



OS LUBRIFICANTES BIODEGRADÁVEIS E NÃO BIODEGRADÁVEIS ? O ESTADO ATUAL DE DESENVOLVIMENTO E ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS DOIS TIPOS DE LUBRIFICANTES

ANA SOFIA NEVES DA SILVA MEIRA

julho de 2021



OS LUBRIFICANTES BIODEGRADÁVEIS E NÃO BIODEGRADÁVEIS – O ESTADO ATUAL DE DESENVOLVIMENTO E ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS DOIS TIPOS DE LUBRIFICANTES

ANA SOFIA NEVES DA SILVA MEIRA

Maio de 2021

OS LUBRIFICANTES BIODEGRADÁVEIS E NÃO BIODEGRADÁVEIS – O ESTADO ATUAL DE DESENVOLVIMENTO E ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS DOIS TIPOS DE LUBRIFICANTES

Ana Sofia Neves da Silva Meira

1131273

2020/21

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



OS LUBRIFICANTES BIODEGRADÁVEIS E NÃO BIODEGRADÁVEIS - O ESTADO ATUAL DE DESENVOLVIMENTO E ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS DOIS TIPOS DE LUBRIFICANTES

Ana Sofia Neves da Silva Meira

1131273

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação de Armando José Vilaça de Campos e coorientação de David Emanuel Pimentel Gonçalves.

2020/21

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

JÚRI

Presidente

Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, ISEP

Orientador

Armando José Vilaça de Campos

Professor Adjunto, ISEP

Coorientador

David Emanuel Pimentel Gonçalves

Investigador, INEGI

Arguente

Jorge Humberto Oliveira Seabra

Professor Catedrático, FEUP

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente, ao meu orientador e coorientador da dissertação por todo o apoio, tempo, incentivo e conhecimento prestado durante a realização da dissertação:

- Doutor Armando José Vilaça de Campos (Orientador);
- Doutor David Emanuel Pimentel Gonçalves (Coorientador):

Ao CETRIB, do Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial (INEGI), ao diretor da unidade Professor Jorge Seabra e à sua equipa de colaboradores, com particular agradecimento à Engenheira Beatriz Graça.

Em segundo lugar, agradeço à minha família e amigos por todo o apoio, ajuda, preocupação e valores transmitidos:

- Laurindo Alves da Silva (Avô);
- Celestina Oliveira Neves (Avó);
- Maria José Neves da Silva (Mãe);
- José Paulo Fernandes Meira (Pai);
- João Luís Neves da Silva Meira (Irmão);
- Sérgio Paulo Neves da Silva (Tio).
- Colegas que se tornaram amigos: Rute Constante; Catarina Almeida; Tiago Oliveira; Luís Devesa; João Correia; Nuno Rosa; Daniel Ribeiro; Célia Almeida; Nuno Teixeira; Fernando Ascenção; Luciano Barbosa; Diogo Tavares e Miguel Araújo

PALAVRAS CHAVE

Lubrificantes, Lubrificantes Biodegradáveis, Toxicidade, Normalização, Comportamento Tribológico.

RESUMO

Com o aumento da consciência ambiental foram impostas legislações à indústria dos lubrificantes, entre as quais se destaca a substituição dos lubrificantes convencionais por biodegradáveis. Os lubrificantes biodegradáveis apresentam bastantes vantagens face aos convencionais, como ser amigo do ambiente, menor toxicidade (indústria alimentar), menor custo na remediação de derramamento, melhor lubrificação, elevado índice de viscosidade (IV) e maior segurança. As desvantagens associadas a este tipo de lubrificante são o custo e a dificuldade na sua reciclagem.

A presente dissertação tem como objetivos a caracterização de lubrificantes biodegradáveis e não biodegradáveis (definições, características e normalização), a comparação das suas propriedades físicas e químicas, e a comparação do seu comportamento tribológico.

A análise do comportamento tribológico será concretizada com a realização de ensaios bola/disco (medição de espessuras do filme lubrificante e obtenção das respetivas curvas de tração) e ensaios de rolamentos (medição do binário de atrito produzido por cada um dos lubrificantes). O estudo incide sobre quatro lubrificantes hidráulicos (ISO VG 46), sendo dois sintéticos biodegradáveis, um sintético não tóxico e um mineral.

KEYWORDS

Lubricants, Biodegradable Lubricants, Toxicity, Normalization, Tribological Behavior.

ABSTRACT

Nowadays, with the increase of environmental awareness, legislation was imposed on the lubricant industry, including the replacement of conventional lubricants with biodegradable ones. Biodegradable lubricants have many advantages over conventional lubricants, such as being environmentally friendly, less toxicity (food industry), less cost in spill remediation, better lubrication, increasing of the viscosity index (IV) and greater safety. The disadvantages associated with this type of lubricant are the cost and the difficulty in recycling it.

This dissertation has as main objective to characterize biodegradable and non-biodegradable lubricants (definitions, characteristics and standardization), compare their physical and chemical properties, and compare their tribological behavior.

The analysis of the tribological behavior will be carried out with ball/disc tests (measuring the thickness of the lubricant film and obtaining the respective traction curves) and bearing tests (measuring the friction torque produced by each of the lubricants). The study focuses on four hydraulic lubricants (ISO VG 46), two biodegradable synthetics, a non-toxic synthetic and a mineral.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

API	American Petroleum Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
ATR	Attenuated total reflection
CEC	Conselho Europeu de Coordenação
CEFAS	Centre for Environment Fisheries and Aquaculture Science
COF	Coefficient Of Friction
DECC	Department of Energy and Climate Change
EAL	Environmentally Acceptable Lubricants
EHD	Elastohydrodynamic
EP	Extreme Pressure
EPA	Environmentally Protection Agency
ESHF	Environmentally Sound Hydraulic Fluids
EUA	Estados Unidos da América
FTIR	Fourier-Transform Infrared Spectroscopy
HD	Hydrodynamic
HFDU	Fire Resistant Hydraulic Oil
HOCNF	Harmonised Offshore Chemical Notification Format
INEGI	Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial
ISO	International Organization for Standardization
IV	Índice de Viscosidade

KLIF	Norwegian Ministry of the Environment
MOHs	Oil Saturated Hydrocarbons
NEMS	Nanoelectromechanical Systems
NN	Neutralisation Number
NPD	Norwegian Petroleum Directorate
OCNS	Offshore Chemical Notification Scheme
OSPAR	Protection of the Marine Environment of the North-East Atlantic
SI	Sistema Internacional de Unidades
SRR	Slide to Roll Ratio
sVGP	Small Vessel General Permit
TAN	Total Acid Number
TBN	Total Base Number
VGP	Vessel General Permit
VIDA	Vessel Incidental Discharge Act

Lista de Unidades

°C	Celsius
°F	Fahrenheit
cP	Centipoise
cSt	Centistoke
kg	Quilograma
m	Metro
N	Newton
P	Poise
Pa	Pascal
s	Segundo
St	Stoke

Lista de Símbolos/ Unidades [SI]

A	Área	[m ²]
F	Força	[N]
h	Espessura do filme	[m]
u	Velocidade	[m/s]
η	Viscosidade dinâmica	[Pa.s]
λ	Espessura específica de filme	[-]
ρ	Massa volúmica	[kg/m ³]
σ	Rugosidade composta	[m]
ν	Viscosidade cinemática	[m ² /s]
τ	Tensão de corte	[Pa]

GLOSSÁRIO DE TERMOS

Antidetonantes	Aditivo adicionado ao combustível para evitar que a combustão se realize no período de compressão, num motor de combustão interna.
Desemulsificação	Separação de uma emulsão nos seus elementos líquidos.
Fuligem	Substância com origem na decomposição de materiais, cujo fumo libertado é acumulado na canalização das chaminés, paredes, tetos, entre outras estruturas.
Incineração	Processo de destruição de resíduos, sobretudo materiais não-biodegradáveis, contaminantes ou tóxicos. São queimados em fornos a temperaturas muito elevadas (acima dos 1000°C), sendo os produtos finais da incineração de materiais orgânicos não-biodegradáveis, gás carbónico, vapor de água e energia térmica.
Lubrificação	Processo ou técnica utilizada na aplicação de um lubrificante com a finalidade de reduzir o atrito e o desgaste entre duas superfícies sólidas em movimento relativo.
Toxicidade	Qualidade que caracteriza o grau de qualquer substância nociva para um organismo vivo ou para uma parte específica desse organismo.

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1- MOVIMENTO RELATIVO DE ROLAMENTO (A), DESLIZAMENTO (B) [2].....	31
FIGURA 2- DESGASTE ADESIVO NUMA MATRIZ PARA FORJAMENTO DE ENGRENAGENS CÔNICAS [3]	32
FIGURA 3- PEQUENAS PARTÍCULAS ABRASIVAS DE AREIA OU DE CAVACOS QUE EVENTUALMENTE PRESENTES NO SISTEMA DE LUBRIFICAÇÃO DESGASTAM AS PISTAS DE ROLAMENTO DE MANCAIS E ROLAMENTOS [4]	32
FIGURA 4- DESGASTE POR <i>MICROPITTING</i> EM ENGRENAGENS [6]	33
FIGURA 5- DESGASTE POR CORROSÃO NUMA CHAVE DE BOCAS [8]	33
FIGURA 6- VIDRO COLORIDO [16]	38
FIGURA 7- HIDRÓMETRO [18]	39
FIGURA 8- ESQUEMA DE UMA CAMADA DE FLUIDO A SEPARAR DUAS SUPERFÍCIES [20]	41
FIGURA 9- FERRUGEM E CORROSÃO [21].....	49
FIGURA 10- PLANTA COLZA [24]	55
FIGURA 11- PLANTA <i>RICINUS COMMUNIS</i> [25]	56
FIGURA 12- RANKING GLOBAL DOS 15 PRINCIPAIS FABRICANTES DE LUBRIFICANTES [28].....	59
FIGURA 13- LUBRIFICANTE SINTÉTICO HIDRA- ATOX 46.....	75
FIGURA 14- LUBRIFICANTE BIODEGRADÁVEL HIDROSECUR D-46	76
FIGURA 15- LUBRIFICANTE SINTÉTICO HYDROFLUX EP 46.....	78
FIGURA 16- LUBRIFICANTE BIODEGRADÁVEL PLANTOHYD 40 N.....	79
FIGURA 17- DENSÍMETRO PORTÁTIL DMA 35N DA ANTON PAAR.....	80
FIGURA 18- VISCOSÍMETRO DE VIDRO DE ONDA SENOIDAL SV-10.....	81
FIGURA 19- COPO DE AMOSTRA DE PC [54].....	82
FIGURA 20- COPO E GUIAS [54]	82
FIGURA 21- PLACAS DE SENSORES E PROTETOR [54]	82
FIGURA 22- MECANISMO DE SUPORTE [54].....	83
FIGURA 23- AJUSTE DA AMOSTRA [54]	83
FIGURA 24- CONSOLA DO EQUIPAMENTO [54]	84
FIGURA 25- JANELA “RSVISCO” [54].....	84
FIGURA 26- COPO E GUIAS [54]	85

FIGURA 27- PROCEDIMENTO DE LIMPEZA [54]	85
FIGURA 28- GRÁFICO DE FLUXO [54].....	87
FIGURA 29- AGILENT CARY 630 FTIR	88
FIGURA 30- FERROGRAFO DE LEITURA DIRETA DRIII [57]	89
FIGURA 31- DILUIÇÃO DE UMA AMOSTRA [57]	91
FIGURA 32- EHD2 PCS INSTRUMENTS	91
FIGURA 33- AMOSTRAS DOS QUATRO TIPOS DE LUBRIFICANTES.....	92
FIGURA 34- ESFERA PARCIALMENTE SUBMERSA.....	93
FIGURA 35- ENSAIO DE ROLAMENTOS	94
FIGURA 36- ESQUEMA DO ENSAIO DE ROLAMENTOS (ADAPTADO DE [22])	95
FIGURA 37- CONJUNTO DO ROLAMENTO ATRAVÉS DO EIXO DE ACIONAMENTO – ARREFECIMENTO [59]	96
FIGURA 38- ROLAMENTO COBERTO A MEIA ALTURA DAS ESFERAS	97
FIGURA 39- MONTAGEM DA TAMPA NO ROLAMENTO	97
FIGURA 40- LIMPEZA EM ULTRASSONS.....	97
FIGURA 41- VARIAÇÃO DA MASSA VOLÚMICA COM A TEMPERATURA PARA OS QUATRO LUBRIFICANTES	102
FIGURA 42- VISCOSIDADE DINÂMICA.....	103
FIGURA 43- VISCOSIDADE CINEMÁTICA	103
FIGURA 44- VISCOSIDADE CINEMÁTICA SEGUNDO A NORMA ASTM D314.....	104
FIGURA 45- VISCOSIDADE CINEMÁTICA SEGUNDO O MODELO DE VOGEL	105
FIGURA 46- IMPRESSÃO DIGITAL COM O ESPETRO FTIR PARA O HIDRA-ATOX46 E HIDROSECUR D-46..	106
FIGURA 47- IMPRESSÃO DIGITAL COM O ESPETRO FTIR PARA O HYDROFLUX EP46 E PLANTOHYD 40 ..	107
FIGURA 48- AMOSTRAS CONTAMINADAS COM 0,5% DE ÁGUA	107
FIGURA 49- AMOSTRAS CONTAMINADAS COM ÁGUA E COBRE.....	108
FIGURA 50- AMOSTRAS DEPOIS DE AQUECIDAS NO FORNO	108
FIGURA 51- IMPRESSÃO DIGITAL COM O ESPETRO FTIR PARA O HIDRA-ATOX46	109
FIGURA 52- IMPRESSÃO DIGITAL COM O ESPETRO FTIR PARA O HIDROSECUR D-46	110
FIGURA 53- IMPRESSÃO DIGITAL COM O ESPETRO FTIR PARA O HYDROFLUX EP46	111
FIGURA 54- IMPRESSÃO DIGITAL COM O ESPETRO FTIR PARA O PLANTOHYD 40N	112
FIGURA 55- ESPESSURA DO FILME PARA O LUBRIFICANTE HIDRA-ATOX 46 A 30, 60 E 80°C.....	113

FIGURA 56- ESPESSURA DO FILME PARA O LUBRIFICANTE HIDROSECUR D-46 A 30, 60 E 80°C.....	114
FIGURA 57- ESPESSURA DO FILME PARA O LUBRIFICANTE HYDROFLUX EP46 A 30, 60 E 80°C.....	114
FIGURA 58- ESPESSURA DO FILME PARA O LUBRIFICANTE PLANTOHYD 40N A 30, 60 E 80°C.....	115
FIGURA 59- ESPESSURA DO FILME PARA OS QUATRO LUBRIFICANTES A 30°C	115
FIGURA 60- ESPESSURA DO FILME PARA OS QUATRO LUBRIFICANTES A 60°C	116
FIGURA 61- ESPESSURA DO FILME PARA OS QUATRO LUBRIFICANTES A 80°C	116
FIGURA 62- CURVAS DE TRAÇÃO PARA O LUBRIFICANTE HIDRA-ATOX 46 A 30, 60 E 80°C A 0,04 M/S..	120
FIGURA 63- CURVAS DE TRAÇÃO PARA O LUBRIFICANTE HIDROSECUR D-46 A 30, 60 E 80°C A 0,04 M/S	120
FIGURA 64- CURVAS DE TRAÇÃO PARA O LUBRIFICANTE HYDROFLUX EP46 A 30, 60 E 80°C A 0,04 M/S	121
FIGURA 65- CURVAS DE TRAÇÃO PARA O LUBRIFICANTE PLANTOHYD A 30, 60 E 80°C A 0,04 M/S	121
FIGURA 66- CURVAS DE TRAÇÃO PARA OS QUATRO LUBRIFICANTES A 30°C E 0,04 M/S.....	122
FIGURA 67- CURVAS DE TRAÇÃO PARA OS QUATRO LUBRIFICANTES A 60°C E 0,04 M/S.....	122
FIGURA 68- CURVAS DE TRAÇÃO PARA OS QUATRO LUBRIFICANTES A 80°C E 0,04 M/S.....	123
FIGURA 69- CURVAS DE TRAÇÃO PARA O LUBRIFICANTE HIDRA-ATOX 46 A 30, 60 E 80°C A 0,5 M/S....	124
FIGURA 70- CURVAS DE TRAÇÃO PARA O LUBRIFICANTE HIDROSECUR D-46 A 30, 60 E 80°C A 0,5 M/S	124
FIGURA 71- CURVAS DE TRAÇÃO PARA O LUBRIFICANTE HYDROFLUX EP46 A 30, 60 E 80°C A 0,5 M/S.	125
FIGURA 72- CURVAS DE TRAÇÃO PARA O LUBRIFICANTE PLANTOHYD A 30, 60 E 80°C A 0,5 M/S	125
FIGURA 73- CURVAS DE TRAÇÃO PARA OS QUATRO LUBRIFICANTES A 30°C A 0,5 M/S	126
FIGURA 74- CURVAS DE TRAÇÃO PARA OS QUATRO LUBRIFICANTES A 60°C A 0,5 M/S	126
FIGURA 75- CURVAS DE TRAÇÃO PARA OS QUATRO LUBRIFICANTES A 80°C A 0,5 M/S	127
FIGURA 76- CURVAS DE TRAÇÃO PARA O LUBRIFICANTE HIDRA-ATOX 46 A 30, 60 E 80°C A 2 M/S.....	128
FIGURA 77- CURVAS DE TRAÇÃO PARA O LUBRIFICANTE HIDROSECUR D-46 A 30, 60 E 80°C A 2 M/S...128	
FIGURA 78- CURVAS DE TRAÇÃO PARA O LUBRIFICANTE HYDROFLUX EP46 A 30, 60 E 80°C A 2 M/S....	129
FIGURA 79- CURVAS DE TRAÇÃO PARA O LUBRIFICANTE PLANTOHYD A 30, 60 E 80°C A 2 M/S	129
FIGURA 80- CURVAS DE TRAÇÃO PARA OS QUATRO LUBRIFICANTES A 30°C A 2M/S	130
FIGURA 81- CURVAS DE TRAÇÃO PARA OS QUATRO LUBRIFICANTES A 60°C 2M/S	130
FIGURA 82- CURVAS DE TRAÇÃO PARA OS QUATRO LUBRIFICANTES A 80°C 2M/S	131
FIGURA 83- CURVAS DE STRIBECK PARA O LUBRIFICANTE HIDRA-ATOX 46 A 30, 60 E 80°C	132
FIGURA 84- CURVAS DE STRIBECK PARA O LUBRIFICANTE HIDROSECUR D-46 A 30, 60 E 80°C	132

FIGURA 85- CURVAS DE STRIBECK PARA O LUBRIFICANTE HYDROFLUX EP46 A 30, 60 E 80°C	133
FIGURA 86- CURVAS DE STRIBECK PARA O LUBRIFICANTE PLANTOHYD A 30, 60 E 80°C.....	133
FIGURA 87- CURVAS DE STRIBECK PARA OS QUATRO LUBRIFICANTES A 30°C	134
FIGURA 88- CURVAS DE STRIBECK PARA OS QUATRO LUBRIFICANTES A 60°C	134
FIGURA 89- CURVAS DE STRIBECK PARA OS QUATRO LUBRIFICANTES A 80°C	135
FIGURA 90- MEDIÇÕES DE BINÁRIO A 50°C E 250 RPM PARA OS QUATRO LUBRIFICANTES.....	136
FIGURA 91- MEDIÇÕES DE BINÁRIO A 80°C E 1000 RPM PARA OS QUATRO LUBRIFICANTES.....	137
FIGURA 92- TBEAR, TSUP, TIN E TOUT A 50°C E 250 RPM.....	138
FIGURA 93- TBEAR, TSUP, TIN E TOUT A 80°C E 1000 RPM.....	138

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1- PROPRIEDADES DOS DIFERENTES ESTADOS DOS LUBRIFICANTES (ADAPTADO DE [23])	54
TABELA 2- DESIGNAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO AMERICA PETROLEUM INSTITUTE (ADAPTADO DE [26])	57
TABELA 3- APLICAÇÕES DOS LUBRIFICANTES (ADAPTADO DE [28])	60
TABELA 4- CRITÉRIOS DE SELEÇÃO DE UM LUBRIFICANTE (ADAPTADO DE [27] [29])	60
TABELA 5- VANTAGENS E DESVANTAGENS DO USO DE LUBRIFICANTES BIODEGRADÁVEIS (ADAPTADO DE [42])	65
TABELA 6- CARACTERÍSTICAS DOS LUBRIFICANTES FUCHS (ADAPTADO DE [45])	67
TABELA 7- PROGRAMAS EAL (ADAPTADO DE [43])	69
TABELA 8- ESTADO DA ARTE DOS LUBRIFICANTES	71
TABELA 9- ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO LUBRIFICANTE HIDRA-ATOX 46	76
TABELA 10- ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO LUBRIFICANTE HIDROSECUR D-46	77
TABELA 11- ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO LUBRIFICANTE HYDROFLUX EP 46	78
TABELA 12- ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO LUBRIFICANTE PLANTOHYD 40 N	79
TABELA 13- COEFICIENTE DE EXPANSÃO TÉRMICA PARA OS QUATRO TIPOS DE LUBRIFICANTES	101
TABELA 14- NORMA ASTM D314 PARA OS QUATRO LUBRIFICANTES	104
TABELA 15- MODELO DE VOGEL PARA OS QUATRO LUBRIFICANTES	105
TABELA 16- PARÂMETROS PARA O ENSAIO DE MEDIÇÃO DA ESPESSURA DO FILME LUBRIFICANTE	113
TABELA 17- CÁLCULO DO COEFICIENTE DE PIEZOVISCOSIDADE	117
TABELA 18- CÁLCULO TEÓRICO DA ESPESSURA DO FILME LUBRIFICANTE PARA $V_0=2M/S$	118
TABELA 19- PARÂMETROS PARA O ENSAIO DAS CURVAS DE TRAÇÃO	118
TABELA 20- REGIMES DE LUBRIFICAÇÃO PARA OS LUBRIFICANTES A 0,04M/S	119
TABELA 21- REGIMES DE LUBRIFICAÇÃO PARA OS LUBRIFICANTES A 0,5M/S	123
TABELA 22- REGIMES DE LUBRIFICAÇÃO PARA OS LUBRIFICANTES A 2M/S	127
TABELA 23- PARÂMETROS SELECIONADOS PARA A OBTENÇÃO DAS CURVAS DE STRIBECK	131
TABELA 24- CONDIÇÕES DO ENSAIO DE ROLAMENTOS	135
TABELA 25- ENSAIO DE ROLAMENTOS A N=250 RPM E T=50°C	136
TABELA 26- ENSAIO DE ROLAMENTOS A N=1000 RPM E T=80°C	137

TABELA 27- RESULTADOS DA FERROMETRIA PARA OS QUATRO LUBRIFICANTES139

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	31
1.1	Contextualização.....	31
1.2	Objetivos.....	34
1.3	Estrutura da dissertação	34
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	37
2.1	História da lubrificação	37
2.2	Características dos lubrificantes	38
2.2.1	Físicas	38
2.2.1.1	Cor.....	38
2.2.1.2	Massa volúmica e densidade	38
2.2.1.3	Ponto de inflamação	39
2.2.1.4	Ponto de fluidez.....	40
2.2.1.5	Viscosidade.....	40
2.2.1.5.1	Viscosidade dinâmica	41
2.2.1.5.2	Viscosidade cinemática	42
2.2.1.6	Índice de viscosidade	43
2.2.2	Químicas	44
2.2.2.1	Teor em carbono	44
2.2.2.2	Número de neutralização (NN)	44
2.2.2.3	Número total de acidez (TAN).....	45
2.2.2.4	Número total de basicidade (TBN)	46
2.2.2.5	Cinzas sulfatadas.....	46

2.2.3	Aditivos	47
2.2.3.1	Retardar o ponto de fluidez	47
2.2.3.2	Melhorar o índice de viscosidade	47
2.2.3.3	Anti-espuma	48
2.2.3.4	Inibir a oxidação.....	48
2.2.3.5	Inibir a ferrugem e corrosão	49
2.2.3.6	Detergentes e dispersantes	50
2.2.3.7	Anti-desgaste.....	51
2.2.3.8	Pressão extrema	52
2.3	Classificação quanto ao estado físico.....	52
2.4	Classificação quanto à origem	55
2.4.1	Orgânica	55
2.4.1.1	Animal/Vegetal.....	55
2.4.2	Mineral	56
2.4.3	Sintética	57
2.5	Indústria dos lubrificantes	58
2.6	Classificação quanto à sua aplicação	59
2.7	Critérios de seleção de um lubrificante	60
2.8	Lubrificantes e o meio ambiente	62
2.8.1	Lubrificantes biodegradáveis.....	62
2.8.1.1	Classificação	64
2.8.1.2	Vantagens e desvantagens.....	64
2.8.1.3	Normas Europeias/internacionais	66
2.8.1.4	Lubrificantes biodegradáveis no futuro.....	70
2.8.2	Reutilização de lubrificantes	70
2.9	Estado da arte.....	71
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	75
3.1	Lubrificantes a testar	75

3.1.1	Hidra- atox 46	75
3.1.2	Hidrosecur D-46	76
3.1.3	Hydroflux EP 46.....	77
3.1.4	Plantohyd 40 N	78
3.2	Propriedades físicas dos quatro lubrificantes	80
3.2.1	Densidade.....	80
3.2.2	Viscosidade	81
3.2.2.1	Preparação das amostras.....	82
3.2.2.2	Pós- procedimento de medição	84
3.2.2.3	Pós-processamento dos resultados.....	86
3.2.2.4	Calibração do dispositivo	86
3.2.3	FTIR.....	87
3.2.4	Ferrometria.....	88
3.2.4.1	Procedimento para uma amostra normal	89
3.2.4.2	Procedimento para uma diluição	90
3.3	Ensaio tribológicos	91
3.3.1	Ensaio bola/disco	91
3.3.1.1	Medição de espessuras do filme lubrificante	92
3.3.1.2	Obtenção das curvas de tração e de Stribeck	93
3.3.2	Ensaio de rolamentos.....	94
3.3.2.1	Medição do binário de atrito	96
4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO	101
4.1	Massa volúmica	101
4.2	Viscosidade	102
4.3	FTIR.....	105
4.4	Ensaio bola/disco.....	112
4.4.1	Obtenção da espessura do filme lubrificante	112
4.4.2	Obtenção das curvas de tração e de Stribeck	118

4.5	Ensaio de rolamentos	135
4.5.1	Obtenção do binário de atrito	135
4.6	Ferrometria	139
5	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	141
5.1	CONCLUSÕES	141
5.2	PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS	142
6	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO	145
7	ANEXOS	151
7.1	Hidra-atox 46	151
7.2	Hidrosecur D-46	152
7.3	Hydroflux EP46	153
7.4	Plantohyd 40N	154
7.5	SKF 51107	155
7.6	FTIR Hidra-atox 46 e Hidrosecur D-46	156
7.7	FTIR Hydroflux EP46 e Plantohyd 40N	157
7.8	FTIR Hidra-atox 46	158
7.9	FTIR Hidrosecur D-46	159
7.10	FTIR Hydroflux EP46	160
7.11	FTIR Plantohyd 40N	161

INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

1.2 OBJETIVOS

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

O termo tribologia provém do grego e foi pronunciado, pela primeira vez, por Hans Peter Jost, durante uma comissão do departamento inglês de educação e ciência, em 1966. Nesta época, o termo foi definido como a ciência, cujo objetivo era analisar o contacto entre duas ou mais superfícies, assim como, o atrito criado entre estas. Seguidamente, Jost estudou os impactos económicos, de maneira a provar a importância do contributo da Tribologia para a sociedade. Desta forma, Jost realizou um relatório em que estimou a percentagem dos benefícios associados à aplicação da lubrificação: diminuição das reparações e substituições de peças (45%), prejuízos derivados de avarias (22%), investimentos por meio da longevidade dos órgãos de máquinas (19%), perdas de energia devido ao atrito (9%) e outras economias (5%).

O estudo da tribologia eclodiu a partir da necessidade de minimizar o desgaste entre duas ou mais superfícies, recorrendo assim, ao uso de lubrificantes. Um lubrificante define-se como uma película (ou filme) de substância sólida, líquida ou gasosa, para aplicar em superfícies, cujo contacto sofra movimento relativo. A água, cera e sabão, são exemplos de lubrificantes com que lidamos no nosso quotidiano [1].

O movimento de um corpo, relativo a um referencial designa-se movimento relativo e divide-se entre: rolamento (a), deslizamento/escorregamento (b) e impacto/choque, como se pode observar na Figura 1.

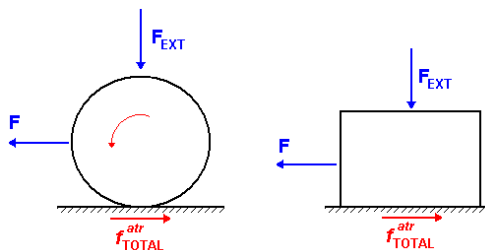


Figura 1- Movimento relativo de rolamento (a), deslizamento (b) [2]

O desgaste ocorre quando há perda progressiva de matéria de um corpo, como consequência do movimento relativo entre duas ou mais superfícies. Existem várias classes de desgaste, como o adesivo, abrasivo, *pitting*, erosão e corrosão.

Com dimensões de contacto reduzidas, é comum que a morfologia das superfícies influencie o início de pressões, deformações e rugosidades superficiais, a nível microgeométrico. Portanto, ergue-se o desgaste adesivo (Figura 2) quando há microsoldadura a frio, difusão atômica, transferência eletrónica ou adsorção química entre as superfícies.



Figura 2- Desgaste adesivo numa matriz para forjamento de engrenagens cónicas [3]

Seguidamente sucede a deformação plástica, transferência ou até mesmo, fratura do material. Esta é a fase inicial da maioria dos sistemas de desgaste de escorregamento a seco, progredindo posteriormente, para o modo misto.

Para minimizar o desgaste adesivo deve-se aperfeiçoar o conhecimento das propriedades mecânicas do material, selecionando adequadamente o material ou alterando as superfícies quimicamente.

O desgaste abrasivo (Figura 3) caracteriza-se como o deslocamento do material, provocado por partículas de alta dureza, existentes entre duas superfícies em movimento, gerando cortes no material mais macio [3].



Figura 3- Pequenas partículas abrasivas de areia ou de cavacos que eventualmente presentes no sistema de lubrificação desgastam as pistas de rolamento de mancais e rolamentos [4]

O desgaste abrasivo deriva de processos como o microsulcamento, microcorte, microfadiga e microfissuras. De maneira a minorar o efeito do desgaste abrasivo, deve-se aumentar a dureza (o que nem sempre resulta, pois com o aumento de dureza há um aumento consequente da fragilidade do material), remover partículas indesejadas, substituir as peças desgastadas e recuperar partes deterioradas por maquinagem ou por deposição de camadas, através de processos a arco ou de aspersão [5].

O desgaste por *pitting* ou fadiga por tensão de contacto, decorre a partir da fadiga de contacto superficial, devido à variação de tensões no interior do contacto, ao fim de vários ciclos. O desgaste por *pitting* divide-se em *micropitting* (Figura 4) e *pitting*.

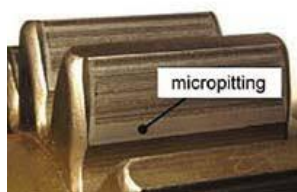


Figura 4- Desgaste por *micropitting* em engrenagens [6]

O desgaste por erosão é incitado pela colisão de líquidos e/ou sólidos, promovendo a remoção de material da superfície. Um exemplo onde este tipo de desgaste acontece é nas pás de hélices.

O desgaste por corrosão (Figura 5) advém da reação química ou eletroquímica do material com o meio ambiente [7].



Figura 5- Desgaste por corrosão numa chave de bocas [8]

O processo de lubrificação é importante, pois influencia o controlo do atrito, desgaste, temperatura e corrosão dos órgãos de máquinas, aumentando a sua longevidade. Através de uma seleção adequada da viscosidade e uso de aditivos, minimiza-se a força de atrito e, conseqüentemente, o desgaste. Os lubrificantes também podem ser usados para arrefecer o material, diminuindo assim, a sua temperatura. Por via da aplicação de lubrificantes, forma-se uma camada protetora que adere ao metal, através de aditivos, preservando-o da corrosão [9].

A espessura específica do filme lubrificante λ relaciona a espessura do filme h e a rugosidade composta σ . Os regimes de lubrificação classificam-se como lubrificação por filme completo, misto e limite. A lubrificação por filme completo ($\lambda > 3$), contacto suportado pelo filme lubrificante, inclui a lubrificação hidrodinâmica ($\lambda > 10$), sem deformação das superfícies e a elastohidrodinâmica ($3 < \lambda < 5$), com deformação elástica das superfícies. A lubrificação em regime misto ($1 < \lambda < 3$), contacto suportado pelo filme lubrificante e pelas superfícies deformadas (em contacto), caracteriza-se pela transição de lubrificação *Elastohydrodynamic* (EHD) para lubrificação limite. A lubrificação limite ($\lambda < 1$), contacto suportado apenas pelas superfícies, descreve a ausência de efeito *Hydrodynamic* (HD) [10].

No estado atual no desenvolvimento de máquinas, como por exemplo, veículos de transporte, a eficiência do seu funcionamento é determinada principalmente pela aplicação qualificada de lubrificantes [11]. Em termos ambientais, o lubrificante é considerado um resíduo perigoso, com riscos inerentes de derramamento durante o seu manuseamento [12].

O conceito de "*Lubrificantes ambientalmente aceitáveis*" valida que os mesmos sejam biodegradáveis, com baixo nível de toxicidade e não bio acumulativos. Para um lubrificante ser considerado ambientalmente aceitável deve estar rotulado segundo as seguintes associações: Blue Angel, European Ecolabel, Nordic Swan, os padrões suecos SS 155434 e 155470 e Protection of the Marine Environment of the North-East Atlantic (OSPAR) [13].

Atualmente, os cientistas têm vindo a descobrir formas mais económicas e seguras de melhorar as propriedades dos lubrificantes biodegradáveis, como a sua estabilidade oxidativa e diminuição do ponto de fluidez [14].

1.2 Objetivos

A presente dissertação tem como objetivos a caracterização de lubrificantes biodegradáveis e não biodegradáveis (definições, características e normalização), a comparação das suas propriedades físicas e químicas (densidade, viscosidade, FTIR), e a comparação do seu comportamento tribológico.

A análise do comportamento tribológico será concretizada com a realização de ensaios bola/disco (medição de espessuras do filme lubrificante e obtenção das respetivas curvas de tração) e ensaios de rolamentos (medição do binário de atrito produzido por cada um dos lubrificantes).

O estudo incide sobre quatro lubrificantes hidráulicos de grau ISO VG 46: dois sintéticos biodegradáveis, um sintético não tóxico e um mineral.

1.3 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está dividida em sete capítulos, sendo o primeiro introdutório ao tema selecionado. O segundo capítulo apresenta toda a pesquisa feita para a revisão bibliográfica, de forma a aprofundar o conhecimento deste tema. O terceiro capítulo consiste na caracterização física e química dos quatro lubrificantes hidráulicos e realização dos ensaios tribológicos (ensaio bola/disco e ensaio de rolamentos). No quarto capítulo será feita a análise e comparação dos lubrificantes a partir dos resultados obtidos (densidade, viscosidade, FTIR, ensaio bola/disco, ensaio de rolamentos e ferrometria). Os últimos três capítulos são inerentes à conclusão, bibliografia e anexos da dissertação.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 HISTÓRIA DA LUBRIFICAÇÃO

2.2 CARACTERÍSTICAS DOS LUBRIFICANTES

2.3 CLASSIFICAÇÃO QUANTO AO ESTADO FÍSICO

2.4 CLASSIFICAÇÃO QUANTO À ORIGEM

2.5 INDÚSTRIA DOS LUBRIFICANTES

2.6 CLASSIFICAÇÃO QUANTO À SUA APLICAÇÃO

2.7 CRITÉRIOS DE SELEÇÃO DE UM LUBRIFICANTE

2.8 LUBRIFICANTES E O MEIO AMBIENTE

2.9 ESTADO DA ARTE

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 História da lubrificação

A lubrificação teve início na pré-história. O Homem primitivo intuitivamente compreendeu que era mais fácil transportar madeira, com seiva entranhada, pois a seiva adquire o papel de lubrificante, ajudando o movimento. Para além da seiva, a lama e ervas esmagadas, foram outros lubrificantes aplicados, para o transporte de madeira e pedras nos trenós.

Com a invenção da roda e do eixo, surgiram os primeiros veículos, fabricados com eixos e rolamentos em madeira. Deste modo, as pessoas descobriram que espalhar gordura animal, nas partes secas e rangentes, permitia que a roda girasse de forma silenciosa e suave. Todavia, como o conceito de desgaste era desconhecido, ninguém sabia o porquê do uso da lubrificação.

Mais tarde, com a permuta da madeira pelo ferro e latão, a gordura animal revelou-se um lubrificante inadequado, conseqüentemente as gorduras passaram de origem animal, a vegetal ou mistura de ambas.

Em 1859, Edwin Drake perfurou o primeiro poço de petróleo, na Pensilvânia, erguendo a indústria do petróleo, assim como, os lubrificantes processados à base deste.

O desenvolvimento de aditivos químicos, para aperfeiçoar as propriedades e prolongar a vida útil dos lubrificantes, começou por volta de 1920. As olefinas polimerizadas foram os primeiros lubrificantes sintéticos a serem produzidos, em 1929, durante uma tentativa de melhorar as propriedades dos lubrificantes à base de petróleo.

O interesse em lubrificantes intensificou-se em 1937 na Alemanha, durante a segunda guerra mundial, para atender às necessidades de lubrificação dos motores de aeronaves a jato, desenvolvidos para os militares.

O desenvolvimento de máquinas, com velocidades maiores e mais especificações para a produção em massa, levaram à especialização de lubrificantes. Um lubrificante de uso geral, que funcionava bem numa máquina simples, poderia não atender a novos requisitos, a nível de altas temperaturas e velocidades. Portanto, as falhas operacionais começaram a ser justificadas pela existência de atrito e desgaste.

Os avanços na ciência da lubrificação, devem-se à descoberta de lubrificantes novos, de aditivos especiais e sistemas de produtos especializados (indústria automóvel, naval e aeronáutica) [15].

2.2 Características dos lubrificantes

2.2.1 Físicas

2.2.1.1 Cor

A cor dos lubrificantes, observada a partir da luz por eles refletida, pode variar entre tonalidades claras ou transparentes, a escuras.

Os métodos utilizados para a definição da cor, passam pela comparação visual da cor do lubrificante, com a sua cor real, observada a partir da luz, ao atravessar um vidro colorido (Figura 6). É atribuído então, um determinado número à cor, correspondente ao número do vidro colorido.



Figura 6- Vidro colorido [16]

Uma justificação plausível, para as variações de cor dos lubrificantes, provém das diferentes viscosidades, refinamento e aditivos, presentes nos lubrificantes.

A cor do lubrificante guia o operador, responsável pelo refinamento percebendo, assim, se este está a proceder corretamente ou não, durante a operação.

Na maior parte das aplicações, a cor é insignificativa, mas em lubrificantes para fins medicinais e industriais, manchas e descoloração podem ser indesejáveis.

Alguns fabricantes adicionam corantes para fácil identificação dos seus produtos [17].

2.2.1.2 Massa volúmica e densidade

A massa volúmica de um material define-se como a relação entre a massa e o volume que ocupa, a uma determinada temperatura e pressão padrão. A densidade é a razão entre a massa volúmica de um material, à temperatura padrão e a massa volúmica da água, à mesma temperatura.

A gravidade delimita a força física que o planeta Terra exerce sobre todos os corpos. A densidade e a gravidade podem ser estipuladas através de um hidrómetro (Figura 7). O hidrómetro ao ser calibrado, tanto pode ler a densidade, como a gravidade específica ou até mesmo, a gravidade American Petroleum Institute (API).



Figura 7- Hidrómetro [18]

A gravidade API é uma função da gravidade específica (*sp gr*) e estas relacionam-se, através da Equação 1 [17]:

$$API\ gravity = \frac{141,5}{sp\ gr\ 60/60^{\circ}F} - 131,5 \quad \text{Equação 1}$$

Como se pode constatar, o valor da gravidade API, aumenta à medida que a gravidade específica diminui. A densidade e a gravidade mudam com a temperatura, logo, as determinações dos seus valores são feitas a uma temperatura controlada e, depois corrigida para uma temperatura padrão, recorrendo ao uso de tabelas específicas.

Nos testes feitos a lubrificantes para motores, uma diminuição na gravidade específica (aumento na densidade API), pode indicar diluição de combustível, enquanto um aumento na densidade específica pode indicar a presença de contaminantes, como fuligem no combustível ou materiais oxidados [17].

2.2.1.3 Ponto de inflamação

O ponto de inflamação de um lubrificante é a temperatura à qual este liberta vapor suficiente (à superfície) para inflamar com a aproximação de uma chama. Com o aquecimento de um lubrificante, num recipiente aberto, os vapores inflamáveis libertados aumentam, consoante o aumento de temperatura. Assim, quando a concentração de vapores na superfície aumenta o suficiente, a exposição a uma chama, resultará num breve *flash*. Um teste deste tipo, realizado sob certas condições específicas, denomina-se “*Cleveland open cup flash tester*”. Todavia, se a libertação de vapores a uma determinada temperatura, não for suficientemente rápida para sustentar combustão, a chama apaga-se de imediato. Mas, se forem libertados vapores suficientes para suportar a combustão, essa temperatura é chamada de ponto de inflamação.

O ponto de inflamação dos lubrificantes varia com a viscosidade, logo, quanto maior for a viscosidade, maior será o ponto de inflamação. O ponto de inflamação também é

afetado pela composição e processo de obtenção do lubrificante. Além disso, para certas aplicações de altas temperaturas, com lubrificantes de baixo ponto de inflamação, ou seja, maior volatilidade, pode resultar em maiores taxas de consumo do lubrificante [17].

2.2.1.4 *Ponto de fluidez*

O ponto de fluidez de um lubrificante corresponde à temperatura mais baixa a que este flui quando é arrefecido, sem perturbações externas.

A maioria dos lubrificantes minerais contém alguma cera dissolvida e, à medida que são arrefecidos, essa cera começa a separar-se em cristais que se unem, de modo a formar uma estrutura rígida. Quando esta estrutura de cera fica completa, o lubrificante não está mais sob as condições de teste. Pode surgir uma quebra da estrutura rígida de cera, devido à agitação mecânica, e assim, é possível que o lubrificante fique a uma temperatura consideravelmente abaixo do seu ponto de fluidez. Embora, o ponto de fluidez na maioria dos lubrificantes esteja relacionado com a cristalização da cera, certos lubrificantes (sem cera na sua composição) têm pontos de fluidez com viscosidade limitada. Nestes lubrificantes, a viscosidade torna-se mais alta conforme a redução da temperatura.

Um exemplo da importância do ponto de fluidez é no Inverno, quando o ponto de fluidez do lubrificante deve ser baixo o suficiente, permitindo que o lubrificante seja distribuído e flua para a sucção da bomba no motor, nas temperaturas ambientes mais baixas previstas [17].

2.2.1.5 *Viscosidade*

Uma propriedade muito importante na escolha de um lubrificante é a sua viscosidade, sendo que esta varia com a temperatura, tensão de corte e pressão. É de notar que a espessura específica do filme lubrificante é proporcional à viscosidade.

Numa primeira análise, os lubrificantes mais viscosos teriam melhor desempenho, uma vez que os filmes gerados seriam mais espessos e seria obtida uma melhor separação das superfícies em contacto. Contudo, nem sempre é o caso, uma vez que os lubrificantes mais viscosos requerem maiores forças de corte e, conseqüentemente, haverá maiores perdas de energia. As perdas de energia resultam em mais calor gerado, resultando num aumento substancial da temperatura das superfícies de contacto, o que pode levar à falha do componente em questão.

No ramo da engenharia, a viscosidade do lubrificante é escolhida de forma a fornecer o desempenho ideal, à temperatura necessária. É preciso, portanto, saber a temperatura na qual o lubrificante deve operar, pois a viscosidade é extremamente dependente da temperatura. A viscosidade também pode ser afetada pelas velocidades das superfícies de operação (taxas de corte). O conhecimento das

características da viscosidade de um lubrificante é muito importante no projeto e na previsão do comportamento de um sistema mecânico, que precise de recorrer à lubrificação [19].

2.2.1.5.1 Viscosidade dinâmica

Considerando duas superfícies planas separadas por uma camada de fluido, de espessura “h”. A força necessária para mover a superfície superior é proporcional à área molhada “A” e à velocidade “u”, tal como se pode observar na seguinte expressão e Figura 8:

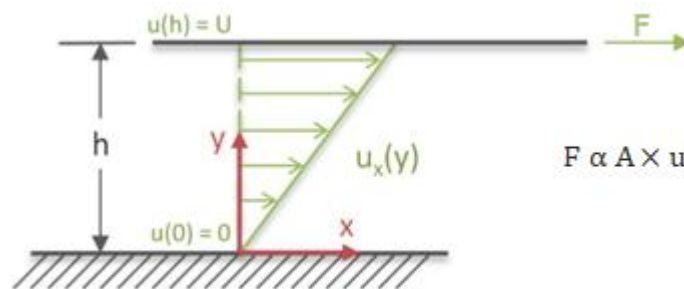


Figura 8- Esquema de uma camada de fluido a separar duas superfícies [20]

Supondo duas espessuras do filme lubrificante diferentes, compostas por camadas equidistantes: se a velocidade da superfície permanecer inalterada nestes dois casos, significa que a camada do filme mais espesso sofrerá menos deslizamento relativo do que a do filme mais fino.

A força necessária para mover a superfície superior é, portanto, proporcional à Equação 2:

$$F \propto A \times \frac{u}{h} \quad \text{Equação 2}$$

Esta relação é mantida para a maior parte dos fluidos. Fluidos diferentes apresentarão viscosidades dinâmicas (η) diferentes. A Equação 3 mostra a relação da viscosidade dinâmica com as expressões referidas em cima [19]:

$$F = \eta \times A \times \frac{u}{h} \quad \text{Equação 3}$$

Em ordem à viscosidade dinâmica obtemos a Equação 4 ou Equação 5 [19]:

$$\eta = \frac{F}{\frac{A}{h} \times u} \quad \text{Equação 4}$$

$$\eta = \frac{\tau}{\frac{u}{h}}$$

Equação 5

Sendo que:

η - viscosidade dinâmica [Pa.s];

τ - tensão de corte que atua no fluido [Pa];

$\frac{u}{h}$ - taxa de corte, ou seja, gradiente de velocidade normal à tensão de corte [s^{-1}].

Antes da introdução do sistema SI, a unidade de viscosidade dinâmica mais usada era o Poise. Este nome não pertencia a um engenheiro, mas a um médico francês Poiseuille, que estudou o fluxo do sangue. Para aplicações práticas, o Poise [P] era muito grande, portanto, uma unidade menor, o centipoise [cP], era mais frequente. A unidade SI para viscosidade dinâmica é o Pascal-segundo [Pa.s].

A relação entre Poise e Pascal-segundo é a seguinte [19]:

$$1 [P] = 100 [cP] \approx 0,1 [Pa.s]$$

2.2.1.5.2 Viscosidade cinemática

A viscosidade cinemática é definida na Equação 6 como a razão entre a viscosidade dinâmica e a massa volúmica do fluido [19]:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}$$

Equação 6

Onde:

ν - viscosidade cinemática [m^2/s];

η - viscosidade dinâmica [Pa.s];

ρ - massa volúmica do fluido [kg/m^3].

A unidade de viscosidade cinemática mais corrente é o stoke [St]. Esta unidade, no entanto, é geralmente grande para aplicações práticas, portanto, recorre-se a uma unidade menor, o centistoke [cSt].

A unidade SI para viscosidade cinemática é o [m^2/s], ou seja:

$$1 [\text{St}] = 100 [\text{cSt}] = 0,0001 [\text{m}^2/\text{s}]$$

A massa volúmica de um lubrificante está geralmente na faixa dos 700 - 1200 [kg/m³] (0,7-1,2 [g/cm³]). A massa volúmica típica de um lubrificante mineral é 850 [kg/m³] (0,850 [g/cm³]).

Para determinar a viscosidade dinâmica de qualquer lubrificante em cP, a viscosidade deste em cSt é multiplicada pela sua massa volúmica [g/cm³], como demonstrado a seguir, para um lubrificante mineral [19]:

$$\text{Viscosidade em [cP]} = \text{viscosidade em [cSt]} \times 0,850 [\text{g/cm}^3]$$

2.2.1.6 Índice de viscosidade

Os diferentes lubrificantes apresentam diferentes índices de viscosidade (IV).

Em 1920, já se sabia que os lubrificantes da Pensilvânia apresentavam melhores características do que os da Costa do Golfo. O petróleo bruto da Pensilvânia tinha as melhores características de viscosidade e temperatura, enquanto o da Costa do Golfo as piores, pois a sua viscosidade variava muito mais com a temperatura.

Em 1929 surge o conceito de “índice de viscosidade”, desenvolvido por Dean e Davis. O índice de viscosidade é um parâmetro inteiramente empírico que compara a viscosidade cinemática do lubrificante de interesse com as viscosidades de dois lubrificantes de referência, que apresentam uma diferença considerável na sensibilidade da viscosidade à temperatura.

Os lubrificantes de referência foram selecionados para que um deles tenha índice de viscosidade igual a zero (IV = 0) e o outro tenha índice de viscosidade igual a cem (IV = 100, a 100 °F (37,8 °C), mas ambos têm a mesma viscosidade que o lubrificante de interesse a 210 °F (98,89 °C).

Como os lubrificantes da Pensilvânia e da Costa do Golfo têm a mesma viscosidade a 210 °F (98,9 °C), foram inicialmente selecionados como lubrificantes de referência.

Os lubrificantes feitos a partir do petróleo bruto da Pensilvânia foram atribuídos com um índice de viscosidade de 100, enquanto os da Costa do Golfo com um índice de viscosidade 0.

O índice de viscosidade pode ser calculado a partir da Equação 7 [19]:

$$IV = \frac{(L - U)}{(L - H)} \times 100 \quad \text{Equação 7}$$

Primeiramente, a viscosidade cinemática (ν) do lubrificante de interesse é medida a 40 e a 100°C. Recorrendo a uma tabela específica da norma ASTM D2270 e olhando para a viscosidade a 100°C do lubrificante de interesse, obtém-se os valores correspondentes ao “U” e “H” dos lubrificantes de referência.

Seguidamente, e substituindo os valores obtidos na equação acima alcança-se o índice de viscosidade.

O índice de viscosidade é uma medida inversa da variação da viscosidade do lubrificante com a temperatura. Índices de viscosidade altos indicam que o lubrificante apresenta uma menor variação da viscosidade com a temperatura.

O índice de viscosidade da maioria dos lubrificantes minerais disponíveis no mercado é de cerca de cem, enquanto os lubrificantes sintéticos têm índices de viscosidade mais altos que rondam os cento e cinquenta [19].

2.2.2 Químicas

2.2.2.1 Teor em carbono

Após a realização dos processos de evaporação e pirólise de um lubrificante, ficam resíduos de carbono no depósito. Esta característica química denomina-se teor em carbono e exprime-se em percentagem.

Qualquer tipo de lubrificante composto por petróleo bruto, exhibe menos teor em carbono do que qualquer outro, com mesmo valor de viscosidade, mas com resíduos na sua composição.

Quanto mais agressivo for o tratamento de refinação de um lubrificante, menor será a sua percentagem ou teor em carbono.

Os lubrificantes são constituídos por aditivos aumentando, assim, a percentagem em carbono, o que contribui para um bom desempenho do lubrificante. Primeiramente, o teste para determinar a existência de carbono na composição do lubrificante, desenvolveu-se, de forma a determinar o teor em carbono dos lubrificantes para cilindros a vapor. Seguidamente, passou-se à execução de tentativas, sem sucesso, de maneira a relacionar os resíduos de carbono, com a quantidade de carbono formada na combustão de câmaras e pistões, em motores de combustão interna. A determinação do teor em carbono é feita, atualmente, em lubrificantes, usados para motores de combustão interna, turbinas e compressores. Nesses casos, o teor de carbono indica o grau de refinação, ao qual o lubrificante foi submetido [17].

2.2.2.2 Número de neutralização (NN)

Foram desenvolvidos testes rápidos, de modo a obter a quantidade de ácido que um lubrificante precisa para ser neutralizado com uma solução básica. Essa quantidade de ácido, expressa juntamente com a quantidade de solução básica, necessária para a sua neutralização, definiu-se como uma quantidade padrão. A quantidade de base precisa, para que ocorra a neutralização de um determinado ácido, denomina-se *Neutralisation Number* (NN).

Alguns provocadores da oxidação nos hidrocarbonetos de petróleo são os ácidos orgânicos. Os lubrificantes oxidam em serviço, devido à exposição a temperaturas elevadas, havendo uma tendência para que se tornem mais ácidos. Assim, medir a acidez de um lubrificante torna-se numa forma de acompanhar o progresso de oxidação. Esta técnica ainda é usada em vários produtos, como em lubrificantes para turbinas a vapor e isolantes elétricos.

Os aditivos, atualmente usados para melhorar as propriedades de desempenho de um lubrificante, podem torná-lo ácido ou básico, dependendo de sua composição.

Noutros casos, os aditivos podem conter ácidos fracos e bases fracas que não reagem entre si, na composição do lubrificante, mas reagem tanto com o ácido forte, como com a base forte, usada no teste do número de neutralização, para fornecer números de neutralização ao ácido e à base.

Os aditivos também podem sofrer reações de troca com a base, usada para o teste de neutralização, podendo dar falsos valores de ácidos. Estes efeitos dos aditivos tendem a confundir quaisquer mudanças na acidez, no lubrificante, e as determinações do número de neutralização podem ter pouco significado para alguns lubrificantes que contêm aditivos na sua composição [17].

2.2.2.3 Número total de acidez (TAN)

O *Total Acid Number* (TAN) é semelhante ao número de neutralização. O TAN de um lubrificante é o peso, em miligramas, de hidróxido de potássio necessário para neutralizar um grama de lubrificante. É uma medida de todos os materiais, num lubrificante, que vai reagir com o potássio hidróxido, sob condições de teste específicas. Os principais componentes desses materiais são ácidos orgânicos, metais, produtos de oxidação intermédios e avançados, nitratos orgânicos, compostos de nitro e outros compostos, que podem estar presentes como aditivos.

Tanto lubrificantes usados, como novos podem apresentar tanto TAN como *Total Base Number* (TBN). Os ácidos orgânicos podem formar-se, como resultado da oxidação progressiva do lubrificante, e de metais, resultantes da reação desses ácidos com metais.

Os ácidos minerais (ácidos inorgânicos fortes), se estiverem presentes numa amostra de lubrificante, são neutralizados por hidróxido de potássio, afetando portanto, a determinação do TAN. Normalmente, estes ácidos nunca estão presentes, exceto nos motores de combustão interna, combustíveis com alto teor de enxofre, ou, em casos de contaminação do lubrificante. Tendo em conta que existe uma variedade de produtos de degradação que contribuem para o valor TAN, e que os ácidos orgânicos presentes variam, relativamente às suas propriedades corrosivas, o teste não pode ser usado para prever a corrosão num lubrificante [17].

2.2.2.4 *Número total de basicidade (TBN)*

O TBN de um lubrificante é a quantidade de ácido, expressa em miligramas de hidróxido de potássio, necessário para neutralizar todos os constituintes presentes num grama de lubrificante. Este teste é normalmente usado em lubrificantes que contêm alcalinos, neutralizantes de ácido e aditivos. A taxa de consumo desses materiais alcalinos (esgotamento de TBN) é uma indicação da vida útil, prevista para o lubrificante. Em lubrificantes usados, indica a quantidade de aditivo neutralizante de ácido que fica no lubrificante. Estes lubrificantes encontram-se em motores diesel e motores de combustão interna que usam combustíveis, contendo constituintes que produzem ácido, como enxofre ou cloro. Sabendo que qualquer quantidade de TBN permanece no lubrificante, não deve haver nenhum ácido forte presente. Contudo, a natureza dos aditivos antioxidantes, altamente alcalinos e metálicos, às vezes permite a obtenção, tanto de valores TAN, como de TBN, na mesma amostra. Isso ocorre, tanto em lubrificantes novos, como em usados [17].

2.2.2.5 *Cinzas sulfatadas*

As cinzas sulfatadas de um lubrificante é o resultado, em percentagem por peso, após a execução de três processos: queima do lubrificante, tratamento do resíduo inicial com ácido sulfúrico e queima do resíduo tratado. É uma forma de quantificar os constituintes não combustíveis (geralmente materiais metálicos), encontrados na constituição do lubrificante.

Os lubrificantes minerais mais recentes e puros não contêm materiais deste tipo, ou seja, formadores de cinzas.

Muitos dos aditivos usados em lubrificantes, como detergentes, contêm compostos organometálicos, que formam um resíduo no teste de cinzas sulfatadas, e desta forma, a concentração destes materiais é indicada, através deste teste. Desta forma, durante o fabrico de lubrificantes, este teste fornece um método simples de verificação para garantir que os aditivos foram incorporados nos valores corretos. Uma vez que, o teste combina todos os elementos metálicos num único resíduo, pode ser necessário recorrer a testes adicionais, para determinar se os vários elementos metálicos se encontram nas proporções corretas.

Atualmente, vários fabricantes incluem um limite máximo para o teor de cinzas sulfatadas nas suas especificações dos lubrificantes, para certos tipos de motores de combustão interna. O teor de cinzas sulfatadas resulta da incorporação de materiais, destinados a melhorar o desempenho geral do lubrificante. Quantidades excessivas de alguns desses materiais, podem contribuir para problemas como: depósitos na câmara de combustão, desgaste do anel superior ou depósitos em motores, com ciclos de dois tempos.

Nos lubrificantes usados, um aumento no teor de cinzas, geralmente indica contaminação, como poeira e sujidade e resíduos de desgaste [17].

2.2.3 Aditivos

2.2.3.1 Retardar o ponto de fluidez

Existem certos polímeros, de elevado peso molecular, com o poder de retardar a formação de estruturas de cera, baixando a temperatura a que esta é formada. Portanto, os aditivos não impedem totalmente o crescimento de cristais de cera, mas baixam a temperatura a que a estrutura rígida é formada. Tendo em conta o tipo de lubrificante, a redução do ponto de fluidez até 50 F° (28 °C) pode ser alcançado, recorrendo a este tipo de aditivos. Porém, uma redução do ponto de fluidez, em cerca de 20-30 F° (11-17 °C, é mais recorrente.

Há então, dois tipos de aditivos, cujo objetivo é retardar o ponto de fluidez: polímeros alquilaromáticos (adsorvem os cristais de cera à medida que se formam, evitando o seu crescimento e aderência) e polimetacrilatos (co-cristalizam com a cera para evitar o crescimento do cristal) [17].

2.2.3.2 Melhorar o índice de viscosidade

Os aditivos, para melhorar o índice de viscosidade, são polímeros de cadeias longas e de elevado peso molecular, que funcionam causando um aumento da viscosidade relativa de um lubrificante, através do aumento da temperatura do lubrificante. Habitualmente, este resultado deve-se a uma mudança na configuração física do polímero, com o aumento da temperatura do lubrificante.

Quando os lubrificantes estão sob efeito de baixas temperaturas, as moléculas que constituem o polímero, adotam uma forma enrolada, com o objetivo de minimizar a sua viscosidade. Embora a adição deste tipo de aditivo ao lubrificante diminua a sua viscosidade (à medida que a temperatura aumenta), a diminuição da viscosidade não é tão pretendida, como seria se o lubrificante não tivesse aditivos.

Os principais aditivos para melhorar o índice de viscosidade são polímeros e copolímeros de metacrilato, acrilatos, olefinas e copolímeros de estireno butadieno. Esta melhoria do grau do índice de viscosidade de um lubrificante deve-se ao peso molecular e à distribuição do polímero.

Os aditivos para melhorar o índice de viscosidade aplicam-se em lubrificantes com aplicações nos ramos mecânicos (motores, engrenagens) e hidráulicos. A sua utilização permite uma lubrificação satisfatória, num intervalo de temperatura mais amplo do que é possível com lubrificantes minerais simples [17].

2.2.3.3 *Anti-espuma*

A capacidade dos lubrificantes resistirem à formação de espuma, depende do tipo de petróleo bruto, grau de refinação e viscosidade. Em algumas ocasiões, pode haver a tendência a agitar o lubrificante, criando espuma, e noutros casos, pequenas quantidades de espuma podem ser deveras problemáticas. Nesses casos, um aditivo anti-espuma pode ser adicionado ao lubrificante.

Os polímeros de silicone são os anti-espuma mais comuns. Esses materiais são essencialmente insolúveis no lubrificante, e a escolha correta do polímero, assim como, o tamanho e os procedimentos de mistura são críticos, para evitar a sedimentação, durante o seu armazenamento a longo prazo. Estes aditivos podem também aumentar a entrada de ar no lubrificante.

Por vezes, recorre-se a polímeros orgânicos, de modo a ultrapassar as dificuldades que surgem com a aplicação de silicones, apesar de, normalmente, ser necessário aumentar a concentração dos mesmos [17].

2.2.3.4 *Inibir a oxidação*

Quando há aquecimento do lubrificante na presença de ar, ocorre oxidação. Nesta oxidação, tanto a viscosidade, como a concentração de ácidos orgânicos no lubrificante aumentam e, o verniz e os depósitos de laca, podem formar-se em superfícies de metal quente, expostas ao lubrificante. A taxa de oxidação é afetada pela temperatura: se a temperatura aumenta, a taxa de oxidação aumenta exponencialmente. Normalmente, por cada 10°C (18°F) de aumento de temperatura, a taxa de oxidação do lubrificante mineral passa para o dobro.

Existem muitos materiais, como metais (principalmente cobre e ferro), ácidos orgânicos e minerais, que podem atuar como catalisadores ou promotores de oxidação.

A oxidação de um lubrificante, por norma, inicia-se com reações em cadeias de radicais livres. Estas cadeias são formadas a partir de moléculas de lubrificantes instáveis, reagindo seguidamente, com o oxigênio, para formar peróxi radicais, que por sua vez, atacam lubrificantes não oxidados, originando novos iniciadores e hidroperóxidos. Qualquer material que interrompa esta reação em cadeia inibirá a oxidação.

Dois tipos de inibidores de oxidação, regularmente usados são todos aqueles que reagem com os iniciadores, radicais peroxi e hidroperóxidos, para formar compostos inativos, e aqueles que decompõem estes materiais, de maneira a criar compostos menos reativos.

Para temperaturas abaixo de 200 °F (93 °C), a oxidação acontece lentamente. Alguns exemplos de aditivos deste tipo são: fenóis impedidos (alquilados), tais como 2,6-diterciário-butil-4-metilfenol (2,6 diterciário-butilparacresol, DBPC), e aminas

aromáticas, como, N-fenil-naftilamina. Estes aditivos são usados em produtos como turbinas e lubrificantes hidráulicos, cujo destino passa por serviços prolongados, a temperaturas moderadas.

Quando a temperatura operacional aumenta cerca de 200 °F (93 °C), os efeitos catalíticos de metais, tornam-se fatores relevantes, na promoção da oxidação do lubrificante. Sob estas condições, os inibidores que reduzem o efeito catalítico dos metais devem ser aplicados. Estes materiais geralmente reagem com as superfícies dos metais, para formar revestimentos de proteção.

Os aditivos deste tipo são os ditiofosfatos, principalmente ditiofosfato de zinco. Uma vez que, os ditiofosfatos também atuam para decompor hidroperóxidos em temperaturas acima de 200 °F (93 °C), inibem a oxidação, da mesma forma.

Os inibidores de oxidação podem não impedir totalmente a oxidação do lubrificante, quando as condições de exposição são graves, e alguns tipos de lubrificante são inibidos num grau muito maior do que outros [17].

2.2.3.5 Inibir a ferrugem e corrosão

Existem vários tipos de corrosão em lubrificantes. Os dois que se destacam são a corrosão por ácidos orgânicos (desenvolvem-se no próprio lubrificante) e corrosão por contaminantes (coletados e transportados pelo lubrificante). A corrosão por ácidos orgânicos pode ocorrer, por exemplo, em rolamentos usados para motores de combustão interna. Os inibidores de corrosão formam uma película protetora na superfície do rolamento, evitando que os materiais corrosivos atinjam ou ataquem o metal. Este filme pode ser adsorvido no metal ou quimicamente ligado ao mesmo.

A Figura 9 mostra um exemplo de um material sujeito a corrosão e ferrugem.



Figura 9- Ferrugem e corrosão [21]

Durante a combustão nos motores a gasolina ou gásóleo, certos elementos no combustível, como enxofre e eliminadores de antidetonantes, podem queimar e formar ácidos fortes. Esses ácidos podem então condensar, nas paredes do cilindro e ser transportados para outras partes do motor pelo lubrificante. Assim sendo, o desgaste corrosivo em anéis, paredes de cilindro, cambota, braço balanceiro e outros componentes do motor, pode ocorrer.

Foi descoberto que a inclusão de materiais altamente alcalinos, na constituição do lubrificante, neutraliza os ácidos fortes à medida que são formados, reduzindo significativamente a corrosão e o desgaste corrosivo.

Os inibidores de ferrugem são, geralmente compostos por uma atração polar alta, em relação ao metal nas superfícies. Por interação física ou química na superfície do metal, forma-se um filme contínuo e tenaz, impedindo a água de atingir a superfície do metal.

Os materiais, tipicamente usados para este fim, são os succinatos de amina e sulfonatos alcalino-terrosos. Os inibidores de ferrugem podem ser usados na maioria dos lubrificantes, mas a seleção deve ser feita com cuidado, de maneira a evitar problemas, como a corrosão de metais não ferrosos, ou, a formação de emulsões problemáticas com a água. Como os inibidores de ferrugem são adsorvidos no metal das superfícies, um lubrificante pode esgotar o inibidor de ferrugem com o tempo [17].

2.2.3.6 Detergentes e dispersantes

Nos lubrificantes para motores de combustão interna, há vários fatores que causam a deterioração do lubrificante, tal como, a formação de depósitos prejudiciais. Os depósitos prejudiciais formados, podem interferir na circulação do lubrificante, acumulando-se atrás dos anéis de pistão (causando o encravamento e desgaste rápido do anel) e afetando as folgas e funcionamento adequado de componentes críticos (elevadores de válvula hidráulica).

A aplicação de detergentes e dispersantes no lubrificante pode retardar o aparecimento de depósitos e reduzir a sua taxa de acumulação nas superfícies metálicas. Uma solução para este problema é a drenagem e mudança regular do lubrificante, para que os contaminantes sejam removidos do lubrificante do motor.

Os detergentes são compostos químicos que neutralizam quimicamente os precursores no depósito, que se formam em condições de altas temperaturas, ou como resultado da queima de combustíveis (com alto teor de enxofre), ou outros materiais (formadores de subprodutos ácidos) provenientes da combustão. Não existe uma linha nítida de demarcação entre detergentes e dispersantes. Os detergentes têm a capacidade de dispersar e suspender os contaminantes, enquanto os dispersantes de evitar a formação de depósitos de alta temperatura. Os principais detergentes usados são sabões orgânicos, sais alcalino-terrosos e metais como o bário, cálcio e magnésio. Estes materiais são frequentemente denominados compostos metalo-orgânicos. Os sulfonatos de cálcio e magnésio e fenatos de cálcio (ou sulfetos de fenol) são frequentemente utilizados. Os sulfonatos e fenatos podem conter mais do metal alcalino do que o necessário para neutralizar os componentes ácidos, usados em lubrificantes para motores a gasóleo e neutralizar os ácidos fortes, formados durante a combustão do enxofre no combustível. Esta neutralização reduz a corrosão, desgaste e minimiza a tendência desses ácidos causarem a degradação do lubrificante.

Os componentes básicos são, correntemente, usados em concentrações mais baixas nos lubrificantes para motores a gasolina, onde o enxofre do combustível é muito mais baixo. Para além disso, estão incluídos na formulação para ajudar na redução da corrosão, para baixas temperaturas. Componentes neutros e básicos em excesso, também atuam para dispersar e suspender materiais formadores de verniz, resultantes da oxidação do lubrificante, evitando que materiais se depositem nas superfícies do motor. Os detergentes metalo-orgânicos, na combustão, deixam um resíduo cinza (cinza sulfatada). Em alguns casos, isto pode ser prejudicial, pois as cinzas podem contribuir para depósitos na câmara de combustão. Por outro lado, noutros casos, pode ser benéfico por a cinza fornecer revestimentos resistentes ao desgaste, nas superfícies. Os dispersantes típicos (poliméricos e sem cinzas) são descritos como succinimidas poliméricas, produtos de reação de olefina/P2S5, poliésteres e benzilamidas. Estes têm por base hidrocarbonetos de cadeia longa, que são acidificados e depois neutralizados com um composto contendo nitrogênio básico. A porção de hidrocarboneto confere solubilidade ao lubrificante, enquanto a porção de nitrogênio um sítio ativo que atrai e contém materiais de formação de depósitos, de forma a mantê-los suspensos no lubrificante.

Embora o principal uso de detergentes e dispersantes seja em lubrificantes para motores, estes também são usados em produtos, como fluidos de transmissão automática, lubrificantes hidráulicos e circulação de lubrificantes de serviço, a altas temperaturas [17].

2.2.3.7 Anti-desgaste

Os aditivos anti-desgaste são usados em muitos lubrificantes, tanto para reduzir o atrito, como o desgaste. A película de lubrificante torna-se progressivamente mais fina, como resultado do aumento da carga ou temperatura. O contacto, através do filme lubrificante é feito primeiro pela superfície de contacto, irregularidades ou asperezas. Essas asperezas promovem o aumento de atrito e a microsoldadura também pode ocorrer. Com o deslizamento, as soldas rompem imediatamente. O processo modifica a rugosidade da superfície, por meio da transferência de metal, ou partículas de desgaste, o que pode causar arranhões e marcas.

Os aditivos anti-desgaste são uma cadeia longa de elementos, que reagem com as superfícies, formando um filme adsorvido nas superfícies de metal, com as extremidades polares das moléculas (ligadas ao metal) e moléculas à superfície. O atrito é reduzido e o movimento das superfícies torna-se mais fácil. O desgaste é reduzido sob condições de deslizamento suave, mas sob condições de deslizamento severas, as camadas de moléculas podem ser removidas, e será praticamente impossível reduzir o desgaste [17].

2.2.3.8 Pressão extrema

Os aditivos de *Extreme Pressure* (EP) são necessários para reduzir o atrito, controlar o desgaste e evitar danos superficiais graves, quando os lubrificantes são expostos a altas temperaturas ou cargas pesadas, onde existem condições de deslizamento mais agressivas. Esses materiais reagem quimicamente com as superfícies de metal, para formar películas de superfície, relativamente insolúveis no lubrificante.

Mesmo com aditivos de extrema pressão no lubrificante, o desgaste de novas superfícies pode ser inicialmente alto. Além do desgaste normal de amaciamento e metal recém-formado (superfícies quimicamente reativas), o tempo e a temperatura são os fatores precisos para a formação de uma camada de filme na superfície. O processo de deslizamento pode levar a alguma remoção da película do filme, mas como a substituição por outras reações químicas é rápida, a perda de metal é extremamente baixa. Este processo esgota gradualmente a quantidade de aditivo EP disponível no lubrificante, embora essa taxa é geralmente muito baixa.

A gravidade das condições de deslizamento define a reatividade dos aditivos EP fundamental para a máxima eficácia. A reatividade ideal ocorre quando os aditivos reduzem o desgaste adesivo ou metálico, sem causar corrosão. Posto que, um aditivo EP específico pode ter reatividade diferente com metais diferentes, é importante combinar a reatividade do metal aditivo aos aditivos, não apenas com a agressividade do sistema de deslizamento, mas também com os metais específicos envolvidos. Outra função importante dos aditivos EP é que estes levam ao polimento das superfícies, pois a reação química é maior nas asperezas, onde o contacto é feito e as temperaturas localizadas são mais altas. A carga é então distribuída de maneira mais uniforme, sobre uma área de contacto maior, o que permite uma redução na gravidade do deslizamento, lubrificação mais eficaz e redução do desgaste.

Os agentes de pressão são normalmente compostos que contêm enxofre, cloro ou fósforo, sozinhos ou combinados. Os compostos usados dependem do uso final do lubrificante e da atividade química exigida pelo mesmo. Por vezes, os compostos de enxofre juntamente com compostos de cloro ou fósforo, são usados em muitos fluidos de corte de metal. As combinações enxofre-fósforo são usadas na maioria dos lubrificantes de engrenagens industriais e automóveis. Isto, deve-se ao facto destes materiais fornecerem uma excelente proteção contra arranhões nos dentes da engrenagem. Para além disso, apresentam vantagens de melhor estabilidade de oxidação, menor corrosividade e, muitas vezes, menor atrito [17].

2.3 Classificação quanto ao estado físico

No quotidiano, é possível encontrar lubrificantes, em quatro estados físicos:

- Líquido- lubrificantes no estado líquido, lubrificantes minerais, orgânicos e sintéticos;
- Semi-sólido- lubrificantes no estado semi-sólido, ou seja, contêm agentes que contribuem para a sua espessura, como por exemplo, lubrificantes anti-gripagem (por exemplo, massa lubrificante);
- Sólido- lubrificantes no estado sólido, por exemplo, pós e teflon;
- Gasoso- lubrificantes no estado gasoso, apenas para aplicações restritas, onde não é possível a aplicação dos lubrificantes convencionais (altíssimas rotações, aplicações que poderiam causar a combustão do lubrificante, ou, o seu congelamento e situações de dificuldade de penetração por folgas extremamente pequenas).

As vantagens e desvantagens dos lubrificantes provêm da sua capacidade de fluir facilmente. Desta forma, torna-se bastante fácil despejar os lubrificantes líquidos num recipiente, para alimentação de um rolamento, através da aplicação em gotas, salpico ou extração através do uso de uma bomba. Também se torna mais simples a remoção dos mesmos, quando estes não estiverem mais aptos para o uso. Todavia, o mais importante passa pelo *design* adequado do rolamento, podendo este ser feito para alimentar a zona carregada com lubrificante. Outras vantagens são o arrefecimento de um rolamento, retirando-lhe o calor e limpando-o, removendo os resíduos. Por outro lado, o lubrificante em estado líquido pode facilmente escapar de um rolamento, vaziar de um recipiente ou máquina, migrar e até mesmo evaporar se o rolamento estiver suficientemente quente e ventilado. Além disso, por ser líquido, não forma uma vedação eficaz contra a entrada de sujidade e humidade no rolamento. Os lubrificantes semi-sólidos comportam-se de várias maneiras como os líquidos, mas as vantagens do fluxo fácil são superadas pelas desvantagens. Os semi-sólidos (massas lubrificantes) não vazam facilmente de uma máquina ou recipiente e haverá a formação de uma vedação eficaz contra contaminantes. Por outro lado, estes são muito menos fáceis de alimentar num rolamento e são quase completamente inúteis para o arrefecimento. As vantagens e desvantagens dos lubrificantes sólidos são bastante semelhantes às dos semi-sólidos, sendo que, o lubrificante não fluirá. Também as vantagens e desvantagens dos lubrificantes gasosos são semelhantes às dos líquidos, onde as propriedades de fluxo são excelentes.

Apesar da teoria EHD descrever particularmente bem o comportamento de um lubrificante totalmente inundado no contacto de lubrificação, o mesmo não acontece com os lubrificantes sólidos [22]. Os lubrificantes sólidos e gasosos são apenas usados em determinadas situações, pois só proporcionam vantagens em casos particulares [23].

As aplicações gerais desses quatro tipos de lubrificantes encontram-se compiladas na Tabela 1.

Tabela 1- Propriedades dos diferentes estados dos lubrificantes (adaptado de [23])

Propriedades	Líquido	Semi-sólido	Sólido	Gasoso
Lubrificação hidrodinâmica	Excelente	Razoável	Nenhuma	Bom
Lubrificação limite	Fraca a excelente	Boa a excelente	Boa a excelente	Normalmente fraca
Arrefecimento	Muito bom	Fraco	Nenhum	Razoável
Baixo atrito	Razoável a bom	Razoável	Fraco	Excelente
Facilidade para alimentação do rolamento	Boa	Razoável	Fraca	Boa
Capacidade para permanecer no rolamento	Fraca	Boa	Muito boa	Muito boa
Capacidade de vedar contaminantes	Fraca	Muito boa	Razoável a boa	Muito fraca
Proteção à corrosão	Razoável a excelente	Boa a excelente	Fraca a razoável	Fraca
Variação de temperatura	Razoável a excelente	Boa	Muito bom	Excelente
Volatilidade	Muito alta a muito baixa	Geralmente baixa	Baixa	Muito alta
Inflamação	Muito alta a muito baixa	Geralmente baixa	Geralmente baixa	Depende do gás
Compatibilidade	Razoável a muito fraca	Razoável	Excelente	Geralmente boa
Custo do lubrificante	Baixo a alto	Razoavelmente alto	Normalmente alto	Geralmente muito baixo

Tabela 1- Propriedades dos diferentes estados dos lubrificantes (continuação)

Complexidade do design do rolamento	Normalmente baixo	Razoavelmente baixo	Baixo a alto	Muito alto
Tempo de vida	Detioração e contaminação	Detioração	Desgaste	Capacidade de fornecer gás

2.4 Classificação quanto à origem

2.4.1 Orgânica

2.4.1.1 Animal/Vegetal

Os lubrificantes de origem orgânica são os produzidos a partir de gorduras animais e vegetais. Estes foram os primeiros e únicos lubrificantes existentes, durante séculos. São considerados excelentes lubrificantes de regime limite, mas muito menos estáveis que os de origem mineral, pois tendem a decompor-se.

O lubrificante obtido através da planta colza (Figura 10) ainda é usado, tanto como lubrificante, como aditivo, para o regime limite em lubrificantes minerais. Além disso, também se aplica em processos que envolvam moldação de metal, pois não causa a carburação do aço.



Figura 10- Planta colza [24]

O lubrificante de rícino, extraído a partir das sementes da planta *Ricinus communis* (Figura 11), é utilizado por ser compatível com a borracha natural, como por exemplo, em vedações [23].



Figura 11- Planta *Ricinus communis* [25]

2.4.2 Mineral

Os lubrificantes de origem mineral, feitos a partir do refinamento do petróleo bruto, fazem parte da constituição de cerca de 95% dos lubrificantes criados atualmente. São essencialmente compostos por hidrocarbonetos que variam em peso molecular de aproximadamente 250 (cerca de 18 átomos de carbono), para lubrificantes de baixa viscosidade, e até 1000, para lubrificantes de alta viscosidade.

Estruturas típicas em lubrificantes minerais são n-parafina, isoparafina, cicloparafina, hidrocarbonetos aromáticos-alifáticos mistos. As parafinas, com um determinado tamanho molecular, têm viscosidade e massa volúmica relativamente baixa, mas elevado ponto de fluidez. Os aromáticos envolvem anéis de carbono insaturados com seis membros, que introduzem maior viscosidade, mudança rápida na viscosidade com a temperatura e produtos de oxidação insolúveis de cor escura (fonte de lama e verniz que acompanham a sua oxidação em altas temperaturas).

A etapa inicial da produção de um lubrificante mineral é a destilação do petróleo bruto para remover gasolina, querosene e combustível de baixo ponto de ebulição.

As etapas de refinamento subsequentes removem as parafinas de cadeia linear (cera), aromáticos indesejáveis e contaminantes de enxofre e nitrogénio.

Começa então a etapa de produção de lubrificantes minerais que se dividem em cinco grupos (Tabela 2), surgindo primeiramente, o Grupo I.

A próxima etapa de hidrocraqueamento resulta no Grupo II e normalmente emprega 500 psi de hidrogénio a 750 °F e 1500 psi em 800-900 °F, para a obtenção de cicloparafinas e isoparafinas do Grupo III. A desparafinação catalítica segue este hidrocraqueamento para os Grupos II e III, de forma a converter cera de parafina de cadeia linear de alto ponto de fusão, em parafina de cadeia ramificada de baixo ponto de fluidez.

Os lubrificantes do Grupo III, de produção mais limitada, são atualmente usados em lubrificantes para automóveis, onde a sua viscosidade e solvência limitada para aditivos exigem uma composição personalizada.

Muitos lubrificantes para engrenagens e compressores ainda pertencem ao Grupo I, de modo a fornecer as viscosidades mais altas necessárias [26].

Tabela 2- Designação das características do America Petroleum Institute (adaptado de [26])

Grupo	Descrição	Saturados (%)	Aromáticos (%)	Enxofre (%)	IV
I	Refinado com solvente	<90 e/ou	>10	>0,03	80-<120
II	Hidroprocessado	>90	<10	<0,03	80-<120
III	Craqueamento	>90	<10	<0,03	120+
IV	PAO polialfaolefinas	(100)	(0)	(0)	
V	Outros				

2.4.3 Sintética

O principal motivo da existência de lubrificantes de origem sintética deve-se à falha dos lubrificantes minerais, em determinadas aplicações.

Os militares dos Estados Unidos da América (EUA) fazem muita investigação e desenvolvem novos lubrificantes sintéticos, devido ao seu bom desempenho para fins militares. As principais razões para o uso deste tipo de lubrificante são o custo, disponibilidade, desempenho e segurança.

Normalmente, os lubrificantes sintéticos são mais caros do que os minerais. No entanto, uma exceção foi um lubrificante mineral parafínico, super refinado e desparafinado, para aplicação na aeronave SR-71, MIL-H27601A. O MIL-H-27601A, custou mais de US \$ 100 por volume.

Na análise de custos, o engenheiro não deve considerar apenas o custo de aquisição inicial, mas também o de ciclo de vida. Em termos de custo de ciclo de vida, os lubrificantes sintéticos apresentam ciclos superiores, pois o equipamento precisa de menos reparações com produtos sintéticos, do que com os restantes tipos de lubrificantes.

O equipamento pode também ser lubrificado para o resto da vida, não precisando de mais lubrificação, sendo necessário recorrer somente à manutenção do mesmo.

Os lubrificantes sintéticos apresentam, geralmente, melhor qualidade na sua composição do que os minerais, pois o mineral provém de poços de petróleo, podendo se tratar de uma mistura de petróleo de vários poços. A estabilidade térmica e oxidante em altas temperaturas dos lubrificantes sintéticos excede a dos minerais. Além disso, a relação de viscosidade-temperatura e fluxo de baixa temperatura podem ser melhorados e controlados em lubrificantes sintéticos, por exemplo, controlar a ramificação e o comprimento da cadeia.

O limite superior pode ser de uma estabilidade térmica limite ou de um limite de viscosidade. A menor viscosidade útil de um fluido depende da aplicação, mas geralmente é considerado 0,5 a 1,0 cSt para a formação de filme de lubrificação, adequada num rolamento, ou outra superfície de desgaste.

O limite inferior de temperatura pode ser tanto da viscosidade limite, como do ponto de fluidez, duas propriedades de um fluido. A viscosidade de baixa temperatura depende da aplicação, por exemplo, do tamanho das bombas de fluido, comprimento das linhas de tubagem e outros impedimentos de fluxo.

A inflamação dos lubrificantes é uma consideração importante no projeto de equipamentos, mesmo para verificar se um determinado fluido deve ser usado.

Os lubrificantes minerais, devido ao processo de destilação dos mesmos, ficam com o ponto de inflamação final do lubrificante mais volátil da mistura. Todavia, os sintéticos, podem ser controlados, de forma a terem essencialmente o mesmo peso molecular. Isto significa que o ponto de inflamação do lubrificante sintético será maior para uma certa viscosidade do que seria para um mineral, com a mesma viscosidade.

Os lubrificantes sintéticos dividem-se em dez classes diferentes: hidrocarbonetos sintéticos, ésteres, ésteres-fosfato, fluidos com silício, ésteres de silicato, silicones, sila hidrocarbonetos, polímeros de clorotrifluoroetileno, éteres polifenílicos e fluidos perfluorados [27].

2.5 Indústria dos lubrificantes

A estrutura da indústria global dos lubrificantes mudou significativamente entre meados da década de 1990 e 2005.

No final da década de 1990, a indústria do petróleo foi afetada por uma onda de fusões e aquisições (M&A), levando à criação de novas e maiores empresas. As principais razões para estas fusões foram fatores económicos na extração e refinamento de petróleo bruto, que resultaram em margens de refinamento mais baixas.

O número de fabricantes (com uma produção de lubrificantes superior a mil toneladas por ano) diminuiu cerca de 60%, em termos nominais cerca de mil fabricantes, no final de 2005.

Os lubrificantes representam apenas uma pequena parte do negócio do petróleo. Em 2005, havia cerca de cento e trinta dessas empresas petrolíferas nacionais e multinacionais envolvidas na produção de lubrificantes, com foco em lubrificantes de elevado volume de consumo, como lubrificantes para motores, engrenagens e

hidráulicos. O número de fabricantes caiu entre 2000 e 2005, de mil e duzentos para 600 fabricantes.

A consolidação hoje em dia avança, no caso de negócios, principalmente derivado ao alto valor. No entanto, existem outras causas competitivas da indústria de hoje: as empresas de lubrificantes minerais já integradas que se concentram em negócios de grande volume e a ameaça de novos concorrentes no mercado.

As atividades de fusão e aquisição mencionadas acima mudaram a classificação dos 15 principais fabricantes de lubrificantes nos últimos quinze anos:

- A EXXON e SHELL trocaram de posições de liderança, após a SHELL adquirir a PENNZOIL;
- A FUCHS ganhou três posições no ranking dos quinze primeiros e ficou entre os dez primeiros, em nono lugar;
- A GULF OIL, PERTAMINA e PETRONAS entraram no ranking das quinze primeiras, enquanto a INDIAN OIL, AGIP e REPSOL tiveram que sair.

No final de 2015, os quinze maiores fabricantes representam dois terços do mercado mundial de lubrificantes, enquanto o restante dos mais de setecentos fabricantes, a outra parte (Figura 12) [28].

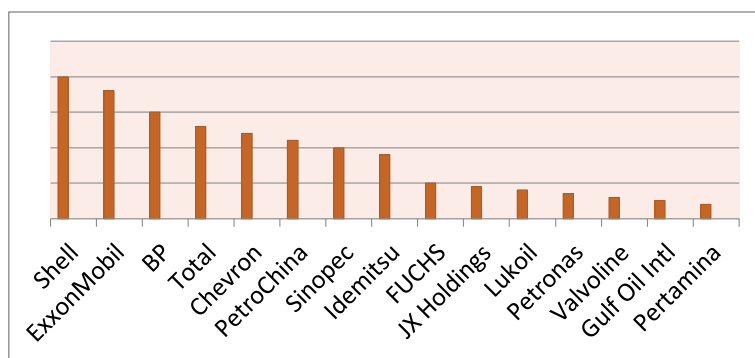


Figura 12- Ranking global dos 15 principais fabricantes de lubrificantes [28]

2.6 Classificação quanto à sua aplicação

Quanto à sua aplicação, os lubrificantes dividem-se em seis classes: motor de combustão interna, engrenagens, hidráulica, compressores, turbinas e metalomecânica.

A Tabela 3 mostra alguns exemplos de aplicações dos lubrificantes no quotidiano.

Tabela 3- Aplicações dos lubrificantes (adaptado de [28])

Aplicação	Exemplos
Motor de combustão interna	Motores a gás, a dois e quatro tempos, tratores e navios.
Engrenagens	Engrenagens para a indústria e veículos motorizados.
Hidráulica	Hidráulica estacionária, móvel e para aviação.
Compressores	Compressores de ar e refrigeração.
Turbinas	Turbinas hidráulicas e a gás.
Metalomecânica	Novas tecnologias que envolvam refrigeração, corte e maquinagem.

2.7 Critérios de seleção de um lubrificante

Antes de se efetuar a escolha de um certo lubrificante, deve-se ter em conta os critérios apresentados na Tabela 4.

Tabela 4- Critérios de seleção de um lubrificante (adaptado de [27] [29])

Critério	Descrição
Ambiente de funcionamento	Este trata-se do primeiro, e mais importante critério, pois é o ambiente no qual o lubrificante vai trabalhar. Normalmente, este critério define-se como a temperatura de aplicação. Porém, existem outras considerações ambientais, como o espaço em si, oxigénio líquido e outro meio reativo.
Viscosidade e filme de lubrificação	A capacidade de um lubrificante (líquido) funcionar sob condições de baixas temperaturas é definida como viscosidade máxima. Assim, para um lubrificante sólido, define-se através da espessura máxima, na qual o conjunto mecânico ou rolamento pode trabalhar. A lubrificação por filme completo ocorre através de um fluido, que separa as superfícies de interação. A lubrificação por filme completo pode ser classificada em duas grandes categorias: lubrificação hidrodinâmica e lubrificação elastohidrodinâmica.

Tabela 4- Critérios de seleção de um lubrificante (continuação)

Desempenho da lubrificação limite	Derivado ao contacto metal-metal entre duas superfícies lubrificadas, ocorre corte, expondo assim, uma nova superfície do metal. O lubrificante reage com o metal exposto, de forma a criar películas protetoras na superfície. Estas películas são de baixo atrito, resistentes ao desgaste, e protegem as superfícies do desgaste prematuro.
Estabilidade	Quando o limite superior da temperatura de funcionamento de um lubrificante líquido não é definido pelas propriedades da temperatura e viscosidade, é caracterizado através da estabilidade do lubrificante. Para lubrificantes sólidos, a viscosidade e a temperatura elevada normalmente, não são propriedades críticas, pois o limite superior de temperatura de funcionamento é geralmente definido através da estabilidade ou volatilidade.
Resistência ao fogo	Os lubrificantes líquidos podem variar entre extremamente inflamáveis e não inflamáveis. A resistência ao fogo é crucialmente importante em fluidos hidráulicos, uma vez que são aplicados para pressões elevadas (até 5000 psi), o que aumenta significativamente o seu potencial de ignição, caso o fluido estiver sob a forma de <i>spray</i> .
Compatibilidade	De forma a proporcionar uma excelente lubrificação, o lubrificante em questão deve ser compatível com todos os materiais envolvidos no contacto, especialmente quando necessário efetuar a substituição do lubrificante por um novo. Neste caso, para além da compatibilidade, o novo lubrificante deve ser miscível com o anterior, facilitando o processo de alteração do anterior para um novo.

Tabela 4- Critérios de seleção de um lubrificante (continuação)

Biodegradabilidade e toxicidade	A biodegradabilidade e a toxicidade interrelacionam-se relativamente às características dos lubrificantes. A biodegradabilidade relaciona-se com a compatibilidade ambiental de um lubrificante e tem-se revelado uma propriedade cada vez mais importante, devido às restrições impostas pelos regulamentos ambientais, no que diz respeito à proteção da integridade do abastecimento de água e do meio ambiente em geral. Atualmente, a toxicidade tem sido uma questão importante, assim como a segurança do operador. O aspeto mais relevante de um lubrificante para uma aplicação específica é o seu desempenho, sendo o respeito pelo meio ambiente secundário [27]. Os lubrificantes minerais, constituídos por MOHs, quando integrados na constituição de alimentos ou materiais em contacto com os mesmos, provocam a sua toxicidade.
Suscetibilidade aos aditivos	De maneira a fornecer uma performance eficaz ao lubrificante juntam-se aditivos à sua composição. Assim, a suscetibilidade aos aditivos é uma propriedade importante que se deve considerar ao seleccionar uma classe de lubrificantes para determinadas aplicações.

2.8 Lubrificantes e o meio ambiente

2.8.1 Lubrificantes biodegradáveis

Antigamente, os lubrificantes limitavam-se apenas a cumprir os padrões exigidos pelo funcionamento das máquinas e equipamentos. No entanto, atualmente existem preocupações com o meio ambiente devido à consciencialização sobre a poluição ambiental. Há também uma tendência clara para uma aplicação mais responsável de lubrificantes, assim como, várias legislações que limitam o uso de determinados lubrificantes, em certas aplicações [30].

Até aos dias de hoje, os EUA têm ocupado o lugar de única jurisdição que exige aos operadores de navios o recurso a Environmentally Acceptable Lubricants (EAL), de acordo com a Vessel General Permit (VGP) e, no futuro, a legislação Vessel Incidental Discharge Act (VIDA) [31].

O fator mais relevante acerca da necessidade do uso de lubrificantes biodegradáveis é o efeito tóxico dos lubrificantes compostos por petróleo. Cerca de 50% dos lubrificantes produzidos são despejados no meio ambiente, tornando assim, os

lubrificantes biodegradáveis uma alternativa sustentável e económica, face aos convencionais [32].

O termo biodegradável define-se como uma degradação química de uma substância (lubrificante) na presença de microrganismos/bactérias [33].

Embora existam diferentes definições de biodegradabilidade na indústria, uma das mais razoáveis é a da norma ASTM D6064, que descreve a biodegradabilidade como "*uma função do grau de degradação, tempo e metodologia de teste*". Há duas medidas usadas para determinar a biodegradabilidade: a degradação primária e a secundária. A degradação primária trata-se da redução da ligação carbono-hidrogénio, determinada através de espectroscopia de infravermelho (IR), correspondente à medida direta da percentagem de degradação do lubrificante.

A forma mais comum para medir a degradação primária é pelo método de teste L-33-93, do Conselho Europeu de Coordenação (CEC), executado em vinte e um dias. O outro tipo de medição de biodegradabilidade é a degradação secundária, mais conhecida como biodegradabilidade final, pois esta mede a evolução do dióxido de carbono, por um processo de degradação, num período de vinte e oito dias.

O termo *Bio-based* nasceu nos Estados Unidos e baseia-se na necessidade de emergir produtos renováveis provenientes de produtos vegetais/animais. Desta forma, os produtos biológicos podem não ser 100% biodegradáveis, mas devem ter origem agrícola e renovável.

Deve-se ter especial cuidado ao selecionar produtos verdes, estando ciente de que verde não significa necessariamente biodegradável. Por exemplo, ser verde ou livre de metais pesados, não torna um produto ecologicamente correto. Assim, para se classificar um produto como ecologicamente correto, requer que o mesmo seja biodegradável ou derivado de fontes renováveis [34].

Uma análise recente mostrou que os lubrificantes ecológicos são potenciais lubrificantes alternativos, devido à sua alta capacidade de carga, baixos valores de Coefficient of Friction (COF), alta temperatura de ignição, baixas taxas de evaporação, excelentes características anti-desgaste, alto índice de viscosidade, baixas emissões para a atmosfera e não tóxico tanto para humanos, como animais [35].

Um crescimento global de qualquer produto novo atrai por norma novos participantes e os lubrificantes biodegradáveis não são exceção. Os imperativos ambientais existentes obrigam a que haja a substituição de hidrocarbonetos prejudiciais ao meio ambiente, sempre que possível e quando o seu desempenho for tecnicamente igual ou melhor [36].

Com o aumento da regulação imposta pelas agências de fiscalização ambiental, aumentam as pressões e os custos para os derramamentos de lubrificante com base

de petróleo, logo os operadores começam a recorrer ou a considerar produtos ambientalmente mais seguros. O uso de lubrificantes biodegradáveis pode evitar multas e custos de limpeza [37].

Os critérios ambientais são projetados para garantir que os lubrificantes sejam qualificados com rótulo europeu ecológico, sendo os seus constituintes biodegradáveis, com baixa toxicidade aquática e que não bio acumulem [38].

Atualmente há cinco produtos biodegradáveis relevantes: lubrificantes de origem vegetal altamente insaturados ou com alto teor de oleico (HOVOs), polialfaolefinas de baixa viscosidade (PAOs), polialquilenoglicóis (PAGs), ésteres de ácido dibásico (DEs) e ésteres de polioli (PEs) [39]. Conforme o melhoramento do desempenho e da tecnologia, o mercado de lubrificantes ecológicos cresce, assim como a análise de novos parâmetros adicionais, como por exemplo, o ciclo de vida, intervalo de drenagem, redução de CO_2 e reciclabilidade [40].

2.8.1.1 Classificação

Os lubrificantes biodegradáveis classificam-se, de acordo com sua composição química, em dois grupos: lubrificantes orgânicos e sintéticos. Os primeiros, ou seja, os orgânicos são produzidos a partir de gorduras vegetais ou animais, enquanto os sintéticos usam lubrificantes orgânicos como matéria-prima, de modo a criar lubrificantes biodegradáveis mais evoluídos.

Processos como a síntese de éster, álcoois, polialcoóis, poliglicóis, éteres perfluoroalquílicos e outros, são capazes de integrar um lubrificante natural, de tal forma que o lubrificante biodegradável sintético exiba propriedades oxidativas, resistência ao desgaste e de lubrificação, ainda melhores do que as observadas em lubrificantes minerais. Todavia, os ésteres sintéticos também apresentam várias limitações, uma vez que a modificação química eleva o preço do lubrificante, aumenta ligeiramente a volatilidade e a toxicidade.

Os lubrificantes biodegradáveis apresentam maior qualidade e longevidade, relativamente aos minerais, além de diversas vantagens ambientais, mas o alto custo dos lubrificantes sintéticos com bases renováveis em relação aos minerais impede um crescimento ainda maior. No entanto, atualmente há falta de tecnologia capaz de produzir lubrificantes renováveis a custos competitivos e em volume necessário para o seu destaque no mercado da lubrificação [41].

2.8.1.2 Vantagens e desvantagens

As vantagens e desvantagens do uso de lubrificantes biodegradáveis apresentam-se na Tabela 5.

Tabela 5- Vantagens e desvantagens do uso de lubrificantes biodegradáveis (adaptado de [42])

Vantagens	Desvantagens
Menos tóxico	Instabilidade oxidativa
Lubrificantes de base mineral e sintética não se degradam eficientemente, prejudicando o meio ambiente. No entanto, os lubrificantes biodegradáveis são amigos do ambiente.	Uma das propriedades mais importantes dos lubrificantes é a estabilidade à oxidação, pois lubrificantes, com baixa estabilidade oxidativa, oxidam rapidamente a temperaturas elevadas, na presença de água.
Menor custo na remediação de derramamento	Alto ponto de fluidez
O custo é significativamente menor para a remediação de derramamento de lubrificantes biodegradáveis.	A fluidez de lubrificantes biodegradáveis não modificados, a temperaturas baixas, é inferior à dos lubrificantes de origem mineral ou sintética. O problema do ponto de fluidez, por exemplo, no caso da soja pode ser resolvido com aditivos ou mistura de outros fluidos, como lubrificantes sintéticos com pontos de fluidez mais baixos.
Lubrificação superior	Preço
Os lubrificantes de base biológica apresentam melhor lubrificação, pois tem um coeficiente de atrito muito menor em comparação com os lubrificantes minerais. Com a redução do atrito e desgaste, também pode ocorrer a eliminação de muitos aditivos, incluindo anti-desgaste e pressão extrema.	O preço elevado pode ser justificado em muitas aplicações onde a biodegradabilidade, lubrificação, viscosidade e segurança contra incêndio são cruciais.
Índice de viscosidade (IV) elevado	Difícil de reciclar
Quanto mais baixo for o índice de viscosidade (IV) de um lubrificante, maior será a alteração da viscosidade em temperaturas altas e baixas. Assim, os lubrificantes biodegradáveis com um elevado índice de viscosidade permanecem estáveis numa ampla faixa de temperaturas.	Há divergências sobre o quão reciclável é um lubrificante de base biológica. Apesar da execução de algumas tentativas para reciclar lubrificantes de base biológica, atualmente não é um fim lucrativo.

Tabela 5- Vantagens e desvantagens do uso de lubrificantes biodegradáveis (continuação)

Mais seguro

O ponto de inflamação de um lubrificante de soja é 326°C, enquanto o de um mineral é 200°C, reduzindo, assim, os riscos de incêndio em muitas aplicações, como por exemplo, na indústria metalomecânica, fundição e elevadores.

Renovável e amigo do ambiente

Para além da tentativa de independência do uso do petróleo, por parte da indústria dos lubrificantes, também há um interesse lucrativo, por parte dos agricultores, tanto nos biocombustíveis, como nos lubrificantes biodegradáveis.

2.8.1.3 Normas Europeias/internacionais

Um lubrificante ecológico define-se como um lubrificante de impacto neutro ou ligeiramente negativo, quando libertado no meio ambiente. Contudo, um lubrificante EAL implica que o mesmo respeite determinados requisitos, como as especificações exigidas pela VGP da Environmental Protection Agency (EPA): biodegradabilidade, toxicidade aquática mínima e não se acumula em peixes e outras formas de vida aquática [43]. Além disso, o lubrificante base usado provém de fontes renováveis, é de longa duração, sem espuma e projetado para proteger a vida útil de bombas e motores hidráulicos. Desta forma, oferece excelente proteção a baixas temperaturas, resiste à oxidação a altas temperaturas e pressões extremas, protegendo o material da corrosão [44].

A Tabela 6 representa as características e informações ambientais dos lubrificantes FUCHS.

Tabela 6- Características dos lubrificantes FUCHS (adaptado de [45])

Área de aplicação do lubrificante	EU Ecolabel	Lubrificantes especiais FUCHS	Características e informações ambientais
Hidráulica	Sim	PLANTOSYN 32 HVI PLANTOSYN 46 HVI PLANTOSYN 68 HVI	<ul style="list-style-type: none"> • ISO VG 32/46/68 • Alternativa ao lubrificante mineral convencional HLP/HVLP (hidráulicos) de acordo com DIN 51524-2 e 3 • ISO 15380: HEES (ésteres sintéticos saturados) • Facilmente biodegradável ($\geq 60\%$ pela OECD 301 B) • Rótulo Ecológico Europeu (EEL) • EAL • VGP e Small Vessel General Permit (sVGP) compatível
Hidráulica	Não	PLANTOHYD N 32 NA PLANTOHYD N 40 NA	<ul style="list-style-type: none"> • ISO VG 32/46 • Alternativa ao lubrificante mineral convencional HLP/HVLP (hidráulicos) de acordo com DIN 51524-2 e 3 • ISO 15380: HETG (ésteres de trigiléridos) • Facilmente biodegradável ($\geq 60\%$ pela OECD 301 B) • Com base em substâncias naturais renováveis, por exemplo, óleo vegetal

Tabela 6- Características dos lubrificantes FUCHS [continuação]

Engrenagens	Sim	PLANTOGEAR 68 S	<ul style="list-style-type: none"> • ISO VG 68/100/150/220/320/460/680
		PLANTOGEAR 100 S	<ul style="list-style-type: none"> • DIN 51517-3: CLP AGMA 9005 / E02: EP
		PLANTOGEAR 150 S	<ul style="list-style-type: none"> • Facilmente biodegradável (≥ 60% pela OECD 301 B)
		PLANTOGEAR 220 S	<ul style="list-style-type: none"> • Com base em ésteres saturados especiais
		PLANTOGEAR 320 S	<ul style="list-style-type: none"> • Rótulo Ecológico Europeu (EEL)
		PLANTOGEAR 460 S	<ul style="list-style-type: none"> • EAL
		PLANTOGEAR 680 S	<ul style="list-style-type: none"> • VGP e sVGP compatível
Engrenagens abertas	Não	CEPLATTYN ECO 300	<ul style="list-style-type: none"> • NLGI 1 • Biodegradabilidade >95%
Cabo de aço	Sim	CEPLATTYN R-VGP	<ul style="list-style-type: none"> • NLGI 1 • Biodegradabilidade >80% • EEL • EAL • VGP e sVGP compatível
Multiusos	Sim	PLANTOGEL ECO 2 S	<ul style="list-style-type: none"> • NLGI 2 • Facilmente biodegradável ≥60%
		PLANTOGEL ECO 2 N	<ul style="list-style-type: none"> • EEL • EAL • Compatível com VGP e sVGP
Ferrovíarios	Não	LOCOLUB ECO	<ul style="list-style-type: none"> • NLGI 000 • Biodegradabilidade >60%
Várias aplicações	Não	MEISSELPASTE BIO	<ul style="list-style-type: none"> • NLGI 1-2 • Biodegradabilidade ≥79%
Marítimos	Não	STABYL LG 2 BIO	<ul style="list-style-type: none"> • NLGI 2 • Biodegradabilidade >70%

Apesar de nem todos os países exigirem o cumprimento de regulamentos, com fins ambientais, há diversas associações amigas do ambiente, como:

- A OSPAR, constituída por 15 governos, investe na proteção do meio marinho do Nordeste do Atlântico;

- O Offshore Chemical Notification Scheme (OCNS) gere os produtos químicos utilizados pelas indústrias de petróleo do Reino Unido e Holanda;
- O Centre for Environment Fisheries and Aquaculture Science (CEFAS) avalia os dados de cada componente químico presente num fluido, no Harmonised Offshore Chemical Notification Format (HOCNF), e emite uma classificação de E a A; sendo o E o melhor;
- A Norwegian Ministry of the Environment (KLIF) solicita que o HOCNF seja preenchido e enviado para uma lista no banco de dados Nanoelectromechanical Systems (NEMS), onde o pessoal restrito tem permissão para aceder a informações do produto e emitir uma faixa colorida. Uma faixa de cor verde é a melhor disponível e uma faixa amarela é a faixa desejável para fluidos Environmentally Sound Hydraulic Fluids (ESHF);
- O Department of Energy and Climate Change (DECC) do Reino Unido e o CEFAS juntam-se de forma a emitir licenças de operação. O Ministério de Assuntos Económicos (MEA) da Holanda coopera com a SODM para a emissão de licenças. O Norwegian Petroleum Directorate (NPD) apoia a KLIF na emissão de licenças [46].

A Tabela 7 compara os programas EAL disponíveis, através das suas propriedades ambientais.

Tabela 7- Programas EAL (adaptado de [43])

Programa EAL	Biodegradabilidade	Toxicidade aquática	Bioacumulação	Outros critérios
Blue Angel	OECD 301B-F ou CEC L-33-A-934	OECD 201-203	OECD 305 A-E ou Kow	Materiais perigosos; Desempenho técnico
Swedish Standard	ISO 9439	Não disponível	Nenhuma	Conteúdo renovável
Nordic Swan	Não disponível	OECD 201-202	Nenhuma	Conteúdo renovável; Desempenho técnico
European Eco-label	OECD 301 A-F, OECD 302C ou ISO 14593	OECD 201 e 202, OECD 210 ou 211	OECD 107, 117, 123 ou OECD 305	Materiais perigosos; Substâncias restritas; Conteúdo renovável; Desempenho técnico
OSPAR	OECD 306	Toxicidade marinha em quatro espécies	OECD 117 ou 107 (Kow)	-

2.8.1.4 *Lubrificantes biodegradáveis no futuro*

Futuramente, os consumidores optarão por lubrificantes de base biológica, face aos convencionais com base de petróleo. Apesar do elevado custo da compra inicial, os custos de energia reduzidos (resultantes da boa lubrificação dos lubrificantes biodegradáveis), compensarão o investimento. As principais aplicações de lubrificantes de origem biológica em percentagem são: 15-30% em parafusos de rosca sem fim, 2-7% em compressores, 2-3% em equipamento para moldes de injeção, 1-5% em engrenagens retas e 1-3% na hidráulica.

O desenvolvimento de matérias-primas mais baratas é fundamental para auxiliar o estudo de lubrificantes biodegradáveis. A colaboração contínua entre fabricantes de lubrificantes, OEMs, consumidores e organizações de teste é essencial para garantir padrões de desempenho e protocolos de teste. O respeito pelas normas adequadas da organização de padrões internacionais como ASTM e ISO é indispensável na definição dos critérios de desempenho para lubrificantes de origem biológica. Para além disso, a realização de testes, segundo as normas, é elementar para persuadir os fabricantes e operadores dos méritos dos lubrificantes biodegradáveis [47].

2.8.2 *Reutilização de lubrificantes*

O recurso a lubrificantes reutilizados como fonte de energia tem demonstrado ser um dos melhores métodos de gestão de resíduos disponíveis [48].

Os lubrificantes reutilizados dividem-se em cinco classes: limpos, misturados com lubrificantes limpos, mistos, totalmente reutilizados e outros.

Dentro dos lubrificantes reutilizados limpos encontram-se os lubrificantes para a indústria metalomecânica e hidráulica. Esta classificação de lubrificante caracteriza-se por voltar a ser refinada e cuidada.

Os lubrificantes reutilizados misturados com lubrificantes limpos incluem os lubrificantes hidráulicos e destacam-se por serem regenerados e refinados mais uma vez.

Através de um processo de gaseificação originam-se os lubrificantes reutilizados mistos. Este processo recorre ao uso de um jato de plasma equipado com incineradores com controlo de temperatura, para a produção de gases como o oxigênio, hidrogénio, monóxido de carbono, entre outros.

Os lubrificantes totalmente reutilizados são fabricados através de três processos: processamento intensivo, suave e incineração direta.

Os outros tipos de lubrificantes reutilizados são os lubrificantes sintéticos [49].

2.9 Estado da arte

Na Tabela 8 apresenta-se toda a informação relativa ao estado da arte do principal foco deste tema, comparação entre lubrificantes biodegradáveis e não biodegradáveis.

Tabela 8- Estado da arte dos lubrificantes

Referências bibliográficas	Descrição do trabalho
(Singh et al., 2020) [50]	<p>O objetivo deste estudo foi recorrer a várias metodologias de lubrificação e arrefecimento durante a maquinagem, analisando o seu potencial sustentável. Os resultados mostraram avanços consideráveis nas técnicas de lubrificação e arrefecimento nos processos de maquinagem, de forma económica, ecológica e sustentável. Além disso, as últimas tendências relatam que a aplicação de nano-fluidos, líquidos iônicos, lubrificantes biodegradáveis em tecnologias de refrigeração e maquinagem híbrida têm fortalecido a utilidade dessas técnicas.</p> <p>Desta forma, a maquinagem de materiais mais duros é agora permitida, a uma velocidade mais elevada na indústria 4.0.</p>
(H. Liu et al., 2020) [51]	<p>Há diversos estudos, teóricos e experimentais, relativos à lubrificação de engrenagens, com especial atenção à modelação da lubrificação e composição dos lubrificantes. Devido a melhorias nos métodos e condições de lubrificação em engrenagens, pode existir redução do atrito, desgaste, cortes e ainda aumento da vida útil à fadiga. Este trabalho analisa a lubrificação de engrenagens (com foco na sua eficiência) e a fadiga, tanto de contacto, como dinâmica.</p>
(F. J. Owuna, 2020) [52]	<p>Os lubrificantes de origem biológica e vegetal são eco compatíveis. Todavia, são considerados instáveis, em termos térmicos e oxidantes. O objetivo deste artigo é reavaliar vários trabalhos académicos sobre a estabilidade térmica e oxidativa destes lubrificantes e assim, validar a sua aplicação como potencial fonte de energia renovável, a fim de substituir fontes de energia de base mineral.</p>

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 LUBRIFICANTES A TESTAR

3.2 PROPRIEDADES FÍSICAS DOS QUATRO LUBRIFICANTES

3.3 ENSAIOS TRIBOLÓGICOS

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Lubrificantes a testar

Inicialmente, procurou-se selecionar óleos para lubrificar engrenagens/rolamentos, o que acabou por se tornar pouco viável temporal e financeiramente. Assim, o que foi possível encontrar em tempo útil e financeiramente viável foram os óleos hidráulicos, nomeadamente, o Hidra-atox 46 (Sintético e não tóxico), Hidrosecur D-46 (Sintético e biodegradável), Hydroflux EP 46 (Mineral) e Plantohyd 40 N (Sintético e biodegradável).

3.1.1 Hidra- atox 46

O lubrificante Hidra-atox 46 da Beslux (Figura 13) é um lubrificante hidráulico sintético, de origem vegetal (com aditivos), com aplicação na indústria alimentar devido à sua não toxicidade¹.



Figura 13- Lubrificante sintético Hidra- atox 46

A Tabela 9 apresenta as características técnicas do lubrificante Hidra-atox 46.

¹ Consultar o Anexo 7.1

Tabela 9- Especificações técnicas do lubrificante Hidra-atox 46

Características	Valor	Unidade
Grau ISO VG	46	-
Viscosidade a 40°C	41,4-50,6	cSt
Índice de viscosidade	193	-
Ponto de inflamação	275	°C
Índice de desemulsificação	40/35/5 (30') Máx.	-
Ponto de congelação	-30	°C

3.1.2 Hidrosecur D-46

O Hidrosecur D-46 da Beslux (Figura 14) é um lubrificante hidráulico biodegradável, constituído por ésteres sintéticos de elevado ponto de inflamação, boas propriedades de lubrificação e longa duração. Cumpre os requisitos impostos pela norma ISO 6743/4 de um lubrificante hidráulico resistente ao fogo, na categoria HFDU. Desta forma, as aplicações deste lubrificante abrangem todo o domínio das instalações hidráulicas que funcionam junto a uma fonte de calor, evitado assim, a dispersão de fogo em caso de fuga do lubrificante. Tem um elevado nível de biodegradabilidade, pelo que pequenos vazamentos não criam problemas de contaminação ambiental em solos e ambiente aquático.



Figura 14- Lubrificante biodegradável Hidrosecur D-46

A Tabela 10 mostra as especificações técnicas do lubrificante Hidrosecur D-46².

² Consultar o Anexo 7.2

Tabela 10- Especificações técnicas do lubrificante Hidrosecur D-46

Características	Valor	Unidade
Densidade a 20°C	0,9260	-
Viscosidade a 40°C	49-55	cSt
Índice de viscosidade	185	-
Ponto de inflamação	290	°C
Ponto de auto-ignição	400	°C
Ponto de congelação	-21	°C
NN	0,5	mgKOH/g
Temperatura de utilização	-15 a 100	°C
Biodegradabilidade	>85	%

3.1.3 Hydroflux EP 46

O lubrificante mineral Hydroflux EP 46 (Figura 15), produzido pela Repsol, pertence a uma gama de lubrificantes hidráulicos de uso geral.

São lubrificantes adequados para a maior parte dos circuitos hidráulicos, incluindo aqueles que exigem especial proteção anti-desgaste, como por exemplo, básculas e maquinaria de obras públicas (com independência do tipo de bomba com o qual estejam equipados e das pressões a que trabalham). É caracterizado por ser resistente à oxidação, envelhecimento e formação de lodos; baixo ponto de congelação; alto índice de viscosidade; compatível com juntas; boas propriedades anti-espuma e anti-desgaste e fácil separação da água.

Este lubrificante cumpre as seguintes normas de qualidade: DIN-51524 Parte 2 HLP, ISO 6743/4 HM, ISO 11158, AFNOR NF E 48-603 HL, HM e ENSAIO FILTRABILIDADE AFNOR NF E 48-690 e 48-691³.

³ Consultar o Anexo 7.3



Figura 15- Lubrificante sintético Hydroflux EP 46

As especificações técnicas do lubrificante Hydroflux EP 46 encontram-se na Tabela 11.

Tabela 11- Especificações técnicas do lubrificante Hydroflux EP 46

Características	Norma	Valor	Unidade
Grau ISO VG	ASTM D 2422	46	-
Viscosidade a 100°C	ASTM D 445	6,7	cSt
Viscosidade a 40°C	ASTM D 445	46	cSt
Índice de viscosidade	ASTM D 2270	97	-
Densidade a 15°C	ASTM D 4052	0,8760	-
Ponto de inflamação	ASTM D 92	231	°C
Ponto de congelação	ASTM D 97	-24	°C
Desgaste 4B, diâmetro gota	ASTM D 4172	0,45	mm
Res. Oxidação, NN a 1500 h	ASTM D 943	<2	mgKOH/g
Desemulsificação (54 °C/82 °C)	ASTM D 1401	<20	min

3.1.4 Plantohyd 40 N

O Plantohyd 40 N é um lubrificante hidráulico de alta performance da FUCHS (Figura 16), compatível com o meio ambiente à base de matérias-primas naturais e pode ser aplicado em equipamentos hidráulicos móveis e estacionários, para os quais seja necessário um ISO VG 32 ou ISO VG 46, respetivamente. É constituído por aditivos, de modo a melhorar a estabilidade ao envelhecimento, proteção anti-corrosiva e anti-desgaste do lubrificante base. Este lubrificante apresenta excelente biodegradabilidade, sendo uma alternativa compatível com o meio ambiente para os fluidos hidráulicos, com base em lubrificantes minerais (a baixas e médias cargas).

Derivado à sua elevada polaridade, o Plantohyd 40 N cumpre os requisitos mínimos de acordo com a ISO 15380 (HETG), sendo premiado com o selo ambiental da Blue Angel⁴.

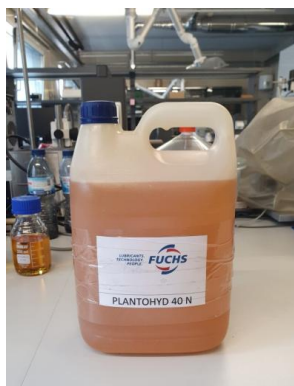


Figura 16- Lubrificante biodegradável Plantohyd 40 N

A Tabela 12 mostra as características técnicas do lubrificante Plantohyd 40 N.

Tabela 12- Especificações técnicas do lubrificante Plantohyd 40 N

Características	Norma	Valor	Unidade
ISO VG	DIN 51519	46	-
Viscosidade Cinemática a -20°C		1444	cSt
Viscosidade Cinemática a 0°C	DIN EN ISO 3104	430	cSt
Viscosidade Cinemática a 40°C		44	cSt
Viscosidade Cinemática a 100°C		9,6	cSt
Índice de Viscosidade	DIN ISO 2909	211	-
Densidade a 15°C	DIN 51 757	0,9220	g/cm^3
Ponto de Inflamação	DIN ISO 2592	306	°C
Ponto de Fluxão	DIN ISO 3016	-36	°C
NN	DIN 51 558-1	0,4	mgKOH/g
FZG A/8, 3/90	DIN ISO 14635-1	>12	Estágio de carga de rotura
Mudança de Volume Relativo	DIN ISO 1817	0,5	%
Alteração da Dureza "Shore-A"	DIN ISO 1817	-2	Shore

⁴ Consultar o Anexo 7.4

3.2 Propriedades físicas dos quatro lubrificantes

3.2.1 Densidade

A densimetria tem como objetivo apresentar uma ordem de ações a seguir, de maneira a medir a massa volúmica (g/cm^3) de um lubrificante. Esta medição é realizada, através de um densímetro (Figura 17), para avaliar possíveis variações e também converter a viscosidade dinâmica em cinemática. O intervalo de temperaturas de funcionamento deste aparelho encontra-se entre 15 e 40°C, o que se adequa para se conseguir obter resultados do fluido à temperatura ambiente.



Figura 17- Densímetro Portátil DMA 35N da Anton Paar

É fundamental ter noções das regras a respeitar, relativas à medição:

- A amostra não deve conter nenhuma bolha de ar na parte do tubo onde se situa a célula de medição;
- A célula de medição deve estar completamente preenchida pela amostra;
- É necessário limpar cuidadosamente a célula de medição, após cada série de medições realizadas, para evitar depósitos acumulados;
- A gama de temperatura de medição situa-se entre 0 e 40°C, caso a amostra esteja a uma temperatura superior, recomenda-se que se aguarde até que esta arrefeça e o resultado no *display* seja mostrado de forma permanente (e não intermitente).

Na execução da medição da densidade deve-se:

- Verificar o estado de limpeza dos tubos onde circula a amostra (se preciso proceder à passagem de um solvente compatível com os componentes do equipamento: heptano ou éter de petróleo);

- Ligar o densímetro e pressionar o pistão da bomba na seringa até ao limite;
- Mergulhar a extremidade do tubo na amostra e soltar lentamente o pistão da seringa;
- Confirmar que o tubo capilar na célula de medição está completamente preenchido e isento de bolhas de ar;
- Registrar o valor medido para a densidade, assim como a temperatura [53].

3.2.2 Viscosidade

Para a viscosimetria (medição da viscosidade) de um lubrificante, através da obtenção das curvas de viscosidade dinâmica vs temperatura, utilizou-se um viscosímetro de vidro de onda senoidal SV-10 (Figura 18). Todavia, foi necessário preparar previamente as amostras, fazer o pós-procedimento da medição e resultados e a calibração do dispositivo.

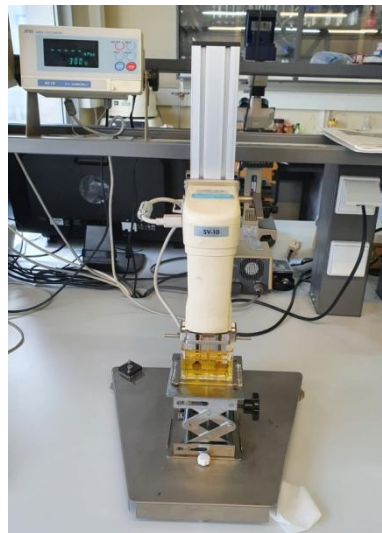


Figura 18- Viscosímetro de vidro de onda senoidal SV-10

É imprescindível tomar precauções durante o uso, nomeadamente:

- Nivelar a superfície da amostra (ajustando o nível dos pés, de forma a que o centro da parte estreita dos sensores da placa direita e esquerda fique na superfície do líquido);
- Ter em conta as mudanças de temperatura do líquido para a medição (a viscosidade de um líquido depende da temperatura e muda entre dois e dez por cento negativos, por grau Celsius);
- Calibrar recorrendo a um fluido de viscosidade padrão ou água purificada antes da medição (se se tratar de uma medição que demore muito tempo é essencial fazer a calibração periodicamente, as vezes que forem necessárias);
- Colocar as placas do sensor e o sensor de temperatura na amostra pode alterar a temperatura da amostra, deste modo para uma medição precisa é

fundamental deixar a amostra intacta por um tempo, antes de iniciar a medição;

- Garantir uma fonte de alimentação estável, usando um adaptador AC;
- Usar apenas o dedo para pressionar as teclas (um instrumento pontiagudo, como uma caneta, pode danificar as teclas);
- O copo que contém a amostra é feito de policarbonato (PC) e não é apropriado para solventes orgânicos. No entanto, se o fluido da amostra se tratar de um solvente orgânico utiliza-se um copo de vidro (AX-SV-35) [54].

3.2.2.1 Preparação das amostras

Na fase da preparação das amostras é crucial respeitar as seguintes medidas:

- Verter a amostra no copo (Figura 19) até que esta atinja o medidor de nível no copo (recolher uma amostra de teste de pelo menos quarenta de cinco ml);

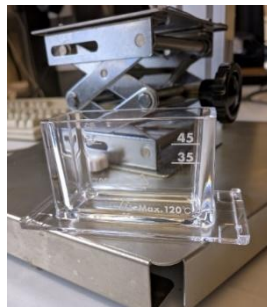


Figura 19- Copo de amostra de PC [54]

- Aquecer o copo com a amostra até uma temperatura de $115 \pm 5^\circ\text{C}$;
- Fixar o copo na mesa ao longo das guias (Figura 20);

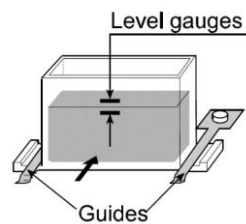


Figura 20- Copo e guias [54]

- Confirmar se o protetor está na posição conforme mostrado na Figura 21;

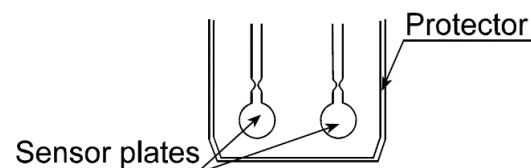


Figura 21- Placas de sensores e protetor [54]

- Tal como se pode observar na Figura 22, é necessário levantar a alavanca soltando o sensor, apertar as garras, apoiar a parte frontal do sensor, baixar as placas do sensor acima da superfície da amostra e por fim, baixar a alavanca prendendo o sensor;

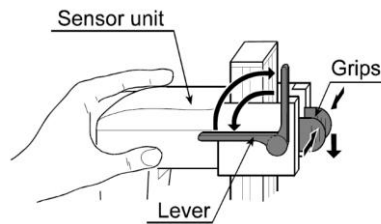


Figura 22- Mecanismo de suporte [54]

- Seguir como referência a Figura 23, rodando o manípulo sobre a mesa, de maneira a ajustar a superfície da amostra ao centro da parte estreita das placas de sensores;
- De seguida, usar a placa localizadora de superfície como guia, fixando-a numa posição em que a ponta da placa localizadora da superfície entre em contacto com a superfície da amostra;
- Garantir o ajustamento da superfície da amostra ao centro da parte estreita das placas do sensor (pode ser fixa ou removida através de um parafuso), caso contrário, pode ocorrer um erro de medição;
- Antes de remover a tampa protetora do sensor, é essencial remover a placa localizadora de superfície;
- Quando a placa localizadora de superfície for removida e fixa novamente, é recomendado que a calibração seja realizada usando o fluido de viscosidade padrão antes da medição;

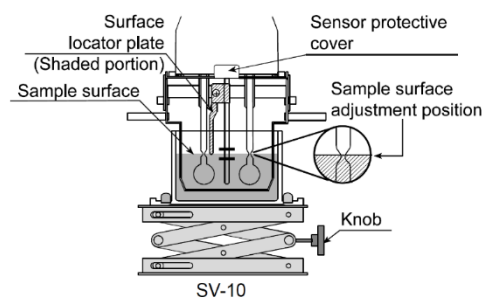


Figura 23- Ajuste da amostra [54]

- Com o equipamento desligado, pressionar o botão “ON: OFF” para ligar o equipamento (Figura 24);

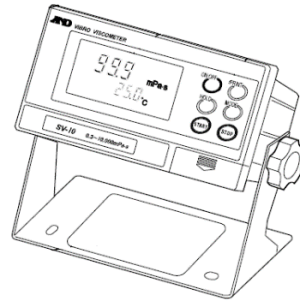


Figura 24- Consola do equipamento [54]

- Iniciar o computador e abrir o *software* denominado “RsVisco” (Figura 25);
- Selecionar as opções: “Visco/Temp” e “Auto Stop” “quarenta e cinco minutos”;
- Para obter uma curva de viscosidade dinâmica vs temperatura, pressionar o botão *START* na janela do *software*;
- Quando terminada a medição: guardar o arquivo no diretório desejado utilizando o menu “File (F)> Save as” [54].

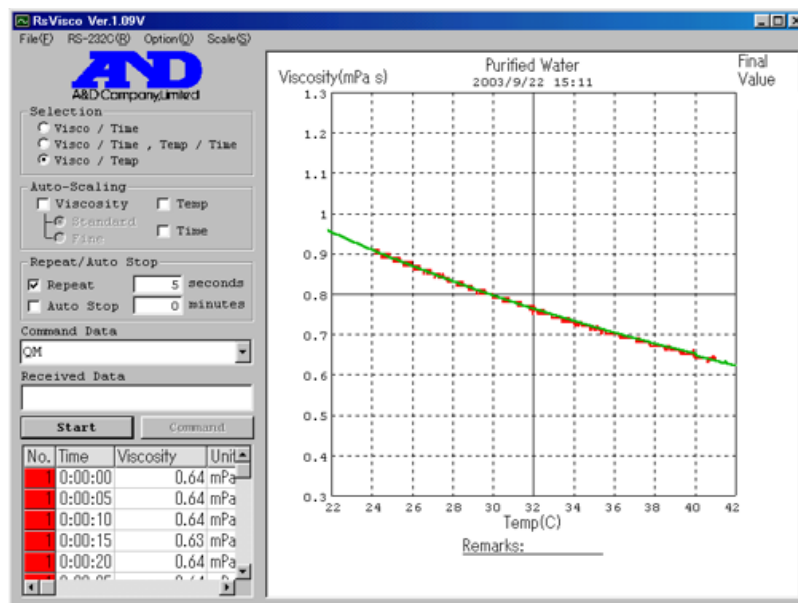


Figura 25- Janela “RsVisco” [54]

3.2.2.2 Pós-procedimento de medição

Após a realização da medição é preciso cumprir os seguintes passos:

- Desligar o viscosímetro pressionando o botão *ON: OFF*;
- Levantar a alavanca soltando o sensor, apertar as garras, apoiar a parte frontal do sensor, baixar as placas do sensor acima da superfície da amostra, e finalmente, baixar a alavanca prendendo o sensor;
- Retirar o copo da mesa ao longo das guias (Figura 26);

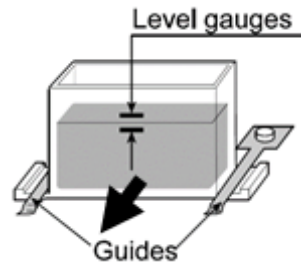


Figura 26- Copo e guias [54]

- Limpar as placas do sensor, o sensor de temperatura e o protetor com um agente de limpeza ou solvente, para remover os resíduos da amostra (limpar o mais rapidamente possível após a medição, especialmente se for uma amostra de cura);
- Limpar o copo da amostra (se o agente de limpeza não for volátil, limpar com água purificada, para não afetar a próxima medição da amostra);
- Limpar conforme a Figura 27: segurar a placa do sensor levemente com um lenço de papel entre os dedos e limpar qualquer resíduo na amostra com o lenço, deslizando-o de cima para baixo;
- Ter em atenção que se deslizar de baixo para cima, a placa do sensor pode ficar torta e/ou danificada;
- Seguidamente, molhar o lenço de papel com um agente de limpeza ou solvente. Limpar com água purificada, se necessário. Normalmente, as placas do sensor, sensor de temperatura ou protetor não serão danificados se pressionados levemente entre os dedos. No entanto, recomenda-se enfaticamente que não se aplique nenhuma força ou pressão anormal ou desnecessária sobre eles. Se o resíduo da amostra for difícil de limpar, usar um produto ultrassônico.

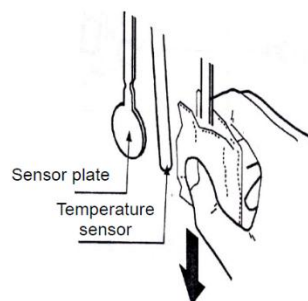


Figura 27- Procedimento de limpeza [54]

- Limpar o copo de amostra conforme necessário;
- Fechar o *software* "RsVisco" e desligar o computador [54].

3.2.2.3 Pós-processamento dos resultados

A fim de obter o valor absoluto da viscosidade dinâmica (Pa·s) o valor que é medido e armazenado deve ser corrigido usando a densidade da amostra, a cada temperatura correspondente, tal como apresentado na Equação 8 [54].

$$\eta = \frac{\text{Valor de viscosidade medido}}{\text{Densidade da amostra à temperatura correspondente}} \quad \text{Equação 8}$$

3.2.2.4 Calibração do dispositivo

A calibração da viscosidade serve para corrigir o valor da mesma. Com o viscosímetro SV-10, pode-se recorrer à calibração simplificada usando água purificada. O SV-10 possui uma função incorporada para realizar uma compensação automática de temperatura no valor da viscosidade, com base na temperatura da água purificada utilizada.

Antes de se executar a calibração do dispositivo deve-se ter em atenção aos seguintes fatores:

- Prestar atenção à temperatura do líquido na calibração, inserir o valor de viscosidade da temperatura do líquido na calibração (um fluido de viscosidade padrão tem uma mudança de viscosidade de -2% /°C a -10% /°C e a água purificada tem uma mudança de viscosidade de -2% /°C, quando a temperatura ambiente muda);
- A temperatura do fluido de viscosidade padrão deve ser igual à temperatura das placas do sensor e do sensor de temperatura (deixar a temperatura exibida estabilizar antes da calibração);
- Ajustar a superfície da amostra ao centro da parte estreita das placas do sensor, caso contrário, pode ocorrer um erro de medição;
- No modo de calibração a unidade de viscosidade para o SV-10 é mPa·s;
- A unidade de temperatura é em °C;
- Se a água usada para a calibração simplificada não for água purificada (como por exemplo, água da torneira), ou a temperatura da água for diferente da temperatura ambiente, podem formar-se bolhas nas placas do sensor e causar um erro de medição. Deve-se então, permitir que a amostra se ajuste à temperatura ambiente e remover todas as bolhas acumuladas antes da calibração.
- Se a viscosidade medida da água for 3 mPa·s ou mais, há contaminação e a calibração simplificada não pode ser realizada. Assim sendo, deve-se substituir a água.

Para a realização da calibração simplificada, com água purificada é preciso ter em conta os seguintes passos:

- Colocar a água purificada no copo de amostra;
- Pressionar a tecla *START* para medir a água purificada (confirmar se os valores de viscosidade e temperatura estão estabilizados);
- Pressionar e segurar a tecla *START*;
- O valor teórico da viscosidade (Viscosidade × Densidade) da água purificada na temperatura de medição é exibido e todos os indicadores piscam;
- Para cancelar a operação, pressionar a tecla *STOP* (o *display* volta ao estado inicial antes da calibração);
- Pressionar a tecla *START* novamente para realizar a calibração quando a calibração é concluída (o "end" é exibido e em seguida, a viscosidade retorna ao modo de medição) [54].

Na Figura 28 o método de calibração simplificado é mostrado sob a forma de um gráfico de fluxo.

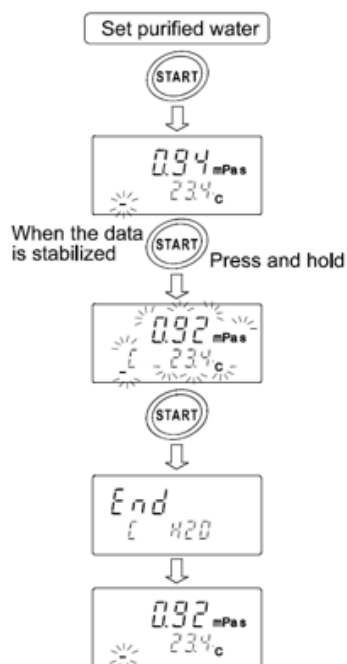


Figura 28- Gráfico de fluxo [54]

3.2.3 FTIR

O termo espectroscopia molecular cobre uma infinidade de técnicas analíticas, algumas dessas técnicas, como o *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR), são bastante comuns, em diversas aplicações [55]. O FTIR recorre à radiação infravermelha e quando a mesma atravessa uma amostra, parte da radiação é absorvida pela amostra, enquanto a outra parte é transmitida ou refletida.

Com o desenvolvimento do FTIR, a análise molecular por infravermelho dos espectros tornou-se comum para os lubrificantes nos laboratórios de análise [56].

Os espectros de FTIR foram extraídos, numa gama de comprimento de onda completa (de 650 a 4000 cm^{-1}), através do dispositivo Agilent Cary 630 FTIR (Figura 29) e do acessório ATR (refletância total atenuada). Selecionou-se a opção 3 que mede espessuras de filme até duzentos nm, de maneira a observar os picos com maior detalhe, o que faz com que a saturação dos picos ocorra. As amostras foram analisadas pela comparação direta da altura dos picos de oxidação, característicos entre os espectros das amostras, obtidos diretamente pelo *software* do dispositivo, sem suavização e com uma reprodutibilidade muito boa [10].

Para a realização de cada medição, as superfícies foram previamente limpas com um solvente apropriado (heptano). O sistema assegura e confirma a limpeza antes do início da medição.



Figura 29- Agilent Cary 630 FTIR

3.2.4 Ferrometria

A medição do índice de concentração de partículas ferrosas faz-se através do ferrógrafo de leitura direta DRIII. A descrição dos procedimentos para a análise de lubrificantes, por ferrometria de leitura direta (Figura 30), é diferente para amostras normais, opacas, massas lubrificantes e de elevada viscosidade. Nesta dissertação procedeu-se à ferrometria de leitura direta para amostras normais, tendo sido necessária a diluição de uma das amostras [57].

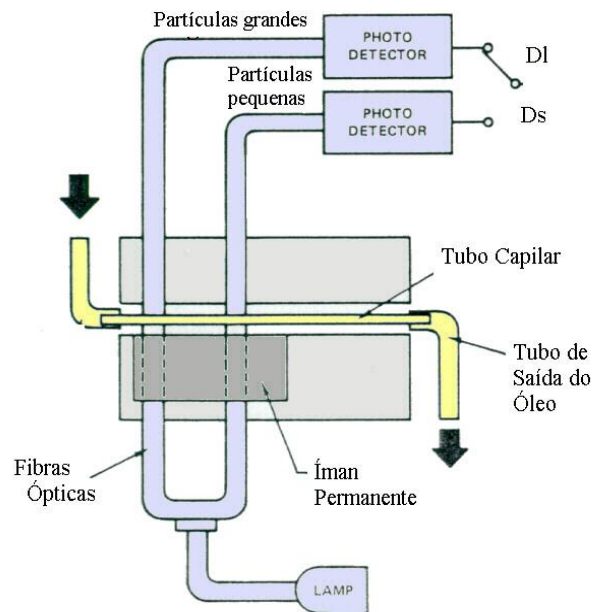


Figura 30- Ferrografo de leitura direta DRIII [57]

3.2.4.1 Procedimento para uma amostra normal

O procedimento para uma amostra normal deve respeitar as seguintes instruções:

- Ligar o DRIII pelo menos trinta minutos antes de iniciar um teste;
- O frasco da amostra deverá ser de vidro transparente (incolor) e deverá ter uma capacidade de pelo menos 1/3 maior que o volume da amostra;
- Aquecer a amostra aproximadamente a 65°C (durante trinta minutos);
- Agitar bem o frasco contendo a amostra, de modo a proporcionar uma boa homogeneização das partículas no óleo (o tempo e o modo de agitação deverão ser constantes para todos os testes);
- Preparar um tubo de ensaio limpo;
- Colocar exatamente 1 ml da amostra do óleo a analisar no tubo de ensaio;
- Introduzir uma pipeta limpa no "pipete *dispenser*";
- Pressionar a mola até ao fim;
- Introduzir a pipeta dentro da amostra a testar e lentamente libertar a mola (até ao líquido estabilizar no interior do tubo);
- Pôr a pipeta dentro do tubo de ensaio e pressionar novamente a mola até à primeira paragem, marcada com o número um;
- Colocar exatamente 1 ml de solvente no tubo de ensaio;
- Introduzir o tubo de ensaio por baixo do tubo do frasco que contém o solvente e puxar lentamente para cima o "*dispenser*" até ao máximo;
- Pressionar para baixo o "*dispenser*", recolhendo exatamente 1 ml de solvente;

- Misturar cuidadosamente o óleo da amostra com o solvente no tubo de ensaio (se necessário tapar o tubo com um material não contaminante);
- Colocar o tubo de ensaio num dos suportes existentes no DRIII;
- Introduzir devidamente o tubo de plástico no DRIII:
- Levantar a mola existente na área de teste do DRIII, colocando a parte do tubo que é em vidro no espaço que lhe é destinado (note uma pequena cavidade circular onde o tubo assenta);
- O indicador luminoso "*Insert Tube*" será desligado e o "*Prime*" acenderá;
- Encaixar a extremidade de maior diâmetro do tubo no orifício;
- Levar a outra extremidade do tubo de plástico ao tubo de ensaio, contornando o guia do tubo;
- Fixar o tubo na mola inferior;
- Mergulhar a extremidade do tubo de plástico bem no fundo do tubo de ensaio, fixando de seguida o tubo de plástico na mola superior;
- Pressionar o botão;
- A luz indicadora "*Prime*" apagará e por sua vez os indicadores "*DL Zero*" e "*DS Zero*" acendem, o que quer dizer que o DRIII está a fazer a calibração para o teste a realizar;
- Após a calibração ter sido feita o "*Ds Zero*" apagará novamente;
- Rodar lentamente o botão no sentido dos ponteiros do relógio até completar uma volta inteira; a análise inicia-se e o óleo circula no tubo de plástico;
- Registar o valor indicado de DL e DS quando o restante dos 2 ml da mistura alcançar um ponto entre o guia do tubo e a mola inferior;
- Rodar o botão lentamente no sentido dos ponteiros do relógio até toda a mistura ter passado na área de teste;
- Por fim, retirar o tubo de plástico da área de teste, assim como o tubo de ensaio e a pipeta antes de iniciar outro teste [57].

3.2.4.2 Procedimento para uma diluição

A resposta do DRIII é considerada linear quando os valores dos índices DL e DS não ultrapassam o valor 100. Por vezes, em óleos bastante contaminados, devido a grandes quantidades de partículas, isso não acontece. Para esses óleos será necessário fazer uma diluição, procedendo do seguinte modo (Figura 31):

- Aquecer aproximadamente a 65° C a amostra a diluir;
- Agitar bem o frasco contendo a amostra, de modo a haver uma boa homogeneização das partículas no óleo;
- Retirar 1 ml da amostra para um frasco limpo;
- Adicionar a esse 1 ml de amostra 9 ml de óleo filtrado;
- Misturar bem as duas soluções.

Assim, obtém-se uma diluição de 1:10. Para uma diluição 1:100, repetem-se novamente todos os passos citados, usando a solução realizada anteriormente.

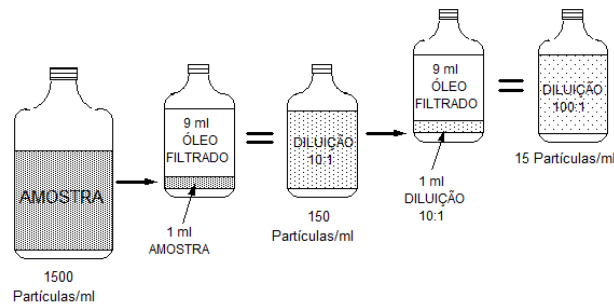


Figura 31- Diluição de uma amostra [57]

Para uma melhor dispersão das partículas no óleo, a diluição poderá ser feita nas seguintes proporções: 1 ml de amostra + 1 ml de solvente + 8 ml de óleo filtrado [57].

3.3 Ensaios tribológicos

3.3.1 Ensaio bola/disco

O comportamento tribológico das amostras de lubrificante foi caracterizado, pelo ensaio bola/disco, o que permitiu a obtenção das medições de espessura do filme lubrificante e das curvas de tração e de Stribeck.

O equipamento EHD2 (Figura 32), produzido pela PCS Instruments, concede a medição da espessura do filme lubrificante, através do ensaio bola/disco, em diferentes condições de temperatura, velocidade, carga e SRR (relação entre a velocidade de deslizamento e velocidade média do rolamento).



Figura 32- EHD2 PCS Instruments

Trata-se de um instrumento controlado por computador, totalmente automatizado, para medir a espessura do filme e o coeficiente de atrito de lubrificantes no regime de lubrificação elastohidrodinâmica. O instrumento pode medir a espessura do filme lubrificante até 1 nm com uma precisão de cerca de 1 nm.

O instrumento mede as propriedades da espessura do filme lubrificante no contacto formado entre uma esfera de aço de $\frac{3}{4}$ " (19,05 mm) de diâmetro e um disco de vidro rotativo por interferometria ótica. A espessura do filme lubrificante em qualquer ponto da imagem pode ser calculada com precisão, medindo o comprimento de onda da luz naquele ponto. O sistema mede o comprimento de onda da luz retornada do centro do contacto e, deste modo, calcula a espessura do filme central [58].

3.3.1.1 Medição de espessuras do filme lubrificante

A medição da espessura do filme lubrificante recorre à técnica da interferometria. A luz incide no contacto entre a esfera e o disco e parte dessa luz é refletida (parte inferior do disco de vidro, de 5 nm de rugosidade), enquanto a outra parte atravessa o filme do lubrificante e só depois é então refletida de volta na esfera de aço (de 20 nm de rugosidade). Assim, como os dois feixes de luz percorrem distâncias diferentes, criam uma imagem de interferência a partir da qual a espessura do filme central pode ser calculada. Os parâmetros requeridos por este ensaio são: o raio, rugosidade, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, carga e pressão [10].

Para a realização de cada ensaio utilizou-se 120 ml de cada amostra de lubrificante (Figura 33).

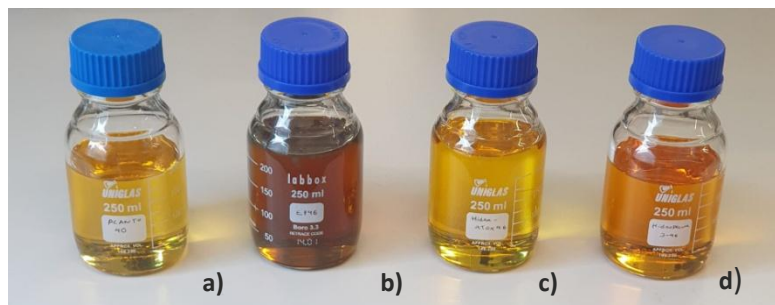


Figura 33- Amostras dos quatro tipos de lubrificantes: a) Plantohyd 40N, b) Hydroflux EP46, c) Hidra-atox 46 e d) Hidrosecur D-46

Antes de cada teste foi aplicado um aumento de temperatura a cada trinta minutos, de forma a garantir estabilidade a nível da temperatura. Após este período, foi medida a espessura do filme lubrificante no raio da pista do disco, sem a aplicação de lubrificante entre a esfera e o disco. A velocidade de ensaio foi desde 40mm/s até 2000 mm/s, tendo posteriormente regressado aos 40mm/s.

A condição parcialmente submersa foi assegurada (metade da esfera envolvida em lubrificante), tal como se pode observar na Figura 34, usando posteriormente uma proteção que forçou o lubrificante a voltar para a pista.

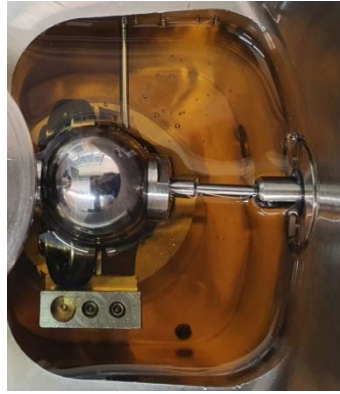


Figura 34- Esfera parcialmente submersa

No final de cada subida, foi medida a espessura do filme de velocidade zero, permitindo identificar se a pista foi danificada durante o processo (medindo uma espessura de filme negativa) e simultaneamente, medindo a espessura do filme residual entre a esfera e o disco.

A espessura do filme de velocidade zero é medida após a descarga da esfera e sem velocidade de arrastamento. É então, aplicada a carga total (50 N) e a espessura do filme estático medida após cinco segundos, permitindo que o filme se espalhe.

Este ensaio realizou-se para os quatro lubrificantes a 30, 60 e 80°C, para um SRR de 5%.

3.3.1.2 *Obtenção das curvas de tração e de Stribeck*

Nos ensaios de tração, realizados no mesmo equipamento EHD2 da PC Instruments (com a diferença do tipo de disco que é em aço), a esfera e o disco são posicionados no interior de um recipiente de aço e são movidos independentemente, possibilitando a medição das velocidades de rolamento e taxas de escorregamento. Utilizou-se uma esfera e um disco de aço, com rugosidades de 20 nm e 50 nm, respetivamente. As curvas de tração são geralmente medidas em temperatura controlada, carga e velocidade de arrasto constante, enquanto ocorre variação de SRR. Todavia, as curvas de Stribeck são normalmente medidas em temperatura controlada, carga e SRR constante, enquanto ocorre variação da velocidade de arrasto. A velocidade de rolamento (U_0) e SRR são definidos, através da Equação 9 e Equação 10 [10]:

$$U_0 = \frac{u_{disco} + u_{bola}}{2} \quad \text{Equação 9}$$

$$SRR = 2 \cdot \frac{|u_{disco} - u_{bola}|}{u_{disco} + u_{bola}} \quad \text{Equação 10}$$

Para as curvas de tração, a velocidade e a carga (50 N) mantiveram-se constantes. A rugosidade da superfície e carga envolvida nos testes das curvas de Stribeck foram previamente definidas. As curvas foram obtidas em SRR a variar de 0 a 30%, em

diferentes temperaturas de operação (30, 60 e 80°C) e as condições parcialmente submersas foram garantidas.

3.3.2 Ensaio de rolamentos

Os rolamentos são componentes de tecnologia avançada do século XX, cuja principal função é transmitir carga, em condições de baixo atrito. A potência total dissipada em rolamentos contribui para a perda geral da energia numa máquina. Por exemplo, a perda de potência dos rolamentos, numa caixa de engrenagens planetárias, pode atingir até 30% da perda total de potência [22].

A Figura 35 mostra o equipamento utilizado na realização do ensaio de rolamentos.

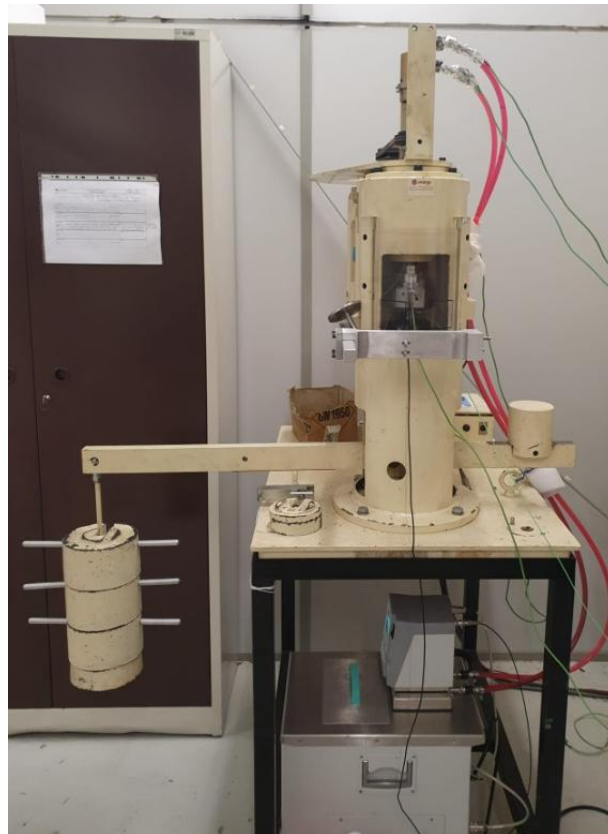


Figura 35- Ensaio de rolamentos

A Figura 36 apresenta um esquema do ensaio de rolamentos, em particular a alavanca para o carregamento do rolamento.

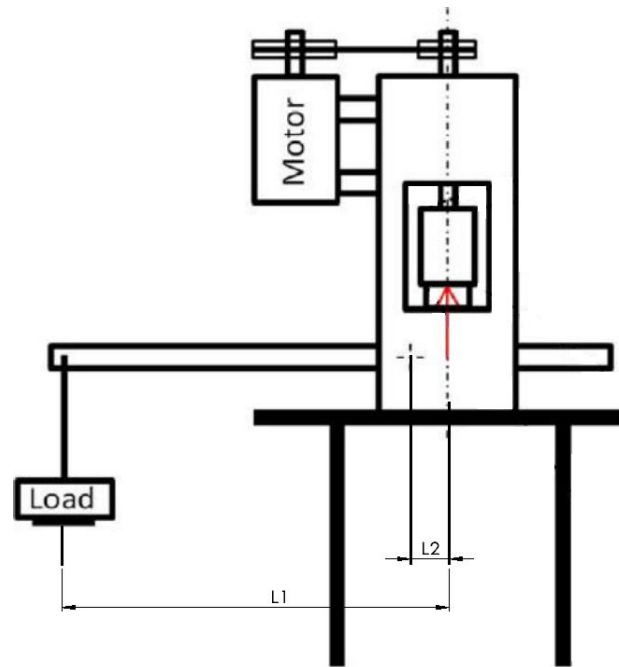


Figura 36- Esquema do ensaio de rolamentos (adaptado de [22])

A Figura 37 mostra o conjunto do rolamento (elemento 2).

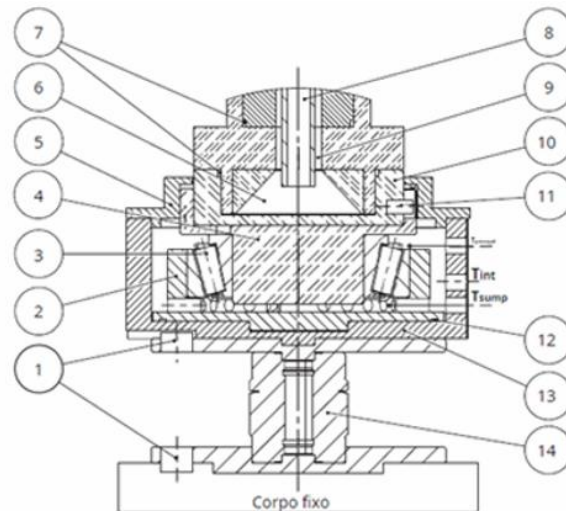
Os elementos 1 e 11 representam os pinos de travamento, o 7 e 12 os vedantes, o 3 a pista externa do rolamento e o 5 a tampa.

O fluido de refrigeração flui através do elemento 8 “entrada de refrigerante” que flutua no centro do eixo de transmissão, expandindo-se no elemento 6 “câmara de refrigeração”.

O fluido é então forçado a subir, através da folga entre o orifício central do eixo de acionamento e a “câmara de refrigeração”, a “saída de refrigerante” (9). Neste arranjo particular, o calor é extraído do conjunto, por meio do elemento de acionamento da pista interna do rolamento (4).

O calor é então trocado através da interface entre os elementos 4 e 10 (*Spindle drive*), para o fluido térmico que circula na “câmara de refrigeração”. Esta forma de transferência de calor, pelo elemento de acionamento da pista interna do rolamento, contorna a necessidade de ter mangueiras fixas no alojamento externo do conjunto que poderiam interferir potencialmente na medição do binário de atrito [59].

O elemento 13 denomina-se por carcaça e o 14 dispositivo de medição de binário.



Legenda

1 - Pino de travamento	8 - Entrada de refrigerante
2 - Rolamento	9 - Saída de refrigerante
3 - Pista externa	10 - <i>Spindle drive</i>
4 - Pista interna	11 - Pino de travamento
5 - Tampa	12 - Vedante
6 - Câmara de refrigeração	13 - Carcaça
7 - Vedante	14 - Dispositivo de medição de binário

Figura 37- Conjunto do rolamento através do eixo de acionamento – arrefecimento [59]

3.3.2.1 Medição do binário de atrito

Os ensaios de medição do binário de atrito foram realizados com carga axial (aproximadamente 6,9 kN), temperatura e velocidade constante.

O rolamento usado corresponde à referência SKF 51107 (rolamentos axiais de esferas de simples efeito)⁵ e foi preenchido com 50 ml de lubrificante (correspondendo a 50% do volume livre do rolamento), tal como se pode ver na Figura 38. De seguida, fez-se a montagem do conjunto envolvente (Figura 39).

Os rolamentos de esferas axiais de efeito simples podem absorver cargas axiais altas, logo não devem ser solicitados radialmente. Os rolamentos axiais de esferas podem ser de efeito simples ou duplo.

⁵ Consultar o Anexo 7.5

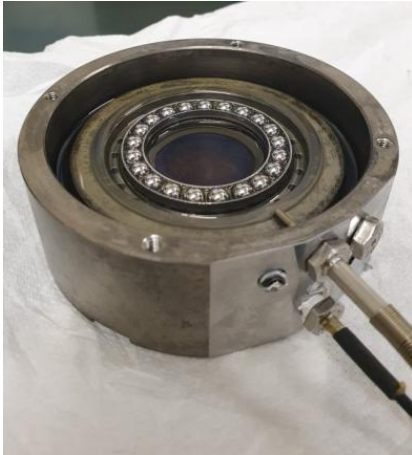


Figura 38- Rolamento coberto a meia altura das esferas



Figura 39- Montagem da tampa no rolamento

Antes da realização dos ensaios de rolamentos, executou-se um período de 24 horas de rodagem, de forma a garantir o alisamento da rugosidade e distribuição do lubrificante, por se tratar de um rolamento novo.

O ensaio realizou-se para os quatro lubrificantes a $50 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$ e $80 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$, para uma velocidade de 250 e 1000 rpm, tendo em atenção a relação entre as polias de 1,2.

Executou-se seis medições de binário para cada temperatura, com o motor a trabalhar e parado. Após o término do último ensaio de cada lubrificante, fez-se uma limpeza em banho de ultrassons com éter de petróleo (Figura 40), de modo a prevenir a contaminação de outros lubrificantes indesejados para o ensaio.



Figura 40- Limpeza em ultrassons

RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

4.1 MASSA VOLÚMICA

4.2 VISCOSIDADE

4.3 FTIR

4.4 ENSAIO BOLA/DISCO

4.5 ENSAIO DE ROLAMENTOS

4.6 FERROMETRIA

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

4.1 Massa volúmica

Esta secção reporta os resultados experimentais de massa volúmica obtidos com recurso a um densímetro.

Para cada lubrificante foram realizadas três medições, à mesma temperatura de 20°C e ainda outras duas medições, a temperatura diferente. O procedimento seguido foi o mesmo para todos os lubrificantes.

Quando se transitou para outro lubrificante foi necessário limpar o circuito de medição do densímetro com um solvente adequado (éter de petróleo).

Através da Equação 11 foi possível obter o valor do coeficiente de expansão térmica, para a temperatura e massa volúmica medida, através de uma temperatura e massa volúmica de referência (15 e 20°C).

$$\rho = \rho_0 \cdot [1 - \alpha_t \cdot (T - T_0)] \quad \text{Equação 11}$$

A Tabela 13 mostra os valores de massa volúmica fornecidos pelo fabricante à temperatura de referência de 15 e 20°C. Na mesma tabela estão referidos os valores obtidos pela Equação 11, sendo o valor do coeficiente de expansão térmica calculado a partir dos dados experimentais medidos pelo densímetro.

Tabela 13- Coeficiente de expansão térmica para os quatro tipos de lubrificantes

Lubrificantes	Valor referência [kg/m ³]	Temperatura [°C]	Valor medido [kg/m ³]	Temperatura [°C]	$\alpha_t \cdot 10^{-4}$ [1/°C]
Hidra- atox 46	n.d	n.d	919	20	7,26
Hidrosecur D-46	926 ⁶	20	923	20	7,48
Hydroflux EP 46	876 ⁷	15	868	15	11,59
Plantohyd 40 N	922 ⁸	15	923	15	13,37

⁶ Consultar o Anexo 7.2

⁷ Consultar o Anexo 7.3

⁸ Consultar o Anexo 7.4

De seguida, calculou-se a média, o erro relativo, assim como, o desvio padrão, utilizando como referência a densidade fornecida na ficha do fabricante. Os valores experimentais não foram muito diferentes dos valores fornecidos pelo fabricante, sendo o maior desvio inferior a 1 kg/m^3 e o maior erro inferior a 2%.

Por fim, procedeu-se à execução de um gráfico (Figura 41) em que se pode observar a variação da massa volúmica com a temperatura, para cada um dos lubrificantes.

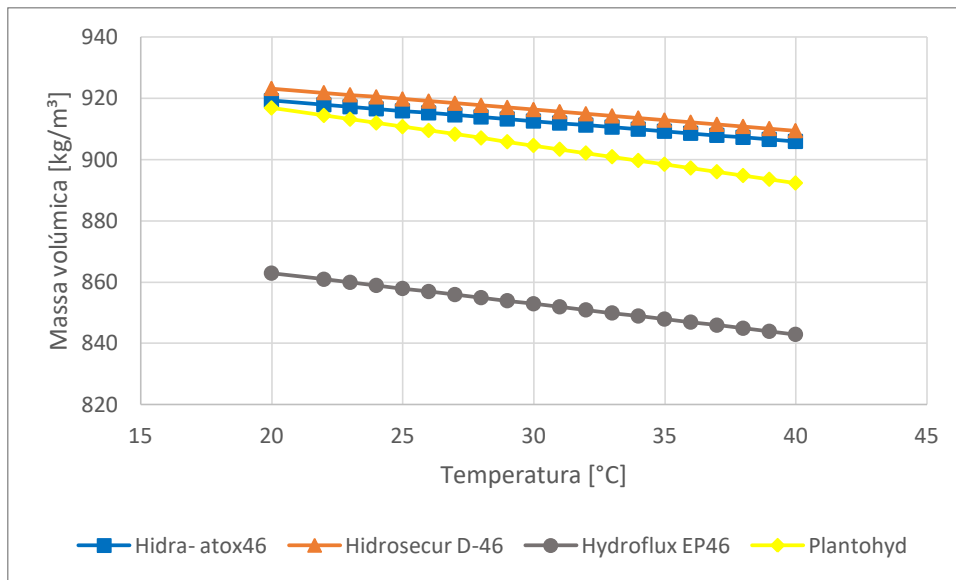


Figura 41- Variação da massa volúmica com a temperatura para os quatro lubrificantes

Pela observação da Figura 41 podemos constatar que a massa volúmica diminui com a temperatura, como esperado de acordo com a literatura.

A densidade varia pouco com a temperatura à pressão atmosférica, daí os valores de alfa serem muito pequenos. O lubrificante mineral Hydroflux EP46 é o menos denso e o Hidrosecur D-46 o mais denso.

4.2 Viscosidade

Na Figura 42 está representada a variação da viscosidade dinâmica dos quatro lubrificantes testados, em função da temperatura. Comparando os resultados, é possível observar que a viscosidade do Hidra-atox 46 e Hidrosecur D-46 é superior à viscosidade dos restantes lubrificantes, no intervalo de temperatura testado. É também possível constatar que o lubrificante mineral Hydroflux EP46 apresenta o mesmo nível de viscosidade que o Plantohyd 40N a 40°C . Porém, o efeito da temperatura sobre o Hydroflux EP46 é superior, apresentando este uma viscosidade inferior em relação ao Plantohyd 40N a 100°C .

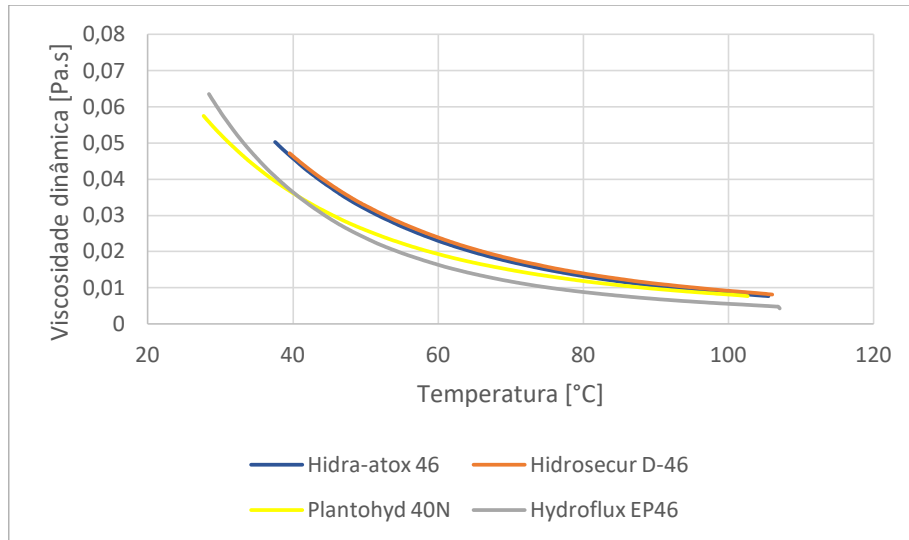


Figura 42- Viscosidade dinâmica

Na Figura 43 está representada a variação da viscosidade cinemática dos quatro lubrificantes testados, em função da temperatura. O comportamento será semelhante ao analisado na Figura 42.

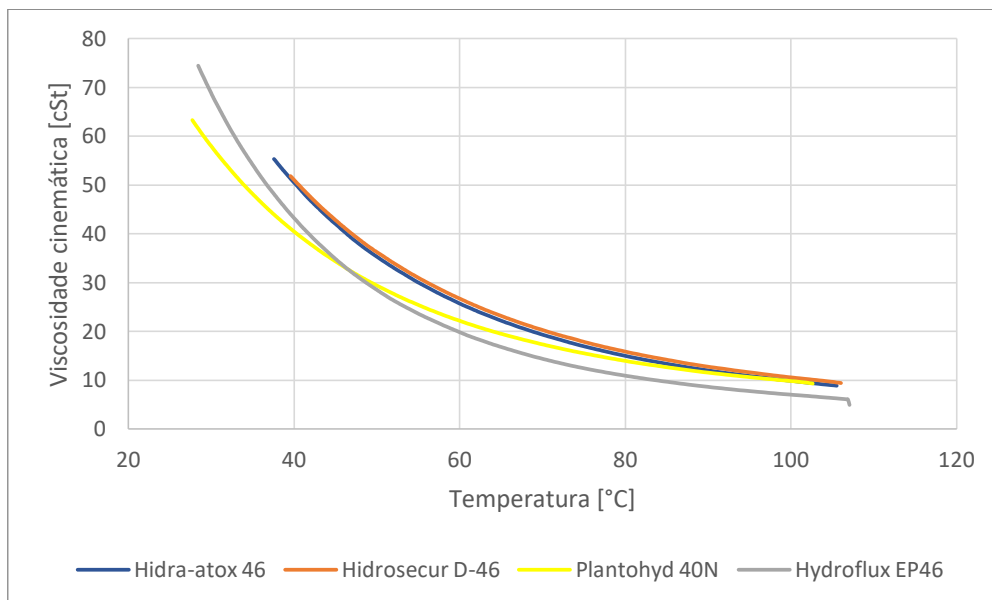


Figura 43- Viscosidade cinemática

Pela análise da Figura 43 é possível constatar que a 40°C o lubrificante mais viscoso é o Hidrosecur D-46, seguido o Hidra-atox 46, Hydroflux EP46 e por último o Plantohyd 40N. A 100°C o lubrificante mais viscoso é o Hidrosecur D-46, seguido o Hidra-atox 46 e Plantohyd 40N e por último o Hydroflux EP46.

A Figura 44 mostra a relação da viscosidade cinemática com a temperatura para os quatro lubrificantes, pela norma ASTM D314.

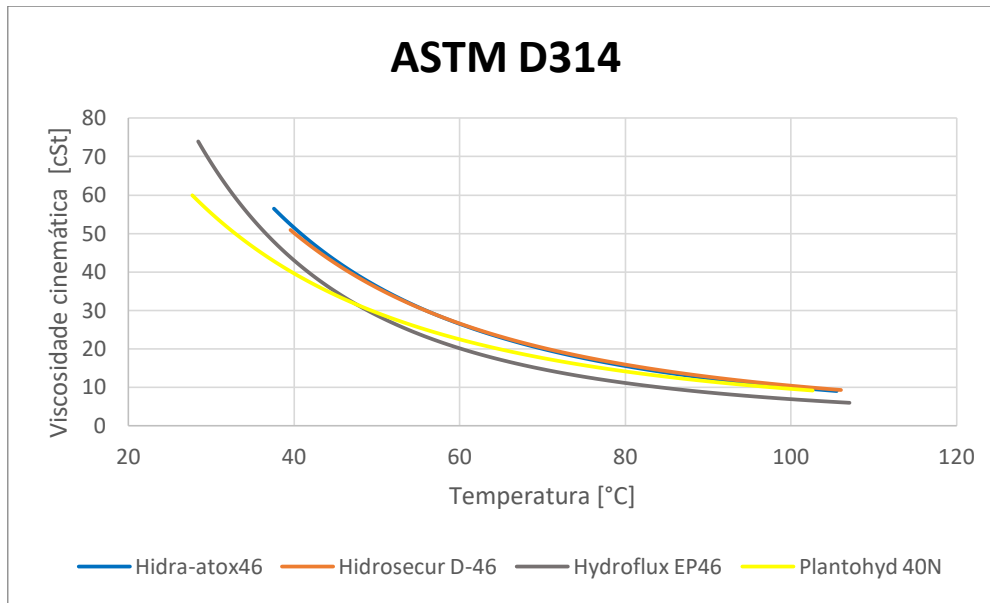


Figura 44- Viscosidade cinemática segundo a norma ASTM D314

Na Tabela 14 estão representadas as constantes da norma ASTM D314 para os quatro lubrificantes.

Tabela 14- Norma ASTM D314 para os quatro lubrificantes

Norma ASTM D314			
Constantes	m	n	a
Hidra-atox 46	7,50	2,91	0,70
Hidrosecur D-46	7,18	2,78	0,70
Hydroflux EP46	9,97	3,51	0,70
Plantohyd 40N	6,72	2,61	0,70

A Figura 45 mostra a relação da viscosidade cinemática com a temperatura para os quatro lubrificantes, através do modelo de Vogel.

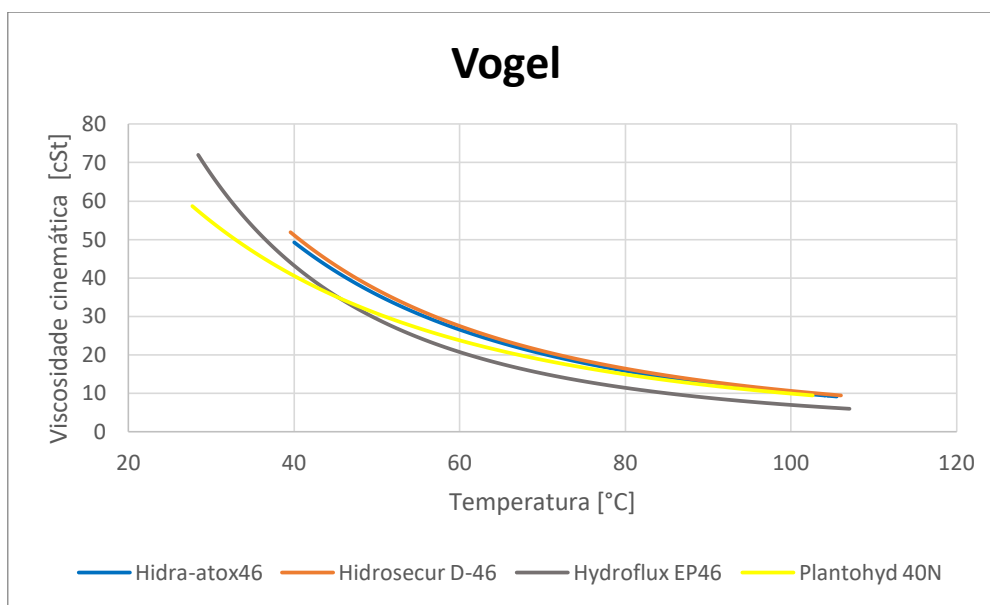


Figura 45- Viscosidade cinemática segundo o modelo de Vogel

Na Tabela 15 apresentam-se as constantes do modelo de Vogel para os quatro lubrificantes.

Tabela 15- Modelo de Vogel para os quatro lubrificantes

Modelo de Vogel			
Constantes	k	b	c
Hidra-atox 46	0,052	1353,26	159,22
Hidrosecur D-46	0,059	1337,86	157,82
Hydroflux EP46	0,042	1173,74	129,24
Plantohyd 40N	0,018	2074,64	228,80

4.3 FTIR

O método selecionado para a análise FTIR foi o *Pathlength_Dialpath* e o campo do espectro foi desde 350 a 4000 cm^{-1} .

Primeiramente realizou-se a análise FTIR para os quatro lubrificantes novos.

De seguida, especialmente para o caso dos óleos biodegradáveis, analisou-se a variação das suas propriedades com o envelhecimento térmico, de forma a perceber como reagem à oxidação e à presença de água.

Tal como é possível observar na Figura 46 (óleos Hidrosecur D-46 e Hidra-atox 46), há uma grande absorção entre os 2800 e 3100 cm^{-1} .

O pico entre os 1700 e 1800 cm^{-1} representa a ligação C = O e o de 720 a 730 cm^{-1} demonstra a área típica da ligação C – O.

O pico 1380 cm^{-1} é, geralmente, atribuído à presença de aditivos anti-desgaste. Isto indica que o aditivo poderá não estar presente, não podendo inferir sobre se é ou não resistente ao desgaste. Para saber se é ou não resistente ao desgaste há que fazer testes mais específicos.

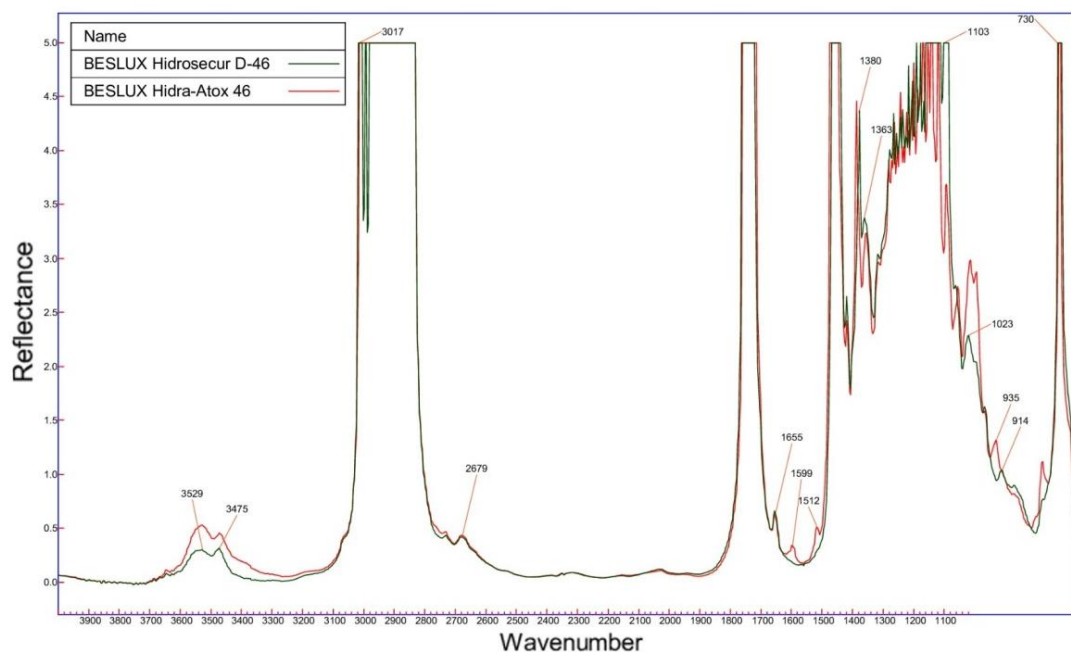


Figura 46- Impressão digital com o espectro FTIR para o Hidra-atox46 e Hidrosecur D-46⁹

Na Figura 47 (óleos Hydroflux EP46 e Plantohyd 40N), a grande absorção é entre os 2800 e 3100 cm^{-1} . Este intervalo representa a ligação O – H.

O pico entre os 1700 e 1800 cm^{-1} representa a ligação C = O que são ácidos carboxílicos e ésteres presentes nos lubrificantes.

O pico de 720 a 730 cm^{-1} demonstra a área típica da ligação C – O.

O pico 1380 cm^{-1} é normalmente, atribuído à presença de aditivos anti-desgaste.

⁹ Consultar o Anexo 7.6

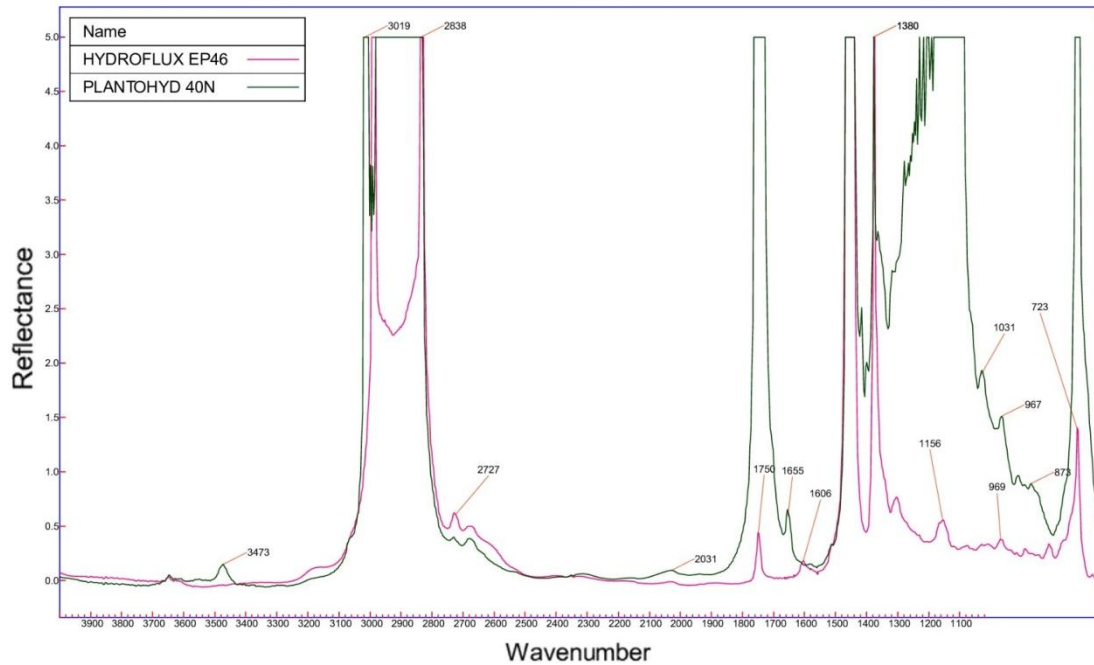


Figura 47- Impressão digital com o espectro FTIR para o Hydroflux EP46 e Plantohyd 40¹⁰

Com o intuito de se testar a capacidade anti-oxidante dos quatro óleos foram criadas oito amostras com 15 ml: quatro com óleo original e quatro contaminadas com água. Nas oito amostras foram colocados fios de cobre (120 mm de comprimento e 1 mm de diâmetro), de modo a acelerar o processo de oxidação.

Na Figura 48 apresentam-se os quatro lubrificantes contaminados com 0,5% de água.

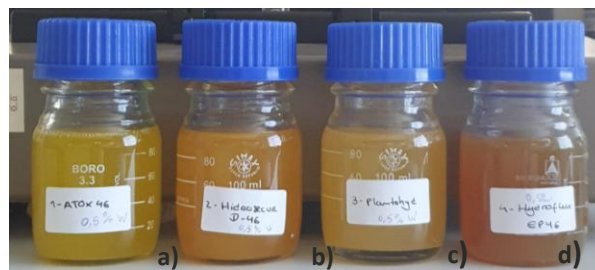


Figura 48- Amostras contaminadas com 0,5% de água: a) Hidra-atox 46, b) Hidrosecur D-46 e d) Hydroflux EP46

¹⁰ Consultar o Anexo 7.7

Na Figura 49 consta uma nova amostra com óleo branco, assim como oito amostras de lubrificantes (quatro não contaminadas e quatro contaminadas com água).

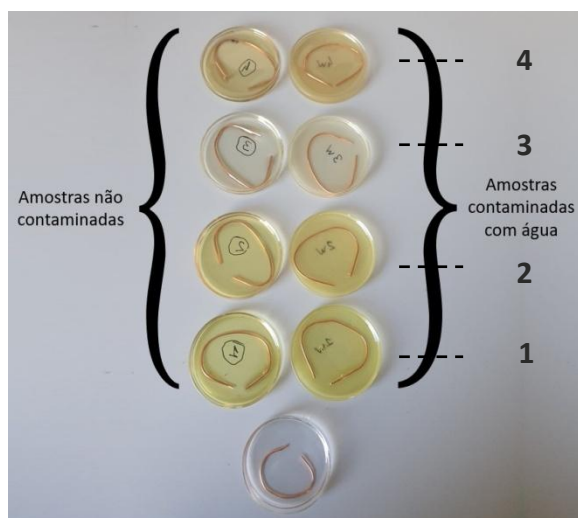


Figura 49- Amostras contaminadas com água e cobre: 1) Hidra-atox 46, 2) Hidrosecur D-46, 3) Hydroflux EP46 e 4) Plantohyd 40N

Depois de preparadas, as oito amostras foram ao forno durante 24 horas a 120°C, de forma a promover a sua oxidação (Figura 50). É de notar a mudança de cor das amostras, tendo escurecido após o envelhecimento térmico.

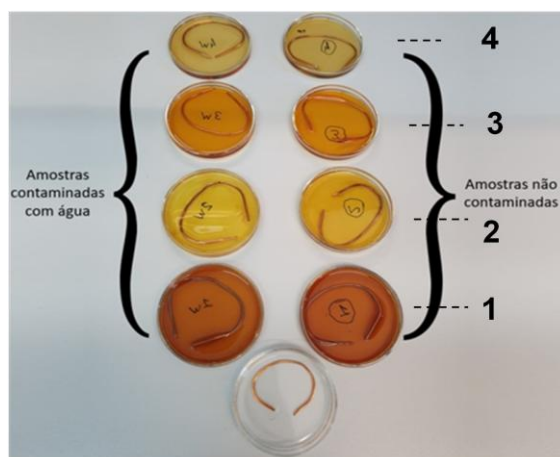


Figura 50- Amostras depois de aquecidas no forno: 1) Hidra-atox 46, 2) Hidrosecur D-46, 3) Hydroflux EP46 e 4) Plantohyd 40N

Após retiradas as amostras do forno, realizou-se a análise FTIR para as oito amostras.

As designações feitas para as amostras no FTIR foram iguais para os quatro lubrificantes. Por exemplo, no caso do Hidra-atox 46: Hidra-atox 46 oxidado (amostra contaminada com cobre), Hidra-atox 46 contaminado com água e oxidado (amostra

contaminada com cobre e água), Hidra-atox 46 contaminado com água (amostra contaminada com água) e Hidra-atox 46 Novo (amostra não contaminada).

Na Figura 51 é apresentado o espectro do FTIR para o Hidra-atox 46, onde se verifica grande absorção entre os 1700 e 1800 cm^{-1} nas quatro amostras.

O pico entre os 1400 e 1500 cm^{-1} representa a ligação simples de carbono e hidrogénio.

O pico de 720 a 730 cm^{-1} demonstra a área típica da ligação C – O.

O pico de 1700 a 1800 cm^{-1} demonstra a presença de ésteres na constituição do lubrificante Hidra-atox 46.

No pico de 3528 cm^{-1} não houve interferência molecular devido à presença de água. Houve alterações na identidade molecular nas amostras oxidadas.

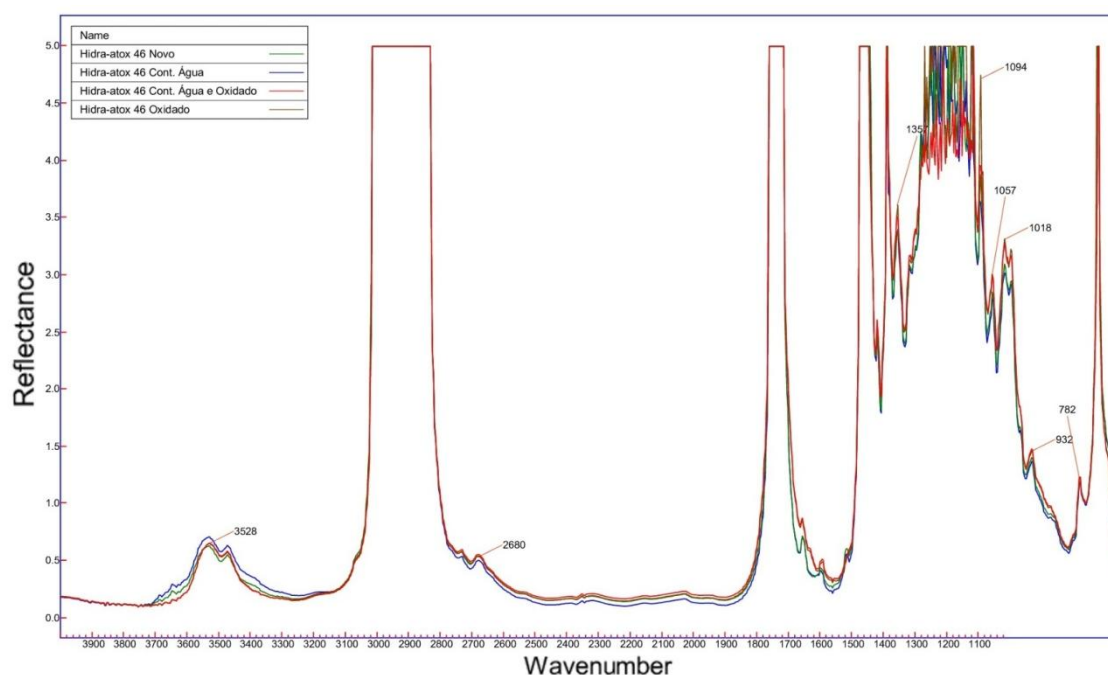


Figura 51- Impressão digital com o espectro FTIR para o Hidra-atox46¹¹

Na Figura 52, onde é apresentado o espectro do FTIR do Hidrosecur D-46, verifica-se grande absorção entre os 1700 e 1800 cm^{-1} nas quatro amostras. Este mesmo intervalo representa a ligação C = O, em que a posição exata depende do tipo de carbonila.

O pico entre os 1400 e 1500 cm^{-1} representa a ligação simples de carbono e hidrogénio, hidrocarbonetos parafínicos presentes na base dos óleos lubrificantes.

¹¹ Consultar o Anexo 7.8

O pico de 1700 a 1800 cm^{-1} demonstra a presença de ésteres na identidade molecular do lubrificante Hidrosecur D-46.

No pico de 3476 cm^{-1} há interferência molecular devido à presença de água. Este lubrificante é que aparenta sofrer mais alterações a nível molecular.

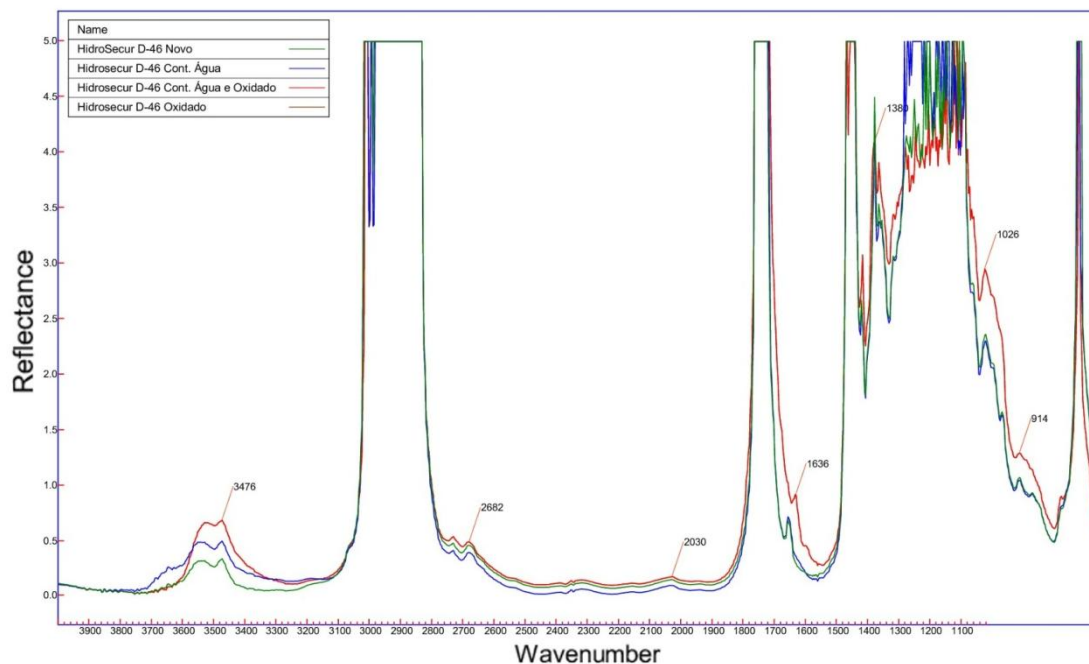


Figura 52- Impressão digital com o espectro FTIR para o Hidrosecur D-46¹²

Na Figura 53, onde é apresentado o espectro do FTIR do Hydroflux EP46, verifica-se grande absorção entre os 1400 e 1500 cm^{-1} nas quatro amostras. Este intervalo representa a ligação simples de carbono e hidrogénio, hidrocarbonetos parafínicos presentes na base dos lubrificantes.

É de notar que as alterações a nível molecular para o Hydroflux EP46 ocorrem essencialmente na presença de água, logo este lubrificante oxida na presença de água.

¹² Consultar o Anexo 7.9

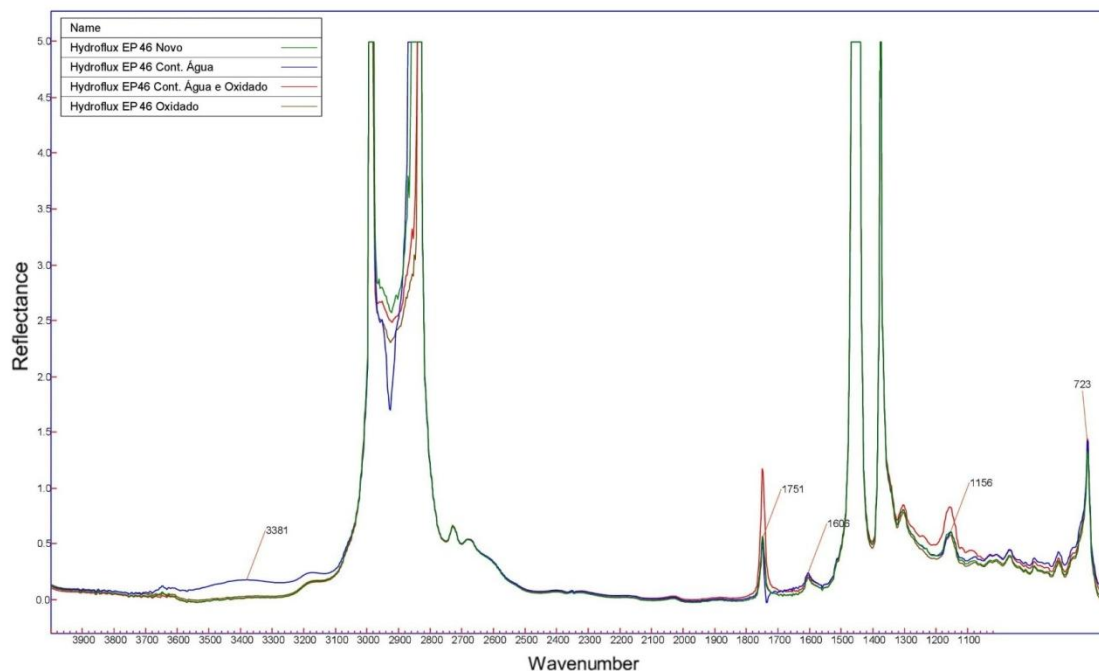


Figura 53- Impressão digital com o espectro FTIR para o Hydroflux EP46¹³

Há uma grande absorção entre os 1700 e 1800 cm^{-1} nas quatro amostras, por observação da Figura 54, onde é apresentado o espectro FTIR do Plantohyd 40N.

O pico entre os 1400 e 1500 cm^{-1} representa a ligação simples de carbono e hidrogênio.

O pico de 1700 a 1800 cm^{-1} demonstra a presença de ésteres na composição molecular do lubrificante Plantohyd 40N. Tanto o lubrificante oxidado, como o contaminado com água mostram uma degradação semelhante, logo este óleo é sensível à temperatura.

¹³ Consultar o Anexo 7.10

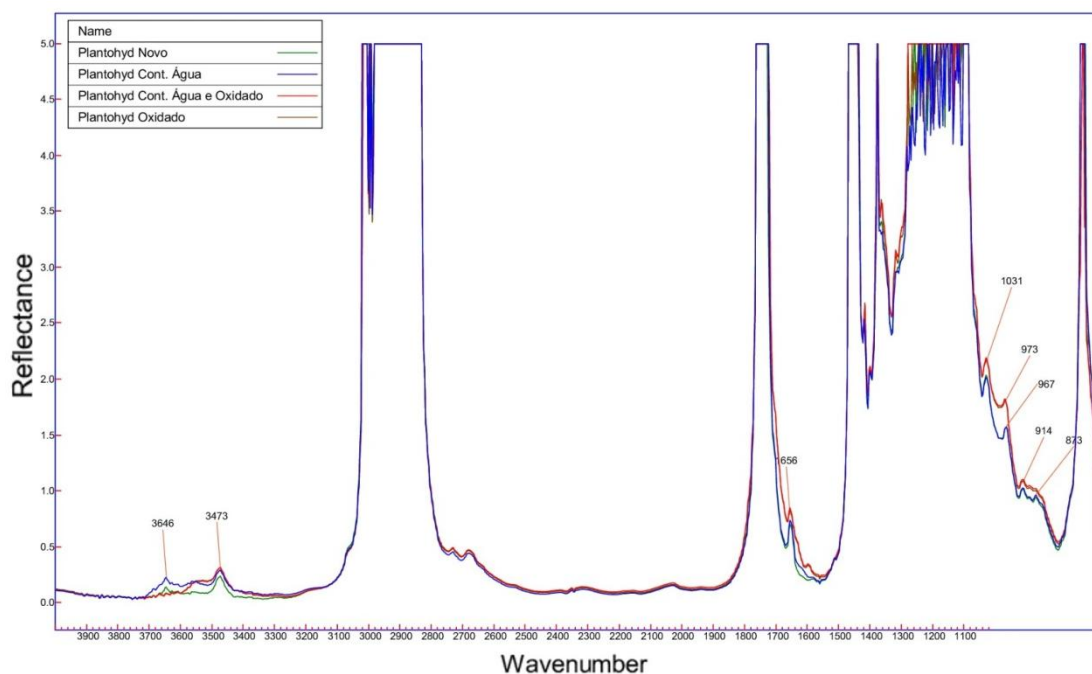


Figura 54- Impressão digital com o espectro FTIR para o Plantohyd 40N¹⁴

Após a análise dos gráficos anteriores, é possível concluir que o Hidrosecur D-46 é provavelmente o óleo que sofre mais alterações a nível molecular e o Plantohyd 40N um óleo sensível à temperatura.

4.4 Ensaio bola/disco

O equipamento bola/disco foi utilizado para as quatro amostras, de forma a obter as diferentes espessuras do filme lubrificante, as curvas de tração e de Stribeck.

Antes de cada teste foi efetuado um tempo de aquecimento de trinta minutos, para garantir estabilidade a nível da temperatura.

4.4.1 Obtenção da espessura do filme lubrificante

A Tabela 16 apresenta os parâmetros selecionados para o ensaio da medição da espessura do filme lubrificante a 30, 60 e 80°C.

¹⁴ Consultar o Anexo 7.11

Tabela 16- Parâmetros para o ensaio de medição da espessura do filme lubrificante

Temperatura [°C]	Velocidade [m/s]	FN [N]	SRR [%]
30	0,040 a 2	50	5
60			
80			

A Figura 55 mostra a obtenção da espessura do filme para o lubrificante Hidra-atox46, a 30, 60 e 80°C.

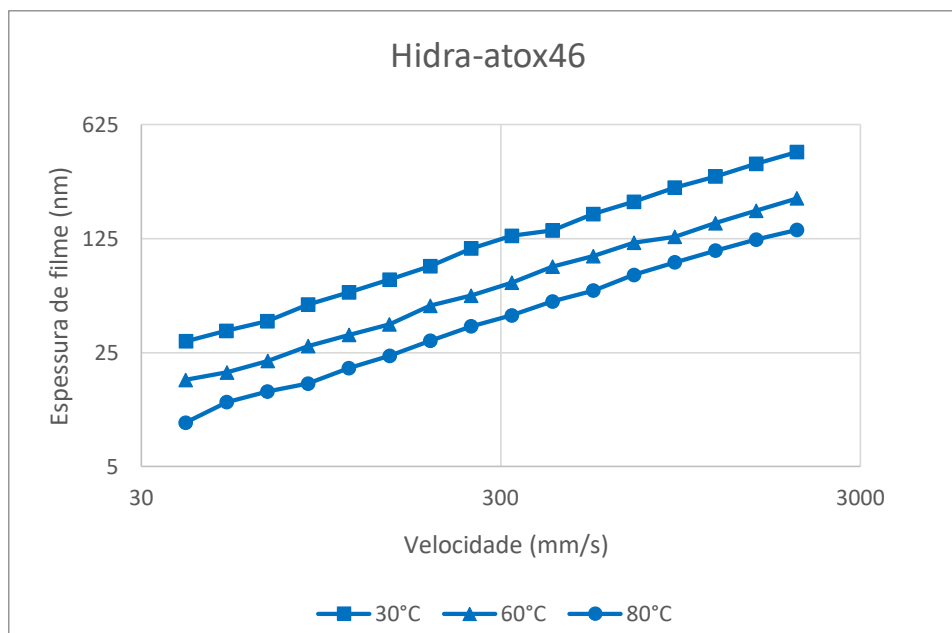


Figura 55- Espessura do filme para o lubrificante Hidra-atox 46 a 30, 60 e 80°C

Pela observação da Figura 55, conclui-se que quanto maior a velocidade e menor a temperatura, maior será a espessura do filme lubrificante medido. Isto deve-se ao facto de na condição de menor temperatura o lubrificante ser mais viscoso e o aumento da velocidade promover uma maior entrada de lubrificante na zona de contacto.

A Figura 56 apresenta a medição da espessura do filme para o lubrificante Hidrosecur D-46 a 30, 60 e 80°C.

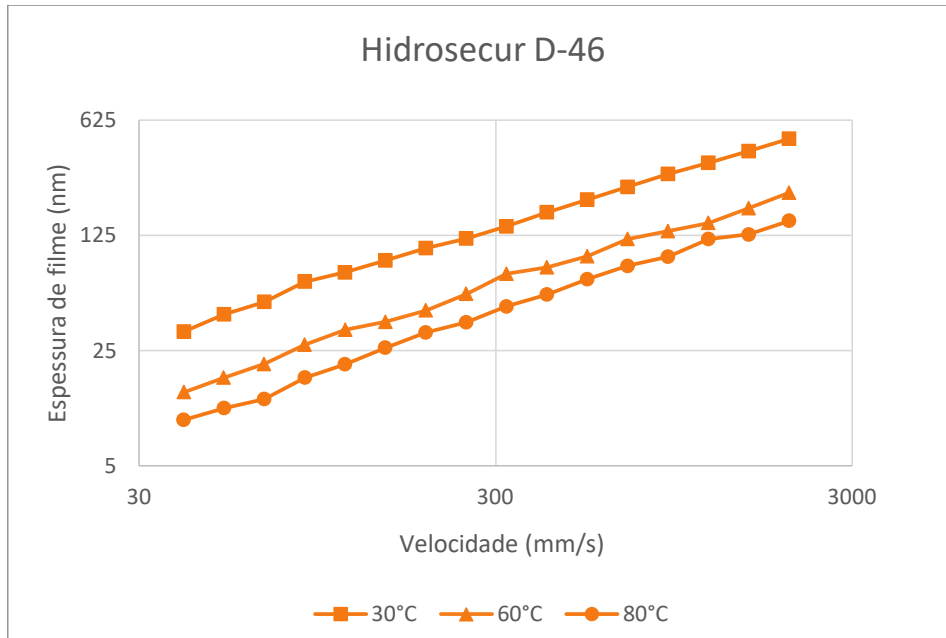


Figura 56- Espessura do filme para o lubrificante Hidrosecur D-46 a 30, 60 e 80°C

Tal como visto anteriormente, quanto maior a velocidade e menor a temperatura, maior será a espessura do filme lubrificante medido.

Através da Figura 57 observa-se a medição da espessura do filme para o lubrificante Hydroflux EP46 a 30, 60 e 80°C.

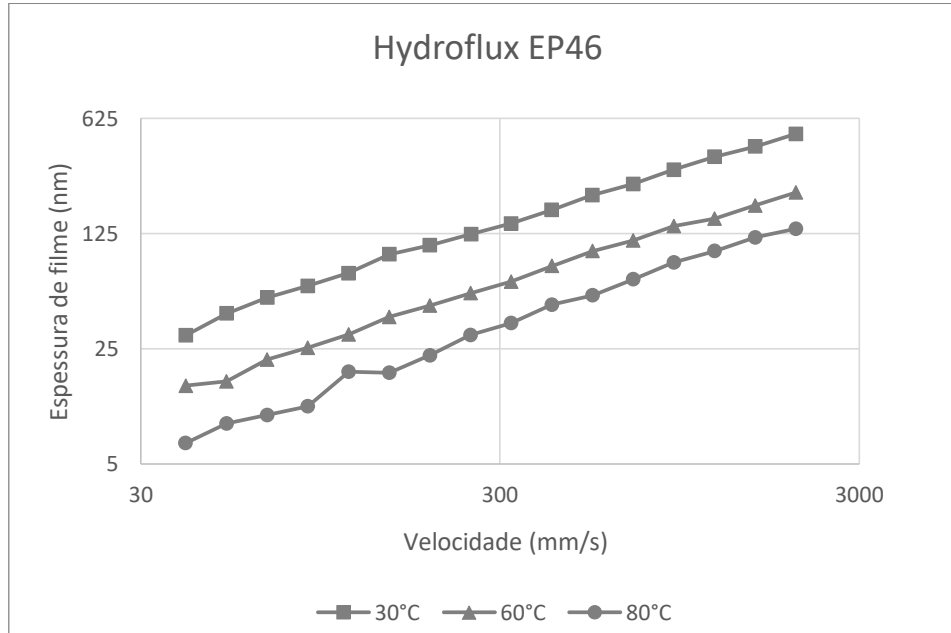


Figura 57- Espessura do filme para o lubrificante Hydroflux EP46 a 30, 60 e 80°C

A maior espessura de filme medida para o Hydroflux EP46 ocorre também para os 30°C de temperatura e velocidade de 2m/s. A menor espessura de filme medida ocorre para as condições opostas, isto é, para a temperatura de 80°C e velocidade de 0,04m/s.

A Figura 58 apresenta a medição da espessura do filme para o lubrificante Plantohyd 40N a 30, 60 e 80°C.

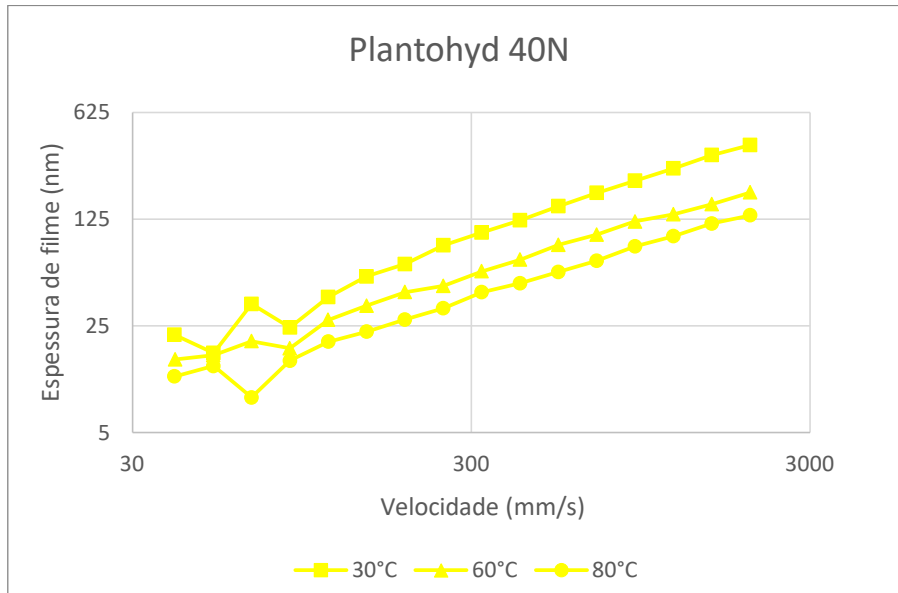


Figura 58- Espessura do filme para o lubrificante Plantohyd 40N a 30, 60 e 80°C

Tal referido anteriormente, quanto maior a velocidade e menor a temperatura, maior será a espessura do filme lubrificante medido. A Figura 59 apresenta a medição da espessura do filme para os quatro lubrificantes a 30°C.

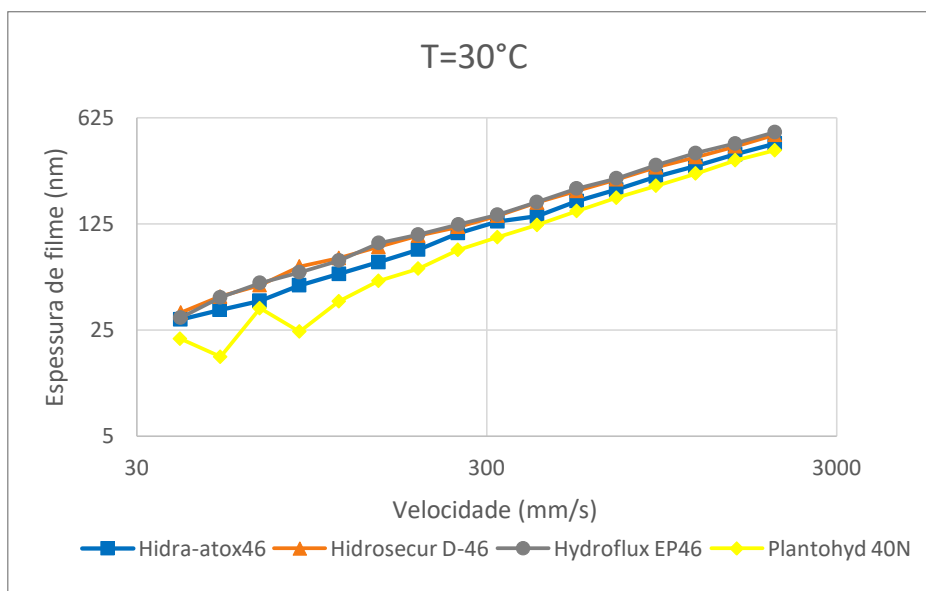


Figura 59- Espessura do filme para os quatro lubrificantes a 30°C

Como se pode observar na Figura 59, os lubrificantes mantiveram valores próximos de espessura de filme, com exceção do Plantohyd 40N. Isto deve-se ao facto deste lubrificante a 30°C apresentar valores ligeiramente mais baixos de viscosidade,

enquanto os outros três lubrificantes apresentam valores semelhantes de viscosidade. A Figura 60 apresenta a medição da espessura do filme para os quatro lubrificantes a 60°C.

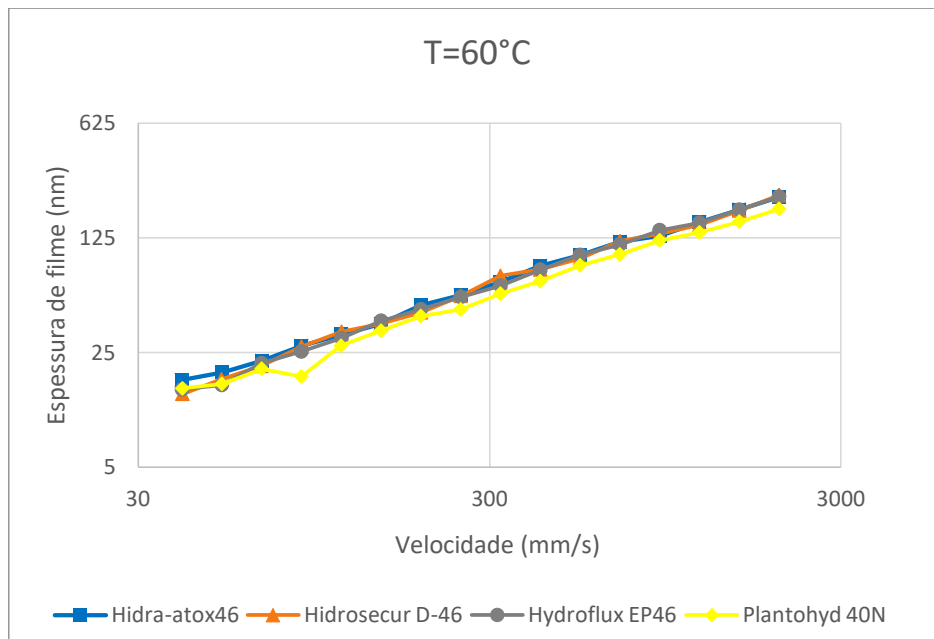


Figura 60- Espessura do filme para os quatro lubrificantes a 60°C

Note-se que os quatro lubrificantes apresentam valores mais próximos de espessura de filme, sendo as diferenças inferiores às verificadas para a temperatura de 30°C. A Figura 61 apresenta a medição da espessura do filme para os quatro lubrificantes a 80°C.

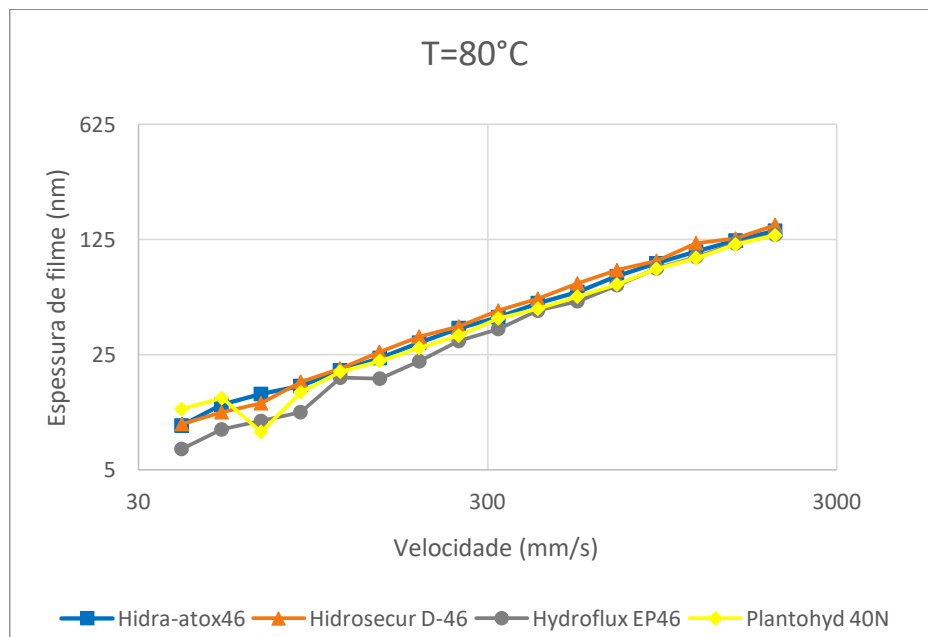


Figura 61- Espessura do filme para os quatro lubrificantes a 80°C

Pela análise da Figura 61 é possível constatar que a 80°C e baixa velocidade, o lubrificante mineral Hydroflux EP46 apresenta os menores valores de espessura de filme medidos. Isto deve-se ao facto de com o aumento da temperatura, o lubrificante mineral Hydroflux EP46 apresentar menor índice de viscosidade, relativamente aos outros lubrificantes sintéticos.

Na Tabela 17 encontra-se o cálculo do coeficiente de piezoviscosidade, obtido pela equação de Gold:

$$\alpha = s \times v^t \quad \text{Equação 12}$$

Tabela 17- Cálculo do coeficiente de piezoviscosidade

Coeficiente de piezoviscosidade $\alpha \times 10^{-8} [\text{Pa}^{-1}]$				
Lubrificante	Base	30°C	60°C	80°C
Hidra-atox 46	Éster	0,984	0,868	0,815
Hidrosecur D-46	Éster	0,987	0,874	0,822
Hydroflux EP46	Mineral	1,54	1,28	1,17
Plantohyd 40N	Éster	0,944	0,850	0,805

Através da Equação 13 e Equação 14, foi possível calcular a espessura do filme lubrificante teórica a 2 m/s, apresentada na Tabela 18.

$$h_0 = 1,345 \times R_x \times C_0 \times U^{0,67} \times G^{0,53} \times W^{-0,067} \quad \text{Equação 13}$$

$$h_{0t} = h_0 \times \phi_T \quad \text{Equação 14}$$

Onde,

h_0 - espessura do filme lubrificante [m];

h_{0t} - espessura do filme lubrificante corrigido [m];

R_x - raio equivalente [m];

C_0 - influência de elipticidade [-];

U - parâmetro de velocidade [-];

G - parâmetro do material [-];

W - parâmetro de carga [-];

ϕ_T - influência do aquecimento no convergente [-].

Tabela 18- Cálculo teórico da espessura do filme lubrificante para $v_0=2\text{m/s}$

Temperatura	h_0 experimental	h_{0t} teórico	Erro
[°C]	$\times 10^{-9}[\text{m}]$	$\times 10^{-9}[\text{m}]$	[%]
Hidra-atox 46			
30	425	467	9,09
60	221	239	7,55
80	141	166	15,0
Hidrosecur D-46			
30	483	476	1,49
60	227	249	9,00
80	154	175	12,2
Hydroflux EP46			
30	504	517	2,54
60	222	230	3,54
80	184	151	21,7
Plantohyd 40N			
30	382	379	0,90
60	187	209	10,7
80	133	151	12,1

4.4.2 Obtenção das curvas de tração e de Stribeck

As condições impostas para as curvas de tração encontram-se na Tabela 19.

Tabela 19- Parâmetros para o ensaio das curvas de tração

Temperatura [°C]	Velocidade [m/s]	FN [N]	SRR [%]
30,60,80	0,04		
30,60,80	0,5	50	0 a 30
30,60,80	2		

A geometria e a rugosidade das superfícies envolvidas nos testes das curvas de tração foram previamente selecionadas. Utilizou-se uma esfera e um disco de aço, com rugosidades de 20 nm e 50 nm, respetivamente. O volume de lubrificante foi o mesmo para todos os testes, garantindo que a esfera está parcialmente mergulhada em óleo até metade do seu diâmetro. As curvas foram obtidas variando o SRR de 0 a 30%, em diferentes temperaturas de operação (30, 60 e 80°C) e as condições parcialmente submersas foram garantidas.

A Tabela 20 mostra a previsão dos regimes de lubrificação para as condições 0,04m/s, a 30, 60 e 80°C. Foi calculada a espessura específica de filme teórica pela Equação 15:

$$\lambda = \frac{h_0}{\sigma} \quad \text{Equação 15}$$

Sendo que:

λ - espessura específica do filme lubrificante;

h_0 - espessura do filme lubrificante corrigida para o contacto aço/aço (m);

σ - rugosidade composta das superfícies (m).

Tabela 20- Regimes de lubrificação para os lubrificantes a 0,04m/s

v=0,04 m/s						
Lubrificante	30°C		60°C		80°C	
	λ	Regime	λ	Regime	λ	Regime
Hidra-atox 46	1,50	Misto	0,87	Limite	0,48	Limite
Hidrosecur D-46	1,67	Misto	0,72	Limite	0,49	Limite
Hydroflux EP46	1,55	Misto	0,76	Limite	0,34	Limite
Plantohyd 40N	1,12	Misto	0,77	Limite	0,60	Limite

A Figura 62 apresenta as curvas de tração a 0,04 m/s para o lubrificante Hidra-atox46, a 30, 60 e 80°C.

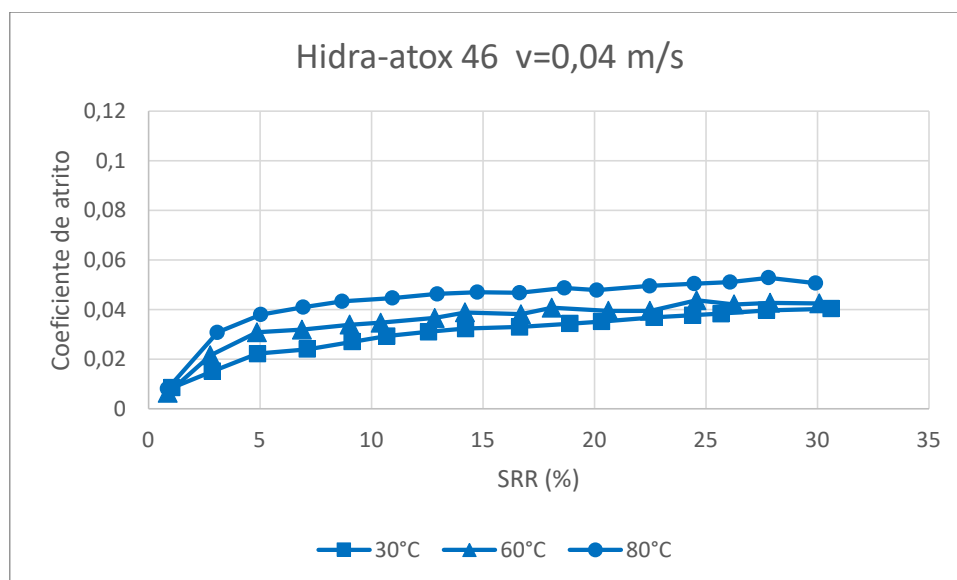


Figura 62- Curvas de tração para o lubrificante Hidra-atox 46 a 30, 60 e 80°C a 0,04 m/s

Analisando a Figura 62 verifica-se que o valor do coeficiente de atrito aumenta com a temperatura e o SRR. Como o lubrificante se encontra no regime limite a 60 e 80°C, com o aumento da temperatura, o óleo torna-se menos viscoso, fazendo diminuir a espessura do filme, o que promove o aumento do coeficiente de atrito.

A Figura 63 mostra as curvas de tração a 0,04 m/s para o lubrificante Hidrosecur D-46, a 30, 60 e 80°C.

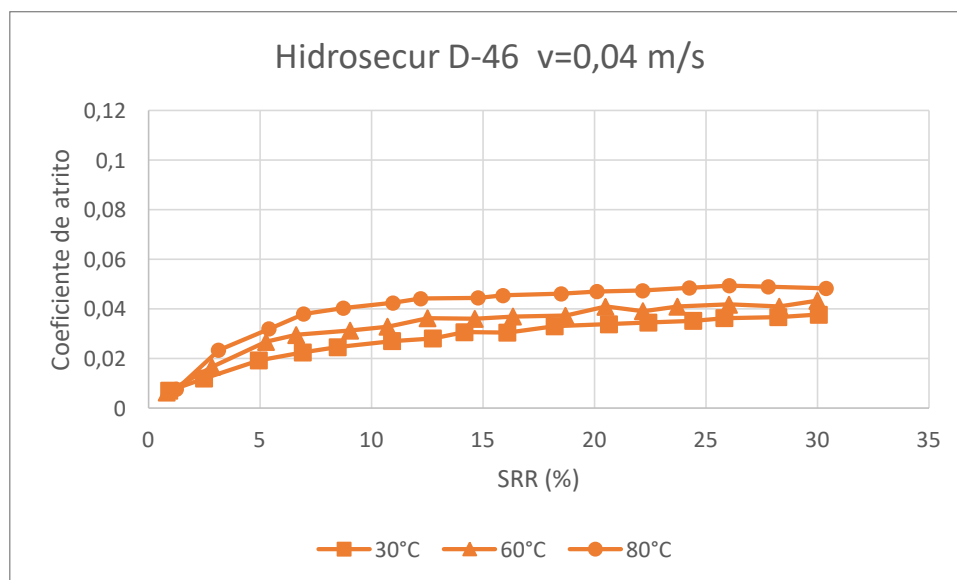


Figura 63- Curvas de tração para o lubrificante Hidrosecur D-46 a 30, 60 e 80°C a 0,04 m/s

Tal como verificado no Hidra-atox 46 para o regime limite a 60 e 80°C, o valor do coeficiente de atrito aumentou com a temperatura e o SRR. Com o aumento da temperatura, o óleo torna-se menos viscoso, o que promove o aumento do coeficiente de atrito.

A Figura 64 exibe as curvas de tração a 0,04 m/s para o lubrificante Hydroflux EP46 a 30, 60 e 80°C.

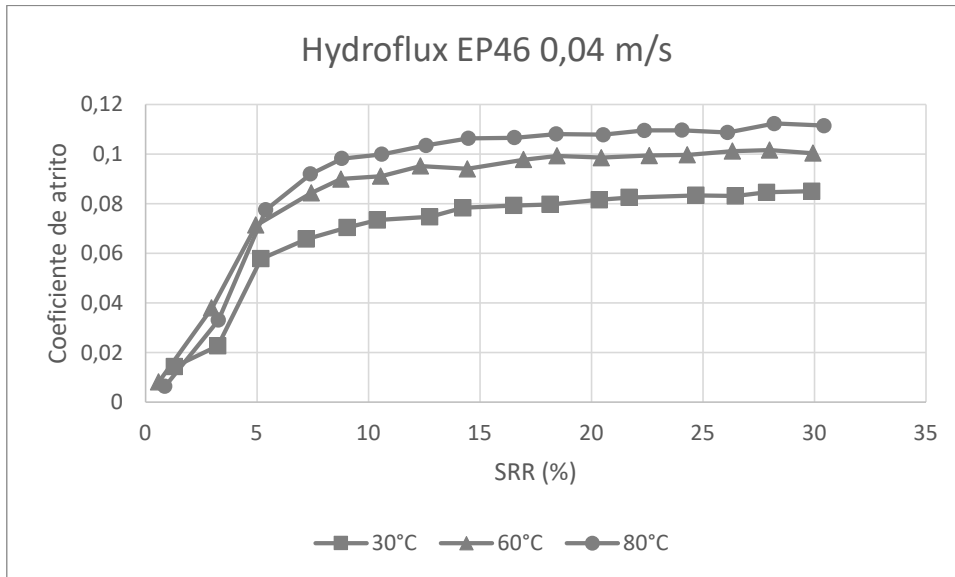


Figura 64- Curvas de tração para o lubrificante Hydroflux EP46 a 30, 60 e 80°C a 0,04 m/s

Constatou-se o mesmo efeito, novamente para o regime limite a 60 e 80°C, o valor do coeficiente de atrito aumentou com a temperatura e o SRR. É de notar que o lubrificante mineral Hydroflux EP46 exibiu o aumento mais acentuado do coeficiente de atrito. Para um SRR de 30%, o coeficiente de atrito assumiu um valor próximo de 0,12.

A Figura 65 apresenta as curvas de tração a 0,04 m/s para o lubrificante Plantohyd 40N, a 30, 60 e 80°C.

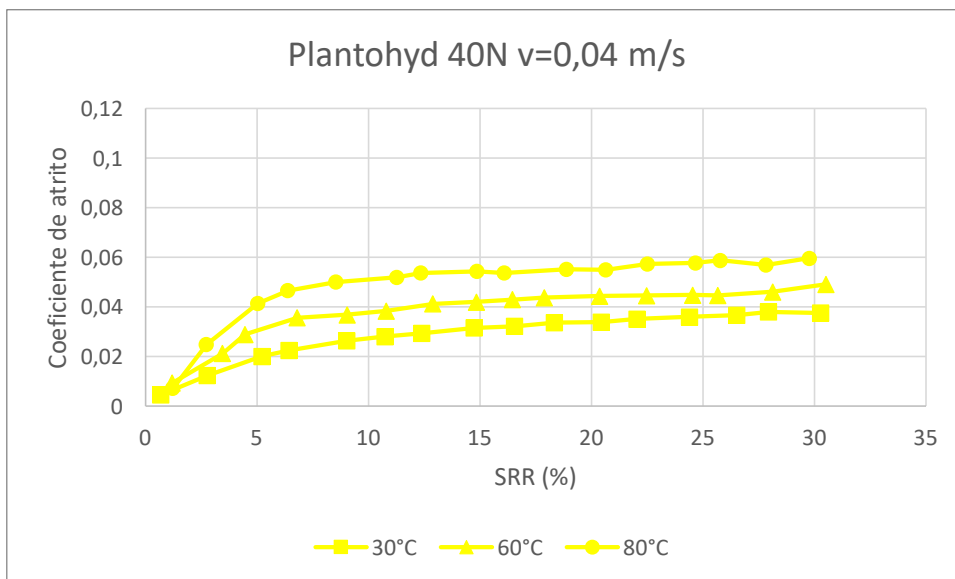


Figura 65- Curvas de tração para o lubrificante Plantohyd a 30, 60 e 80°C a 0,04 m/s

Tal como referido anteriormente, para o regime limite a 60 e 80°C, o valor do coeficiente de atrito aumentou com a temperatura e o SRR.

A Figura 66 expressa a comparação das curvas de tração para os quatro lubrificantes a 30°C e 0,040 m/s.

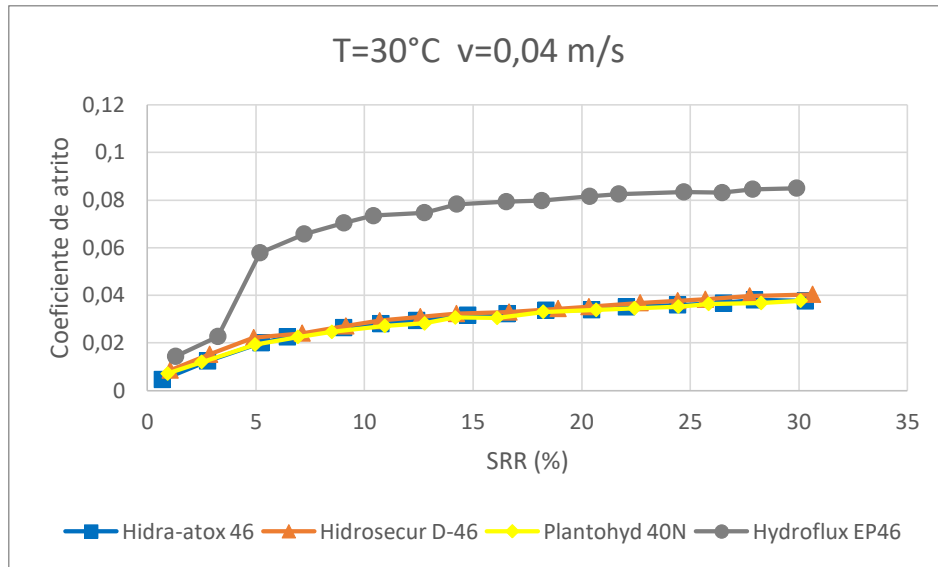


Figura 66- Curvas de tração para os quatro lubrificantes a 30°C e 0,04 m/s

Observando a Figura 66, para a mesma temperatura e velocidade, o lubrificante mineral apresenta maiores valores de coeficiente de atrito, enquanto os sintéticos apresentam valores semelhantes entre si.

A Figura 67 apresenta as curvas de tração para os quatro lubrificantes a 60°C e uma velocidade de 0,040 m/s.

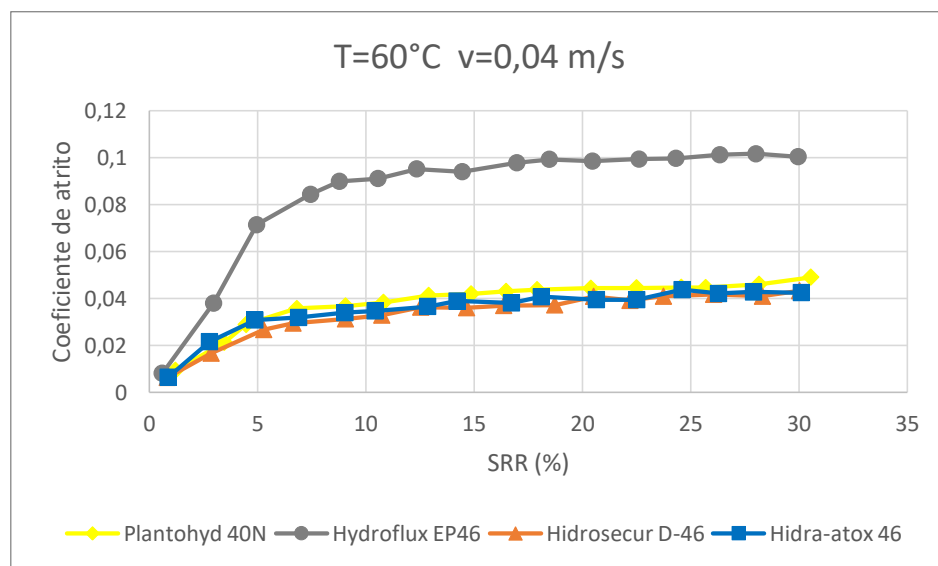


Figura 67- Curvas de tração para os quatro lubrificantes a 60°C e 0,04 m/s

Neste caso, o lubrificante mineral continua a transmitir os maiores valores de coeficiente de atrito. Porém, o Plantohyd 40N destaca-se ligeiramente com valores superiores de coeficiente de atrito, relativamente aos lubrificantes Hidra-atox 46 e Hidrosecur D-46.

A Figura 68 mostra as curvas de tração para os quatro lubrificantes a 80°C e 0,040 m/s.

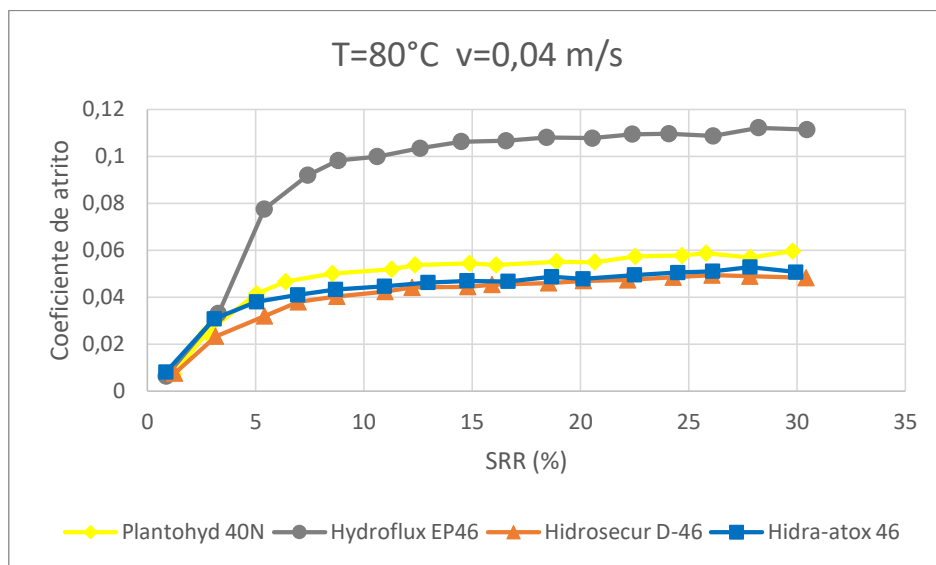


Figura 68- Curvas de tração para os quatro lubrificantes a 80°C e 0,04 m/s

O coeficiente de piezoviscosidade (efeito da pressão sobre a viscosidade do óleo) interfere com a viscosidade do óleo e essa variação pode fazer mudar o coeficiente de atrito. O óleo mineral apresenta uma viscosidade menor a 80°C, influenciando um aumento do coeficiente de atrito para o regime limite. Os lubrificantes sintéticos, a diferentes temperaturas mantiveram valores de coeficiente de atrito próximos entre si.

A Tabela 21 apresenta os diferentes regimes de lubrificação para os lubrificantes a 0,5m/s, a 30, 60 e 80°C.

Tabela 21- Regimes de lubrificação para os lubrificantes a 0,5m/s

v=0,5 m/s						
Lubrificante	30°C		60°C		80°C	
	λ	Regime	λ	Regime	λ	Regime
Hidra-atox 46	9,07	Completo	5,00	Completo	3,08	Completo
Hidrosecur D-46	10,57	Completo	4,79	Completo	3,47	Completo
Hydroflux EP46	10,98	Completo	5,03	Completo	2,71	Misto
Plantohyd 40N	7,80	Completo	4,35	Completo	2,88	Misto

A Figura 69 apresenta as curvas de tração a 0,5 m/s para o lubrificante Hidra-atox46, a 30, 60 e 80°C.

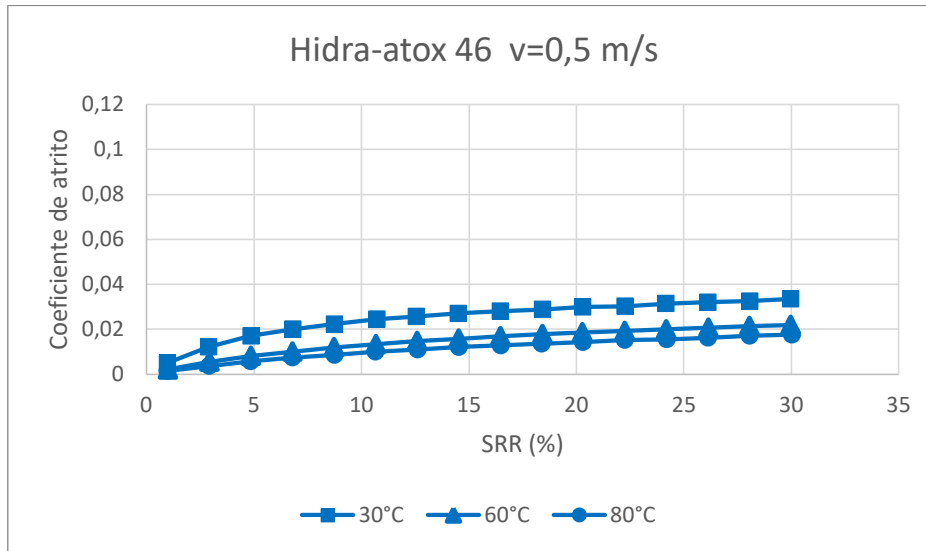


Figura 69- Curvas de tração para o lubrificante Hidra-atox 46 a 30, 60 e 80°C a 0,5 m/s

Com o aumento da velocidade, o coeficiente de atrito desceu, sendo agora o maior valor a 30°C. Isto justifica-se, pois com o aumento da velocidade houve mais lubrificante a entrar na zona de contacto, contribuindo para o aumento da espessura do filme, mas o efeito da viscosidade condiciona o atrito. Isto é, maior viscosidade traduz-se num maior coeficiente de atrito. Todavia, maior velocidade leva o lubrificante a trabalhar em regime completo, logo o coeficiente de atrito baixa com o aumento de temperatura.

A Figura 70 mostra as curvas de tração a 0,5 m/s para o lubrificante Hidrosecur D-46, a 30, 60 e 80°C.

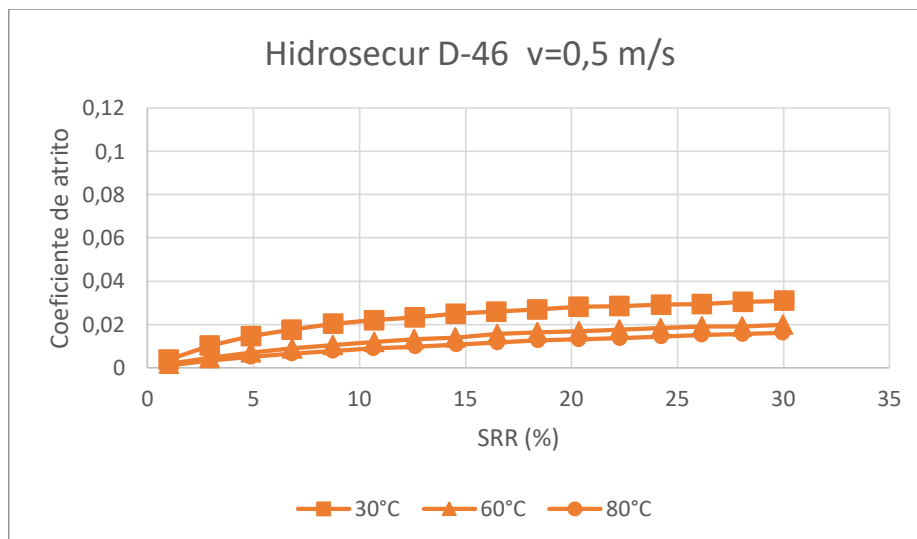


Figura 70- Curvas de tração para o lubrificante Hidrosecur D-46 a 30, 60 e 80°C a 0,5 m/s

Tal como visto anteriormente, com o aumento da velocidade, o coeficiente de atrito desceu, sendo o maior valor a 30°C, pois com o aumento da velocidade houve mais lubrificante a entrar na superfície de contacto.

A Figura 71 apresenta as curvas de tração a 0,5 m/s para o lubrificante Hydroflux EP46, a 30, 60 e 80°C.

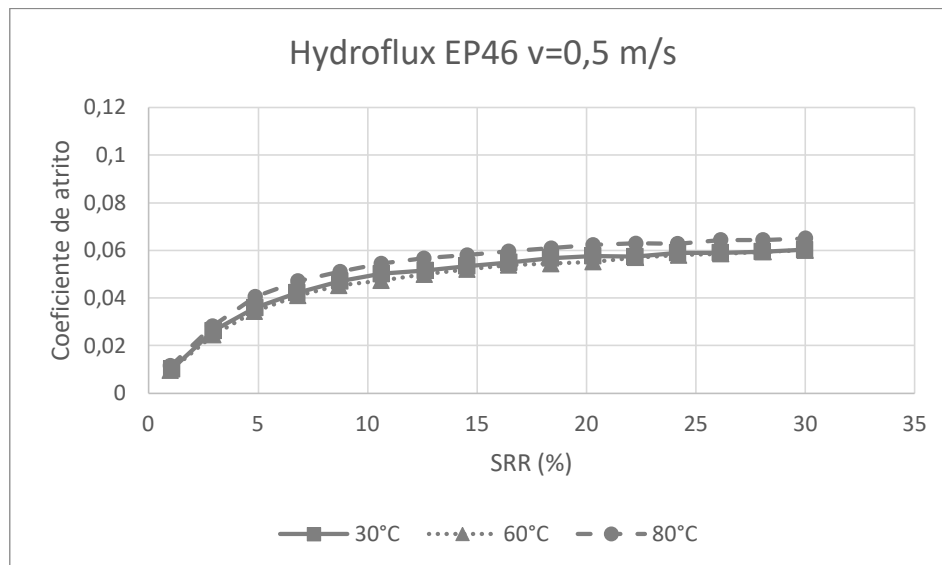


Figura 71- Curvas de tração para o lubrificante Hydroflux EP46 a 30, 60 e 80°C a 0,5 m/s

O Hydroflux EP46 ainda se encontra na transição de regime misto para completo, com um coeficiente de piezoviscosidade elevado, por se tratar de um óleo mineral.

A Figura 72 mostra as curvas de tração a 0,5 m/s para o lubrificante Plantohyd 40N, a 30, 60 e 80°C.

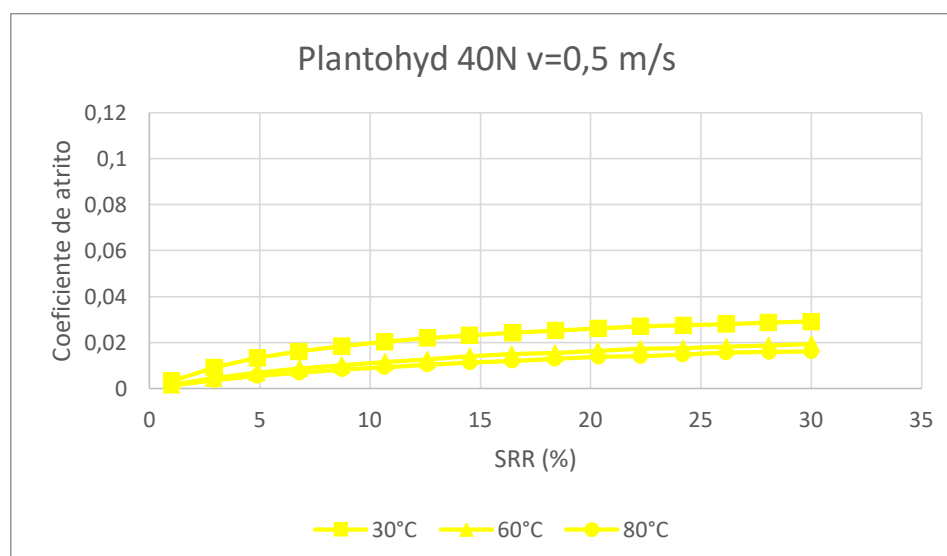


Figura 72- Curvas de tração para o lubrificante Plantohyd a 30, 60 e 80°C a 0,5 m/s

Com o aumento da velocidade, o lubrificante passou a estar em regime praticamente completo, sendo agora o maior valor de coeficiente de atrito a 30°C. Em regime de filme completo o atrito resulta apenas das tensões de corte do lubrificante, dependentes da viscosidade do óleo (quanto maior a viscosidade, maior as tensões de corte).

As Figura 73, Figura 74 e Figura 75 apresentam as curvas de tração para os quatro lubrificantes a 0,5 m/s e 30, 60 e 80°C.

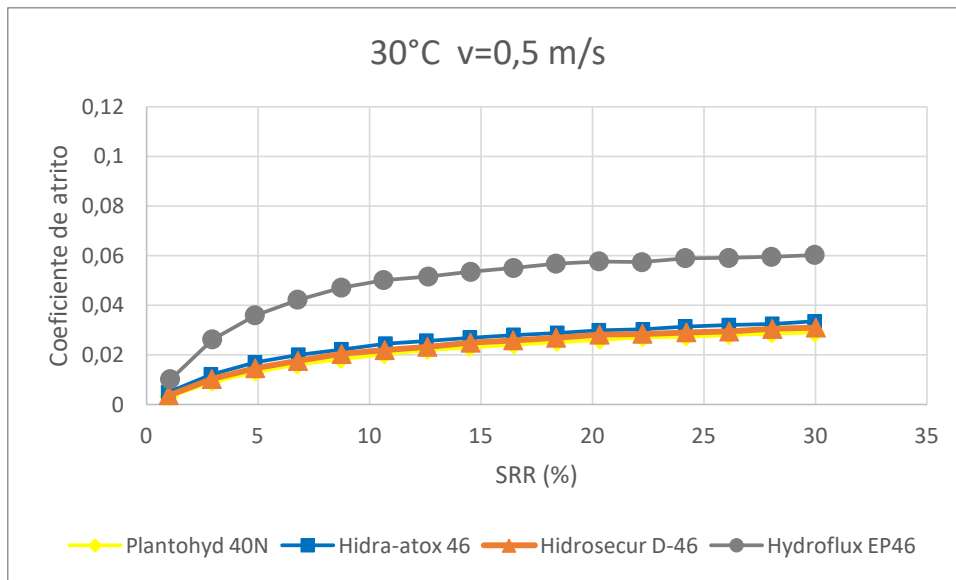


Figura 73- Curvas de tração para os quatro lubrificantes a 30°C a 0,5 m/s

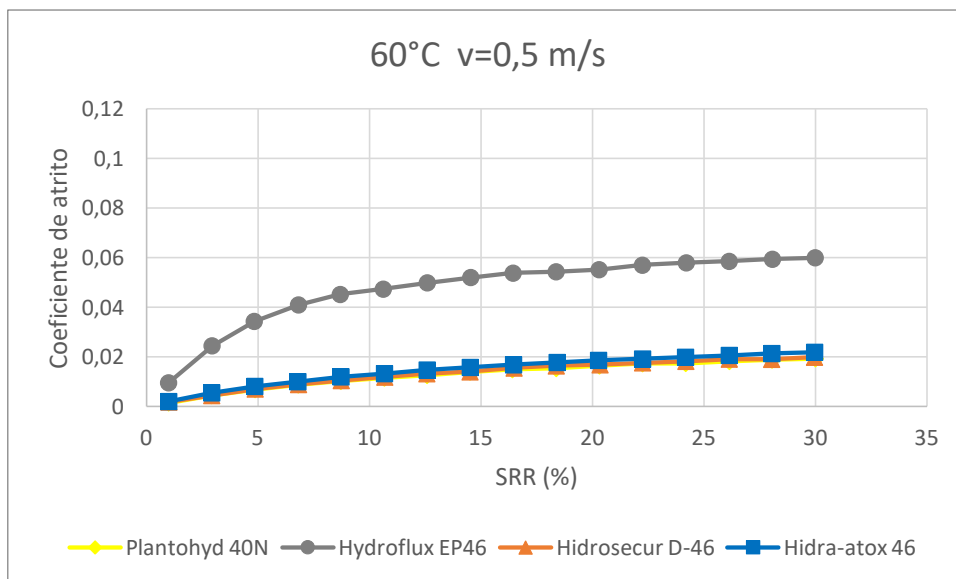


Figura 74- Curvas de tração para os quatro lubrificantes a 60°C a 0,5 m/s

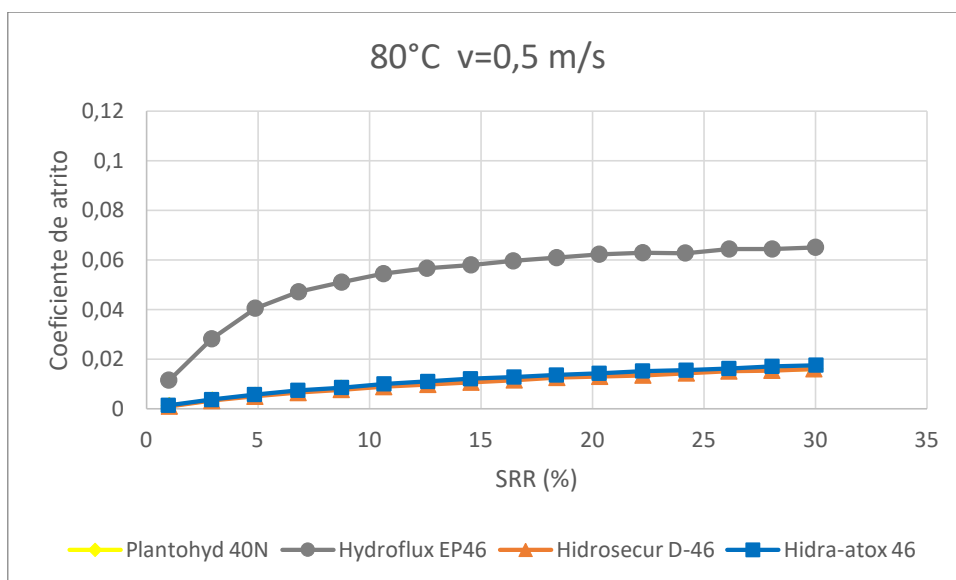


Figura 75- Curvas de tração para os quatro lubrificantes a 80°C a 0,5 m/s

Pela observação das figuras anteriores, conclui-se que para a mesma temperatura e velocidade, o lubrificante mineral apresenta maiores valores de coeficiente de atrito, enquanto os sintéticos apresentam valores semelhantes entre si.

Verifica-se, conforme já referido que o coeficiente de atrito diminui com o aumento da temperatura para os lubrificantes sintéticos, enquanto o Hydroflux EP46 tem um comportamento oposto, por ter um coeficiente de piezoviscosidade alto e ser de origem mineral.

A Tabela 22 mostra os diferentes regimes de lubrificação para os lubrificantes a 2m/s, a 30, 60 e 80°C.

Tabela 22- Regimes de lubrificação para os lubrificantes a 2m/s

v=2 m/s						
Lubrificante	30°C		60°C		80°C	
	λ	Regime	λ	Regime	λ	Regime
Hidra-atox 46	21,78	Completo	11,33	Completo	7,25	Completo
Hidrosecur D-46	24,75	Completo	11,64	Completo	7,87	Completo
Hydroflux EP46	25,81	Completo	11,40	Completo	6,86	Completo
Plantohyd 40N	19,58	Completo	9,60	Completo	6,80	Completo

A Figura 76 apresenta as curvas de tração a 2 m/s para o lubrificante Hidra-atox46, a 30, 60 e 80°C.

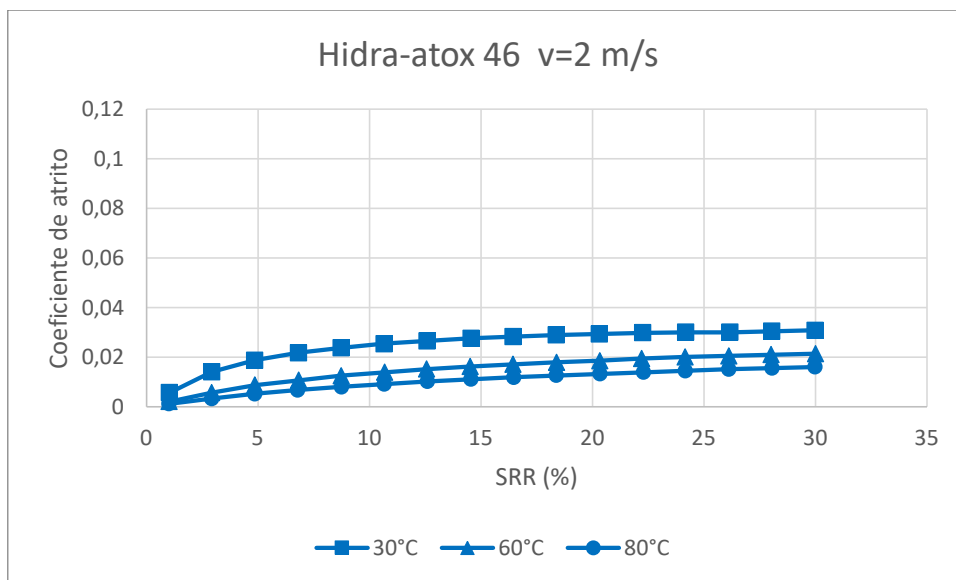


Figura 76- Curvas de tração para o lubrificante Hidra-atox 46 a 30, 60 e 80°C a 2 m/s

O Hidra-atox 46 encontra-se em regime completo, logo o valor do coeficiente de atrito aumentou com a diminuição da temperatura e aumento do SRR.

A Figura 77 apresenta as curvas de tração a 2 m/s para o lubrificante Hidrosecur D-46, a 30, 60 e 80°C.

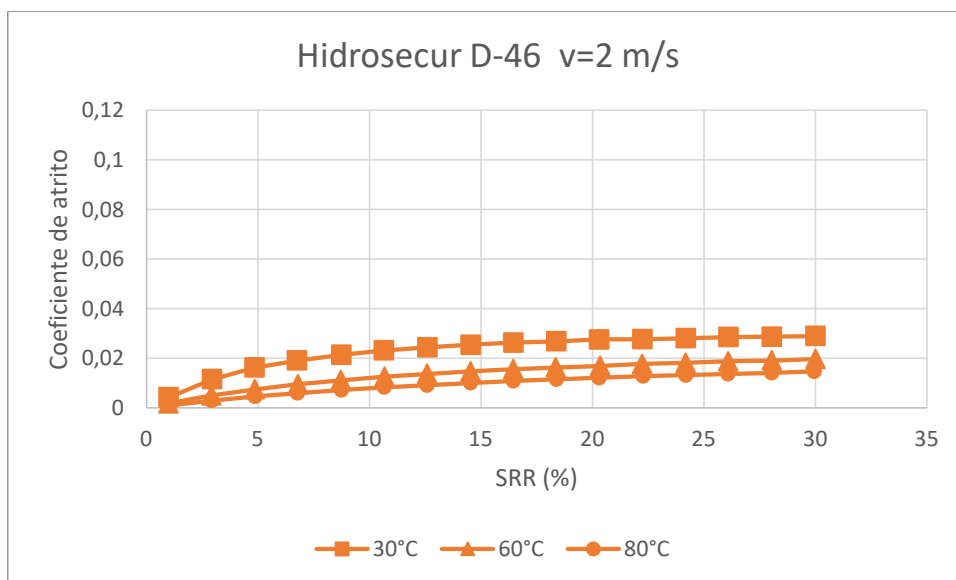


Figura 77- Curvas de tração para o lubrificante Hidrosecur D-46 a 30, 60 e 80°C a 2 m/s

Tal como visto para o Hidra-atox 46, o valor do coeficiente de atrito aumentou com a diminuição da temperatura e aumento do SRR.

A Figura 78 apresenta as curvas de tração a 2 m/s para o lubrificante Hydroflux EP46, a 30, 60 e 80°C.

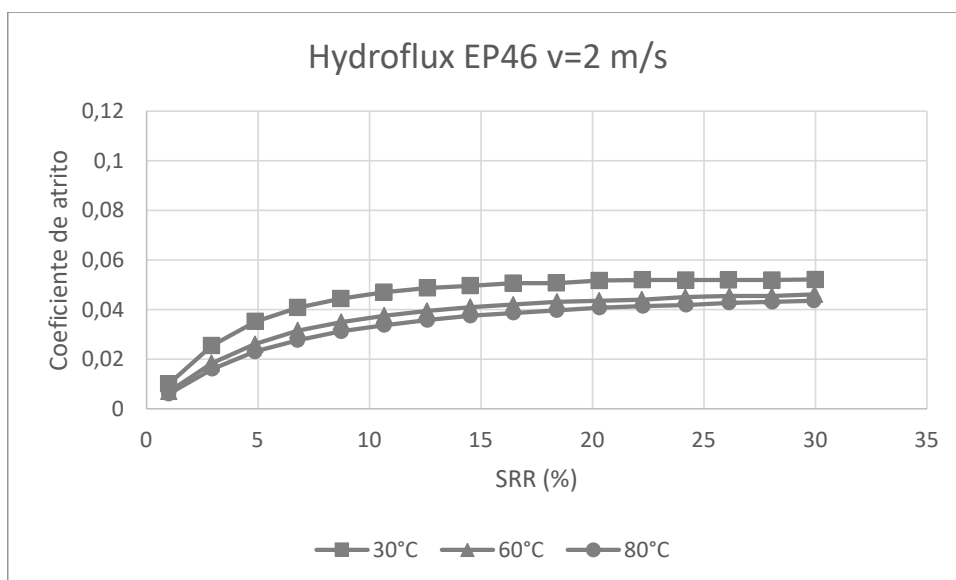


Figura 78- Curvas de tração para o lubrificante Hydroflux EP46 a 30, 60 e 80°C a 2 m/s

Pela análise da figura anterior conclui-se que o valor do coeficiente de atrito aumentou, com a diminuição da temperatura e aumento do SRR, tal como seria de esperar para regime completo.

A Figura 79 apresenta as curvas de tração a 2 m/s para o lubrificante Plantohyd 40N, a 30, 60 e 80°C.

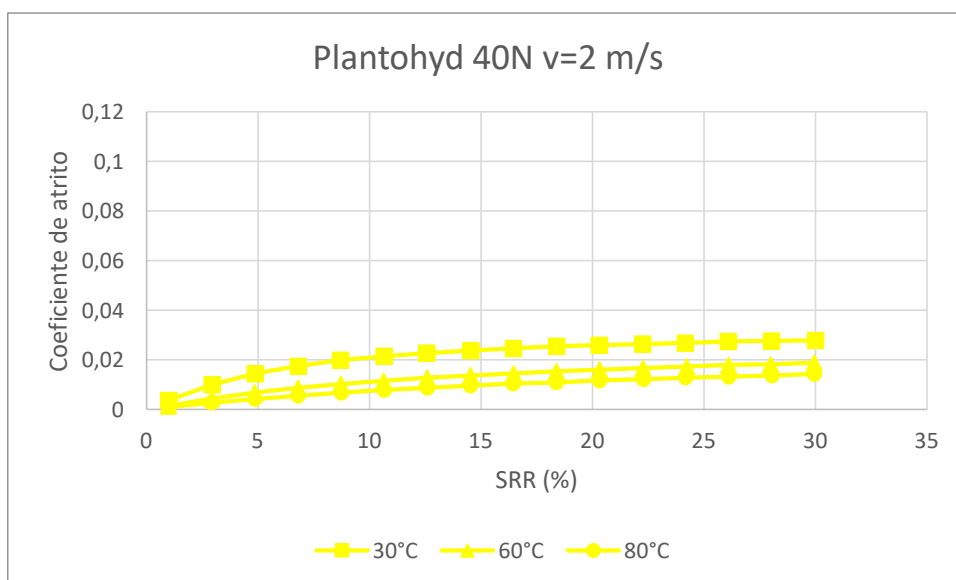


Figura 79- Curvas de tração para o lubrificante Plantohyd a 30, 60 e 80°C a 2 m/s

Tal como anteriormente, verifica-se que o valor do coeficiente de atrito aumentou, com a diminuição da temperatura e aumento do SRR.

A Figura 80, Figura 81 e Figura 82 apresentam as curvas de tração para os quatro lubrificantes a 2 m/s e 30, 60 e 80°C.

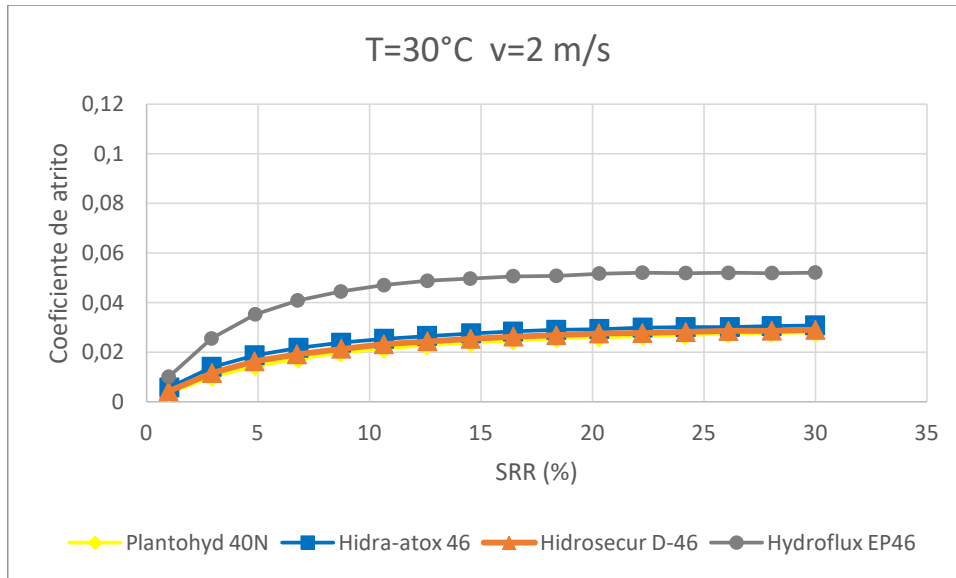


Figura 80- Curvas de tração para os quatro lubrificantes a 30°C a 2m/s

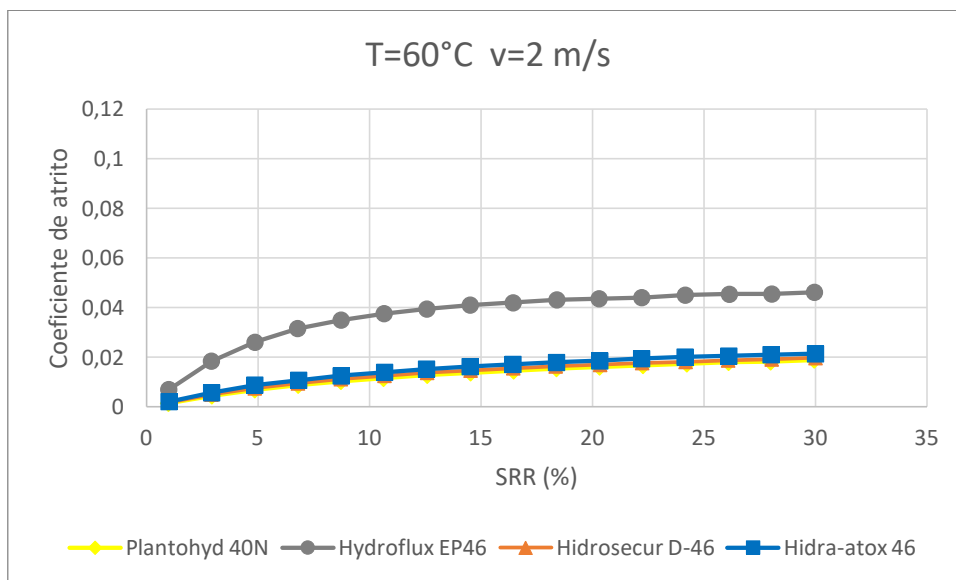


Figura 81- Curvas de tração para os quatro lubrificantes a 60°C 2m/s

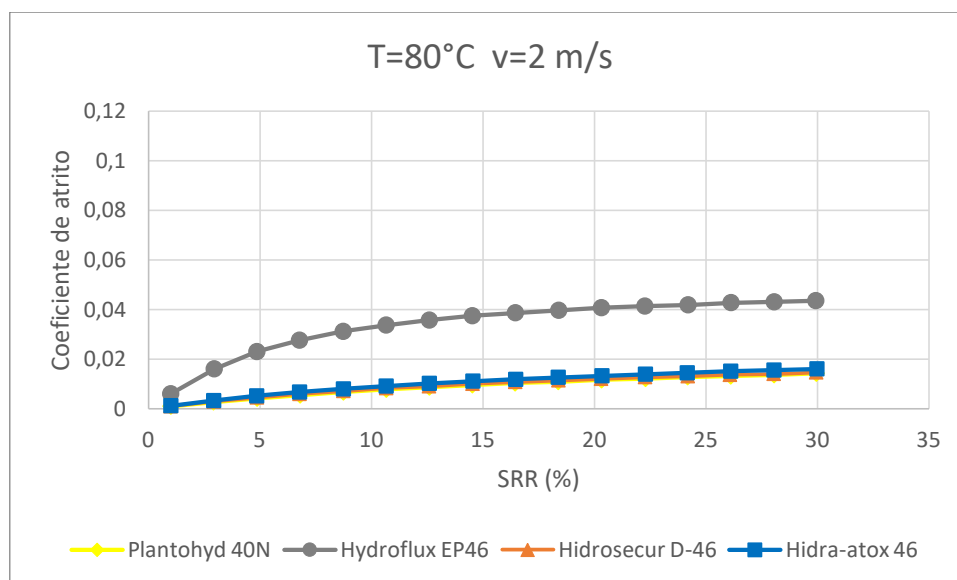


Figura 82- Curvas de tração para os quatro lubrificantes a 80°C 2m/s

Através da análise das figuras anteriores podemos constatar que os lubrificantes sintéticos mantêm valores baixos e semelhantes de coeficiente de atrito, ao longo do aumento do SRR, enquanto o lubrificante mineral (Hydroflux EP 46) apresenta valores de coeficiente de atrito mais elevados devido à sua natureza e coeficiente de piezoviscosidade. Neste caso (v=2m/s) os coeficientes de atrito baixaram com o aumento da temperatura para os quatro lubrificantes.

As curvas de Stribeck foram obtidas para as mesmas condições que as curvas de tração, com exceção do SRR que agora é constante (SRR=5%) e a velocidade a variar no intervalo de 0,04 a 2m/s.

Na Tabela 23 são apresentadas as principais condições de ensaio para a obtenção das curvas de Stribeck.

Tabela 23- Parâmetros selecionados para a obtenção das curvas de Stribeck

Temperatura [°C]	Velocidade [m/s]	FN [N]	SRR [%]
30	0,04 a 2	50	5
60			
80			

A Figura 83 mostra as curvas de Stribeck para o Hidra-atox46, a 30, 60 e 80°C.

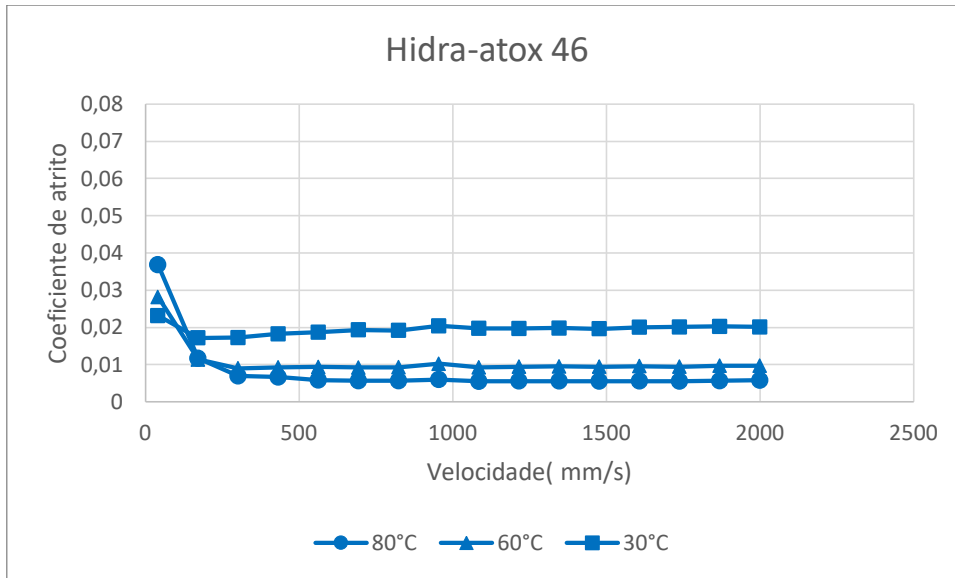


Figura 83- Curvas de Stribeck para o lubrificante Hidra-atox 46 a 30, 60 e 80°C

O valor do coeficiente de atrito é alto no início do teste a 80°C a baixa velocidade, devido ao lubrificante ainda se encontrar em regime limite. Todavia, com o aumento da velocidade o lubrificante transita para o regime completo, sendo mais viscoso a 30°C, logo o coeficiente de atrito é maior.

A Figura 84 mostra as curvas de Stribeck para o Hidrosecur D-46 a 30, 60 e 80°C.

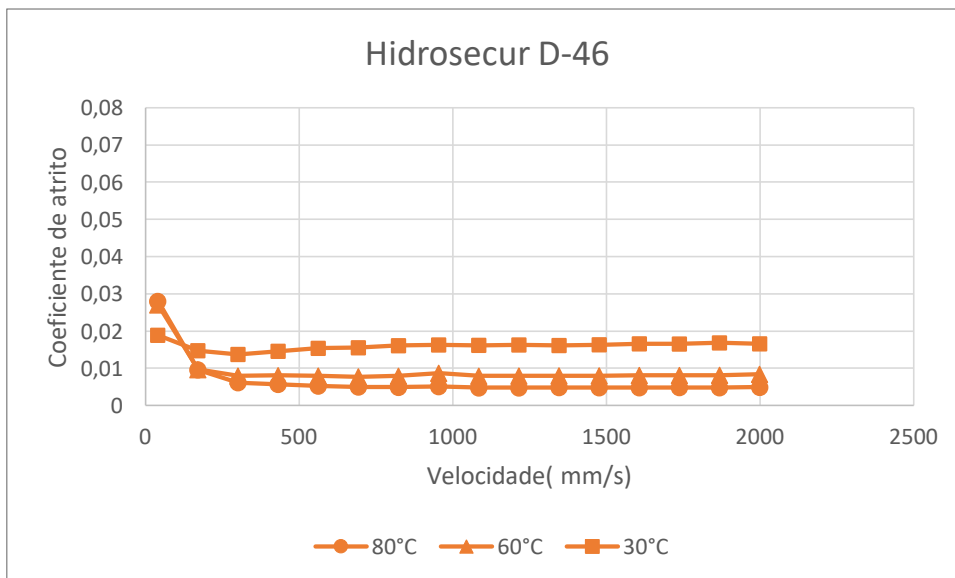


Figura 84- Curvas de Stribeck para o lubrificante Hidrosecur D-46 a 30, 60 e 80°C

Tal como na análise feita à figura anterior conclui-se que o valor do coeficiente de atrito aumentou inicialmente a 80°C e baixa velocidade, devido ao lubrificante ainda se encontrar em regime limite. Seguidamente, com o aumento da velocidade (transição para o regime completo) o coeficiente de atrito é maior para os 30°C.

A Figura 85 apresenta as curvas de Stribeck para o Hydroflux EP46 a 30, 60 e 80°C.

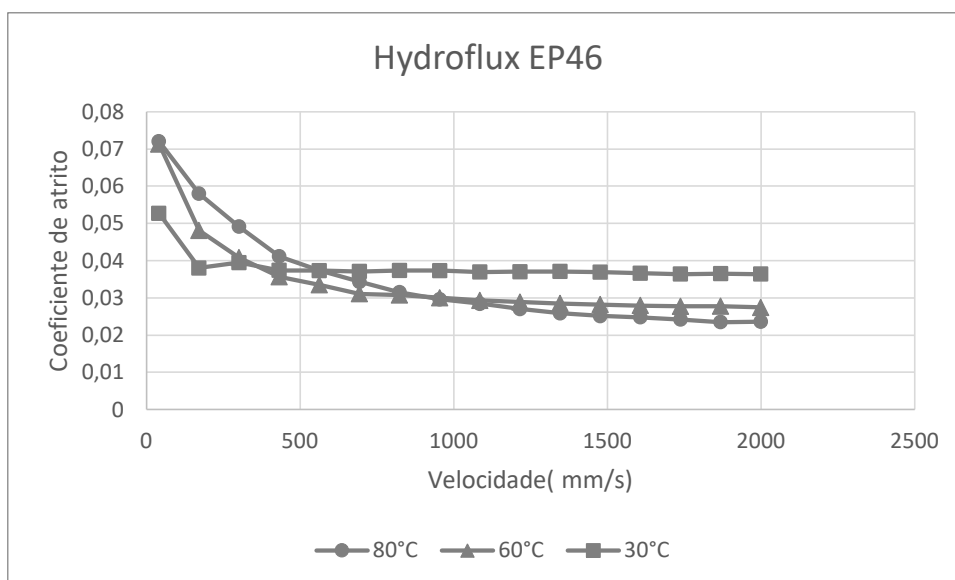


Figura 85- Curvas de Stribeck para o lubrificante Hydroflux EP46 a 30, 60 e 80°C

Para o Hydroflux EP46 o valor do coeficiente de atrito aumentou inicialmente a 80°C e baixa velocidade, devido ao lubrificante ainda se encontrar em regime limite. Com o aumento da velocidade o lubrificante transitou para regime completo. O lubrificante mineral precisou de uma velocidade superior relativamente aos sintéticos, para transitar até ao regime completo.

A Figura 86 apresenta as curvas de Stribeck para o Plantohyd 40N a 30, 60 e 80°C.

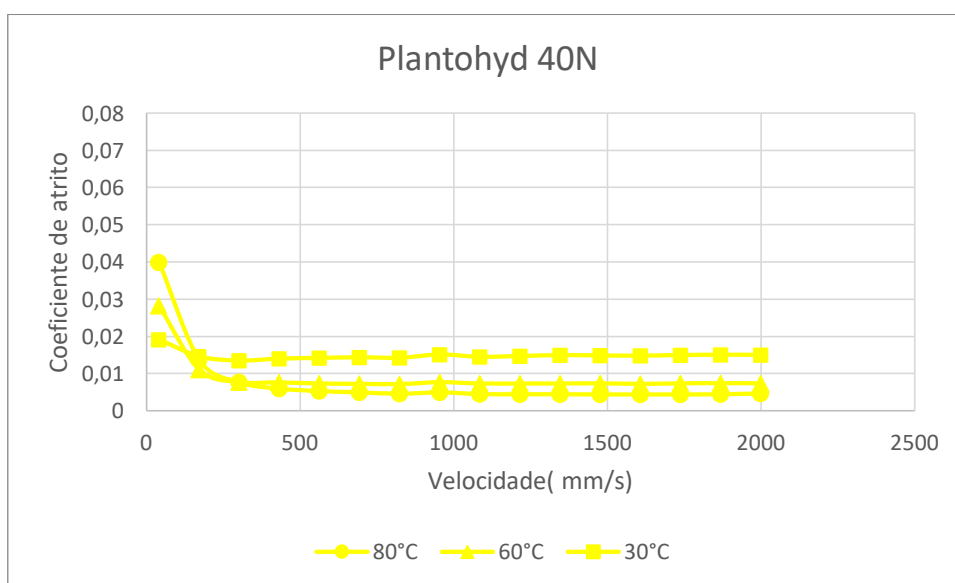


Figura 86- Curvas de Stribeck para o lubrificante Plantohyd a 30, 60 e 80°C

O valor do coeficiente de atrito aumentou inicialmente a 80°C e baixa velocidade, devido ao lubrificante ainda se encontrar em regime limite. Com o aumento da velocidade e já em regime completo, o coeficiente de atrito é maior para os 30°C.

A Figura 87, Figura 88 e Figura 89 apresentam as diferentes curvas de Stribeck para os quatro lubrificantes a 30, 60 e 80°C.

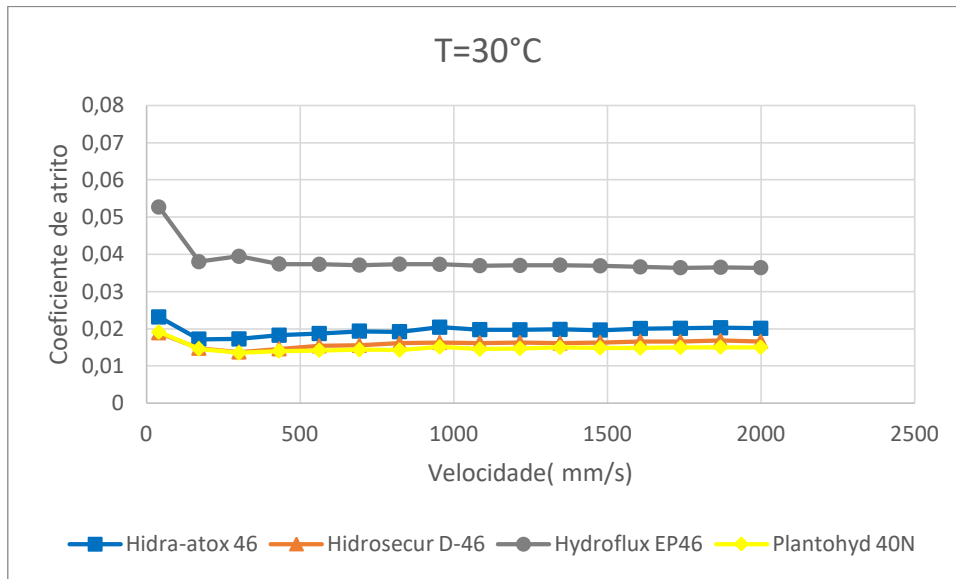


Figura 87- Curvas de Stribeck para os quatro lubrificantes a 30°C

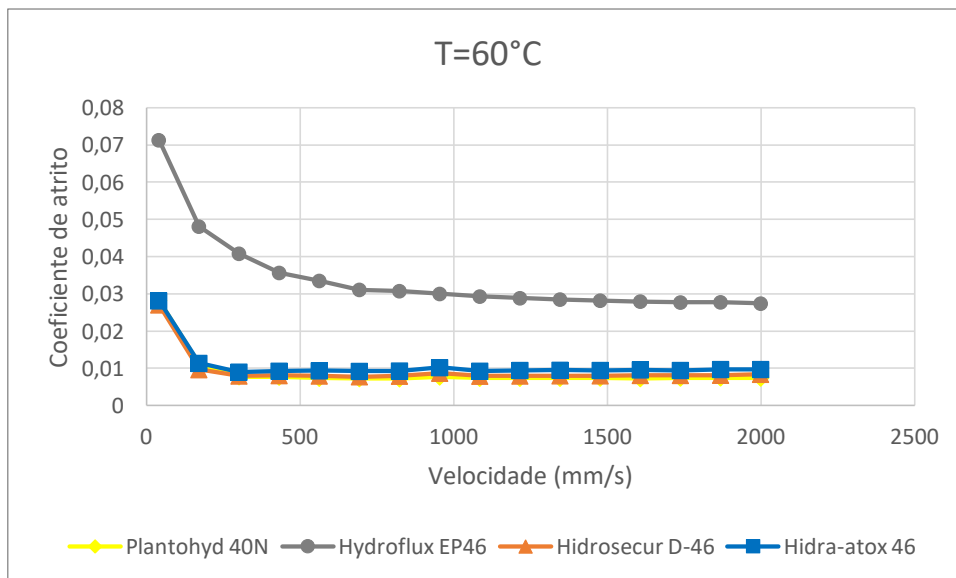


Figura 88- Curvas de Stribeck para os quatro lubrificantes a 60°C

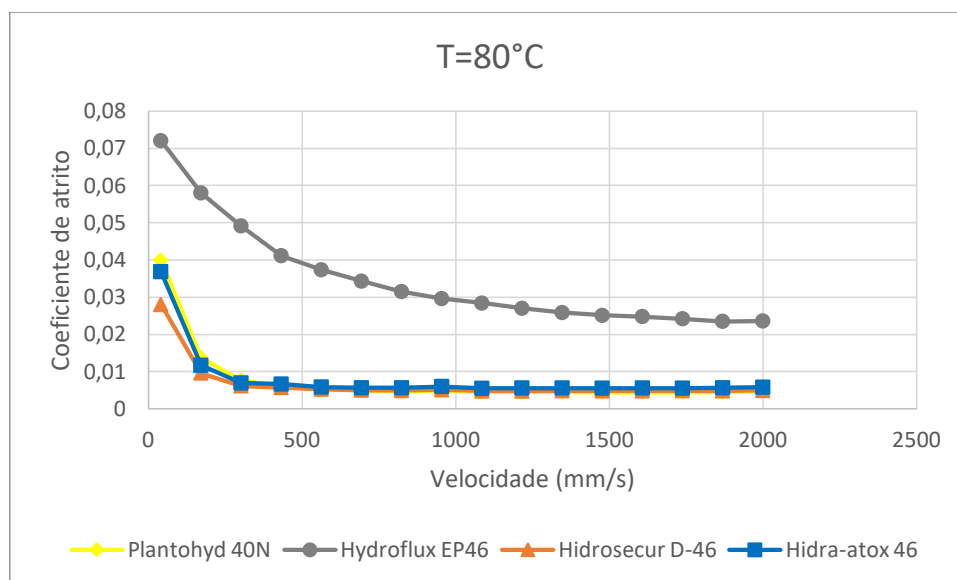


Figura 89- Curvas de Stribeck para os quatro lubrificantes a 80°C

Após observação das figuras anteriores, é possível observar que os lubrificantes sintéticos mantêm valores baixos e semelhantes de coeficiente de atrito, ao longo do aumento da velocidade de arrasto e temperatura, enquanto o lubrificante mineral (Hydroflux EP 46) apresenta valores de coeficiente de atrito mais elevados.

4.5 Ensaio de rolamentos

Os quatro óleos foram testados relativamente ao seu desempenho na lubrificação de um rolamento. Foram seleccionadas duas condições de rotação (250 e 1000 rpm) e temperatura (50 e 80°C), a carga constante (6,9kN).

4.5.1 Obtenção do binário de atrito

A Tabela 24 apresenta as condições do ensaio de rolamentos.

Tabela 24- Condições do ensaio de rolamentos

Ensaio	Temperatura imposta [°C]	Carga [kN]	R _{méd} [mm]	Velocidade de rotação [rpm]	Velocidade linear [m/s]
C1	50	6,9	21,75	250	0,57
C2	80			1000	2,30

A Tabela 25 mostra os registos do ensaio C1 (50°C): temperaturas e binário de atrito. O T_{bear} e o T_{sup} tratam-se das temperaturas medidas por baixo e por cima do

rolamento. O Tin representa a temperatura de entrada do fluido de refrigeração no interior do veio ao qual está acoplada a pista superior do rolamento e o Tout a temperatura de saída do mesmo fluido. Desta forma, através da circulação do fluido de refrigeração, é possível manter o sistema à temperatura pretendida.

Tabela 25- Ensaio de rolamentos a n=250 rpm e T=50°C

Lubrificante	Tbear [°C]	Tsup [°C]	Tin [°C]	Tout [°C]	ΔT [°C]	Binário [N.mm]
Hidra-atox 46	49,9	51,0	51,0	49,2	1,8	199,2
Hidrosecur D-46	49,9	50,3	51,2	49,2	2,0	197,4
Hydroflux EP46	49,8	50,1	49,3	47,3	2,0	409,6
Plantohyd 40N	49,9	50,4	50,7	48,7	2,0	220,6

A média das medições de binário (N.mm) para cada lubrificante apresenta-se na Figura 90.

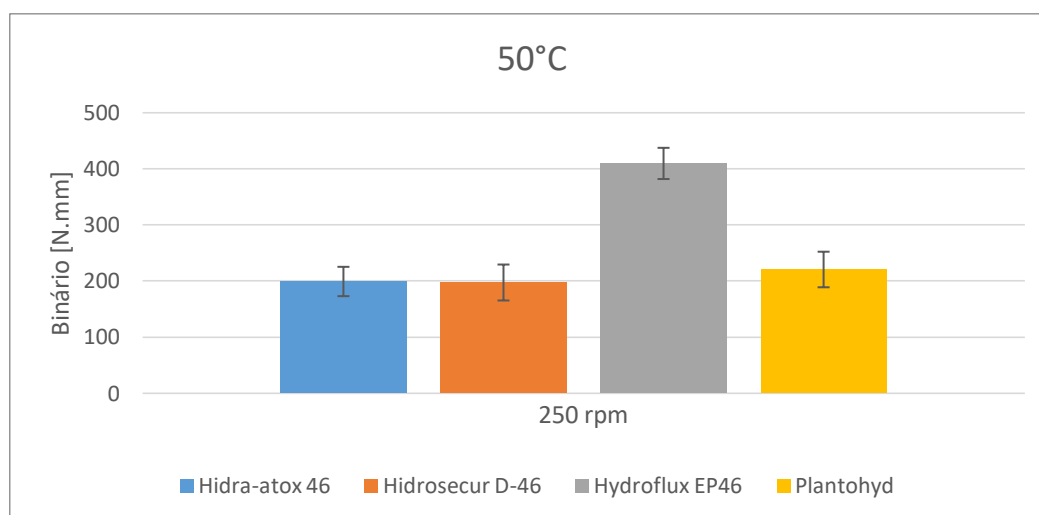


Figura 90- Medições de binário a 50°C e 250 rpm para os quatro lubrificantes

Observando a Figura 90, conclui-se que o lubrificante com o pior desempenho foi o mineral (Hydroflux EP46). Dentro dos lubrificantes sintéticos, o de pior desempenho foi o biodegradável Plantohyd 40N, sendo o menos viscoso. Os restantes lubrificantes sintéticos Hidra-atox46 e Hidrosecur D-46 (biodegradável) apresentaram valores muito semelhantes de binário.

A Tabela 26 apresenta os registos do ensaio C2 (80°C): temperaturas e binários de atrito.

Tabela 26- Ensaio de rolamentos a n=1000 rpm e T=80°C

Lubrificante	Tbear [°C]	Tsup [°C]	Tin [°C]	Tout [°C]	ΔT [°C]	Binário [N.mm]
Hidra-atox 46	79,9	83,0	77,7	72,5	5,2	133,9
Hidrosecur D-46	79,8	82,5	77,9	71,9	6,0	105,2
Hydroflux EP46	79,8	82,3	72,8	67,9	4,9	242,6
Plantohyd 40N	79,9	82,4	77,3	71,5	5,8	140,1

A média das medições de binário (N.mm) para cada lubrificante apresenta-se na Figura 91. O ensaio realizou-se a 80°C e 1000 rpm.

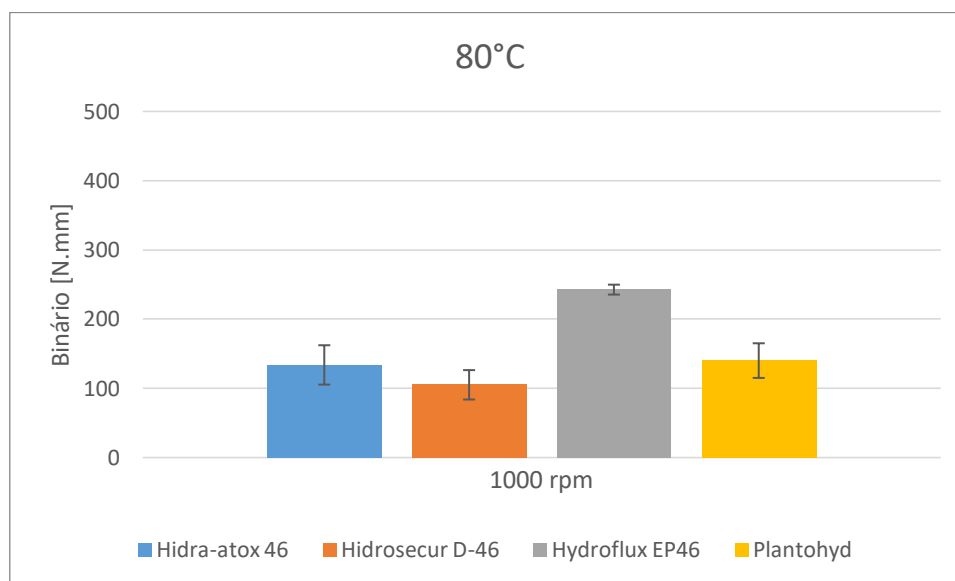


Figura 91- Medições de binário a 80°C e 1000 rpm para os quatro lubrificantes

Ao contrário do ensaio anterior o Hidra-atox46 encontra-se próximo do Plantohyd 40N e o Hidrosecur D-46 (biodegradável) apresentou os valores mais baixos de binário.

A Figura 92 mostra as diferentes temperaturas envolvidas no ensaio.

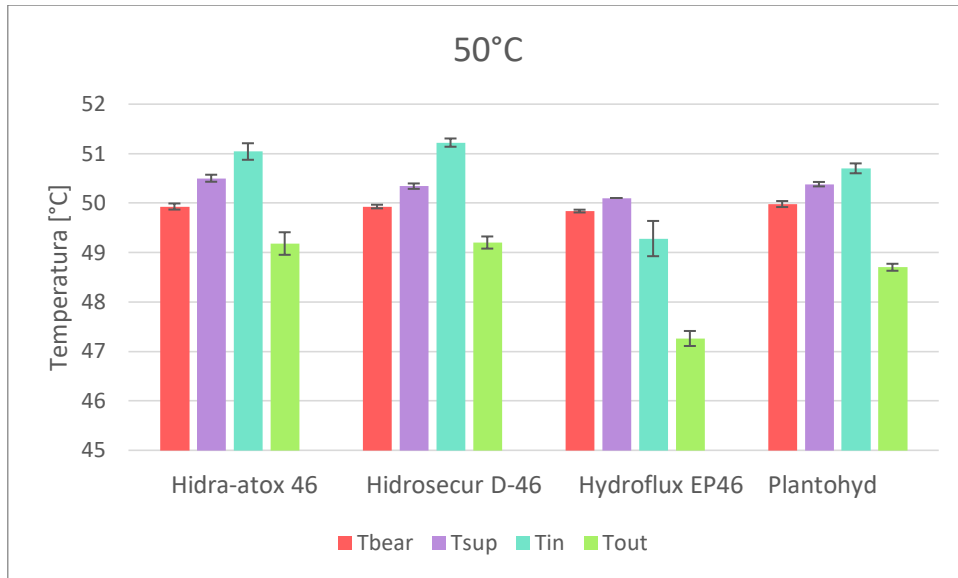


Figura 92- Tbear, Tsup, Tin e Tout a 50°C e 250 rpm

A Tsup é a temperatura imposta ao sistema, daí ser muito semelhante entre testes. A Tin e Tout vai depender do lubrificante. Se o lubrificante dissipar muita energia (sob a forma de calor) por atrito, então esse lubrificante mostrará um binário de atrito maior e o fluido de refrigeração não precisa de “aquecer” tanto o sistema, logo o Tin será mais baixo, assim como o Tout. Este é o caso do Hydroflux EP46, logo o desempenho deste lubrificante é o pior, pois perde mais energia nas mesmas condições de ensaio.

Na Figura 93 é possível observar as diferentes temperaturas envolvidas no ensaio de rolamentos.

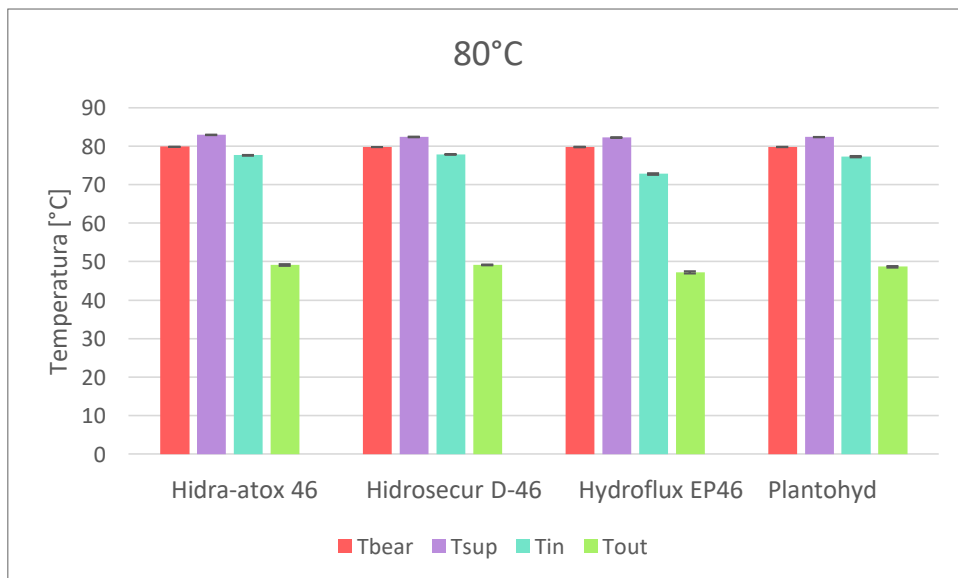


Figura 93- Tbear, Tsup, Tin e Tout a 80°C e 1000 rpm

Através da figura anterior, conclui-se que as maiores variações no desvio padrão ocorrem no Tin e Tout. Isto deve-se aos valores de temperatura necessários para que ocorra a transferência de calor para manter o sistema à temperatura pretendida.

4.6 Ferrometria

Após o término dos ensaios de rolamentos recolheram-se as amostras dos lubrificantes utilizados e procedeu-se à medição do índice de concentração de partículas ferrosas, através do ferrógrafo de leitura direta DRIII. Assim, obteve-se a quantidade de partículas grandes (DI) e pequenas (Ds). Seguidamente calculou-se a concentração de partículas de desgaste (CPUC) e a severidade do desgaste (ISUC), recorrendo à Equação 16 e à Equação 17 [60]:

$$CPUC = \frac{DI + Ds}{d} \quad \text{Equação 16}$$

$$ISUC = \frac{DI^2 - Ds^2}{d^2} \quad \text{Equação 17}$$

Na Tabela 27 encontram-se já calculados a concentração de partículas de desgaste (CPUC) e a severidade do desgaste (ISUC). Para além disso, também mostra o fator de diluição da amostra (d), assim como a quantidade de partículas grandes (DI) e pequenas (Ds).

Tabela 27- Resultados da ferrometria para os quatro lubrificantes

Amostra	d	DI	Ds	CPUC	ISUC
Hidra-atox 46	1	44,6	24,7	69,3	1379,1
Hidrosecur D-46	1	64,9	35,7	100,2	2937,5
Hydroflux EP46	0,1	18,1	15,9	340,0	7480,0
Plantohyd 40N	1	51,6	42,0	93,6	898,56

Analisando a Tabela 27 conclui-se que o lubrificante com maior concentração de partículas de desgaste (CPUC) e severidade do desgaste (ISUC) foi o lubrificante mineral Hydroflux EP46 (a diluição foi de 0,1, de forma aos valores de DI e Ds serem semelhantes aos dos outros lubrificantes para se poder comparar) e o que apresentou menor concentração de CPUC e ISUC foi o Plantohyd 40N.

CONCLUSÕES

5.1 CONCLUSÕES

5.2 PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

5 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

A revisão bibliográfica descreveu a história da lubrificação, características dos lubrificantes (físicas, químicas e aditivos), classificação dos lubrificantes (quanto ao estado físico, origem e aplicação), indústria dos lubrificantes, critério de seleção de um lubrificante e os lubrificantes e o meio ambiente. Assim, consolidou-se conhecimentos sobre as principais características dos lubrificantes convencionais e as normas inerentes aos lubrificantes biodegradáveis.

A substituição dos lubrificantes convencionais pelos biodegradáveis apresenta vantagens relevantes como: baixa toxicidade; menor custo no seu derramamento; lubrificação superior; elevado índice de viscosidade; maior segurança e renovável. Apesar destas seis vantagens, os lubrificantes biodegradáveis apresentam quatro desvantagens: preço; instabilidade oxidativa; alto ponto de fluidez e dificuldade na sua reciclagem.

Atualmente, os cientistas estão a melhorar a performance dos lubrificantes amigos do ambiente, atenuando as suas desvantagens. Desta forma, antes de iniciar a segunda parte deste trabalho concluiu-se, tal como era previsto, que os lubrificantes biodegradáveis trazem bastantes vantagens face aos convencionais.

A segunda parte deste relatório consistiu na caracterização dos dois tipos de lubrificantes e a realização dos ensaios tribológicos, com os ensaios bola/disco, os ensaios de rolamentos e análise e comparação dos lubrificantes a partir dos resultados obtidos.

A primeira escolha tratou-se de óleos para lubrificar engrenagens/rolamentos, o que acabou por se tornar pouco viável temporal e financeiramente. Assim, o que foi possível encontrar em tempo útil e financeiramente viável foram os óleos hidráulicos, nomeadamente, o Hidra-atox 46 (Sintético e não tóxico), Hidrosecur D-46 (Sintético e biodegradável), Hydroflux EP 46 (Mineral) e Plantohyd 40 N (Sintético e biodegradável).

Através da análise FTIR constatou-se que o lubrificante Hidra-atox 46 sofreu alterações na identidade molecular nas amostras oxidadas. No Hidrosecur D-46 houve interferência molecular devido à presença de água, sendo o que sofreu mais alterações a nível molecular. Verificou-se que o Hydroflux EP46 oxida na presença de água e o Plantohyd 40N é um óleo sensível à temperatura.

Observou-se através do ensaio bola/disco (curvas de tração e de Stribeck) que os lubrificantes sintéticos mantêm valores baixos e semelhantes de coeficiente de atrito, enquanto o mineral (Hydroflux EP 46) apresenta valores de coeficiente de atrito mais elevados.

Tal como visto anteriormente, o lubrificante Hydroflux EP46 mostrou o pior desempenho, pois libertou mais energia (sob a forma de calor, por atrito), apresentando o maior valor de binário. O lubrificante de menor binário, para as mesmas condições de ensaio, foi o Hidrosecur D-46.

No ensaio de rolamentos, tal como verificado no ensaio bola/disco, quanto maior o coeficiente de atrito, maior a perda de potência.

Após o ensaio de rolamentos, com a realização da ferrometria concluiu-se que o lubrificante com maior concentração de partículas de desgaste (CPUC) e severidade do desgaste (ISUC) foi o lubrificante mineral Hydroflux EP46 e o que apresentou menor concentração de CPUC e ISUC o Plantohyd 40N.

Em suma, as melhores opções são os lubrificantes sintéticos biodegradáveis. Para uma boa performance de longa duração, pretendendo pouco desgaste do lubrificante, a melhor opção é o Plantohyd 40N. Porém, para uma elevada performance num curto espaço de tempo, a melhor solução seria o Hidrosecur D-46, por apresentar o menor coeficiente de atrito (menor binário) e elevado desgaste do lubrificante.

5.2 PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

Seria interessante dar continuidade a este trabalho analisando outras aplicações de lubrificantes, para além das hidráulicas e de diferente grau ISO VG.

Estudar e entender o efeito dos aditivos existentes em cada óleo que condiciona o atrito, em particular nas condições limite de lubrificação.

Outro aspeto a estudar futuramente seria o desempenho de massas lubrificantes biodegradáveis, assim como as suas aplicações na indústria.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES
DE INFORMAÇÃO**

6 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

- [1] "Tribologia, conceitos e aplicações". [Online]. Disponível em: <http://www.bibl.ita.br/xiiiencita/FUND18.pdf>, [Consultado a 28-10-2020].
- [2] "Tipos de movimentos relativos". [Online]. Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/Figura-8-Tipos-de-movimentos-relativos-de-superficies-a-rolamento-e-b-deslizamento_fig2_284448063, [Consultado a 28-10-2020].
- [3] "Desgaste em matrizes de forjamento". [Online]. Disponível em: <http://www.revistaferamental.com.br/site/artigo/desgaste-em-matrizes-de-forjamento>, [Consultado a 28-10-2020].
- [4] "Desgaste e seus mecanismos". [Online]. Disponível em: <https://engenheirodemateriais.com.br/2017/11/03/desgaste-e-os-seus-mecanismos/>, [Consultado a 28-10-2020].
- [5] "Falhas por desgaste". [Online]. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/2792745/mod_resource/content/2/Aula%203.pdf, [Consultado a 28-10-2020].
- [6] "Turbinas eólicas". [Online]. Disponível em: <https://cld.pt/dl/download/41e927bb-4f86-49aa-ae29-329c6a510155/case1.pdf>, [Consultado a 28-10-2020].
- [7] "Mecanismos de desgaste". [Online]. Disponível em: <https://rijeza.com.br/wp-content/uploads/2020/08/mecanismos-desgaste-erosao-abrasao-corrosao.pdf>, [Consultado a 28-10-2020].
- [8] "Os tipos de corrosão". [Online]. Disponível em: <https://betaeq.com.br/index.php/2018/11/27/os-tipos-de-corrosao/>, [Consultado a 28-10-2020].
- [9] "A importância da lubrificação em sistemas tribológicos". [Online]. Disponível em: https://www.ordemengenheiros.pt/fotos/dossier_artigo/20150325_jsobral_13_003981245515542fcb3fc.pdf, [Consultado a 28-10-2020].
- [10] D. Gonçalves, A. Vieira, A. Carneiro, A. V. Campos, and J. H. O. Seabra, "Film thickness and friction relationship in grease lubricated rough contacts," *Lubricants*, vol. 5, no. 3, p. 34, 2017.
- [11] O. P. Parenago, R. Z. Safieva, S. V. Antonov, N. D. Stenina, and A. S. Lyadov, "State-of-the-Art and Future Prospects of Production of Biodegradable Lubricating Greases," *Petroleum Chemistry*, vol. 57, no. 12, pp. 1144-1146, 2017.
- [12] G. A. González-Reyes, S. Bayo-Besteiro, J. Vich Llobet, and J. A. Añel, "Environmental and Economic Constraints on the Use of Lubricant Oils for Wind and Hydropower Generation: The Case of NATURGY," *Sustainability*, vol. 12, no. 10, p. 4242, 2020.
- [13] "Lubrificantes ambientalmente aceitáveis: regulamentos, aplicações e opções". [Online]. Disponível em: https://www.unols.org/sites/default/files/Bryant_EnvironmentallyAcceptableLubricants.pdf, [Consultado a 24-11-2020].
- [14] "Lubrificantes biodegradáveis: matérias-primas, modificações químicas e benefícios ambientais". [Online]. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/229916656_Biolubricants_Raw_ma

- [terials chemical modifications and environmental benefits](#) [Consultado a 25-11-2020].
- [15] K. J. Anderson, "A history of Lubricants," *MRS Bulletin*, vol. 16, no. 10, pp. 69-69, 1991.
- [16] "Como é feito o vidro colorido". [Online]. Disponível em: <https://industria hoje.com.br/como-e-feito-o-vidro-colorido>, [Consultado a 01-11-2020].
- [17] D. M. Pirro, M. Webster, and E. Daschner, *Lubrication fundamentals, revised and expanded*. CRC Press, 2016.
- [18] "Hidrômetros". [Online]. Disponível em: <https://stylab-shop.com/category/areometry/395.html>, [Consultado a 01-11-2020].
- [19] G. Stachowiak and A. W. Batchelor, *Engineering tribology*. Butterworth-Heinemann, 2013.
- [20] "Viscosidade". [Online]. Disponível em: <https://wikiciencias.casadasciencias.org/wiki/index.php/Viscosidade>, [Consultado a 18-01-2020].
- [21] "JANOX Aço inoxidável". [Online]. Disponível em: <http://blog.janox.com.br/oxidacao-corrosao-e-ferrugem-entenda-as-diferencas/>, [Consultado a 02-11-2020].
- [22] D. Goncalves, T. Cousseau, A. Gama, A. V. Campos, and J. H. O. Seabra, "Friction torque in thrust roller bearings lubricated with greases, their base oils and bleed-oils," *Tribology International*, vol. 107, pp. 306-319, 2017.
- [23] A. R. Lansdown, *Lubrication: a practical guide to lubricant selection*. Elsevier, 2013.
- [24] "Colza". [Online]. Disponível em: <https://educalingo.com/pt/dic-es/colza>, [Consultado a 20-11-2020].
- [25] "Ricinus communis". [Online]. Disponível em: <https://www.jardineiro.net/plantas/mamona-ricinus-communis.html>, [Consultado a 22-11-2020].
- [26] M. M. Khonsari and E. R. Booser, *Applied tribology: bearing design and lubrication*. John Wiley & Sons, 2017.
- [27] L. J. Gschwender, D. C. Kramer, B. K. Lok, S. K. Sharma, C. E. Snyder, and M. L. Sztenderowicz, "Liquid lubricants and lubrication," *Modern Tribology Handbook*, vol. 1, pp. 361-382, 2001.
- [28] T. Mang and C. Busch, "Lubricants in the tribological system," *Lubricants and Lubrication*, pp. 11-30, 2017.
- [29] R. Bevan, P. T. C. Harrison, B. Jeffery, and D. Mitchell, "Evaluating the risk to humans from mineral oils in foods: Current state of the evidence," *Food and Chemical Toxicology*, vol. 136, p. 110966, 2020.
- [30] "Lubrificantes biodegradáveis e ambientalmente aceitáveis (EAL)". [Online]. Disponível em: <https://www.tribonet.org/bio-lubricants-and-environmentally-acceptable-lubricants-eal/>, [Consultado a 08-01-2021].
- [31] "Lubrificantes ambientalmente aceitáveis". [Online]. Disponível em: <https://www.totallubmarine.com/innovation/eal-bio-lubricants-greases>, [Consultado a 08-01-2021].
- [32] "Uma revisão sobre a ciência e tecnologia de biolubrificantes naturais e sintéticos". [Online]. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40735-016-0069-5>, [Consultado a 08-01-2021].
- [33] "Lubrificantes de qualidade alimentar e ambientalmente corretos". [Online]. Disponível em: <https://www.clarionlubricants.com/Welcome.do>, [Consultado a 08-01-2021].
- [34] "O que deve saber sobre lubrificantes ecológicos". [Online]. Disponível em: <https://www.machinerylubrication.com/Read/29229/environmentally-friendly-lubricants>, [Consultado a 08-01-2021].

- [35] "Desempenho tribológico de lubrificantes biodegradáveis ambientalmente corretos com base em uma combinação de ácido bórico e óleos de base biológica". [Online]. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7504173/>, [Consultado a 08-01-2021].
- [36] K. Jones, "Brajendra K. Sharma and Girma Bireshaw (Eds): Environmentally Friendly and Biobased Lubricants," ed: Springer, 2017.
- [37] B. C. Roell Jr, "Best Practices in Choosing and Maintaining EALs for Marine Applications," *Marine log (New York, NY)*, 2016.
- [38] D. Theodori, R. J. Saft, H. Krop, and P. Van Broekhuizen, "Development of Criteria for the Award of the European Eco-label to Lubricants," *IVAM, Amsterdam*, 2004.
- [39] P. Nagendramma and S. Kaul, "Development of ecofriendly/biodegradable lubricants: An overview," *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 16, no. 1, pp. 764-774, 2012.
- [40] B. K. Sharma and G. Biresaw, *Environmentally friendly and biobased lubricants*. CRC Press, 2016.
- [41] J. A. Cecilia, D. Ballesteros Plata, R. M. Alves Saboya, F. M. Tavares de Luna, C. L. Cavalcante, and E. Rodríguez-Castellón, "An Overview of the Biolubricant Production Process: Challenges and Future Perspectives," *Processes*, vol. 8, no. 3, p. 257, 2020.
- [42] J. Van Rensselaar, "Biobased Lubricants: Gearing up for a green world," *Tribology & lubrication technology*, vol. 66, no. 1, p. 32, 2010.
- [43] V. F. Medina, "Evaluation of Environmentally Acceptable Lubricants (EALS) for Dams Managed by the US Army Corps of Engineers," ENGINEER RESEARCH AND DEVELOPMENT CENTER VICKSBURG MS ENVIRONMENTAL LAB2015.
- [44] "Lubrificantes ambientalmente aceitáveis". [Online]. Disponível em: <https://www.l Lubrificantes.com/lubrificantes/environmentally-acceptable-lubrificantes/>, [Consultado a 09-01-2021].
- [45] "Lubrificantes ambientalmente aceitáveis (EAL)". [Online]. Disponível em: https://www.fuchs.com/fileadmin/us/product-data/EAL_Lubrificantes_Product_Brochure.pdf, [Consultado a 09-01-2021].
- [46] "Compreender lubrificantes biodegradáveis". [Online]. Disponível em: <https://safety4sea.com/wp-content/uploads/2015/01/IMCA-Understanding-Biodegradable-Lubrificantes.pdf>, [Consultado a 09-01-2021].
- [47] A. Z. Syahir *et al.*, "A review on bio-based lubricants and their applications," *Journal of Cleaner Production*, vol. 168, pp. 997-1016, 2017.
- [48] W.-T. Tsai, "An analysis of used lubricant recycling, energy utilization and its environmental benefit in Taiwan," *Energy*, vol. 36, no. 7, pp. 4333-4339, 2011.
- [49] A. J. Jafari and M. Hassanpour, "Analysis and comparison of used lubricants, regenerative technologies in the world," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 103, pp. 179-191, 2015.
- [50] G. Singh, V. Aggarwal, and S. Singh, "Critical review on ecological, economical and technological aspects of minimum quantity lubrication towards sustainable machining," *Journal of Cleaner Production*, p. 122185, 2020.
- [51] H. Liu, H. Liu, C. Zhu, and R. G. Parker, "Effects of lubrication on gear performance: A review," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 145, p. 103701, 2020.
- [52] F. J. Owuna, "Stability of vegetable based oils used in the formulation of ecofriendly lubricants—a review," *Egyptian Journal of Petroleum*, 2020.
- [53] D. E. P. Gonçalves, "Densimetria- Instruções de trabalho."
- [54] D. E. P. Gonçalves, "Viscosimetria- Instruções de trabalho."
- [55] "Molecular Spectroscopy - A Precision

- Lubrication Tool?*" [Online]. Disponível em: <https://www.machinerylubrication.com/Read/477/molecular-spectroscopy-lubrication>, [Consultado a 01-05-2021].
- [56] A. M. Toms and B. D. Maclsaac, "On-line oil condition sensor for industrial gas turbine condition assessment," 2005.
- [57] D. E. P. Gonçalves, "Ferrometria- Instruções de trabalho."
- [58] *EHD2*. [Online]. Disponível em: <https://pcs-instruments.com/product/ehd-elasto-hydrodynamic-lubriiction-2/>, [Consultado a 20-05-2021].
- [59] P. M. T. Marques, R. C. Martins, and J. H. O. Seabra, "Experimental measurement of rolling bearing torque loss in a modified Four-Ball machine: An improved setup," *Lubrication Science*, vol. 32, no. 5, pp. 245-259, 2020.
- [60] B. Graça, J. Seabra, J. D. Rodrigues, L. A. Ferreira, and R. Martins, "Laboratório de Lubrificação e Vibrações."

ANEXOS

7.1 HIDRA-ATOX 46

7.2 HIDROSECUR D-46

7.3 HYDROFLUX EP46

7.4 PLANTOHYD 40N

7.5 SKF 51107

7.6 FTIR HIDRA-ATOX 46 E HIDROSECUR D-46

7.7 FTIR HYDROFLUX EP46 E PLANTOHYD 40N

7.8 FTIR HIDRA-ATOX 46

7.9 FTIR HIDROSECUR D-46

7.10 FTIR HYDROFLUX EP46

7.11 FTIR PLANTOHYD 40N

7 ANEXOS

7.1 Hidra-atox 46



BESLUX HIDRA – ATOX 46

ACEITE HIDRÁULICO MULTIFUNCIONAL.
ESPECIAL PARA LA INDUSTRIA ALIMENTARIA.

OLIVE BASED

PENDIENTE



Nonfood Commodity
Program Listed 461

DESCRIPCION

BESLUX HIDRA – ATOX 46 está formulado con aceite base sintético de origen vegetal y aditivos especiales, exentos de hidrocarburos.

Todas las materias primas utilizadas en su formulación aparecen en las listas positivas de la FOOD AND DRUGS ADMINISTRATION (FDA).

Está homologado en la categoría NSF H-1 (anteriormente USDA H-1), con el número de registro ... (PENDIENTE).

Por ello **BESLUX HIDRA – ATOX 46** puede estar en contacto incidental con alimentos, o materias primas que entren en su elaboración, sin presentar ningún riesgo para la salud.

Además presenta las siguientes ventajas:

- Exento de hidrocarburos.
- Gran capacidad antidesgaste de los equipos.
- Alto índice de viscosidad, lo que hace que el aceite **BESLUX HIDRA – ATOX 46** presenta unas curvas de viscosidad-temperatura bastante planas. Es decir su comportamiento a altas temperaturas es excelente.
- Muy bajos puntos de congelación, pudiendo trabajar en entornos con temperaturas por debajo de cero grados, y facilitando arrancar la maquinaria después de varios días de paro.
- Gran estabilidad a la pérdida de viscosidad por cizallamiento.
- Excelente capacidad antiespumante y muy buena desaireación. Excelente desmulsionante del agua, con un valor muy bueno.
- No obtura filtros y válvulas.
- Fluido biodegradable.

APLICACIONES

Por sus características y aditivación, el aceite **BESLUX HIDRA – ATOX 46**, es un aceite hidráulico que se puede utilizar en la lubricación de casi toda la maquinaria utilizada en la industria alimentaria.

BESLUX HIDRA – ATOX 46 da óptimos resultados en la lubricación de todos aquellos puntos que requieran un aceite de engrase general.

- Sistemas hidráulicos de vibradores de olivos y maquinaria agrícola.
- Bombas de trasiego.

Puede utilizarse en rodamientos, cojinetes, guías, cadenas y pequeños mecanismos que necesiten un aceite del tipo media presión, proporcionando una lubricación limpia y no contaminante.

PRECAUCIONES

Tenemos a su disposición Ficha de Datos de Seguridad del producto, conforme a la normativa europea vigente.

ENVASES

Existen distintas capacidades de suministro. Consultar con el Departamento Comercial.

CARACTERÍSTICAS FÍSICO – QUÍMICAS (VALORES TÍPICOS)

Grado de Viscosidad ISO-3448	46
Viscosidad a 40° C	41.4 – 50.6 cSt
Índice de viscosidad	193
Punto de Inflamación	275 °C
Índice de Desemulsión	40 / 35 / 5 (30') Máx.
Punto de congelación	- 30 °C

03/05/2012
Página 1 de 1



La información contenida en este documento es fiel reflejo de nuestros actuales conocimientos técnicos, proporciona una descripción adecuada de las características del producto y enumera las aplicaciones para las cuales puede resultar idóneo. El usuario deberá asegurarse en todo caso de la adecuación del producto para cada utilización particular. **BRUGAROLAS S.A.** se reserva el derecho de efectuar modificaciones en los productos con posterioridad a la fecha de edición del presente documento, al objeto de mejorar su calidad y optimizar su rendimiento. Los valores de las características físico-químicas indicadas son valores típicos. Están a su disposición las hojas de especificación en vigor para cada uno de los productos.

BRUGAROLAS S.A. – Camino de la Riera 36-44 Pol. Ind. Cova Solera – 08191 Rubí (Barcelona) – Tlf. 93 588 31 00 Fax. 93 588 31 01
comercial@brugarolas.com www.brugarolas.com

7.2 Hidrosecur D-46



HIDROSECUR D-46

FLUIDO HIDRAULICO DE SEGURIDAD Y RESISTENTE AL FUEGO

PROPIEDADES Y APLICACIONES

HIDROSECUR D-46 es un fluido hidráulico compuesto por ésteres sintéticos de muy elevado punto de inflamación, buenas propiedades lubricantes y larga duración.

Cumple los requisitos de la norma ISO-6743/4 como fluido hidráulico resistente al fuego de la categoría HFDU.

Las aplicaciones del **HIDROSECUR D-46** abarca todo el campo de instalaciones hidráulicas que trabajan cerca de una fuente de calor y que una fuga de aceite mineral podría propagar el fuego.

HIDROSECUR D-46 es altamente biodegradable por lo que pequeñas fugas del mismo no crean problemas de contaminación ambiental en suelos, acuíferos, etc.

A título de ejemplo, seguidamente se detallan algunas aplicaciones:

- Trenes de laminación en caliente.
- Coladas continuas.
- Transportadores de lingotes.
- Fundición de metales a presión.
- Prensas de forja, estampación y sinterizado.
- Hornos de tratamientos térmicos.
- Máquinas de soldar.
- Maquinaria forestal.

MODO DE EMPLEO

No se requieren medidas especiales para la manipulación de este producto.

CARACTERISTICAS FISICO-QUIMICAS

Naturaleza	Ester sintético
Categoría ISO-6743/4	HFDU
Densidad a 20 °C	0.926 g/ml.
Viscosidad a 40 °C	49 – 55 cSt
Índice de viscosidad	185 Min.
Punto de Inflamación	290 °C, Min.
Punto de autoignición	400 °C, Min.
Punto de Congelación	- 21 °C, Máx.
Índice de Neutralización	0.5 mg KOH/g, Máx.
Temperatura de utilización	- 15 °C a 100 °C
Biodegradabilidad	Superior al 85 %

HIDROSECUR D-46 es compatible con la mayor parte de los cauchos que componen las juntas y retenes de los circuitos que trabajan con aceite mineral. No son aconsejables los cauchos naturales y el poliuretano.

Para utilizar el **HIDROSECUR D-46** en un circuito que anteriormente haya trabajado con aceite hidráulico de tipo mineral, es suficiente proceder de la forma siguiente:

1. Vaciar el circuito del aceite y limpiar el depósito, asegurándose de que no está pintado interiormente.
2. Quitar y limpiar los filtros del circuito.
3. Llenar el depósito con **HIDROSECUR D-46** hasta el nivel mínimo para que funcione el circuito
4. Poner en marcha el circuito haciendo funcionar a baja presión, accionando todos los movimientos, durante 1 a 2 horas
5. Vaciar el **HIDROSECUR D-46**, poner los filtros, llenar el depósito con nuevo **HIDROSECUR D-46** y trabajar en condiciones normales.

PRECAUCIONES

Tenemos a su disposición Ficha de Datos de Seguridad del producto, conforme a la normativa europea vigente.

ENVASES

Existen distintas capacidades de suministro. Consultar con el Dpto. Comercial.

13/03/2007
Página 1 de 1



La información contenida en este documento es fiel reflejo de nuestros actuales conocimientos técnicos, proporciona una descripción adecuada de las características del producto y enumera las aplicaciones para la cuales puede resultar idóneo. El usuario deberá asegurarse en todo caso de la adecuación del producto para cada utilización particular. **BRUGAROLAS S.A.** se reserva el derecho de efectuar modificaciones en los productos con posterioridad a la fecha de edición del presente documento, al objeto de mejorar su calidad y optimizar su rendimiento. Los valores de las características físico-químicas indicadas son valores típicos. Están a su disposición las hojas de especificación en vigor para cada uno de los productos.

BRUGAROLAS S.A. – Camino de la Riera 36-44 Pol. Ind. Cova Solera – 08191 Rubí (Barcelona) – Tlf. 93 588 31 00 Fax. 93 588 31 01
comercial@brugarolas.com www.brugarolas.com

7.3 Hydroflux EP46

Descrição

Os óleos incluídos nesta gama são fabricados com bases seleccionadas e cuidadosamente aditivadas para conferir características de óleos hidráulicos de uso geral.

São óleos adequados para a maior parte dos circuitos hidráulicos, incluindo aqueles que exigem especial protecção antidesgaste, tanto na indústria como na auto (básculas, maquinaria de obras públicas, etc.) com independência do tipo bomba com o qual estejam equipados e das pressões a que trabalham.

Qualidades

- Resistência à oxidação, envelhecimento e formação de lodos.
- Baixo ponto de congelação.
- Alto índice de viscosidade.
- Compatível com juntas.
- Boas propriedades antiespuma.
- Marcadas propriedades antidesgaste.
- Fácil separação da água.

Nível de qualidade

- DIN-51524 Parte 2 HLP
- ISO 6743/4 HM
- ISO 11158
- AFNOR NF E 48-603 HL, HM
- ENSAIO FILTRABILIDADE AFNOR NF E 48-690 e 48-691

Características técnicas

	UNIDADE	MÉTODO	VALOR					
Grau ISO			22	32	46	68	100	150
Viscosidade a 100 °C	cSt	ASTM D 445	4,3	5,4	6,7	8,6	11,1	14,5
Viscosidade a 40 °C	cSt	ASTM D 445	22	32	46	68	100	150
Índice de Viscosidade		ASTM D 2270	103	104	97	97	97	96
Densidade a 15 °C	g/cm ³	ASTM D 4052	0,865	0,878	0,876	0,882	0,887	0,893
Ponto de inflamação	°C	ASTM D 92	210	226	231	246	264	264
Ponto de congelação	°C	ASTM D 97	-24	-24	-24	-24	-21	-21
FZG, Escalão de danos		DIN 51354	--	11	11	11	11	11
Desgaste 4B, diâmetro gota	mm	ASTM D 4172	0,50	0,50	0,45	0,45	0,45	0,45
Res. Oxidação, NN a 1500 h	mgKOH/g	ASTM D 943	<2	<2	<2	<2	<2	<2
Desemulsificação ⁽¹⁾ 54° C/ ⁽²⁾ 82 °C	min	ASTM D 1401	<20 ⁽¹⁾	<20 ⁽¹⁾	<20 ⁽¹⁾	<30 ⁽¹⁾	<30 ⁽²⁾	<30 ⁽²⁾
Corrosão ao Cobre 3 h 100 °C		ASTM D 130	1b	1b	1b	1b	1b	1b

As características mencionadas representam valores típicos e não podem ser consideradas especificações de produto.

Existe uma ficha de dados de segurança.

repsol.com
+34 901 111 999
lubrificantes@repsol.com

Ficha técnica Lubrificantes. Revisão 7. Fevereiro 2020.

7.4 Plantohyd 40N

PLANTOHYD 40 N

Óleo hidráulico compatível com o meio ambiente, à base de matérias-primas naturais, tipo HETG, de acordo com ISO 15380, para equipamentos hidráulicos móveis e estacionários.

Descrição

O PLANTOHYD N é um óleo hidráulico com lubrificantes de alta performance, compatível com o meio ambiente, à base de matérias-primas naturais. Contém aditivos para melhorar a estabilidade ao envelhecimento, a proteção anticorrosiva e as propriedades anti desgaste do óleo base.

O óleo mostra excelente biodegradabilidade e é uma alternativa compatível com o meio ambiente aos fluidos hidráulicos à base de óleos minerais (a baixas e médias cargas). Devido à sua elevada polaridade, o PLANTOHYD 40 N oferece excelentes propriedades de lubrificação. O PLANTOHYD 40 N cumpre e supera os requisitos mínimos de acordo com ISO15380, tipo HETG. O PLANTOHYD 40 N foi galardoado com o Selo Ambiental "Blue Angel".

Aplicação

O PLANTOHYD 40 N pode ser usado em equipamentos hidráulicos móveis e estacionários para os quais é necessário um ISO VG 32 e ISO VG 46 respetivamente. As diretrizes de mudança de acordo com a ISO 15380 têm que ser observadas aquando da mudança para o PLANTOHYD 40 N. Tintas de reparação e tintas que não são baseadas em sistemas de 2 componentes podem não ser compatíveis com óleo mineral, bem como com o PLANTOHYD 40 N. O PLANTOHYD 40 N tem uma melhor performance a temperaturas de tanque entre 50 e 60 °C. Temperaturas de serviço recomendadas: -27 °C a 70 °C.

Vantagens / Benefícios

- À base de matérias-primas renováveis.
- Compatível com meio ambiente.
- Rapidamente biodegradável (> 60% de acordo com OCDE 301 B).
- Características multigraduadas, índice de viscosidade naturalmente elevado.
- Boa proteção anticorrosiva.
- Excelentes propriedades de lubrificação.
- Baixas perdas por evaporação.
- Capacidade natural de limpeza.
- Bom comportamento a baixas temperaturas.

Especificações

O PLANTOHYD 40 N cumpre e supera os requisitos de acordo com:

- ISO 15380: HETG
- RAL UZ 79: Blue Angel (PLANTOHYD 40 N)

PLANTOHYD 40 N (cont.)

Óleo hidráulico compatível com o meio ambiente, à base de matérias-primas naturais, tipo HETG, de acordo com ISO 15380, para equipamentos hidráulicos móveis e estacionários.

Dados Técnicos

Características	Unidade	Valor	Norma
ISO VG		46	DIN 51519
Viscosidade Cinemática	a -20 °C	1444	DIN EN ISO 3104
	a 0 °C	430	
	a 40 °C	44	
	a 100 °C	9,6	
Índice de Viscosidade		211	DIN ISO 2909
Densidade	a 15 °C	0,922	DIN 51 757
Cor	ASTM	1,0	DIN ISO 2049
Ponto de Inflamação	°C	306	DIN ISO 2592
Ponto de Fluxão	°C	-36	DIN ISO 3016
Nº de Neutralização	mgKOH/g	0,4	DIN 51 558-1
FZG A/8,3/90	estágio de carga de rutura	> 12	DIN ISO 14635-1
Efeito sobre o Material Vedantes FPM AK 6, 1000 h, 100 °C			
Mudança de Volume Relativo	%	0,5	DIN ISO 1817
Alteração da Dureza "Shore-A"	Shore	-2	DIN ISO 1817

Dez.17/CB

A informação prestada nesta ficha técnica está correta segundo o nosso critério. Não obstante, e como as condições em como o produto é utilizado estão fora do nosso controlo, não nos podemos responsabilizar pelas consequências de utilização do mesmo. Os valores indicados são valores médios, e qualquer pequena diferença é devida às variações permitidas pelo método de fabrico.

7.5 SKF 51107

51107 Rolamentos axiais de esferas, escora simples

Item popular

Rolamentos axiais de esferas, escora simples



Especificações do rolamento

[Tolerâncias,](#)

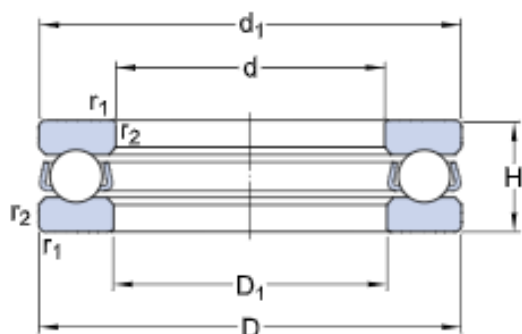
tabela 1

Interfaces do rolamento

[Tolerâncias de assento para condições padrão,](#)

[Tolerâncias e ajuste resultante](#)

Especificações técnicas

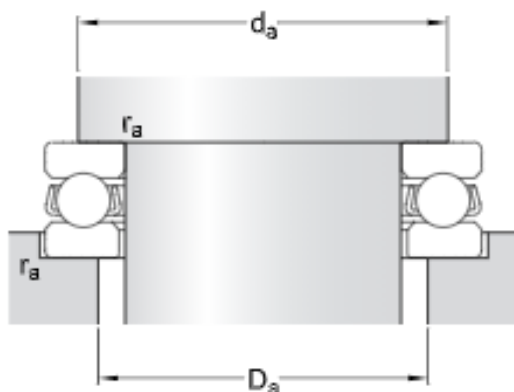


DIMENSÕES

d	35 mm
D	52 mm
H	12 mm
d_1	≈ 52 mm
D_1	≈ 37 mm
$r_{1,2}$	min. 0.6 mm

DIMENSÕES DO ENCOSTO

d_a	min. 45 mm
D_a	max. 42 mm
r_a	max. 0.6 mm



DADOS DE CÁLCULO

Classificação de carga dinâmica básica	C	19.9 kN
Classificação de carga estática básica	C ₀	51 kN
Limite de carga de fadiga	P _u	1.86 kN
Velocidade de referência		5 600 r/min
Velocidade-limite		7 500 r/min
Fator de carga mínima	A	0.013

MASSA

Rolamento de massa (incluindo a arruela de assento quando aplicável)	0.08 kg
--	---------

Mais informações

Detalhes do produto	Informações de engenharia	Ferramentas
Designs e variantes	Princípios da seleção de rolamentos	Bearing Select
Especificações do rolamento	Conhecimentos gerais sobre rolamentos	Engineering Calculator
Cargas	Processo de seleção de rolamentos	SimPro Quick
Limites de temperatura	Interfaces do rolamento	LubeSelect para graxas SKF
Velocidade permitida	Tolerâncias de assento para condições padrão	Ferramenta para seleção de aquecedor
Montagem	Lubrificação	
Sistema de designação	Vedação externa, montagem e desmontagem	
	Falha do rolamento e como evitá-la	

Termos e condições

Ao acessar e utilizar este site/aplicativo do Grupo SKF, o que inclui a AB SKF e/ou qualquer uma de suas afiliadas ("SKF"), você concorda com os seguintes termos e condições

Exclusão da garantia e limitação de responsabilidade

Embora todo cuidado tenha sido tomado para assegurar a precisão das informações deste site/aplicativo, a SKF fornece essas informações "NO ESTADO" e SEM QUAISQUER GARANTIAS, EXPRESSAS OU IMPLÍCITAS, INCLUINDO, ENTRE OUTRAS, GARANTIAS IMPLÍCITAS DE COMERCIALIZAÇÃO E ADEQUAÇÃO PARA UM DETERMINADO PROPÓSITO. Você reconhece que o uso deste site/aplicativo é um risco unicamente seu, que você assume total responsabilidade por todos os custos associados ao uso do site/aplicativo e que a SKF não será responsabilizada por quaisquer danos diretos, incidentais, consequentes ou indiretos de qualquer espécie decorrentes de seu acesso ou uso das informações ou software disponibilizados no site/aplicativo. Quaisquer garantias e representações neste site/aplicativo em relação a produtos ou serviços da SKF adquiridos ou utilizados por você estarão sujeitas aos termos e condições acordados no contrato do referido produto ou serviço. Além disso, para sites/aplicativos que não sejam da SKF e que sejam referidos em nosso site/aplicativo ou onde haja um hiperlink, a SKF não dá garantias relativas à precisão ou confiabilidade das informações desses sites/aplicativos, não assumindo qualquer responsabilidade por materiais criados ou publicados por terceiros ali contidos. Ademais, a SKF não garante que este site/aplicativo ou outros sites/aplicativos vinculados não contenham vírus ou outros elementos nocivos.

Copyright

Os direitos autorais deste site/aplicativo e os direitos autorais das informações e software disponibilizados neste site/aplicativo pertencem à SKF ou seus licenciadores. Todos os direitos são reservados. Todo o material licenciado faz referência ao licenciador que cedeu à SKF o direito de utilizar o material. As informações e o software disponibilizados neste site/aplicativo não podem ser reproduzidos, duplicados, copiados, transferidos, distribuídos, armazenados, modificados, transferidos por download ou explorados de qualquer outra forma, para qualquer uso comercial, sem aprovação prévia por escrito da SKF. No entanto, eles podem ser reproduzidos, armazenados e transferidos por download para uso por pessoas, sem a aprovação prévia, por escrito, da SKF. Sob nenhuma circunstância, essas informações ou esse software podem ser fornecidos a terceiros.

Este site/aplicativo inclui determinadas imagens usadas sob licença da Shutterstock, Inc.

Marcas e patentes

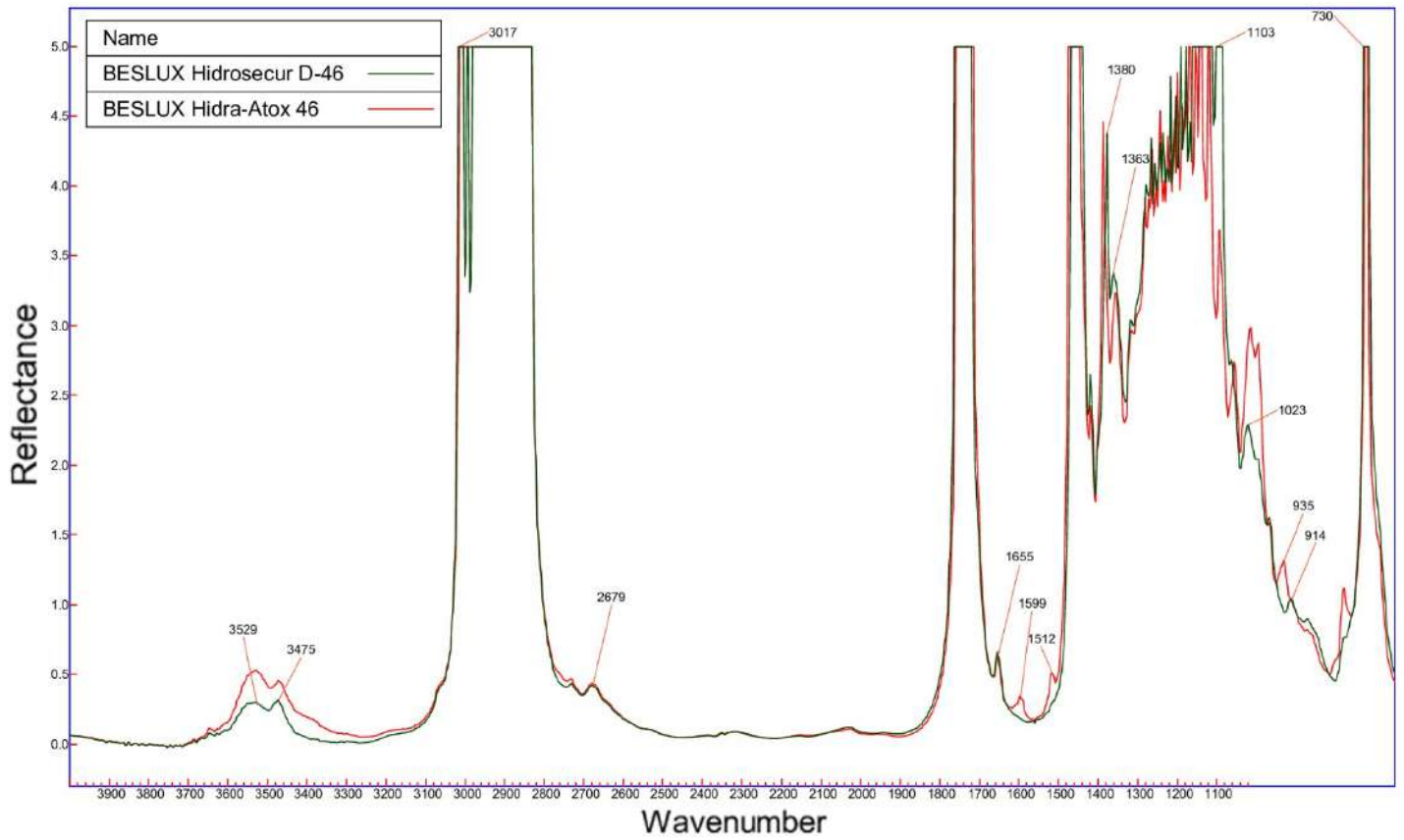
Todas as marcas comerciais, nomes de fantasia e logotipos corporativos exibidos no site/aplicativo são propriedade da SKF ou de seus licenciadores, não podendo ser utilizados de qualquer forma sem a aprovação prévia por escrito da SKF. Todas as marcas comerciais licenciadas publicadas neste site/aplicativo fazem referência ao licenciador que cedeu à SKF o direito de utilizar a marca comercial. O acesso a este site/aplicativo não concede ao usuário qualquer licença sob quaisquer patentes pertencentes ou licenciadas à SKF.

Alterações

A SKF reserva-se o direito de fazer alterações ou acréscimos neste site/aplicativo a qualquer momento.

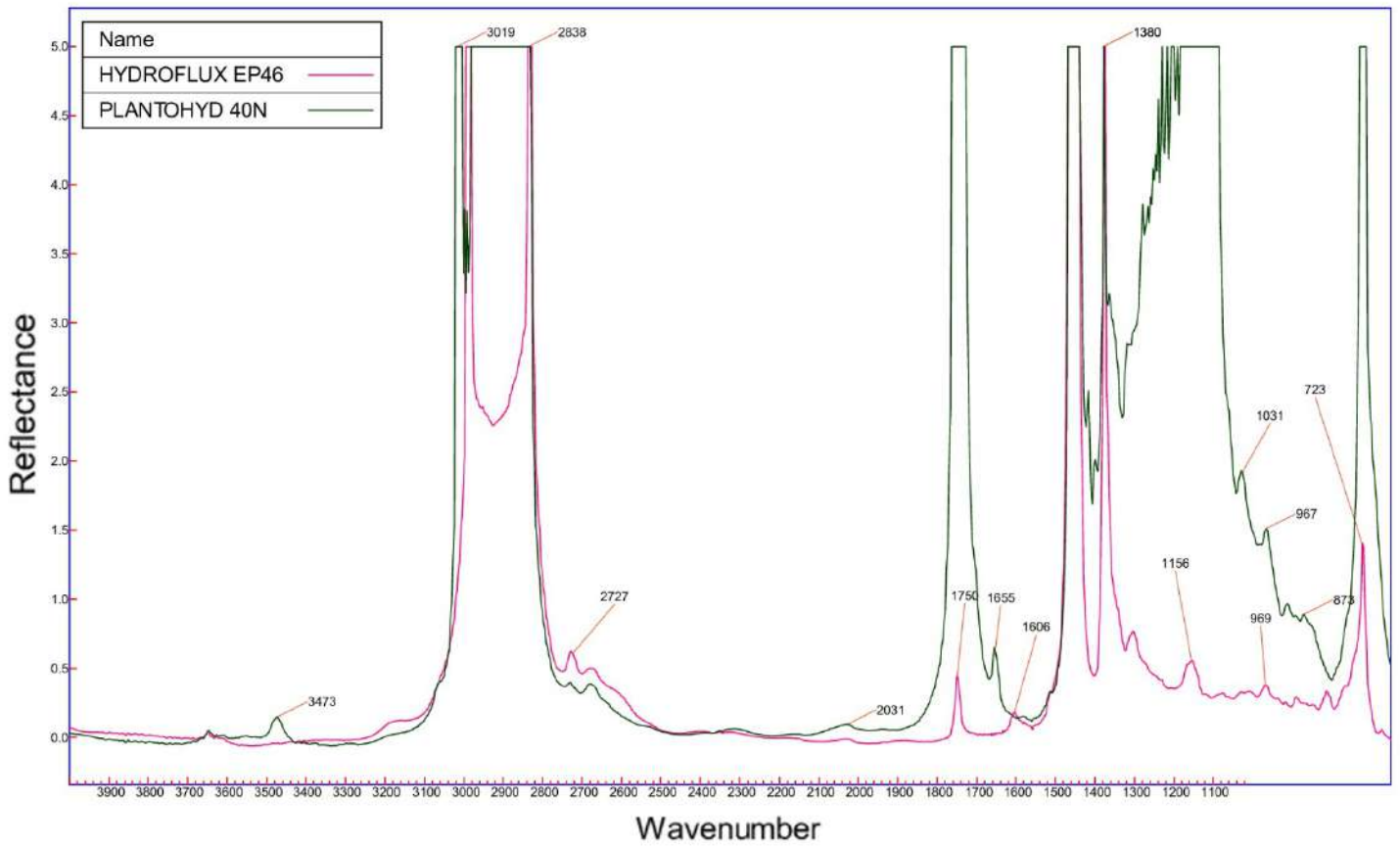
7.6 FTIR Hidra-atox 46 e Hidrosecur D-46

Agilent Resolutions Pro



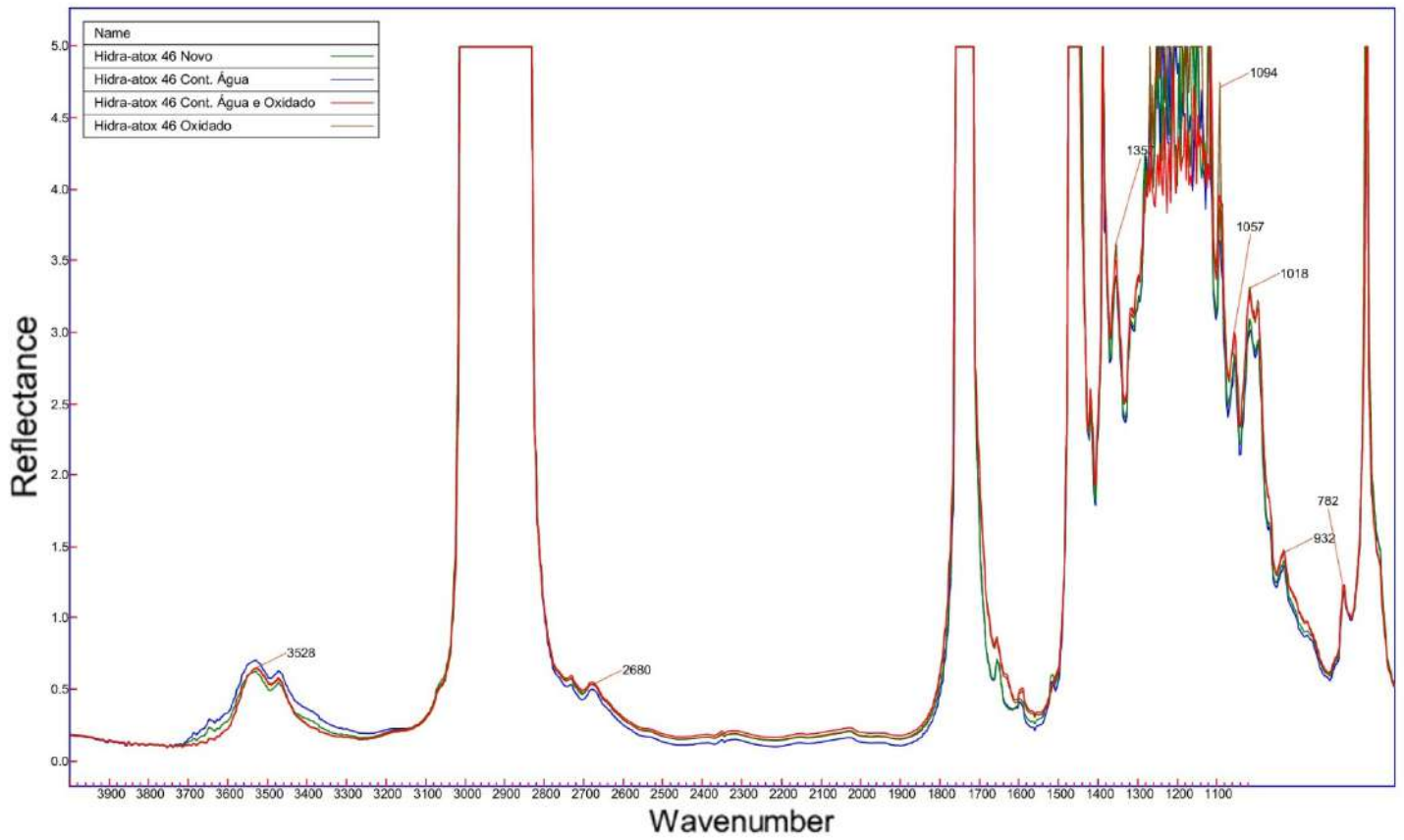
7.7 FTIR Hydroflux EP46 e Plantohyd 40N

Agilent Resolutions Pro



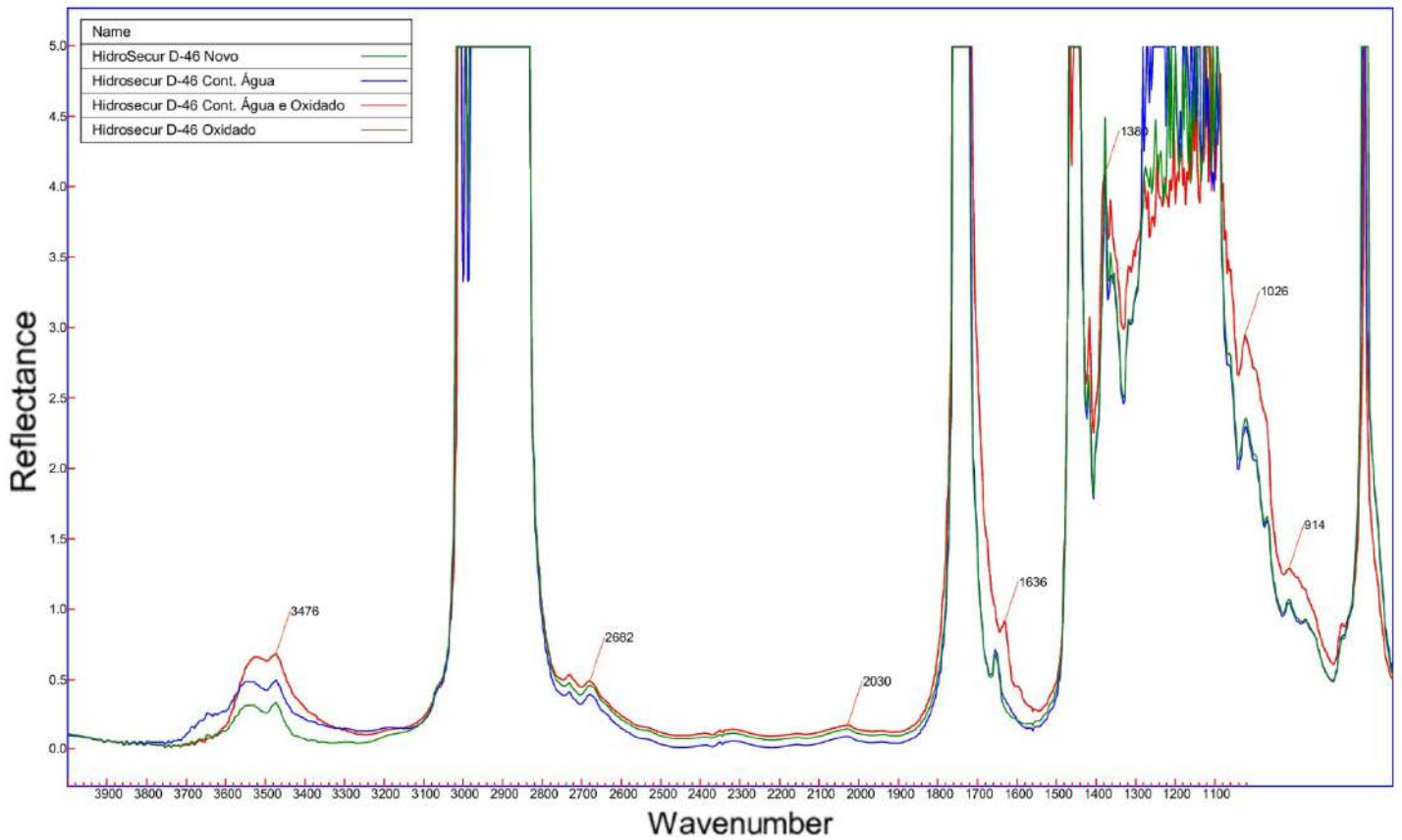
7.8 FTIR Hidra-atox 46

Agilent Resolutions Pro



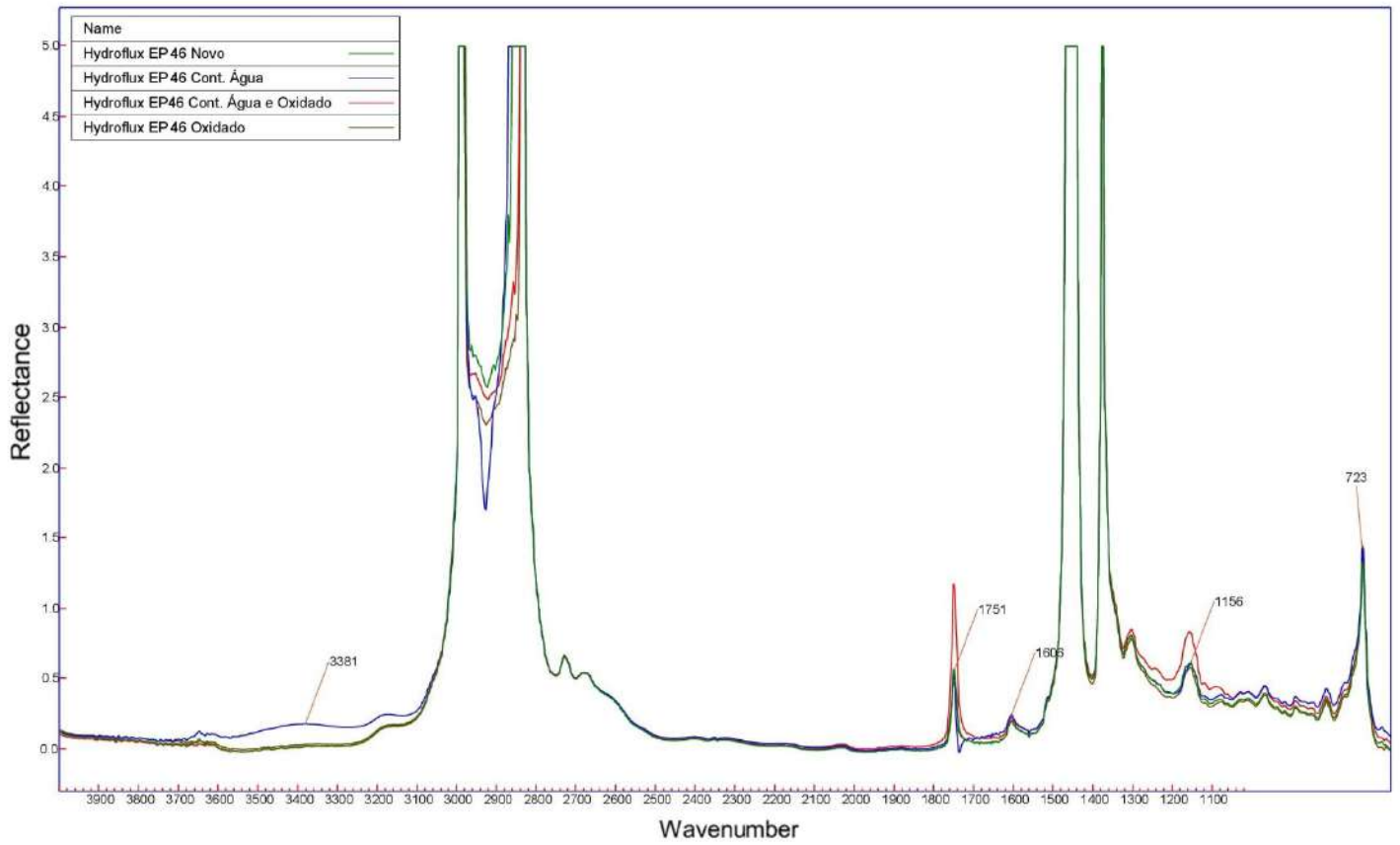
7.9 FTIR Hidrosecur D-46

Agilent Resolutions Pro



7.10 FTIR Hydroflux EP46

Agilent Resolutions Pro



7.11 FTIR Plantohyd 40N

Agilent Resolutions Pro

