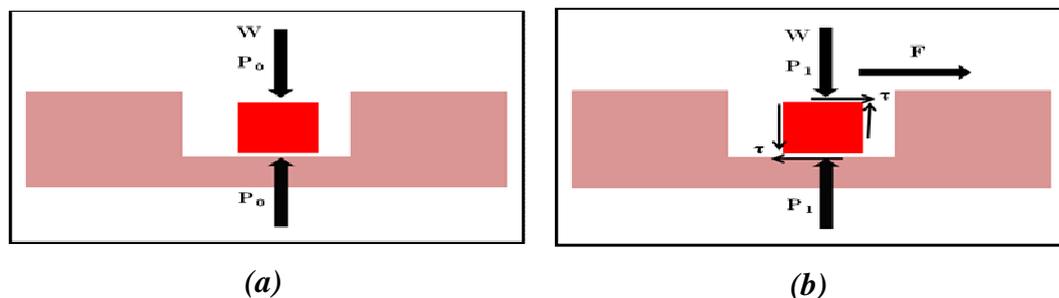
trabalho no sistema e toda energia potencial armazenada na primeira fase é recuperada. Portanto, não ocorre dissipação de energia no ciclo completo [HUTCHINGS (1992) *Apud* SANTANA (2009)].



**Figura 2 – Diagrama esquemático ilustrando o modelo de Coulomb para o atrito de deslizamento (HUTCHINGS, 1992).**

O modelo de atrito por crescimento de junção é determinado pelo critério de escoamento, para metais que flui plasticamente ou não. Este modelo considera tanto a carga normal  $P$  como a ação da tensão de cisalhamento  $\tau$ . A *Figura (3a)* mostra uma placa carregada contra uma superfície plana e rígida, representando o contato das asperezas. O material dentro da placa é submetido à compressão uniaxial por uma carga normal  $P_o$ , onde podemos assumir para o ponto de escoamento que todos os contatos das asperezas entre os metais são plásticos (HUTCHINGS, 1992).

Quando uma força tangencial  $F$  é aplicada na junção das asperezas (*Fig.3b*), o material experimenta uma tensão de cisalhamento adicional  $\tau$ . Para que o material permaneça no ponto de escoamento, a carga normal sobre a superfície plana deve ser reduzida para um valor  $P_1$ . Se a carga normal permanecer constante  $W$ , a área de contato deve aumentar (fenômeno conhecido como crescimento de junção) (HUTCHINGS, 1992).



**Figura 3 – Modelo de Atrito por Crescimento de Junção (Adaptado de HUTCHINGS, 1992).**

Segundo Bhushan (2001), em 1964, Bowden e Tabor reconheceram a existência de forças interfaciais e propuseram outro mecanismo, baseado na adesão de interfaces. No modelo de atrito de deslizamento assume-se que a força de atrito surge de duas fontes: uma *força de adesão* desenvolvida na área de contato real entre as superfícies (junção das asperezas), e uma *força de deformação* necessária para promover o sulcamento das asperezas de uma superfície dura em uma superfície macia (HUTCHINGS, 1992).

### 2.2.1. Tipos de Atrito

#### (a) *Atrito Interno*

Resulta da fricção entre as moléculas do lubrificante. A medida do atrito interno em um fluido é descrito como a viscosidade (MANG e DRESEL, 2007).

#### (b) *Atrito Externo*

São, sobretudo, os pontos de contato microscópico entre duas superfícies deslizantes. Esta causa adesão, deformação do material e ranhuras. A energia que é perdida na forma de atrito pode ser medida através da dissipação de calor ou através de vibrações mecânicas (MANG e DRESEL, 2007).

#### (c) *Atrito Estático*

O coeficiente de atrito estático é definido como coeficiente de atrito correspondente á força máxima a ser superada para iniciar o movimento entre dois corpos macroscópicos conforme ASTM (MANG e DRESEL, 2007).

#### (d) *Atrito Cinético*

Diferente do atrito estático, o atrito cinético ocorre sob condições de movimento relativo. A ASTM define o coeficiente de atrito como sendo o coeficiente em condições de movimento relativo entre dois corpos macroscópicos. O coeficiente de atrito cinético é também chamado de coeficiente de atrito dinâmico (MANG e DRESEL, 2007).

(e) *Stick Slip*

É uma forma especial de atrito que resulta muitas vezes de movimentos lentos de deslizamento quando os pares são conectados a um sistema que pode vibrar. O processo é influenciado pela dependência do coeficiente de deslizamento da velocidade (MANG e DRESEL, 2007). A ASTM G40 define o stick-slip como sendo uma oscilação associada a uma diminuição do coeficiente de atrito com o aumento da velocidade relativa (ASM HANDBOOK, v. 18, 1992). Já segundo Stoeterau (2004), o processo de stick-slip é ocasionado por uma inconstância da força de atrito, motivada pelas variáveis: distância, tempo e velocidade.

(f) *Atrito de Deslizamento*

Este tipo de atrito é observado quando a superfície de um corpo desliza ou escorrega em contato com a superfície de outro corpo (MANG e DRESEL, 2007). Para haver o deslizamento não é necessário que as superfícies de contato sejam planas.

(g) *Atrito por Rolamento*

Observa-se o atrito de rolamento quando a superfície de um corpo rola sobre a superfície de outro, sem escorregar (HILSDORF *et al*, 2004). Este tipo de atrito é gerado pelo contato de rolamento, podendo também ser influenciado pela geometria das superfícies de contato e a deformação dos elementos de contato (MANG e DRESEL, 2007).

### **2.3. O Desgaste**

Segundo Leite (2010), o significado comum e perceptível do desgaste pode ser resumido em: modificações da forma original de um corpo por ação do tempo ou frequência de contato com outro corpo. Esta percepção é maior à medida que o tempo passa, pois essa variável é diretamente proporcional à intensidade das alterações da forma original. A combinação da variável tempo com outras variáveis, como por exemplo, força de contato, pode resultar num aumento do desgaste. Além disso, a intensidade na qual se observa o desgaste depende basicamente dos materiais que estão em contato e das características na qual

estes se interagem. Segundo Zum Gahr (1987) *Apud* Santana (2009), a norma DIN 50320 define desgaste como sendo a perda progressiva do material da superfície de um corpo sólido devido à ação mecânica, ou seja, o contato e o movimento relativo contra um contracorpo sólido, líquido ou gasoso.

Esta perda de material pode ser quantificada através da equação do desgaste por deslizamento, medido em termos de taxa de desgaste específica  $\kappa$  (Eq.2), definida como volume de material desgastado por unidade de força e comprimento (SMITH, 1994). Esta equação também é denominada de *Equação de Desgaste de Archard* (HUTCHINGS, 1992), portanto:

$$\kappa = \frac{V}{(W.L)} \quad (2)$$

Onde:

$V$  = volume de material desgastado ( $m^3$ ),

$W$  = carga normal aplicada (N),

$L$  = distância de deslizamento total (m).

A unidade padrão  $\kappa$  é dada em  $m^2 N^{-1}$ . Segundo Smith (1994), valores de  $10^{-16}$  ou menores, são indicativos de desgaste moderado, e valores acima de  $10^{-14}$  representam desgaste severo.

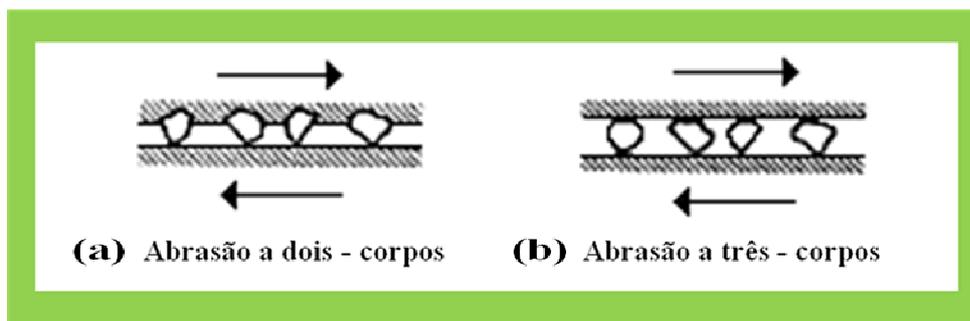
### 2.3.1. Tipos de Desgaste

O desgaste, que é resultante da remoção de materiais pela separação física devido à microfratura, dissolução química, ou pela fusão na interface do contato, é tradicionalmente representado por quatro modos principais: abrasão, adesão, corrosão e fadiga (BHUSHAN, 2001).

#### (a) Desgaste Abrasivo

O desgaste abrasivo ocorre principalmente quando um corpo entra em contato com outro de maior dureza (MANG e DRESEL, 2007). Neale (1995) detalha também que este mecanismo é causado geralmente por partículas que estão juntas e embutidas em alguma

superfície oposta, ou por partículas que estão deslizando ou rolando entre duas superfícies. A contaminação de lubrificante com produtos abrasivos (como partículas de quartzo) também podem causar desgaste abrasivo (MANG e DRESEL, 2007). De acordo com Stachowiak e Batchelor (1996), a natureza do desgaste abrasivo é determinada pela maneira com que os grãos passam pela superfície, podendo ser denominado de desgaste abrasivo a dois corpos ou três corpos como demonstrado na *Figura (4)*.



**Figura 4 – Esquema dos modos de desgaste abrasivo (a) a dois-corpos e (b) a três-corpos (Adaptado de HUTCHINGS, 1992).**

(b) Desgaste Adesivo

Este é o mais complexo mecanismo de desgaste (MANG e DRESEL, 2007). MEDEIROS (2002) relata a conceituação de DARQUE-CERETTI (1997) em relação ao uso indiscriminado do termo “adhesion” sem que se faça distinção entre adesão e aderência. Os fenômenos de atração limitados às interações eletromagnéticas e que podem ser explicadas pela físico-química são denominados adesão, enquanto aqueles que correspondem à dificuldade de separação entre dois corpos são denominados de aderência.

(c) Corrosão

São reações químicas que ocorrem em condições tribológicas, referidas como “triboquímica”. É aplicado em particular, a efeitos térmicos, que não são prontamente identificáveis macroscopicamente os efeitos de atrito nas superfícies reativas, onde a camada de valência do metal estrutural desempenha um papel no desgaste e na deformação devido a remoção de material das camadas reativas (MANG e DRESEL, 2007).

(d) Fadiga

É resultado de cargas periódicas nas zonas de contato. Os frequentes carregamentos levam a fadiga de superfície, que é resultado da fadiga do material. Elementos de máquinas que são submetidos a cargas periódicas na zona de contato são particularmente propensas a este tipo de dano. (MANG e DRESEL, 2007).

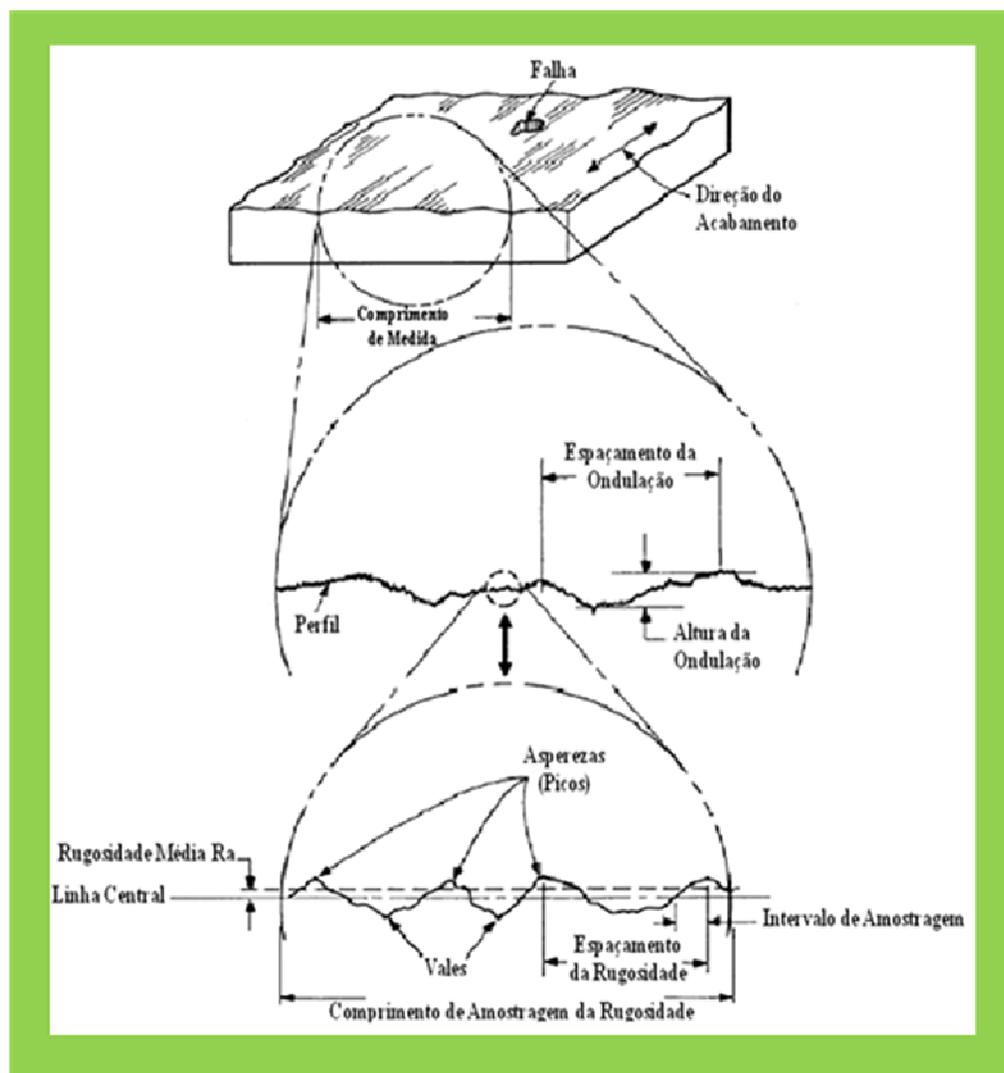
## 2.4. Natureza da Superfície

Uma superfície sólida, com interface sólido-gás e/ou sólido-líquido, possui estrutura e propriedade complexa em função da natureza dos sólidos, do método de acabamento da superfície e da interação entre a superfície e o ambiente. As propriedades das superfícies sólidas são cruciais para a interação da superfície devido às mesmas afetarem a área real de contato, o atrito, o desgaste e a lubrificação. Além das funções tribológicas, as propriedades das superfícies são importantes em outras aplicações como óptica, elétrica e desempenho térmico, pintura e aparência.

As superfícies sólidas, independentes de seu método de formação, contêm irregularidades ou desvios de forma geométrica. Nenhum método de usinagem de precisão pode produzir uma superfície molecularmente plana sobre os materiais convencionais (BHUSHAN, 2001).

Além de desvios de superfície, as superfícies sólidas consistem de várias zonas contendo propriedades físico-químicas peculiares ao volume do material (BHUSHAN, 2001).

A textura da superfície é o desvio repetitivo ou aleatório a partir da superfície nominal que constitui a topografia tridimensional da superfície. A textura da superfície inclui (1) rugosidade (nano e microrugosidade), (2) ondulação (macrorugosidade), (3) acabamento, e (4) falhas, conforme *Figura (5)*.

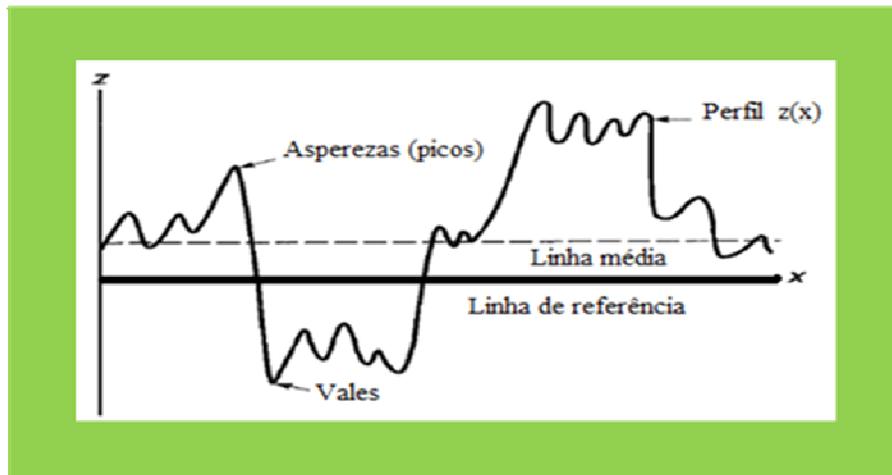


**Figura 5 – Textura da superfície [Adaptado de Anônimos (1985), ANSI/ASME Apud BHUSHAN (2001)].**

A nanorugosidade e a microrugosidade são formadas por oscilações na superfície de comprimento de onda curta, caracterizada por picos (asperezas) e vales de diferentes amplitudes e espaçamentos. As asperezas são referidas como perfil de picos (com duas dimensões) e cume em um mapa de superfície (em três dimensões). A ondulação é uma irregularidade da superfície de longo comprimento de onda e é referido como macrorugosidade. A ondulação pode ser resultante de fatores tais como deflexão da peça ou da máquina, vibração, tratamento térmico, tensões ou deformações. O acabamento é a direção principal do padrão da superfície, o qual é normalmente determinado pelo método de produção. As falhas são interrupções intencionais inesperadas e indesejadas na textura, além disso, a superfície pode conter desvios de forma (BHUSHAN, 2001).

Uma das formas de caracterizar a topografia é através de parâmetros que se baseiam na medida de profundidade da rugosidade, como: Ra (rugosidade média aritmética), Rq (rugosidade média quadrática), Rt (rugosidade total), etc.

A rugosidade média aritmética Ra representa uma média dos valores absolutos dos desvios verticais com relação à linha principal de um perfil superficial (**Fig.6**).



**Figura 6 – Esquema de um perfil de rugosidade (Adaptado de BHUSHAN, 2001).**

A medida de rugosidade Ra é um parâmetro mais utilizado no mundo, e é geralmente utilizado quando se pretende um controle contínuo da linha de produção e em superfícies que apresentam sulcos de usinagem bem orientados (ROSA, 2006).

O cálculo do Ra é obtido através da **Equação (3)**.

$$\mathbf{Ra} = \frac{1}{L} \int_0^L z \, dx = \frac{A}{L} \quad (3)$$

Onde:

**x** = comprimento de varredura,

**z** = altura do perfil.

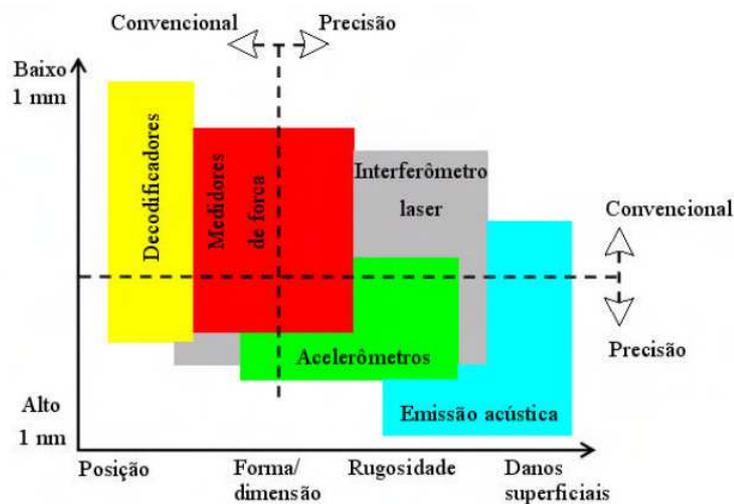
Já a rugosidade média quadrática Rq conhecida como RMS (root mean square) em países ingleses é um parâmetro correspondente ao Ra (ROSA, 2006). Pode ser definido matematicamente como a integral do quadrado da altura das asperezas através da **Equação (4)**.

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L y^2 dx} \quad (4)$$

## 2.5. Emissão Acústica e Vibracional

A emissão acústica é definida como um fenômeno onde ondas elásticas transientes são geradas por rápida liberação de energia mecânica a partir de fontes localizadas em um material ensaiado. A técnica de emissão acústica consiste em avaliar sinais acústicos coletados através de sensores piezelétricos instalados na superfície externa do equipamento. Estes equipamentos são capazes de identificar defeitos elétricos e mecânicos (HOULE, 1996).

De acordo com Dornfeld (1999) *Apud* Jun (2004), os diferentes sensores possuem aplicações distintas em variados níveis de precisão e taxas de remoção de materiais. A **Figura (7)**, representa um diagrama esquemático dos diversos tipos de sensores utilizados, para variados níveis de precisão. A linha tracejada representa a faixa aproximada do seu emprego.



**Figura 7 – Diagrama esquemático da aplicação de sensores em comparação com o nível de precisão [DORNFELD (1999) *Apud* JUN (2004)].**

Segundo Taylor (1994), a vibração é qualquer movimento que se repete, regular ou irregularmente, depois de um intervalo de tempo. Dentre as diversas fontes de vibração, as mais comuns que podem ser responsabilizadas pela quase totalidade das vibrações mecânicas indesejáveis são: desbalanceamento; desalinhamento (eixos; correias; correntes); rolamentos; folgas generalizadas; dentes de engrenagens; etc.

Os parâmetros de medição de vibração são: deslocamento, velocidade e aceleração.

- *Deslocamento*

São utilizados para identificar principalmente as seguintes causas de vibração: desbalanceamento e desalinhamento (TAYLOR, 1994).

- *Velocidade*

São utilizados para identificar: desbalanceamento, desalinhamento, folgas, falta de rigidez, excentricidade, correias defeituosas, rolamentos defeituosos, engrenagens defeituosas, vibrações hidrodinâmica, vibrações hidráulicas e problemas elétricos (TAYLOR, 1994).

- *Aceleração*

É utilizado para identificar as seguintes causas de vibração: desbalanceamento, desalinhamento, folgas e principalmente problemas em rolamentos.

A aceleração pode ser medida em dois níveis de vibração: aceleração RMS e aceleração pico a pico.

**Aceleração RMS (Amplitude Média Quadrática):** pode detectar até uma frequência de 10 KHz em desgastes de rolamento, problemas de falha de lubrificação, problemas de desbalanceamento, contato entre metal-metal e frequência de engrenamento.

**Aceleração Pico a Pico:** a medição é realizada em função do tempo e pode ser utilizada para analisar impactos anormais de qualquer natureza, identificando falhas localizadas que ainda não percebidas nas medições com valor RMS (TAYLOR, 1994).

## 2.6. Lubrificação

A lubrificação pode ser definida como um meio capaz de controlar o atrito e o desgaste das interações de superfícies em movimento relativo sobre carga (BHUSHAN, 2001). Segundo Hutchings (1992), os lubrificantes são usados para reduzir a força de atrito entre as superfícies.

Os lubrificantes têm a função de introduzir entre as superfícies de deslizamento uma camada de material com menor resistência ao cisalhamento. Em alguns sistemas, o lubrificante pode não prevenir completamente o contato das asperezas, embora possa reduzir a resistência das junções formadas (HUTCHINGS, 1992).

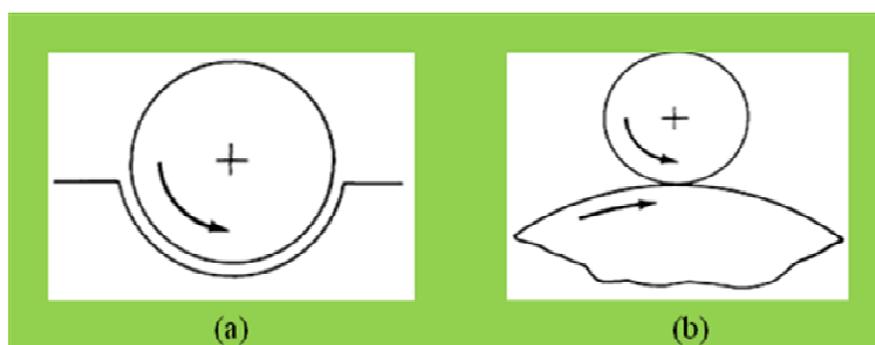
A lubrificação é introduzida entre dois sólidos deslizantes pela adição de gases, líquidos ou lubrificantes sólidos na interface do deslizamento para reduzir o atrito e o desgaste, e para retirar calor e detritos “*debris*” gerados durante o processo de deslizamento (ASM HANDBOOK, v. 18, 1992). Em outros casos, o lubrificante separa completamente as superfícies, e as junções das asperezas não são formadas, proporcionando uma maior durabilidade das superfícies devido à redução do desgaste (HUTCHINGS, 1992).

Toda vez que há o movimento entre superfícies, poderá ocorrer: dano para uma ou ambas as superfícies, envolvendo perda progressiva de material (HUTCHINGS, 1992).

Segundo Hutchings (1992), outro benefício da lubrificação é que seu uso, em maior ou menor quantidade, pode sempre reduzir a taxa de desgaste por deslizamento.

O processo de lubrificação pode assumir diferentes formas, dependendo da geometria dos corpos em contato, da rugosidade e textura da superfície de deslizamento, do contato da carga, da pressão e temperatura, da velocidade de rolamento e deslizamento, das condições ambientais, das propriedades físicas e químicas do lubrificante, da composição do material e das propriedades próximas às camadas da superfície (ASM HANDBOOK, v. 18, 1992).

Existem dois tipos de geometria de contato entre as superfícies, denominadas de contato conforme e não- conforme, como mostra a **Figura (8)** (ASM HANDBOOK, v. 18, 1992).



**Figura 8 – Contato Conforme representado em (a) e Contato Não – Conforme representado em (b) (ASM HANDBOOK, v. 18, 1992).**

As superfícies de contato conforme usualmente aparecem em mancais deslizantes e rolamentos, guias de máquinas e selos.

Em rolamentos conformes, as superfícies são separadas por um filme de óleo ou gás, gerado hidrodinamicamente pela velocidade da superfície ou hidrostáticamente por um

lubrificante pressurizado externamente. Essas superfícies usualmente operam em regime de espessura de filme hidrodinâmico ou lubrificação hidrostática.

O desempenho da lubrificação, mensurado pela espessura de filme, pressão e atrito, pode ser previsto baseada na análise da equação de Reynolds. A maior propriedade lubrificante de importância para superfícies conforme incluem viscosidade e a relação temperatura- viscosidade (ASM HANDBOOK, v. 18, 1992).

A lubrificação de contatos não-conformes ocorre em uma área muito pequena, conhecida como contato Hertziano. Nesses contatos, a espessura do filme é muito fina e o desempenho da lubrificação é fortemente afetado pela deformação elástica da superfície deslizante. A espessura do filme lubrificante, pressão e a distribuição desse conjunto pode ser determinado pela teoria elastohidrodinâmica (ASM HANDBOOK, v. 18, 1992).

Com relação ao movimento da superfície, a rugosidade superficial pode ter uma influência significativa sobre o desempenho do regime de lubrificação mista, onde a carga é dividida entre a pressão do lubrificante e as asperezas. Os efeitos da rugosidade são particularmente importantes nos contatos não-conforme devido à maioria desses contatos operarem na lubrificação mista. Falha por desgaste progressivo e falha por scuffing são dependentes no processo de lubrificação influenciado pela geometria da micro-rugosidade, e também pela temperatura do contato no conjunto. (ASM HANDBOOK, v. 18, 1992).

A espessura do filme lubrificante deteriora rapidamente sob combinações de pressão extrema, temperatura extrema, baixa velocidade de rolamento, e alta velocidade de deslizamento (ASM HANDBOOK, v. 18, 1992).

### **2.6.1. Equação de Reynolds**

A apreciação da lubrificação hidrodinâmica foi iniciada no final do século 19, pelo engenheiro Beauchamp Tower, o qual descobriu que poderia separar as superfícies de deslizamento por uma força hidráulica. No tempo da descoberta de Beauchamp Tower, Osborne Reynolds e outros cientistas estavam trabalhando na teoria da lubrificação hidrodinâmica (BHUSHAN, 2001).

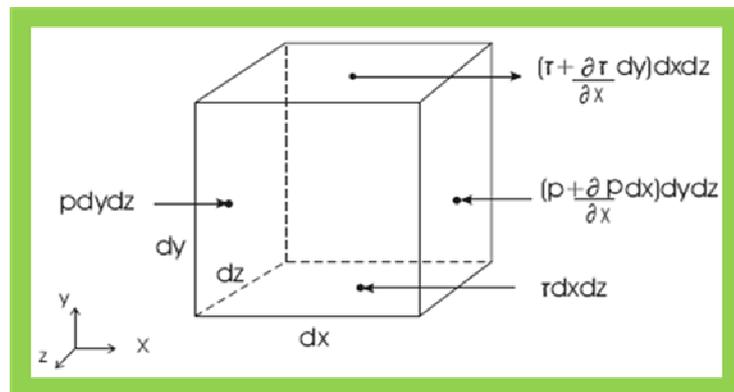
Desde a primeira prova analítica que um líquido viscoso pode separar fisicamente duas superfícies deslizantes por uma pressão hidrodinâmica, resultando em um baixo atrito e

teoricamente zero desgaste, Reynolds publicou em 1886 a teoria da lubrificação hidrodinâmica (MARGHITU, 2001).

A teoria de Reynolds explica o mecanismo de lubrificação através da geração de um filme líquido viscoso entre as superfícies móveis. A condição é que as superfícies devem mover-se relativamente entre si, com uma velocidade suficiente para gerar um filme fluido. Assim, Reynolds e outros pesquisadores descobriram que a maioria dos efeitos de lubrificação de óleos pode ser explicada em termos de sua viscosidade relativa (BHUSHAN, 2001).

Toda lubrificação hidrodinâmica pode ser expressa matematicamente na forma de uma equação que foi derivada originalmente por Reynolds, a qual é conhecida comumente como Equação de Reynolds (MARGHITU, 2001).

As maneiras de obter esta equação são através da simplificação da dinâmica de Navier-Stokes e da Equação da Continuidade. Existem várias maneiras de deduzir a equação, entretanto, é mais freqüente considerar a aplicação do princípio da continuidade para um elemento infinitesimal em equilíbrio (*Fig.9*), sujeito a ação de cisalhamento viscoso e da pressão do fluido. Assim temos a *Equação. (5)* (MARGHITU, 2001).



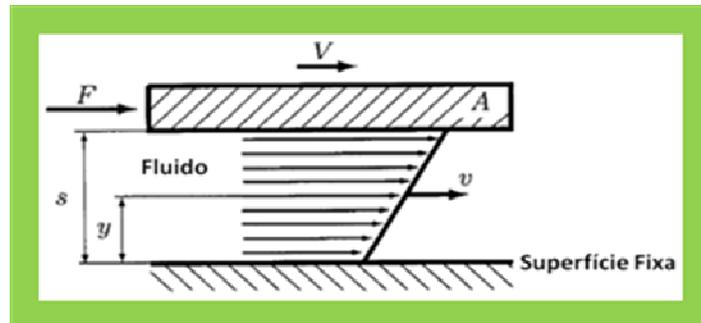
**Figura 9 – Equilíbrio de um elemento infinitesimal.**

$$p \, dy \, dz + \left( \tau_x + \frac{\partial \tau_x}{\partial z} dz \right) dx \, dy = \left( p + \frac{\partial p}{\partial x} dx \right) dy \, dz + \tau_x \, dx \, dy \quad (5)$$

### 2.6.2. Lei de Newton para Fluidos Viscosos

Uma superfície de área  $A$  está se movendo com velocidade linear  $V$  sobre um filme lubrificante como mostra a *Figura (10)*. A espessura do lubrificante é  $S$  e a ação da força de deformação no filme é  $F$ . As camadas de fluido em contato com a superfície em movimento

possuem velocidade  $v = V$  e as camadas de fluido em contato com a superfície fixa possui velocidade  $v = 0$ .



**Figura 10 – Superfície em movimento (MARGUITU, 2001).**

As leis de Newton para fluidos viscosos afirmam que tensões cisalhantes  $\tau$  em um fluido são proporcionais a taxa de mudança da velocidade  $v$  com relação à distância  $y$  da superfície fixa (Eq.6).

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{\partial v}{\partial y} \quad (6)$$

Onde  $\mu$  é uma constante, conhecida também como viscosidade absoluta ou viscosidade dinâmica. A derivada  $\partial v / \partial y$  é a taxa de mudança de velocidade com a distância e representa a taxa de cisalhamento ou gradiente de velocidade (MARGUITU, 2001).

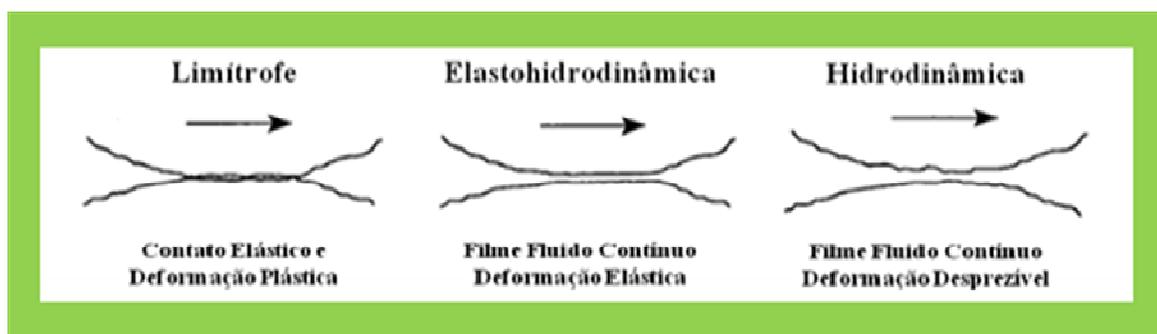
### 2.6.3. Regimes de Lubrificação

Quando duas superfícies estão em contato uma com a outra, a carga é suportada por vários picos, ou seja, pelas asperezas da superfície. Durante o deslizamento, a força tangencial total requerida para eliminar estas junções das asperezas é geralmente elevada, causando atritos indesejáveis, desgaste e danos na superfície. Para reduzir a força de atrito e permitir um melhor deslizamento é necessário introduzir um lubrificante para separar as asperezas totalmente ou parcialmente (BHUSHAN, 2001).

Portanto, os possíveis tipos de lubrificação são definidos de acordo com a espessura do filme lubrificante e, também, em função da possibilidade ou não de haver contato entre os

elementos do par, por rompimento localizado e momentâneo do filme lubrificante HUTCHINGS (1992).

O uso de lubrificantes líquidos ou gasosos é conhecido como lubrificação de filme fluido. A lubrificação pode ser classificada em três tipos: lubrificação limítrofe, lubrificação mista e lubrificação hidrodinâmica (*Fig.11*) (BHUSHAN, 2001).



**Figura 11 – Formas do regime de lubrificação (Adaptado de BHUSHAN, 2001)**

A lubrificação entre duas superfícies deslizantes pode mudar entre os regimes, dependendo da carga, velocidade, viscosidade, geometria do contato e rugosidade superficial de ambas as superfícies. Essa dependência foi reconhecida primeiramente em 1902 por Stribeck, o qual observou a variação do atrito de deslizamento com parâmetros de lubrificação  $\eta N/p$ , onde  $\eta$  é a viscosidade,  $N$  é a velocidade angular do contato cilíndrico e  $p$  é a pressão média de contato (*Fig.12*), com base da teoria de Sommerfeld (*Eq.7*) (BHUSHAN, 2001).

$$\text{Número de Sommerfeld} = \frac{\eta N}{p} \quad (7)$$

Os parâmetros adimensionais da abscissa são utilizados de acordo com as características de cada sistema, sendo o número de Sommerfeld utilizado para sistemas rotativos e para sistemas alternados. Outro parâmetro, também utilizado, corresponde à relação entre a espessura de filme lubrificante  $h_{min}$  e a combinação do desvio padrão das alturas das asperezas das superfícies em contato, denominado de parâmetro  $\lambda$  (*Eq.8*) (PROFITO, 2010).

$$\lambda = \frac{h_{min}}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}} \quad (8)$$

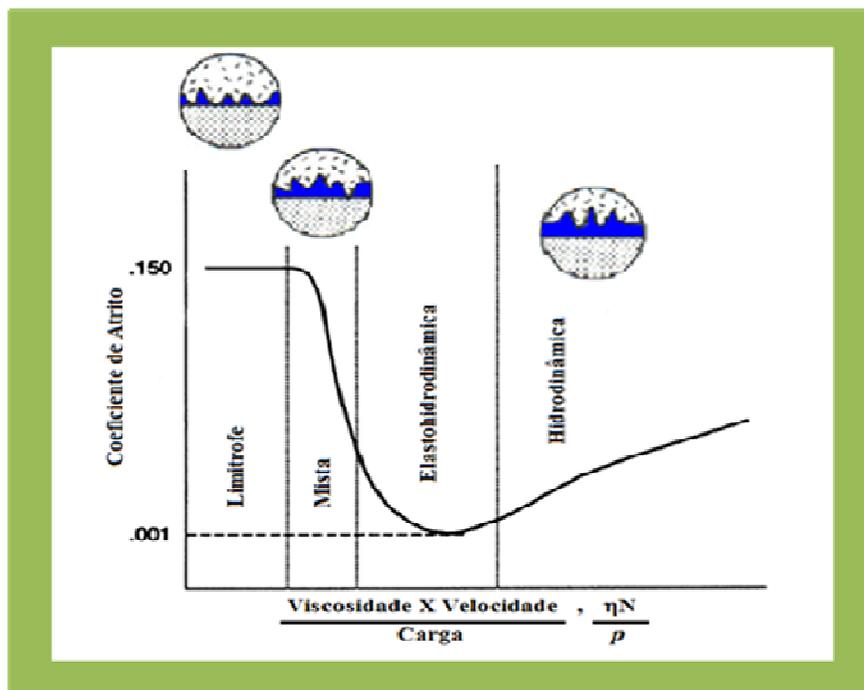


Figura 12 – Curva de Stribeck [Adaptado de BHUSHAN, 2001].

### I - Lubrificação Limítrofe

A lubrificação limítrofe ocorre sob condições de alta carga e baixas velocidades em rolamentos, engrenagens, anéis de pistão, bombas, transmissões, etc. Em alguns casos, o regime de lubrificação é crítico, controlando a vida de componentes sujeitos ao desgaste (BHUSHAN, 2001).

Neste regime as superfícies são separadas por um filme molecular adsorvido. Boa parte do carregamento é suportada pelas forças de repulsão entre os filmes adsorvidos em cada face do material. Embora possa ainda ocorrer algum desgaste, ele será bem menor do que se as superfícies estivessem totalmente desprotegidas. Para cargas muito elevadas ou para velocidade de deslizamento muito baixa, a película de lubrificante se rompe e os materiais do par entram em contato, aumentando o atrito e a taxa de desgaste (HUTCHINGS, 1992).

Neste tipo de lubrificação a pressão hidrostática não é suficientemente grande para suportar totalmente a carga, ocorrendo assim o contato entre as superfícies. Este contato ocorre nos picos e vales da superfície, referidos como asperezas. A quantidade e a extensão do contato das asperezas dependem da: rugosidade da superfície, pressão do filme fluido, carga normal, dureza e da elasticidade das asperezas (BHUSHAN, 2001).

## **II - Lubrificação Mista**

O regime de lubrificação mista é caracterizado por espessuras de filme lubrificantes cujas dimensões são suficientes para a completa separação das superfícies em contato. Desta forma, este regime de lubrificação é governado pela combinação dos efeitos inerentes aos regimes hidrodinâmicos e limítrofe. Conseqüentemente, o carregamento externo atuante no sistema é suportado concomitantemente pelo campo de pressões hidrodinâmicas e pelo contato das asperezas. Analogamente, os níveis de atrito serão também intermediários aos dois regimes extremos (hidrodinâmico e limítrofe) (PROFITO, 2010).

## **III - Lubrificação Elastohidrodinâmica**

Ocorre quando as asperezas sofrem deformação elástica no contato e a carga normal é suportada por uma fina película de fluido (BHUSHAN, 2001).

Na lubrificação elastohidrodinâmica, o filme lubrificante é mais espesso que na lubrificação limítrofe. As pressões de contato, neste caso, são da ordem de GPa. Nestas condições a dependência da viscosidade do lubrificante com a pressão tem um papel importante (HUTCHINGS, 1992).

## **IV - Lubrificação Hidrodinâmica**

Este tipo de lubrificação é gerado pela separação das superfícies por um filme relativamente espesso de fluido lubrificante, e a carga normal é suportada pelas pressões hidrodinâmicas (HUTCHINGS, 1992).

Freqüentemente o regime de lubrificação hidrodinâmico é considerado como a forma ideal de lubrificação, pois é caracterizado por baixos níveis de atrito e elevada resistência ao desgaste, ocorrendo geralmente em sistemas envolvendo superfícies conformes (PROFITO, 2010).

#### 2.6.4. Rodopio no óleo Lubrificante

O rodopio do óleo é um termo coloquial que descreve a vibração hidrodinâmica induzida num mancal [STACHOWIAK e BATCHELOR, (1996)].

O rodopio do óleo “*Oil Whirl*”, é um problema que pode ocorrer em máquinas com mancais de deslizamento, funcionando com óleo sob pressão e operando em altas rotações, e também a erros de projetos, desgaste e mudanças de viscosidade, etc (SILVA, D. A., 2006), é caracterizado pela vibração severa do eixo, que ocorre em uma velocidade específica [STACHOWIAK e BATCHELOR, (1996)].

Segundo D. A. Silva (2006), no início da operação, o eixo da máquina provoca um fluxo de óleo dentro do mancal, criando uma condição favorável de sustentação, fazendo com que o eixo fique ligeiramente elevado. O processo de sustentação hidrodinâmica desloca o eixo no sentido contrário à rotação, fazendo com que o eixo descreva uma trajetória elíptica ou orbital dentro do mancal. A vibração devida ao rodopio do óleo pode ser identificável por sua frequência que é levemente menor (5% a 8%) que  $\frac{1}{2}$  do RPM do eixo do equipamento. Por exemplo, se uma máquina girar a 1200 RPM, o rodopio do óleo estará na faixa de 0,5 a 0,8 Hz.

Embora possa parecer improvável que um líquido como óleo cause vibração, de acordo com a teoria hidrodinâmica discutida anteriormente, uma mudança na carga do mancal é sempre acompanhada por um deslocamento finito. Isso constitui uma forma de rigidez mecânica ou constante da mola, e quando combinado com a massa do eixo, vibração é o resultado natural [STACHOWIAK e BATCHELOR, (1996)].

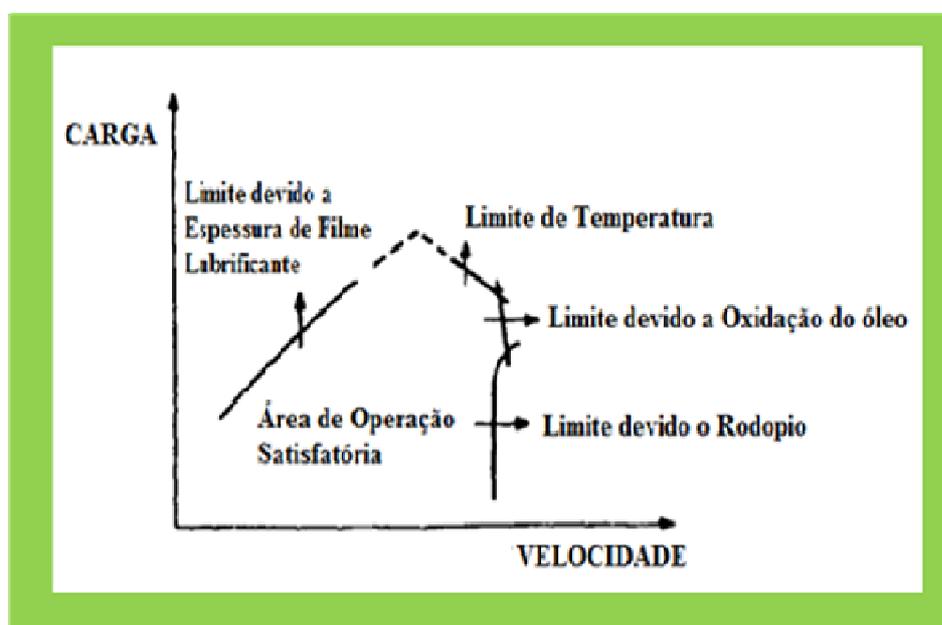
Existe também, outra forma de vibração conhecida como “*chicoteamento do eixo*” ou “*Oil Whip*”, que é causado pela ação combinada da flexibilidade do eixo e da vibração do mancal [STACHOWIAK e BATCHELOR, (1996)]. Ocorrendo quando a vibração torna-se constante e com frequência mais baixa que o rodopio do óleo (SILVA, D. A., 2006).

Uma rotação do eixo quase sempre promove uma força de excitação, devido ao desequilíbrio de forças pequenas. Para análises de engenharia, é essencial o conhecimento da velocidade crítica em que ocorre o rodopio do óleo e evitar que ocorra durante a operação. Foi constatado que o **rodopio severo** ocorre quando a velocidade do eixo é aproximadamente duas vezes a frequência crítica do mancal. A questão é, o que é a frequência crítica e como pode ser estimada? A resposta para essa questão e para a maioria dos problemas de vibração em mancais é encontrado pela análise numérica [STACHOWIAK e BATCHELOR, (1996)].

Segundo Dowson (1997), para o projeto de um mancal, é necessário assegurar que o mesmo possa operar satisfatoriamente nas condições impostas. É também importante mantê-lo abaixo dos limites de operação que possam comprometer a sua fiabilidade, e assim, evitar o seu sobredimensionamento.

Para um determinado mancal, as condições limitantes para a velocidade rotacional e carga são apresentados na (**Fig.13**) (DOWSON, 1997).

Em velocidades pequenas e sob carga pesada o risco do mancal ocorre no contato com o eixo, devido a fina espessura de filme lubrificante. Para altas velocidades e cargas leves, um limite operacional pode existir devido a oxidação do óleo, causado pela temperatura elevada, onde geralmente o chicoteamento do eixo provoca oscilações inaceitáveis (DOWSON, 1997).



**Figura 13 – Limite de carga e velocidade para um mancal (DOWSON, 1997).**

## 2.7. Propriedades dos Lubrificantes

### 2.7.1. Viscosidade

A viscosidade é a medida do atrito interno de um fluido, sendo a propriedade física mais importante de um óleo lubrificante (NEALE, 1995), e é também dada como o grau com que o fluido resiste a fluir. Ela relaciona diretamente a habilidade de um lubrificante separar

as superfícies deslizantes, e geralmente é correlacionada também com outras características de desempenho.

A viscosidade dinâmica é a propriedade lubrificante que envolve cálculos tribológicos. Elas provêm de relações entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento (NEALE, 1995), pode ser expressa como na *Equação (9)*:

Tensão de cisalhamento = coeficiente de viscosidade dinâmica x taxa de cisalhamento.

$$\tau = \mu \cdot \frac{\partial u}{\partial y} = \mu \cdot D \quad (9)$$

Onde:

$$\begin{aligned} \tau &= \text{tensão cisalhante (N/m}^2\text{)}, \\ \mu &= \text{viscosidade dinâmica (N.s/m}^2\text{)}, \\ \partial u / \partial y &= D = \text{taxa de cisalhamento (s}^{-1}\text{)}. \end{aligned}$$

Já a viscosidade cinemática  $\nu$  é expressa como sendo igual à viscosidade dinâmica (absoluta)  $\mu$  dividida pela massa específica  $\rho$  (*Eq.10*), mensurada pela norma ASTM D 445 comumente utilizados pelos fornecedores de lubrificantes.

$$\nu = \mu / \rho \quad (10)$$

A unidade de viscosidade dinâmica  $\mu$  no SI é expressa por N.s/m<sup>2</sup> (Newton x segundo por metro quadrado). Para formar um padrão métrico de unidade de viscosidade foi adotado também o poise, onde (1 N.s/m<sup>2</sup> = 10 poise). Na viscosidade cinemática  $\nu$  adotada no SI é o metro quadrado por segundo (m<sup>2</sup>/s), onde 1 m<sup>2</sup>/s corresponde a 10<sup>4</sup> Stokes (NEALE, 1995).

A Sociedade dos Engenheiros Automotivos dos Estados Unidos – SAE – possui limites de viscosidade definidos entre 100°C (212°F), e os óleos lubrificantes são divididos em três categorias.

- 1 – Óleos de verão: SAE 20, SAE 30, SAE 40, SAE 50 e SAE 60.
- 2 – Óleos de inverno: SAE 0W, 5W, 10W, 15W, 20W e 25W.
- 3 – Óleos multiviscosos (inverno e verão): SAE 20W40, 20W50 e 15W50.

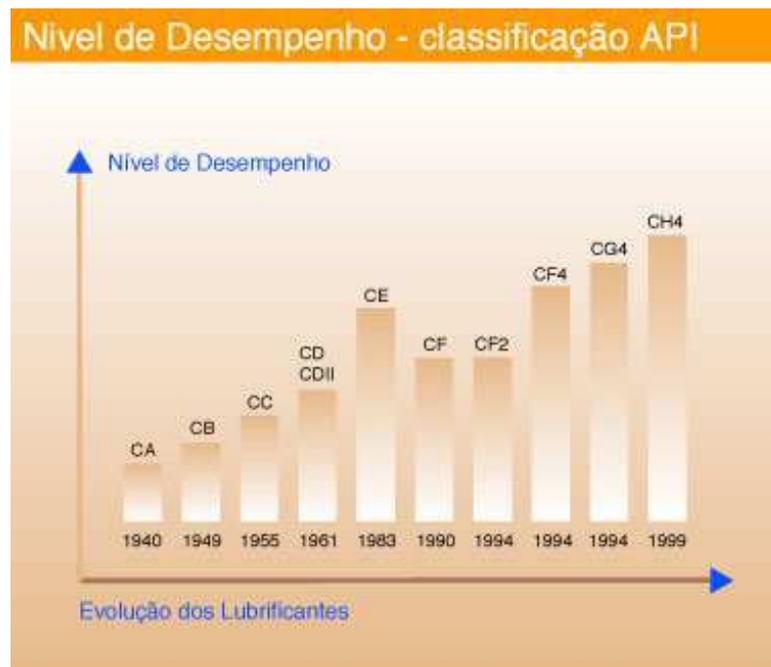
Onde o sufixo W significa inverno (*winter*). Na **Tabela (2)** é apresentada a classificação do grau de viscosidade SAE para os óleos lubrificantes.

**Tabela 2** – Classificação SAE para viscosidade (MARGHITU, 2001).

Grau SAE de Viscosidade	Medida de viscosidade $\mu$ a 100° C (cSt)
20	$5,6 \leq \mu < 9,3$
30	$9,3 \leq \mu < 12,5$
40	$12,5 \leq \mu < 16,3$
50	$16,3 \leq \mu < 21,9$

O Instituto Americano de Petróleo – API, em conjunto com a Sociedade Automotiva de Engenheiros – SAE e com a Sociedade Americana para Testes e Materiais – ASTM, estabeleceu um sistema de classificação para os óleos de motor que é baseado na descrição dos níveis de desempenho de cada tipo de óleo. O sistema é completado com testes de motores e limites de avaliação, sendo elaborado de tal forma que permite a adição de novos níveis de qualidade na medida em que se fizerem necessários (HILSDORF *et al.*, 2004).

O API classificou os óleos lubrificantes por duas letras: S ou C. Nos motores a gasolina, sigla “S” vem do termo *Spark* que significa Faísca ou Centelha, por exemplo: (SA, SB, SC, SD, SE, SF, SG, SH, SJ, SL), onde a segunda letra define seu desempenho. Nos motores a diesel, a primeira sigla “C” vem do termo inglês *Compression* ou Compressão, exemplo: (CA, CB, CC, CD, CE, CF, CF-4, CG-4, CH-4.). A **Figura (14)** ilustra a classificação API para o nível de desempenho versus a evolução dos lubrificantes para motores a diesel.

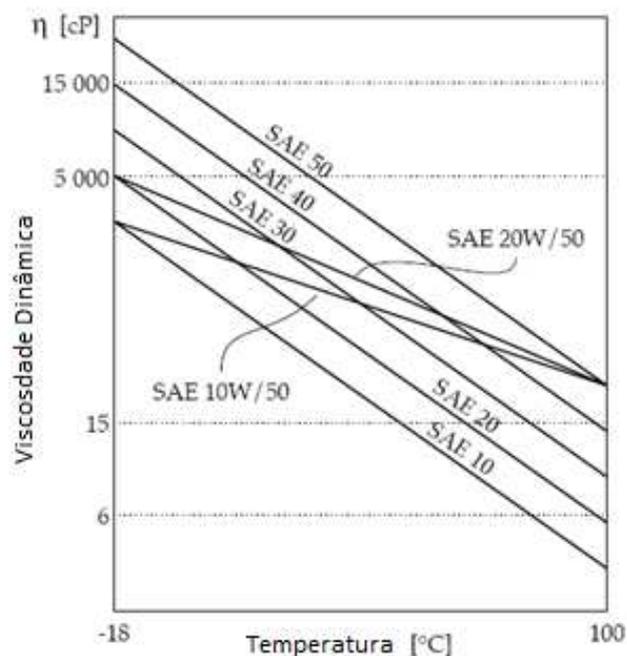


**Figura 14 – Classificação API para nível de desempenho de motores Diesel (Fonte: [www.lubrificantes.net](http://www.lubrificantes.net))**

### 2.7.2. Relação entre Viscosidade e Temperatura

A viscosidade de óleos lubrificantes são extremamente sensíveis, pois, com o aumento da temperatura a viscosidade dos óleos cai rapidamente. Em alguns casos, o decréscimo da viscosidade dos óleos chega a aproximadamente 80% com o aumento da temperatura de 25°C [STACHOWIAK e BATCHELOR (1996)].

Do ponto de vista da engenharia, faz importante conhecer o valor da viscosidade na temperatura de trabalho, uma vez que a mesma determinará a espessura do filme lubrificante que separa duas superfícies (*Fig.15*) [STACHOWIAK e BATCHELOR (1996)].



**Figura 15 – Viscosidade Dinâmica versus Temperatura para alguns óleos SAE [STACHOWIAK e BATCHELOR (1996)].**

### 2.7.3. Massa Específica

O massa específica ou densidade absoluta é a razão entre a massa e o volume de uma substância à temperatura e pressão específicas. Como o volume varia com a temperatura, é necessário especificar a temperatura da medida da massa específica (HILSDORF *et al.*, 2004).

### 2.7.4. Ponto de Fulgor

O ponto de fulgor é a menor temperatura na qual o combustível, ao ser aquecido, sob condições controladas, gera uma quantidade de vapores suficiente para formar com o ar uma mistura capaz de inflamar. Esta propriedade está relacionada á inflamabilidade e serve como indicativo das precauções que devem ser tomadas durante o manuseio, transporte e armazenamento de substâncias (MORAES, 2008).

### **2.7.5. Acidez**

O pH é um conceito proposto pelo dinamarquês Sørensen, em 1909, que significa literalmente potência ou concentração (p) de hidrogênio (H), o qual permite descrever o caráter ácido ou básico, tendo em conta o seu valor determinado numa escala de 0 a 14. Para a temperatura de 25°C, um meio aquoso será ácido se tiver pH de 0 a 7, será básico se o pH for de 7 a 14 e será neutro para o pH igual a 7 (HILSDORF *et al.*, 2004).

A acidez é uma medida de ácidos graxos livres que representam o indício de presença de água. Ela também é uma medida dos contaminantes e/ou constituintes de natureza ácida presentes no óleo (HILSDORF *et al.*, 2004).

### **2.7.6. Ponto de Névoa e Ponto de Fluidez**

O ponto de névoa de um óleo é a temperatura em que a parafina ou outras substâncias semelhantes, normalmente dissolvidas no óleo, começam a separar-se, formando minúsculos cristais, tornando o óleo turvo (HILSDORF *et al.*, 2004).

O ponto de fluidez é a menor temperatura na qual o óleo ainda pode escoar nas condições de teste, ou seja, está relacionado a facilidade de iniciar a lubrificação quando uma máquina fria é posta em funcionamento (HILSDORF *et al.*, 2004).

## **2.8. Propriedades Térmicas dos Lubrificantes**

As propriedades térmicas mais importantes dos lubrificantes são: calor específico, condutividade térmica e difusividade térmica. Esses três parâmetros são importantes para avaliar os efeitos do aquecimento na lubrificação [STACHOWIAK e BATCHELOR, (1996)].

### **2.8.1. Calor Específico**

O calor específico é uma grandeza física que define a variação térmica de uma substância ao receber determinada quantidade de calor.

O calor específico varia linearmente com a temperatura, e aumenta com a polarização ou com a ligação das moléculas de hidrogênio. O calor específico de um óleo é usualmente a metade do calor específico da água. Para lubrificante mineral e de base sintética, o calor específico está na escala de 1800 J/kg.K a 0°C e 3300 J/Kg.K a 400°C [STACHOWIAK e BATCHELOR, (1996)]. Para obter uma estimativa aproximada do calor específico, a seguinte fórmula pode ser empregada (*Eq.11*).

$$\sigma = \frac{1,63 + 0,0034.\theta}{s^{0,5}} \quad (11)$$

Onde:

$\sigma$  = calor específico (kJ/kg.K).

$\theta$  = temperatura de interesse (°C).

S = densidade relativa a 15,6°C.

## 2.8.2. Condutividade Térmica

A condutividade térmica é uma propriedade física dos materiais que é descrita como a habilidade dos mesmos de conduzir calor.

A condutividade térmica também varia linearmente com a temperatura e é afetada pela polarização e ligação das moléculas de hidrogênio. A condutividade térmica da maioria dos lubrificantes de base mineral e sintética encontram-se na escala de 0,14 W/m.K a 0°C e 0,11 W/m.K a 400°C [STACHOWIAK e BATCHELOR, (1996)]. Para obter uma estimativa aproximada da condutividade térmica, a seguinte fórmula pode ser empregada (*Eq.12*).

$$K = \frac{0,12}{s} (1 - 1,667.10^{-4}\theta) \quad (12)$$

Onde:

K = condutividade térmica (W/m.K).

$\theta$  = temperatura de interesse (°C).

S = densidade relativa a 15,6°C.

### 2.8.3. Difusividade Térmica

A difusividade térmica é um parâmetro que descreve a propagação de temperatura em sólidos [STACHOWIAK e BATCHELOR (1996)]. É definido através da **Equação (13)**.

$$\chi = \frac{K}{\rho\sigma} \quad (13)$$

Onde:

$\chi$  = difusividade térmica (m<sup>2</sup>/s).

K = condutividade térmica (W/m.K).

$\rho$  = massa específica (kg/m<sup>3</sup>).

$\sigma$  = calor específico (kJ/kg.K).

## 2.9. Óleo Mineral

Os óleos minerais são misturas de hidrocarbonetos, obtidos através da refinação do petróleo. Apresentam propriedades relacionadas com o tipo de petróleo de onde são extraídos. Os óleos lubrificantes minerais são obtidos pela destilação à pressão reduzida (devido ao alto ponto de ebulição desses compostos), obtendo-se três frações lubrificantes principais: leve, média e pesada. Segundo a origem do óleo e a qualidade desejada, sofre, ainda, processos de refinação, sendo classificados em óleos naftênicos ou em óleos parafínicos (**Tab.3**) (HILSDORF *et al.*, 2004).

**Tabela 3** – Classificação dos óleos lubrificantes (HILSDORF *et al.*, 2004).

<b>Óleos Parafínicos</b>	<b>Óleos Naftênicos</b>
Alto ponto de fluidez	Baixo ponto de fluidez
Alto índice de viscosidade	Baixo índice de viscosidade
Boa resistência à oxidação	Menor resistência à oxidação
Menor oleosidade	Maior oleosidade
Menor resíduo de carbono	Maior resíduo de carbono

## 2.10. Óleo Graxo

Os óleos graxos foram os primeiros lubrificantes a serem utilizados, sendo substituídos pelo aperfeiçoamento industrial. Atualmente, os óleos graxos são principalmente utilizados em misturas com óleos minerais para a obtenção de óleos compostos. Podem ser misturados até 30% nos óleos minerais, e conferem ao composto maior oleosidade e maior facilidade de emulsão com água. Apresentam pequena resistência à oxidação (tornam-se rançosos facilmente), formando gomas (HILSDORF *et al.*, 2004). Dependendo da origem, os óleos graxos podem ser:

### a) Óleos Vegetais

Óleo de rícino (extraído da semente de mamona), óleo de coco, óleo de oliva, óleo de dendê, etc.

A maioria dos óleos vegetais consistem principalmente de triglicerídeos, ou seja, de moléculas de glicerol com três graxos de cadeia longa, ácidos ligados aos grupos hidroxí (FOX *et al.*, 2007).

Segundo Bartz (1998) *Apud* Singh (2010), o óleo vegetal é conhecido pela sua alta lubricidade e por ajudar na combustão devido à presença de oxigênio na molécula, reduz o desgaste do motor, das velas e reduz depósitos da câmara de combustão. Além disso, os produtos vegetais matam o motor limpo em altas temperaturas de operação e evita a corrosão de mancais.

### b) Óleos Animais

Óleo de baleia, óleo de mocotó, óleo de peixe e outros. São pouco usados, pois oxidam facilmente.

## 2.11. Número de Peclet

A medida adimensional da velocidade com que uma fonte de calor se movimenta através da superfície, chamado de número de Peclet, é um critério que permite diferenciar vários regimes de velocidade [STACHOWIAK e BATCHELOR (1996)].

O número de Peclet é um indicador da penetração de calor no volume do contato sólido, ou seja, ele descreve se há tempo suficiente para a distribuição de temperatura da superfície de contato difundir em um sólido estacionário.

O número de Peclet é definido através da *Equação (14)*.

$$L = \frac{Ua}{2\chi} \quad (14)$$

Onde:

$L$  = número de Peclet.

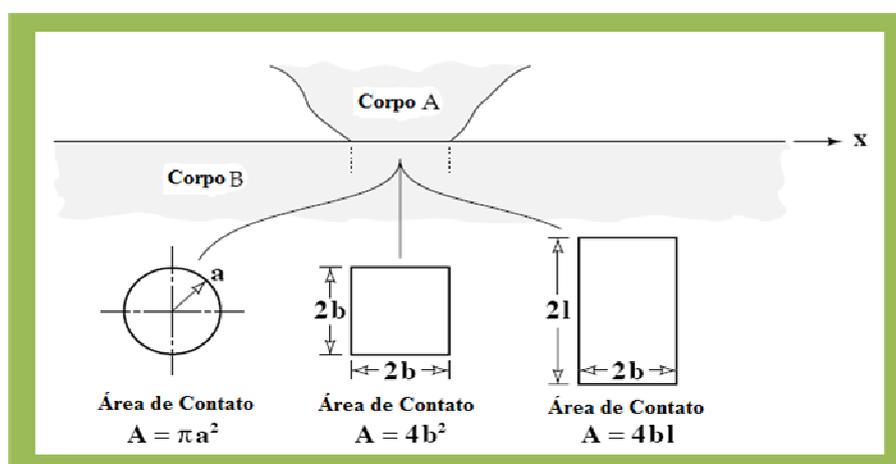
$U$  = velocidade de um sólido (A ou B) (m/s).

$a$  = dimensão do contato (m) (raio de contato para contato circular, metade da largura do quadrado para contato quadrado e metade da largura do retângulo para contato linear).

$\chi$  = difusividade térmica ( $m^2/s$ ),  $\chi = K / \rho \cdot \sigma$ .

Um alto número de Peclet indica uma alta velocidade da superfície para características constantes do material [STACHOWIAK e BATCHELOR (1996)].

Uma vez que todo o calor de atrito é gerado no contato, o contato é modelado e tratado como uma fonte de calor na análise. Equações de temperatura instantânea são formuladas com base no pressuposto de que a área de contato se move com velocidade  $U$  sobre a superfície plana de um corpo **B** (*Fig.16*) [STACHOWIAK e BATCHELOR (1996)].



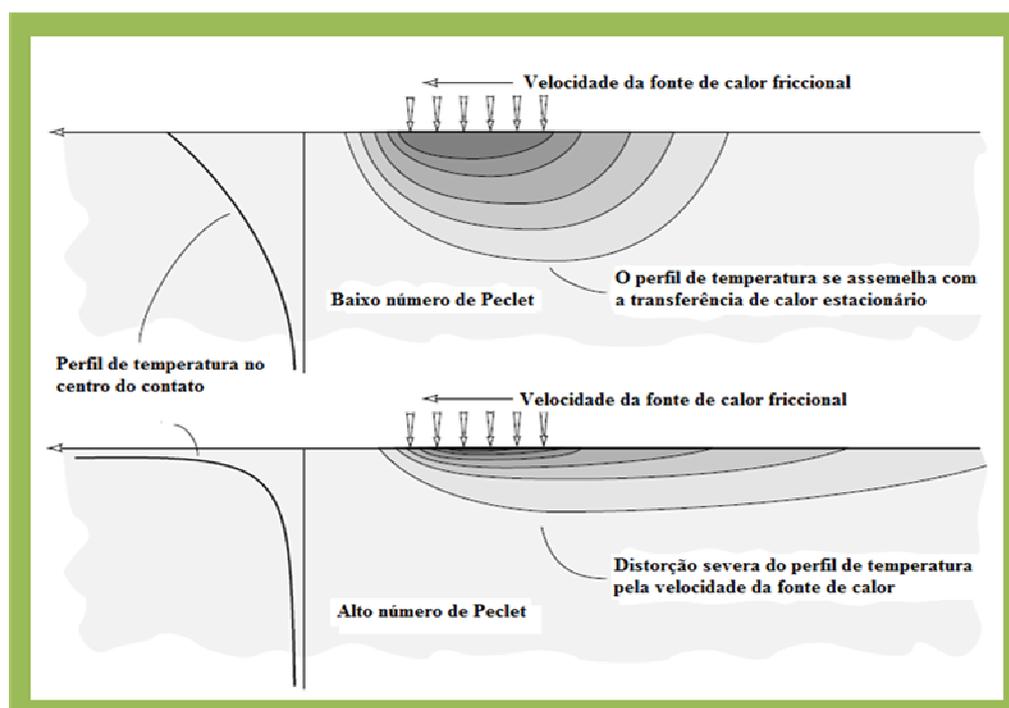
**Figura 16 – Geometrias de contato circular, quadrado e linear [STACHOWIAK e BATCHELOR (1996)].**

Os efeitos de transferência de calor variam com o número de Peclet, como mostra (Fig.17). As faixas de velocidade definidas pelo número de Peclet são consideradas nas análises de temperatura instantânea [STACHOWIAK e BATCHELOR (1996)].

Para  $L < 0,1$ ; uma superfície se move muito lentamente em relação a outra. Há tempo suficiente para a distribuição de temperatura do contato ser estabelecida em um corpo estacionário.

Para  $0,1 < L < 5$ ; região intermediária. Uma superfície se move mais rápido em relação a outra, e um modelo de fonte de calor movendo-se lentamente é assumido.

Para  $L > 5$ ; uma superfície se move rápido em relação a outra. Não há tempo suficiente para distribuição de temperatura do contato ser estabelecida no corpo estacionário. A profundidade em que o calor penetra no corpo estacionário é muito pequena comparado com as dimensões de contato [STACHOWIAK e BATCHELOR (1996)].



**Figura 17 – Perfil de temperatura friccional para baixos e altos números de Peclet [STACHOWIAK e BATCHELOR (1996)].**

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. Os Metais

Neste trabalho foram selecionados três materiais metálicos:

- I. *Alumínio L6261*, adquirido comercialmente na forma de barra cilíndrica, com diâmetro de  $\frac{1}{2}$ ";
- II. *Bronze TM-23*, adquirido comercialmente na forma de barra cilíndrica, com diâmetro de  $\frac{1}{2}$ ";
- III. *Aço AISI 1045 trefilado*, adquirido comercialmente em forma de barra cilíndrica, com diâmetro de  $\frac{1}{2}$ ".

Os materiais metálicos foram usinados pelo processo de torneamento, obtendo-se as seguintes geometrias:

- *Contracorpos*

Hastes de aço AISI 1045 com 12,2 mm de diâmetro e comprimento de 252,7 mm, com nove seções de 18 mm de comprimento, conforme a *Figura (18)*.



**Figura 18 – Hastes de aço AISI 1045.**

- *Corpos-de-prova*

A *Figura (19)* apresenta os pinos de Bronze TM-23, Alumínio 6261 e Aço AISI 1045, com diâmetro de 12,2 mm e altura de 25 mm.



**Figura 19 – Pinos de aço AISI 1045, bronze TM-23 e alumínio L6261.**

### **3.1.1. Aço AISI 1045**

O aço AISI 1045 é classificado como aço de médio teor de carbono, com boas propriedades mecânicas e tenacidade (STEIN *et al.*, 2005) . Podem ser utilizados em eixos, peças forjadas, engrenagens comuns, componentes estruturais e de máquinas, virabrequim, entre outras. Possui em sua composição: 0,45% de carbono (C), 0,20 de silício (Si), 0,85% de manganês (Mn), 0,014% de fósforo (P), 0,02% de enxofre (S), 0,02% de níquel (Ni), 0,11% de cromo (Cr), 0,027% de alumínio (Al) e 0,01% de cobre (Cu) (ELMER e PALMER, 2006).

### **3.1.2. Liga de Alumínio 6261**

O alumínio possui grande aplicabilidade em estruturas sujeitas a ações dinâmicas, em estruturas móveis e em estruturas onde o seu peso próprio corresponde a grande parte do carregamento total. Merecem destaque as estruturas espaciais, que fazem do alumínio juntamente com a concepção estrutural e arquitetônica, um conjunto extremamente viável (BUZINELLI, 2000).

As estruturas de alumínio, em comparação com as estruturas de aço, apresentam reduções no peso de 40% a 70%. A camada superficial do metal ao oxidar-se passa a apresentar propriedades oclusivas dando proteção às camadas mais internas do metal [ABDO (1993) *Apud* BUZINELLI (2000)].

Em função das características dos elementos da liga podem ser listadas as seguintes famílias das ligas de alumínio: série 1000, série 2000, série 3000, série 4000, série 5000, série 6000 e série 7000.

A liga de alumínio 6261 pertencente a família 6000 é uma liga metálica que tem como base o alumínio e proporções variáveis de outros elementos de liga como magnésio e silício, que formam a matriz ternária de Al-Mg-Si (ASM HANDBOOK, v. 9, 2004). A combinação de magnésio e silício proporciona maior resistência mecânica aliada à resistência a corrosão (BUZINELLI, 2000). A **Tabela (4)** apresenta a equivalência entre normas para ligas de alumínio (BUZINELLI, 2000) e a (**Tab.5**) apresenta os elementos de composição para as famílias das ligas de alumínio (ASHBY e JONES, 1998).

**Tabela 4** – Equivalência entre normas para ligas de alumínio (BUZINELLI, 2000).

Canadá	Brasil	USA	Alemanha	Itália	França	Inglaterra
ALCAN	ABNT	AA/ASTM/ ALCOA	DIN	UNI	NF ou AIR	BS
50S	6063	6063	Al-Mg-Si1	P-Al- Si0,5-Mg	A-GS	H9
D50S	6101	-	Al-Mg5		A-SGM	91E
55S	6053	6053	-	P-Al- Mg2,5	A-G5 MC	-
65S	6061	6061	-	-	-	-
D65S	6261	6261	-	-	-	-

**Tabela 5** – Elementos de composição das ligas de alumínio (ASHBY e JONES, 1998).

Metal	Composição Típica (wt%)
Série 1000 (Al não ligado)	99 Al
Série 2000 (maior aditivo de Cu)	Al + 4 Cu + Mg, Si, Mn
Série 3000 (maior aditivo de Mn)	Al + 1 Mn
Série 5000 (maior aditivo de Mg)	Al + 3 Mg 0.5 Mn
Série 6000 (maior aditivo de Mg + Si)	Al + 0.5 Mg 0.5 Si
Série 7000 (maior aditivo de Zn + Mg)	Al + 6 Zn + Mn, Cu, Mn
Ligas fundidas	Al + 11 Si
Alumínio com ligas de Lítio	Al + 3 Li

### 3.1.3. Bronze TM-23

Os bronzes são descritos como ligas de cobre (Cu) que contém estanho (Sn) como o único ou principal elemento de liga, podendo conter ainda proporções variáveis de chumbo (Pb), zinco (Zn), etc [FIGUEIREDO JR, *et al.* (2007)].

O chumbo é algumas vezes adicionado para atuar como um lubrificante interno e os bronzes ao chumbo são largamente utilizados em mancais que devem suportar ação de deslizamento prolongado. A presença de chumbo também facilita a usinagem da liga (FIGUEIREDO JR, *et al.*, 2007).

O bronze TM-23 é uma liga fabricada por fundição contínua, com alto teor de chumbo, que é insolúvel nas ligas sólidas, ficando isolado na forma de pequenos nódulos em uma matriz ternária de Cu-Zn-Sn (Catálogo Termomecânica, acesso em 16/10/2010). Apresenta boa resistência à corrosão, elevada resistência ao desgaste por fricção, excelente usinabilidade, permite que o mesmo trabalhe em sistemas em sistemas com lubrificação precária.

Esta liga pode ser empregada também na fabricação de bombas de água, corpos de válvulas, buchas, mancais de deslizamento, casquilhos, coroas, anéis, materiais hidráulicos, elementos de acoplamento, mancais com alta velocidade e pressões elevadas, mancais para trem de laminação, buchas para prensas, sapatas, casquilhos de deslize, engrenagens fundidas para locomotivas com moderada pressão nos flancos de dentes.

O bronze TM-23 possui em sua composição: 72% de cobre, 5% de estanho, 8% de zinco e 15% de chumbo [FIGUEIREDO JR, *et al.* (2007)]

## 3.2. Os Óleos

Neste trabalho foram selecionados dois óleos, um mineral (óleo SAE 40) e um vegetal (óleo de rícino).

O óleo mineral Lubrax MD 400 SAE 40 foi adquirido comercialmente em um posto de combustível BR. O óleo vegetal de rícino bruto foi adquirido comercialmente na cidade de Natal (*Fig.20*).



**Figura 20 – Aspecto visual da turbidez dos óleos de rícino e SAE 40 utilizados.**

A turbidez do óleo de rícino apresenta o aspecto marron-amarelado, conforme obtido por Kirk-Othmer (1979) *Apud* Singh (2010).

### **3.2.1. Óleo SAE 40**

O óleo mineral SAE 40 é um óleo lubrificante aditivado para motores diesel com aspiração natural e superalimentado, que atende ao nível de desempenho API CF. O Lubrax MD 400 foi fabricado para controlar a formação de depósitos no motor e nos filtros como também para reduzir o desgaste e a corrosão das partes lubrificadas. É utilizado na sua aditivação: anticorrosivo, antiespumante, antioxidante, detergente, dispersante, agente de reserva alcalina e baixador do ponto de fluidez (PETROBRAS, 2009).

### **3.2.2. Óleo de Rícino**

O óleo vegetal de rícino é oriundo da planta *ricinus communis*, pertencente á família das Euphorbiaceae, planta de origem afro-asiática, que pode ser encontrado em todo o território brasileiro. Essa ocorrência se dá em virtude de ser facilmente adaptável a diversas condições de solo e clima (DESER, 2007). Em variações bruscas de temperatura, não sofre alterações nas suas características, razão do seu imprescindível emprego na aviação (CARVALHO 1991 *Apud* COSTA 2006).

Segundo Maleque *et al.* (2003), o óleo de rícino é um bom lubrificante, que possui um alto teor de ácido ricinoléico. O óleo de rícino é constituído de uma mistura de ésteres de glicerol, cuja cadeia de ácidos graxos contém de 8 a 20 átomos de carbono (SILVA, 2006).

A obtenção do óleo de rícino conhecido popularmente como óleo de mamona, se dá através da prensagem das sementes, contendo 90% de ácido graxo ricinoléico, o qual confere ao óleo suas características singulares, possibilitando ampla gama de utilização industrial. A planta possui raízes laterais e uma raiz principal que pode atingir 1,50 metros de profundidade. As variedades cultivadas no Brasil podem ser de porte anão ou baixo (até 1,60 m), médio (1,60 a 2,00 m) ou alto (acima de 2,00 m). O fruto (**Fig.21**), é uma cápsula com espinhos, com três divisões e uma semente em cada uma (DAMASCENO e DOMINGUES, 2008).



**Figura 21 – Fruto da Ricinus Communis.**

No Nordeste a miscigenação de variedades dessa planta provocou um hibridismo espontâneo, onde os frutos são deiscentes, ou seja, se abrem espontaneamente derrubando as sementes (DAMASCENO e DOMINGUES, 2008).

Segundo Bartz (1998) *Apud* Singh (2010), o óleo de rícino é único em vários aspectos. Possui alta viscosidade e baixo coeficiente de atrito, e é o único dos óleos graxos comum a ser solúvel em álcool, mas não em óleos de petróleo devido ao grupo funcional da hidroxila. Possuem também, interações intermoleculares fortes, o que fornece resistência às mudanças de temperatura, proporcionando um ambiente estável (FOX, 2007).

A **Tabela (6)** apresenta a composição química do óleo de rícino [EMBRAPA *Apud* PERES, (2008)].

**Tabela 6** – Composição do óleo de rícino [EMBRAPA *Apud* PERES, (2008)].

Ácidos Graxos	%
Ricinoleico	89,5
Linoléico	4,2
Oléico	3,0
Palmítico	1,0
Estearico	1,0
9,10 – Di-hidróxi-esteárico	0,7
Eicosanóico	0,3
Linolênico	0,3

As propriedades do óleo de rícino variam com o método de extração [EMBRAPA *Apud* PERES, (2008)]. Segundo Kirk-Othmer (1979) *Apud* Singh (2010) e Fox *et al.* (2007), as propriedades físico-químicas do óleo de rícino são descritas na (**Tab.7**).

**Tabela 7** – Propriedade físico-químicas do óleo do de rícino.

Propriedades	Segundo [Kirk-Othmer (1979) <i>Apud</i> Singh (2010)]	Segundo Fox (2007)
Viscosidade cinemática a 40°C	252 cSt	252 cSt
Viscosidade cinemática a 100°C	19 cSt	20 cSt
Índice de iodo	83	-
Ponto de fluidez, °C	-10	
Ponto de fulgor, °C	>300	-
Índice de acidez	<4	-24
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	0,957	

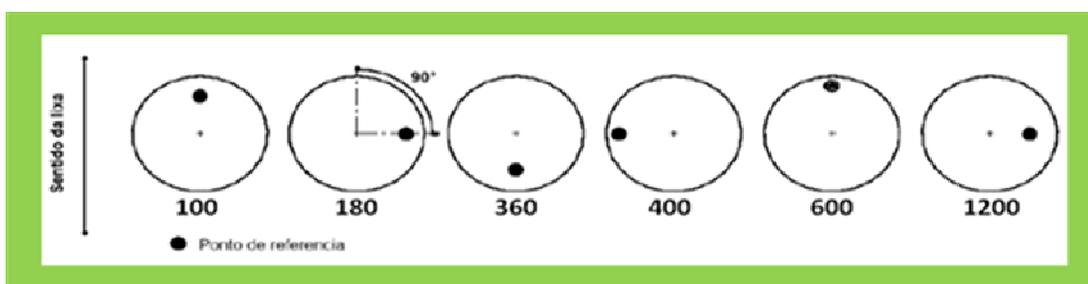
Segundo Fox (2007), a estrutura dos triglicerídeos é a base para deficiências inerentes de óleos vegetais como lubrificantes. As duplas ligações insaturadas de ácidos graxos são sítios ativos para muitas reações, incluindo a oxidação, diminuindo a estabilidade de óleos vegetais. A oxidação do óleo vegetal é iniciada pela formação de radicais livres.

### 3.3. Caracterização dos Materiais Metálicos

Os materiais metálicos foram caracterizados através de análise metalográfica, medidas de rugosidade (Ra, Rq) e ondulação (Wa e Wq), difração de Raios-X e medidas de dureza Rockwell B (HRB), Rockwell C (HRC) e Brinell (HB).

#### 3.3.1. Análise Metalográfica

Os materiais metálicos foram lixados com lixas de carboneto de silício nas seguintes seqüências granulométricas do abrasivo: #100, #180, #360, #400, #600 e #1200, respectivamente. A direção de lixamento foi variada com ângulo de 90° a cada troca de lixa (**Fig.22**), e o acabamento final foi realizado em uma Politriz, utilizando pasta de diamante com granulação de 6 µm. A microestrutura, revelada após o uso de reagentes químicos específicos para cada tipo de material, foi registrada utilizando-se um microscópio óptico de marca Olympus, modelo GX51.

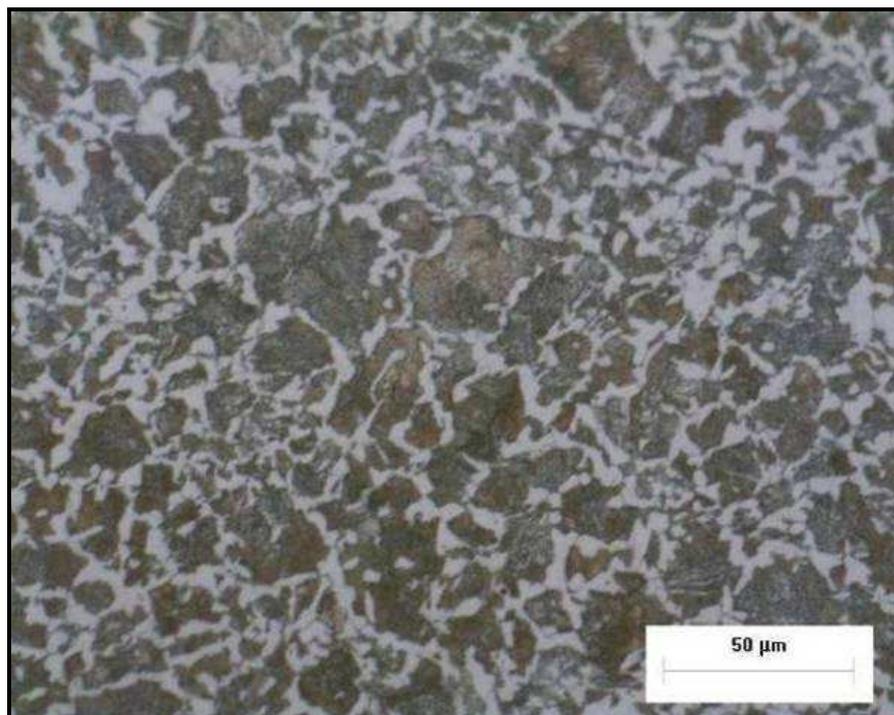


**Figura 22 – Representação esquemática do método de lixamento (ROHDE, 2010).**

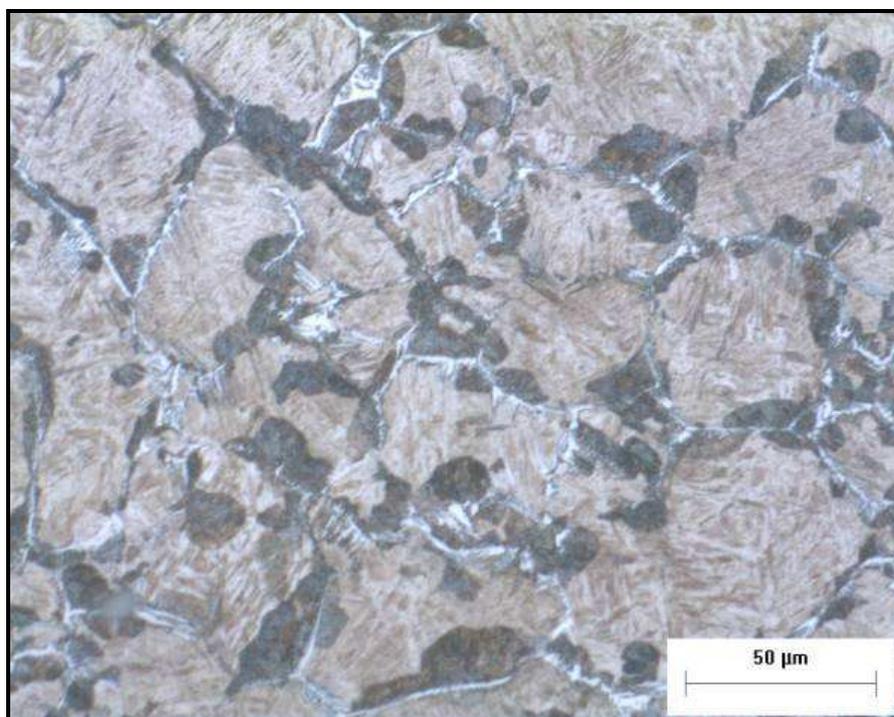
O reagente utilizado para atacar o aço AISI 1045 com e/ou sem tratamento térmico foi o Nital a 2%. Para ataque do alumínio 6261 foi utilizado *keller*, e para o bronze TM-23 o ácido fluorídrico a 0,5%.

Nas **Figuras (23)** a **(26)** são apresentadas as imagens obtidas por microscopia óptica dos materiais metálicos utilizados neste trabalho.

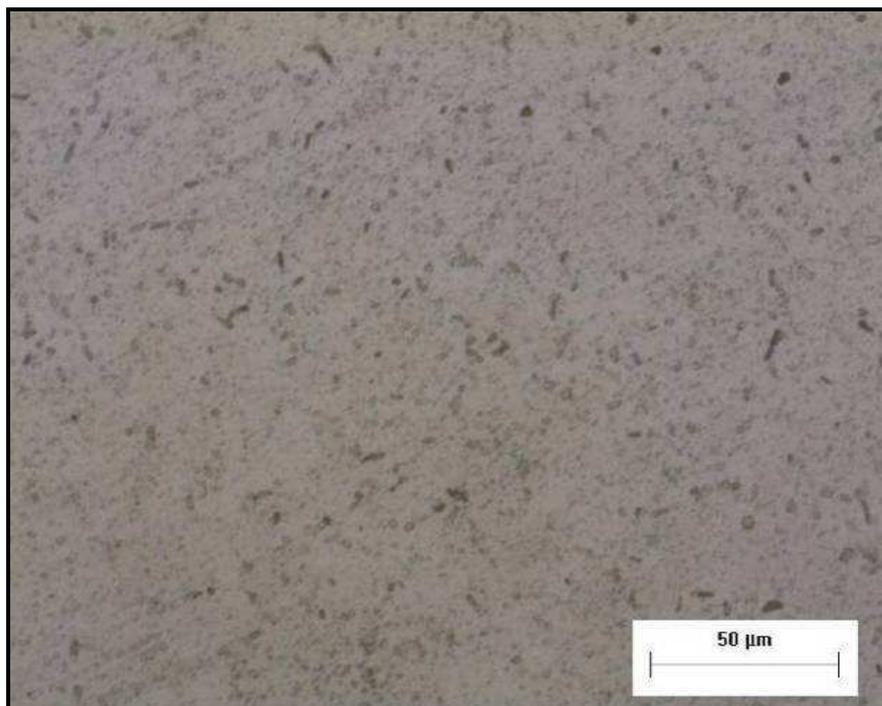
A **Figura (23)** ilustra a imagem do aço AISI 1045 como recebido, sem tratamento térmico, apresentando a presença de ferrita (regiões claras) e cementita (regiões escuras), caracterizando uma microestrutura predominantemente perlítica. Já na **Figura. (24)**, apresenta uma imagem do aço AISI 1045 após tratamento térmico de têmpera e revenimento.



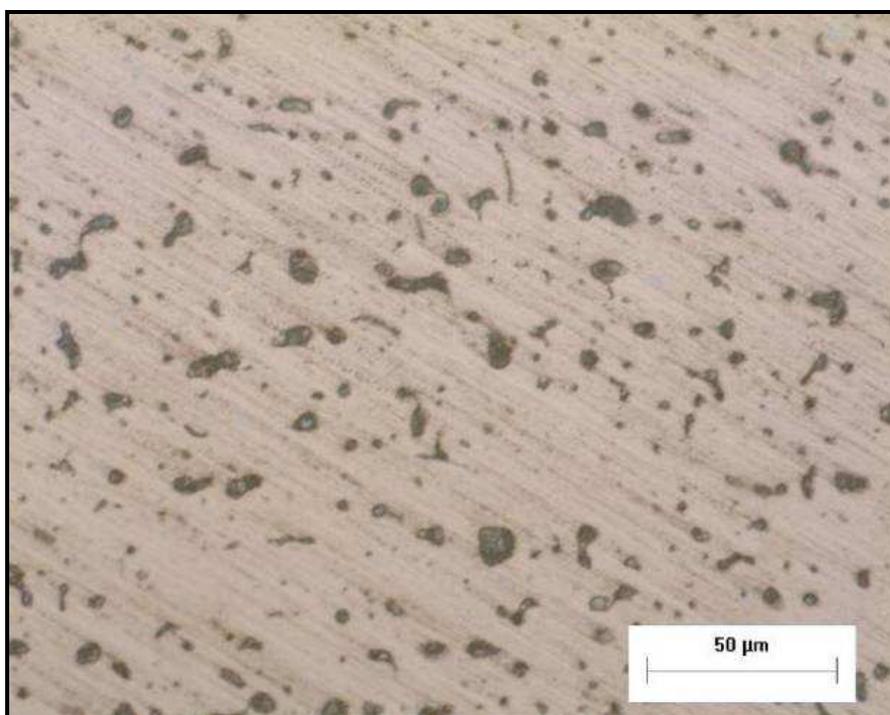
**Figura 23 – Imagem de MO do aço AISI 1045 sem tratamento térmico, apresentando uma microestrutura predominantemente perlítica. Ataque: Nital 2%.**



**Figura 24 – Imagem de MO do aço AISI 1045 após têmpera e revenido, apresentando microestrutura martensítica. Ataque: Nital 2%.**



**Figura 25 – Imagem de MO da liga de alumínio 6261, apresentando fase do composto intermetálico de  $\text{FeAl}_3$  (partículas escuras). Ataque: Keller.**



**Figura 26 – Imagem de MO do bronze TM-23, apresentando nódulos de óxidos de cobre  $\text{Cu}_2\text{O}$  (partículas escuras). Ataque: Ácido acético (acidez volátil = 4,4%).**

### 3.3.2. Medidas de Rugosidade e Ondulação

Os corpos-de-prova e contracorpos foram lixados com a finalidade de padronizar as superfícies de ensaios, com lixas de granulometrias conforme as utilizadas na preparação da metalografia.

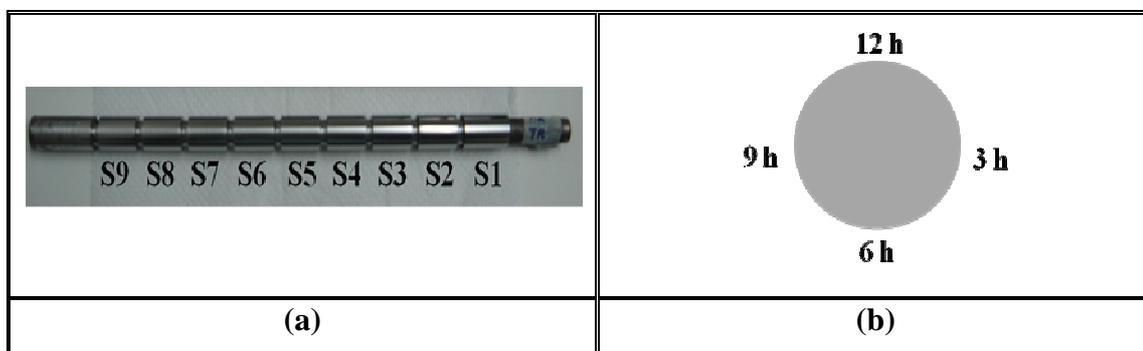
A rugosidade e a ondulação dos corpos-de-prova e contracorpos, foram obtidas através do rugosímetro Taylor Hobson Precision Surtronic 25 (*Fig.27*), no sentido transversal ao lixamento final da peça. O comprimento de amostragem, ou cut-off ( $\lambda_c$ ), foi de 0,8 mm.



**Figura 27 – Rugosímetro Taylor Hobson Precision Surtronic 25.**

Foram realizadas sete medidas de rugosidade e ondulação, para possibilitar uma varredura mais confiável nas superfícies planas dos corpos-de-prova.

Nos contracorpos cilíndricos, foram realizadas quatro medidas de rugosidade e ondulação ao longo da superfície cilíndrica de cada seção nas marcações: 12 horas, 3 horas, 6 horas e 9 horas, respectivamente, conforme *Figura (28)*.



**Figura 28 – Contra-corpo: zonas S1, S2, ..., S9 após torneamento e lixamento (a), em cujas geratrizes às direções 12h, 3h, 6h, 9h (b), foram tomadas as medidas de rugosidade e ondulação.**

Para medição da rugosidade, esta deve ser separada da ondulação e dos desvios macrogeométricos, através de uma filtragem. O comprimento de amostragem, cut-off, determina o sinal que deve passar ou não. O sinal de rugosidade apresenta altas frequências (pequenos comprimentos de onda), sendo definidos por filtros passa-alta que eliminam as baixas frequências. Já as ondulações e demais erros de forma apresentam sinais com baixas frequências (altos comprimentos de ondas), logo, são definidos por filtros passa-baixa, que remove os componentes de comprimento de onda mais longos do sinal do perfil [Whitehouse (1994) *Apud* Oliveira (2004)].

Na **Tabela (8)** são apresentados os valores médios e desvio padrão das medidas de rugosidade e ondulação dos materiais metálicos.

Os valores de rugosidade e ondulação dos corpos-de-prova e contracorpos utilizados no cálculo da média são apresentados respectivamente nos **Apêndices E e F**.

**Tabela 8** – Valor médio e desvio padrão da rugosidade e ondulação dos materiais metálicos em  $\mu\text{m}$ .

Forma	Materiais	Rugosidade		Ondulação	
		Ra	Rq	Wa	Wq
Pinos	Aço AISI 1045	0,223±0,12	0,305±0,15	0,253±0,7	0,282±0,84
	Alumínio L6261	0,217±0,16	0,369±0,51	0,535±0,72	0,574±0,77
	Bronze TM-23	0,157±0,08	0,198±0,12	0,456±0,70	0,498±0,74
Hastes	Aço AISI 1045	0,180±0,06	0,247±0,08	0,341±0,21	0,344±0,22

### 3.3.3. Medidas de Dureza

As durezas Rockwell C e Rockwell B dos corpos-de-prova e contracorpos de aço AISI 1045, foram obtidas através de um durômetro de marca Panambra (**Fig.29**).

Foram realizadas sete medidas de dureza Rockwell C e Rockwell B nos corpos-de-prova e contracorpos de aço AISI 1045. A dureza Rockwell B foi realizada antes do tratamento térmico, utilizando uma pré-carga de 10 Kgf e carga de 100 Kgf. A dureza Rockwell C foi realizada após o tratamento térmico de têmpera e revenimento dos corpos-de-

prova e contracos, utilizando uma pré-carga de 10 Kgf e carga de 150 Kgf, com a finalidade de verificar o ganho de dureza no material.



**Figura 29 – Durômetro de marca Panambra.**

As medidas de dureza Brinell dos corpos-de-prova de bronze TM-23 e alumínio L6261, foram obtidas através da *Equação (15)*, onde o diâmetro da calota formada pelo indentedor foi medida no projetor de perfil.

$$HB = \frac{2F}{\pi \cdot D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (15)$$

Onde :

F = carga aplicada (Kgf),

D = diâmetro da esfera (mm),

d = diâmetro da impressão (mm).

A *Tabela (9)* apresenta os valores de dureza para o aço AISI 1045, antes e após o tratamento térmico de têmpera e revenimento.

**Tabela 9** – Valores médios de dureza HRB, HRC e HB do aço AISI 1045.

Condição do Aço AISI 1045	Forma	Valor Médio de Dureza Rockwell B e Rockwell C		Valor Médio de Dureza Brinell
Antes do Tratamento Térmico	Pino	Rockwell B	100 ± 2 HRB	243 ± 0,32 HB
	Haste		101 ± 2 HRB	247 ± 0,92 HB
Após Tratamento Térmico	Pino	Rockwell C	47,0 ± 3 HRC	442 ± 0,45 HB
	Haste		49,0 ± 7 HRC	464 ± 1,3 HB

Foram obtidos maiores valores de dureza para as hastes de aço AISI 1045.

A *Tabela. (10)* apresenta os valores médios de dureza obtidos para os pinos de alumínio 6261 e bronze TM-23.

**Tabela 10** – Valores médios de dureza Brinell do alumínio 6261 e bronze TM-23.

Material	Forma	Valor Médio de Dureza Brinell
Alumínio 6261	Pino	71,98±0,34 HB
Bronze TM-23	Pino	80,97±0,12 HB

### 3.4. Caracterização dos Óleos Lubrificantes

Um lubrificante pode ser classificado pela sua viscosidade, desempenho, tipo de mecanismo no qual se pretende ser utilizado, como: lubrificantes automotivos, de aviação, marinha ou lubrificantes industriais.

Neste trabalho os óleos lubrificantes foram caracterizados através da viscosidade, massa específica, tensão superficial, ponto de fulgor e acidez.

#### 3.4.1. Viscosidade

A viscosidade cinemática foi determinada num equipamento para viscosidade cinemática a uma temperatura de 100°C (*Fig.30*) marca ISL, modelo TVB 445 Tamson Inside

que obedece a norma ASTM D445. Foi utilizado um tubo Cannon Fenske, série 150 com constante igual a  $0,03892 \text{ mm}^2/\text{s}^2$ .

O equipamento consiste em um recipiente com glicerina e uma serpentina para aquecê-la. Foi inserido por vácuo 15 ml do óleo em estudo dentro do tubo Cannon Fenske, e este é colocado dentro do recipiente em banho de glicerina. Após a homogeneização da temperatura do óleo foi realizado a primeira medida, que consiste em cronometrar a fluidez do óleo através dos capilares do tubo. Para cada tipo de óleo foram realizadas duas medidas.



**Figura 30 – Viscosímetro modelo TVB 445.**

A viscosidade dinâmica foi calculada através da *(Eq.10)* vista anteriormente, utilizando-se os valores obtidos de massa para cada tipo de óleo.

A *Tabela (11)* representam os valores obtidos para a viscosidade cinemática e a *Tab. (12)* os valores de viscosidade dinâmica, calculados através da *Equação 10*, descrita no capítulo 2.

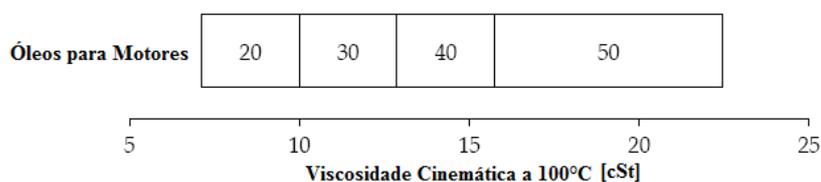
**Tabela 11 – Valores de viscosidade cinemática do óleo de rícino e óleo SAE 40.**

<b>Viscosidade Cinemática (<math>\text{mm}^2/\text{s}</math>) = cSt</b>	
Óleo de Rícino	21,367
Óleo SAE 40	17,086

De acordo com os resultados obtidos, verifica-se que o óleo de rícino possui maior viscosidade cinemática do que a do óleo SAE 40.

Souza (2007), avaliou diferentes óleos vegetais produzidos no estado do Rio Grande do Norte, dentre eles o óleo de rícino (conhecido como óleo de mamona). Conforme os resultados de Souza (2007), os óleos de rícino produzidos em regiões diferentes do estado, possuem propriedades físico-químicas diferentes, apresentando viscosidade cinemática entre 29,6 a 31,1 cSt.

Na **Figura (31)**, conforme Stachowiak e Batchelor (1996), o óleo SAE 40 possui viscosidade cinemática a 100°C entre 12,5 a 16,3 cSt.



**Figura 31 – Viscosidade cinemática dos óleos SAE para motores [Adaptado de STACHOWIAK e BATCHELOR (1996)].**

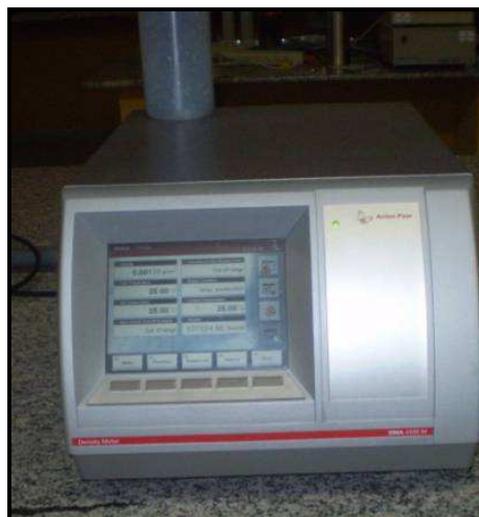
**Tabela 12 – Valores de viscosidade dinâmica do óleo de rícino e óleo SAE 40.**

Viscosidade Dinâmica	cP	PI
Óleo de Rícino	20,458	0,020458
Óleo SAE 40	15,22	0,01522

### 3.4.2. Massa específica

A massa específica foi medida num densímetro de marca Anton Paar DMA 4500M, (**Fig.32**), que segue a norma ASTM D 4052. O equipamento consiste em um tubo de vidro de borossilicato em forma de U que recebe o fluido a ser medido através da injeção na câmara, acomodando 20 ml do fluido a ser estudado. A massa específica é medida através de uma célula de medição de densidade pelo princípio do tubo em U que oscila. A temperatura é controlada pelo termostato fixo na célula e no sensor de platina.

Foram realizadas sete medidas para cada tipo de óleo na temperatura de 20°C, conforme a norma ASTM D 4052.



**Figura 32 – Densímetro marca Anton Paar DMA 4500M.**

Os valores médios de massa específica obtidas para os óleos lubrificantes utilizados no presente trabalho são apresentados na **Tabela (13)**. Verifica-se que o óleo de rícino apresenta valores de massa específica maiores em relação ao óleo SAE 40, conforme a literatura.

**Tabela 13 – Valores médios de massa específica do óleo de rícino e óleo SAE 40.**

<b>Massa Específica <math>\rho</math> (g/cm<sup>3</sup>) = (kg/l)</b>	
Óleo de Rícino	0,956 ± 0,0002
Óleo SAE 40	0,890 ± 0,0003

### 3.4.3. Ponto de Fulgor

O ponto de fulgor para o óleo de rícino e para o óleo SAE 40, foi medido em vaso fechado, com aparelho de marca Petrotest (**Fig.33**), num recipiente que acomodava 30 ml de óleo, seguindo a norma ASTM D93.

A ANP estabelece a norma ASTM D92 (vaso aberto), para ponto de fulgor de óleos lubrificantes minerais, conforme a portaria N°129 de 1999, ver **Apêndice A**. Devido as limitações de equipamento, o mesmo foi realizado neste trabalho com a norma ASTM D93.

Foram realizadas oito medidas de ponto de fulgor para cada tipo de óleo, a uma taxa de aquecimento de 3°C por minuto.

Para cada tipo de óleo, foram coletadas duas temperaturas do ponto de fulgor, e em seguida o óleo foi resfriado até obter uma queda de 10°C na sua temperatura. Após esse

resfriamento, foi executado mais duas medidas do ponto de fulgor. Ao término da medição, o óleo foi descartado, e o recipiente foi limpo para ser executado uma nova repetição desse procedimento.



**Figura 33 – Aparelho Petrotest.**

As *Tabelas (14) e (15)* apresentam, respectivamente, os valores do ponto de fulgor obtidos para os óleos de rícino e SAE 40, respectivamente.

**Tabela 14 – Ponto de fulgor do óleo de rícino.**

<b>Ponto e Fulgor do Óleo de Rícino</b>	<b>Após resfriamento de 10°C</b>	<b>Repetição do Óleo de Rícino</b>	<b>Após resfriamento de 10°C</b>
122°C	122°C	132°C	122°C
124°C	132°C	134°C	132°C

Os valores do ponto de fulgor para o óleo de rícino, difere dos resultados obtidos por Souza (2007), cujo ponto de fulgor obtido variou entre 287°C e 297 °C. Este fato pode ter ocorrido devido a quantidade de água contida no óleo, uma vez que este não passou pelo processo de refino e foi utilizado na sua forma bruta.

**Tabela 15** – Ponto de fulgor do óleo SAE 40.

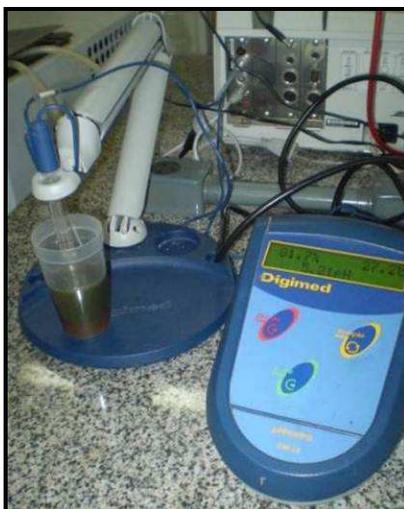
<b>Ponto e Fulgor do Óleo SAE 40</b>	<b>Após resfriamento de 10°C</b>	<b>Repetição do Óleo SAE 40</b>	<b>Após resfriamento de 10°C</b>
187°C	179°C	172°C	175°C
190°C	183°C	174°C	182°C

Os valores do ponto de fulgor do óleo SAE 40 obtidos neste trabalho, difere do informativo Petrobrás, cujo valor apresentado é de 262°C. Este fato, deve-se ao procedimento utilizado para a obtenção deste valor, uma vez que foram obtidos através da norma ASTM D93 e não através da norma recomendada pela ANP portaria N° 129 de 1999 (norma ASTM D92, para vaso aberto).

#### **3.4.4. Acidez**

A acidez foi medida num pHmetro de marca Digimed DM-23 que segue a norma ASTM D664 (*Fig.34*).

O pHmetro ou medidor de pH, consiste em um eletrodo acoplado a um potenciômetro (medidor de diferença de potencial), cujo medidor do pH é um milivoltímetro com uma escala que converte o valor de potencial do eletrodo em unidades de pH. Assim, a leitura do aparelho é feita em função da leitura dos milivolts que o eletrodo de vidro gera quando é submerso em uma amostra.

**Figura 34** – pHmetro Digimed DM-23.

A acidez obtida para os óleos de rícino e SAE 40 são apresentadas na **Tabela (16)**, onde pode-se verificar maiores valores de acidez para o óleo de rícino.

**Tabela 16** – Acidez do óleo de rícino e do óleo SAE 40.

<b>Acidez (pH)</b>	
Óleo de Rícino	6,28
Óleo SAE 40	5,21

### **3.5. A Máquina de Ensaio Tribológico**

Os ensaios foram realizados em um tribômetro, adaptado de uma máquina balanceadora, pelo Grupo de Estudos de Tribologia da UFRN. Este tribômetro é configurado para trabalhar com geometria na forma de cilindro contra plano, permitindo que entre os corpos-de-prova e contracorpos haja um contato em linha.

O contracorpo cilíndrico é apoiado por dois mancais em suas extremidades, e estes podem assumir quatro condições: mancais fixos, mancais livres e as combinações entre eles.

Com a finalidade de evitar a influência do ruído externo na coleta de dados do nível de pressão sonora, o equipamento de ensaio foi revestido com folhas de isopor (**Fig.35**) de 5 cm de espessura, e recoberto com espuma acústica de densidade 45 e espessura de 5 cm (**Fig.36**).



**Figura 35 – Equipamento de ensaio tribológico revestido com isopor.**



**Figura 36 – Equipamento de ensaio tribológico revestido com isopor e espuma acústica D45 (a), e visão geral do equipamento em funcionamento (b).**

A eficiência do revestimento foi avaliada, utilizando um decibelímetro (*Fig.37*), e uma fonte externa de ruído, que verificou o nível de pressão sonora que poderia ser absorvido no

interior do equipamento. Tais medidas foram realizadas inicialmente no equipamento revestido com isopor, e em seguida com revestimento de isopor e espuma acústica D45, sendo observado, neste caso, um decréscimo do nível de pressão sonora de aproximadamente **10 dB**.

Todos os dados de nível de pressão sonora foram coletados na região 5 (ver *Apêndice B*), devido às limitações de espaço dentro da máquina.



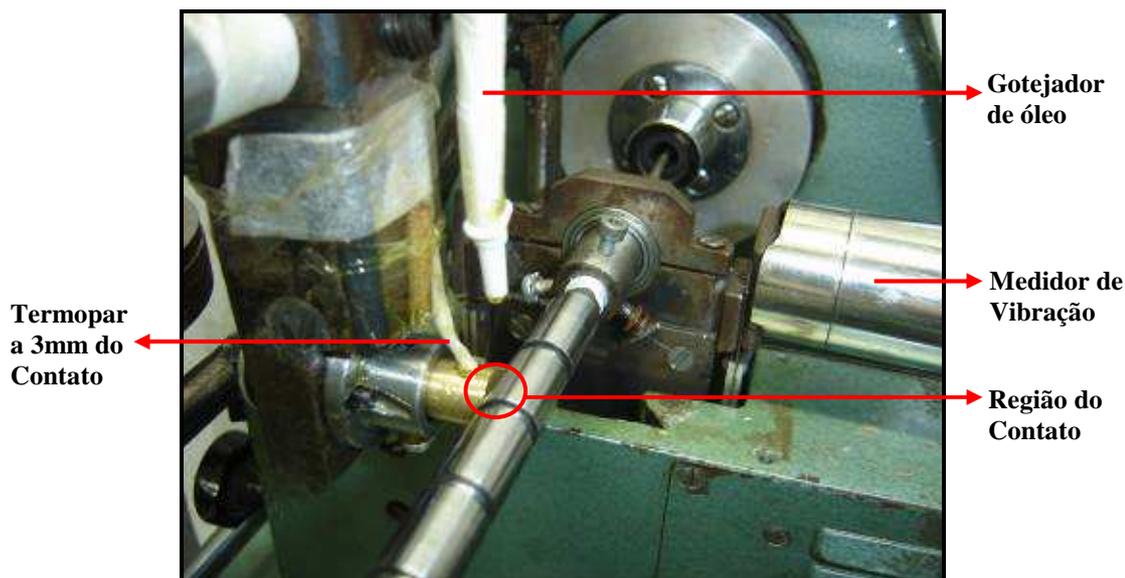
**Figura 37 – Decibelímetro Impac SL – 4012.**

A velocidade do motor de indução trifásica, foi controlada em uma rotação de aproximadamente 1300 RPM, através de um inversor de frequência de marca Weg, modelo CFW-07.

No estágio de potência do inversor de frequência, a tensão alternada da rede de alimentação da máquina é transformada em tensão contínua através do retificador, sendo em seguida, filtrada por um banco de capacitores, formando um circuito intermediário. A partir deste circuito intermediário, o inversor gera a alimentação trifásica para o motor com tensão e frequência variáveis, utilizando a técnica de modulação vetorial.

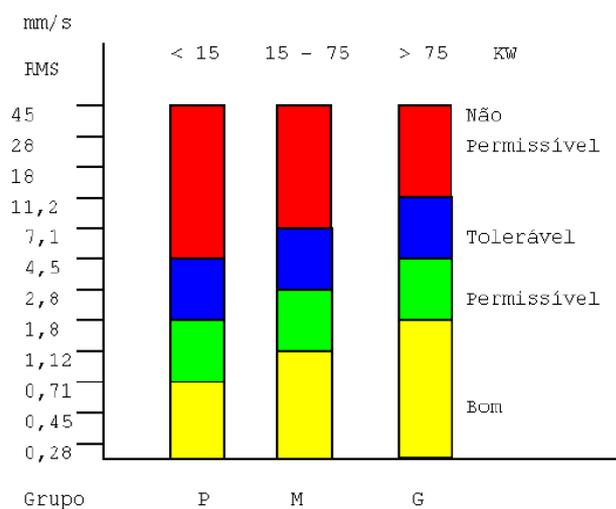
Uma placa de aquisição de dados da National Instruments, com módulo de temperatura NI 9211, foi utilizada para coletar a dissipação térmica do sistema.. Os fios foram aferidos com calibrador digital tipo bloco seco, ver *Apêndice C*.

Com a finalidade de avaliar a temperatura próximo a região de contato, foram realizados em cada corpo-de-prova um furo de 2 mm de diâmetro a aproximadamente 3 mm de distância do contato, onde foram fixados os fios termopares (*Fig.38*). Próximo a região de contato, uma válvula foi colocada para controlar o fluxo de vazão do óleo lubrificante. Foi anexado ao mancal fixo que recebe a potência do motor um medidor de vibração da TEKNIKAO NK300 (sem filtro), para coletar o sinal de velocidade global de vibração (mm/s - RMS), emitido pelo mesmo.



**Figura 38 – Detalhe do contato entre corpo-de-prova e contracorpo.**

O medidor de vibração da TEKNIKAO (sem filtro), mede a vibração total resultante da ação de todas as frequências presentes no sinal de vibração, dentro da faixa considerada, onde as medições são comparadas com padrões gerais (normas) ou valores de referência. Em casos de falta de valores de referência, as leituras de velocidade em RMS podem ser comparadas com critérios de severidade de vibração normalizados que podem indicar a necessidade de manutenção (*Fig.39*).



**Figura 39 – Critério de severidade de vibração normalizado (manual da TEKNIKAO).**

### 3.5.1. Ensaios Tribológicos

No presente trabalho, foram realizados ensaios de deslizamento lubrificados para avaliar o desempenho do óleo de rícino em relação ao óleo lubrificante SAE 40. Utilizou-se para isto, pares tribológicos de diferentes materiais metálicos. O aço AISI 1045 temperado e revenido foi utilizado como contracorpo (haste). Já os corpos-de-prova (pinos), foram confeccionados de alumínio 6261, bronze TM-23 e aço AISI 1045 temperado e revenido.

Dois valores de carga normal foram aplicadas, 9N e 20N. A velocidade relativa e a distância de deslizamento foram mantidas constantes em: 0,83 m/s e 6 Km, respectivamente.

Adotou-se a condição de deslizamento com mancais fixos. A vazão do óleo lubrificante no contato dos pares tribológicos, ocorreu a cada 1 minuto.

Foi realizada uma repetição para cada configuração de pares de deslizamento adotados, totalizando 32 ensaios.

Na **Tabela (17)**, discrimina os parâmetros adotados nos ensaios de deslizamento, bem como os materiais e óleos lubrificantes utilizados.

**Tabela 17** – Parâmetro dos Ensaios de Deslizamento.

<i>CONDIÇÕES</i>	<i>LUBRIFICANTE</i>	<i>CARGA</i>	<i>CORPO-DE-PROVA</i>
<i>VELOCIDADE</i> (1300 RPM)	<i>RÍCINO</i>	<i>9N</i>	<i>Alumínio L6261</i>
			<i>Bronze TM-23</i>
			<i>Aço AISI 1045</i>
<i>VELOCIDADE RELATIVA</i> (0,83 m/s)	<i>SAE 40</i>	<i>9N</i>	<i>Alumínio L6261</i>
			<i>Bronze TM-23</i>
			<i>Aço AISI 1045</i>
<i>DISTÂNCIA DE DESLIZAMENTO</i> (6 Km)	<i>RÍCINO</i>	<i>20N</i>	<i>Alumínio L6261</i>
			<i>Bronze TM-23</i>
			<i>Aço AISI 1045</i>
<i>MANCAIS</i> (Fixos)	<i>SAE 40</i>	<i>20N</i>	<i>Alumínio L6261</i>
			<i>Bronze TM-23</i>
			<i>Aço AISI 1045</i>

As temperaturas coletadas no decorrer dos ensaios foram obtidas a uma taxa de aquisição de 1 segundo. Os dados de velocidade global de vibração foram coletadas a cada 5 minutos e o nível de pressão sonora foi coletado a uma taxa de 1 segundo.

Antes e após a realização dos ensaios, os corpos-de-prova foram lavados em uma solução de álcool isopropílico e pesados em uma balança digital. A taxa de desgaste foi calculada através da equação de Archard (*Eq.2*), que relaciona a variação de massa devido ao desgaste e a densidade dos materiais. A umidade relativa do ar foi coletada no início e no término dos ensaios, na região externa a cabine.

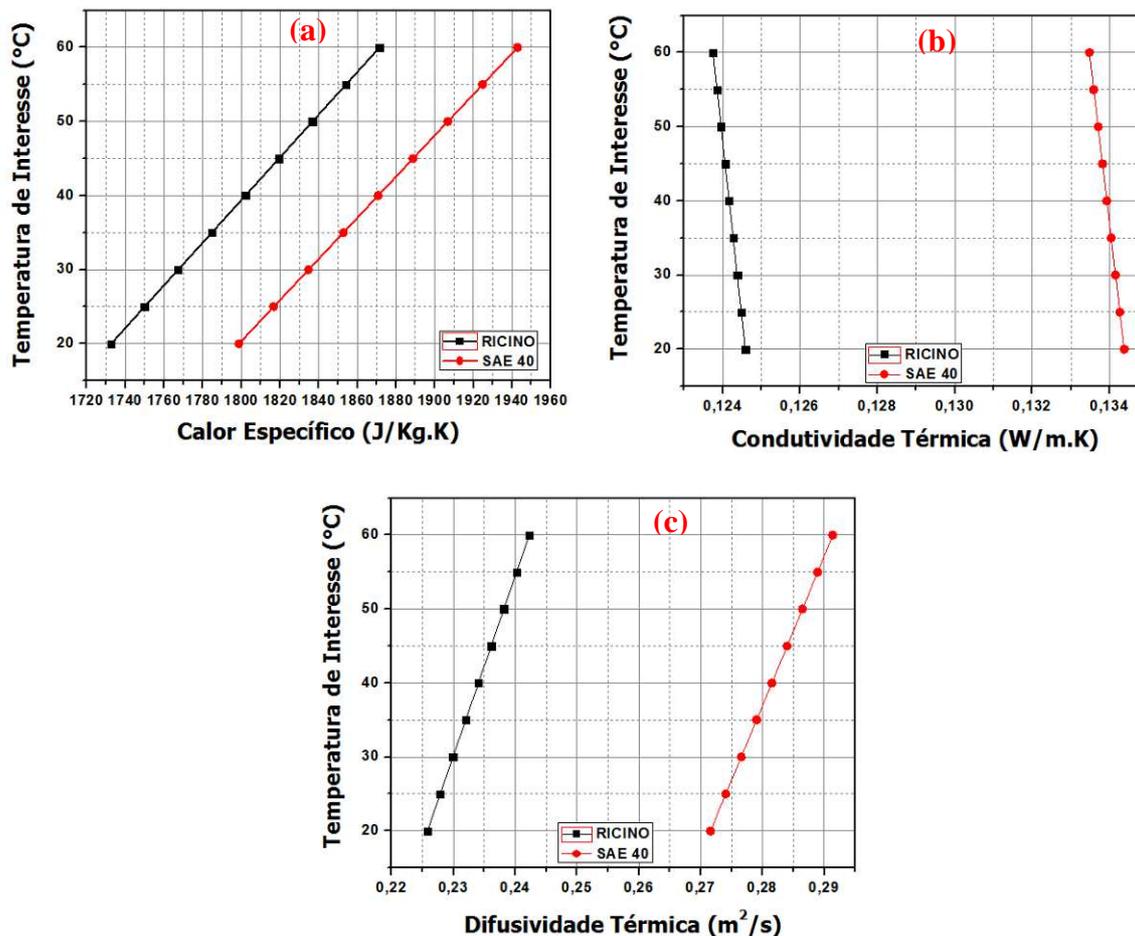
O calor específico, a condutividade térmica e a difusividade térmica dos fluidos estudados foram estimados através das equações *11,12* e *13*, respectivamente.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Estimativa das Propriedades Térmicas dos Lubrificantes

As propriedades térmicas dos lubrificantes (calor específico, condutividade térmica e difusividade térmica) (*Fig.40*), foram calculadas através das equações *11*, *12* e *13*, como mostrado no capítulo 2. Os cálculos foram realizados levando em consideração a temperatura de interesse de: 20°C, 25°C, 30°C, 35°C, 40°C, 45°C, 50°C, 55°C e 60°C, e a densidade relativa a 20°C dos óleos estudados.

Os gráficos (*a*), (*b*) e (*c*), mostram que o óleo SAE 40 possui maior calor específico, maior condutividade térmica e maior difusividade do que o óleo de rícino, ou seja, possui maior capacidade de receber uma determinada quantidade de calor, maior capacidade de conduzir calor e maior capacidade de propagar a temperatura em sólidos, o que é comprovado nos gráficos de aquecimento a 3 mm do contato (*item 4.3*) a seguir.



**Figura 40 – Propriedades térmicas dos lubrificantes (a) calor específico, (b) condutividade térmica e, (c) difusividade térmica.**

Os valores calculados das propriedades térmicas para as temperaturas de interesse de 20°C a 60°C, encontram-se no *Apêndice G*.

## 4.2. Estimativa do Número de Peclet

O número de Peclet foi estimado através da medição da dimensão da escara de desgaste impressa na superfície do corpo-de-prova após a realização dos ensaios de deslizamento.

As *Tabelas (18) e (19)* indicam os valores obtidos do número de Peclet para a carga de 9N, utilizando óleo de rícino e óleo SAE 40, respectivamente.

**Tabela 18** – Número de Peclet para o óleo de rícino com carga de 9N.

<b>Materiais</b>	<b>K (W/m.K)</b>	<b><math>\sigma</math> (J/kg.K)</b>	<b><math>\rho</math> (Kg/ m<sup>3</sup>)</b>	<b>U (m/s)</b>	<b>a (m)</b>	<b>L</b>
<i>Aço 1045</i>	49,8	460	7710	0,83	$7,5 \cdot 10^{-4}$	22,2
<i>Alumínio</i>	147	880	2700	0,83	$7,06 \cdot 10^{-4}$	6
<i>Bronze</i>	33	390	9200	0,83	$3,67 \cdot 10^{-4}$	16,6

**Tabela 19** – Número de Peclet para óleo SAE 40 com carga de 9N.

<b>Materiais</b>	<b>K (W/m.K)</b>	<b><math>\sigma</math> (J/kg.K)</b>	<b><math>\rho</math> (Kg/ m<sup>3</sup>)</b>	<b>U (m/s)</b>	<b>a (m)</b>	<b>L</b>
<i>Aço 1045</i>	49,8	460	7710	0,83	$1,51 \cdot 10^{-4}$	4,5
<i>Alumínio</i>	147	880	2700	0,83	$5,68 \cdot 10^{-4}$	3,8
<i>Bronze</i>	33	390	9200	0,83	$6,025 \cdot 10^{-4}$	27,2

Observa-se, nos materiais ensaiados com óleo de rícino e carga de 9N, que o número de Peclet foram superiores a 5, indicando que nos contatos lubrificadas dos metais em estudo não há tempo suficiente para que a distribuição de temperatura seja estabelecida no mesmo. Nos ensaios com óleo SAE 40 apenas o bronze apresentou o comportamento descrito anteriormente. Este fato pode estar relacionado a porosidade do bronze que permite a penetração do óleo em suas cavidades e contribui para a refrigeração do mesmo. Os demais materiais apresentaram números de Peclet inferiores a 5, indicando que há tempo suficiente para a propagação do calor gerado na superfície de contato.

As *Tabelas (20) e (21)* indicam os valores obtidos do número de Peclet para a carga de 20N, utilizando óleo de rícino e óleo SAE 40.

**Tabela 20** – Número de Peclet para o óleo de rícino com carga de 20N.

<b>Materiais</b>	<b>K (W/m.K)</b>	<b><math>\sigma</math> (J/kg.K)</b>	<b><math>\rho</math> (Kg/ m<sup>3</sup>)</b>	<b>U (m/s)</b>	<b>a (m)</b>	<b>L</b>
<i>Aço 1045</i>	49,8	460	7710	0,83	$8,1 \cdot 10^{-4}$	23,8
<i>Alumínio</i>	147	880	2700	0,83	$2,9 \cdot 10^{-4}$	117,3
<i>Bronze</i>	33	390	9200	0,83	$2,6 \cdot 10^{-3}$	2

**Tabela 21** – Número de Peclet para o óleo SAE 40 com carga de 20N.

<b>Materiais</b>	<b>K (W/m.K)</b>	<b><math>\sigma</math> (J/kg.K)</b>	<b><math>\rho</math> (Kg/ m<sup>3</sup>)</b>	<b>U (m/s)</b>	<b>a (m)</b>	<b>L</b>
<i>Aço 1045</i>	49,8	460	7710	0,83	$3,14 \cdot 10^{-4}$	9,3
<i>Alumínio</i>	147	880	2700	0,83	$6,3 \cdot 10^{-4}$	4,3
<i>Bronze</i>	33	390	9200	0,83	$6,8 \cdot 10^{-4}$	30,52

Nos ensaios realizados com óleo de rícino e carga de 20N verificou-se que tanto para a liga de alumínio quanto para o aço AISI 1045 o número de Peclet foi superior a 5. Nestas condições de ensaio o bronze apresentou número de Peclet inferior a 5 indicando que houve tempo suficiente para propagar a temperatura do contato no corpo estacionário.

Na utilização do óleo SAE 40 com carga de 20N, obteve-se número de Peclet superior a 5 para o aço AISI 1045 e para o bronze, enquanto a liga de alumínio apresenta-se inferior a 5.

Baseado no mapa de desgaste para aços na configuração pino-sobre-disco na condição não lubrificada obtida por Hutchings (1992), foi construído um mapa de desgaste dos materiais estudados, *Figuras (41) e (42)*, para as duas condições de lubrificação, através dos dados da pressão normalizada, calculada com as *Equações (16) e (17)*, em função da velocidade normalizada (Número de Peclet).

$$N = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \alpha \cdot L \cdot P_{\text{máx}} \quad (16)$$

e

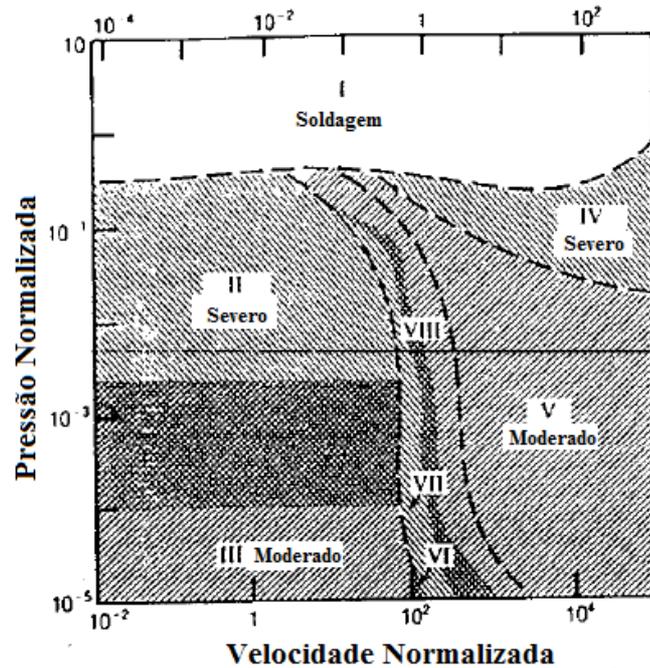
$$P_n = \frac{P_{\text{máx}}}{Dureza_{\text{mole}}} \quad (17)$$

Onde:

N = carga (N);

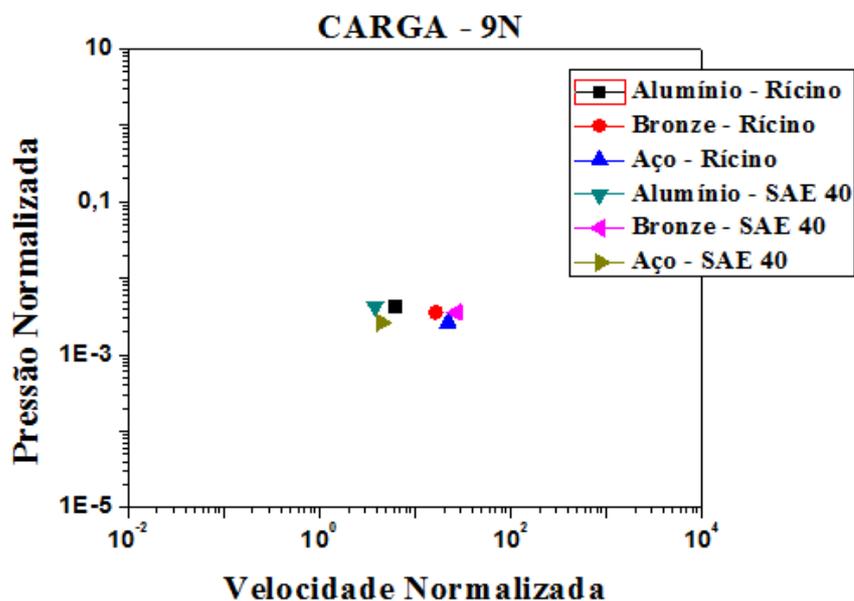
a e L = comprimento das escaras de desgaste, ambas em metro;

P<sub>máx</sub> = pressão máxima (Pa);



**Figura 41 – Mapa de desgaste para aços na configuração pino-sobre-disco na condição não lubrificada (HUTCHINGS, 1992).**

A *Figura (42)* apresenta a pressão normalizada versus a velocidade normalizada na condição de ensaio lubrificado utilizando-se carga de 9N. Nestas condições, verifica-se que os valores de pressão normalizada permanecem no mesmo patamar quando materiais idênticos são comparados com lubrificantes diferentes, ocorrendo apenas pequenas variações na velocidade normalizada entre os materiais.



**Figura 42 – Mapa de desgaste para carga de 9N.**

A estimativa do número de Peclet para os materiais lubrificadas com óleo SAE 40 e carga de 20N, apresentados na *Figura (43)*, demonstra que a pressão normalizada e velocidade normalizada apresentam pequenas variações entre materiais idênticos, com exceção do contato aço-aço, onde a pressão normalizada apresenta a diferença de aproximadamente uma ordem de grandeza.

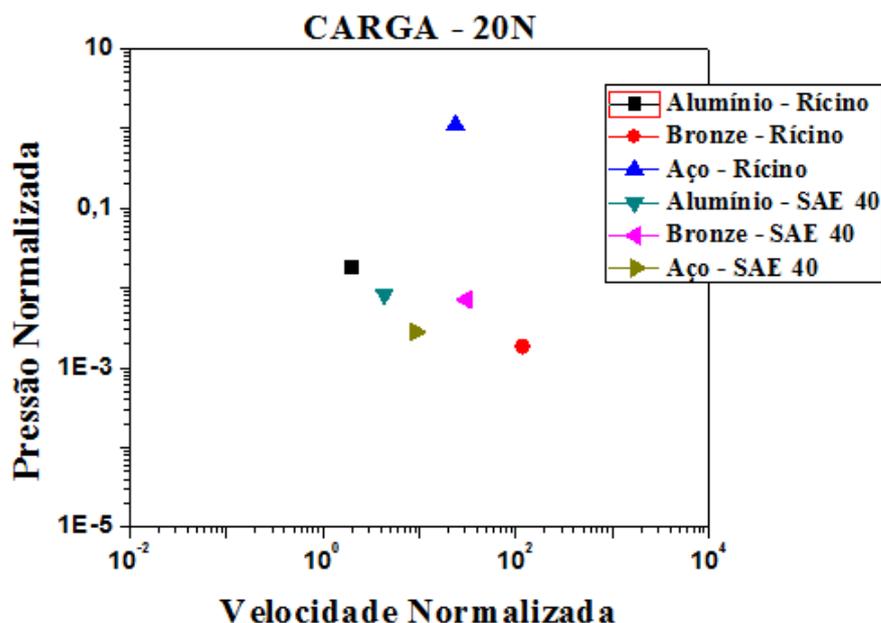


Figura 43 – Mapa de desgaste para carga de 20N.

### 4.3. Calor Dissipado, Nível de Pressão Sonora e Resposta Vibracional do Sistema.

Das *Figuras (44)* a *(49)* serão apresentados os gráficos de aquecimento a 3 milímetros do contato, a correlação entre o aquecimento dos óleos de rícino e SAE 40, nível de pressão sonora (NPS) e velocidade global de vibração (VGV) para os ensaios realizados com carga de 9N e lubrificadas com óleo de Rícino e óleo SAE 40.

Na análise dos dados de aquecimento do contato aço – alumínio, através da distribuição de janelas temporais (*Fig.44a*), observa-se que a distribuição dos quartis ao utilizar o óleo de rícino como lubrificante apresenta maiores dispersões. Entretanto, o aquecimento do contato lubrificado com óleo de rícino é menor que o lubrificado com óleo SAE 40. A qualidade dos resultados de aquecimento foi verificada através do gráfico de

correlação (*Fig.44b*), obtidas a partir dos dados que situam-se fora do período de amaciamento das asperezas (running). Observa-se que o óleo SAE 40 apresenta  $R^2 = 0,974$  indicando que a qualidade de seus dados são melhores que do óleo de rícino com  $R^2 = 0,821$ . A temperatura média obtida no contato para os óleos de rícino e SAE 40 foram de 26,09 °C e 25,14 °C, respectivamente.

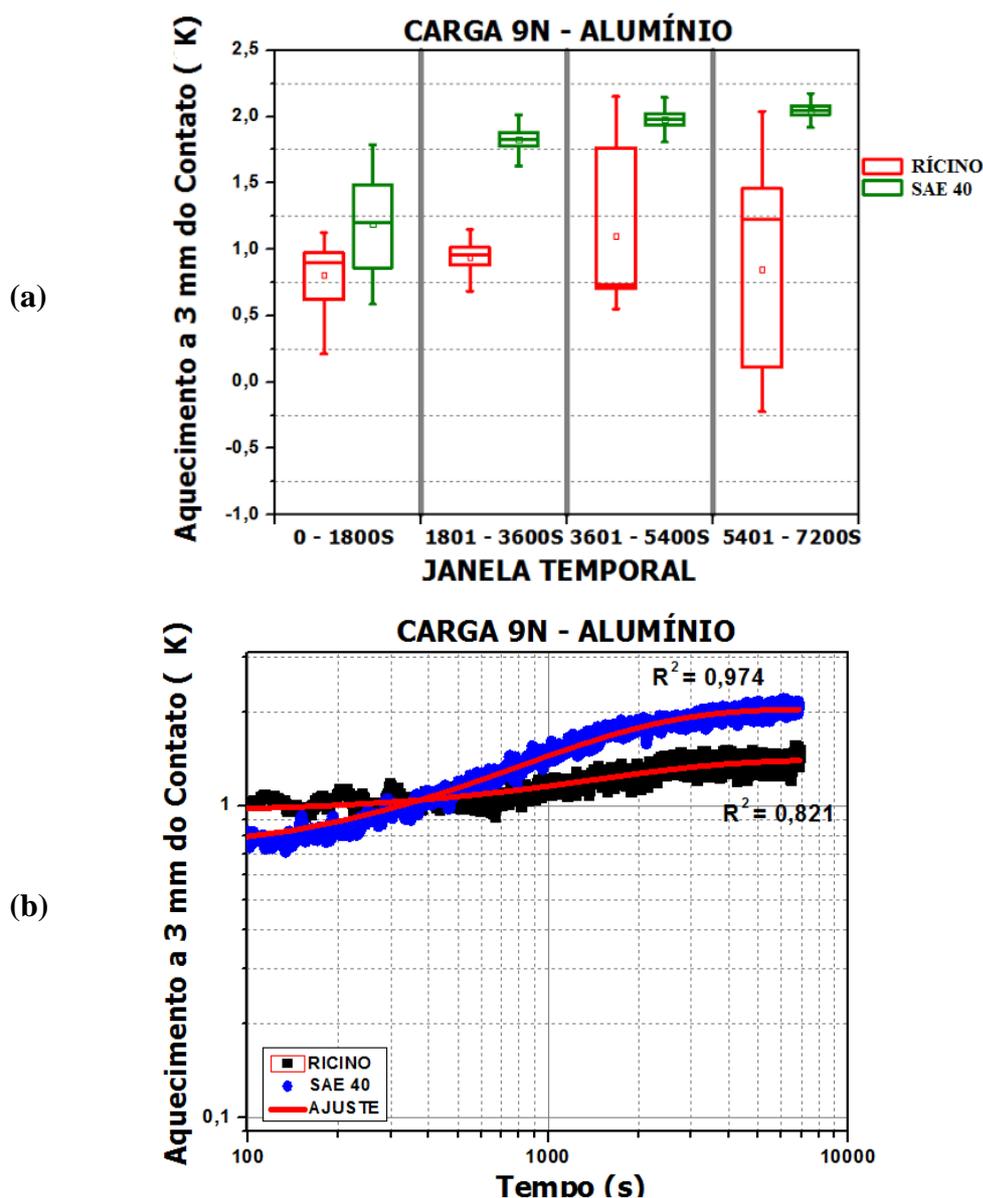
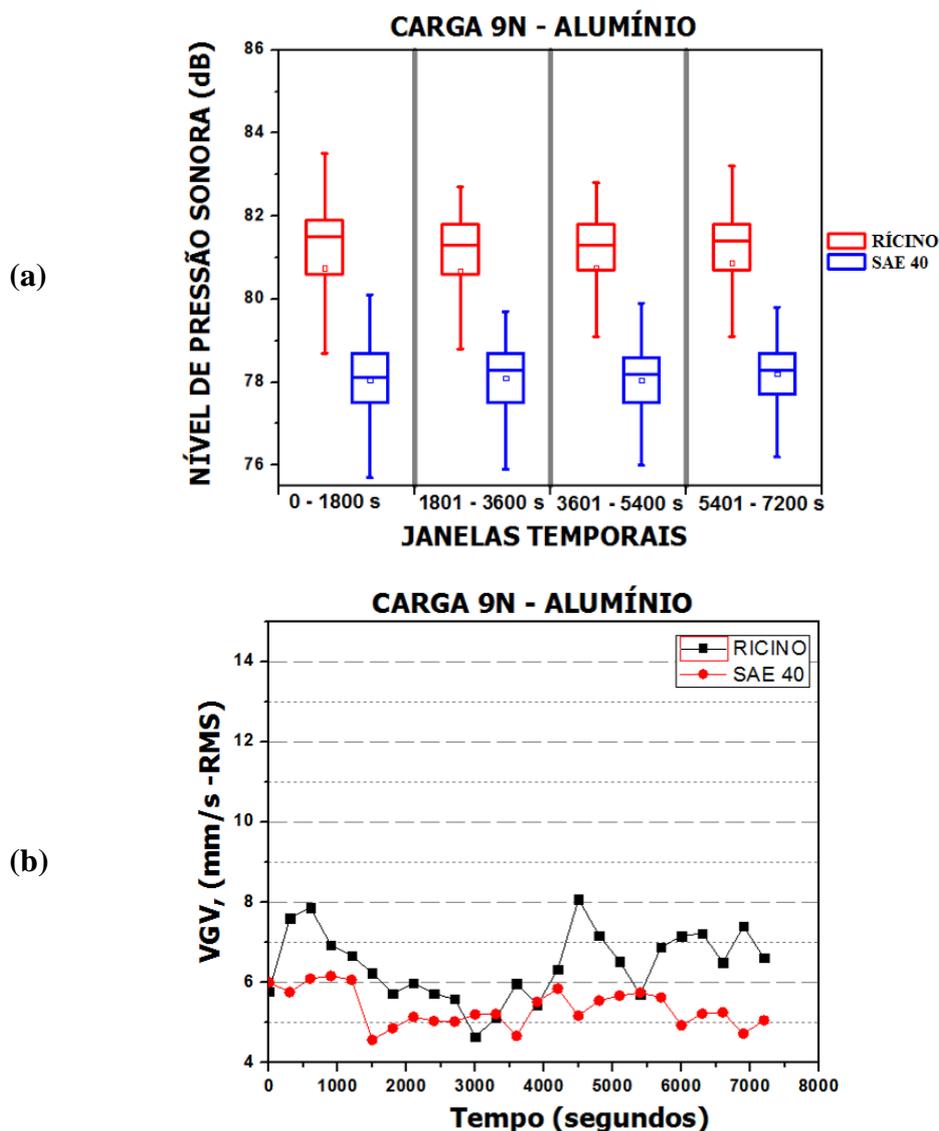


Figura 44 – Gráfico do aquecimento a 3 mm do contato, (a) em função das janelas temporais e (b) correlação exponencial, para carga de 9N, corpo-de-prova de alumínio 6261 lubrificado com óleo de rícino e óleo SAE 40.

As *Figuras 45 (a)* e *(b)* apresentam, respectivamente, o nível de pressão sonora (NPS) e a velocidade global de vibração (VGV) obtidos nos ensaios para a carga de 9N, utilizando contato alumínio-aço. Ambos os gráficos indicam maiores valores de NPS e VGV para o óleo de rícino (média de 81,4 dB e 6,5 mm/s) em relação ao óleo SAE 40 (média de 78,2 dB e 5,22 mm/s).



**Figura 45 – Gráficos (a) do nível de pressão sonora (NPS) e (b) velocidade global de vibração (VGV), para carga de 9N e corpo-de-prova de alumínio 6261 lubrificado com óleo de rícino e óleo SAE 40.**

A análise dos dados de aquecimento do contato aço – bronze, através da distribuição de janelas temporais é apresentada na *Figura (46a)*. Observa-se, de maneira geral, que a

distribuição dos quartis apresenta tanto menores dispersões quanto menores valores de aquecimento ao utilizar o óleo de rícino. A exceção deste fato ocorre durante o período de running, onde o óleo SAE 40 apresenta maiores dispersões dos dados, porém com uma média de aquecimento menor que o óleo de rícino. Mesmo assim, a qualidade dos dados de aquecimento, verificada através do gráfico de correlação (*Fig.46b*), mostraram que o óleo SAE 40 apresenta  $R^2 = 0,984$  indicando que a qualidade de seus dados são melhores que do óleo de rícino com  $R^2 = 0,703$ . A temperatura média obtida no contato para os óleos de rícino e SAE 40 foram de 26,98 °C e 25,50 °C, respectivamente.

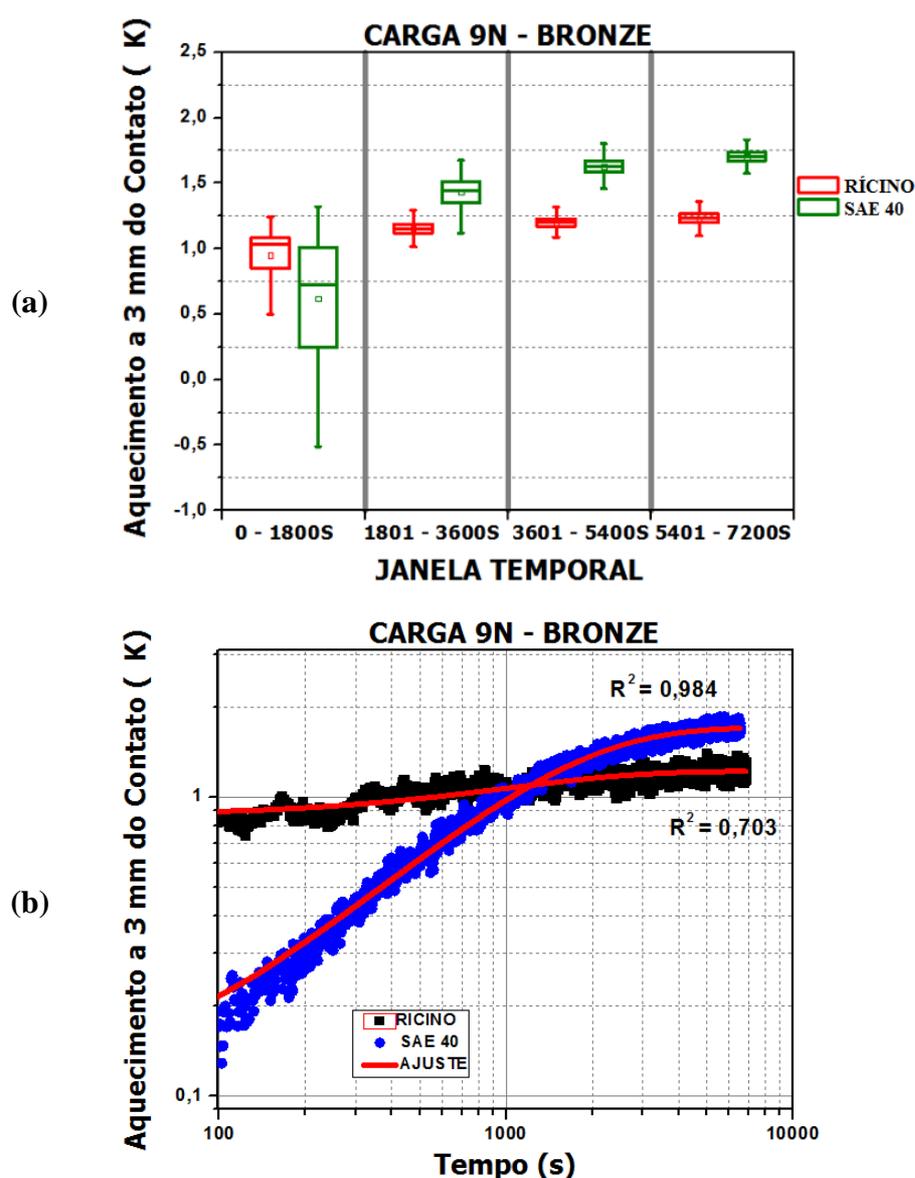
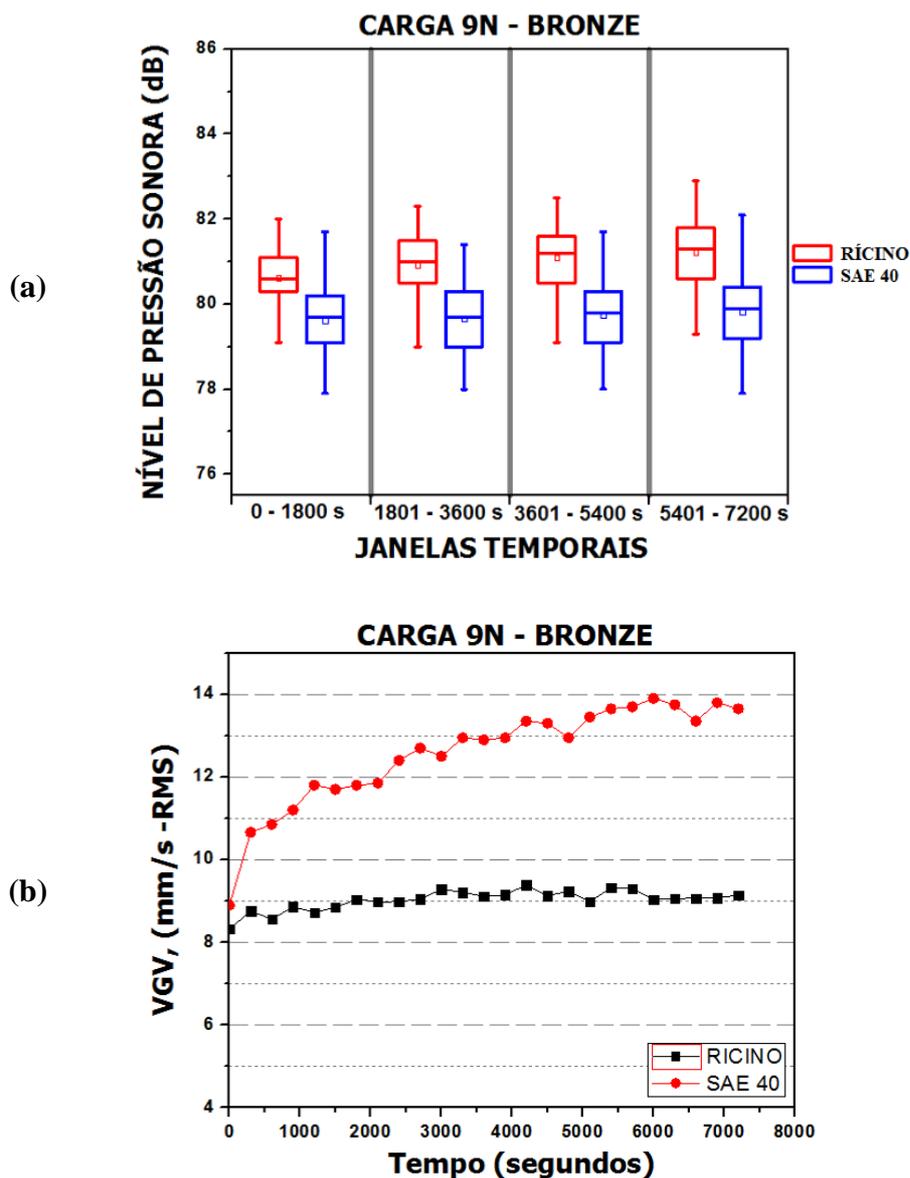


Figura 46 – Gráfico do aquecimento a 3 mm do contato, (a) em função das janelas temporais e (b) correlação exponencial, para carga de 9N, corpo-de-prova de bronze TM-23 lubrificado com óleo de rícino e óleo SAE 40.

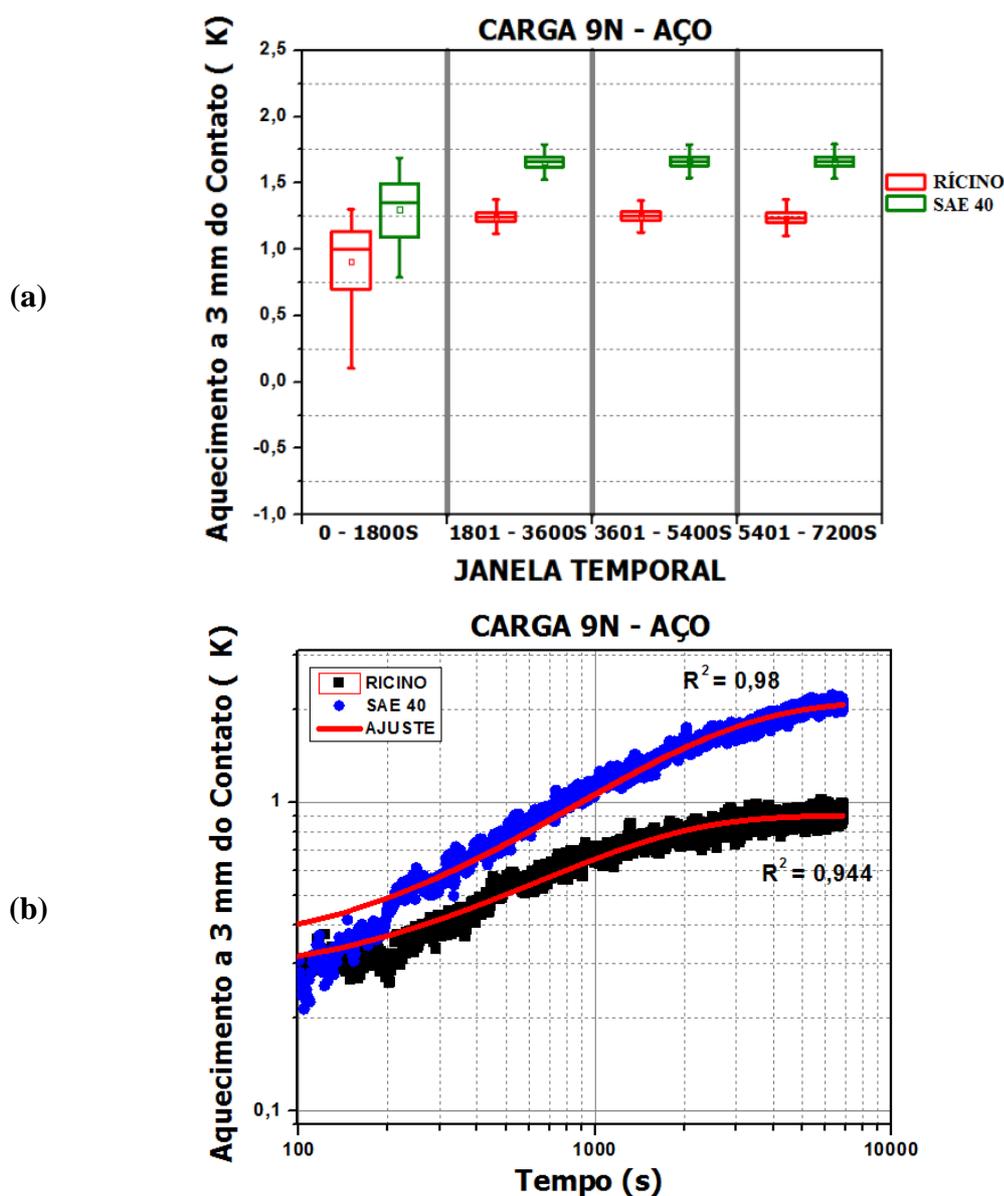
As *Figuras 47 (a)* e *(b)* apresentam, respectivamente, o NPS e a os valores de VGV obtidos nos ensaios para a carga de 9N, utilizando contato bronze-aço. O gráfico de NPS apresenta maiores valores para o óleo de rícino (média de 81 dB e 9,6 mm/s) e o gráfico da VGV mostra maiores valores para o óleo SAE 40 (média de 79,8 dB e 12,9 mm/s).



**Figura 47 – Gráficos (a) do nível de pressão sonora (NPS) e (b) velocidade global de vibração (VGV), para carga de 9N e corpo-de-prova de bronze TM-23 lubrificado com óleo de rícino e óleo SAE 40.**

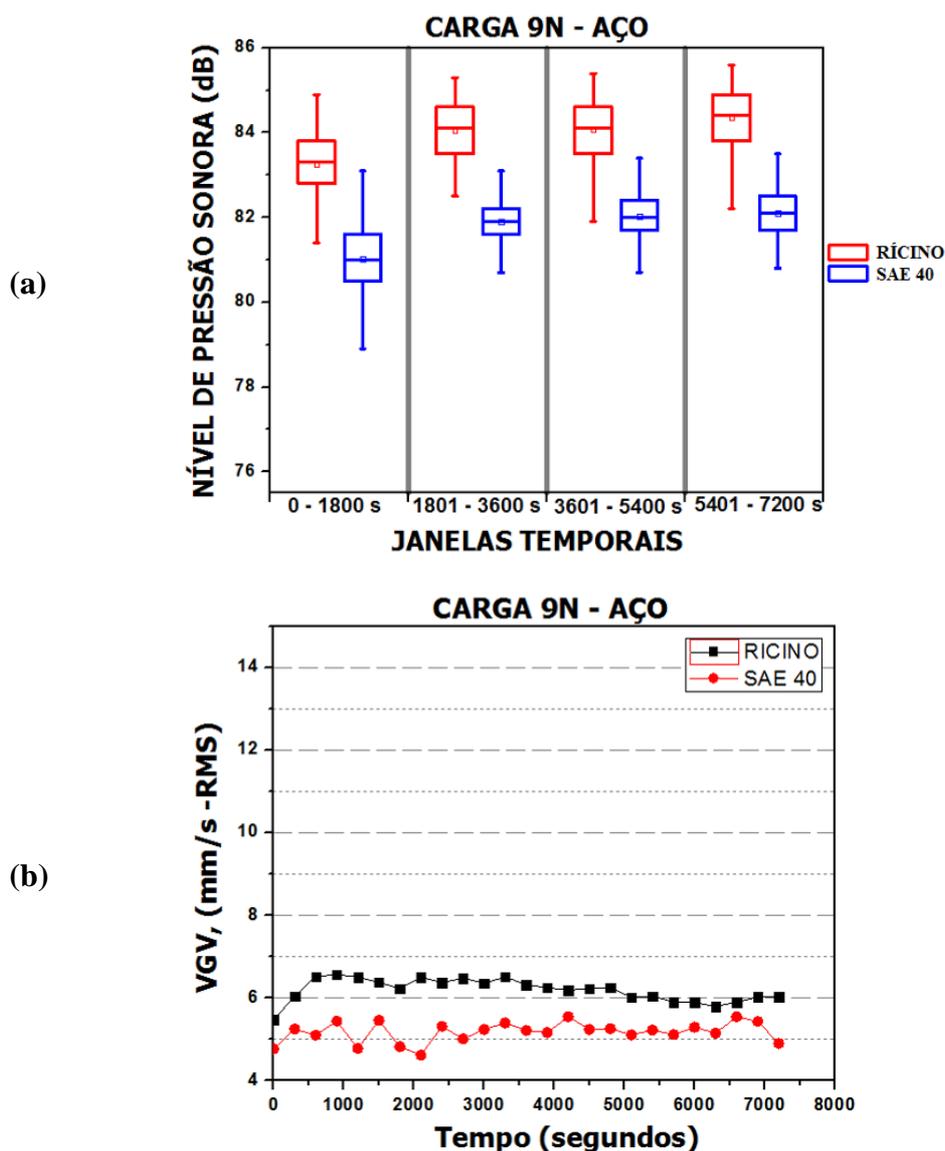
Na análise dos dados de aquecimento do contato aço – aço, através da distribuição de janelas temporais (*Fig.48a*), observa-se, de maneira geral, que a distribuição dos quartis apresentam maiores dispersões para ambos os óleos, apenas durante o período de running. No

entanto, apresenta maiores valores de aquecimento para o óleo SAE 40, ao longo do ensaio. Entretanto, a qualidade dos dados de aquecimento (*Fig.48b*), verificada através do gráfico de correlação, apresenta melhores resultados para o óleo SAE 40, apresentando  $R^2 = 0,98$  indicando que a qualidade de seus dados são melhores que do óleo de rícino com  $R^2 = 0,944$ . A temperatura média obtida no contato para os óleos de rícino e SAE 40 foram de 27,55 °C e 24,94 °C, respectivamente.



**Figura 48 – Gráfico do aquecimento a 3 mm do contato, (a) em função das janelas temporais e (b) correlação exponencial, para carga de 9N, corpo-de-prova de aço AISI 1045 lubrificado com óleo de rícino e óleo SAE 40.**

As *Figuras 49 (a)* e *(b)* apresentam, respectivamente, os valores de VGV obtidos nos ensaios para a carga de 9N, utilizando contato aço-aço. Ambos os gráficos apresentam maiores valores de NPS e VGV para o óleo de rícino, com (média de 84 dB e 6,22 mm/s) para o óleo de rícino e (média de 81,8 dB e 5,22 mm/s) para o óleo SAE 40. Entretanto, o gráfico da VGV apresenta menores valores quando comparados com os contatos alumínio-aço e bronze-aço.



**Figura 49 – Gráficos (a) do nível de pressão sonora (NPS) e (b) velocidade global de vibração (VGV), para carga de 9N e corpo-de-prova de aço AISI 1045 lubrificado com óleo de rícino e óleo SAE 40.**

Das **Figuras (50)** a **(55)** serão apresentados os gráficos de aquecimento a 3 milímetros do contato, a correlação entre o aquecimento dos óleos de rícino e SAE 40, nível de pressão sonora e velocidade global de vibração para os ensaios realizados com carga de 20N e lubrificados com óleo de Rícino e óleo SAE 40.

Na análise dos dados de aquecimento do contato aço – alumínio, através da distribuição de janelas temporais (**Fig.50a**), observa-se que a distribuição dos quartis para os dois óleos utilizados apresentam maiores dispersões, apenas durante o período de running. Entretanto, o aquecimento do contato lubrificado com óleo de rícino é menor que o lubrificado com óleo SAE 40, conforme ocorreu para a carga de 9N. A qualidade dos resultados de aquecimento foi verificada através do gráfico de correlação (**Fig.50b**), no qual o óleo SAE 40 apresenta  $R^2 = 0,986$  indicando que a qualidade de seus dados são melhores que do óleo de rícino com  $R^2 = 0,971$ . A temperatura média obtida no contato para os óleos de rícino e SAE 40 foram de 28,88 °C e 29,64 °C, respectivamente.

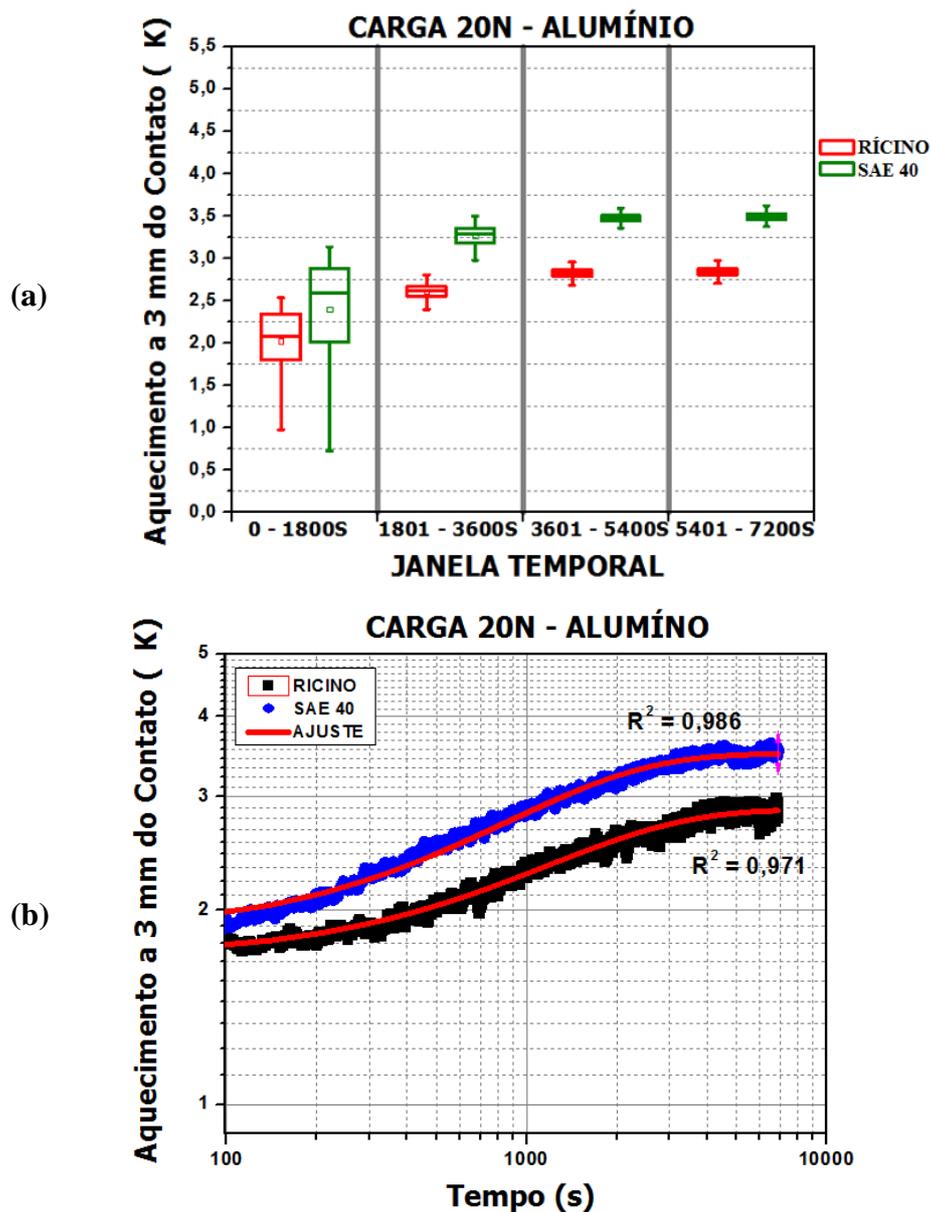
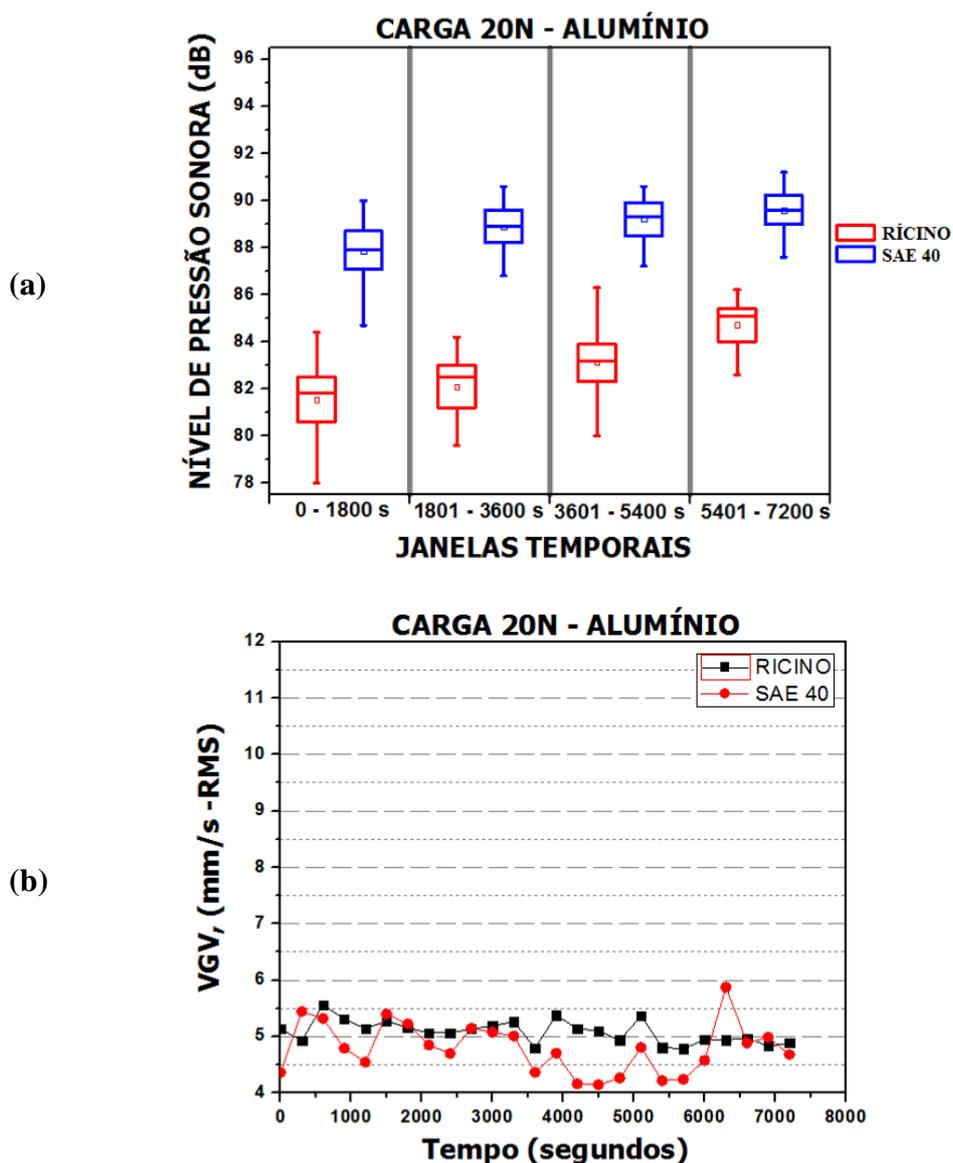


Figura 50 – Gráfico do aquecimento a 3 mm do contato, (a) em função das janelas temporais e (b) correlação exponencial, para carga de 20N, corpo-de-prova de alumínio 6261 lubrificado com óleo de rícino e óleo SAE 40.

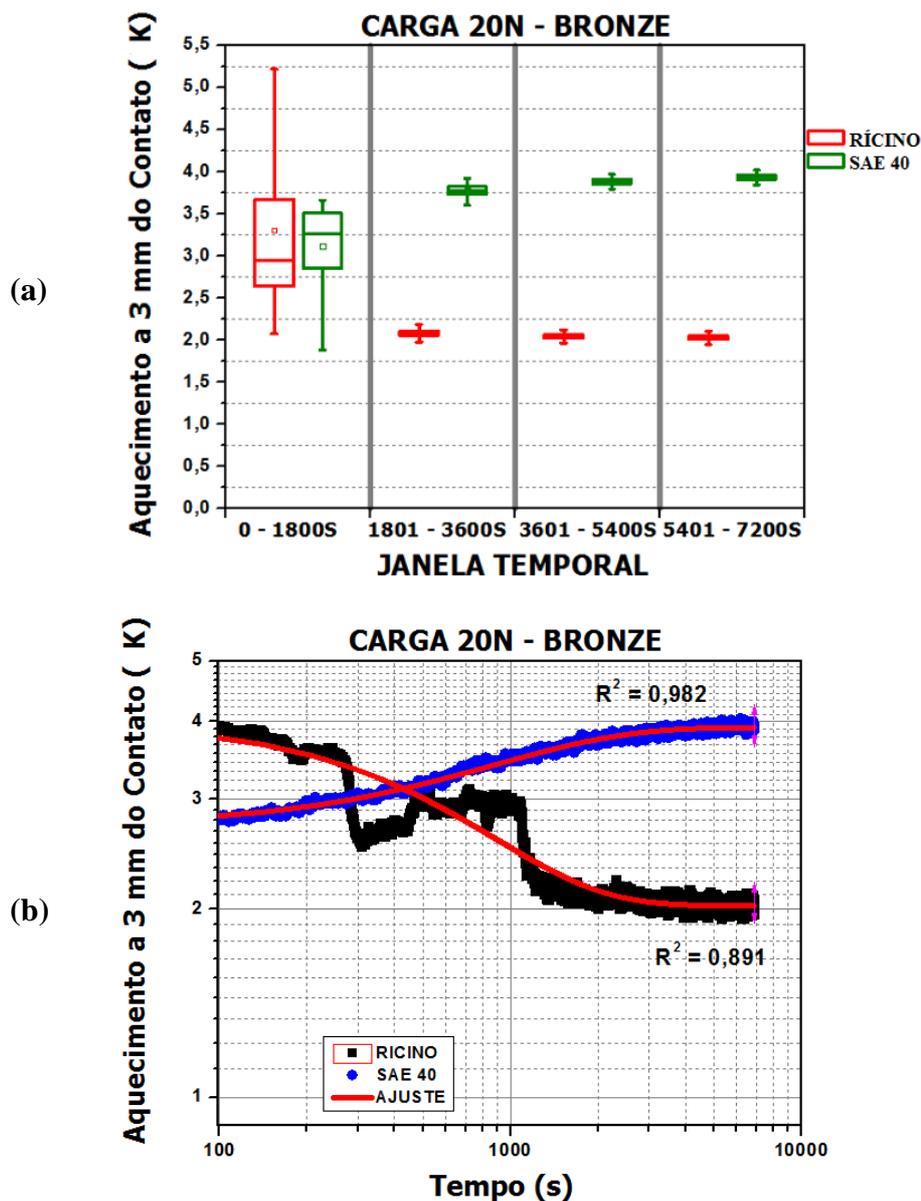
As *Figuras 51 (a) e (b)* apresentam, respectivamente, o nível de pressão sonora (NPS) e os valores de VGV obtidos nos ensaios. Ambos os gráficos mostram maiores valores de NPS e VGV para o óleo de rícino, com (média de 84 dB e 5,1 mm/s) e (média de 82,9 dB e 4,79 mm/s) para o óleo SAE 40.



**Figura 51 – Gráficos (a) do nível de pressão sonora (NPS) e (b) velocidade global de vibração (VGv), para carga de 20N e corpo-de-prova de alumínio 6261 lubrificado com óleo de rícino e óleo SAE 40.**

Na análise dos dados de aquecimento do contato aço – bronze, através da distribuição de janelas temporais (*Fig.52a*), observa-se que a distribuição dos quartis para os dois óleos utilizados apresentam maiores dispersões, apenas durante o período de running. Entretanto, o aquecimento do contato lubrificado com óleo de rícino é menor que o lubrificado com óleo SAE 40, conforme ocorreu para a carga de 9N. A qualidade dos resultados de aquecimento foi verificada através do gráfico de correlação (*Fig.52b*), no qual o óleo SAE 40 apresenta  $R^2 = 0,982$ , indicando que a qualidade de seus dados são melhores que do óleo de rícino que

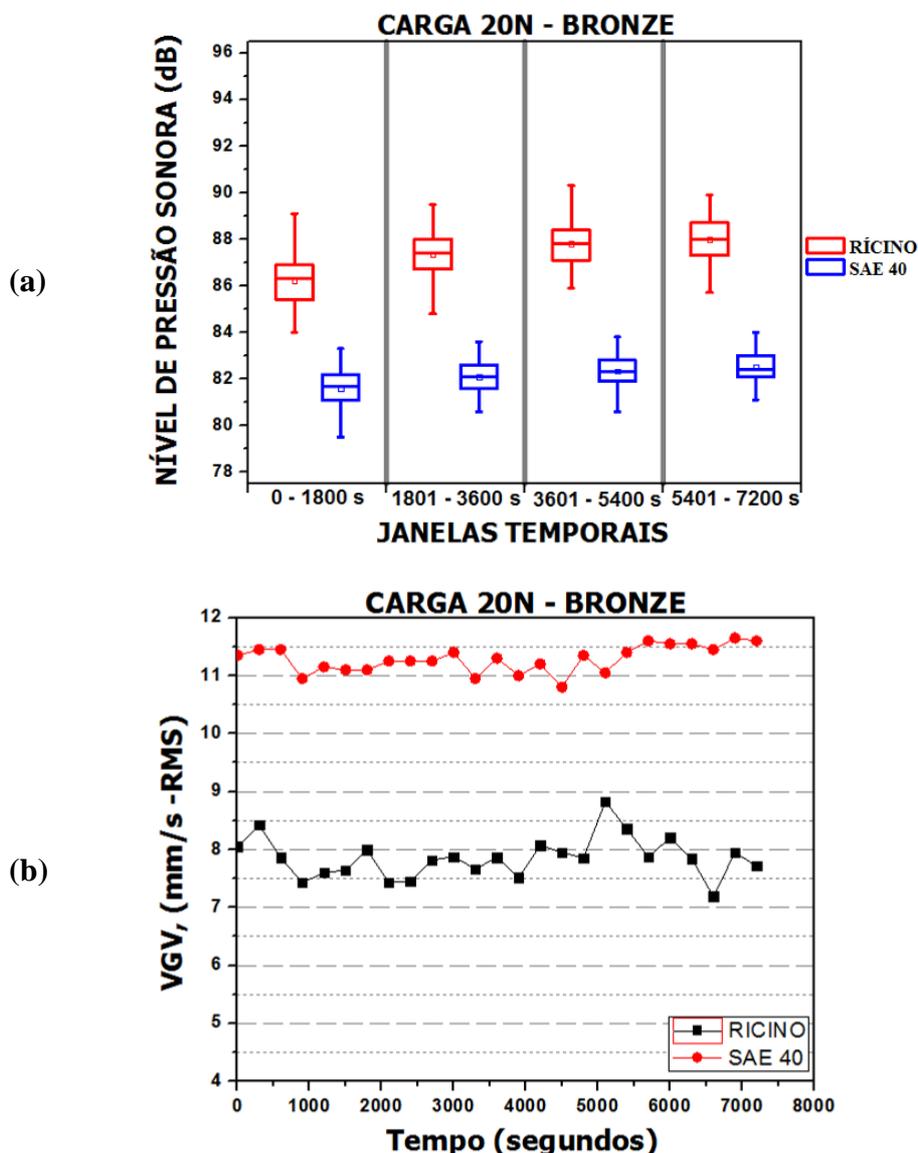
apresenta uma correlação negativa, com  $R^2 = 0,891$ . A temperatura média obtida no contato para os óleos de rícino e SAE 40 foram de 29,14 °C e 30,33 °C, respectivamente.



**Figura 52 – Gráficos do aquecimento a 3 mm do contato, (a) em função das janelas temporais e (b) correlação exponencial, para carga de 20N, corpo-de-prova de bronze TM-23 lubrificado com óleo de rícino e óleo SAE 40.**

As *Figuras 53 (a) e (b)* apresentam, respectivamente, o nível de pressão sonora (NPS) e a velocidade global de vibração (VGV) obtidos nos ensaios para a carga de 20N, utilizando contato bronze-aço. O gráfico de NPS apresenta maiores valores para o óleo de rícino (média

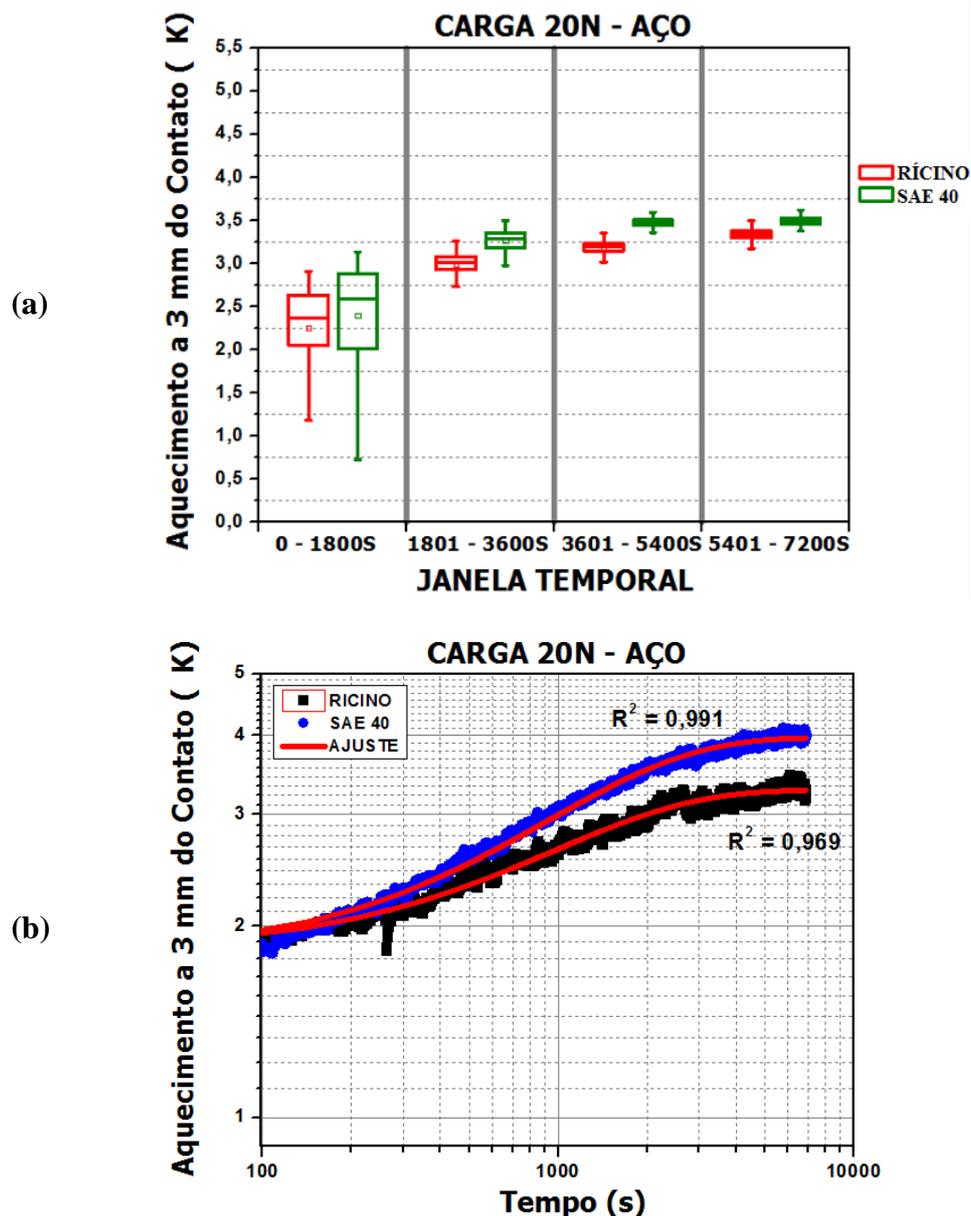
de 89,9 e 7,86 mm/s) e o gráfico da VGV mostra maiores valores para o óleo SAE 40 (média de 87,4 dB e 11,3 mm/s).



**Figura 53 – Gráficos (a) do nível de pressão sonora (NPS) e (b) velocidade global de vibração (VGV), para carga de 20N e corpo-de-prova de bronze TM-23 lubrificado com óleo de rícino e óleo SAE 40.**

Na análise dos dados de aquecimento do contato aço – aço, através da distribuição de janelas temporais (*Fig.54a*), observa-se que a distribuição dos quartis para os dois óleos utilizados apresentam maiores dispersões, apenas durante o período de running. Entretanto, o aquecimento do contato lubrificado com óleo de rícino é menor que o lubrificado com óleo SAE 40, conforme ocorreu para a carga de 9N. A qualidade dos resultados de aquecimento foi

verificada através do gráfico de correlação (*Fig.54b*), no qual o óleo SAE 40 apresenta  $R^2 = 0,991$  indicando que a qualidade de seus dados são melhores que do óleo de rícino com  $R^2 = 0,969$ . A temperatura média obtida no contato para os óleos de rícino e SAE 40 foram de 29,18 °C e 34,81 °C, respectivamente.



**Figura 54 – Gráfico do aquecimento a 3 mm do contato, (a) em função das janelas temporais e (b) correlação exponencial, para carga de 20N, corpo-de-prova de aço AISI 1045 lubrificado com óleo de rícino e óleo SAE 40.**

As *Figuras 55 (a) e (b)* apresentam, respectivamente, o nível de pressão sonora (NPS) e a velocidade global de vibração (VGV) obtidos nos ensaios para a carga de 20N, utilizando

contato aço-aço. Os gráficos de NPS e VGV, apresentam maiores valores para o óleo de rícino (média de 93,2 dB e 7,98 mm/s) em relação ao óleo SAE 40, com (média de 85,3 dB e 6,93 mm/s), seguindo a mesma tendência da carga de 9N.

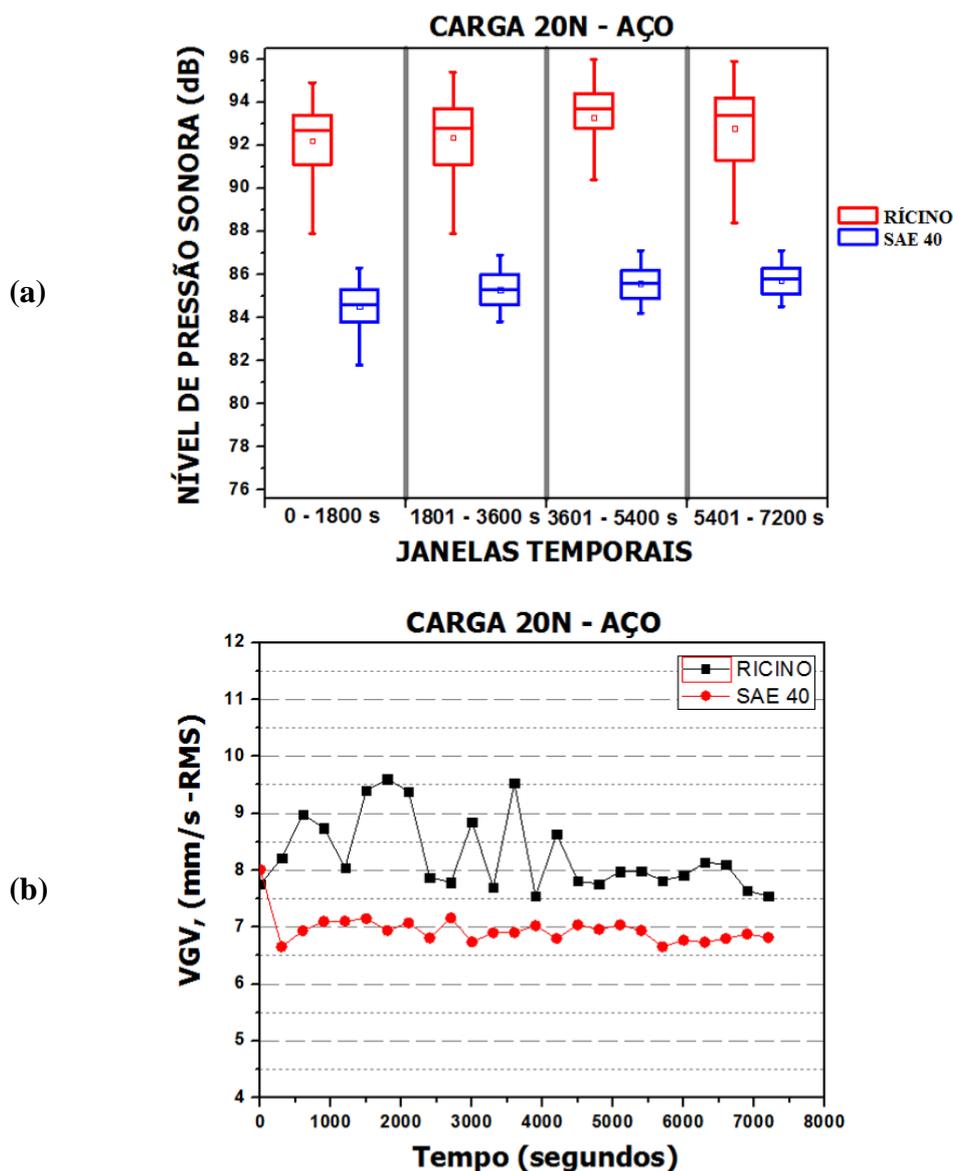


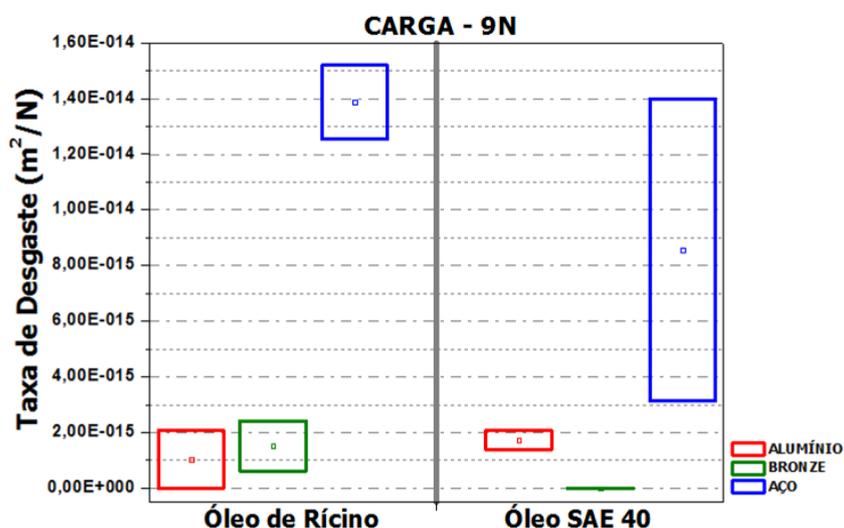
Figura 55 – Gráficos, (a) NPS e (b) velocidade global de vibração, para carga de 20N e corpo-de-prova de aço AISI 1045 lubrificado com óleo de rícino e óleo SAE 40.

#### 4.4. Taxa de Desgaste.

A taxa de desgaste foi determinada de acordo com a equação de Archard. As *Figuras (56) e (57)*, apresentam a taxa de desgaste dos corpos-de-prova lubrificado com óleos de

ricino e SAE 40 para a carga de 9N e 20N, respectivamente. É mostrado no *Apêndice G* os cálculos obtidos para as duas cargas utilizadas.

Na *Figura (56)* verifica-se que o contato aço-aço apresenta uma maior taxa de desgaste ao utilizar tanto o óleo de ricino quanto o para óleo SAE 40, porém, para este último a dispersão dos resultados são maiores. Para o contato bronze-aço, ocorre maior taxa de desgaste e dispersão para o contato lubrificado com óleo de ricino, apresentando desgaste moderado para ambos os óleos utilizados. Já o contato alumínio-aço, apresenta uma taxa de desgaste maior para o contato lubrificado com óleo SAE 40, porém com menor dispersão quando comparado ao óleo de ricino.



**Figura 56 – Gráfico da Taxa de Desgaste para carga de 9N de óleos de Ricino e SAE 40.**

Na *Figura (57)* foi observado uma maior dispersão dos resultados para o contato bronze-aço lubrificado com óleo de ricino, bem como para o contato aço-aço lubrificado com óleo SAE 40. O corpo-de-prova de bronze TM-23 lubrificado com óleo de ricino apresenta uma taxa de desgaste negativa, indicando aderência de material.

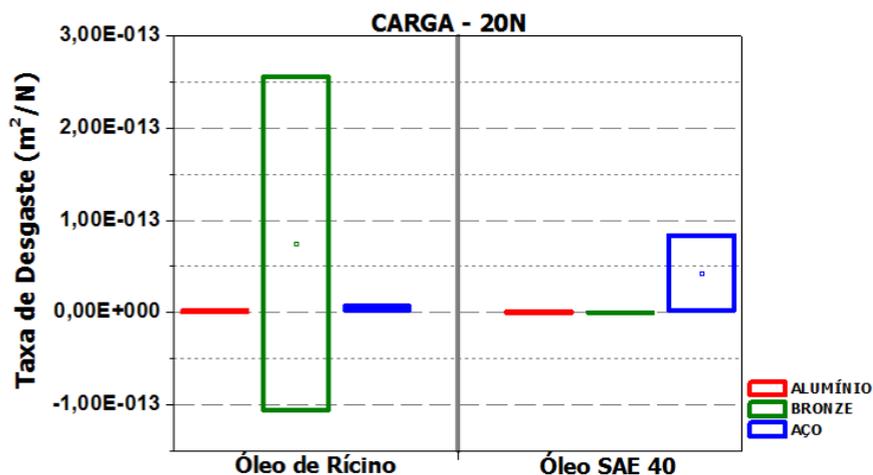


Figura 57 – Taxa de Desgaste para carga de 20N e óleos de Rícino e SAE 40.

#### 4.5. Imagens obtidas por MEV.

Das *Figuras (58) à (64)*, são referentes aos ensaios realizados com carga de 9N, utilizando óleo de rícino ou óleo SAE 40. A *Figura 58(a)* representa o desgaste para carga de 9N e corpo-de-prova de alumínio 6261 utilizando óleo de rícino, as imagens apresentam deformação plástica da região desgastada. As setas verticais nas laterais das imagens de MEV indicam o sentido do deslizamento.

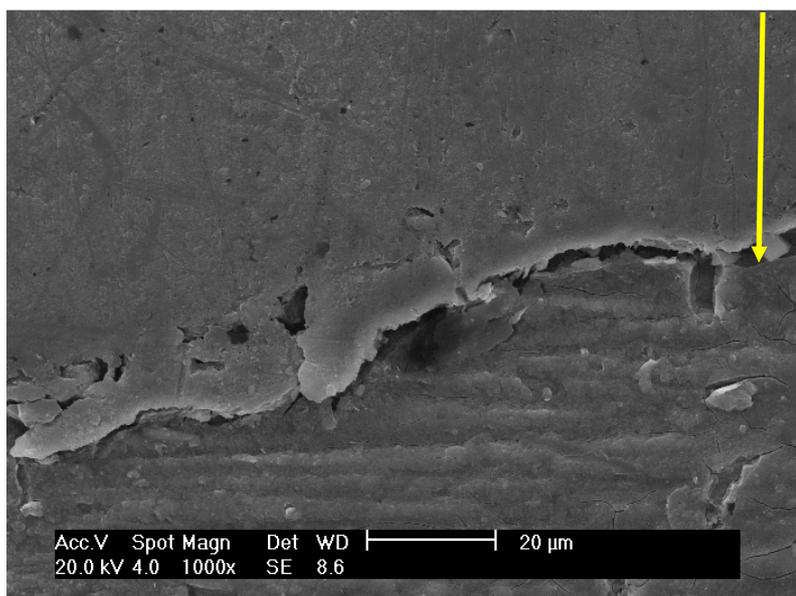
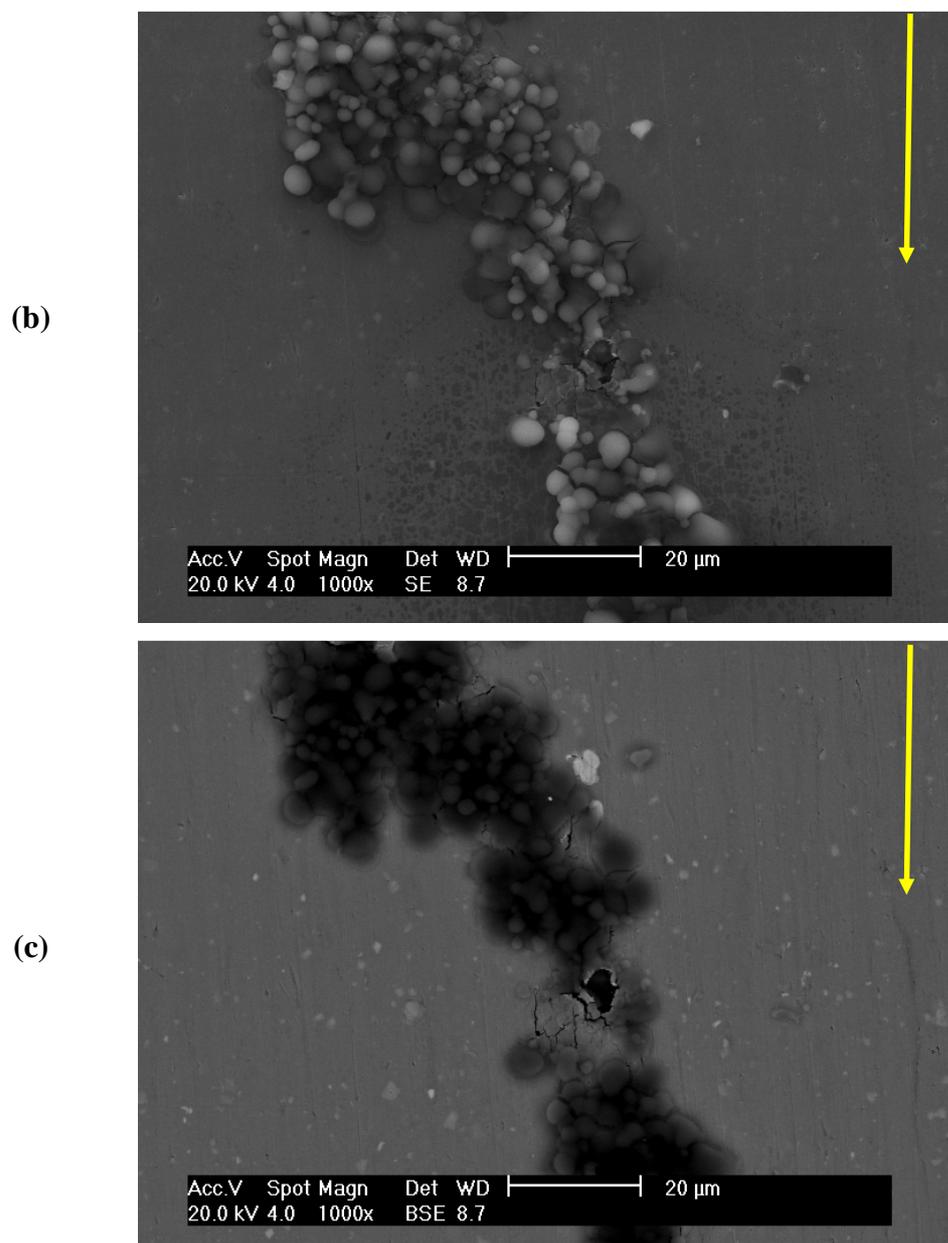


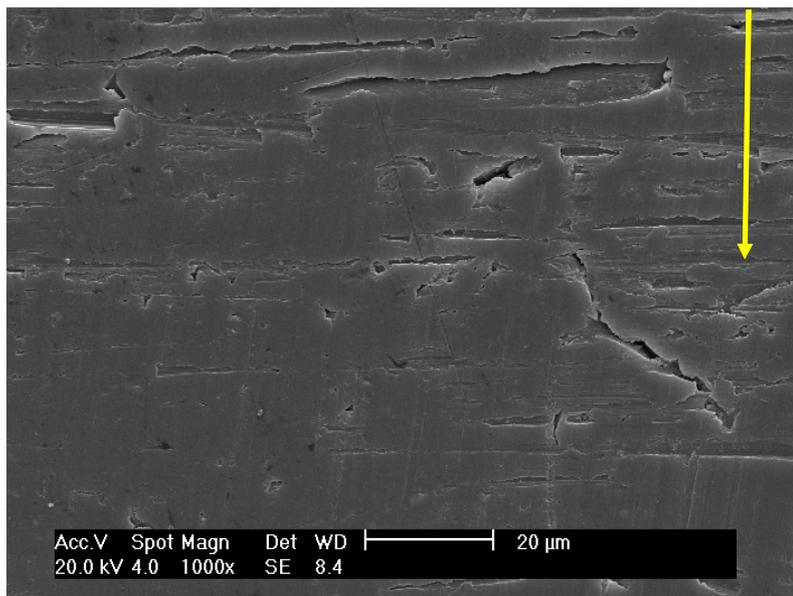
Figura 58 (a) – Imagens obtidas por MEV para carga de 9N utilizando óleo de Rícino e corpo-de-prova de Alumínio 6261.

A **Figura 58(b)** representa o desgaste na região central da escara de desgaste do corpo-de-prova de alumínio 6261 utilizando óleo de rícino e carga de 9N. A **Figura 58(c)** representa o BSE da **Fig.58(b)** e apresenta a presença de material particulado aderido a superfície e de composição diferente em relação a superfície da amostra.



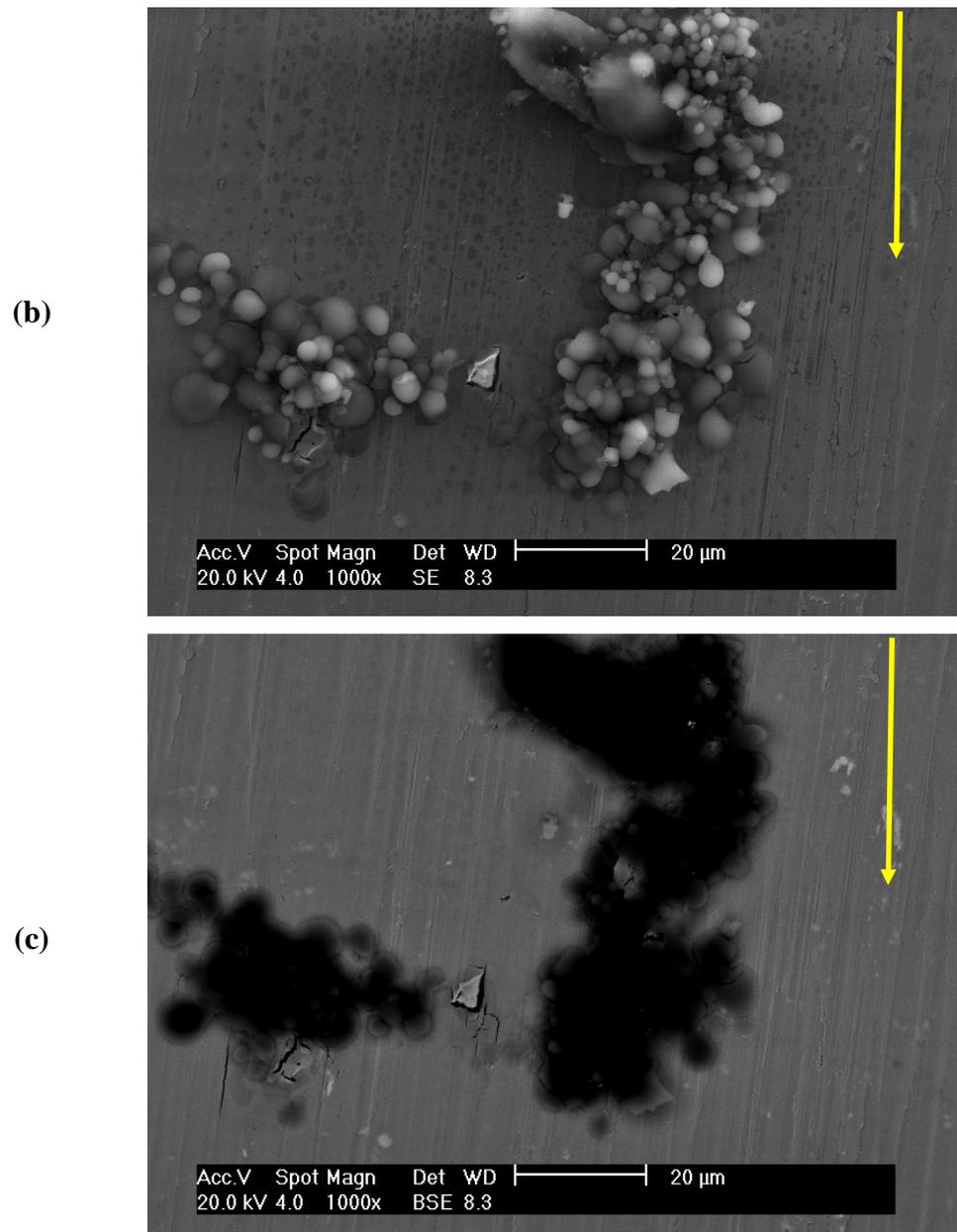
**Figura 58 (b) e (c) – Imagens obtidas por MEV para carga de 9N utilizando óleo de Rícino e corpo-de-prova de Alumínio 6261.**

A **Figura 59(a)** representa o desgaste para carga de 9N e corpo-de-prova de alumínio 6261 utilizando óleo SAE 40, a imagem apresenta riscos abrasivos e deformação plástica.



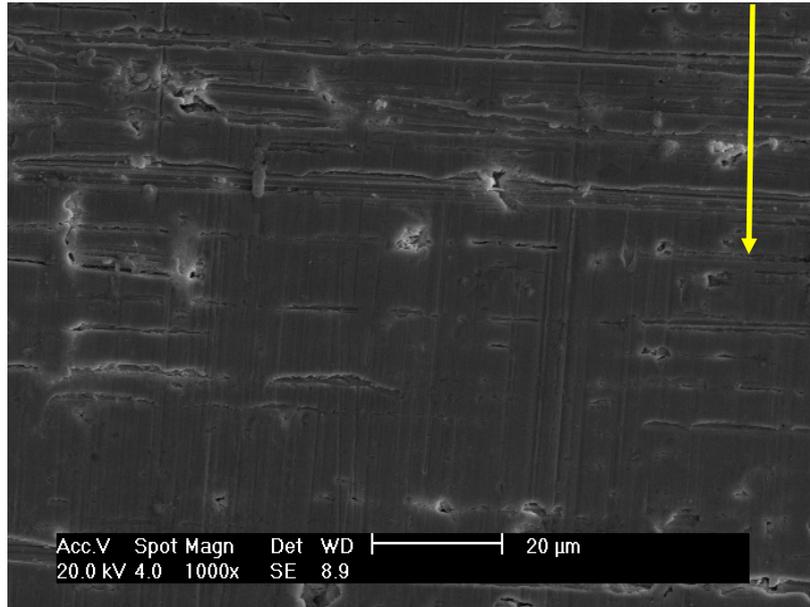
**Figura 59 (a) – Imagens obtidas por MEV para uma carga de 9N utilizando óleo SAE 40 e corpo-de-prova de Alumínio 6261.**

A **Figura 60(b)** representa o desgaste na região central da escara de desgaste do corpo-de-prova de alumínio 6261 utilizando óleo de rícino e carga de 9N. A **Figura 60(c)** representa o BSE da **Fig. 60(b)** e apresenta a presença de material particulado aderido a superfície e de composição diferente em relação a superfície da amostra igualmente como ocorrido com o óleo de rícino.



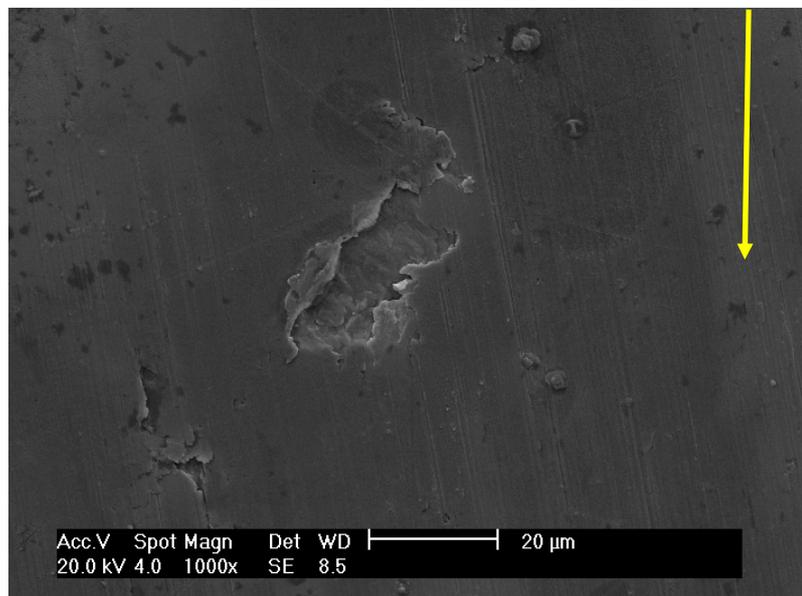
**Figura 60 (b) e (c) – Imagens obtidas por MEV para carga de 9N utilizando óleo SAE 40 e corpo-de-prova de Alumínio 6261.**

A *Figura (61)* representa o desgaste para carga de 9N e corpo-de-prova de bronze TM-23 utilizando óleo de rícino, a imagem apresenta riscos abrasivos e deformação plástica da região desgastada.



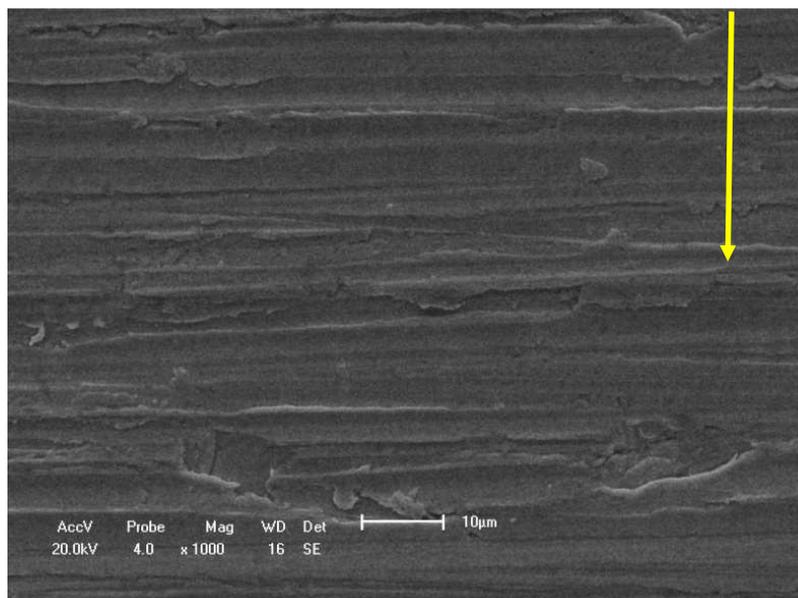
**Figura 61 – Imagens obtidas por MEV para carga de 9N utilizando óleo de Rícino e corpo-de-prova de Bronze TM-23.**

A *Figura (62)* representa o desgaste para carga de 9N e corpo-de-prova de bronze TM-23 utilizando óleo SAE 40, a imagem apresenta riscos abrasivos e spalling na região desgastada.



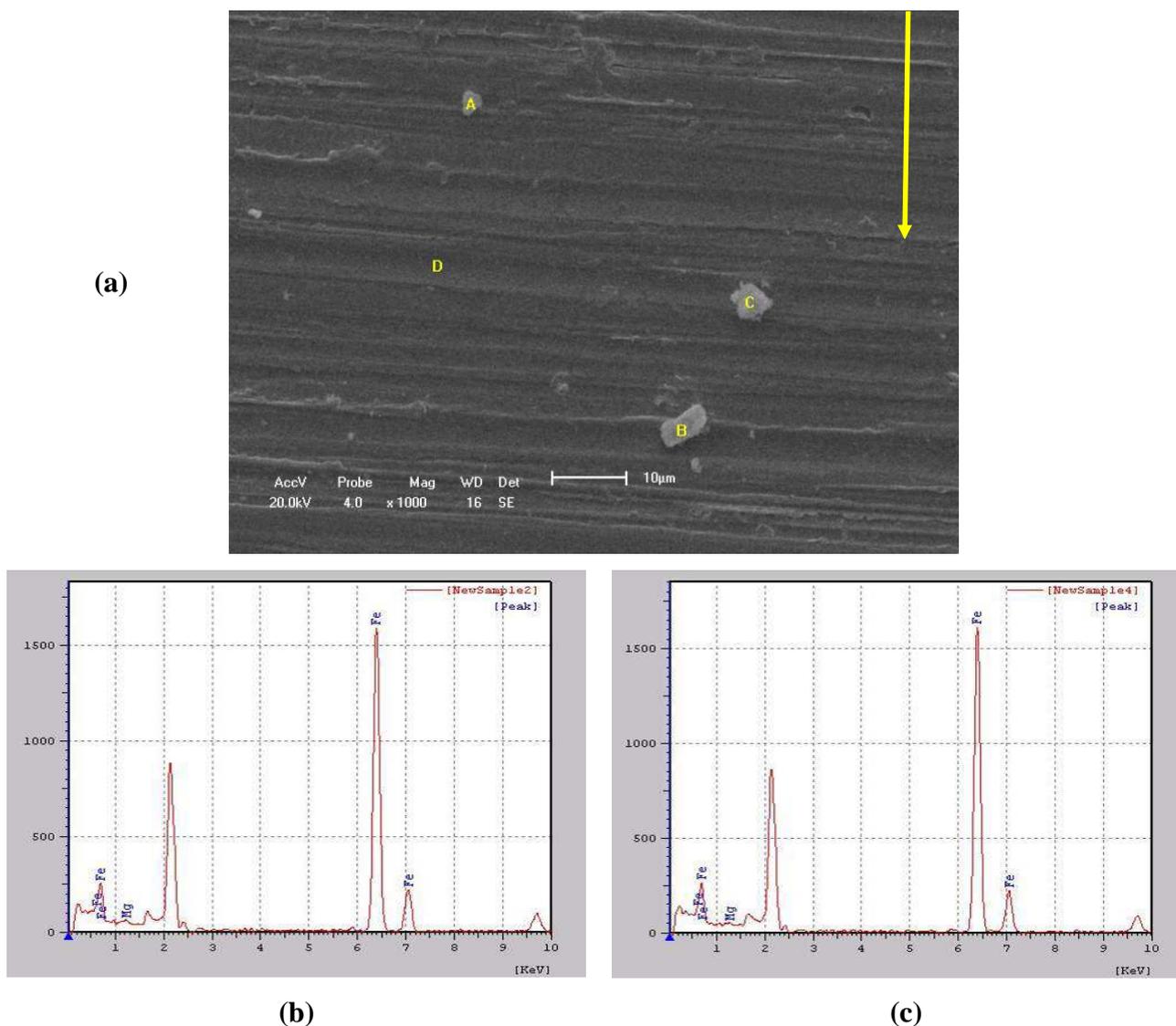
**Figura 62 – Imagens obtidas por MEV para carga de 9N utilizando óleo SAE 40 e corpo-de-prova de Bronze TM-23.**

A **Figura (63)** representa o desgaste para carga de 9N e corpo-de-prova de aço AISI 1045 utilizando óleo de rícino, a imagem apresenta deformação plástica da região desgastada.



**Figura 63 – Imagens obtidas por MEV para carga de 9N utilizando óleo de Rícino e corpo-de-prova de aço AISI 1045.**

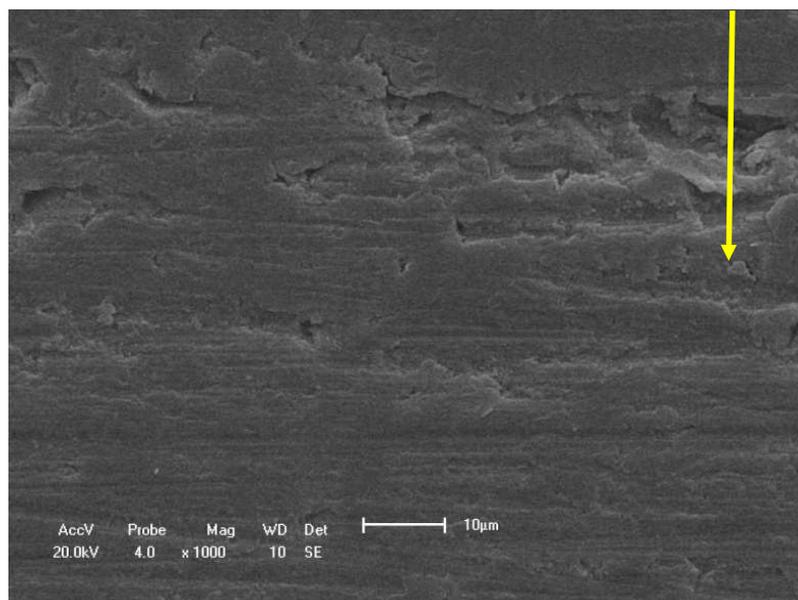
A **Figura 64(a)** representa o desgaste para carga de 9N e corpo-de-prova de aço AISI 1045 utilizando óleo SAE 40, a imagem apresenta deformação plástica da região desgastada e presença de partículas abrasivas. A **Figura 64(b)** representa o EDS das partículas abrasivas A, B e C; e a **Figura 64(c)** representa o EDS da superfície representado pela letra D. Ambas as imagens demonstram a predominância da composição do ferro contido no aço AISI 1045.



**Figura 64 – Imagens obtidas por MEV para carga de 9N utilizando óleo SAE 40 e corpo-de-prova de aço AISI 1045.**

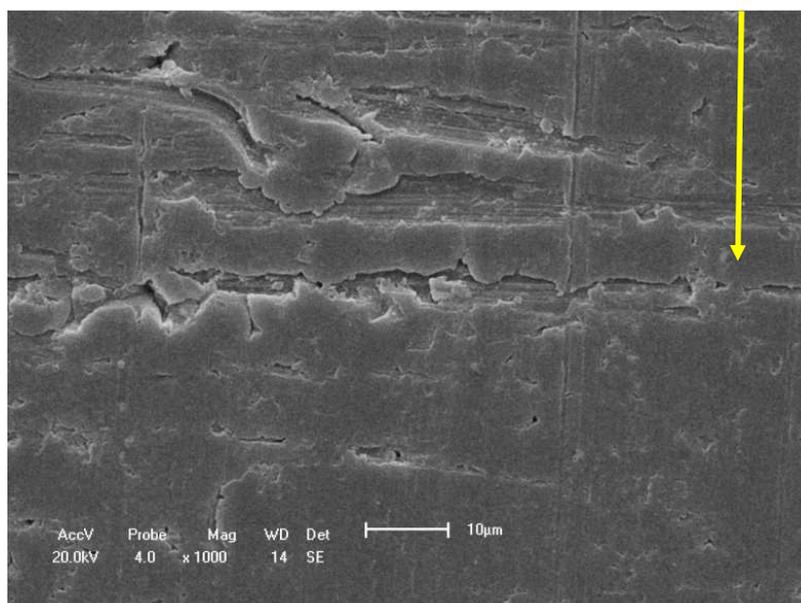
Das *Figuras (65) à (70)*, são referentes aos ensaios realizados com carga de 9N, utilizando óleo de rícino ou óleo SAE 40.

A *Figura (65)* representa o desgaste para carga de 20N e corpo-de-prova de alumínio 6261 utilizando óleo de rícino. A imagem apresenta deformação plástica e spalling na região desgastada.



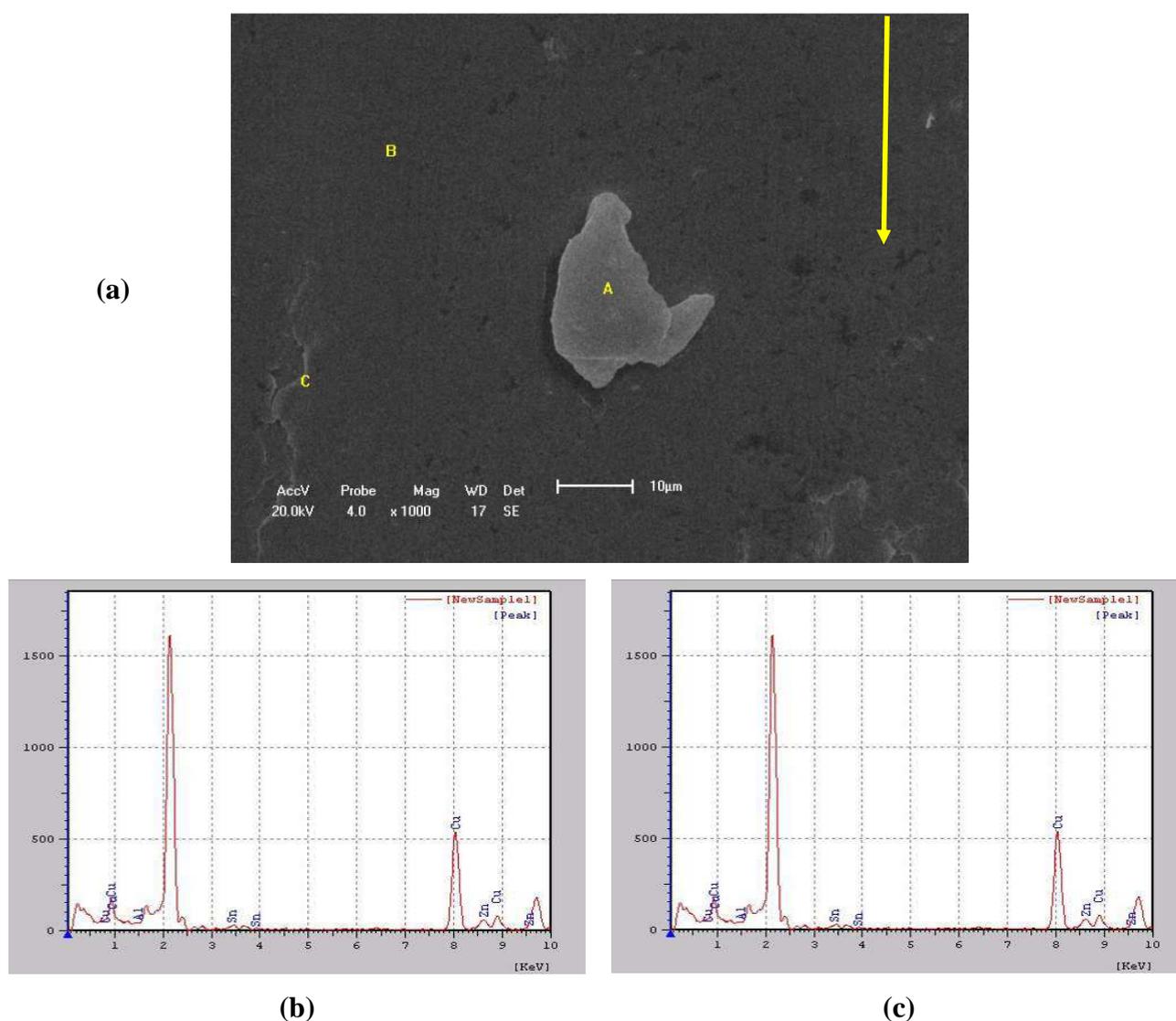
**Figura 65 – Imagens obtidas por MEV para carga de 20N utilizando óleo de Rícino e corpo-de-prova de Alumínio 6261.**

A *Figura (66)* representa o desgaste para carga de 20N e corpo-de-prova de alumínio 6261 utilizando óleo SAE 40. A imagem apresenta riscos abrasivos e deformação plástica na região desgastada.



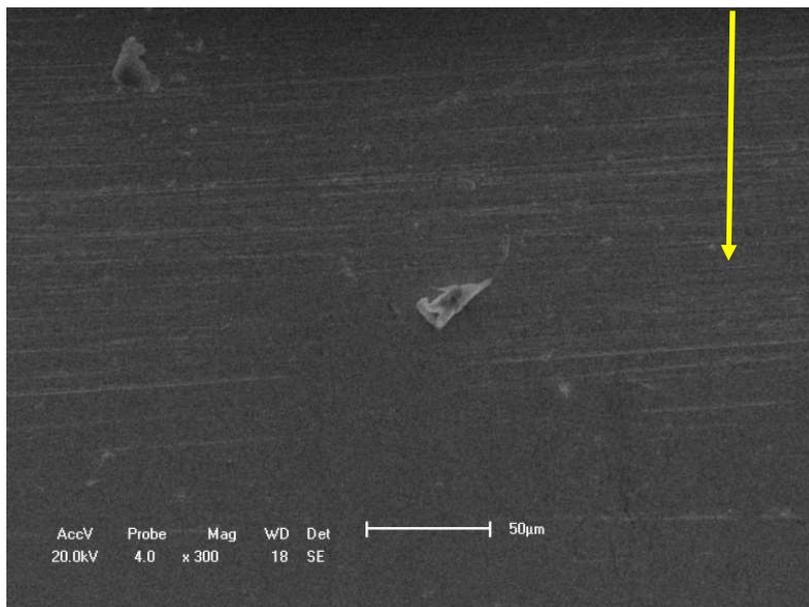
**Figura 66 – Imagens obtidas por MEV para carga de 20N utilizando óleo SAE 40 e corpo-de-prova de Alumínio 6261.**

A **Figura 67(a)** representa o desgaste para carga de 20N e corpo-de-prova de bronze TM-23 utilizando óleo de rícino. A imagem apresenta deformação plástica da região desgastada e presença de partícula abrasiva. A **Figura 67(b)** representa o EDS da partícula abrasiva A e a **Figura 67(c)** representa o EDS da superfície representado pela letra B. Ambas as imagens demonstram picos de cobre e alumínio característicos da liga de bronze TM-23.



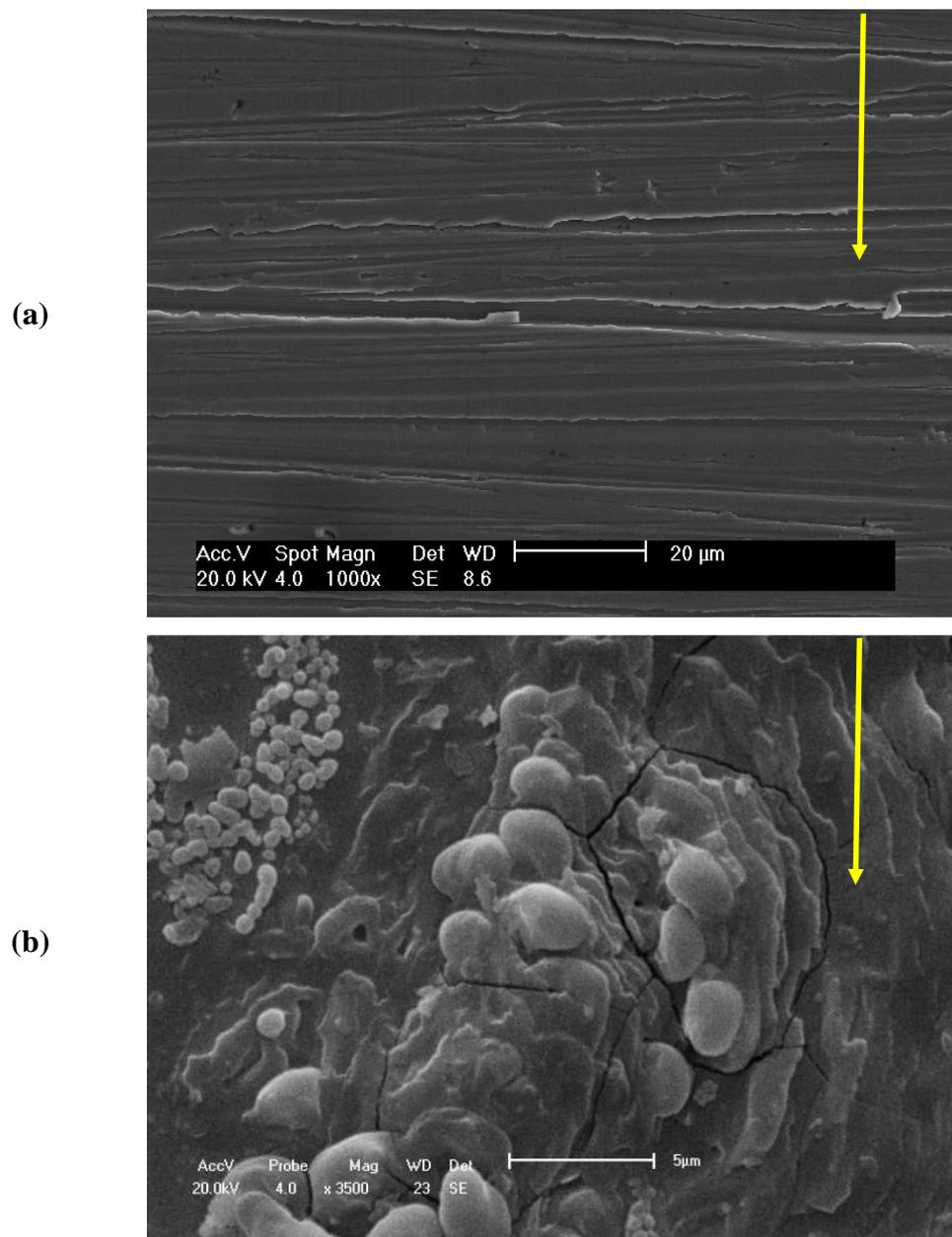
**Figura 67 – Imagens obtidas por MEV para carga de 20N utilizando óleo de Rícino e corpo-de-prova de Bronze TM-23.**

A **Figura (68)** representa o desgaste para carga de 20N e corpo-de-prova de bronze TM-23 utilizando óleo SAE 40. A imagem apresenta a presença de partículas abrasivas na região desgastada.



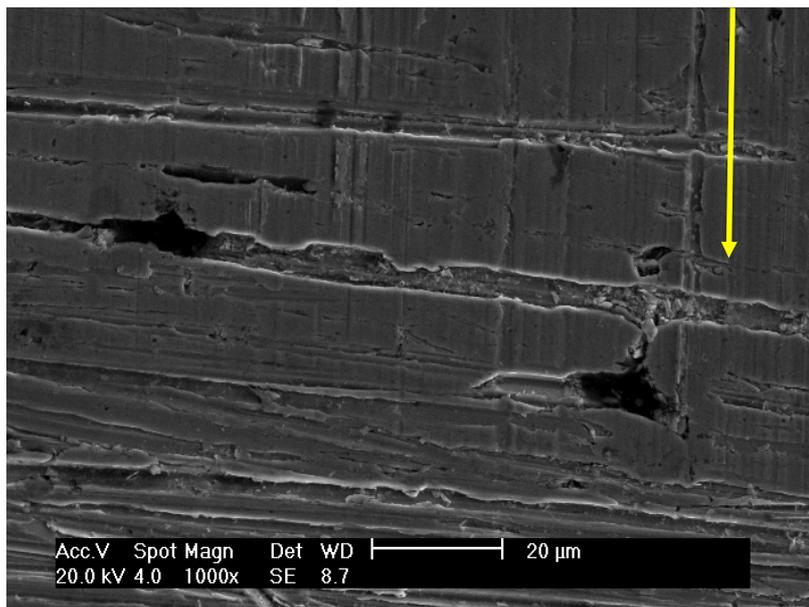
**Figura 68 – Imagens obtidas por MEV para carga de 20N utilizando óleo SAE 40 e corpo-de-prova de Bronze TM-23.**

A **Figura 69 (a)** e **(b)** representam o desgaste para carga de 20N e corpo-de-prova de aço AISI 1045 utilizando óleo de rícino. A **Figura 69(a)** representa deformação plástica perpendicular ao sentido de deslizamento e a **Figura 69(c)** representa a formação de trincas na região desgastada.



**Figura 69 – Imagens obtidas por MEV para carga de 20N utilizando óleo de Rícino e corpo-de-prova de aço AISI 1045.**

A **Figura (70)** representa o desgaste para carga de 20N e corpo-de-prova de aço AISI 1045 utilizando óleo SAE 40. A imagem apresenta a presença de riscas abrasivos, deformação plástica e spalling na região desgastada.



**Figura 70 – Imagens obtidas por MEV para carga de 20N utilizando óleo SAE 40 e corpo-de-prova de aço AISI 1045.**

## 5. CONCLUSÕES

Verifica-se, em todas as condições de contato metal-lubrificante-metal, que o óleo de Rícino apresenta menor aquecimento em relação ao óleo SAE 40. Tal comportamento pode ser justificado pelos seguintes fatores:

- 1- A elevada viscosidade do óleo de rícino pode promover a formação de uma camada lubrificante mais espessa, resultando assim em uma redução do atrito e como consequência no aquecimento do sistema.
- 2- Conforme as suas propriedades térmicas o óleo de rícino apresenta menor capacidade em absorver, conduzir e propagar calor.

Porém para os gráficos de correlação, os ajustes da curva para o óleo SAE 40 apresentam melhor qualidade em relação ao óleo de rícino, mantendo uma baixa dispersão dos seus valores.

De maneira geral, o sistema apresenta maior intensidade de velocidade global de vibração (VGV) para cargas de 9N, e com os materiais do par tribológico na seguinte ordem: bronze-aço > alumínio-aço > aço-aço. A VGV apresentam maiores valores para o óleo de rícino nos contatos alumínio-aço e aço-aço para as cargas de 9N e 20N, e maiores valores para o óleo SAE 40 apenas no contato bronze-aço para as duas cargas utilizadas.

A taxa de desgaste apresenta uma relação não linear quando comparado ao aquecimento. Observa-se para os dois óleos lubrificantes a presença de desgaste severo como descrito por Smith (valores acima de  $10^{-14}$ ). Assim, levando em consideração a afirmação de Smith, a carga de 20N apresenta desgaste severo para todos os corpos-de-prova utilizados.

Os NPS apresentam maiores valores para o óleo de rícino para as cargas de 9N e 20 N, com exceção do par alumínio-aço com carga de 20N. Os gráficos de NPS não mantêm a mesma tendência em relação aos gráficos de aquecimento, onde o óleo SAE 40 apresenta maiores valores.

Os principais mecanismos de desgaste observados nas superfícies dos materiais ensaiados foram: trincas, deformação plástica e sulcos.

A predominância do número de Peclet maior que 5 indica que na maioria dos ensaios não há tempo suficiente para dissipar a temperatura do contato na superfície.

## 6. SUGESTÕES

Segue algumas sugestões para trabalhos futuros, com o intuito de melhorar o sistema.

- Realizar o estudo da rigidez do sistema, compreendendo a análise de mancais em balanço e fixo, variando a rotação e a carga.
- Aprimorar o estudo do desgaste através da implantação de um acelerômetro que fornecerá medidas indiretas de dados de coeficiente de atrito.
- Monitorar a umidade relativa do ar dentro da cabine de ensaio, utilizando o termohigrômetro.
- Realizar ensaios físico-químicos de:
  - (1) teor de água, através do método de Karl Fisher, que determina a quantidade de água presente no óleo;
  - (2) análise de ponto de névoa, que indicará a temperatura na qual o óleo começa a cristalizar;
  - (3) análise de ponto de fluidez, que indicará a menor temperatura no qual o óleo poderá escoar; e,
  - (4) realizar ensaio de ponto de fulgor em vaso fechado, seguindo a norma ASTM D92.
- Utilizar transformada de Fourier para tratamento de dados de vibração.
- Realizar os ensaios de desgaste utilizando um agente contaminantes nos óleos lubrificantes.
- Aprofundar o estudo da influencia do número de Peclet nos ensaios de desgaste.
- Construir um mapa de desgaste (pressão normalizada versus velocidade normalizada) para materiais metálicos sob contato lubrificado.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGARWAL, D., KUMAR, L., AGARWAL, A.K. – **Performance evaluation of a vegetable oil fuelled compression ignition engine** – Renewable Energy, v. 33: p. 1147-1156, 2008.

ASHBY, M. F., JONES, D. R. H. – **Engineering Materials 2 – An Introduction to Microstructures, Processing and Design** – Segunda edição, Butterworth Heinemann, 1998.

ASM HANDBOOK. – **Friction, Lubrication, and Wear Technology** – Volume 18. ASM International Handbook, 1992.

ASM HANDBOOK. – **Metallography and Microstructures** – Volume 9. ASM International Handbook, 2004.

BHUSHAN, B. – **Modern Tribology Handbook**. Florida: CRC Press, volume 1 e 2, 2001.

BUZINELLI, D.V. – Dimensionamento de Elementos Estruturais em Alumínio. **Dissertação de mestrado** apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, SP, Brasil, 2000.

CATÁLOGO TERMOMECÂNICA – [www.termomecanica.com.br](http://www.termomecanica.com.br). Acesso em 16/10/2010.

CIMM – Centro de Informação Metal Mecânica – **Controle de Poluentes Atmosféricos**. Disponível em [www.cimm.com.br/portal/material\\_didatico/3672-control-de-poluente-atmosfericos](http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/3672-control-de-poluente-atmosfericos). Acesso em 05/08/2010.

CHIAVERINI, V. – **Tecnologia Mecânica – Processos de Fabricação e Tratamento** – Editora Mc Graw Hill, Volume III, 2º Edição, 1986.

COSTA, T. L. – Características Físicas e Físico-Químicas do Óleo de Duas Cultivares de Mamona. **Dissertação de mestrado** apresentada à Universidade Federal de Campina Grande, PB, Brasil, 2006.

DASMASCENO, M. P. S., DOMINGUES, M. S. – Análise da Utilização das Oleaginosas - Dendê, Mamona e Soja para Viabilidade de Implantação do Programa Nacional de Produção

e Uso do Biodiesel – PNPB. **Monografia** apresentada ao IEE da USP - Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo, SP, Brasil, 2008.

DESER – Departamento de Estudos Sócio-Econômicos Rurais – **A Cadeia Produtiva da Mamona – Estudos Exploratórios**. 2007. Disponível em [www.deser.org.br/publicacoes](http://www.deser.org.br/publicacoes).

DOWSON, D. – **Hydrodynamic Lubrication – Bearings and Thrust Bearings**. Tribology Series 33, Elsevier, 1997.

ELMER, J. W., PALMER, T. A. – **In-Situ Mapping and Direct Observations of Phase Transformations During Arc Welding of 1045 Steel**. Metallurgical and Materials Transactions, volume 37A, 2006.

FIGUEIREDO JUNIOR, J. C. D., CUNHA LINS, V.F., DE BELLIS, V. M. – **Surface characterization of a corroded bronze-leaded alloy in a salt spray cabinet** – Applied Surface Science 253 (2007) 7104 – 7107.

FOX, N. J., STACHOWIAK, G. W. – **Vegetable Oil-Based Lubricants – A Review of Oxidation**, Tribology International, 2007.

HILSDORF, J.W., BARROS, N.D., TASSINARI, C.A., COSTA, I. – **Química Tecnológica**, 1ª Edição, Cengage Learning, 2004.

HOULE, P. A. – **Acoustic Emission from Crumpling Paper**, Physical Review, 1996.

HUTCHINGS, I.M. – **Tribology – friction and wear of engineering materials**. 1 ed., Cambridge: Edward Arnold, 1992, 273p.

JUN, N. J. X. – Análise de um Processo Abrasivo Combinado em Algumas Características da Lapidação e Retificação. **Dissertação de mestrado** apresentada a Faculdade de Engenharia da UNESP, Bauru, SP, Brasil, 2004.

LEITE, M.V. – Conformação mecânica: efeito da topografia na transferência de material e no atrito. **Tese de doutorado** apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, SP, Brasil, 2010.

MANUAL DA TEKNIKAO – **Medida de Vibração, uma Ferramenta para a Manutenção**.

MALEQUE, M. A., MASJUKI, H. H., SAPUAN, S. M. – **Vegetable-Based Biodegradable Lubricating Oil Additives**, *Industrial Lubrication and Tribology*, vol. 55, number 3, 2003.

MANG, T. and DRESEL, W – **Lubricants and Lubrication**, Wiley-VCH, segunda edição; 2007.

MARGESIN, R. and SCHINNER, F. – **Biodegradation and Bioremediation of Hydrocarbons in Extreme Environments**, Institute of Microbiology, University of Innsbruck, Austria, Mini-Review, 2001.

MARGHITU, D. B. – **Mechanical Engineer's Handbook**, Capítulo 5, Academic Press, 2001.

MEDEIROS, J.T.N. – Fadiga de contato de discos metálicos não-conformes submetidos a ensaio a seco de rolamento cíclico. **Tese de doutorado** apresentada a Escola Politécnica de São Paulo, SP, Brasil, 2002. 2 Vol.

MORAES, M. S. A. – Biodiesel de Sebo – Avaliação de Propriedades e Testes de Consumo em Motor a Diesel. **Dissertação de mestrado** apresentada na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS, Brasil, 2008.

NEALE, M.J. – **The Tribology Handbook** – 2 ed., Butterworth Heinemann, 1995.

OLIVEIRA, C. J. – Avaliação da Influência de Sistemas de Filtragem Aplicados a Topografia de Superfície em Usinagens. **Dissertação de mestrado** apresentada à Universidade Católica de Minas Gerais, MG, Brasil, 2004.

PERES, E. U. X. – Síntese e Avaliação da Atividade de Catalisadores obtidos a partir de Ácido Ricinoleico na Produção de Poliéster de óleo de Mamona (*Ricinus Communis*) e Ácido Tereftálico. **Dissertação de mestrado** apresentada à Universidade de Brasília, DF, Brasil, 2008.

PETROBRAS – **Informações Técnicas do óleo Lubrax MD 400** – dezembro, 2009.

PROFITO, F. G. – Modelagem Unidimensional do Regime Misto de Lubrificação Aplicada a Superfícies Texturizadas. **Dissertação de mestrado** apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, SP, Brasil, 2010.

ROHDE, R. A. – **Metalografia Preparação de Amostras, Uma Abordagem Prática**, versão 3, LEMM – Laboratório de Ensaios Mecânicos e Materiais, Outubro de 2010.

ROSA, L. C. – Apostila de Oficina Mecânica para Automação. **Acabamento de Superfícies – Rugosidade Superficial**. Apostila do curso de Engenharia de Controle e Automação, UNESP – Unidade Diferenciada – Sorocaba/Iperó, Sorocaba/SP, 2006.

SANTANA, J.S. – Avaliação tribológica de polímeros NBR, PTFE e PTFE grafitado em contato com aço AISI 52100. **Dissertação de mestrado** apresentada à Universidade Federal do Rio Grande do Norte, RN, Brasil, 2009.

SILVA, D. A. – Diagnóstico de Equipamentos de Propulsão Naval através de Análise de Vibração. **Dissertação de mestrado** apresentada à Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2006.

SILVA, M.V.I. – Efeitos do uso do biodiesel sobre propriedades do óleo lubrificante usado em um motor de ignição por compressão. **Dissertação de mestrado** apresentada à Escola de Engenharia de São Paulo, SP, Brasil, 2006.

SINGH, A. K. – **Castor Oil-Based Lubricant Reduces Smoke Emission in Two-Stroke Engines** – Chemical Science Division, Indian Institute of Petroleum, Haridwar Road, Mohkampur, India, Elsevier, 2010

SMITH, E. H. – **Mechanical Engineers Reference Book** – Edição 12<sup>o</sup>, University of Central Lancashire, 1994.

SOUZA, L. D., NUNES, A. O., SANTOS, A. G. D., BARROS NETO, E. L., **Caracterização Padronização de Óleos, Diesel e Biodiesel, Produzidos ou Consumidos no RN** – ISSN 1980-5748 P. 81-94, Química no Brasil Vol. 1, 2007.

STACHOWIAK, G. W. & BATCHELOR, A. W. – **Engineering Tribology** – BH – Butterworth Heinemann, 1996.

STEIN, C. R., HERMENEGILDO, T. F. – **Efeito da Rápida Austenitização sobre as Propriedades Mecânicas de um Aço SAE 1045**. Revista Escola de Minas, Ouro Preto, 58(1): 51-56, jan. mar. 2005.

STOETERAU, R. L. – **Apostila de Tribologia** – Universidade Federal de Santa Catarina, SC, Brasil, 2004.

TAYLOR, J. I. – **The Vibration Analysis Handbook** – Hardcover, 1994.

Sites: [www.lubrificantes.net](http://www.lubrificantes.net). Acessado em 15/01/2011.

## **APÊNDICE A**

### **Portaria ANP N°129-1999**

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO

PORTARIA N° 129, DE 30 DE JULHO DE 1999

Estabelece o Regulamento Técnico ANP n° 004/99, que especifica os óleos lubrificantes básicos de origem nacional ou importado para comercialização em território nacional.

O DIRETOR da AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO – ANP, no uso de suas atribuições legais, conferidas pela Portaria ANP n° 118, de 14 de julho de 1999, e com base na Resolução de Diretoria n° 355, de 29 de julho de 1999, torna público o seguinte ato:

Art. 1º Fica estabelecido que a comercialização dos óleos lubrificantes básicos no País deverá observar as especificações constantes do Regulamento Técnico ANP n.º 004 de 30 de julho de 1999 do anexo I da presente Portaria e respectivas Tabelas I e II.

Parágrafo Único. As especificações a que se refere este artigo aplicam-se aos óleos lubrificantes básicos de origem nacional e aos importados.

Art. 2º A comercialização e/ou importação de óleos lubrificantes básicos, com faixas de viscosidade diferentes das explicitadas nesta Portaria, poderá ser realizada mediante acordo entre comprador e vendedor e informada à ANP até 10 dias após sua efetivação.

Art. 3º Ficam revogadas a Resolução do Conselho Nacional de Petróleo n.º 06, de 24 de fevereiro de 1987, a Portaria n.º 45, de 17 de novembro de 1994 do Departamento Nacional de Combustíveis e demais disposições em contrário.

Art. 4º Esta Portaria entra em vigor na data de sua publicação.

**GIOVANNI TONIATTI**  
**DIRETOR**

Publicada no DOU de 02/08/99

Republicada no DOU de 30/09/99

**ANEXO I**  
**REGULAMENTO TÉCNICO ANP Nº 004/99**

1. Objetivo

1.1. Este Regulamento Técnico aplica-se aos óleos lubrificantes básicos comercializados em todo o território nacional de origem nacional ou importado.

1.2. Os óleos lubrificantes básicos abaixo relacionados, comercializados em todo o território nacional, deverão estar de acordo com as especificações estabelecidas neste Regulamento Técnico e respectivas Tabelas I e II.

ÓLEO	ABREVIACÃO
Parafínico Spindle 09	PSP 09
Parafínico Neutro Leve 30	PNL 30
Parafínico Neutro Médio 55	PNM 55
Parafínico Neutro Médio 80	PNM 80
Parafínico Neutro Pesado 95	PNP 95
Parafínico Bright Stock 30	PBS 30
Parafínico Bright Stock 33	PBS 33
Parafínico Turbina Leve 25	PTL 25
Parafínico Turbina Pesado 85	PTP 85
Parafínico Cilindro 45	PCL 45
Parafínico Cilindro 60	PCL 60
Naftênico Hidrogenado 10	NH 10
Naftênico Hidrogenado 20	NH 20
Naftênico Hidrogenado 140	NH 140

2. As abreviações, doravante utilizadas neste Regulamento Técnico, foram estabelecidas utilizando-se o seguinte critério:

- a) Código alfanumérico de 2 ou 3 letras e 2 ou 3 números.
- b) A primeira letra “P” ou “N” indica se o óleo é Parafínico ou Naftênico respectivamente.
- c) A letra ou letras seguintes resumem os nomes dos óleos.
- d) Os números expressam a viscosidade cinemática típica a 40°C de cada um dos óleos.
- e) Nos óleos com viscosidade cinemática a 40°C maior do que 215 cSt, ou seja, óleos PBS30, PBS33, PCL 45 e PCL60, foram utilizados os valores típicos das viscosidades cinemáticas a 100°C.

### 3. Conceito Básico / Aplicação.

Os óleos lubrificantes básicos especificados no presente Regulamento são óleos lubrificantes obtidos do refino de determinados tipos de petróleo.

A principal função de um óleo lubrificante é a redução do atrito e do desgaste entre superfícies metálicas ou plásticas que se movem uma contra a outra.

Somente em algumas aplicações menos severas é possível utilizar o óleo lubrificante básico sem aditivos.

Normalmente, são adicionados ao óleo lubrificante básico diversos tipos de aditivos químicos de modo a atender aos requisitos necessários às diferentes aplicações a que se destina.

As características contempladas por esta especificação são aquelas de maior importância para a caracterização do óleo básico.

### 4. Características.

4.1. Aparência – é uma indicação visual da pureza do óleo e permite verificar a presença de contaminantes visíveis.

4.2. Cor – é mais utilizada como um controle na produção do óleo lubrificante. As variações na cor determinada de um óleo lubrificante podem indicar uma possível contaminação ou indícios de oxidação.

4.3. Viscosidade - é a medida da sua resistência ao escoamento a uma determinada temperatura. É uma das características de maior importância do óleo lubrificante.

4.4. Índice de Viscosidade – é uma indicação da variação da viscosidade do óleo de acordo com a temperatura. Quanto maior o índice de viscosidade menor é a variação da viscosidade com a temperatura, característica esta desejável para os óleos que trabalham em aplicações sujeitas a variações de temperatura.

4.5. Ponto de Fulgor – dá uma indicação da possível presença de compostos voláteis e inflamáveis no óleo. É definido como a menor temperatura, sob determinadas condições de teste, na qual o produto se vaporiza em quantidade suficiente para formar com o ar uma mistura capaz de inflamar-se momentaneamente quando se aplica uma chama sobre a mesma.

4.6. Ponto de Fluidez - é a menor temperatura na qual o óleo lubrificante flui quando sujeito a resfriamento sob condições determinadas de teste. É principalmente controlado para avaliar o desempenho nas condições de uso em que o óleo é submetido a baixas temperaturas ou em climas frios.

4.7. Índice de Acidez Total – é uma medida da quantidade de substâncias ácidas presentes no óleo e indica a eficiência do processo de neutralização dos resíduos ácidos resultantes do tratamento do óleo.

4.8 Cinzas – a quantidade de cinzas presentes no óleo pode ser resultante da presença de compostos metálicos no óleo ou solúveis em água, bem como de outros materiais tais como poeira e ferrugem.

4.9. Resíduo de Carbono Ramsbottom – indica a tendência do óleo à formação de depósitos de carbono, quando submetido a altas temperaturas.

4.10. Corrosividade ao cobre – dá uma indicação relativa do grau de corrosividade do óleo.

4.11. Estabilidade à oxidação – indica a capacidade de resistência à oxidação do óleo quando submetido a longos períodos de estocagem ou sob condições dinâmicas de uso.

4.12. Emulsão – é um indicativo da capacidade de separação da água do óleo quando submetido a contaminação por água.

4.13. Perda por evaporação – avalia as perdas dos hidrocarbonetos mais leves do óleo quando submetido a temperaturas elevadas, o que levaria ao maior consumo do óleo e alteração de suas características.

## 5. Normas Aplicáveis

A verificação das características dos óleos básicos far-se-á mediante o emprego das Normas Brasileiras Registradas - NBR dos métodos da American Society for Testing and Materials – ASTM e da Deutsche Norma -DIN, observando-se sempre os de publicação mais recente.

Os dados de precisão, repetitividade e reprodutibilidade fornecidos nos métodos relacionados neste Regulamento devem ser usados somente como guia para aceitação das determinações em duplicata de ensaio e não devem ser considerados como tolerância aplicada aos limites especificados neste Regulamento.

A análise do produto deverá ser realizada em amostra representativa do produto segundo método ASTM D 4057 -Practice for Manual Sampling of Petroleum and Petroleum Products.

### 5.1. COR.

ASTM D 1500	Test Method for ASTM Color of Petroleum Products (ASTM Color Scale).
-------------	--

### 5.2. VISCOSIDADE CINEMÁTICA.

NBR 10441	Produtos de Petróleo – Líquidos transparentes e opacos –
-----------	--

	Determinação da viscosidade cinemática e cálculo da viscosidade dinâmica.
ASTM D 445	Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and the Calculation of Dynamic Viscosity).

### 5.3. INDICE DE VISCOSIDADE.

NBR 14358	Produtos de Petróleo – Cálculo do índice de viscosidade a partir da viscosidade cinemática.
ASTM D 2270	Practice for Calculating Viscosity Index from Kinematic Viscosity at 40 and 100 °C.

### 5.4. PONTO DE FULGOR.

NBR 11341	Produtos de Petróleo - Determinação dos pontos de fulgor e de combustão em vaso aberto Cleveland.
ASTM D 92	Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup.

### 5.5. PONTO DE FLUIDEZ.

NBR 11349	Produtos de Petróleo – Determinação do ponto de fluidez.
ASTM D 97	Test Method for Pour Point of Petroleum Products.

### 5.6. INDICE DE ACIDEZ TOTAL.

NBR 14248	Produtos de Petróleo – Determinação do índice de neutralização – Método do indicador.
ASTM D 974	Test Method for Acid and Base Number by Color-Indicator Titration.

### 5.7. CINZAS.

NBR 9842	Produtos de Petróleo – Determinação do teor de cinzas.
ASTM D 482	Test Method for Ash from Petroleum Products.

### 5.8. RESÍDUO DE CARBONO RAMSBOTTOM.

NBR 14318	Produtos de Petróleo - Determinação do resíduo de carbono Ramsbottom.
ASTM D 524	Test Method for Ramsbottom Carbon Residue of Petroleum Products.

### 5.9. CORROSIVIDADE AO COBRE.

NBR 14359	Produtos de Petróleo – Determinação da corrosividade – Método da lâmina de cobre.
ASTM D 130	Test Method for Detection of Copper Corrosion from Petroleum Products by the Copper Strip Tarnish Test.

## 5.10. ESTABILIDADE À OXIDAÇÃO.

ASTM D 943	Test Method for Oxidation Characteristics of Inhibited Mineral Oils.
------------	--

## 5.11. EMULSÃO.

NBR 14172	Óleos derivados de petróleo e fluidos sintéticos - determinação das características de emulsão.
ASTM D 1401	Test Method for Water Separability of Petroleum Oils and Synthetic Fluids.

## 5.12. PERDA POR EVAPORAÇÃO-NOACK.

NBR 14157	Óleos Lubrificantes – Determinação da perda por evaporação pelo método Noack.
DIN 51581	Testing of Lubricants- Determination of Evaporation Loss of Lubricant Oils-Noack Test.

## APÊNDICE B

### Mapeamento do Nível de Pressão Sonora

Foram mapeados inicialmente seis regiões para fixar o decibelímetro, conforme *Figura (A)* abaixo.



**Figura (A): Vista de topo da máquina de ensaio, demonstrando a região de posicionamento do decibelímetro.**

O mapeamento foi efetuado num tempo de 21 segundos para duas condições: (1) máquina revestida com isopor e (2) máquina revestida com isopor e espuma D45, utilizando-se o som de uma turbina Mirage 2000, *Tabela (A)*.

Devido a limitações de espaço dentro da máquina para acoplamento do decibelímetro, foi escolhido a região 5, conforme destaque na *Figura (B)*, para coletar todas as medidas de ensaios.



**Figura (B): Decibelímetro na região 5.**

**Tabela (A)** – Nível de pressão sonora para revestimento com isopor e para revestimento com isopor e espuma acústica D45.

<b>Ensaio com Revestimento de Isopor</b>		<b>Ensaio com Revestimento de Isopor e Espuma Acústica D45</b>	
<b>SEÇÃO 5</b>		<b>SEÇÃO 5</b>	
Segundos	<b>dB</b>	Segundos	<b>dB</b>
1	<b>81,7</b>	1	<b>72,4</b>
2	<b>81,7</b>	2	<b>72,2</b>
3	<b>81,1</b>	3	<b>72,2</b>
4	<b>81</b>	4	<b>71,9</b>
5	<b>82,6</b>	5	<b>71,9</b>
6	<b>82</b>	6	<b>71,9</b>
7	<b>82,2</b>	7	<b>71,9</b>
8	<b>82,7</b>	8	<b>70,9</b>
9	<b>81,3</b>	9	<b>71,2</b>
10	<b>80,3</b>	10	<b>71,3</b>
11	<b>79,6</b>	11	<b>71,1</b>
12	<b>80</b>	12	<b>71,2</b>
13	<b>80,1</b>	13	<b>71,4</b>
14	<b>81,1</b>	14	<b>71,1</b>
15	<b>81,8</b>	15	<b>71,7</b>
16	<b>81,1</b>	16	<b>71</b>
17	<b>81</b>	17	<b>71,2</b>
18	<b>81,7</b>	18	<b>71,4</b>
19	<b>81,4</b>	19	<b>71,3</b>
20	<b>81,8</b>	20	<b>71,2</b>
21	<b>80,9</b>	21	<b>71</b>

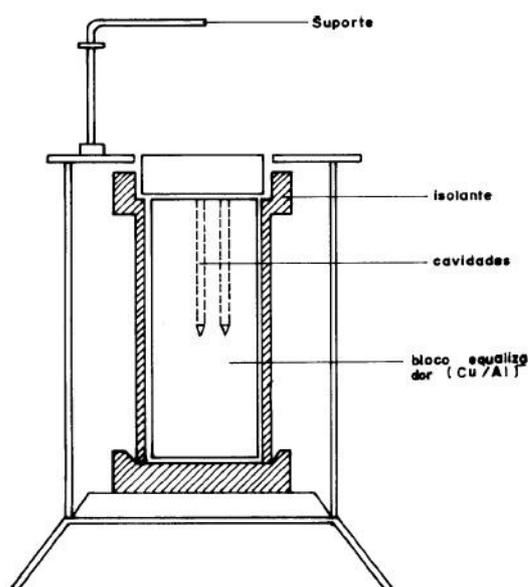
## APÊNDICE C

### Calibração dos Termopares

Como qualquer outro sensor, o termopar está sujeito a ter suas características alteradas com o uso, ao longo do tempo, principalmente sob condições severas de temperatura e atmosfera agressiva. Assim, para garantir a precisão da malha em que o mesmo está instalado, periodicamente o mesmo deve ser calibrado.

Os fios termopares foram calibrados com o método de calibração digital de temperatura tipo bloco seco. Este método é baseado na comparação dos valores obtidos pelo termopar e um padrão (tipo R ou S), ambos nas mesmas condições de medição. O equipamento consiste em um forno com temperatura controlada. O termopar padrão e os termopares a serem calibrados são imersos no forno, e quando o forno atinge o equilíbrio e estabilidade térmica numa dada temperatura, esta pode ser determinada pelo termopar padrão acoplado ao sistema de medição, estabelecendo-se a correlação com cada termopar a ser calibrado.

A *Figura (C)*, mostra um exemplo do forno para calibração de termopares pelo método de comparação.



**Figura (C): Forno para calibração de termopares por comparação.**

Certificados de calibração N° 456-2010, N° 457-2010 e N° 458-2010 emitido em 28/05/2010 pelo Laboratório de Metrologia da UFRN.

Foram utilizados fios termopares do tipo K de marca Cole-Parme, com faixa nominal de temperatura de  $-150^{\circ}\text{C}$  a  $1370^{\circ}\text{C}$ .

O termopar foi calibrado por comparação, com padrão do Laboratório de Metrologia da UFRN a uma temperatura ambiente de  $20 \pm 1^{\circ}\text{C}$ , com calibrador digital de temperatura tipo bloco seco, conforme *Figura (D)* abaixo.



**Figura (D):** Calibrador digital de temperatura de bloco seco, marca Presys T-350P.

As temperaturas de calibração foram efetuadas a  $0^{\circ}\text{C}$ ;  $25^{\circ}\text{C}$ ;  $60^{\circ}\text{C}$  e  $100^{\circ}\text{C}$ , conforme indicado nas tabelas a seguir.

**Tabela (B) –** Calibração Termopar TP 13.

Indicação do Padrão V.V.C. ( $^{\circ}\text{C}$ )	Média das Indicações do Termopar ( $^{\circ}\text{C}$ )	Incerteza ( $^{\circ}\text{C}$ )
0,00	-0,3	$\pm 0,1$
25,00	24,8	$\pm 0,2$
60,00	60,1	$\pm 0,2$
100,00	100,5	$\pm 0,1$

**Tabela (C)** – Calibração Termopar TP 14.

<b>Indicação do Padrão V.V.C. (°C)</b>	<b>Média das Indicações do Termopar (°C)</b>	<b>Incerteza (°C)</b>
0,00	-0,3	±0,1
25,00	24,8	±0,2
60,00	60,0	±0,2
100,00	100,5	±0,2

**Tabela (D)** – Calibração Termopar TP 15

<b>Indicação do Padrão V.V.C. (°C)</b>	<b>Média das Indicações do Termopar (°C)</b>	<b>Incerteza (°C)</b>
0,00	-0,3	±0,2
25,00	24,8	±0,2
60,00	60,1	±0,1
100,00	100,4	±0,2

As incertezas apresentadas possuem um nível de confiança de aproximadamente 95 % e fator de abrangência  $k=2,0$ , segundo EA-4/02.

Observações:

- 1) A validade da calibração do instrumento deve ser estabelecida pelo usuário em plano de calibração descrito no sistema da qualidade de acordo com a norma NBR ISO 10.012, parte 1;
- 2) Os valores definidos para esta calibração foram estabelecidos pelo requerente;
- 3) Calibração em 28/05/2010 e validade em 01/02/2013, conforme atestado pelo Laboratório de Metrologia da UFNR.

## APÊNDICE D

### Tratamento Térmico do aço AISI 1045

Neste trabalho, foi realizado o tratamento térmico de têmpera seguido pelo processo de revenimento para o contracorpos e corpos-de-prova de aço AISI 1045.

Têmpera: A têmpera é um processo de tratamento térmico nos aços, destinados á obtenção de dureza. Esse tratamento possibilita vida longa ao objeto tratado, para que a mesma não se desgaste nem se deforme rapidamente.

O processo consiste em aquecer o aço num forno com temperatura acima da zona crítica. Para o aço carbono, a temperatura varia entre 750°C a 950°C. A peça permanece nessa temperatura o tempo necessário para se transformar em austenita. Em seguida a peça é retirada do forno e resfriada em solução de óleo ou em água.

Quando a austenita é resfriada rapidamente, não há tempo para que se transforme em ferrita, cementita ou perlita. Logo, a austenita se transformará num novo constituinte do aço conhecido como martensita (CHIAVERINE, 1986).

A têmpera foi realizada a uma taxa de aquecimento de 10 °C por minutos. Atingindo após 1 hora e 30 minutos o patamar de 900 °C, permaneceu nesta temperatura durante 30 minutos, sendo a peça em seguida resfriada num recipiente contendo óleo fazendo-se movimentos circulares para obter resfriamento homogêneo.

Revenimento: O tratamento térmico de têmpera provoca mudanças nas propriedades do aço, sendo que algumas delas, como dureza e a resistência á tração atinge valores elevados, enquanto resistência ao choque e o alongamento ficam com valores muito baixos e o material adquire uma apreciável quantidade de tensões internas. Logo, o revenimento é um processo sempre posterior á têmpera que tem a função de corrigir a dureza excessiva da têmpera e aliviar ou remover as tensões internas. Seu tratamento consiste em levar a peça ao forno, em uma temperatura abaixo da zona crítica que varia entre 100°C a 700°C (CHIAVERINE, 1986). O revenimento foi realizado a uma taxa de aquecimento de 2 °C por minutos, atingindo o patamar de 180 °C após 1 hora e 30 minutos. Em seguida as peças permaneceram durante 1 hora nesta temperatura e depois resfriada no próprio forno.

## APÊNDICE E

### Rugosidade (Ra, Rq) e Ondulação (Wa, Wq) dos corpos-de-prova em $\mu\text{m}$

(a) Pinos de Aço AISI 1045 Temperado e Revenido.

Amostra 1	Número de Medições							Média	Desv.Padrão
Desvio de Forma	1	2	3	4	5	6	7		
<b>Ra</b>	0,136	0,227	0,429	0,299	0,428	0,295	0,375	0,299	$\pm 0,108$
<b>Rq</b>	0,173	0,283	0,541	0,386	0,560	0,385	0,478	0,386	$\pm 0,140$
<b>Wa</b>	0,187	0,167	0,420	0,899	0,665	1,480	0,27	0,420	$\pm 0,477$
<b>Wq</b>	0,202	0,192	0,463	0,966	0,756	1,600	0,321	0,463	$\pm 0,511$

Amostra 2	Número de Medições							Média	Desv.Padrão
Desvio de Forma	1	2	3	4	5	6	7		
<b>Ra</b>	0,219	0,256	0,506	0,177	0,307	0,25	0,408	0,256	$\pm 0,116$
<b>Rq</b>	0,304	0,331	0,632	0,234	0,397	0,329	0,524	0,331	$\pm 0,139$
<b>Wa</b>	0,117	0,358	0,431	0,127	0,729	0,207	4,19	0,358	$\pm 1,475$
<b>Wq</b>	0,132	0,409	0,479	0,144	0,812	0,23	4,33	0,409	$\pm 1,516$

Amostra 3	Número de Medições							Média	Desv.Padrão
Desvio de Forma	1	2	3	4	5	6	7		
<b>Ra</b>	0,428	0,351	0,172	0,146	0,48	0,152	0,174	0,174	$\pm 0,144$
<b>Rq</b>	0,571	0,452	0,225	0,194	0,599	0,202	0,216	0,225	$\pm 0,183$
<b>Wa</b>	0,279	0,578	0,0919	0,048	3,55	0,117	0,249	0,249	$\pm 1,268$
<b>Wq</b>	0,326	0,627	0,0992	0,0619	3,78	0,134	0,269	0,269	$\pm 1,347$

<b>Amostra 4</b>	<b>Número de Medições</b>							<b>Média</b>	<b>Desv.Padrão</b>
<b>Desvio de Forma</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>		
<b>Ra</b>	0,186	0,158	0,162	0,129	0,141	0,12	0,298	0,158	± 0,060
<b>Rq</b>	0,239	0,208	0,208	0,175	0,193	0,168	0,386	0,208	± 0,075
<b>Wa</b>	0,128	0,498	0,293	0,0569	0,0853	0,254	0,534	0,254	± 0,192
<b>Wq</b>	0,141	0,571	0,333	0,0608	0,107	0,271	0,587	0,271	± 0,215

<b>Amostra 5</b>	<b>Número de Medições</b>							<b>Média</b>	<b>Desv.Padrão</b>
<b>Desvio de Forma</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>		
<b>Ra</b>	0,265	0,214	0,327	0,299	0,189	0,375	0,118	0,265	± 0,089
<b>Rq</b>	0,338	0,276	0,424	0,394	0,263	0,479	0,154	0,338	± 0,111
<b>Wa</b>	0,253	0,143	0,169	0,245	0,764	0,506	0,348	0,253	± 0,220
<b>Wq</b>	0,291	0,159	0,204	0,274	0,801	0,539	0,385	0,291	± 0,224

<b>Amostra 6</b>	<b>Número de Medições</b>							<b>Média</b>	<b>Desv.Padrão</b>
<b>Desvio de Forma</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>		
<b>Ra</b>	0,230	0,372	0,205	0,227	0,395	0,209	0,278	0,23	± 0,079
<b>Rq</b>	0,332	0,487	0,28	0,305	0,522	0,316	0,384	0,332	± 0,094
<b>Wa</b>	0,248	0,963	0,322	0,117	0,43	0,0195	0,27	0,27	± 0,306
<b>Wq</b>	0,255	1	0,349	0,132	0,485	0,0273	0,312	0,312	± 0,317

<b>Amostra 7</b>	<b>Número de Medições</b>							<b>Média</b>	<b>Desv.Padrão</b>
<b>Desvio de Forma</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>		
<b>Ra</b>	0,481	0,195	0,766	0,36	0,207	0,187	0,342	0,342	± 0,208
<b>Rq</b>	0,609	0,261	0,963	0,459	0,291	0,246	0,445	0,445	± 0,255
<b>Wa</b>	0,447	0,214	2,51	1,1	0,229	0,098	2,04	0,447	± 0,973
<b>Wq</b>	0,579	0,232	2,76	1,25	0,246	0,111	2,2	0,579	± 1,057

<b>Amostra 8</b>	<b>Número de Medições</b>							<b>Média</b>	<b>Desv.Padrão</b>
<b>Desvio de Forma</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>		
<b>Ra</b>	0,146	0,116	0,185	0,163	0,184	0,16	0,138	0,16	± 0,025
<b>Rq</b>	0,189	0,16	0,231	0,207	0,24	0,204	0,182	0,204	± 0,028
<b>Wa</b>	0,137	0,0588	0,64	0,0657	0,213	0,182	0,218	0,182	± 0,198
<b>Wq</b>	0,164	0,0645	0,689	0,0795	0,261	0,201	0,233	0,201	± 0,211

**(b) Pinos de Alumínio 6261.**

<b>Amostra 1</b>	<b>Número de Medições</b>							<b>Média</b>	<b>Desv.Padrão</b>
<b>Desvio de Forma</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>		
<b>Ra</b>	0,12	0,112	0,121	0,143	0,177	0,215	0,119	0,121	± 0,038
<b>Rq</b>	0,157	0,145	0,164	0,187	0,224	0,277	0,155	0,164	± 0,048
<b>Wa</b>	0,29	0,312	0,242	0,296	0,278	0,236	0,226	0,278	± 0,034
<b>Wq</b>	0,311	0,33	0,265	0,312	0,302	0,257	0,246	0,302	± 0,032

<b>Amostra 2</b>	<b>Número de Medições</b>							<b>Média</b>	<b>Desv.Padrão</b>
<b>Desvio de Forma</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>		
<b>Ra</b>	0,155	0,209	0,406	0,212	0,189	0,143	0,244	0,209	± 0,088
<b>Rq</b>	0,2	0,275	0,489	0,29	0,24	0,186	0,311	0,275	± 0,101
<b>Wa</b>	1,08	0,726	1,75	1,21	1,17	0,496	1,14	1,14	± 0,397
<b>Wq</b>	1,21	0,795	1,84	1,3	1,36	0,531	1,17	1,21	± 0,419

<b>Amostra 3</b>	<b>Número de Medições</b>							<b>Média</b>	<b>Desv.Padrão</b>
<b>Desvio de Forma</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>		
<b>Ra</b>	0,157	0,102	0,121	0,119	0,149	0,197	0,121	0,121	± 0,032
<b>Rq</b>	0,195	0,13	0,165	0,154	0,193	0,247	0,159	0,165	± 0,038
<b>Wa</b>	1,16	0,271	0,517	0,463	0,982	1,5	0,461	0,517	± 0,453
<b>Wq</b>	1,24	0,293	0,544	0,508	1,03	1,63	0,487	0,544	± 0,490

<b>Amostra 4</b>	<b>Número de Medições</b>							<b>Média</b>	<b>Desv.Padrão</b>
<b>Desvio de Forma</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>		
<b>Ra</b>	0,274	0,268	0,231	0,33	0,335	0,492	0,372	0,33	± 0,086
<b>Rq</b>	0,362	0,337	0,296	0,417	0,432	0,63	0,482	0,417	± 0,111
<b>Wa</b>	1,44	0,169	0,454	0,644	0,187	0,477	0,429	0,454	± 0,429
<b>Wq</b>	1,45	0,192	0,543	0,706	0,214	0,515	0,472	0,515	± 0,423

<b>Amostra 5</b>	<b>Número de Medições</b>							<b>Média</b>	<b>Desv.Padrão</b>
<b>Desvio de Forma</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>		
<b>Ra</b>	0,177	0,278	0,167	0,192	0,37	0,383	0,597	0,278	± 0,155
<b>Rq</b>	0,23	0,375	0,22	0,259	0,488	0,504	0,827	0,375	± 0,216
<b>Wa</b>	0,35	1,47	0,791	0,554	1,08	0,857	0,64	0,791	± 0,369
<b>Wq</b>	0,367	1,56	0,862	0,604	1,12	1,02	0,785	0,862	± 0,384

<b>Amostra 6</b>	<b>Número de Medições</b>							<b>Média</b>	<b>Desv.Padrão</b>
<b>Desvio de Forma</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>		
<b>Ra</b>	0,867	0,564	0,43	0,305	0,404	0,33	0,282	0,404	± 0,205
<b>Rq</b>	1,18	0,707	0,523	0,392	0,5	0,427	0,364	0,5	± 0,286
<b>Wa</b>	2,61	1,47	1,41	1,48	1,74	0,343	0,409	1,47	± 0,783
<b>Wq</b>	2,99	1,56	1,46	1,57	1,83	0,403	0,447	1,56	± 0,880

<b>Amostra 7</b>	<b>Número de Medições</b>							<b>Média</b>	<b>Desv.Padrão</b>
<b>Desvio de Forma</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>		
<b>Ra</b>	0,152	0,157	0,143	0,155	0,178	0,204	0,219	0,157	± 0,029
<b>Rq</b>	1,9	1,93	1,36	1,22	1,84	1,88	2,11	1,88	± 0,327
<b>Wa</b>	0,34	0,368	0,254	0,33	0,41	0,297	0,229	0,33	± 0,063
<b>Wq</b>	0,361	0,392	0,278	0,357	0,44	0,305	0,24	0,357	± 0,069

<b>Amostra 8</b>	<b>Número de Medições</b>							<b>Média</b>	<b>Desv.Padrão</b>
<b>Desvio de Forma</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>		
<b>Ra</b>	0,245	0,854	0,41	0,344	0,521	0,325	0,314	0,344	± 0,206
<b>Rq</b>	0,331	1,01	0,55	0,437	0,677	0,408	0,403	0,437	± 0,235
<b>Wa</b>	0,159	3,21	1,55	0,902	3,54	0,676	0,705	0,902	± 1,326
<b>Wq</b>	0,178	3,55	1,63	0,939	3,69	0,791	0,74	0,939	± 1,415

## (c) Pinos de Bronze TM-23.

<b>Amostra 1</b>	<b>Número de Medições</b>							<b>Média</b>	<b>Desv.Padrão</b>
<b>Desvio de Forma</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>		
<b>Ra</b>	0,192	0,186	0,214	0,139	0,638	0,245	0,188	0,192	± 0,171
<b>Rq</b>	0,24	0,237	0,267	0,174	0,908	0,31	0,226	0,24	± 0,255
<b>Wa</b>	0,796	0,494	0,438	0,961	0,831	0,673	0,383	0,673	± 0,221
<b>Wq</b>	0,853	0,523	0,475	1,02	0,872	0,727	0,416	0,727	± 0,230

<b>Amostra 2</b>	<b>Número de Medições</b>							<b>Média</b>	<b>Desv.Padrão</b>
<b>Desvio de Forma</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>		
<b>Ra</b>	0,279	0,125	0,125	0,103	0,154	0,199	0,235	0,154	± 0,065
<b>Rq</b>	0,351	0,157	0,155	0,13	0,188	0,261	0,285	0,188	± 0,0820
<b>Wa</b>	4,31	0,514	0,532	1,32	0,459	0,5	3,74	0,532	± 1,675
<b>Wq</b>	4,51	0,55	0,581	1,4	0,496	0,54	3,93	0,581	± 1,748

<b>Amostra 3</b>	<b>Número de Medições</b>							<b>Média</b>	<b>Desv.Padrão</b>
<b>Desvio de Forma</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>		
<b>Ra</b>	0,12	0,212	0,144	0,116	0,107	0,16	0,177	0,144	± 0,039
<b>Rq</b>	0,153	0,278	0,19	0,148	0,137	0,202	0,244	0,19	± 0,053
<b>Wa</b>	0,627	0,473	0,877	0,69	0,321	0,456	0,67	0,627	± 0,184
<b>Wq</b>	0,66	0,504	0,948	0,72	0,425	0,5	0,732	0,66	± 0,180

<b>Amostra 4</b>	<b>Número de Medições</b>							<b>Média</b>	<b>Desv.Padrão</b>
<b>Desvio de Forma</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>		
<b>Ra</b>	0,188	0,16	0,122	0,184	0,116	0,113	0,162	0,16	± 0,032
<b>Rq</b>	0,268	0,208	0,152	0,256	0,148	0,132	0,2	0,2	± 0,054
<b>Wa</b>	0,339	0,525	0,358	0,357	0,43	0,609	0,51	0,43	± 0,103
<b>Wq</b>	0,385	0,548	0,373	0,376	0,49	0,637	0,65	0,49	± 0,121

<b>Amostra 5</b>	<b>Número de Medições</b>							<b>Média</b>	<b>Desv.Padrão</b>
<b>Desvio de Forma</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>		
<b>Ra</b>	0,13	0,198	0,213	0,197	0,153	0,238	0,105	0,197	± 0,048
<b>Rq</b>	0,16	0,266	0,263	0,241	0,197	0,308	0,132	0,241	± 0,063
<b>Wa</b>	0,254	0,291	0,503	0,337	0,219	0,201	0,231	0,254	± 0,104
<b>Wq</b>	0,275	0,313	0,563	0,356	0,241	0,214	0,253	0,275	± 0,119

<b>Amostra 6</b>	<b>Número de Medições</b>							<b>Média</b>	<b>Desv.Padrão</b>
<b>Desvio de Forma</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>		
<b>Ra</b>	0,13	0,115	0,144	0,118	0,2	0,104	0,122	0,122	± 0,032
<b>Rq</b>	0,163	0,142	0,188	0,151	0,238	0,13	0,155	0,155	± 0,036
<b>Wa</b>	0,304	0,217	0,204	0,159	0,195	0,162	0,234	0,204	± 0,049
<b>Wq</b>	0,325	0,231	0,217	0,173	0,214	0,172	0,251	0,217	± 0,052

<b>Amostra 7</b>	<b>Número de Medições</b>							<b>Média</b>	<b>Desv.Padrão</b>
<b>Desvio de Forma</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>		
<b>Ra</b>	0,12	0,111	0,128	0,135	0,101	0,151	0,104	0,12	± 0,018
<b>Rq</b>	0,152	0,144	0,157	0,176	0,13	0,193	0,128	0,152	± 0,024
<b>Wa</b>	0,393	0,205	0,162	0,256	1,05	0,211	0,456	0,256	± 0,310
<b>Wq</b>	0,422	0,222	0,174	0,286	1,09	0,22	0,487	0,286	± 0,319

<b>Amostra 8</b>	<b>Número de Medições</b>							<b>Média</b>	<b>Desv.Padrão</b>
<b>Desvio de Forma</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>		
<b>Ra</b>	0,163	0,211	0,234	0,311	0,288	0,345	0,282	0,282	± 0,063
<b>Rq</b>	0,243	0,304	0,351	0,477	0,42	0,49	0,411	0,411	± 0,091
<b>Wa</b>	0,65	0,56	0,593	0,484	0,455	0,583	0,345	0,56	± 0,103
<b>Wq</b>	0,675	0,636	0,621	0,525	0,506	0,605	0,368	0,605	± 0,105

## APÊNDICE F

### Rugosidade (Ra, Rq) e Ondulação (Wa, Wq) dos Contracorpos em $\mu\text{m}$

(a) Hastes de Aço AISI 1045 Temperado e Revenido.

Haste 1	Posição de Medição				Média	Desv. Padrão
Seção 3	12 h	3 h	6 h	9 h		
<b>Ra</b>	0,161	0,200	0,179	0,167	0,173	$\pm 0,017$
<b>Rq</b>	0,220	0,284	0,235	0,235	0,235	$\pm 0,028$
<b>Wa</b>	0,427	0,523	0,193	0,417	0,422	$\pm 0,140$
<b>Wq</b>	0,448	0,556	0,202	0,44	0,444	$\pm 0,149$

Haste 1	Posição de Medição				Média	Desv. Padrão
Seção 4	12 h	3 h	6 h	9 h		
<b>Ra</b>	0,239	0,155	0,201	0,224	0,2125	$\pm 0,037$
<b>Rq</b>	0,331	0,207	0,272	0,311	0,2915	$\pm 0,055$
<b>Wa</b>	0,673	0,466	0,429	0,434	0,45	$\pm 0,116$
<b>Wq</b>	0,701	0,494	0,455	0,463	0,4785	$\pm 0,116$

Haste 1	Posição de Medição				Média	Desv. Padrão
Seção 5	12 h	3 h	6 h	9 h		
<b>Ra</b>	0,228	0,260	0,175	0,197	0,213	$\pm 0,037$
<b>Rq</b>	0,302	0,336	0,23	0,266	0,284	$\pm 0,046$
<b>Wa</b>	0,574	0,614	0,378	0,353	0,476	$\pm 0,133$
<b>Wq</b>	0,605	0,64	0,396	0,380	0,501	$\pm 0,136$

Haste 1	Posição de Medição				Média	Desv. Padrão
Seção 6	12 h	3 h	6 h	9 h		
<b>Ra</b>	0,172	0,185	0,174	0,179	0,177	± 0,006
<b>Rq</b>	0,227	0,253	0,231	0,240	0,236	± 0,012
<b>Wa</b>	0,315	0,366	0,256	0,329	0,322	± 0,046
<b>Wq</b>	0,342	0,396	0,279	0,346	0,344	± 0,048

Haste 1	Posição de Medição				Média	Desv. Padrão
Seção 7	12 h	3 h	6 h	9 h		
<b>Ra</b>	0,170	0,165	0,162	0,170	0,168	± 0,004
<b>Rq</b>	0,234	0,215	0,210	0,229	0,222	± 0,011
<b>Wa</b>	0,230	0,235	0,232	0,227	0,231	± 0,003
<b>Wq</b>	0,261	0,259	0,250	0,248	0,255	± 0,006

Haste 1	Posição de Medição				Média	Desv. Padrão
Seção 8	12 h	3 h	6 h	9 h		
<b>Ra</b>	0,169	0,153	0,177	0,188	0,173	± 0,015
<b>Rq</b>	0,22	0,195	0,225	0,256	0,2225	± 0,025
<b>Wa</b>	0,297	0,268	0,198	0,22	0,244	± 0,045
<b>Wq</b>	0,326	0,3	0,226	0,248	0,274	± 0,046

Haste 1	Posição de Medição				Média	Desv. Padrão
Seção 9	12 h	3 h	6 h	9 h		
<b>Ra</b>	0,165	0,158	0,174	0,161	0,163	± 0,007
<b>Rq</b>	0,213	0,212	0,224	0,225	0,2185	± 0,007
<b>Wa</b>	0,145	0,0977	0,109	0,0823	0,10335	± 0,027
<b>Wq</b>	0,166	0,118	0,123	0,0955	0,1205	± 0,029

Haste 2	Posição de Medição				Média	Desv. Padrão
Seção 2	12 h	3 h	6 h	9 h		
<b>Ra</b>	0,189	0,176	0,159	0,187	0,1815	± 0,014
<b>Rq</b>	0,241	0,234	0,204	0,258	0,2375	± 0,023
<b>Wa</b>	0,18	0,273	0,109	0,136	0,158	± 0,072
<b>Wq</b>	0,206	0,296	0,13	0,16	0,183	± 0,072

Haste 2	Posição de Medição				Média	Desv. Padrão
Seção 3	12 h	3 h	6 h	9 h		
<b>Ra</b>	0,228	0,186	0,173	0,212	0,199	± 0,025
<b>Rq</b>	0,288	0,244	0,215	0,272	0,258	± 0,032
<b>Wa</b>	0,236	0,151	0,208	0,275	0,222	± 0,052
<b>Wq</b>	0,281	0,173	0,231	0,297	0,256	± 0,056

Haste 2	Posição de Medição				Média	Desv. Padrão
Seção 4	12 h	3 h	6 h	9 h		
<b>Ra</b>	0,207	0,211	0,158	0,152	0,1825	± 0,031
<b>Rq</b>	0,267	0,28	0,208	0,207	0,2375	± 0,038
<b>Wa</b>	0,158	0,203	0,216	0,213	0,208	± 0,027
<b>Wq</b>	0,183	0,222	0,231	0,229	0,2255	± 0,023

Haste 2	Posição de Medição				Média	Desv. Padrão
Seção 5	12 h	3 h	6 h	9 h		
<b>Ra</b>	0,239	0,228	0,222	0,307	0,2335	± 0,039
<b>Rq</b>	0,301	0,304	0,289	0,452	0,3025	± 0,077
<b>Wa</b>	0,238	0,289	0,375	0,52	0,332	± 0,123
<b>Wq</b>	0,258	0,307	0,406	0,54	0,3565	± 0,124

Haste 2	Posição de Medição				Média	Desv. Padrão
Seção 6	12 h	3 h	6 h	9 h		
<b>Ra</b>	0,258	0,457	0,315	0,228	0,2865	± 0,102
<b>Rq</b>	0,332	0,671	0,408	0,297	0,37	± 0,169
<b>Wa</b>	0,866	0,621	0,682	0,555	0,6515	± 0,134
<b>Wq</b>	0,889	0,805	0,716	0,573	0,7605	± 0,135

Haste 2	Posição de Medição				Média	Desv. Padrão
Seção 7	12 h	3 h	6 h	9 h		
<b>Ra</b>	0,261	0,341	0,234	0,242	0,2515	± 0,049
<b>Rq</b>	0,362	0,468	0,311	0,333	0,3475	± 0,070
<b>Wa</b>	0,631	0,664	0,605	0,555	0,618	± 0,046
<b>Wq</b>	0,31	0,701	0,632	0,582	0,607	± 0,171

Haste 2	Posição de Medição				Média	Desv. Padrão
Seção 8	12 h	3 h	6 h	9 h		
<b>Ra</b>	0,231	0,234	0,257	0,241	0,2375	± 0,012
<b>Rq</b>	0,296	0,298	0,322	0,32	0,309	± 0,014
<b>Wa</b>	0,56	0,514	0,639	0,579	0,5695	± 0,052
<b>Wq</b>	0,584	0,533	0,662	0,6	0,592	± 0,053

Haste 2	Posição de Medição				Média	Desv. Padrão
Seção 9	12 h	3 h	6 h	9 h		
<b>Ra</b>	0,295	0,272	0,335	0,351	0,315	± 0,036
<b>Rq</b>	0,383	0,364	0,457	0,479	0,42	± 0,056
<b>Wa</b>	0,765	0,722	0,645	0,999	0,7435	± 0,152
<b>Wq</b>	0,8	0,749	0,671	1,03	0,7745	± 0,154

Haste 3	Posição de Medição				Média	Desv. Padrão
Seção 2	12 h	3 h	6 h	9 h		
<b>Ra</b>	0,277	0,169	0,196	0,226	0,211	± 0,046
<b>Rq</b>	0,358	0,226	0,254	0,297	0,2755	± 0,057
<b>Wa</b>	0,618	0,276	0,133	0,195	0,2355	± 0,216
<b>Wq</b>	0,64	0,293	0,16	0,224	0,2585	± 0,214

Haste 3	Posição de Medição				Média	Desv. Padrão
Seção 4	12 h	3 h	6 h	9 h		
<b>Ra</b>	0,2	0,198	0,19	0,268	0,199	± 0,036
<b>Rq</b>	0,275	0,31	0,261	0,369	0,2925	± 0,048
<b>Wa</b>	0,194	0,0933	0,117	0,135	0,126	± 0,043
<b>Wq</b>	0,219	0,115	0,137	0,147	0,142	± 0,045

Haste 3	Posição de Medição				Média	Desv. Padrão
Seção 6	12 h	3 h	6 h	9 h		
<b>Ra</b>	0,253	0,206	0,21	0,312	0,2315	± 0,049
<b>Rq</b>	0,349	0,306	0,266	0,453	0,3275	± 0,080
<b>Wa</b>	0,203	0,0798	0,0757	0,36	0,1414	± 0,134
<b>Wq</b>	0,229	0,0898	0,0961	0,379	0,16255	± 0,136

Haste 3	Posição de Medição				Média	Desv. Padrão
Seção 7	12 h	3 h	6 h	9 h		
<b>Ra</b>	0,217	0,178	0,458	0,199	0,208	± 0,131
<b>Rq</b>	0,293	0,256	0,591	0,288	0,2905	± 0,157
<b>Wa</b>	0,0878	0,0741	0,488	0,0643	0,08095	± 0,207
<b>Wq</b>	0,101	0,0829	0,568	0,0707	0,09195	± 0,242

Haste 3	Posição de Medição				Média	Desv. Padrão
Seção 8	12 h	3 h	6 h	9 h		
<b>Ra</b>	0,169	0,173	0,173	0,18	0,173	± 0,005
<b>Rq</b>	0,232	0,237	0,226	0,25	0,2345	± 0,010
<b>Wa</b>	0,0597	0,394	0,0669	0,0807	0,0738	± 0,163
<b>Wq</b>	0,0696	0,42	0,0829	0,0897	0,0863	± 0,170

Haste 3	Posição de Medição				Média	Desv. Padrão
Seção 9	12 h	3 h	6 h	9 h		
<b>Ra</b>	0,169	0,141	0,181	0,166	0,1675	± 0,017
<b>Rq</b>	0,217	0,177	0,238	0,213	0,215	± 0,025
<b>Wa</b>	0,131	0,0681	0,0781	0,0824	0,08025	± 0,028
<b>Wq</b>	0,145	0,0809	0,103	0,0987	0,10085	± 0,027

Haste 11	Posição de Medição				Média	Desv. Padrão
Seção 6	12 h	3 h	6 h	9 h		
<b>Ra</b>	0,167	0,143	0,155	0,14	0,149	± 0,012
<b>Rq</b>	0,237	0,187	0,207	0,19	0,1985	± 0,023
<b>Wa</b>	0,501	0,509	0,511	0,477	0,505	± 0,016
<b>Wq</b>	0,54	0,541	0,544	0,516	0,5405	± 0,013

Haste 11	Posição de Medição				Média	Desv. Padrão
Seção 7	12 h	3 h	6 h	9 h		
<b>Ra</b>	0,138	0,154	0,145	0,148	0,1465	± 0,007
<b>Rq</b>	0,186	0,205	0,194	0,2	0,197	± 0,008
<b>Wa</b>	0,538	0,467	0,529	0,502	0,5155	± 0,032
<b>Wq</b>	0,566	0,506	0,56	0,533	0,5465	± 0,028

<b>Haste 11</b>	<b>Posição de Medição</b>				<b>Média</b>	<b>Desv. Padrão</b>
<b>Seção 8</b>	<b>12 h</b>	<b>3 h</b>	<b>6 h</b>	<b>9 h</b>		
<b>Ra</b>	0,124	0,143	0,148	0,147	0,145	± 0,011
<b>Rq</b>	0,185	0,184	0,191	0,193	0,188	± 0,004
<b>Wa</b>	0,538	0,489	0,535	0,509	0,522	± 0,023
<b>Wq</b>	0,561	0,527	0,565	0,54	0,5505	± 0,018

<b>Haste 11</b>	<b>Posição de Medição</b>				<b>Média</b>	<b>Desv. Padrão</b>
<b>Seção 9</b>	<b>12 h</b>	<b>3 h</b>	<b>6 h</b>	<b>9 h</b>		
<b>Ra</b>	0,14	0,147	0,146	0,127	0,143	± 0,009
<b>Rq</b>	0,186	0,206	0,207	0,182	0,196	± 0,013
<b>Wa</b>	0,574	0,634	0,599	0,625	0,612	± 0,027
<b>Wq</b>	0,594	0,657	0,618	0,661	0,6375	± 0,032

## APÊNDICE G

### Propriedades Térmicas de Lubrificantes

**Tabela (E)** – Valores obtidos para o óleo de rícino.

Óleo de Rícino			
Temperatura de Interesse (°C)	Calor Específico (J/Kg.K)	Condutividade Térmica (W/m.K)	Difusividade Térmica (m <sup>2</sup> /s)
<b>20</b>	1732,7	0,12458325	0,225795
<b>25</b>	1750	0,124479063	0,227864
<b>30</b>	1767,3	0,124374875	0,22993
<b>35</b>	1784,7	0,124270688	0,231993
<b>40</b>	1802	0,1241665	0,234051
<b>45</b>	1819,4	0,124062313	0,236106
<b>50</b>	1836,7	0,123958125	0,238157
<b>55</b>	1854,1	0,123853938	0,240204
<b>60</b>	1871,4	0,12374975	0,242248

**Tabela (F)** – Valores obtidos para o óleo SAE 40.

Óleo SAE 40			
Temperatura de Interesse (°C)	Calor Específico (J/Kg.K)	Condutividade Térmica (W/m.K)	Difusividade Térmica (m <sup>2</sup> /s)
<b>20</b>	1798,7	0,134381933	0,271592
<b>25</b>	1816,7	0,134269551	0,274081
<b>30</b>	1834,7	0,134157169	0,276567
<b>35</b>	1852,8	0,134044787	0,279047
<b>40</b>	1870,8	0,133932404	0,281523
<b>45</b>	1888,8	0,133820022	0,283995
<b>50</b>	1906,8	0,13370764	0,286462
<b>55</b>	1924,8	0,133595258	0,288924
<b>60</b>	1942,8	0,133482876	0,291382

## APÊNDICE H

### Taxa de Desgaste

A *Tabela (G)* e *(H)*, abaixo apresentam os valores obtidos para o cálculo da taxa de desgaste, calculadas através da equação de Archard, para amostras ensaiadas com carga de 9N e 20N.

**Tabela (G)** – Valores obtidos para o cálculo da taxa de desgaste para carga de 9N.

Carga 9N								
Condição	Ensaio	RPM	t (min.)	d. d. (m)	V. M. (g)	$\rho$ . (g/cm <sup>3</sup> )	d. d. x carga (m.N)	k (m <sup>2</sup> /N)
<i>Óleo de Rícino</i>	Alumínio	1300	120	5976,048	0,0000	2,7000	53784,432	0
	Alumínio	1300	120	5976,048	0,0003	2,7000	53784,432	2,06586E-15
	Bronze	1300	120	5976,048	0,0012	9,200	53784,432	2,42514E-15
	Bronze	1300	120	5976,048	0,0003	9,200	53784,432	6,06285E-16
	Aço	1300	120	5976,048	0,0063	7,7100	53784,432	1,51925E-14
	Aço	1300	120	5976,048	0,0052	7,7100	53784,432	1,25399E-14
<i>Óleo SAE 40</i>	Alumínio	1300	120	5976,048	0,0003	2,7000	53784,432	2,06586E-15
	Alumínio	1300	120	5976,048	0,0002	2,7000	53784,432	1,37724E-15
	Bronze	1300	120	5976,048	0,000	9,200	53784,432	0
	Bronze	1300	120	5976,048	0,000	9,200	53784,432	0
	Aço	1300	120	5976,048	0,0013	7,7100	53784,432	3,13496E-15
	Aço	1300	120	5976,048	0,0058	7,7100	53784,432	1,39868E-14

Onde:

RPM = rotações por minuto;

t = tempo (minutos);

dd = distância de deslizamento (metro);

V.M. = variação de massa (gramas);

$\rho$  = massa específica (g/cm<sup>3</sup>);

dd x carga = distância de deslizamento vezes carga (m.N); e,

k = taxa de desgaste (m<sup>2</sup>/N).

**Tabela (H)** – Valores obtidos para o cálculo da taxa de desgaste para carga de 20N.

Carga 20N								
Condição	Ensaio	RPM	t (min.)	d. d. (m)	V. M. (g)	$\rho$ . (g/cm <sup>3</sup> )	d. d. * carga (m.N)	k (m <sup>2</sup> /N)
<i>Óleo de Rícino</i>	Alumínio	1300	120	5976,048	0,0003	2,7000	119520,96	9,29637E-16
	Alumínio	1300	120	5976,048	0,0007	2,7000	119520,96	2,16915E-15
	Bronze	1300	120	5976,048	0,2811	9,200	119520,96	2,5564E-13
	Bronze	1300	120	5976,048	-0,1162	9,200	119520,96	-1,05675E-13
	Aço	1300	120	5976,048	0,0027	7,7100	119520,96	2,92998E-15
	Aço	1300	120	5976,048	0,0066	7,7100	119520,96	7,16218E-15
<i>Óleo SAE 40</i>	Alumínio	1300	120	5976,048	0,0003	2,7000	119520,96	9,29637E-16
	Alumínio	1300	120	5976,048	0,0001	2,7000	119520,96	3,09879E-16
	Bronze	1300	120	5976,048	0,000	9,200	119520,96	0
	Bronze	1300	120	5976,048	0,0003	9,200	119520,96	2,72828E-16
	Aço	1300	120	5976,048	0,0020	7,7100	119520,96	2,17036E-15
	Aço	1300	120	5976,048	0,0771	7,7100	119520,96	8,36673E-16

Onde:

RPM = rotações por minuto;

t = tempo (minutos);

dd = distância de deslizamento (metro);

V.M. = variação de massa (gramas);

$\rho$  = massa específica (g/cm<sup>3</sup>);

dd x carga = distância de deslizamento vezes carga (m.N); e,

k = taxa de desgaste (m<sup>2</sup>/N).