

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE POS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA E DE MATERIAIS

LUCAS BIAZON CAVALCANTI

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TRIBOLÓGICO DE GRAXAS E
MODIFICADORES DE ATRITO A BASE DE ÁGUA UTILIZADOS NO CONTATO
RODA-TRILHO EM UM ENSAIO DISCO SOBRE DISCO

DISSERTAÇÃO

CURITIBA
2020

LUCAS BIAZON CAVALCANTI

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TRIBOLÓGICO DE GRAXAS E
MODIFICADORES DE ATRITO A BASE DE ÁGUA UTILIZADOS NO CONTATO
RODA-TRILHO EM UM ENSAIO DISCO SOBRE DISCO

Twin Disk Tribological Performance's Evaluation of Greases and
Water Based Friction Modifiers Used on Wheel Rail Contact

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Área de concentração: Engenharia de Materiais

Orientador: Prof. Dr. Tiago Cousseau

Coorientador: Prof. Dr. Julio Cesar Klein das Neves

CURITIBA

2020



4.0 Internacional

Esta licença permite o download e o compartilhamento da obra desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-la ou utilizá-la para fins comerciais.



**Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Curitiba**



LUCAS BIAZON CAVALCANTI

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TRIBOLÓGICO DE GRAXAS E MODIFICADORES DE ATRITO A BASE DE
ÁGUA UTILIZADOS NO CONTATO RODA-TRILHO EM UM ENSAIO DISCO SOBRE DISCO**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Área de concentração: Engenharia De Materiais.

Data de aprovação: 09 de Dezembro de 2020

Prof Tiago Cousseau, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Carlos Henrique Da Silva, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Luiz Antonio Silveira Lopes, Doutorado - Instituto Militar de Engenharia (Ime)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 09/12/2020.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos especiais à minha família, namorada e amigos por sempre estarem ao meu lado além do entusiasmo em me ouvir falar sobre lubrificação e engenharia ferroviária;

Aos meus amigos e colegas do LASC, CMCM e LSF-USP pelo tempo que disponibilizaram para me auxiliarem;

Aos professores Tiago Cousseau e Julio Cesar Klein das Neves pelas orientações e ensinamentos essenciais para a elaboração desse trabalho.

A VALE S.A. e ao Instituto Vale de Tecnologia – ITV pelo apoio financeiro e técnico para o desenvolvimento desse trabalho através do projeto SAP 4600040312

A LB Foster (Burnaby) em nome da Renata Cristina do Carmo Santoro e todos os colegas do laboratório de consumíveis por terem me recebido muito bem no Canadá

Ao Professor Alejandro Toro da Universidad Nacional de Colombia (Medellin) por realizarem parte dos ensaios disco sobre disco em seu laboratório

“O que sabemos é uma gota, o que não sabemos é um oceano.”

Isaac Newton

RESUMO

Os fenômenos tribológicos na interface roda-trilho são complexos. O desempenho nesta interface quanto ao atrito e desgaste impacta diretamente no consumo de combustível, vida útil de rodas e trilhos que estão entre os maiores custos de operação em uma ferrovia. A gestão total do atrito busca através da aplicação de graxas e modificadores de atrito em diferentes regiões do contato roda trilho melhorar esse desempenho. A comparação de desempenho entre diferentes graxas e entre diferentes modificadores de atrito em campo é difícil e custosa. Além disso, há uma lacuna no conhecimento em correlacionar as propriedades fornecidas pelas fichas técnicas desses produtos com o seu desempenho. Portanto, neste trabalho, graxas e modificadores de atrito foram analisados em ensaios laboratoriais exploratórios a fim de caracterizar o seu desempenho em campo além de utilizar o ensaio disco sobre disco, o qual é reconhecido por reproduzir as condições de rolamento e deslizamento que ocorrem no contato roda-trilho. A metodologia consistiu em verificar o efeito das formulações de graxas (viscosidade do óleo base e tipo de espessante) em termos de atrito, desgaste por propagação trinca e retentividade, e das formulações de modificadores de atrito (composição do filme sólido formado após evaporação da água) apenas para atrito e retentividade. As conclusões para as graxas analisadas foram: i) para baixos valores de espessura específica de filme (Λ), o coeficiente de atrito e o desgaste por propagação de trincas são altamente dependente do tipo de espessante, os quais são maiores para espessante de Cálcio e menores para espessante de Lítio; ii) para altos valores de espessura específica de filme (Λ), o coeficiente de atrito e o desgaste por propagação de trincas são controlados pela viscosidade do óleo base; iii) a retentividade é controlada pela viscosidade do óleo base independentemente do valor da espessura de filme específica ou do tipo de espessante. Já as conclusões para os modificadores de atrito apontam que o atrito e retentividade se mostraram semelhantes independente da composição do filme sólido formado.

Palavras chaves: Graxa lubrificante; Modificador de atrito; Retentividade; FCR

ABSTRACT

The tribological phenomena on the wheel-rail interface is complex. This interface performance regarding friction and wear impacts fuel consumption, wheels' and rails' lifespan, which are among the highest operating costs on a railway. The total friction management aims to apply greases and water-based friction modifiers to this interface to improve performance. Comparing performance between different greases and between different friction modifiers in the field is costly and challenging due to the variety of uncontrollable parameters, time to obtain results, operating difficulties. Besides this, there is a gap in correlations between these products datasheet properties and their field performance. Therefore, in this work, greases and friction modifiers were analyzed in exploratory laboratory tests to find properties that might represent these products' performance in the field and analyzed in a twin disk test rig, reproducing the rolling and sliding conditions of the wheel-rail contact. The methodology consisted of verifying the effect of grease formulations (base oil viscosity and type of thickener) concerning friction; wear by RCF crack propagation, and retentivity. While the friction modifier formulations (the composition of the solid film formed after water evaporation) only for friction and retentiveness. The conclusions for greases analyzed were: i) for low values of specific film thickness (Λ), the friction coefficient and crack propagation wear are highly dependent on the thickener type, both of which increase for Calcium thickener and decrease for the Lithium thickener; ii) for high values of specific film thickness (Λ), the friction coefficient and crack propagation wear are controlled by the base oil viscosity; iii) retentivity is controlled by the viscosity of the base oil regardless of the value of the specific film thickness or the type of thickener. The friction modifiers' conclusions pointed out that friction and retentivity were similar regardless of the formed solid film's composition.

Key words: Grease; Water-based friction modifier; Retentivity; RCF

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Principais regiões do contato da roda sobre trilho e os produtos aplicados segundo o gerenciamento de atrito.....	13
Figura 2 – a) Imagem ilustrando a região do contato onde são aplicados a graxa e o modificador de atrito; b) fotografia mostrando que na mesma região surgem danos por FCR.....	15
Figura 3 – Gráfico com os resultados de desgaste em um ensaio pino sobre disco em função da carga de soldagem por quatro esferas das graxas utilizadas.....	17
Figura 4 – Estrutura do capítulo	22
Figura 5 - Ilustração de um rodeiro sobre trilhos e a nomenclatura das regiões de interface da roda com o trilho.....	24
Figura 6 – Faixas de pressão de contato e velocidade de deslizamento entre as regiões de contato do trilho e roda com os pontos de condições de ensaios realizados em laboratório	26
Figura 7 – Micrografia de um corpo de prova do ensaio disco sobre disco (representando o trilho) apresentando as linhas de deformação plástica na superfície.....	27
Figura 8 – Início da formação de <i>headchecks</i> em trilhos ferroviários no canto de bitola (esquerda) e topo de boleto (direita).....	28
Figura 9 Comprimento e profundidade dos <i>headchecks</i> após a) 10 MTBT; b) 30 MTBT; c) 62 MTBT e d) 210 MTBT.....	28
Figura 10 – Representação esquemática da propagação de trincas na presença de fluido. a) propagação por cisalhamento; b) propagação por efeito hidráulico; c) propagação por aprisionamento de lubrificante.....	30
Figura 11: a) representação esquemática do terceiro corpo como elemento interfacial entre as superfícies da roda e do trilho durante o contato; b) seção transversal de um disco de corpo de prova de um ensaio disco sobre disco indicando a presença do terceiro corpo na	

superfície após ensaios a seco com 5% de escorregamento longitudinal, velocidade tangencial de 0.5 m/s e $P_0=1500$ MPa.....	31
Figura 12 – Curvas do coeficiente de atrito em função da taxa de escorregamento para diferentes tipos de contaminantes	32
Figura 13 - Valores de coeficiente de atrito recomendados nas diferentes regiões de contato entre as rodas e os trilhos	33
Figura 14: Coeficiente de atrito típicos encontrados para trilho em condições a seco, com modificadores de atrito a base de água e com lubrificantes	34
Figura 15 –Desenho esquemático de um lubrificador de via para graxas em verde e modificadores de atrito em azul	36
Figura 16 – Fotografia de uma barra de aplicação de graxa lubrificante (esquerda) e modificador de atrito (direita)	36
Figura 17 - Fluxograma do funcionamento do lubrificador eletrônico.....	37
Figura 18 - Ilustração da graxa sendo coletada pelo friso da roda da barra distribuidora fixada no trilho.....	38
Figura 19: Ilustração com a sequência da formação do filme sólido do modificador de atrito a base de água antes, durante e após a coleta do produto do topo do boleto do trilho pela roda.....	38
Figura 20 – a) Graxa no friso da roda após passagem pelo lubrificador; b) Modificador de atrito no banda de rodagem após passar pelo lubrificador.....	39
Figura 21 – Correlação da estrutura do espessante com uma esponja.....	40
Figura 22 – Relação entre os regimes de lubrificação com atrito e o coeficiente de desgaste para materiais metálicos.....	42
Figura 23 – Imagens de microscopia eletrônica de varredura e de microscopia de força atômica para espessantes de lítio e cálcio.	45
Figura 24 – Espessura de filme (h) em função da velocidade de entrada (U) para graxas e óleos sem aditivos.....	48

Figura 25 – Coeficiente de atrito (COF) em função da velocidade de entrada (U) do lubrificante para graxas e óleos sem aditivos.....	49
Figura 26 - Mecanismo de funcionamento dos modificadores de atrito. a) interface roda trilho formada por um terceiro corpo sem a presença do modificador de atrito; b) interface roda trilho com a presença do terceiro junto com o modificador de atrito em sua forma líquida e c) interface do contato roda trilho com o novo terceiro corpo formado.....	52
Figura 27 – Exemplo da característica de gradiente positivo (modificador de atrito a base de água) e negativo (contato a seco) em uma curva de coeficiente de atrito em função da taxa de escorregamento.....	52
Figura 28 – a) Tensão de cisalhamento em função do deslocamento para diferentes composições de modificador de atrito com Fe ₂ O ₃ e b) efeito da concentração de Fe ₂ O ₃ no coeficiente de atrito. As linhas tracejadas representam dois modelos distintos EP (<i>equal pressure</i>) e EW (<i>equal wear</i>) para previsão do coeficiente de atrito em função de misturas multifásicas.....	56
Figura 29: Efeito das condições ambientais em função da distância percorrida para a) umidade relativa; b) Temperatura e c) concentração de óxido Fe ₂ O ₃ na mistura com o modificador de atrito na curva do coeficiente de atrito.....	57
Figura 30: Coeficiente de atrito do modificador de atrito FMA (rosa), FMB (verde) e sem produto (base azul) em função do número de ciclos do teste com 2% de escorregamento a) condições a seco; b) com presença de água.....	58
Figura 31: Diferença no comportamento do atrito para diferentes formulações a) contendo talco; b) óxido de zinco.....	60
Figura 32: Hierarquia entre os resultados obtidos para os três ensaios realizados.....	62
Figura 33: Perda de massa por propagação de trincas para diferentes modificadores de atrito aplicados em um contato disco sobre disco com presença de trincas na superfície.....	63

Figura 34 – a) Desgaste e formação de trincas em trilhos para diferentes taxas de aplicação de modificadores de atrito a base de água b) comparação entre a condição superficial de um trilho novo e após 100.000 ciclos de ensaio.....	64
Figura 35 - Tribômetro manual em utilização ferroviária.....	65
Figura 36 – Medição de carregamento da graxa através da identificação manual da graxa ao longo da ferrovia.....	66
Figura 37 (a) <i>Miniproof</i> em utilização em campo (b) Exemplo de medição do perfil realizado por <i>miniproof</i>	67
Figura 38 - Gráfico com desempenho em retentividade de diferentes lubrificadores e diferentes quantidades de graxa.....	68
Figura 39: Comparação da distribuição das forças laterais entre o contato a seco (vermelho) e com a presença do modificador de atrito (verde).....	69
Figura 40: Fluxograma do capítulo Materiais e Métodos.....	71
Figura 41 – Desenho esquemático do método de separação de óleo estático.....	80
Figura 42 – Perda de óleo estática para cada graxa após 24h à 60°C.....	80
Figura 43: Formação da linha de graxa durante o afastamento dos dedos.....	82
Figura 44 – Esquema de ensaio de <i>tackiness</i> por rolamento.....	84
Figura 45 – <i>Tackiness</i> de rolamento x Viscosidade.....	85
Figura 46: Diferentes padrões de escoamento das graxas encontrados nas trilhas durante o ensaio de adesividade.....	87
Figura 47 – Imagens capturadas por câmera (A) antes do contato entre a primeira roda do trem a o bulbo de graxa e (B) após a passagem da segunda roda pelo lubrificador.....	88
Figura 48: Esquema do procedimento de teste de <i>tackiness</i> por estiramento.....	89
Figura 49 – Curva característica de um ensaio de <i>tackiness</i> por estiramento.....	90
Figura 50 - Curva característica de um ensaio de <i>tackiness</i> por estiramento para graxas de cálcio.....	91

Figura 51: Força máxima de separação das superfícies em função da viscosidade da graxa lubrificante a 40°C	92
Figura 52: Região B em função da viscosidade das graxas lubrificantes a 40°C.....	93
Figura 53: Trabalho de <i>tackiness</i> de estiramento em função das viscosidade das graxas lubrificantes a 40°C.....	94
Figura 54 – Ensaio para avaliação da perda de massa por lavagem por água.....	95
Figura 55 Imagens dos filmes das graxas após ensaio perda de massa por lavagem por água.....	96
Figura 56 – Perda de massa por lavagem por água x Viscosidade	97
Figura 57 – Detalhamento da medição da finura de moagem de graxas utilizando o grindômetro.....	99
Figura 58 – Resultados do ensaio de finura de moagem por graxa.....	100
Figura 59: a) Curvas de dTG e b) massa remanescente em função da temperatura para os modificadores de atrito	103
Figura 60 - Massa remanescente a 80°C e 120°C.....	104
Figura 61 Ensaio de tempo de secagem: relação entre observações e características do filme de modificador de atrito.....	106
Figura 62: Imagens das amostras de TOR-A e TOR-B submetidas ao ensaios de tempo de secagem.....	107
Figura 63: MEV do modificador de atrito TOR-A: a) vista de topo do filme sólido formado com ampliação de 400x b) vista de topo com ampliação de 1000x, c) vista da seção transversal do filme formado com ampliação de 400x e d) vista da seção transversal com ampliação de 1000x	108
Figura 64: MEV do modificador de atrito TOR-B: a) vista de topo do filme sólido formado com ampliação de 400x b) vista de topo com ampliação de 1000x, c) vista da seção transversal do filme formado com ampliação de 400x e d) vista da seção transversal com ampliação de 1000x	109

Figura 65: Imagem do filme sólido TOR-A com indicação dos pontos selecionados para análise elementar.....	110
Figura 66: Imagem do filme sólido TOR-B com indicação dos pontos selecionados para análise elementar.....	111
Figura 67: imagens dos filmes de modificador de atrito antes e após o ensaio de lavagem por água.	113
Figura 68: Esquemático do ensaio disco sobre disco.....	115
Figura 69: Equipamento disco sobre disco do laboratório de tribologia e superfícies da <i>Universidad Nacional de Colombia</i> . a) esquemático do equipamento, b) foto do equipamento, c) foto ampliada da região da posição dos corpos de prova	118
Figura 70 Representação da região de onde foram removidos os a) discos de trilho, b) discos de rodas e c) suas dimensões	121
Figura 71: Exemplo do coeficiente de atrito em função do número de ciclos para as graxas lubrificantes CaM200 e CaM500 durante o teste de desgaste.....	123
Figura 72: Exemplo do ensaio de retentividade para as graxas CaM200 e CaM500 ...	124
Figura 73: Desenho esquemático e fotografia do equipamento disco sobre disco (55mm de diâmetro) do laboratório de consumíveis da empresa LB Foster utilizado.....	126
Figura 74: Metodologia para o ensaio de retentividade de modificadores de atrito.....	128
Figura 75: a) fotografia apresentando o processo de lixamento superficial das amostras b) suporte para aferição da rugosidade superficial dos discos.....	129
Figura 76: Fotografia apresentando as condições da superfície do disco (300mm). a) antes do ensaio (após lixamento); b) após aplicação da graxa sobre o disco e c) após o ensaio	129
Figura 77: Exemplo do ensaio de retentividade para graxas utilizando o equipamento disco sobre disco #3 (300mm)	130
Figura 78: Desenho esquemático e fotografia do equipamento disco sobre disco (55mm de diâmetro) do laboratório de consumíveis da empresa LB Foster utilizado.....	131

Figura 79: Dimensões dos corpos de prova do equipamento disco sobre disco #2 (55mm – LB Foster). a) corpo de prova disco trilho; b) corpo de prova disco roda.....	134
Figura 80: Metodologia para o ensaio de retentividade de modificadores de atrito.....	135
Figura 81: Fotografia apresentando as condições da superfície do disco antes do ensaio (após lixamento) e depois do ensaio.....	136
Figura 82: Exemplo do ensaio de retentividade para modificadores de atrito a base de água.....	137
Figura 83: Metodologia para gerar a curva de coeficiente de atrito em função da taxa de escorregamento para modificadores de atrito.....	137
Figura 84: Exemplo do ensaio geração da curva de coeficiente de atrito em função da taxa de escorregamento para modificadores de atrito a base de água	138
Figura 85: Curva de coeficiente de atrito em função da taxa de escorregamento típica de modificadores de atrito à base de água obtida conforme procedimento descrito na Figura 84.....	138
Figura 86: Fluxograma da apresentação dos resultados obtidos para graxas	140
Figura 87: Coeficiente de atrito em função da viscosidade do óleo base das graxas....	144
Figura 88 – Perda de massa dos discos de roda e trilho juntamente com o desgaste total medido nos ensaios de desgaste.....	146
Figura 89: Efeito do tipo de tensão na propagação de trincas nos discos de roda e trilho devido ao efeito hidráulico	146
Figura 90 – Perda de massa total em função do óleo base das graxas, tipo de espessante e espessura específica nominal de filme lubrificante.....	147
Figura 91: Retentividade adimensionalizada em função da distância percorrida para ensaios disco sobre disco em dois equipamentos distintos em função da espessura específica de filme e tipo de espessante.....	149
Figura 92 – Retentividade em função da viscosidade do óleo base, tipo do espessante e espessura específica de filme.....	150

Figura 93: Fluxograma da apresentação dos resultados obtidos com modificador de atrito	151
Figura 94: Resultados do ensaio de retentividade para o TOR-A e TOR-B sob a aplicação de uma e duas gotas de produto (10mg e 20mg respectivamente) em condições de 1% de escorregamento.....	152
Figura 95: Fotografia do disco (roda) após o ensaio de retentividade com o modificador de atrito ilustrando a presença de resíduo de produto na interface entre os discos e os excessos de produto que escoam para fora do contato.....	153
Figura 96: Faixa do coeficiente de atrito dos produtos TOR-A e TOR-B ao longo do ensaio de retentividade de acordo com a quantidade produto aplicado.....	154
Figura 97: Curva de coeficiente de atrito em função da taxa de escorregamento para os modificadores de atrito TOR-A e TOR-B	156
Figura 98: Sequência de fotos do ensaio de retentividade: a) segundos antes da aplicação do modificador de atrito; b) segundos após a aplicação do modificador de atrito; c) três minutos após a aplicação do modificador de atrito e d) segundos antes do término do ensaio.....	157
Figura 99: Coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio de retentividade para o modificador de atrito a base de água com as regiões numeradas para cada foto apresentada na Figura 98.....	158
Figura 100: Fotografia da superfície do disco após o ensaio de retentividade com o modificador de atrito a base de água.....	159
Figura 101: Variação do coeficiente de atrito em função do tempo durante a aplicação de uma gota de água no contato disco sobre disco a seco	160
Figura 102: Sequência de fotografia da superfície dos discos durante a aplicação de uma gota de água no contato a) antes da aplicação, b) instantes após a aplicação e c) 10 segundos após a aplicação.....	160

Figura 103: Coeficiente de atrito em função do tempo com a aplicação contínua de água com taxas de aplicação de 0,1g/min e 0,2g/min.....	161
Figura 104: Influência de uma gota de água como um contaminante durante a aplicação dos modificadores de atrito a) TOR-A e b) TOR-B.....	162
Figura 105: Influência da aplicação contínua de água (0,1g/min) como um contaminante durante a aplicação dos modificadores de atrito a) TOR-A e b) TOR-B.....	163
Figura 106 – Contato hertziano pontual (esquerda) e elíptico (direita).....	189
Figura 107 – Geometria de um contato linear entre sólidos de revolução: RX1, RX2, raios de curvatura. Indicação de sinal positivo ou negativo consoante forma do contato....	190
Figura 108 - Distribuição de pressão no interior de um contato elíptico entre sólidos de revolução com superfícies lisas com indicação das semi-larguras de contato.....	190
Figura 109 - Espessura do filme lubrificante no interior de um contato EHD	194
Figura 110 - Coeficiente de correção térmica da espessura do filme lubrificante.....	194

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Extensão das linhas principais e ramais, por concessionária.....	12
Tabela 2 - Exemplo da ficha técnica de uma graxa comercial utilizada na lubrificação do contato do friso da roda com o canto de bitola com as principais propriedades presentes	17
Tabela 3 – Regimes de lubrificação EHL e valores típicos	41
Tabela 4 – Característica geométricas do espessante obtidas por análise das imagens de AFM.....	45
Tabela 5 – Aditivos habituais em graxas lubrificantes e seus componentes	46
Tabela 6: Lista dos diferentes elementos presentes em um modificador de atrito apresentando as suas funcionalidades, exemplos de produtos, composição química e possíveis quantidades.	54
Tabela 7 – Propriedades das graxas utilizadas em teste de campo	68
Tabela 8 - Resultados de atrito e retentividade de graxas para testes de campo.....	68
Tabela 9 – Formulação e propriedades das graxas avaliadas.....	75
Tabela 10 – Elementos encontrados através de EDX nas graxas comerciais	77
Tabela 11 – Resultados dos ensaios de <i>Tackiness</i> por estiramento	91
Tabela 12: Propriedades dos produtos TOR-A e TOR-B presentes nas respectivas fichas técnicas.....	101
Tabela 13: Estimativa do percentual de cada composição para os modificadores de atrito estudados.....	104
Tabela 14: Elementos identificados no filme sólido TOR-A	110
Tabela 15: Elementos identificados no filme sólido TOR-B	111
Tabela 16: Tipos de ensaios realizados em cada um dos equipamentos disco sobre disco utilizados para avaliar o desempenho dos produtos lubrificantes	117
Tabela 17 - Composição química nominal dos trilhos DHH 370.....	119
Tabela 18 – Composição química nominal da roda forjada classe C	120

Tabela 19: Condições do ensaio disco sobre disco # realizado no equipamento da Universidad Nacional de Colombia.....	125
Tabela 20 Condições do ensaio disco sobre disco #2 (diâmetro 300mm) realizado no equipamento do laboratório de consumíveis da LB Foster	130
Tabela 21 Condições do ensaio disco sobre disco #3 (LB Foster) r	139
Tabela 22: Formulação das graxas, viscosidade do óleo base e espessura específica de filme (Λ) para todos os ensaios relativos a graxa	142
Tabela 23 – Resumo das equações de Hertz para resolução do contato elíptico.....	190
Tabela 24 - Resumo das equações da lubrificação EHL para resolução do contato linear14	193

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AW – Anti Desgaste

AFM – Microscopia de Força Atômica

COF – Coeficiente de Atrito

EDS – Espectroscopia de Energia Dispersiva

EDX – Espectroscopia de Raios X por Dispersão em Energia

EFVM – Estrada Ferroviária Vitória Minas

EP – Extrema Pressão

MEV – Microscopia Eletrônica por Varredura

MO – Microscopia Óptica

MTBT – Milhão de Tonelada Bruta Transportada

FCR – Fadiga de Contato de Rolamento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	CONTEXTO.....	11
1.2	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA.....	14
1.3	OBJETIVOS.....	18
1.4	APRESENTAÇÃO DO TRABALHO.....	19
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	22
2.1	INTRODUÇÃO SISTEMA RODA-TRILHO.....	23
2.1.1	Defeitos em Trilhos por FCR.....	26
2.1.2	Terceiro Corpo.....	30
2.1.3	Gestão Total do Atrito.....	33
2.1.4	Lubrificação de Trilhos.....	35
2.2	GRAXA LUBRIFICANTE.....	39
2.2.1	Regimes de Lubrificação.....	40
2.2.2	Óleo Base.....	43
2.2.3	Espessante.....	43
2.2.4	Aditivos.....	46
2.2.5	Lubrificação por Graxa.....	47
2.3	MODIFICADOR DE ATRITO.....	50
2.3.1	Princípio de Funcionamento.....	51
2.3.2	Composição.....	53
2.3.3	Ensaio Laboratoriais com Modificadores de Atrito.....	55
2.4	TESTES DE CAMPO.....	65
2.4.1	Medições em Testes de Campo.....	65
2.4.2	Retentividade - Testes de Campo.....	67
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	70
3.1	GRAXAS.....	72

3.1.1	Graxas Seleccionadas.....	72
3.1.2	Caracterização das Graxas.....	76
3.1.3	Edx.....	76
3.1.4	Separação de Óleo.....	78
3.1.5	Medição de <i>Tackiness</i>	82
3.1.6	<i>Tackiness</i> por Rolamento.....	83
3.1.7	<i>Tackiness</i> por Estiramento	87
3.1.8	Perda de Massa por Lavagem por Água.....	94
3.1.9	Finura de Moagem (Grindometro).....	98
3.2	MODIFICADORES DE ATRITO A BASE DE ÁGUA.....	100
3.2.1	Termogravimetria (TGA).....	102
3.2.2	Tempo de Secagem do Filme do Modificador de Atrito (ASTM D5895-96).....	105
3.2.3	Avaliação Morfológica e Química dos Filmes de Modificadores de Atrito.....	107
3.2.4	Adesão por Lavagem por Água.....	113
3.3	EQUIPAMENTO DISCO SOBRE DISCO.....	115
3.3.1	Equipamento Disco Sobre Disco #1 (UNC).....	117
3.3.1.1	Materiais Disco Sobre Disco #1.....	119
3.3.1.2	Metodologia Disco Sobre Disco #1.....	122
3.3.2	Equipamento Disco Sobre Disco #2 (LB Foster).....	125
3.3.2.1	Materiais Disco Sobre Disco #2.....	127
3.3.2.2	Metodologia Disco Sobre Disco #2.....	127
3.3.3	Equipamento Disco Sobre Disco #3 (LB Foster).....	131
3.3.3.1	Materiais Disco Sobre Disco #3.....	133
3.3.3.2	Metodologia Disco Sobre Disco #3.....	134
4	RESULTADOS.....	140

4.1	RESULTADOS TRIBOLÓGICOS PARA GRAXAS	140
4.1.1	Atrito	142
4.1.2	Desgaste por Propagação de Trincas por FCR.....	145
4.1.3	Retentividade.....	148
4.2	RESULTADOS TRIBOLÓGICOS PARA MODIFICADOR DE ATRITO	151
4.2.1	Retentividade.....	152
4.2.2	Coefficiente de Atrito em Função da Taxa de Escorregamento	155
4.2.3	Mecanismos de Funcionamento	157
5	DISCUSSÕES	165
5.1	GRAXAS	165
5.2	MODIFICADORES DE ATRITO.....	168
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	171
6.1	CONCLUSÃO.....	171
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	174
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	175
	ANEXO A – MECÂNICA DO CONTATO.....	188

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO

A conscientização da escassez de recursos naturais e dos efeitos das atividades humanas sobre o meio ambiente é responsável por inúmeras políticas públicas que visam tornar a indústria mais eficiente a fim de minimizar seu impacto no meio ambiente. Visto que o uso de energia é o maior responsável pela emissão dos gases do efeito estufa, representando 79% do total e, desse valor, o transporte, representa aproximadamente 30% da demanda mundial (EIA, 2017), tornar o transporte mais eficiente é um objetivo global. Neste sentido, o uso do transporte ferroviário para médias distâncias se mostra vantajoso, visto consumir um terço da energia do transporte rodoviário (PROFILLIDIS, 2016). Isso é devido a pequena área de contato entre as superfícies metálicas com baixa resistência ao rolamento. Apesar da vantagem já existente ainda há espaço para melhorias no sistema ferroviário, em particular no que tange a gestão total de atrito, que é um procedimento que visa assegurar o transporte de maneira segura e eficiente por meio do uso correto de lubrificação, esmerilhamento de trilhos e reperfilamento de rodas.

Apesar das vantagens e perspectivas apresentadas, as estradas de ferro representam apenas 21% do transporte de cargas no Brasil, enquanto o rodoviário é responsável por 62,8% (COLAVITE; KONISHI, 2016). Atualmente a malha ferroviária de cargas brasileira constitui-se de aproximadamente 29.000 km. Os principais trechos dessas malhas são concessões a empresas privadas. A Tabela 1 apresenta as principais linhas e suas extensões.

A VALE, empresa que opera ambas as ferrovias EFC e EFVM listadas na Tabela 1, conforme o plano de investimento trienal (2019-2021), estima um investimento de R\$

3,76 bilhões, sendo R\$ 1,89 bilhões em via permanente, nomenclatura utilizada para a infra e superestrutura dos trilhos (ANTT, 2019).

Tabela 1 – Extensão das linhas principais e ramais, por concessionária

Ferrovia	Extensão (km)
EFC – Estrada de Ferro Carajás	978
EFVM – Estrada de Ferro Vitória a Minas	894
MRS – MRS Logística	1685
VALEC/Subconcessão: Ferrovia Norte-Sul TRAMO CENTRAL	856
FTL S/A – Ferrovia Transnordestina Logística	4295
RMN – Rumo Malha Norte	735
RMO – Rumo Malha Oeste	1973
RMP – Rumo Malha Paulista	2055
RMS – Rumo Malha Sul	7223
FCA – Ferrovia Centro-Atlântica	7222
FNS S/A – Ferrovia Norte-Sul TRAMO NORTE	745
EFPO – Estrada de Ferro Paraná Oeste	248
FTC – Ferrovia Tereza Cristina	163
Total	29.074

Fonte: CNT (2018)

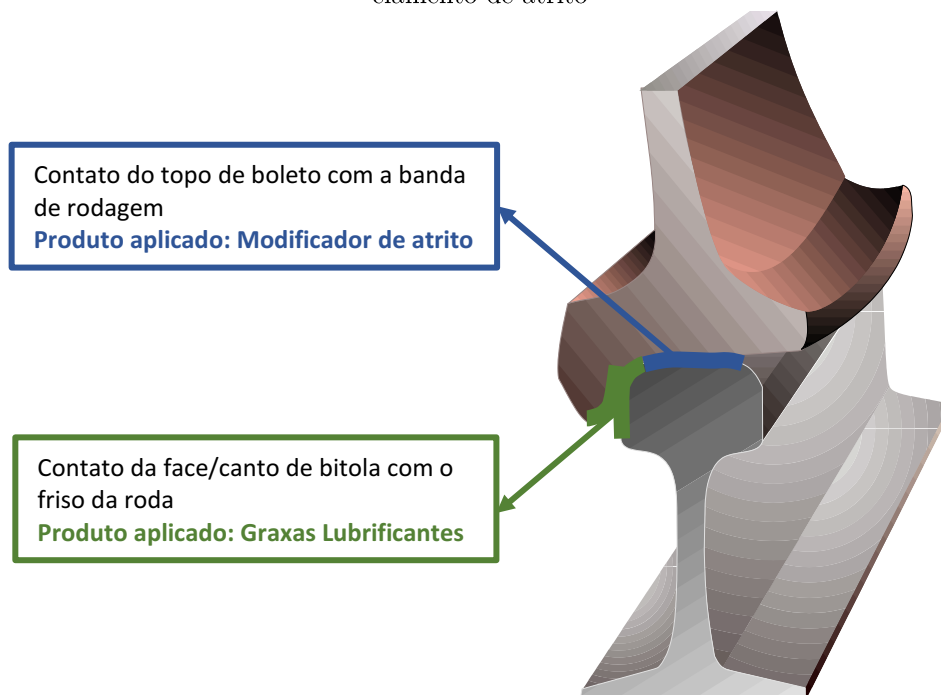
Tendo em vista esses valores financeiros e que a troca de um trilho representa um alto custo para qualquer ferrovia, na faixa de USD 375.000 por milha de trilho em uma ferrovia de carga (MAGEL, 2011), fica claro que investir em soluções que mitiguem a substituição de trilhos é necessário. Sabendo que Fadiga de Contato de Rolamento (FCR¹), fenômeno de dano que representa a principal razão de manutenção, falhas e troca de trilhos, assim como temas relacionados à segurança operacional (MAGEL, 2011), a relevância desse tema é prioritária quando se trata da manutenção da via permanente.

Dentre as possíveis ferramentas para se evitar FCR, e também o desgaste, tem-se: i) desenvolvimento de melhores aços para trilhos e rodas; ii) otimização dos perfis de contato entre rodas e trilhos; iii) gerenciamento do atrito pelo uso de graxas e modificadores de atrito e; iv) remoção dos danos na superfície dos trilhos por esmerilhamento (MAGEL, 2011).

¹ FCR é um tipo de dano que ocorre em trilhos devido ao carregamento cíclico das rodas em contato sobre os trilhos. Detalhes serão abordados no capítulo 2.

O contato da roda sobre o trilho é basicamente dividido em duas regiões, o contato da banda de rodagem da roda com o topo de boleto do trilho e o contato do friso da roda com o canto de bitola do trilho. O gerenciamento do atrito é um processo que visa controlar o coeficiente de atrito na interface roda-trilho em ambas as regiões de contato para valores que sejam apropriados para operação ferroviária, uma vez que sem controle este pode variar entre 0,05 e 0,7 (MAGEL, 2011). Esse gerenciamento, atualmente realizado nas maiores ferrovias do mundo, é feito com a aplicação de graxas lubrificantes no contato entre o friso da roda com o canto de bitola do trilho e a aplicação de modificador de atrito no topo do boleto (Figura 1).

Figura 1 – Principais regiões do contato da roda sobre trilho e os produtos aplicados segundo o gerenciamento de atrito



Fonte: Adaptado de Stock (2015)

Ambos produtos (no caso dos modificadores de atrito, apenas os a base de água) são objetos de estudo deste trabalho, que é parte integrante do projeto de lubrificação no Cátedra Roda-Trilho, um modelo de pesquisa criado em 2014 a partir de um convênio da VALE com diversas universidades do país para estudar temas de interesse da empresa relacionados ao material rodante e/ou trilhos e sua interface de contato. O gerenciamento

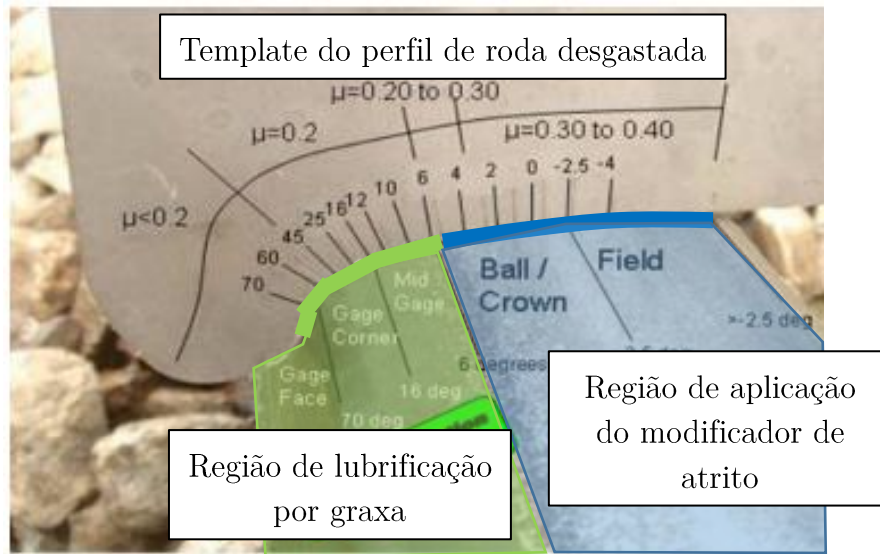
do atrito resulta em grandes benefícios para a ferrovia através de reduções significativas de FCR, desgaste e das forças laterais em curvas, além de economia de combustível (SROBA, 2001), o que gera uma redução de custos, maior segurança operacional e colabora com os anseios do desenvolvimento sustentável.

1.2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

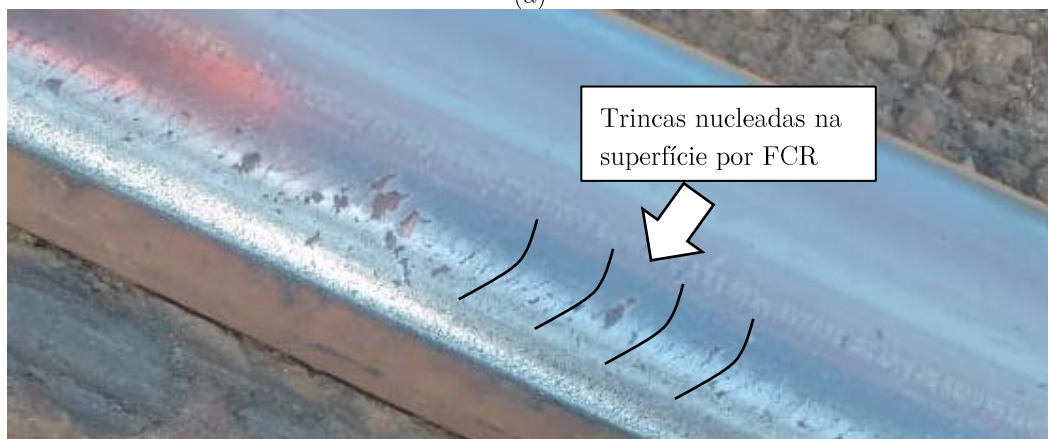
Em trilhos novos ou logo após o processo de esmerilhamento as graxas lubrificantes e os modificadores de atrito a base de água retardam a nucleação de danos por princípios de funcionamento distintos. No entanto, com a intensa passagem dos trens sobre os trilhos, mesmo nas regiões de atuação desses produtos, trincas superficiais são nucleadas (Figura 2). Nesta situação, especificamente para graxas aplicadas no canto de bitola, devido a interação do fluido lubrificante com as trincas superficiais, observa-se um efeito prejudicial deste quanto a propagação da trinca por FCR (LEWIS; OLOFSSON, 2009). Já para os modificadores de atrito a base de água não apresenta efeito prejudicial quanto a propagação de trinca, visto que este produto resulta na formação de filme sólido, porém os mecanismos de funcionamento deste produto ainda não foram amplamente explorados.

A aplicação de graxas e modificadores de atrito hoje Brasil é realizada por equipamentos chamados lubrificadores de via, onde os produtos lubrificantes são aplicados sobre o trilho para serem coletados pela passagem da roda e distribuídos ao longo da ferrovia. Logo, uma característica relevante desses produtos em campo é a retentividade, a qual é definida como distância máxima a partir do ponto de coleta em que graxas e modificadores de atrito ainda são capazes de desempenhar efetivamente a sua função. A retentividade é relevante, uma vez que o número necessário desses lubrificadores de via em uma ferrovia está diretamente relacionado com esta propriedade dos produtos.

Figura 2 – a) Imagem ilustrando a região do contato onde são aplicados a graxa e o modificador de atrito; b) fotografia mostrando que na mesma região surgem danos por FCR



(a)



(b)

Fonte: Adaptado de Uddin et al. (2010)

Atualmente, a literatura relativa a lubrificação na interface roda-trilho pouco explorou a influência das propriedades e formulações de graxas lubrificantes quanto ao seu desempenho. Esta situação é ainda mais crítica para os modificadores de atrito, visto que este é uma tecnologia recente, principalmente no Brasil, e que há pouquíssimas opções no mercado. Por ventura, graxas lubrificantes são amplamente utilizadas em rolamentos, elementos que também tem a sua vida atrelada a FCR. Por mais que hajam diferenças nas condições do contato em ambos os sistemas, a literatura sobre graxas lubrificantes em rolamentos está mais avançada e apresenta uma base para a discussão do problema. O mesmo pode se dizer sobre o contato entre engrenagens, já que tanto no

contato roda trilho quanto em engrenagens existe um movimento relativo entre as superfícies que provocam um rolamento com deslizamento (LEWIS; OLOFFSON, 2009). Mesmo que sistemas de engrenagens sejam predominantemente lubrificados a óleo, propriedades do óleo como viscosidade e a presença de aditivos também se fazem presentes em graxas. Já para modificadores de atrito, não há aplicações paralelas que possam embasamento, uma vez que é um produto criado exclusivamente para o contato roda sobre trilho.

Vale S.A (2018) avaliou as especificações técnicas de 27 graxas comerciais recomendadas para lubrificação do contato roda-trilho e verificou grande divergência entre propriedades e formulações. Essa divergência apresenta uma lacuna no conhecimento científico sobre graxas lubrificantes utilizados em ferrovias. As graxas podem ser caracterizadas por mais de 100 normas e métodos padronizados (COUSSEAU, 2013). Porém não se sabe quais dessas têm relação com o desempenho na aplicação ferroviária, em especial na propagação de trincas, retentividade e atrito. Essa falta de conhecimento fica evidenciada pelas informações que estão contidas na ficha técnica de uma graxa comercial utilizada para lubrificação do canto de bitola, como por exemplo, a propriedade da carga de soldagem por quatro esferas (Tabela 2). Essa é uma das principais propriedades utilizadas pelos fabricantes para promover o seu produto em que eles informam que quanto maior esse valor, melhor o desempenho do produto em campo. No entanto, segundo o trabalho realizado por Ferrer (2020), verificou-se que para as graxas estudadas por ele e nas condições avaliadas não se confirmou essa tendência em relação ao desgaste (Figura 3). Neste mesmo trabalho, foram avaliadas outras propriedades comumente encontradas na ficha técnica de graxas, porém sem encontrar nenhuma correlação.

Essa lacuna de conhecimento pode ser explicada por três motivos principais: i) baixo *marketshare* das graxas em comparação aos óleos lubrificantes, 9% contra 91% (MANG et al, 2007), fazendo com que exista pouco investimento e, conseqüentemente,

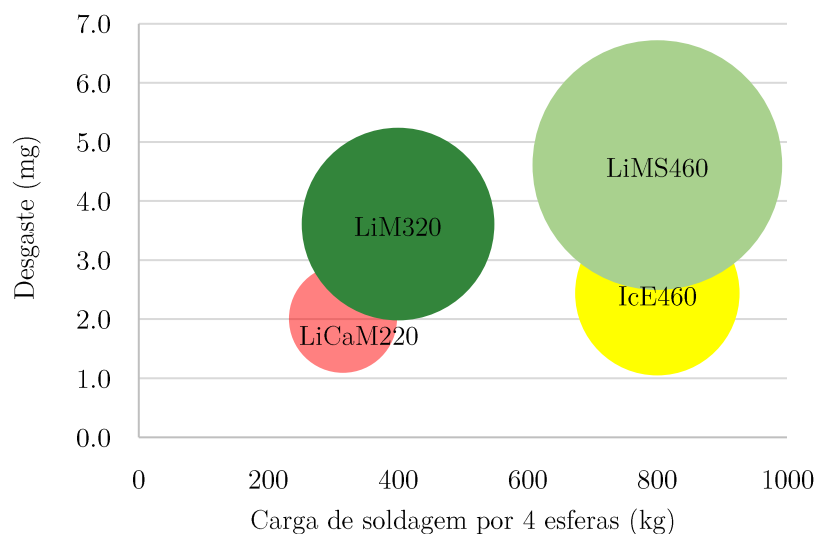
entendimento sobre seu comportamento em funcionamento; ii) baixo *marketshare* de graxas de canto de bitola em comparação às graxas para rolamentos; e iii) a introdução sistemática de graxas para aplicação ferroviária ter um século a menos que a lubrificação sistemática de rolamentos por graxas. Essa situação é ainda mais agravada para os modificadores de atrito a base de água utilizados no topo de boleto, visto ser um produto mais recente no mercado.

Tabela 2 - Exemplo da ficha técnica de uma graxa comercial utilizada na lubrificação do contato do friso da roda com o canto de bitola com as principais propriedades presentes

Propriedades	Método		Características
Consistência NLGI			2
Cor			Preta
Tipo de Sabão			Lítio/Cálcio
Óleo Básico			Mineral
Viscosidade Cinemática	@40°C cSt	IP 71 /ASTM D445	220
Viscosidade Cinemática	@100°C cSt	IP 71 /ASTM D445	18
Penetração Trabalhada	@25°C 0.1mm	IP 50/ASTM D217	265-295
Ponto de Gota	°C	IP 396	175
Carga de soldagem – 4 esferas	kg típico	IP 239	400
Carga de soldagem – 4 esferas	kg mínimo	IP 239	315

Fonte: Autoria própria

Figura 3 – Gráfico com os resultados de desgaste em um ensaio pino sobre disco em função da carga de soldagem por quatro esferas das graxas utilizadas



Fonte: Adaptado de Ferrer (2020)

A fadiga de contato de rolamento decorrente do contato roda-trilho é complexa. Por se tratar de um sistema aberto, o controle das variáveis é restrito, o que pode distorcer os resultados de análises de campo, além de que o tempo de resposta dos testes é muito longo. Em decorrência avaliar diferentes graxas lubrificantes e modificadores de atrito em campo é um trabalho que demanda alto investimento em suprimentos, recursos humanos e tempo. Portanto, ensaios laboratoriais são necessários para, se não indicar qual o melhor lubrificante a ser utilizado, filtrar vários deles e elencar possíveis candidatos para testes em campo. Além disso ensaios laboratoriais permitem, dado maior controle das variáveis, entender como as propriedades e constituintes de graxas e modificadores de atrito interferem no desempenho e o quanto e porquê são influentes.

Assim, ao se desenvolver metodologias que permitam selecionar graxas lubrificantes e modificadores de atrito a base de água que retardem o aparecimento de danos superficiais e que uma vez que esses danos estejam presentes, eles não tenham um impacto severo na sua propagação, será possível reduzir a frequência do esmerilhamento, reduzindo os custos de manutenção. Além disso, a seleção adequada de graxas e modificadores de atrito acarreta no aumento da vida útil de trilho e roda, além da redução no consumo de combustível via controle de atrito na interface roda-trilho.

1.3 OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho é ampliar o conhecimento sobre o efeito das propriedades e da formulação de graxas lubrificantes e modificadores de atrito sobre a retentividade, desgaste por propagação de trincas e atrito na interface roda-trilho, a fim de propor diretrizes para seleção destes produtos.

Dado as condições do sistema roda sobre trilho, os mecanismos de falha apresentados em campo na região de interesse (topo de boleto e canto de bitola) e a divergência

entre propriedades de graxas lubrificantes e modificadores de atrito recomendados para interface roda-trilho, os seguintes objetivos específicos são listados:

1. Formular / selecionar graxas lubrificantes e modificadores de atrito para que se possa avaliar de forma isolada e sistemática o efeito de suas propriedades e composição no seu desempenho;
2. Definir metodologia para analisar o efeito das graxas lubrificantes em termos de retentividade, propagação de trincas e retentividade em ensaios que promovam mecanismos de desgaste similares aos observados em campo;
3. Caracterizar propriedades não normalizadas de graxas e modificadores de atrito a fim de verificar se tais propriedades se relacionam com o desempenho tribológico dos mesmos.

1.4 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

Esta seção apresenta como o trabalho foi organizado a fim de facilitar sua leitura. Neste capítulo, **1 – Introdução**, apresentou-se de modo sucinto a demanda global por sistemas mais eficientes visto a necessidade de vivermos em um ambiente mais sustentável. Introduziu-se o transporte ferroviário neste contexto e identificou-se que os custos associados a reparação de vias férreas estão intimamente relacionados aos danos de fadiga de contato, e que a eficiência energética dos trens de carga e de passageiros está associada à lubrificação, que é realizada predominantemente pela aplicação de graxas e dos modificadores de atrito no contato. Por fim, identificou-se lacunas na literatura relacionando formulação e propriedades de graxas lubrificantes com seu desempenho, em particular na falha por propagação de trincas geradas na superfície por FCR e retentividade, bem como o desconhecimento dos mecanismos de funcionamento dos modificadores de atrito e como estes estão associadas as suas propriedades e a retentividade, sendo o objetivo deste trabalho cobrir parte desses vãos.

No capítulo **2 – Revisão da literatura**, introduz-se o sistema roda trilho, os danos nucleados na superfície ocasionados por FCR em trilhos de trem, e como a graxa

lubrificante e o modificador de atrito interagem com estes danos. Na sequência, apresenta-se o conceito de terceiro corpo, o qual representa o elemento interfacial de composição e propriedades distintas em função dos diferentes contaminantes presentes no contato roda-trilho, visto que a operação ferroviária é considerada um sistema aberto. Prosseguiu-se apresentando como a lubrificação é realizada em campo, e como algumas propriedades das graxas e dos modificadores de atrito afetam o processo de lubrificação. Na sequência as características e os mecanismos de lubrificação de graxas, incluindo as teorias para previsão da espessura específica de filme lubrificante são apresentadas. De modo análogo, apresentam-se as características e os mecanismos de funcionamento dos modificadores de atrito, incluindo resultados de laboratório já reportados na literatura. Para ambos, graxa e modificador de atrito, dá-se maior enfoque na relação entre formulação e propriedades com o desempenho. Por fim, resultados de campo são apresentados a fim de embasar a utilização desses produtos. O objetivo deste capítulo é introduzir o estado da arte do tema, a fim de identificar lacunas científicas e tecnológicas, os quais foram usados para estruturar os objetivos deste trabalho.

No capítulo **3 - Materiais e Métodos**, seleção das graxas lubrificantes e dos modificadores de atrito é apresentado em detalhe. Em paralelo, as caracterizações exploratórias realizadas nestes produtos são apresentadas com suas devidas justificativas. Neste capítulo os resultados destas caracterizações já são apresentados e discutidos. Só então introduz-se os ensaios tribológico de FCR e retentividade em um equipamento disco sobre disco com metodologia específica para se obter os mesmos danos observados em campo.

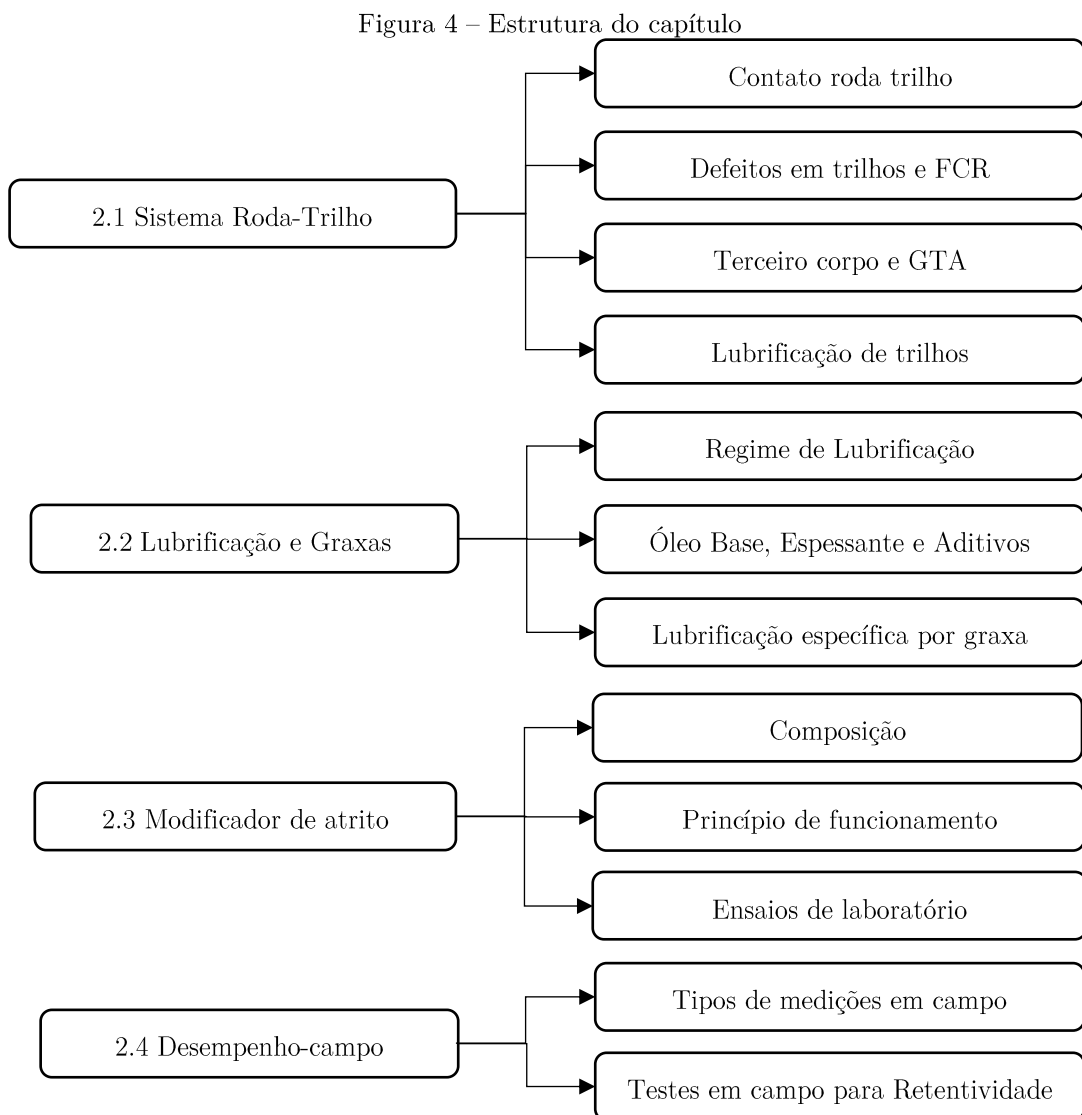
No capítulo **4 - Resultados**, são apresentados os resultados dos ensaios tribológicos disco sobre disco. Estes são discutidos em função da formulação e das características das graxas lubrificantes e dos modificadores de atrito, além de serem confrontados com a literatura atual sobre o assunto.

Por fim, o capítulo **5 - Discussão**, apresenta um resumo dos principais resultados dos capítulos 3 e 4 em conjunto com o ponto de vista do autor sobre a proposição de diretrizes para seleção de graxas lubrificantes para aplicação ferroviária, visando responder ao objetivo principal deste trabalho.

Por fim, no capítulo **6 - Considerações Finais** são apresentadas as principais conclusões do trabalho indicando onde se avançou na literatura e uma lista de oportunidades para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

O estudo do desempenho de graxas e modificadores de atrito quanto a FCR em um contato roda sobre trilho é complexo e multidisciplinar. O diagrama da Figura 4 apresenta a estrutura adotada e em conjunto com o subcapítulo (1.3) apresentado anteriormente servem para guiar a leitura deste capítulo.

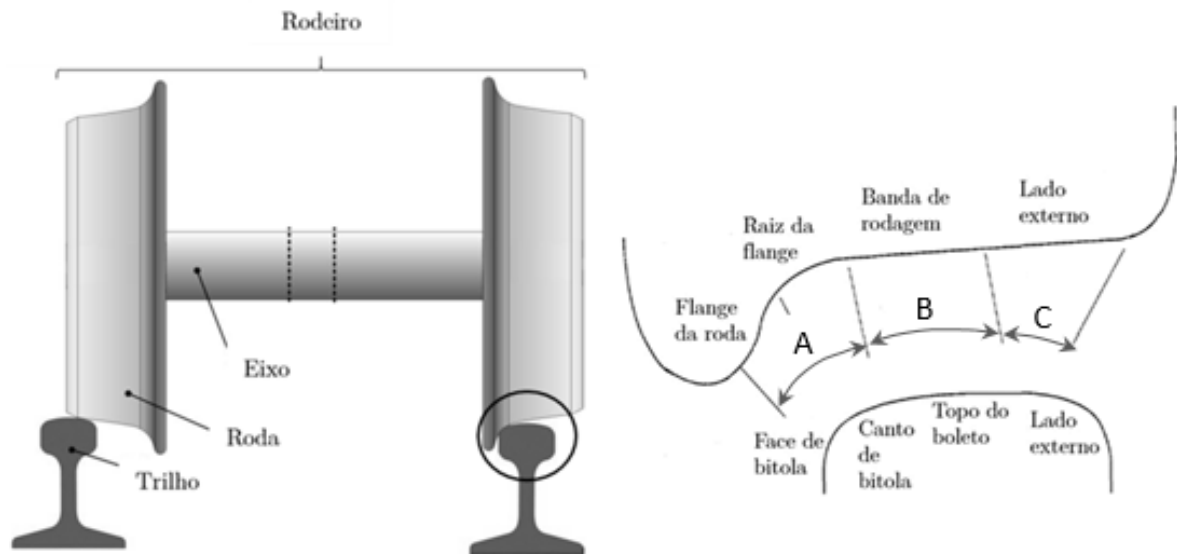


Fonte: Autoria própria

2.1 INTRODUÇÃO SISTEMA RODA-TRILHO

No transporte de carga ferroviário convencional, locomotivas e vagões são guiados por um par de trilhos. A interação desses veículos com a linha férrea ocorre através dos rodeiros, par de rodas rigidamente montadas em um eixo, que rolam sobre os trilhos (Figura 5). Este contato é caracterizado por ter uma pequena área de contato onde todos os esforços verticais (peso transportado), longitudinais (aceleração e frenagem), laterais e de giro (em curvas) são transmitidos. Em decorrência destas forças, há movimento relativo entre roda e trilho, caracterizando-se como um contato de rolamento e deslizamento. Este movimento relativo é chamado de *creepage*, conhecido também como escorregamento e indica o quanto de escorregamento está ocorrendo no contato, normalmente expressado em percentagem da velocidade da roda. A taxa de escorregamento (*creepage*) é importante visto ter uma relação direta com o coeficiente de atrito (LEWIS; OLOFSSON, 2009), no entanto será explorado mais adiante neste trabalho. Maiores detalhes da dinâmica do movimento entre os rodeiros em contato com o trilho podem ser consultados em Iwnicki (2006). Resumidamente, dependendo da posição da roda sobre o trilho, a qual é função das características da via, essas condições e componentes do contato se alteram. Estas regiões podem ser divididas em três, as quais são representadas pelas letras A, B e C na Figura 5.

Figura 5 - Ilustração de um rodeiro sobre trilhos e a nomenclatura das regiões de interface da roda com o trilho



Fonte: Adaptado de Dollevoet (2010) e Tournay (2001)

As zonas de contato mais prováveis são a **(A)** e a **(B)**, ambas objeto de estudo desse trabalho, sendo a região **(C)** indesejada.

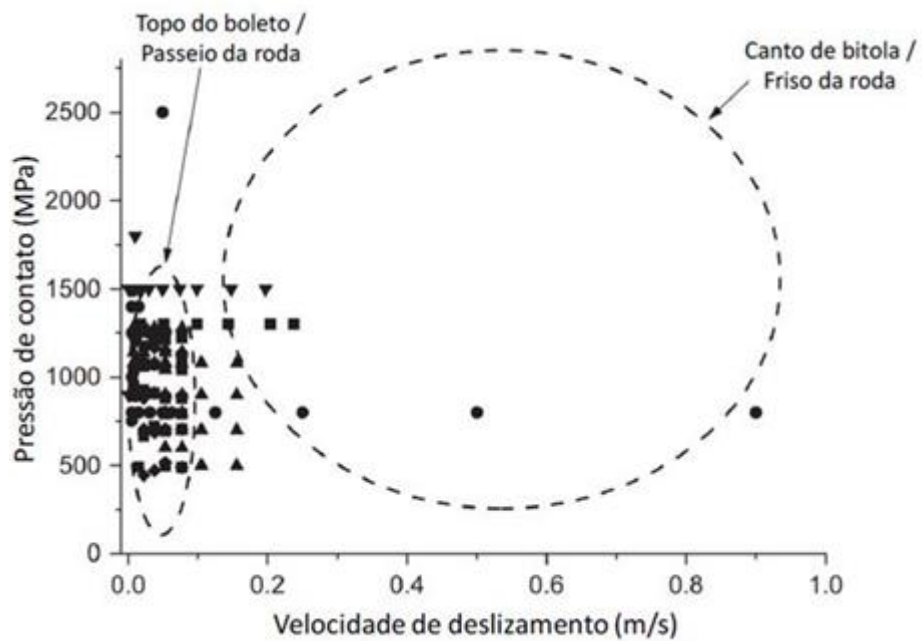
Na região **(B)** ocorre o contato entre a banda de rodagem da roda e o topo do boleto do trilho. Nessa região ocorre predominantemente movimento de rolamento junto com um pouco de deslizamento na direção do movimento (escorregamento longitudinal). Em curvas ocorre também o deslizamento lateral (escorregamento lateral) e a rotação da roda não é paralela ao trilho (*spin*) em função do ângulo de ataque existente entre a roda e a direção de movimento da ferrovia. A aplicação de produtos nessa região tem por objetivo controlar o atrito, deixando-o na faixa de 0,25 a 0,40. Um valor maior que essa faixa gera maior consumo de combustível, desgaste acima do desejado e surgimento acelerado de defeitos (devido ao FCR) tanto no trilho quanto na roda. Já um valor de coeficiente de atrito menor que 0,20 compromete a segurança da operação da ferrovia, pois um baixo valor de coeficiente de atrito afeta a frenagem e a aderência entre a roda e o trilho. Outro efeito indesejado do baixo coeficiente de atrito nesta região é a patinação, que decorre da falta de tração necessária para movimentar a locomotiva, podendo até mesmo impedir que o trem se mova. Nesta região, para evitar esses fenômenos, é

comumente utilizado modificadores de atrito e intensificadores de tração que serão abordados mais adiante neste trabalho (LEWIS; OLOFSSON, 2009). Os valores de pressão de contato e velocidade de deslizamento para essa região foram estimados por simulações numéricas, considerando a pressão de contato devido a dinâmica da estrutura e a carga transportada (JENDEL, 2002). Os valores variam de 100 MPa à 1600 MPa e a velocidade de escorregamento de 0 a 0,1 m/s (Figura 6).

Na região (**A**) ocorre o contato entre o friso da roda com o canto e a face de bitola do trilho (referido apenas como canto de bitola neste trabalho). Esse tipo de contato ocorre em curvas, devido a inércia do movimento, superelevação da via e a diferença de raios entre o trilho externo e o trilho interno da curva. Nesta região valores de atrito inferiores a 0,20 são desejáveis. O friso da roda entra em contato com o canto de bitola em curvas abertas, enquanto a face de bitola entra em contato com o friso da roda em curvas fechadas. Nesta região o contato pode ser predominantemente de deslizamento, situação que promove aceleração do desgaste e aumento do coeficiente de atrito em comparação com o contato de rolamento observado na região B, apesar de também gerar trincas superficiais. O objetivo da lubrificação nessa região é reduzir o coeficiente de atrito e o desgaste, mas caso existam trincas superficiais o lubrificante poderá auxiliar na propagação das mesmas, o que se é indesejado. Para ferrovias de transporte de cargas a lubrificação é feita geralmente com graxa. Os valores de pressão de contato nessa região, de acordo Jendel (2002), variam de 250 MPa à 2500 MPa e a velocidade de escorregamento de 0,12 a 0,91 m/s (Figura 6). Os pontos apresentados na Figura 6 são compilações de ensaios pino sobre disco e disco sobre disco realizados com materiais de roda e trilho, os quais evidenciam a escassez de dados sobre o contato entre friso da roda e canto de bitola. As variações em pressão e velocidade de escorregamento nesta região são grandes pois são fortemente dependentes da velocidade do trem, características dinâmicas do vagão, as quais dependem da suspensão do truque, do raio das curvas e de qual rodeiro do vagão e a roda que está em contato com o trilho, sendo mais severas (maior pressão

e maior velocidade de escorregamento) para velocidades altas, curvas fechadas e para a primeira roda do primeiro rodeiro (primeira a entrar em contato com o trilho), e com a severidade sendo reduzida gradualmente para as demais rodas e curvas mais abertas.

Figura 6 – Faixas de pressão de contato e velocidade de deslizamento entre as regiões de contato do trilho e roda com os pontos de condições de ensaios realizados em laboratório

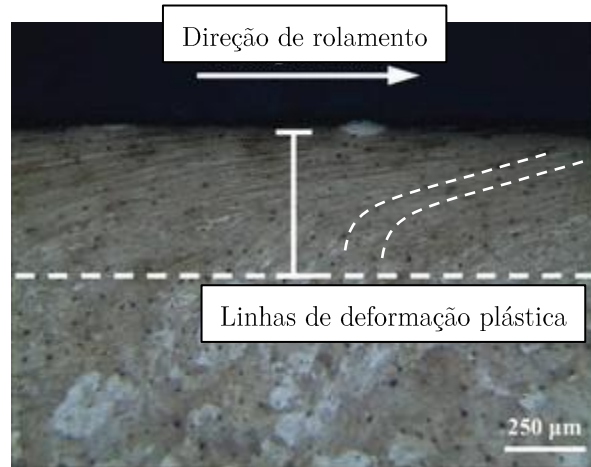


Fonte: JENDEL, 2002 (Adaptado)

2.1.1 Defeitos em Trilhos por FCR

Trilhos estão submetidos a carregamentos repetitivos com altas pressões de contato e cargas tangenciais (aceleração, frenagem, curvas, etc.) que deformam plasticamente a superfície do material. Se a deformação ocorre em uma direção dominante, a microestrutura apresentará sinais claros de alinhamento conforme apresentado na Figura 7.

Figura 7 – Micrografia de um corpo de prova do ensaio disco sobre disco (representando o trilho) apresentando as linhas de deformação plástica na superfície

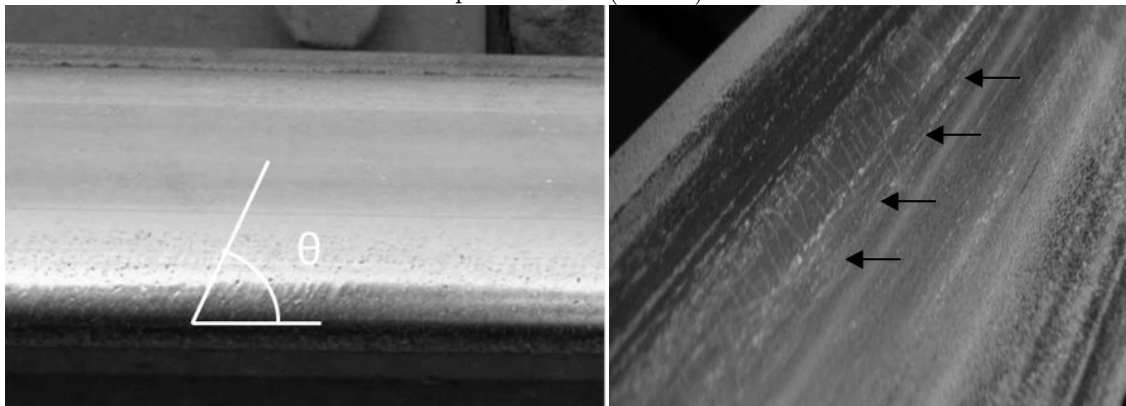


Fonte: Wang et al. (2017)

Quando o encruamento e as tensões residuais, que são limitadas pela ductilidade do material, não são mais suficientes para evitar uma maior acumulação da deformação plástica durante um ciclo de carregamento, trincas eventualmente serão formadas. Esse fenômeno é comumente chamado de *ratcheting* (EKBERG; KABO, 2004).

Em ambas as regiões de contato (A) e (B) se verificam trincas de fadiga pouco espaçadas na superfície dos trilhos e com aparência similar, denominadas *headchecks* (Figura 8). Esse é um tipo de defeito relevante encontrado em campo, visto que a partir dele danos mais severos como o *flaking* e o *spalling* podem surgir (AREMA, 2010) e, portanto, é um dos responsáveis por definir a frequência do processo de esmerilhamento em trilhos (HEYDER; BREHMER, 2014). *Headchecks* são mais comuns de serem observados em curvas do que em retas, visto que o escorregamento lateral da roda sobre o trilho é acentuado. (LEWIS; OLOFSSON, 2009).

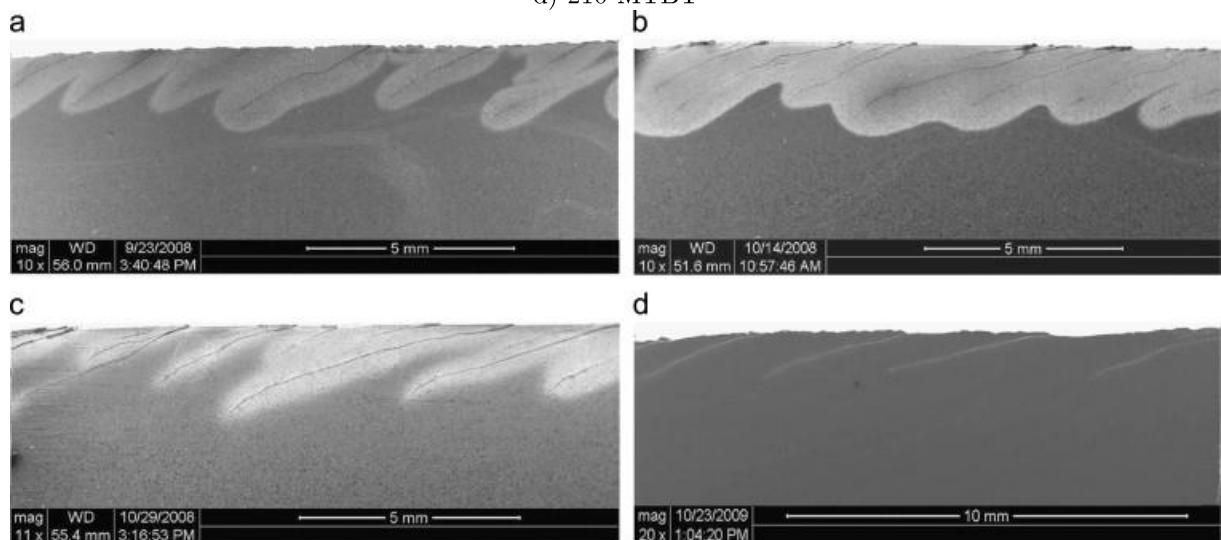
Figura 8 – Início da formação de *headchecks* em trilhos ferroviários no canto de bitola (esquerda) e topo de boleto (direita)



Fonte - (AREMA, 2010)

A morfologia dos *headchecks* aparentam ser compridas ($\approx 1\text{-}5\text{mm}$), finas ($\approx 0.1\text{-}1\text{mm}$) e rasas ao longo da superfície do trilho com grande número de ramificações (ZHOU et al, 2017). A Figura 11 apresenta a seção transversal desse defeito e sua evolução com o número de ciclos de carregamento em uma ferrovia de carga, onde no meio ferroviário o número de ciclos é descrito como milhões de toneladas brutas transportadas (MTBT) sobre o trilho.

Figura 9 Comprimento e profundidade dos *headchecks* após a) 10 MTBT; b) 30 MTBT; c) 62 MTBT e d) 210 MTBT



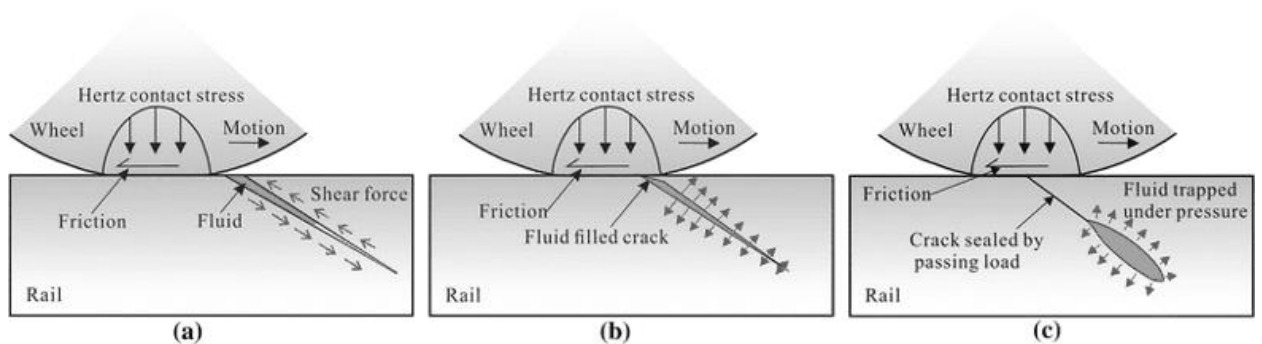
Fonte: Zhou et al, (2014)

A aplicação de produtos como graxas e modificadores de atrito nas respectivas regiões adequadas auxiliam na redução dos esforços tangenciais e conseqüentemente na

deformação plástica da superfície, retardando a nucleação dessas trincas. Porém, a literatura indica que uma vez nucleado os *headchecks*, a propagação deles é mais acelerada quando há presença de lubrificantes como graxas (LEWIS; OLOFSSON, 2009), mas não de modificadores de atrito. De modo resumido, após a nucleação de uma trinca, o lubrificante utilizado no canto de bitola que penetrar na trinca pode acelerar a propagação da mesma. Existem três modos de propagação de trincas devidos a presença de lubrificante, conforme apresentado esquematicamente na Figura 10.

- i) Quando a carga cíclica se aproxima da trinca, o fluido lubrifica as faces da trinca que está submetida a tensão cisalhante cíclica gerando a propagação da trinca em Modo II (mecanismo de propagação de trinca por cisalhamento – Figura 10 a). O coeficiente de atrito nas faces da trinca é fator preponderante deste modo de propagação. Bower (1988) modelou o contato e mostrou que é improvável a propagação da trinca por este mecanismo caso o coeficiente de atrito na face das trincas seja superior a 0,2. Ou seja, verifica-se que a propagação da trinca é menor quanto maior for o coeficiente de atrito nas suas faces.
- ii) Quando a carga cíclica está sobre o começo da trinca, a carga normal tende a forçar o fluido para dentro dela, o que causa propagação de trinca por efeito hidráulico em Modo I (Figura 10 b).
- iii) No momento em que a carga está sobre a trinca, a carga cíclica tende a fechar a trinca e um certo volume de fluido fica aprisionado na sua cavidade. Em decorrência, o fluido, que é incompressível, é empurrado para ponta da trinca devido à pressão de contato, o que causa tensões de alta intensidade e propagação de trinca por aprisionamento de lubrificante no Modo I, conforme apresentado na Figura 10 c.

Figura 10 – Representação esquemática da propagação de trincas na presença de fluido. a) propagação por cisalhamento; b) propagação por efeito hidráulico; c) propagação por aprisionamento de lubrificante



Fonte: Wang et al, 2017

Do exposto, verifica-se que a presença de graxas e modificadores de atrito no contato possuem influência direta na nucleação (ambos os produtos retardando a nucleação dos danos) e na propagação (apenas graxas apresentando um efeito negativo). No entanto, a interface do contato roda trilho encontrada em campo é heterogênea e possui grande influência no comportamento do contato (principalmente no coeficiente de atrito) como será abordado a seguir.

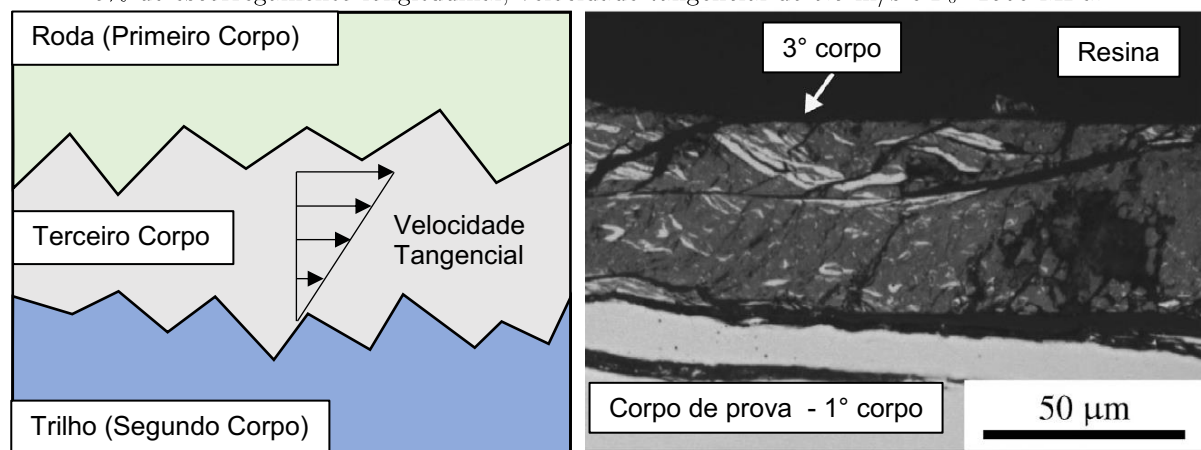
2.1.2 Terceiro Corpo

A interface do contato roda trilho é complexa, uma vez que é considerada como um sistema tribológico aberto, onde o ambiente em que essa interface está inserida está variando constantemente (OLOFSSON; LYU, 2017). Como consequência, esse contato está exposto a presença de diferentes tipos de contaminantes líquidos e sólidos (LEWIS; OLOFSSON, 2009). É importante destacar que neste trabalho contaminante é considerado qualquer produto involuntariamente presente na interface roda trilho, diferentemente de graxas lubrificantes aplicados no canto de bitola, os modificadores de atrito aplicados no topo do boleto ou areia aplicada em rodas de locomotivas que fazem parte do que é chamada da gestão total do atrito.

Entre os contaminantes comumente encontrados nas ferrovias brasileiras estão: água da chuva, óleo hidráulico devido a algum vazamento do sistema do trem, brita de

lastro, partículas de sapata de freios e cargas transportadas como minério de ferro, carvão e cereais (VIDON, 2012). Além desses contaminantes citados, as superfícies dos trilhos e rodas normalmente estão separadas por uma fina camada de óxidos de diferentes tipos devido as condições ambientais e de operação que ocorrem no contato (LEWIS et al., 2012). O conjunto formado por essas partículas de óxidos e os possíveis contaminantes presentes constituem uma camada que é chamada de terceiro corpo (Figura 11).

Figura 11: a) representação esquemática do terceiro corpo como elemento interfacial entre as superfícies da roda e do trilho durante o contato; b) seção transversal de um disco de corpo de prova de um ensaio disco sobre disco indicando a presença do terceiro corpo na superfície após ensaios a seco com 5% de escorregamento longitudinal, velocidade tangencial de 0.5 m/s e $P_0=1500$ MPa.



(a)

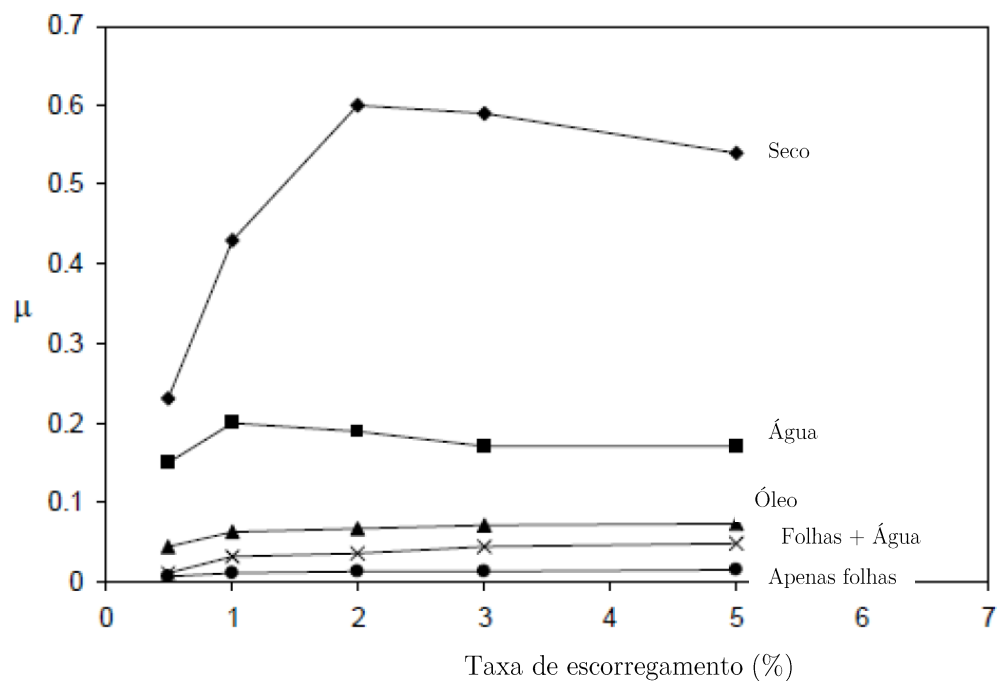
(b)

Fonte: Adaptado de Meierhofer et al., (2014)

Esse terceiro corpo é responsável por separar as superfícies da roda e do trilho e acomodar a diferença de velocidades entre as superfícies (Figura 11a). A Figura 11b apresenta a seção transversal de um disco de corpo de prova após o ensaio disco sobre disco do trabalho de (MEIERHOFER, et al 2013) diferenciando o terceiro corpo formado durante o ensaio atuando como elemento interfacial no contato e o primeiro corpo sendo o disco do corpo de prova. Maiores detalhes sobre os mecanismos de formação, transferência, escoamento e adsorção do terceiro corpo no contato roda trilho também podem ser consultados no trabalho de Descartes (2005), já que este não é o foco deste trabalho.

Porém, é relevante apontar que a composição e propriedades como a resistência ao cisalhamento desse terceiro corpo não são constantes e nem contínuas nas superfícies das rodas e trilhos e, portanto, o nível do coeficiente de atrito na interface roda trilho está sujeito a grandes variações (MAGEL, 2017). A Figura 12 Figura 15 apresenta os dados experimentais de um ensaio disco sobre disco de como diferentes tipos de contaminantes alteram o coeficiente de atrito no contato.

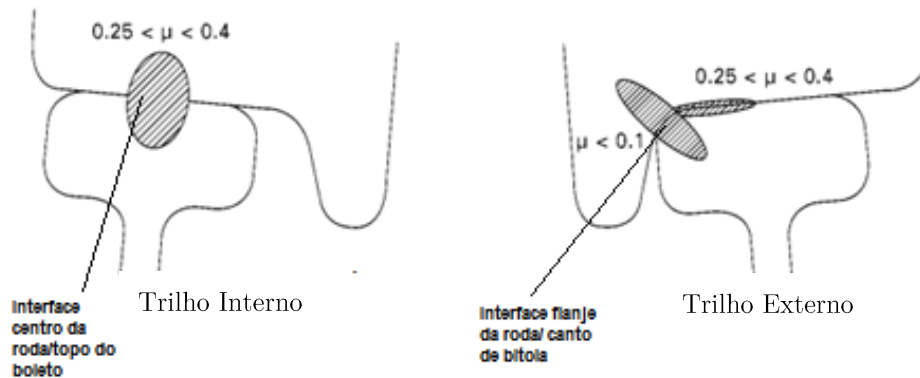
Figura 12 – Curvas do coeficiente de atrito em função da taxa de escorregamento para diferentes tipos de contaminantes



Fonte: Gallardo-Hernandez e Lewis (2008)

Para contornar os riscos envolvendo a operação ferroviária com uma variação tão significativa desses valores, normas ferroviárias determinam valores limites de coeficiente de atrito (Figura 13).

Figura 13 - Valores de coeficiente de atrito recomendados nas diferentes regiões de contato entre as rodas e os trilhos



Fonte: Lewis e Olofsson (2009)

2.1.3 Gestão Total do Atrito

Para atingir os valores recomendados na Figura 13, normalmente as ferrovias aplicam a gestão total do atrito (GTA), o qual são um conjunto de estratégias para o controle do coeficiente de atrito, reduções do desgaste, do FCR, de ruídos e dos custos de manutenção da via a fim de atingir maior eficiência e segurança na operação ferroviária (RONEY et al, 2010). Apesar de ser amplamente aplicada nas principais ferrovias do mundo, a GTA pode ser considerada como algo novo nas ferrovias brasileiras, uma vez que a MRS foi a pioneira na implementação dessa estratégia no Brasil iniciando em 2008 (DO CARMO, 2012). A GTA consiste na aplicação de produtos específicos na interface roda trilho, sendo esses produtos normalmente são divididos em três categorias: graxas, modificadores de atrito e intensificadores de tração (KALOUSEK, 1997). Este último está fora do escopo deste trabalho, porém são amplamente utilizados nas rodas motoras (locomotivas) em situações onde é necessário aumentar o coeficiente de atrito em casos específicos, como por exemplo presença de contaminantes que reduzem o coeficiente de atrito abaixo do mínimo durante a frenagem ou aceleração (LEWIS; OLOFSSON 2009). Para tal, o produto mais comumente utilizado é a areia, no entanto atualmente novos

produtos em forma de gel com a presença de partículas de alumina além de areia estão sendo comercializados (HARMON, 2018).

Graxas lubrificantes e modificadores de atrito a base de água, objetos de estudo deste trabalho, são produtos distintos. A Figura 14 apresenta os valores típicos de coeficiente de atrito para ambos os produtos.

Figura 14: Coeficiente de atrito típicos encontrados para trilho em condições a seco, com modificadores de atrito a base de água e com lubrificantes



Fonte: Adaptado de Stock et al., (2016)

Graxas atuam reduzindo o coeficiente de atrito entre o contato do friso da roda com o canto de bitola através da lubrificação elastohidrodinâmica, onde a viscosidade do óleo aumenta substancialmente com o aumento da pressão de contato a ponto de formar um filme capaz de separar as superfícies em contato dependendo das condições de operação. Os benefícios dessa lubrificação foram verificados experimentalmente em diferentes ferrovias ao redor do mundo. Sims, Miller e Schepmann (1999) reportaram que a lubrificação do canto de bitola pode reduzir o consumo energético em até 32% e a lubrificação efetiva pode aumentar em até seis vezes a vida de operação da roda (IHHA, 2001).

Já os modificadores de atrito a base de água são aplicados no topo de boleto com a banda de rolagem da roda e buscam atingir um coeficiente de atrito intermediário (valores entre 0,3 e 0,4). O produto, que é caracterizado como um líquido com partículas

sólidas em suspensão, é desenvolvido para operar de maneira ótima quando, inicialmente na forma líquida, se mistura com a camada de óxidos (terceiro corpo) presente nas superfícies em contato (LEWIS et al, 2012). Após a evaporação da água, um novo terceiro corpo é formado pelos óxidos anteriormente presentes em conjunto com as novas partículas sólidas poliméricas residuais do modificador de atrito. Esse novo terceiro corpo é responsável pelo controle do coeficiente de atrito e trazem benefícios em relação ao contato a seco como redução dos ruídos, melhora no desempenho do trem em curvas, além de redução no desgaste e consumo de combustível (STOCK et al, 2016).

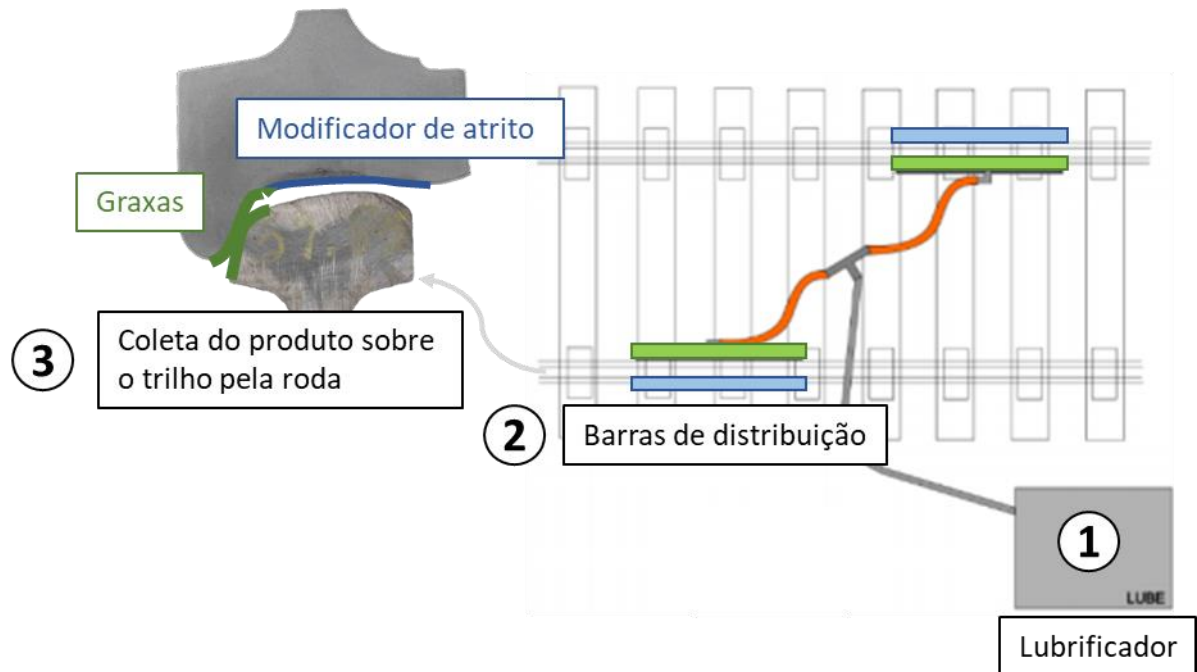
Ambos os produtos serão mais detalhados e explorados nos subcapítulos 2.2 e 2.3. A maneira de como esses produtos são aplicados em uma ferrovia é apresentada a seguir.

2.1.4 Lubrificação de Trilhos

A aplicação de lubrificantes em trilhos foi introduzida na década de 1970 devido ao aumento do volume do tráfego e aumento do peso por eixo que acelerava a deterioração dos trilhos (WAARA, 2001). Várias soluções de lubrificação foram usadas desde então. Atualmente, a solução predominante no mercado para lubrificação em ferrovias de carga é a utilização de lubrificadores fixos que bombeiam graxa para a face de bitola interna do trilho e modificador de atrito para o topo de boleto cada vez que um trem se aproxima. A Figura 15 apresenta um desenho esquemático do sistema e a Figura 16 uma foto de uma barra lubrificadora usada para graxas na face interna do trilho e outra barra para modificadores de atrito posicionadas na face externa do trilho, para evitar a colisão do friso da roda com a passagem do trem. Neste tipo de aplicação, as rodas que passam pelas barras lubrificadoras são as responsáveis por coletar e espalhar, no caso de graxas, ao longo do trilho para distâncias habituais de até 4km enquanto para os modificadores

de atrito as rodas coletam o produto e são condicionadas formando um filme sólido em sua superfície após a evaporação da água presente no produto.

Figura 15 –Desenho esquemático de um lubrificador de via para graxas em verde e modificadores de atrito em azul



Fonte: Adaptado de Vidon, Soares e Do Carmo Santoro (2013)

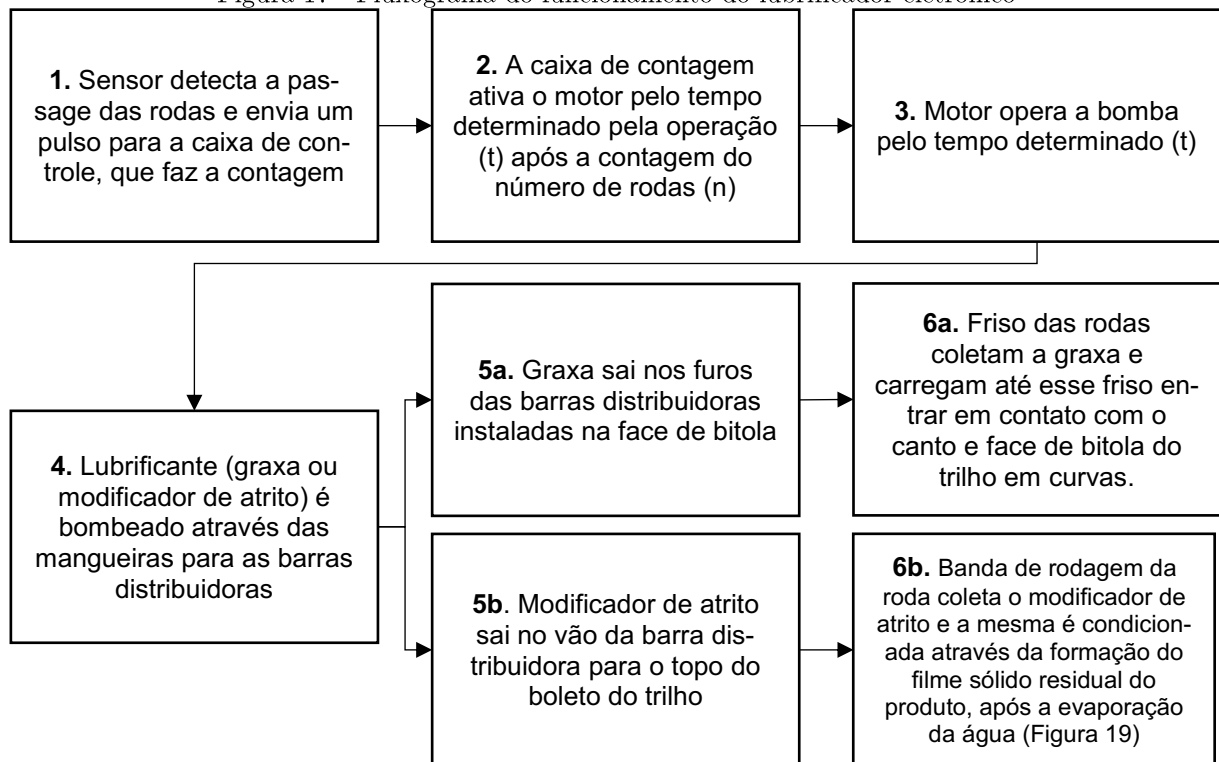
Figura 16 – Fotografia de uma barra de aplicação de graxa lubrificante (esquerda) e modificador de atrito (direita)



Fonte: VALE (2018)

A metodologia de funcionamento do lubrificador é sumarizada na Figura 17. Conceitos importantes relacionados a etapa 6 do fluxograma para as graxas e modificadores de atrito são:

Figura 17 - Fluxograma do funcionamento do lubrificador eletrônico



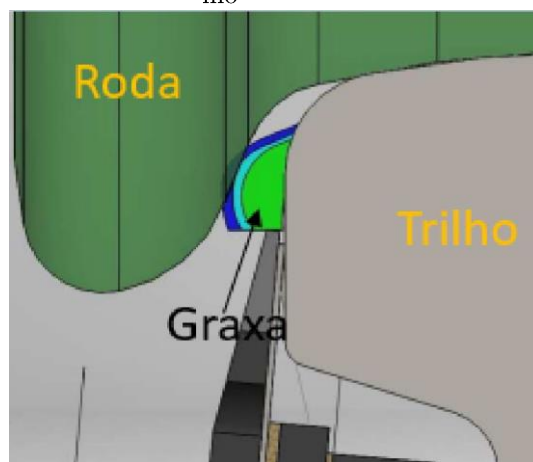
Fonte: Adaptado de Vidon et al, (2013)

a) *Pick up*: é a capacidade que a roda do trem tem de coletar a graxa/modificador de atrito que foi colocada no trilho pela barra distribuidora. Para as graxas lubrificantes sabe-se que as propriedades reológicas, juntamente com as condições de bombeamento, determinam a forma geométrica da graxa na lateral do contato, a qual é definida como *bulb* na literatura, e referido daqui para frente como bulbo. A forma do bulbo é fator determinante na eficiência do lubrificador (Figura 18). Já para modificadores de atrito, como estes ficam no topo do boleto, o processo de coleta não apresenta maiores desafios, porém este produto possui uma etapa adicional durante a coleta que é o condicionamento da superfície da roda após a evaporação da água nos primeiros ciclos após a coleta (Figura 19).

b) *Splash*: quantidade de graxa/modificador de atrito ejetado do contato para fora da zona de interesse no processo de pick-up, ou ejetada devido a força centrífuga da roda para a parte de baixo do vagão (habitual tanto para graxas lubrificantes como para modificadores de atrito). Para graxas o *splash* está diretamente relacionado com

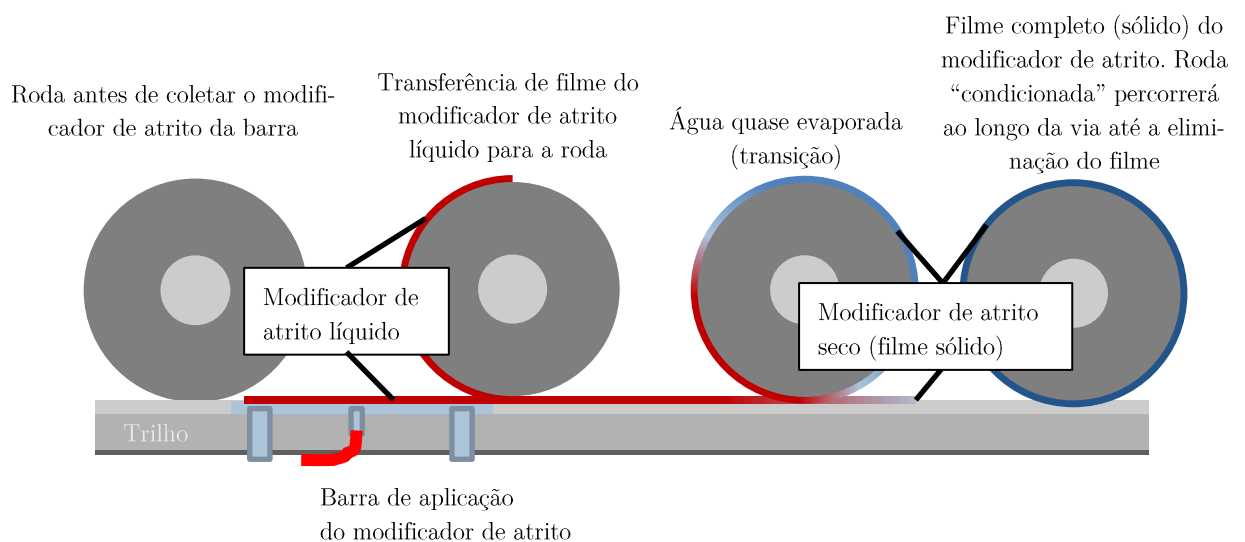
o formato do bulbo (Figura 18), e a aderência da graxa na superfície do friso da roda e à sua coesão (*tackiness*). Essa característica do processo é que faz com que na região das barras distribuidoras sejam necessárias mantas para impedir a contaminação do solo. Para os modificadores de atrito o efeito de *splash* também é relevante e também está associado com a *tackiness* do produto, conforme destacado por (HARMON, 2019).

Figura 18 - Ilustração da graxa sendo coletada pelo friso da roda da barra distribuidora fixada no trilho



Fonte: Adaptado de Uddin et al, 2010

Figura 19: Ilustração com a sequência da formação do filme sólido do modificador de atrito a base de água antes, durante e após a coleta do produto do topo do boleto do trilho pela roda



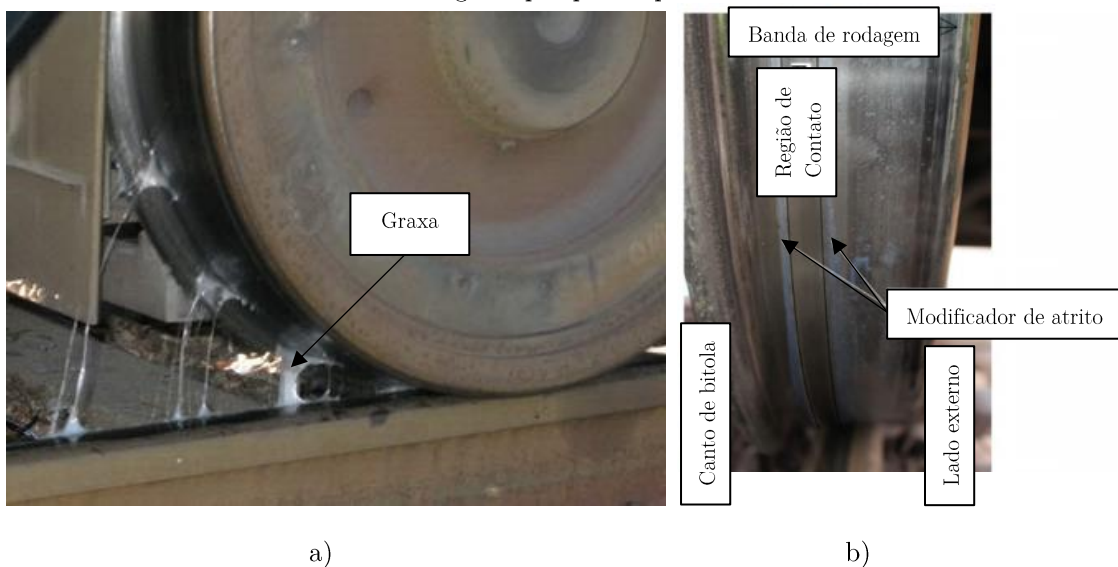
Fonte: Adaptado de Vidon (2012)

Após a etapa 6, quando a graxa já se encontra no friso da roda (Figura 20a), e o modificador de atrito na banda de rodagem da roda (Figura 20b) os conceitos relevantes são:

c) Carreamento: distância que a roda percorre o trilho lubrificando-o com a graxa coletada, ou que a roda percorre o trilho sem o desgaste do filme de modificador de atrito aderido à mesma. Essa distância é habitualmente mensurada por inspeção visual de rodas e trilhos;

d) Retentividade: distância que, mesmo sem ter graxa ou modificador de atrito visível no contato, se observa controle do atrito, quer seja pela medição das forças laterais por extensômetria ou pela medição do atrito com o tribômetro manual. É importante destacar que na lubrificação por graxa apenas as rodas dos vagões são lubrificadas para evitar que as locomotivas percam aderência.

Figura 20 – a) Graxa no friso da roda após passagem pelo lubrificador; b) Modificador de atrito no banda de rodagem após passar pelo lubrificador



a)

b)

Fonte: Adaptado de Khan, 2019

2.2 GRAXA LUBRIFICANTE

A ASTM D 288 define graxa como um lubrificante sólido a semifluido, proveniente da dispersão de um agente espessante em um líquido lubrificante, podendo conter

outros ingredientes que propiciem propriedades especiais a mesma (aditivos). Para melhor entendimento pode-se fazer uma analogia entre a graxa e uma esponja molhada, que apesar de pouco acadêmica é bastante esclarecedora. O agente espessante, responsável por manter o óleo base confinado, é a esponja. O óleo base com os aditivos, que é o agente lubrificante principal, é a água. Quando a graxa é solicitada termomecanicamente ela libera o óleo lubrificante com os aditivos para que o mesmo lubrifique o contato, assim como a esponja libera a água quando é espremida (ver Figura 21).

Figura 21 – Correlação da estrutura do espessante com uma esponja



Fonte: Cousseau (2013)

A distribuição típica dos constituintes de graxas é óleo base, espessante e aditivos. Esta composição proporciona a graxa um comportamento viscoelástico semi-plástico, que fornece a graxa suas principais vantagens quando comparada ao óleo lubrificante. Tal característica assegura que uma graxa não escoe a baixas tensões, evitando que a mesma escorra do contato, e que escoe facilmente a altas tensões, garantindo um funcionamento com baixo atrito.

2.2.1 Regimes de Lubrificação

As graxas atingem baixos valores de coeficiente de atrito em função da baixa resistência ao cisalhamento do filme lubrificante formado entre as superfícies em contato. Normalmente essa camada é muito fina, podendo variar na ordem de nanômetros a mi-

crômetros que dificultam a sua observação. A maneira mais usual de avaliar a lubrificação, é através dos regimes de lubrificação estabelecidos a partir do cálculo da espessura específica de filme lubrificante (Equação (1)).

$$\Lambda = \frac{h}{\sqrt{S_{q1}^2 + S_{q2}^2}} \quad (1)$$

Onde:

Λ é o parâmetro de espessura específica de filme

h é a espessura do filme lubrificante

S_{q1} é a rugosidade média quadrática do corpo 1

S_{q2} é a rugosidade média quadrática do corpo 2

A espessura do filme (h), necessária para o cálculo da espessura específica de filme, é um parâmetro que depende dos seguintes fatores: carga, velocidade de rolamento e deslizamento, viscosidade e piezo-viscosidade do lubrificante, geometria, topografia e propriedades mecânicas das superfícies. As equações para o cálculo da espessura de filme lubrificante (h), estão apresentadas no Anexo A, juntamente com as equações para determinação da pressão de contato.

A resolução da Equação (1) define o regime de lubrificação em que o sistema está operando. Podem-se definir três regimes na lubrificação elastohidrodinâmica: filme completo, filme misto e filme limítrofe. Estes três regimes apresentam as características definidas na Tabela 3.

Tabela 3 – Regimes de lubrificação EHL e valores típicos

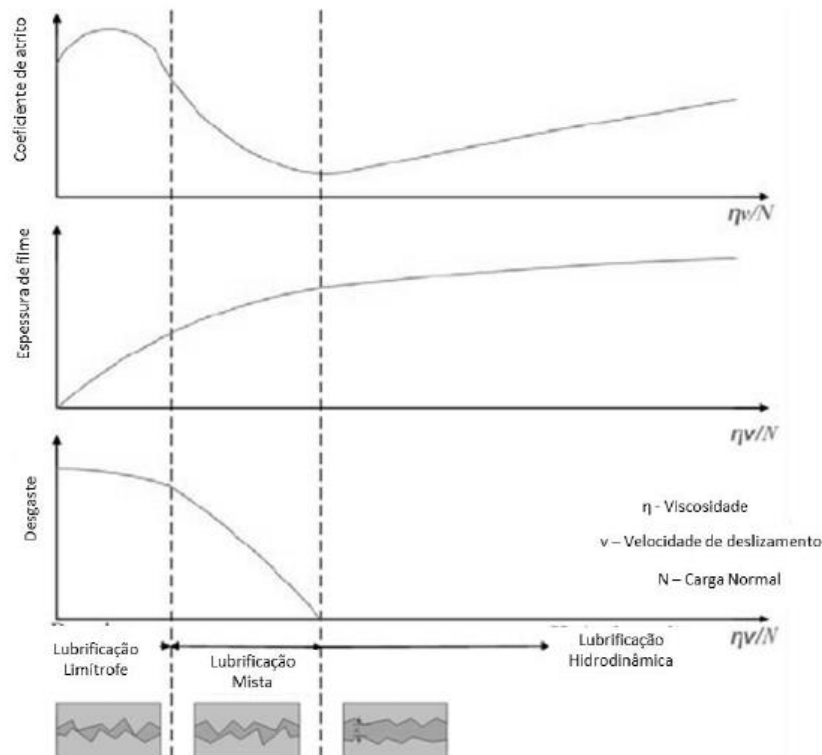
Equação (1)	Regime	Observações
$\Lambda < 1$	filme limítrofe	Não há um filme lubrificante entre as superfícies em contato, predominando o contato metal vs. metal..
$1 < \Lambda < 3$	filme misto	Superfícies em contato parcialmente separadas pelo filme lubrificante, ocorrendo em alguns pontos contato metal vs. metal.
$\Lambda > 3$	filme completo	Superfícies em contato completamente separadas pelo filme lubrificante.

Fonte – (SEABRA, 2002)

As observações experimentais mostram claramente que há uma relação entre os regimes de lubrificação, o desgaste e o coeficiente de atrito. Esta relação é apresentada esquematicamente na Figura 22. Neste sentido, a teoria da lubrificação EHD, será fundamental para, primeiramente definir ensaios representativos e conseqüentemente discutir os resultados de atrito, desgaste e retentividade apresentados no capítulo 4. É importante mencionar que não se encontrou na literatura nenhuma medição de espessura de filme lubrificante realizada no contato do friso da roda com o canto e ou face de bitola do trilho. No entanto, devido as condições de operação da lubrificação em campo e os mecanismos de desgaste presentes no canto de bitola do trilho, o provável regime de lubrificação nesse contato é limítrofe ou misto.

Nesta Figura 22 verifica-se que quanto maior for a viscosidade ou velocidade, e menor for a carga, maior será a espessura específica de filme. Quanto maior a espessura específica de filme, menor será o desgaste e o coeficiente de atrito.

Figura 22 – Relação entre os regimes de lubrificação com atrito e o coeficiente de desgaste para materiais metálicos



Fonte: Adaptado de Yang e Moan (2010)

É importante destacar que essa teoria foi desenvolvida e validada para óleos lubrificantes. Visto que as graxas são compostas majoritariamente por óleo base, e que em altas taxas de cisalhamento a resposta do sistema é definida pelo óleo, tais teorias são aplicáveis as graxas. No entanto, para determinadas condições de operação verifica-se que graxas e óleos lubrificantes apresentam desempenho tribológico distintos. Tais diferenças serão introduzidas mais adiante no subcapítulo 2.2.5.

2.2.2 Óleo Base

O óleo base representa de 65 a 95% de uma graxa lubrificante. Consequentemente tem uma influência significativa no desempenho das graxas. Entre as graxas analisadas neste estudo há dois tipos de óleo base: mineral e sintético, sendo que o sintético, neste caso, é misturado a um óleo mineral e em proporções muito pequenas. Os óleos de base mineral são mais baratos e quando propriamente aditivados apresentam bom desempenho. No entanto, é importante mencionar que os óleos sintéticos são aproximadamente 20% mais eficientes que os minerais em termos de atrito no regime de lubrificação por filme completo, apesar de sua maior vantagem sobre os minerais ser a capacidade de operar a maiores temperaturas.

A propriedade mais importante do óleo base é a sua viscosidade, visto que esta determina a espessura de filme lubrificante, e consequentemente o coeficiente de atrito e a vida de um determinado componente (SKF, 2015).

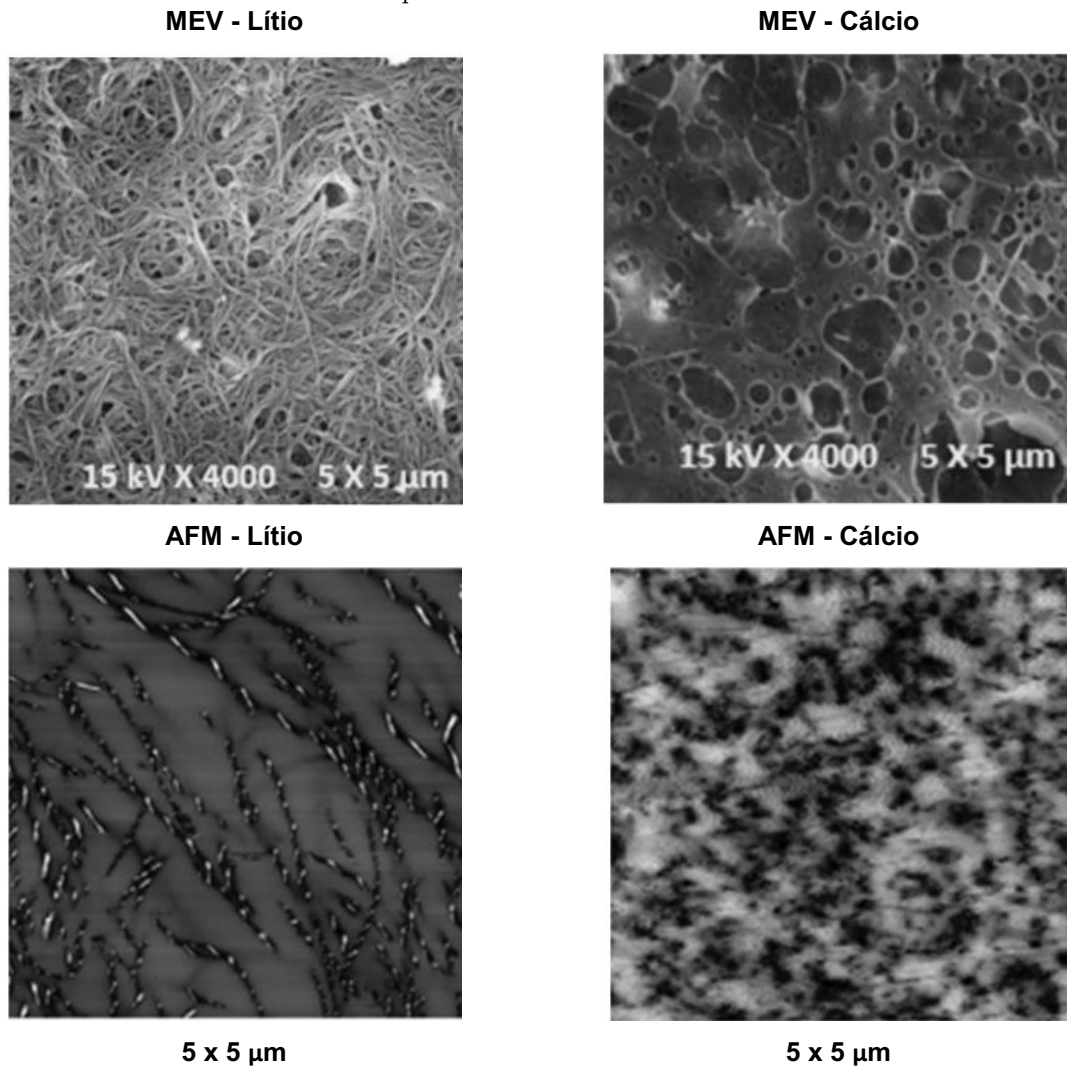
2.2.3 Espessante

O espessante é que confere à graxa: i) sua característica elástica a baixas tensões termomecânicas, assegurando que a graxa mantenha o óleo confinado e não escoe, pro-

porcionando boa adesão ao sistema; e ii) sua característica viscosa a altas tensões, permitindo um escoamento suave do lubrificante. Além disso o espessante pode contribuir como um aditivo de extrema pressão e de anti-desgaste. Resistência a contaminação por água e adesão à superfície são outras propriedades em que o espessante tem um papel fundamental (COUSSEAU, 2013).

Nas graxas em estudo apenas dois tipos de espessante serão analisados: **Lítio** e **Cálcio**, cujas estruturas típicas observadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microscopia de força atômica (AFM) são apresentadas na Figura 23. A partir do tratamento destas imagens obteve-se as características geométricas destes espessantes, as quais são apresentadas na Tabela 4. É importante mencionar que tanto as imagens quanto os valores apresentados são típicos para a formulação das graxas em estudo (Lítio com óleo mineral e Cálcio com óleo mineral). Porém, o processo de fabricação, o pacote de aditivos e a relação entre espessante e óleo base podem alterar as imagens e os valores apresentados. É de grande relevância apresentar a morfologia do espessante, visto que vários autores já mostraram que a mesma tem relação direta com a formação de filme lubrificante e com o coeficiente de atrito em contatos lubrificados por graxa (CYRIAC et al, 2016).

Figura 23 – Imagens de microscopia eletrônica de varredura e de microscopia de força atômica para espessantes de lítio e cálcio.



Fonte: Cyriac et al., (2016)

Tabela 4 – Característica geométricas do espessante obtidas por análise das imagens de AFM

Características	Graxa de lítio	Graxa de cálcio
Morfologia	Fibras torcidas	Partículas esféricas
Comprimento médio (L)	$\approx 2 \pm 0,40 \mu\text{m}$	-
Diâmetro médio (D)	$\approx 0,1 \pm 0,02 \mu\text{m}$	$\approx 0,26 \pm 0,05 \mu\text{m}$
Volume médio (V)	$\approx 0,0157 \mu\text{m}^3$	$\approx 0,009 \mu\text{m}^3$

Fonte – Cyriac et al. (2016)

Além da diferença morfológica, as graxas com espessante de cálcio apresentam melhor resistência a contaminação por água e maior capacidade de carga (COUSSEAU, 2013). Isto sugere que para graxas idênticas, em que apenas o espessante é distinto, uma graxa de cálcio apresentará melhor desempenho para altas cargas, e não perderá suas propriedades caso ocorra contaminação por água.

2.2.4 Aditivos

Os aditivos são adicionados ao lubrificante para melhorar algumas de suas propriedades e / ou fornecerem outras que o lubrificante não possuía. Os aditivos mais habituais em graxas lubrificantes são listados na Tabela 5 juntamente com seus elementos / espécies químicas principais. Quanto aos aditivos, sabe-se que as graxas devem apresentar aditivos antioxidante para lhes garantir vida longa, bem como aditivos inibidores de corrosão, de extrema pressão e anti-desgaste para proteger a superfície de contato. Algumas graxas apresentam também aditivos modificadores de atrito. Para graxas de trilho, que são consumidas rapidamente, os aditivos antioxidante são menos relevantes, já os aditivos de extrema pressão, anti-desgaste e os modificadores de atrito são essenciais. No entanto, não há literatura específica que permita comparar a eficiência de diferentes tipos de aditivos. Sabe-se apenas que aditivos metálicos tem maior propensão a propagar trincas que aditivos não metálicos, visto sua maior afinidade química com superfícies nascentes de materiais ferrosos (MEHEUX et al., 2010). Ou seja, estes possuem efeito prejudicial para superfícies com trincas. Além disso, raramente é possível obter informações sobre os aditivos presentes em um dado lubrificante. Por tanto, neste trabalho, graxas com o mesmo pacote de aditivo serão analisadas, a fim de eliminar essa variável do sistema.

Tabela 5 – Aditivos habituais em graxas lubrificantes e seus componentes

Tipo de aditivo	Componentes
Inibidores de corrosão (IC)	Bário, Cálcio, Zinco, Magnésio, Éster
Extrema pressão (EP) / Anti-desgaste (AW)	Zinco, Fósforo, Enxofre, Bismuto, Estanho, Cálcio, Chumbo*
Anti-oxidante (AO)	Zinco

Fonte: Cousseau (2013)

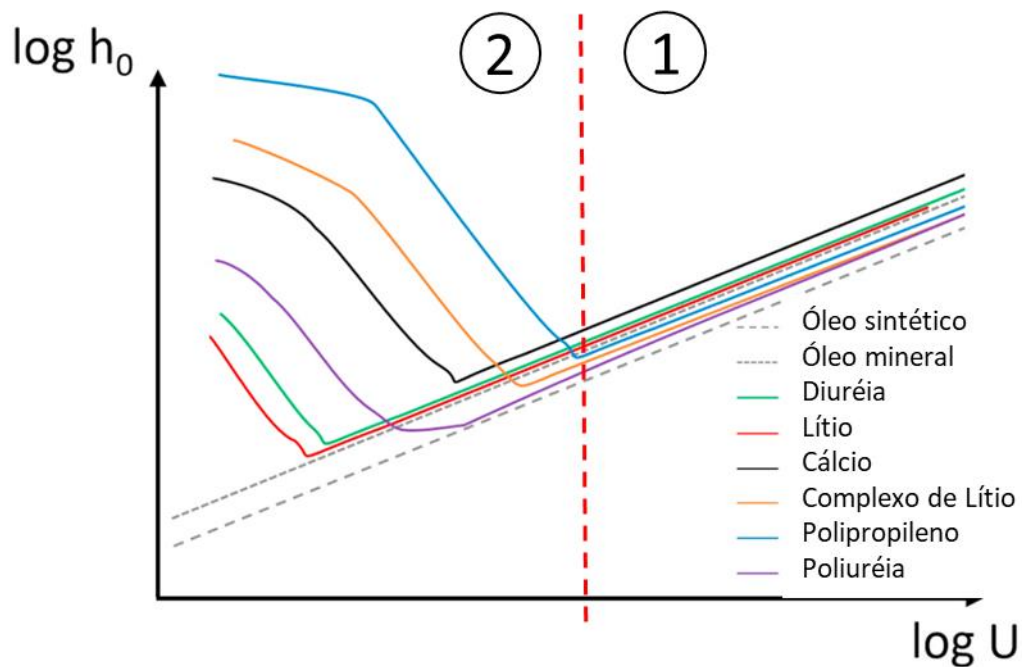
2.2.5 Lubrificação por Graxa

A literatura nos mostra que o desempenho tribológico de uma graxa é influenciado pelas condições de operações a que esta é submetida, pelo seu óleo base, espessante e aditivos, bem como pela interação entre esses componentes e o seu processo de fabricação (BHAT; CHAROO, 2019; CZARNY, 1995).

Biazon et al. (2020) fizeram uma revisão da literatura sobre o efeito do espessante e do óleo base de graxas lubrificantes na espessura de filme e no coeficiente de atrito em função da velocidade de entrada do lubrificante (U). A espessura de filme de graxas e óleos em um contato com lubrificação abundante é mostrada na Figura 24 em função da velocidade de entrada do lubrificante em uma escala log-log. Os óleos apresentam uma relação linear com U (em escala log-log), sendo que os óleos sintéticos apresentam menor espessura de filme que os óleos minerais devido ao seu menor coeficiente de pressão-viscosidade. A previsão da espessura de filme lubrificante para óleos lubrificantes é detalhada no Anexo A. Já as graxas lubrificantes apresentam um comportamento distinto, representado por uma curva da variação da espessura de filme lubrificante em função da velocidade de entrada do lubrificante em forma de ‘V’ e podem ser divididas em duas regiões distintas enumeradas (1) e (2) na Figura 24. Para valores altos de U (lubrificação com filme completo), região (1) a graxa se comporta como o óleo, porém apresentando uma espessura de filme ligeiramente maior. Nesta região o filme é composto predominantemente por óleo base, apesar de ocorrer a passagem de espessante pelo contato. À medida que U é reduzido, uma transição definida como ‘velocidade de transição’ ocorre e a graxa não segue o comportamento convencional observado em óleos lubrificantes. Ao reduzir ainda mais a velocidade de entrada do lubrificante, para valores abaixo da velocidade de transição, destacada pela região (2), a espessura do filme é determinada predominantemente pelo espessante que passa

e se depositar na interface do contato. Usualmente nessa região, à medida que U diminuí, a espessura do filme aumenta. Abaixo da velocidade de transição, as graxas de cálcio com óleo mineral apresentam espessura de filme muito maior que as graxas formuladas com espessante de lítio e óleo mineral.

Figura 24 – Espessura de filme (h) em função da velocidade de entrada (U) para graxas e óleos sem aditivos



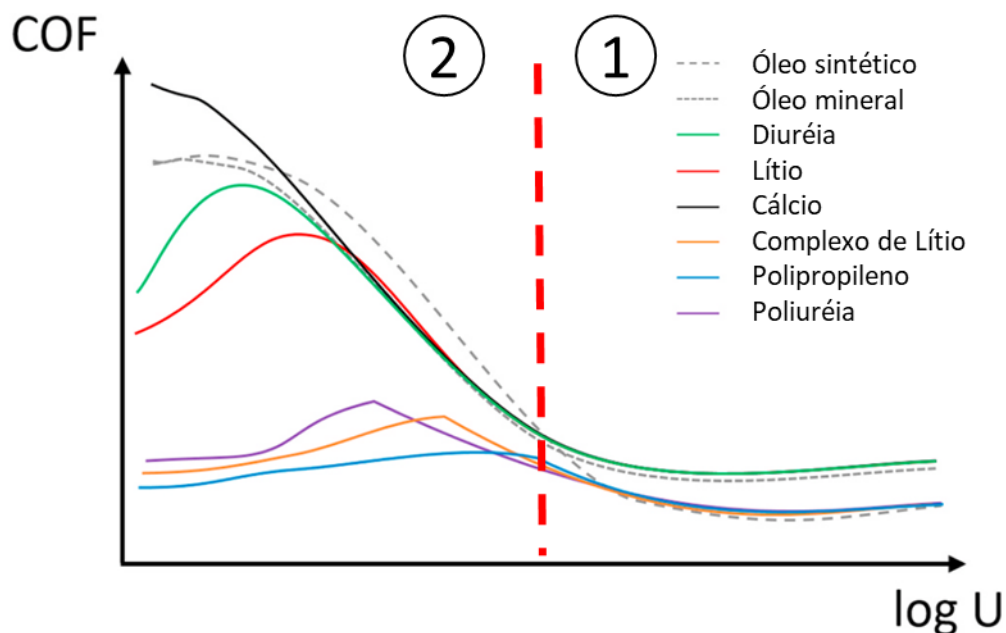
Fonte: Adaptado de Biazon et al., (2021)

Cen et al. (2014) mostraram que para cada tipo de graxa, parece haver um valor específico de espessura do filme lubrificante, abaixo do qual o efeito do espessante torna-se relevante e faz com que a espessura de filme aumente mesmo com a redução da velocidade de entrada do lubrificante. Segundo Kanazawa (2017), esta espessura é definida pela razão entre a espessura do filme lubrificante e a morfologia e quantidade de espessante presentes na graxa lubrificante.

A Figura 25 mostra o coeficiente de atrito para as mesmas graxas e óleos apresentados na Figura 24 em função da velocidade de entrada do lubrificante. Para os óleos vemos o comportamento característico da curva de Stribeck. Já as graxas lubrificantes não seguem essa tendência e podem ser divididas em duas regiões distintas (1) e (2).

Basicamente para altos valores de U indicado pela região (1), situação em que o filme lubrificante é composto predominantemente de óleo base, as graxas apresentam o mesmo comportamento que seus correspondentes óleos base. Mas à medida que a velocidade de entrada do lubrificante vai diminuindo, as graxas apresentam aumento do coeficiente de atrito indicado pela região (2), porém a partir de certo ponto, o coeficiente de atrito cai significativamente para graxas de lítio e continua aumentando para as graxas de cálcio. Obviamente que esta transição está associada a ‘velocidade de transição’ referida anteriormente (Figura 24). Quando o filme lubrificante passa a ser formado predominantemente pelo espessante, que caracteriza o contato entre friso de roda e canto de bitola, são as características reológicas do espessante que definem o valor do coeficiente de atrito e a resposta em desgaste do sistema. Conforme visto na Figura 24, nesta região as graxas de cálcio apresentam maior espessura de filme que as graxas de lítio. No entanto, o filme de espessante de cálcio apresenta maior resistência ao cisalhamento que as do filme de espessante de lítio, e conseqüentemente maior coeficiente de atrito.

Figura 25 – Coeficiente de atrito (COF) em função da velocidade de entrada (U) do lubrificante para graxas e óleos sem aditivos



Fonte: Adaptado de Biazon et al., (2021)

Essas diferenças destacadas entre o comportamento das graxas quando comparadas com o seu óleo base serão importantes para a discussão dos resultados, uma vez que o projeto de experimento utilizado neste trabalho busca avaliar os principais aspectos da formulação de uma graxa como por exemplo, isolando a influência da viscosidade do óleo base e os tipos de espessante.

2.3 MODIFICADOR DE ATRITO

Os modificadores de atrito são produtos capazes de reduzir e controlar o atrito, que em condições a seco variam entre 0,5 e 0,8, para níveis intermediários entre 0,3 e 0,4. Atualmente, devido à expansão da prática da GTA, existem diferentes tipos de produtos que são comercializados como modificadores de atrito para serem aplicados no contato da roda com o topo do boleto. Esses produtos podem ser classificados quanto a sua capacidade de evaporação (STOCK, et al, 2016). Produtos que possuem a capacidade de evaporar são comumente chamados de modificadores de atrito a base de água, e são objetos de estudo deste trabalho. Nestes produtos, a água, utilizada como meio de transporte de partículas sólidas presentes no material para a interface do contato, é evaporada rapidamente durante o contato (Figura 19). Produtos que não possuem a capacidade de evaporar, são chamados normalmente de lubrificantes de topo de boleto, pois possuem em sua composição óleo ou graxa e seus mecanismos de funcionamento são similares aos das graxas lubrificantes aplicados no canto de bitola (Figura 22). Estes produtos não são de interesse para ferrovias de transporte de carga por poderem propagar trincas presentes na superfície e demandarem uso de manta de proteção, visto que a ocorrência de *splash* pode ejetar o produto, formulado com óleo, para o ambiente e do minucioso ajuste de aplicação do produto que pode atingir valores de coeficiente de atrito abaixo do permitido para operar com segurança. Logo, modificadores de atrito à base de óleo ou graxa não fazem parte do escopo deste trabalho.

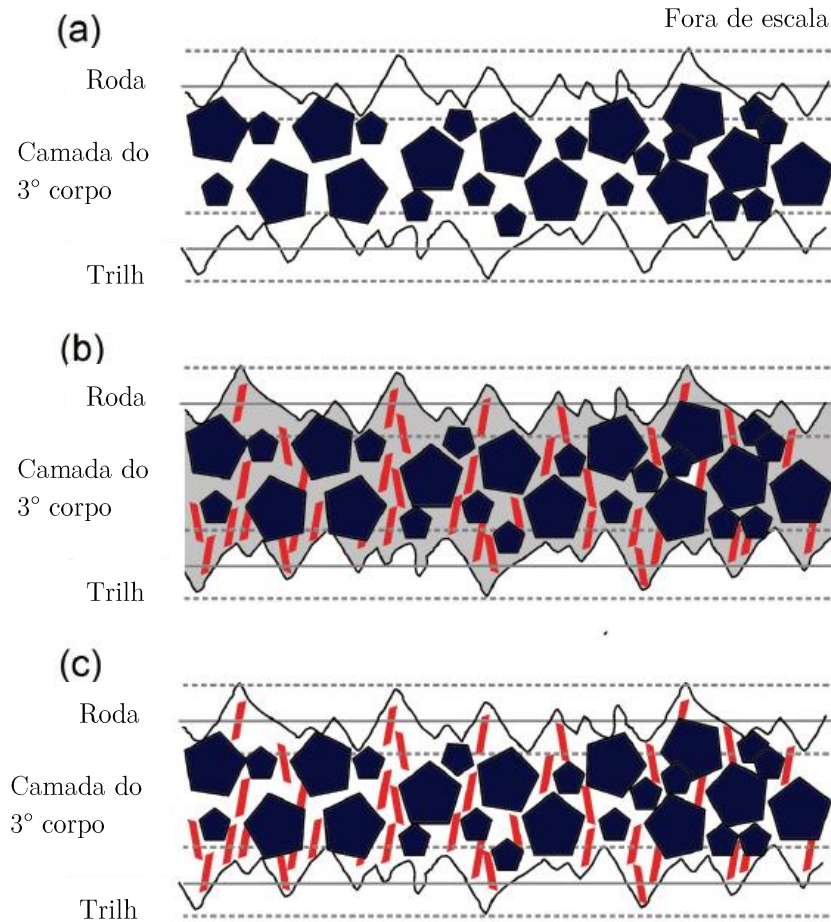
Atualmente operadoras de ferrovia como a VALE, MRS e VLI utilizam os modificadores de atrito a base de água. Ao longo do texto, o termo modificador de atrito será usado para representar aqueles modificadores de atrito à base de água.

2.3.1 Princípio de Funcionamento

A Figura 26 apresenta-se um desenho esquemático da interface roda-trilho em três diferentes condições. Na Figura 26a, a interface do contato roda sobre trilho apresenta o terceiro corpo formado principalmente por partículas de desgaste, óxidos e outros possíveis contaminantes. Após a aplicação do modificador de atrito, o terceiro corpo já presente no contato é então misturado a água e as partículas presentes no modificador de atrito em uma lubrificação limítrofe e/ou mista (Figura 26b). Após a evaporação da água no contato, as partículas sólidas do modificador de atrito interagem com o terceiro corpo controlando o coeficiente de atrito através da acomodação do cisalhamento entre as partículas sólidas do terceiro corpo e entre as superfícies do trilho e da roda em movimento (Figura 26c). No entanto, os mecanismos dessa interação do modificador de atrito e o terceiro ainda não foram explorados em detalhes. Em campo, conforme apresentado ilustrado pela Figura 19, espera-se que o modificador de atrito apresente secagem rápida, que deve ocorrer após uma ou duas voltas da roda.

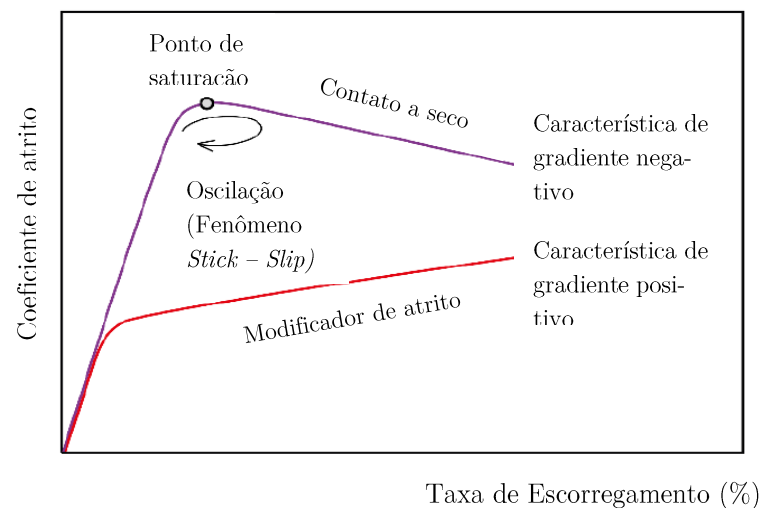
Segundo Cotter (2004), essa nova interface formada no contato promove uma característica chamada de gradiente positivo na curva de coeficiente de atrito em função da taxa de escorregamento (Figura 27). Isso é importante porque as características de gradiente negativo, que comuns a condições a seco, são instáveis e levam a oscilações (fenômeno chamado *stick-slip*) que causam ruído excessivo em campo e defeitos como a corrugação (MAGEL, 2011).

Figura 26 - Mecanismo de funcionamento dos modificadores de atrito. a) interface roda trilho formada por um terceiro corpo sem a presença do modificador de atrito; b) interface roda trilho com a presença do terceiro junto com o modificador de atrito em sua forma líquida e c) interface do contato roda trilho com o novo terceiro corpo formado



Fonte: Adaptado de Khan (2018) e Stock (2016)

Figura 27 – Exemplo da característica de gradiente positivo (modificador de atrito a base de água) e negativo (contato a seco) em uma curva de coeficiente de atrito em função da taxa de escorregamento



Fonte: Galas (2018)

2.3.2 Composição

Do exposto acima, verifica-se que os modificadores de atrito são projetados em função da composição do terceiro corpo. É notável que essa composição pode variar significativamente devido as diferentes condições do sistema aberto em que o contato roda trilho está exposto. Logo, significa que esses modificadores de atrito devem ser benéficos para uma grande gama de condições ambientais e operacionais.

De acordo com as patentes Cotter (2004) e Chiddick (2000), a Tabela 6 lista os possíveis componentes que são contidos nos modificadores de atrito e as suas funcionalidades.

Tabela 6: Lista dos diferentes elementos presentes em um modificador de atrito apresentando as suas funcionalidades, exemplos de produtos, composição química e possíveis quantidades.

Elementos da composição	Exemplos de produtos	Composição Química	Quantidades (% em peso)	Funcionalidade
Base	Água	H ₂ O	40-95	É o meio de transporte que garante a distribuição do produto na interface roda trilho
Ligante	Bentonita; Polímeros;	Al ₂ H ₂ Na ₂ O ₁₃ Si ₄ ; Cadeias C-H	1-10	Responsável por absorver a água e os solventes. Este agente cria uma matriz que é capaz de ligar as partículas sólidas presentes no produto. Ele também tem a função de espessar o líquido para controlar as propriedades reológicas da composição.
Partículas modificadoras de atrito	Talco; Dolomita; Sulfonato de Cálcio; Caolina	Mg ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ ; CaMg(CO ₃) ₂ ; CaSO ₄ ; Al ₂ (OH) ₄ Si ₂ O ₅ ;	0-10	Se presente, normalmente são partículas minerais ou óxidos. São as partículas que devem garantir o nível desejado do coeficiente de atrito e a característica de gradiente positivo (Figura 27).
Lubrificante sólido	Grafite; Bissulfeto de Molibdênio	C; MoS ₂ ;	0-10	Composto responsável por reduzir o coeficiente de atrito entre as superfícies. Pode atuar como aditivos de extrema pressão
Tensioativos	-	-	< 2	Auxilia na redução da tensão superficial dos líquidos. Esse agente garante uma melhor adesão do modificador de atrito na superfície do trilho
Outros Aditivos	-	-	-	Antioxidantes, agentes anti-bacteriais, agentes de retentividade, etc

Fonte: Autoria própria

Baseado nas informações da Tabela 6, é possível verificar que os modificadores de atrito são um produto complexo. Diferentemente como apresentado para graxas, os elementos que o compõem ainda não foram amplamente explorados, uma vez que são produtos que foram recentemente introduzidos no mercado em uma aplicação muito específica que é o contato roda sobre trilho.

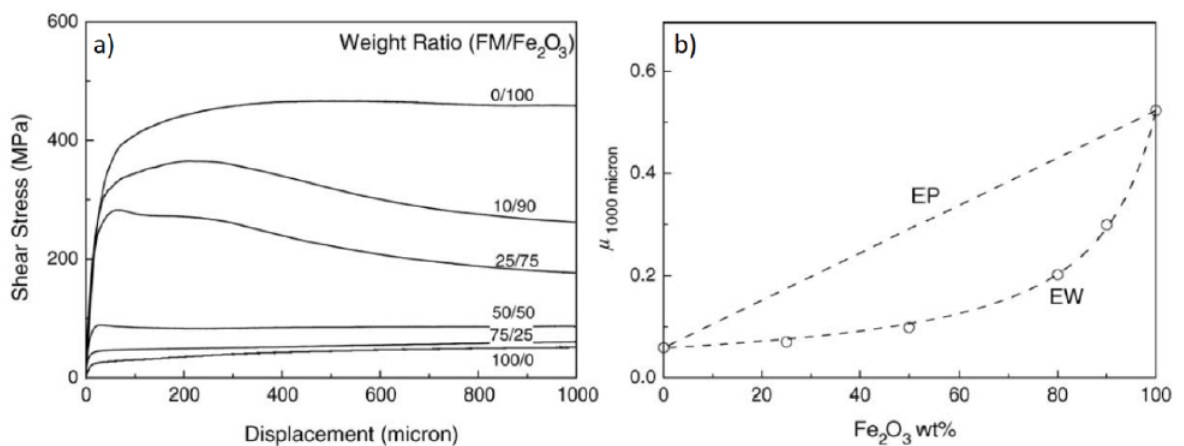
2.3.3 Ensaios Laboratoriais com Modificadores de Atrito

Essa seção descreve a bibliografia específica dos ensaios laboratoriais encontrados para o estudo dos modificadores de atrito em geral, já que alguns estudos realizados são comparativos entre os diferentes tipos de produto (a base de água comparado com a base de óleo). Isso ocorre, pois são poucos os fabricantes existentes quando comparados com graxas por exemplo. A revisão se restringiu aos ensaios de atrito, desgaste, retentividade e FCR com modificadores de atrito. A maioria dos ensaios são conduzidos em testes do tipo pino sobre disco, disco sobre disco e testes em escalas reduzida ou 1:1.

Lu et al (2005) avaliaram a interação do modificador de atrito com a presença de óxido de ferro (Fe_2O_3) em diferentes razões de cada material. Foi utilizado um equipamento pino sobre disco (denominado no trabalho como reômetro com altas pressões de contato) para avaliar a relação da tensão cisalhante em função do deslocamento (deformação cisalhante) da mistura modificador de atrito com Fe_2O_3 (Figura 28). Verifica-se que para a condição com Fe_2O_3 apenas, as tensões necessárias para cisalhar o filme são acima de 400 MPa. Conforme a razão de modificador de atrito presente na mistura aumenta, verifica-se uma diminuição da tensão cisalhante do filme. Os resultados da Figura 28b indicam que o modificador de atrito é capaz de manter o atrito abaixo de 0,2 para um filme com até 80% de Fe_2O_3 . De acordo com este experimento, verificou-se que os resultados obtidos para o coeficiente de atrito correspondem ao modelo de *Equal Wear* (EW). A definição desse modelo é baseada na fração de cada componente do filme em

resistir ao desgaste. O componente com a maior resistência ao desgaste, domina o coeficiente de atrito, ou seja, isso significa que o modificador de atrito possui uma maior resistência ao desgaste e, portanto, tem maior contribuição para o resultado geral do coeficiente de atrito do filme composto. No entanto, o artigo não discute os mecanismos de como o modificador de atrito acomoda esse carregamento e nem a condição física do modificador de atrito durante os ensaios (líquido ou sólido).

Figura 28 – a) Tensão de cisalhamento em função do deslocamento para diferentes composições de modificador de atrito com Fe_2O_3 e b) efeito da concentração de Fe_2O_3 no coeficiente de atrito. As linhas tracejadas representam dois modelos distintos EP (*equal pressure*) e EW (*equal wear*) para previsão do coeficiente de atrito em função de misturas multifásicas

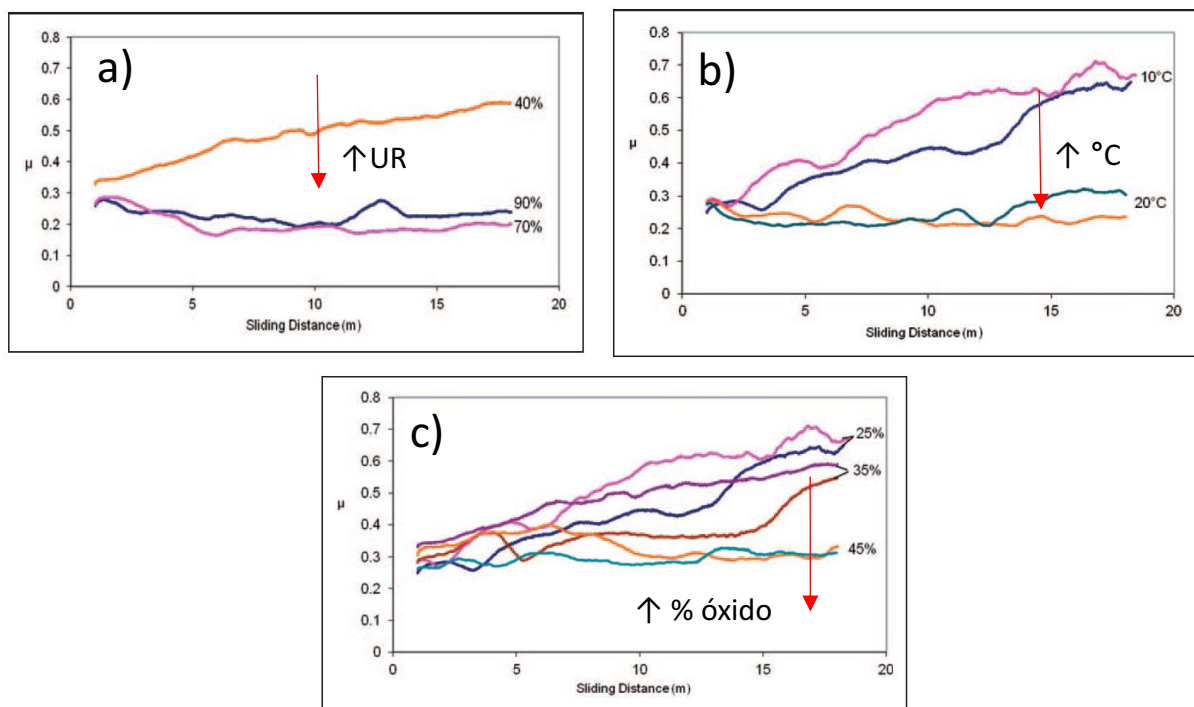


Fonte: Lu et al., (2005)

Lewis et al (2013), também utilizaram ensaios pino sobre disco para avaliar como a umidade relativa (40-90%), a temperatura (10°C e 20°C) e contaminantes encontrados na superfície dos trilhos (magnetita Fe_3O_4 e hematita Fe_2O_3) influenciam no desempenho de modificadores de atrito. As misturas dos contaminantes verificadas foram entre 25-45%. Os resultados mostraram que o desempenho das misturas contendo modificador de atrito e óxidos de ferro são significativamente afetados pela variação da umidade relativa e da temperatura (Figura 29). Foi observado que o coeficiente de atrito diminui com o aumento da umidade relativa (saturação com UR 70%) e temperatura, ou seja, a umidade absoluta. Isso é explicado pela capacidade de evaporação dos modificadores de atrito dependerem da umidade absoluta do ambiente, quanto menor a umidade relativa do

ambiente, mais rápido a evaporação da água e a formação do filme sólido ocorre. Esses experimentos mostraram que os modificadores de atrito misturados com magnetita Fe_3O_4 possuem maior coeficiente de atrito que com hematita Fe_2O_3 . Além disso, os experimentos revelaram que o coeficiente de atrito diminui com o aumento da concentração dos óxidos na mistura (Figura 29c). Segundo os autores, os óxidos possuem a habilidade de reter a água presente no modificador de atrito, diminuindo a sua taxa de evaporação.

Figura 29: Efeito das condições ambientais em função da distância percorrida para a) umidade relativa; b) Temperatura e c) concentração de óxido Fe_2O_3 na mistura com o modificador de atrito na curva do coeficiente de atrito

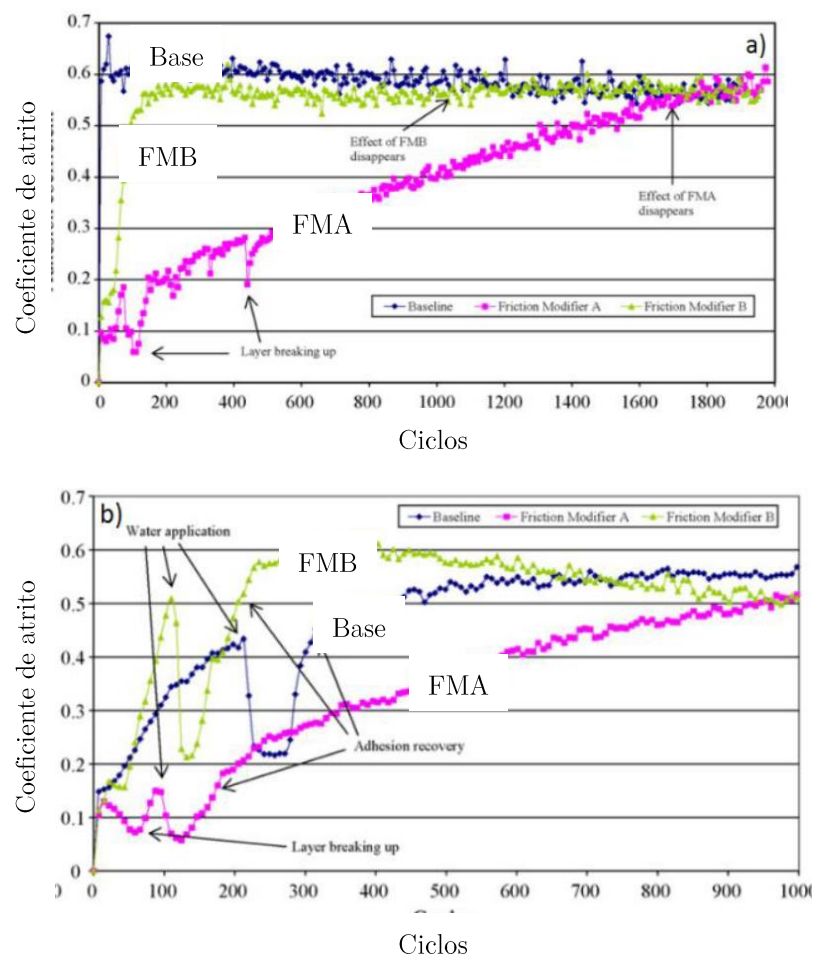


Fonte: Lewis et al., (2013)

Arias-Cuevas et al, 2010 investigaram o desempenho de dois modificadores de atrito a base de água (FMA e FMB) utilizando um equipamento disco sobre disco em condições a seco e a água. Existem algumas diferenças entre esses produtos. O produto FMA contém diferentes componentes sólidos entre eles polímeros que melhoram na aderência do produto na superfície de contato. Já o FMB apresenta grãos de areia e partículas de aço inoxidável em um espessante inorgânico. Verificou-se que o tamanho das

partículas sólidas presentes nos produtos FMA e FMB são 100 e 420 μm , respectivamente. Ambos os produtos apresentaram características de gradiente positivo (ver Figura 27), no entanto, com diferenças no comportamento para cada modificador de atrito (Figura 30a). Enquanto o FMA formou camada durável com coeficiente de atrito intermediário para todas as condições de escorregamento testadas, o FMB apresentou um aumento abrupto do coeficiente de atrito logo após sua aplicação, indicando uma menor retentividade para o produto. No entanto, as características apresentadas pelo FMB foram benéficas quando ensaios com presença de água foram realizados, enquanto as características apresentadas pelo FMA com partículas sólidas menores, reduziu o COF para menos que 0,1 (Figura 30b).

Figura 30: Coeficiente de atrito do modificador de atrito FMA (rosa), FMB (verde) e sem produto (base azul) em função do número de ciclos do teste com 2% de escorregamento a) condições a seco; b) com presença de água.

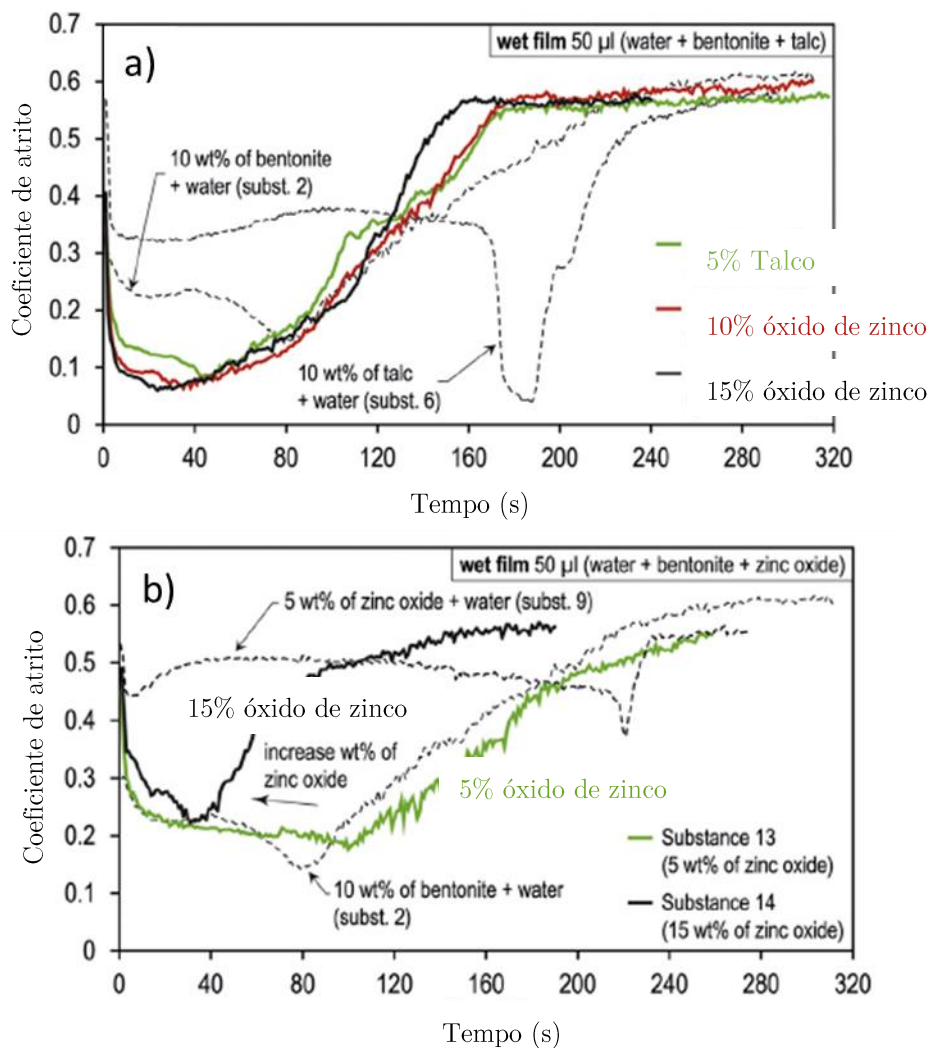


Fonte: Arias-Cuevas et al. (2010)

Esses resultados mostram que o tamanho das partículas sólidas afeta o desempenho dos modificadores de atrito. Produtos com partículas pequenas, forneceram uma maior retentividade e um nível intermediário de coeficiente de atrito, no entanto em contato com a água podem reduzir o coeficiente de atrito a valores abaixo do recomendado (Figura 30), podendo comprometer a aceleração e a frenagem das locomotivas.

Galas et al, 2018 verificaram o impacto dos diferentes componentes que formam o modificador de atrito a base de água em um ensaio esfera sobre plano em condições de rolamento e deslizamento (300mm/s com escorregamento de 5%). As diferentes formulações foram feitas em uma combinação de água, ligante (bentonita), diferentes partículas modificadores de atrito (óxido de zinco e talco) e diferentes lubrificantes sólidos (bissulfeto de molibdênio e grafite). Essas formulações foram testadas tanto na fase líquida quanto após a evaporação da água em termos de atrito, retentividade e desgaste. Verificou-se para todos os testes que a retentividade das formulações é controlada predominantemente pela quantidade de produto aplicado. O coeficiente de atrito de formulações complexas (líquidas) contendo água, ligante e talco, é afetado principalmente pela presença de água e ligante (Figura 31a). Neste caso o coeficiente de atrito é reduzido a valores mínimos imediatamente após a aplicação do produto no contato, porém com o passar do tempo, o coeficiente de atrito atinge o mesmo nível que a formulação contendo apenas água e ligante.

Figura 31: Diferença no comportamento do atrito para diferentes formulações a) contendo talco; b) óxido de zinco



Fonte: Galas et al., (2018)

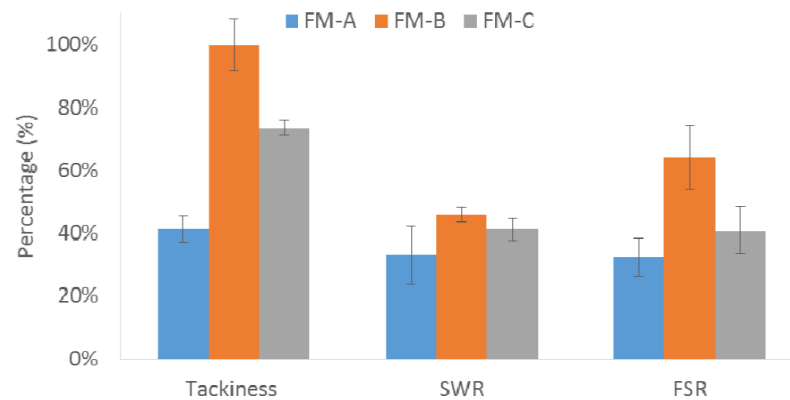
Um comportamento diferente foi encontrado para as formulações contendo óxido de zinco como partículas modificadoras de atrito. Neste caso, o óxido de zinco possibilitou o aumento da retentividade sem a queda a níveis tão baixos do coeficiente de atrito. Verificou-se que quanto maior a razão de óxido de zinco na formulação menor a retentividade. Os autores creditam essa diferença de comportamento entre as formulações à diferença da dureza das partículas modificadoras de atrito. Óxido de zinco é cinco vezes mais duro que o talco e, portanto, age como partículas abrasivas.

Em relação a uma formulação completa com a presença de lubrificantes sólidos, os resultados para o filme sem a presença de água indicaram que bissulfeto de molibdênio

é mais indicado que grafite, justificando que o grafite apresenta menores valores de coeficiente de atrito que MoS₂. Quanto ao ensaio de desgaste, verificou-se que formulações contendo talco apresentaram mais que o dobro da taxa de desgaste que formulações contendo óxido de zinco, mesmo que essas formulações apresentaram maior coeficiente de atrito.

Harmon e Lewis (2020) estudaram quatro variações do mesmo modificador de atrito para verificar o desempenho em relação à quantidade de produto que é coletada pela roda ao passar pelo trilho após a aplicação do produto. Eles avaliaram os produtos através de três ensaios distintos: ensaio de *tackiness* (similar ao que será apresentado para graxas no capítulo 4), ensaio de contato roda sobre trilho em escala reduzida (SWG) e em escala 1:1 (FSTF). A hierarquia entre a quantidade dos produtos coletados nos 3 ensaios se manteve para todos os ensaios (Figura 32), indicando que o simples ensaio de *tackiness* serve para hierarquizar o processo de coleta de modificador de atrito pela roda (*pick up*). No entanto, é relevante mencionar que todos os três ensaios em realizados em velocidades de até duas ordens de grandeza inferior ao observado em campo. Visto que o escoamento de fluidos está diretamente associado a velocidade imposta aos mesmos, tais resultados podem não ser representativos. Além disso, os autores não discutiram as diferenças apresentadas para cada variação do produto. De qualquer maneira, a possibilidade de correlacionar o desempenho dos produtos com testes mais simples é de grande valia.

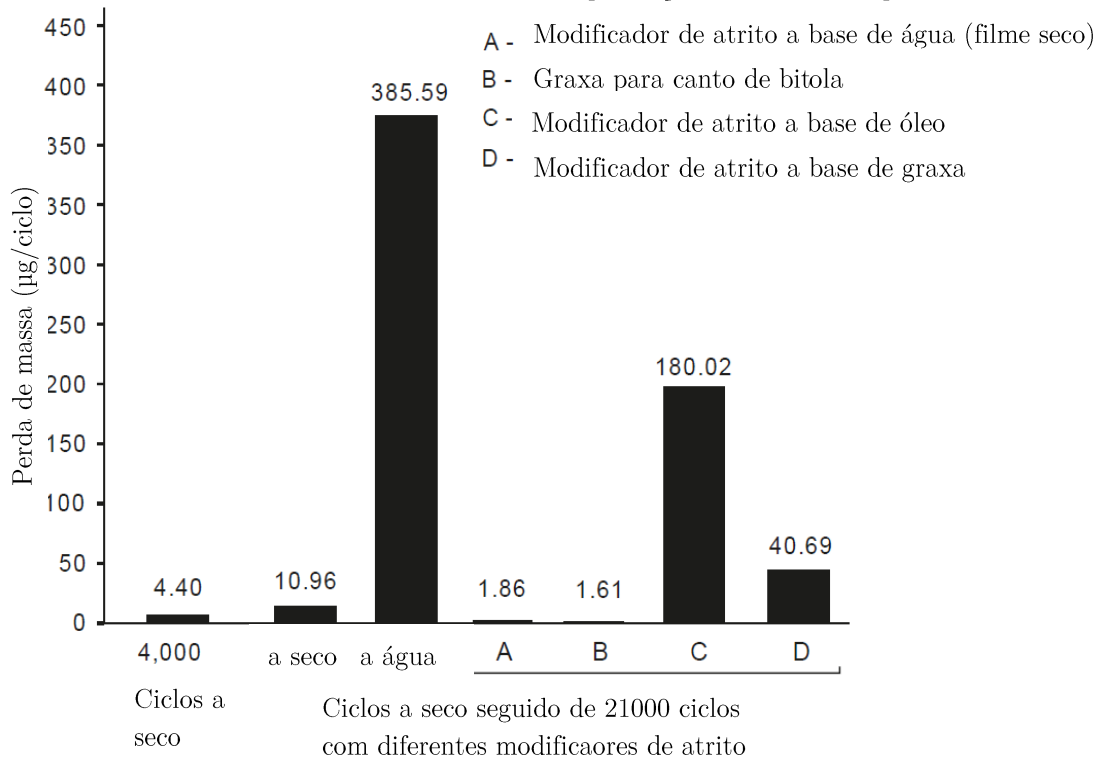
Figura 32: Hierarquia entre os resultados obtidos para os três ensaios realizados



Fonte: Harmon e Lewis (2020)

Hardwick e Lewis (2014), verificaram que apenas modificadores de atrito a base de água (A) minimizaram a geração de trincas e desgaste e suprimiram a propagação de trincas. Eles testaram o desempenho de diferentes tipos de modificadores de atrito em um ensaio disco sobre disco quanto o potencial dos mesmos em propagar trincas quando em aplicados em superfícies com fissuras. Os discos giraram 5000 ciclos a seco, para geração de trincas superficiais, antes de aplicar o produto no contato há uma taxa constante de uma gota por segundo por mais 21000 ciclos (propagação de trinca). Diferentemente de modificadores de atrito que possuem a capacidade de evaporar, os modificadores a base de óleo (C) e a base de graxa (D) apresentaram maior desgaste por propagação de trincas conforme apresentado na Figura 33. Verifica-se também que o modificador de atrito a base de água (A) apresentou menor desgaste do que as amostras em contato a seco. Os autores reivindicaram que modificadores de atrito sem a capacidade de evaporar no contato podem causar deterioração dos trilhos com trincas na superfície.

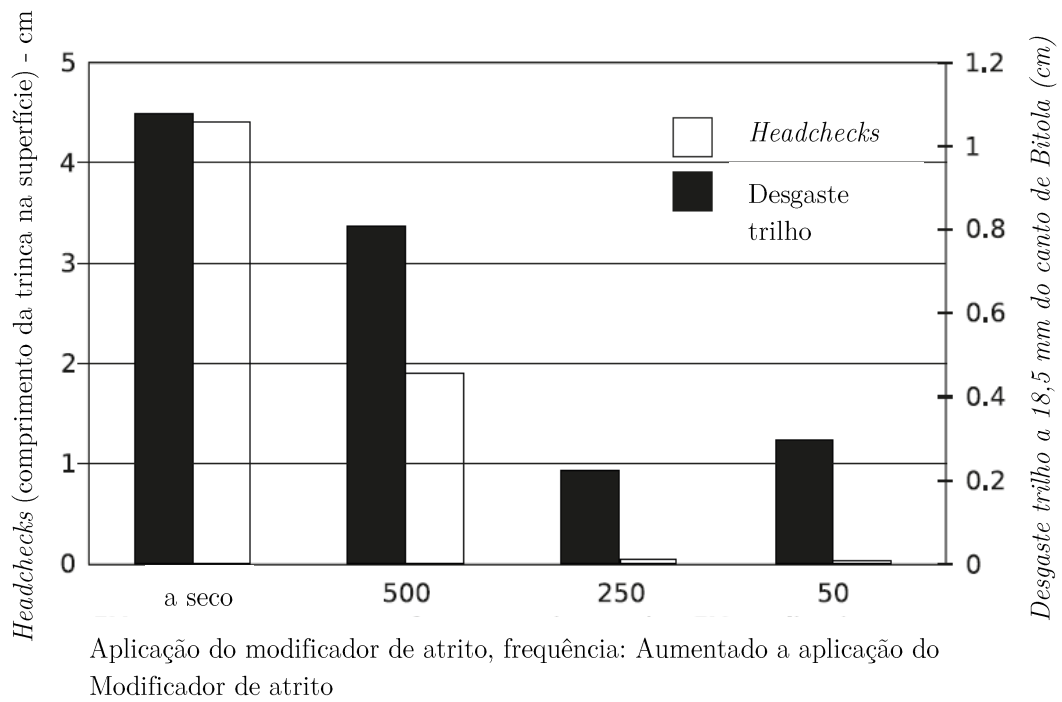
Figura 33: Perda de massa por propagação de trincas para diferentes modificadores de atrito aplicados em um contato disco sobre disco com presença de trincas na superfície



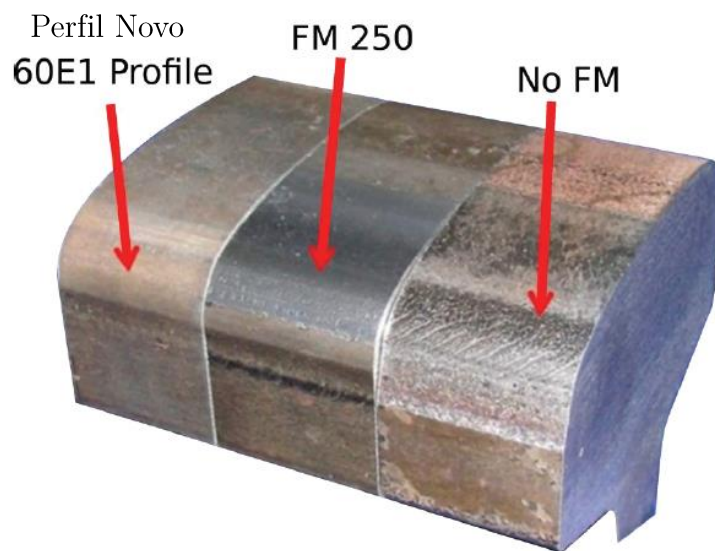
Fonte Hardwick e Lewis (2014)

Eadie et al. (2008) avaliaram o efeito de filmes finos de modificador de atrito a base de água quanto a desgaste e a nucleação de trincas por FCR em um equipamento em escala 1:1. Neste teste, variou-se a frequência de aplicação do produto e os autores observaram que os melhores resultados foram para uma taxa de aplicação a cada 250 passagens de roda. A redução de desgaste e de nucleação de trincas (*headchecks*) para diferentes taxas de aplicação após 100.000 ciclos estão apresentadas na Figura 34a. A Figura 34b apresenta a comparação da superfície de um trilho novo com os trilhos após o ensaio para a condição 250 e a seco.

Figura 34 – a) Desgaste e formação de trincas em trilhos para diferentes taxas de aplicação de modificadores de atrito a base de água b) comparação entre a condição superficial de um trilho novo e após 100.000 ciclos de ensaio



(a)



(b)

Fonte Eadie et al. (2008)

2.4 TESTES DE CAMPO

Conforme citado no capítulo 1, a realização de ensaios de campo para lubrificantes ferroviários apresenta uma série de dificuldades. Isto justifica a literatura escassa sobre avaliação de lubrificantes e modificadores de atrito em campo. Um compilado das principais referências encontradas é apresentado na sequência.

2.4.1 Medições em Testes de Campo

Para a medição do atrito o equipamento mais comumente utilizado é o tribômetro manual, que está representado na Figura 35. O princípio de funcionamento do equipamento consiste em uma roda que pode ser posicionada na face de bitola, canto de bitola e topo do boleto, e que está acoplada a um sensor de torque. A legitimidade dos tribômetro manuais foi sintetizada por Areiza (2015) e não será abordada pois está fora do escopo deste trabalho.

Figura 35 - Tribômetro manual em utilização ferroviária



Fonte: VALE S.A (2018)

A medição de atrito permite também avaliar a retentividade da graxa a partir de um lubrificador. Essa medição consiste em avaliar o coeficiente de atrito para cada

curva a partir do lubrificador, e verificar até que distância o atrito permanece dentro dos valores pré-estabelecidos (Figura 13).

Geralmente quando se mede a retentividade, se mede também o carregamento da graxa, ou seja, o quão longe a graxa pode ser notada a partir do lubrificador. Há basicamente duas maneiras bem simples de identificar o carregamento, através de inspeção visual ou manual (Figura 36).

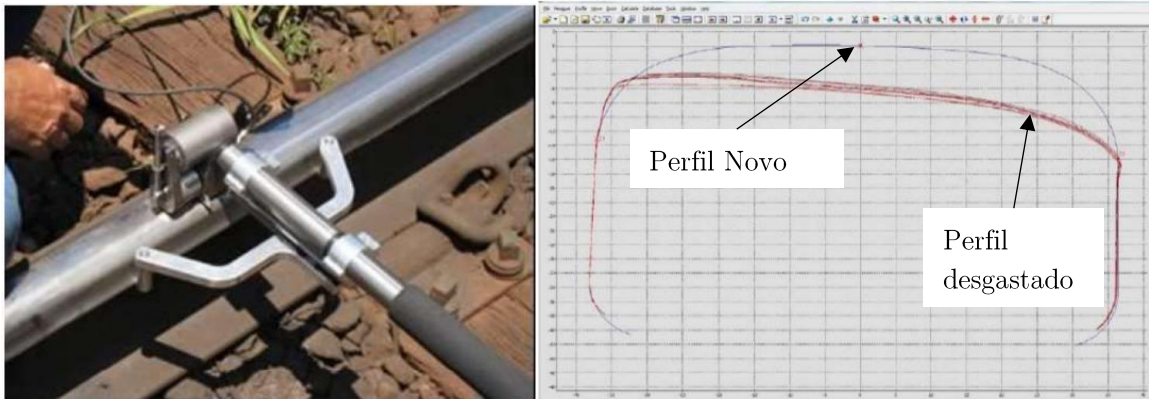
Figura 36 – Medição de carregamento da graxa através da identificação manual da graxa ao longo da ferrovia



Fonte: Adaptado de Uddin et al., (2014)

A medição do coeficiente de atrito e do carregamento podem ser verificadas assim que um novo lubrificante é colocado no sistema, já a quantificação de desgaste demanda meses de uso de um determinado produto até que se torna quantificável com acurácia. A medição é realizada principalmente pelo *miniproof* (Figura 37a) que faz medição do perfil do trilho (Figura 37b) e o compara com um perfil padrão para o trilho da ferrovia.

Figura 37 (a) *Miniproof* em utilização em campo (b) Exemplo de medição do perfil realizado por *mini-proof*



Fonte: VALE S.A (2018)

2.4.2 Retentividade - Testes de Campo

Uddin et al (2014) avaliaram cinco graxas em campo com relação ao desempenho em atrito e retentividade (Tabela 8). As propriedades das graxas utilizadas são apresentadas na Tabela 7. Apesar de ganhos em retentividade superiores a 2 vezes (comparação entre graxas A e D), não houve nenhuma tentativa por parte do autor de correlacionar formulação e propriedades do lubrificante com os resultados obtidos.

Uddin et al. (2010) mostrou que além das graxas, fatores operacionais influenciam significativamente no desempenho em retentividade. Nos testes foram utilizadas duas barras distribuidoras distintas, sendo uma mais longa e com mais pontos de saída para a graxa que a outra, e manteve-se o mesmo ajuste do lubrificador para bombear o mesmo volume de graxa. Ou seja, o que mudou foi a forma (espessura) do bulbo na saída da barra lubrificador. Bulbos com maior espessura tiveram menor retentividade (Figura 38), devido a serem ejetados mais facilmente pela roda, conforme mostrado por Ferrer, 2020.

Tabela 7 – Propriedades das graxas utilizadas em teste de campo

Propriedades	Graxa A	Graxa B	Graxa C	Graxa D	Graxa E
NLGI	1-2	2	2	1	2
Aditivos sólidos	Grafite	-	-	Grafite	-
Espessante	Lítio	Lítio	Lítio	Microgel	Lítio
Ponto de gota (°C)	190	-	385	260+	-
Viscosidade do óleo a 40°C (cSt)	150	-	220	22	-
Temperatura de operação	-10 a 150	-	28 a 176	-35 a 80	-
Aditivos de extrema pressão	Sólido	MoS ₂ + FM	3% MoS ₂ + EP	Grafite	3% MoS ₂ + EP

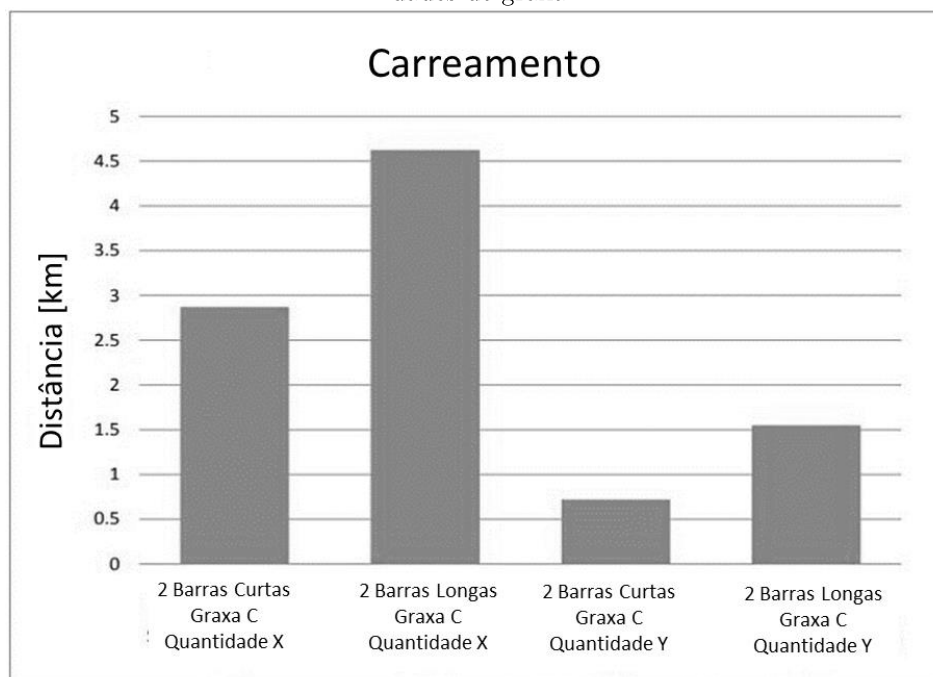
Fonte: Uddin et al., (2014)

Tabela 8 - Resultados de atrito e retentividade de graxas para testes de campo

Graxa	COF da 1ª curva medida [-]	Retentividade [km]
Graxa A	0,18	0,330
Graxa B	0,17	2,960
Graxa C	0,20	4,623
Graxa D	0,22	2,650
Graxa E	0,20	1,280

Fonte: Adaptado de Uddin et al., (2014)

Figura 38 - Gráfico com desempenho em retentividade de diferentes lubrificadores e diferentes quantidades de graxa

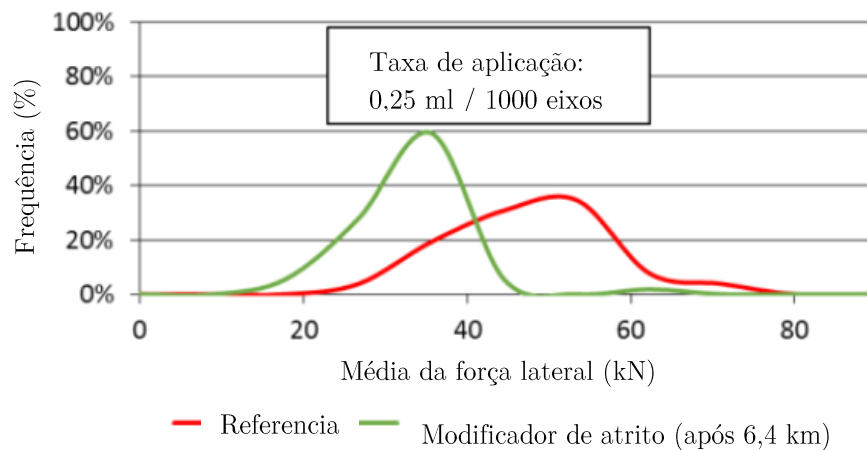


Fonte: Uddin et al., (2010)

Já para aferir a eficácia / retentividade dos modificadores de atrito, não é possível a utilização do tribômetro manual, uma vez que o filme sólido fica aderido a roda

após a evaporação do produto no contato. A verificação do desempenho é habitualmente medida em função da razão das medições das forças laterais e verticais (chamado L/V) em uma curva antes e após a aplicação do modificador de atrito. Para essa medição instalam-se temporariamente *strain gauges* nos trilhos para medir o deslocamento do trilho causado pela passagem das rodas em contato. Assume-se que em curvas fechadas, as forças laterais resultantes do contato roda sobre o trilho estejam diretamente relacionadas com as mudanças das condições do coeficiente de atrito (STOCK, 2016). A Figura 39 apresenta a distribuição dessas forças laterais em uma curva a 6,4 km de distância do lubrificador antes da aplicação do modificador de atrito (linha vermelha) e após a sua aplicação (linha verde).

Figura 39: Comparação da distribuição das forças laterais entre o contato a seco (vermelho) e com a presença do modificador de atrito (verde)



Fonte: Stock et al., (2016)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

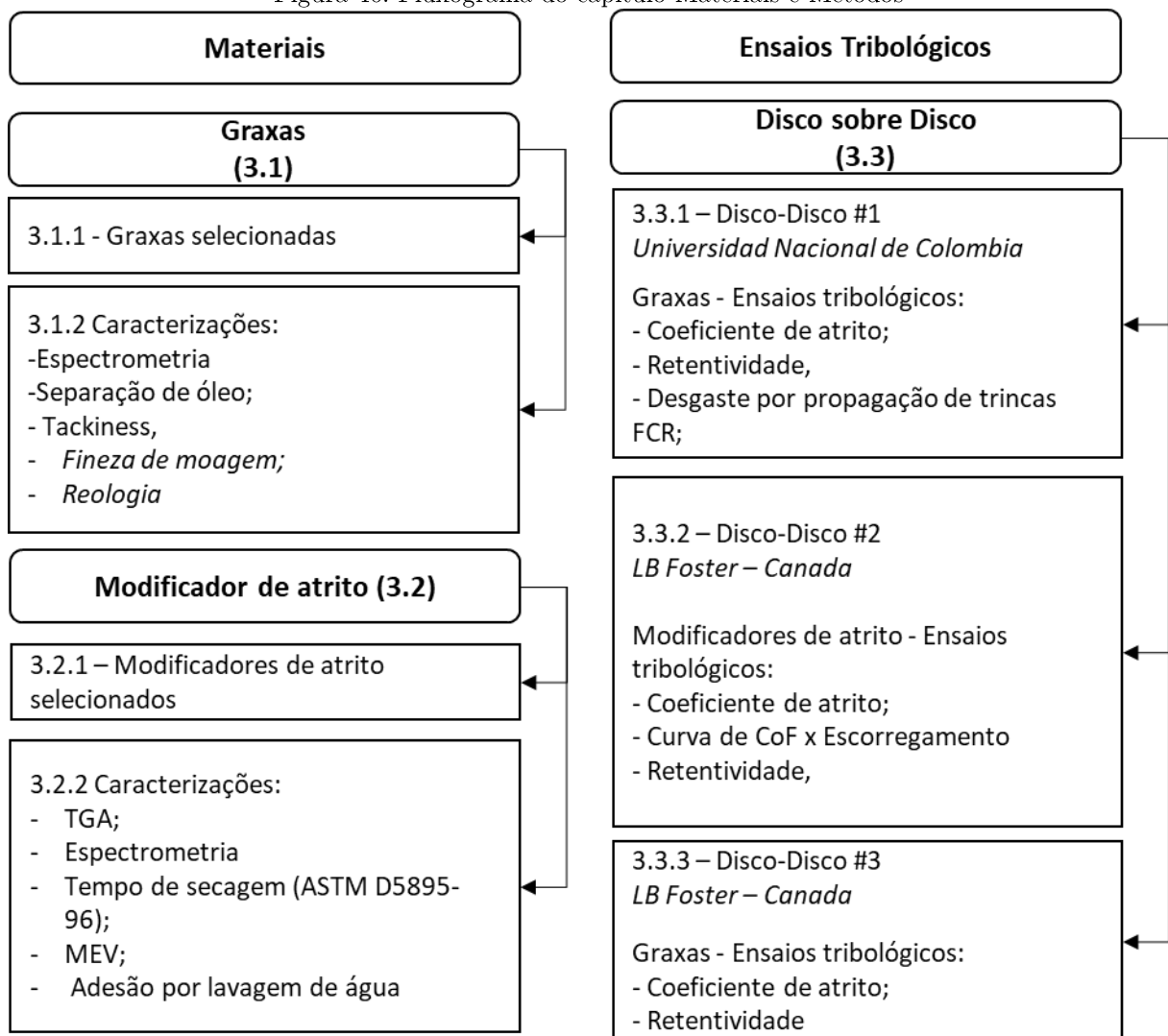
Oito graxas lubrificantes e dois modificadores de atrito utilizados na interface roda-trilho, bem como corpos de prova extraídos de segmentos de trilhos e rodas, foram submetidos a caracterizações diversas que possam estar associadas com seu desempenho em campo. Tais caracterizações visam aumentar o conhecimento associado ao efeito que a formulação das graxas e modificadores de atrito tem sobre suas propriedades, e como estas se relacionam com os ensaios tribológicos, que são ensaios de desempenho que visam simular os fenômenos observados na interface roda-trilho em campo. O desempenho em termos de atrito, desgaste por FCR e retentividade foi avaliado em ensaios de rolamento com escorregamento realizados em tribômetro disco sobre disco. Neste sentido, este capítulo apresenta em detalhes as graxas e modificadores de atrito utilizados, as técnicas de caracterizações aplicadas e a metodologia utilizada nos ensaios disco sobre disco, conforme apresentados no fluxograma da Figura 40.

Como é possível verificar, foram realizados ensaios disco sobre disco em três equipamentos diferentes e em dois laboratórios distintos. É importante destacar que parte deste trabalho foi realizado durante o estágio do autor na empresa LB Foster em Burnaby no Canadá (item 3.3.2 e item 3.3.3 da Figura 40) e outra parte foi realizado em parceria com a *Universidad Nacional de Colombia - Medellin* (item 3.3.1 da Figura 40). Maiores detalhes sobre as atividades desenvolvidas em cada um destes laboratórios serão apresentados ao longo do capítulo. Segue abaixo o objetivo de cada uma das atividades apresentadas na Figura 40.

- Graxas (3.1): Apresentar as graxas formuladas (6) e selecionadas (2) para este trabalho, enfatizando que tais formulações apresentam objetivo específico de permitir a avaliação sistêmica do efeito da viscosidade do óleo base e do tipo de espessante nas propriedades e desempenho de graxas lubrificantes, bem como o efeito do pacote de aditivos e do tipo de óleo base de modo qualitativo. Para todas estas

graxas a formulação e as propriedades fornecidas pelo fabricante serão apresentadas conjuntamente com caracterizações adicionais que visam auxiliar na compreensão do seu desempenho em campo. Os resultados das caracterizações serão apresentados junto com a descrição das correspondentes técnicas para facilitar a leitura. Estes dados, sempre que possível, serão comparados com os resultados tribológicos expostos no capítulo 5.

Figura 40: Fluxograma do capítulo Materiais e Métodos



Fonte: Autoria Própria

- Modificadores de atrito (3.2): Apresentar os dois modificadores de atrito a base de água selecionados juntamente com as especificações técnicas apresentadas pelo fabricante. Enfatizar que os dados fornecidos pelos fabricantes são poucos e não permitem qualificar, nem mesmo de forma subjetiva, os produtos. Passa-se então para a descrição de algumas técnicas de caracterização associadas tanto a compreensão da formulação dos modificadores de atrito, quanto ao seu mecanismo de funcionamento. De modo análogo a seção 3.1, os resultados obtidos serão mostrados e discutidos em conjunto com as técnicas de caracterização para facilitar a leitura. Estes dados, sempre que possível, serão comparados com os resultados tribológicos expostos no capítulo 4.
- Ensaio Disco sobre Disco (3.3): Os ensaios tribológicos, realizados em três equipamentos disco sobre disco de duas instituições, visam a obtenção do desempenho das graxas e modificadores de atrito em relação a métricas relevantes de campo, tais como atrito, desgaste por FCR e retentividade. Estes equipamentos e seus respectivos procedimentos de ensaio para obtenção dos resultados de atrito, desgaste e retentividade serão apresentados separadamente, visto que cada um tem suas características próprias. Diferentemente das seções 3.1 e 3.2, os resultados destes ensaios serão apresentados só no capítulo 4, visto que são o objeto principal deste trabalho e demandam discussão mais extensa e detalhada.

3.1 GRAXAS

3.1.1 Graxas Selecionadas

Graxas são produtos complexos formados por espessante, óleo base e aditivos. Até hoje não há uma definição clara de como seus constituintes impactam seu desempenho. Parte deste desconhecimento está associado ao processo de fabricação das graxas,

que é tão relevante quanto sua formulação na definição de suas propriedades e desempenho. Conforme destacado por Delgado et al., (2005), graxas de mesma formulação podem ser fabricadas visando propriedades como separação de óleo, estabilidade mecânica e consistência significativamente diferentes, as quais por sua vez podem impactar o desempenho da graxa em serviço. A fim de evitar variações decorrentes do desconhecimento da formulação e do processo de fabricação das graxas, e visando avaliar sistematicamente o efeito isolado da viscosidade do óleo base e do tipo de espessante no desempenho de graxas para lubrificação de canto de bitola, seis graxas lubrificantes foram formuladas utilizando valores de viscosidade e tipos de espessante usuais para graxas de canto de bitola. Além disso, utilizou-se o mesmo pacote de aditivos de extrema pressão para todas as graxas de formulação própria, o qual é considerado estado da arte. Segundo Ferrer (2020), há mais de 30 tipos de graxas comerciais recomendadas para a aplicação em canto de bitola cujas formulações e propriedades diferem significativamente, com variações da viscosidade a 40°C de até uma ordem de grandeza (de 50 cSt a 500 cSt) e com os mais variados tipos de espessante, sendo os mais comuns de lítio, cálcio e lítio com cálcio. Em decorrência, utilizou-se espessantes de lítio e cálcio e óleo mineral com viscosidades de 50cSt, 200cSt e 500cSt na formulação das seis graxas objeto de estudo. Além disso, duas graxas comerciais, sendo uma delas atualmente utilizada pela maioria das concessionárias de vias férreas do Brasil, também foram incorporadas no estudo. Estas graxas permitirão, de modo qualitativo, avaliar também o efeito do pacote de aditivos e da natureza do óleo lubrificante (mineral versus sintético) no desempenho das graxas. Ainda, permitirão verificar se as tendências observadas para as graxas processadas da mesma maneira e com o mesmo pacote de aditivos poderão ser extrapoladas às graxas comerciais. As principais propriedades dessas graxas lubrificantes são apresentadas na Tabela 9.

Todas as de formulação própria (form. UTFPR) apresentam consistência NLGI 2, visto que é a consistência mais adequada para graxas que operam em um clima tropical segundo a experiência dos operadores ferroviários. Com isso, é importante informar que

para atingir a consistência requerida é necessário balancear o efeito do aumento da viscosidade das graxas com a redução percentual do espessante. Logo, as graxas mais viscosas apresentam menor percentual de espessante, e quando avaliarmos o impacto da viscosidade nos ensaios tribológicos, é necessário ter em mente que existe um efeito combinado de viscosidade e percentual de espessante.

É importante destacar que atualmente a graxa comercial amplamente utilizada nas ferrovias brasileiras é de formulação internacional, ou seja, mesmo que essa graxa seja fabricada aqui no Brasil, ela segue o protocolo da matriz. Isso dificulta conhecer mais profundamente sua formulação. Já as graxas formuladas especialmente para este trabalho, elas foram fabricadas em parceria com uma empresa nacional, onde o desenvolvimento de um fornecedor local é facilitado e permite uma melhoria contínua do produto além de obter-se com menor custo.

Tabela 9 – Formulação e propriedades das graxas avaliadas

Características de formulação	Graxa LiM50	Graxa LiM200	Graxa LiM500	Graxa CaM50	Graxa CaM200	Graxa CaM500	Graxa LiCaM220	Graxa LiMS460
Classe	UTFPR	UTFPR	UTFPR	UTFPR	UTFPR	UTFPR	Comercial	Comercial
Tipo do óleo base	Mineral	Mineral	Mineral	Mineral	Mineral	Mineral	Mineral	Mineral + Sintético
Viscosidade cinemática do óleo base à 40°C (mm ² /s)	50	200	500	50	200	500	220	460
Viscosidade cinemática do óleo base à 100°C (mm ² /s)	4.1	15.5	32.6	4.1	15.5	32.6	19	36
Tipo de espessante	Sabão de Lítio	Sabão de Lítio	Sabão de Lítio	Sabão de Cálcio	Sabão de Cálcio	Sabão de Cálcio	Lítio + Cálcio	Lítio
Concentração (%m/m) de espessante ²	7	8,5	10	7	8,5	10	-	-
Concentração (%m/m) e tipo de aditivos sólidos	4% (<i>MoS</i> ₂ + Grafite)	4% (<i>MoS</i> ₂ + Grafite)	4% (<i>MoS</i> ₂ + Grafite)	4% (<i>MoS</i> ₂ + Grafite)	4% (<i>MoS</i> ₂ + Grafite)	4% (<i>MoS</i> ₂ + Grafite)	5% <i>MoS</i> ₂	4% (<i>MoS</i> ₂ + Grafite)
Propriedades								
Consistência (ASTM D-217)	2	2	2	2	2	2	2	2
Carga 4-ball, kg (ASTM D-2783)							315	800
Temperatura de operação, °C							-25 / +120	-10 / +150
Ponto de gota, °C (ASTM D-2783)							175	180
Separação estática de óleo, % (Ensaio UTFPR) ³	4,6	3,4	4,2	5,0	4,9	-	6,6	4,0
Resistência a jato de água, % (D-1264)							-	5

² Valores aproximados³ Valores medidos na UTFPR conforme apresentado pelo subcapítulo 3.1.4.

3.1.2 Caracterização das Graxas

A maioria das propriedades e ensaios normalizados presentes nas especificações técnicas de graxas lubrificantes são associadas a lubrificação de rolamentos, a qual difere significativamente da lubrificação de canto de bitola, que representam um mercado muito menor, cuja utilização sistemática ocorreu apenas a partir de 1970 (WAARA, 2001). Em estudo recente Ferrer (2020) mostrou que tais propriedades, como carga de soldagem por 4 esferas, ponto de gota e temperatura máxima de operação, não apresentam correlação com o desempenho tribológico de graxas. Isso indica que, para a aplicação ferroviária, analisar isoladamente apenas as propriedades obtidas por ensaios normalizados contidos nas especificações técnicas das graxas não permite qualificar a graxa em relação ao seu desempenho em campo e, portanto, ensaios adicionais devem ser realizados. Tais ensaios buscam de forma exploratória representar algumas situações de campo conforme serão apresentados nas seções seguintes com a devida justificativa da realização dos mesmos.

3.1.3 Edx

Espectroscopia de raios X por dispersão em energia permite avaliar o percentual dos elementos químicos com número atômico situados entre sódio e urânio, sendo que os elementos próximos ao sódio são mais difíceis de detectar. Tal limitação impede a detecção de elementos mais leves como, por exemplo, hidrogênio, lítio e carbono, os quais estão presentes nas graxas em estudo, tanto no espessante, como nos aditivos sólidos (grafite). Dessa forma, os valores apresentados a seguir são referentes ao percentual elementar medido levando em conta apenas os elementos detectáveis que estão de acordo com o número atômico situados entre o elemento sódio (Na) e o elemento urânio (U), e por tanto, não é possível comparar diretamente a formulação das graxas. Porém, é possível identificar os principais elementos químicos presentes nas graxas, e associar estes com o

pacote de aditivos utilizado, e posteriormente com o desempenho em campo. A maior motivação em identificar esses elementos é que em um estudo realizado por Meheux et al. (2010), verificaram que a presença de aditivos em óleos lubrificantes causaram uma redução da vida em fadiga em um ensaio de propagação de trincas por FCR. Os autores atribuíram essa redução a formação de tribofilmes compostos principalmente por Enxofre, Fósforo e Cálcio na ponta da trinca o qual impediu das trincas se fecharem.

A Tabela 10 apresenta a análise de EDX dos elementos químicos para as duas graxas comerciais. Apenas estas graxas foram caracterizadas por EDX, visto que as graxas de formulação própria não ficaram prontas a tempo de fazer esta análise. Isto não é problema, visto que o pacote de aditivos das graxas com formulação própria é idêntico ao pacote de aditivos da graxa LiMS460. A discussão sobre os principais elementos encontrados em cada uma das graxas será embasada em (LUGT, 2012), que apresenta as possíveis fontes e funções de cada elemento químico das graxas lubrificantes.

Tabela 10 – Elementos encontrados através de EDX nas graxas comerciais

Graxa	Mo	Ca	Fe	Zn	Si	Mn	Cr	Cu	S	Bi	Nb
LiMS460	30,3	4,1	1,8	8,7	15,3	-	-	-	39,5	-	0,3
LiCaM220	40,1	13,2	0,4	0,3	-	-	-	-	46,0	-	-

Fonte: Vale S.A. (2018)

A graxa LiCaM220, atualmente usada nas vias férreas nacionais, apresentou principalmente enxofre e molibdênio, além de cálcio e pequenas quantidades de ferro e zinco. A presença de MoS₂ e cálcio estão de acordo com as indicações da ficha técnica do produto, que indica a utilização de cálcio como espessante e MoS₂ como aditivo sólido. Além disso, o cálcio também pode ser proveniente de detergentes, visto que quase todas as graxas possuem detergente de cálcio em formulação, o qual tem a função de manter as superfícies limpas e ajudar na neutralização de ácidos. O Zinco é habitualmente diluído no óleo base e atua como um aditivo anti-desgaste e de extrema pressão, ou como um inibidor de corrosão e anti-oxidante (LUGT, 2012).

A graxa LiMS460 apresenta molibdênio e enxofre, que está de acordo com a ficha técnica do produto, que menciona a utilização de MoS₂. Também foram observados Cálcio, Zinco, Silício, Bismuto e Nióbio. O Cálcio, o Zinco e o Bismuto são habitualmente utilizados como aditivo anti-desgaste e extrema pressão, porém o cálcio também pode ser um aditivo detergente, como descrito acima. O silício está provavelmente associado ao óleo sintético que foi utilizado nesta graxa e não ao seu pacote de aditivos. Óleos sintéticos a base de silício, denominados silicones, apresentam melhor molhabilidade, estabilidade térmica e resistência a oxidação, além de serem resistentes a água do que os óleos minerais. Em contrapartida, as propriedades lubrificantes e anti-desgaste são piores que as dos óleos minerais (LUGT, 2012).

Em resumo, verifica-se que o pacote de aditivos de todas as graxas é similar, sendo constituído predominantemente de MoS₂ e outros aditivos formulados com cálcio e zinco, provavelmente atuando como aditivos de extrema pressão e anti-desgaste. A graxa LiMS460 também apresenta, em pequenas quantidades, nióbio e bismuto em sua formulação. As principais diferenças observadas estão associadas a natureza do óleo base da graxa LiMS460. O óleo sintético utilizado, teoricamente não traz benefícios para as condições de operação decorrentes do contato entre roda e trilho.

3.1.4 Separação de Óleo

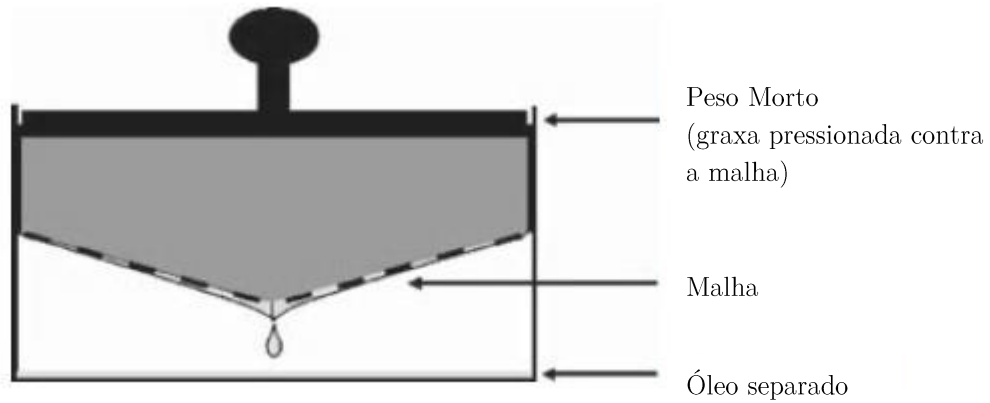
Todas as graxas lubrificantes apresentam em maior ou menor nível separação do óleo lubrificante de sua matriz (espessante). A separação do óleo é dependente da formulação da graxa e das condições externas, como temperatura, vibração e carregamento. Em repouso as graxas devem apresentar baixa liberação de óleo evitando assim sua degradação durante o armazenamento. Já em funcionamento, ao ser solicitada termomecanicamente, o óleo deve ser liberado com os seus aditivos para que o mesmo lubrifique a

região de contato. Logo, a separação de óleo é relevante sob dois aspectos para lubrificação de canto de bitola: i) durante seu armazenamento nos lubrificadores, os quais estão expostos a gradientes de temperatura significativo e vibrações decorrentes da passagem dos trens. Tais situações aceleram a separação de óleo e podem comprometer o bombeamento da graxa para as barras de distribuição. De fato, é comum verificar a separação de óleo dentro dos tanques lubrificadores. Eventualmente essa separação de fase dentro do tanque poderá fazer com que a bomba envie para as barras distribuidoras uma graxa com baixa razão de óleo base e espessante, impactando diretamente na performance da coleta e eventualmente da retentividade da graxa; ii) Na interface roda-trilho, é que a separação de óleo é um importante mecanismo de lubrificação em graxas, e dependendo da taxa de separação do óleo da matriz do espessante, diferentes desempenhos decorrentes da lubrificação escassa (*starvation*) e retentividade poderão ser observados (HUANG et al., 2016).

Sob os aspectos citados acima existem principalmente dois princípios de se mensurar a perda de óleo em graxas, um é a perda estática de óleo via aplicação de uma pressão sobre a graxa contra uma malha (simulando a graxa nos tanques dos lubrificadores), e o outro é a separação dinâmica que envolve submeter as graxas a força centrífuga, e simula a graxa na interface roda-trilho.

Neste trabalho, a separação de óleo das graxas apresentadas na Tabela 9 foi realizada apenas pelo método estático na UTFPR. Para tal, foi utilizado um equipamento normalizado (ASTM D1742) que consiste de um copo separador em aço inoxidável com uma peneira reta de malha nominal 240 (75 μ m) conforme apresentado na Figura 41. A extração do óleo é realizada inserindo aproximadamente 25ml de graxa no reservatório com a malha sob a pressão de um peso morto de 262g (\approx 1 kPa) por 24h à 60°C.

Figura 41 – Desenho esquemático do método de separação de óleo estático

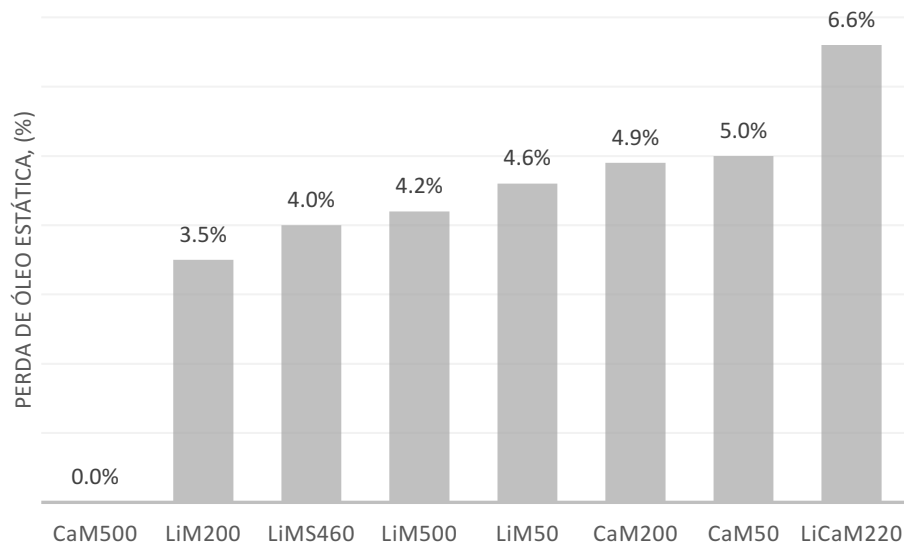


Fonte: Lugt (2012)

A quantidade de óleo separado é calculada utilizando a Equação (2), em que M é a massa inicial da graxa e m é a massa de óleo separada após 24h. A Figura 42 apresenta os valores de apenas uma medição de separação de óleo para cada uma das graxas. A graxa CaM500 não foi avaliada por falta de amostra.

$$S_{OIL} = 100 \cdot \frac{m}{M} \quad (2)$$

Figura 42 – Perda de óleo estática para cada graxa após 24h à 60°C



Fonte Autoria Própria

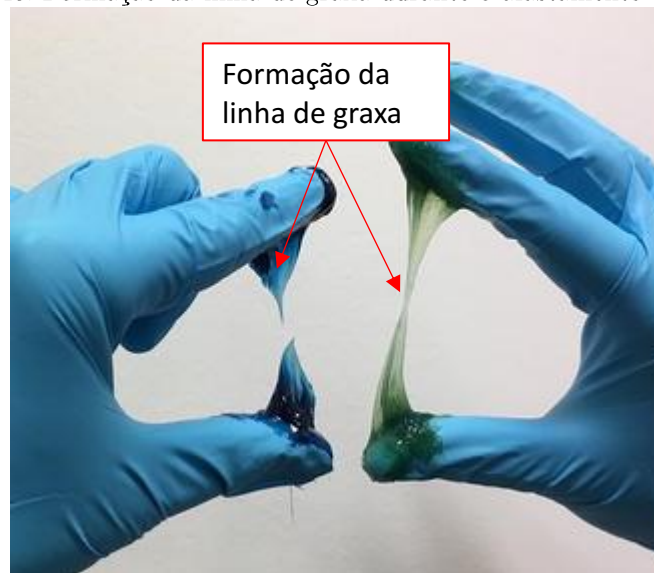
Observa-se que todas as graxas apresentaram valores entre 3,5% e 6,6% de separação de óleo. A diferença máxima observada foi de 88% entre as graxas LiM200 e

LiCaM220. É importante ressaltar que a graxa LiCaM220 é a graxa de referência utilizada atualmente nas ferrovias no Brasil. Para as graxas de formulação própria, que apresentam o mesmo procedimento de preparação, a diferença máxima observada é de 42%. Para estas é possível verificar que as graxas espessadas com cálcio apresentam maior separação de óleo que as graxas espessadas com lítio (CaM50 vs. LiM50 e CaM200 vs. LiM200), apesar das diferenças serem pequenas. Já o efeito da viscosidade não é claro. A maior separação de óleo para graxas espessadas com cálcio está associada com a morfologia do seu espessante. O óleo tem maior dificuldade de se separar da matriz formada por fibras presentes no espessante de lítio do que da matriz formada por cristais presentes no espessante de cálcio. Já a falta de tendência sobre o efeito da viscosidade na separação de óleo é decorrente do processo de formulação das graxas visar uma consistência NLGI 2, e por tanto, usar mais espessante para as graxas de menor viscosidade. Quando se altera a viscosidade sem alterar a quantidade de espessante, é esperado que graxas com óleos de menor viscosidade apresentem maior separação de óleo (LUGT, 2012). Do exposto, verifica-se que apesar de espessante e viscosidade do óleo base serem relevantes, o processo de fabricação das graxas tem papel fundamental na separação de óleo. Isto é evidenciado ao comparar a graxa de formulação própria LiM200 com a graxa comercial LiCaM220, as quais apresentaram os valores extremos de separação de óleo. Ambas são formuladas com óleo mineral de viscosidade similar e com espessantes de lítio, apesar da LiCaM220 também apresentar espessante de cálcio. Isto evidencia que o processamento das graxas é tão relevante quanto seus constituintes em termos de separação de óleo lubrificante. Além disso, é relevante mencionar que não há limites pré-estabelecidos de separação de óleo para graxas de canto de bitola, e nem mesmo se é melhor maior ou menor separação.

3.1.5 Medição de *Tackiness*

Tackiness não é uma propriedade física da graxa como elasticidade ou viscosidade, o que dificulta a especificação dessa característica, fato verificado pela ausência de normas para sua medição (LUGT, 2012). No entanto, ela possui diferentes conceitos dependendo da indústria que o termo está inserido. Especificamente para graxas, a *tackiness* é vista como a habilidade da graxa entre duas superfícies em formar linhas durante a separação dessas superfícies (GEORGIU, 2018).

Figura 43: Formação da linha de graxa durante o afastamento dos dedos



Fonte: Adaptado de Georgiou (2018)

Para lubrificação ferroviária buscam-se graxas que não escoem do canto de bitola por ação da gravidade, temperatura ou umidade, e que não sejam ejetadas da roda pela força centrífuga imposta por esta. Além disso, as graxas devem ‘aderir’ às superfícies, para assegurar que se mantenham nas superfícies mesmo quando submetidas ao contato entre a roda e o trilho. Esta habilidade da graxa se manter aderida à superfície é chamada de *tackiness*.

Essa característica está relacionada com a tensão de escoamento e a adesão/mo-
lhabilidade da graxa em uma superfície. Fatores que influenciam a *tackiness* são rugosi-
dade superficial, pressão de contato, temperatura, umidade, e as propriedades reológicas

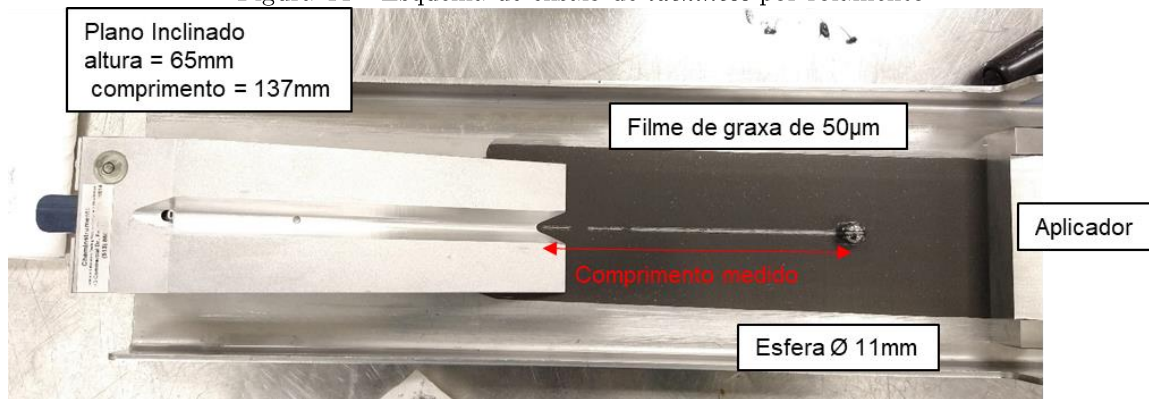
da graxa (LUGT, 2013). Conforme apresentado no capítulo 2, a *tackiness* é um parâmetro relevante tanto na formação do bulbo e acúmulo de graxa após a aplicação nas barras distribuidoras, quanto na coleta da mesma ao entrar em contato com a roda de um trem. Essa fase crítica da aplicação da graxa tem impacto direto na quantidade de graxa que estará em contato na interface de contato roda - trilho e será determinante no desempenho da retentividade da graxa.

É relevante mencionar que não há limites pré-estabelecidos para o valor de *tackiness*, apesar de se considerar que quanto maior for o seu valor, melhor será o desempenho em campo em termos de retentividade (HARMON, 2019).

Há diversas maneiras de se qualificar graxas em termos de *tackiness*. Duas das utilizadas para graxas e modificadores de atrito são *rolling ball tackiness* e *approach-retraction tackiness* (HARMON, 2019 e GEORGIU, 2018), traduzidas livremente para *tackiness* por rolamento e *tackiness* por estiramento, respectivamente.

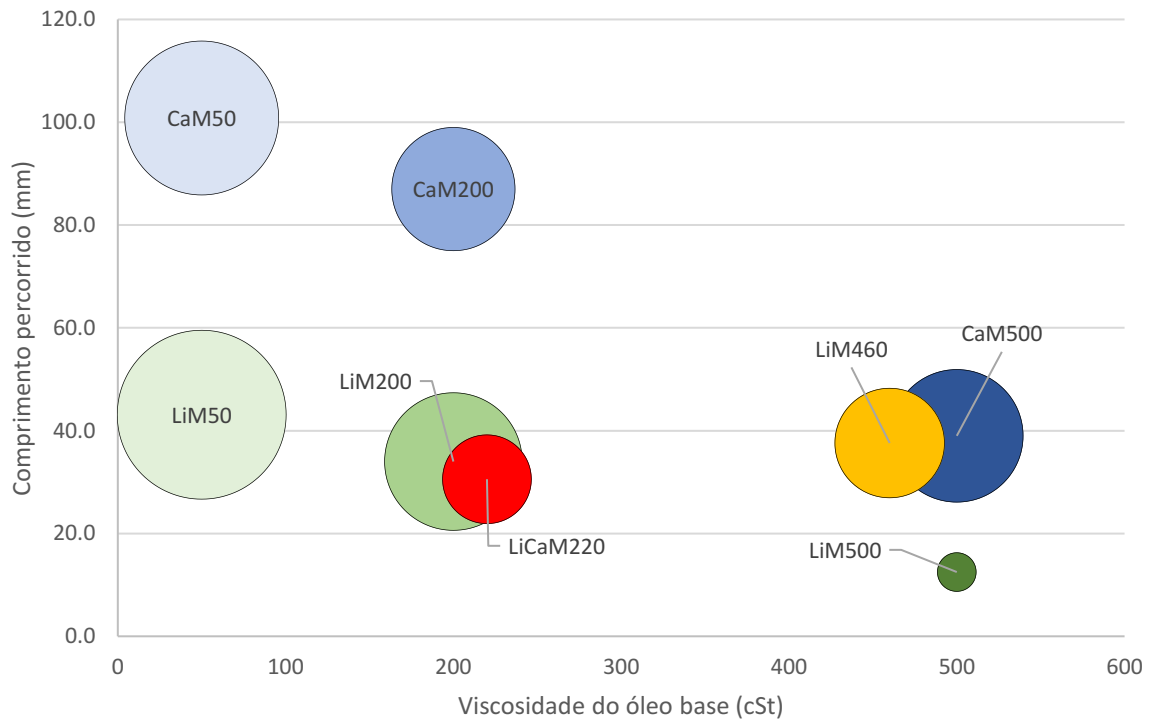
3.1.6 *Tackiness* por Rolamento

Tackiness por rolamento é um procedimento normalizada pela ASTM D3121 – 17 para filmes adesivos. O procedimento consiste em medir comparativamente a *tackiness* de filmes adesivos através da distância que uma esfera de aço solta de um plano inclinado atinge após percorrer uma região plana com o filme adesivo. Sendo que quanto menor foi essa distância, maior é a *tackiness* do adesivo. Neste trabalho, a *tackiness* das graxas apresentadas na Tabela 9 foram mensuradas via uma adaptação da norma ASTM D3121 – 17. A mudança consiste na substituição dos filmes adesivos por um filme de graxa de 50µm que é espalhado sobre uma superfície metálica com o auxílio de uma ferramenta chamada aplicadora de filme, a qual possui uma lacuna de 50µm para garantir a espessura do filme. A Figura 44 apresenta o esquemático do ensaio.

Figura 44 – Esquema de ensaio de *tackiness* por rolamento

Fonte: Autoria própria

A *tackiness* é medida pela distância que a esfera de aço percorre através do filme de graxa até a sua parada. Foram realizadas ao menos cinco repetições para cada graxa testada em condições ambientes de laboratório ($\sim 20^{\circ}\text{C}$). A Figura 45 apresenta os resultados deste teste em função da viscosidade cinemática a 40°C para cada uma das graxas do trabalho. O tamanho do marcador está associado ao desvio padrão das medições e, não indicam uma faixa de variação da viscosidade cujo valor corresponde somente ao valor do centro das esferas. As cores do marcador estão relacionadas ao espessante. As graxas formuladas com espessante de lítio são representadas em tons de verde, enquanto as graxas formuladas com espessante de cálcio são apresentadas em azul. Apenas duas graxas têm formulações distintas, a graxa LiCaM220 cujo espessante é uma mistura de lítio e cálcio e cujo pacote de aditivos é desconhecido, e a graxa LiMS460, que apresenta óleo sintético misturado ao óleo mineral em sua composição. É importante mencionar que esta é a principal diferença entre as graxas LiMS460 e LiM500, visto que a viscosidade cinemática do óleo base é consideravelmente similar.

Figura 45 – *Tackiness* de rolamento x Viscosidade

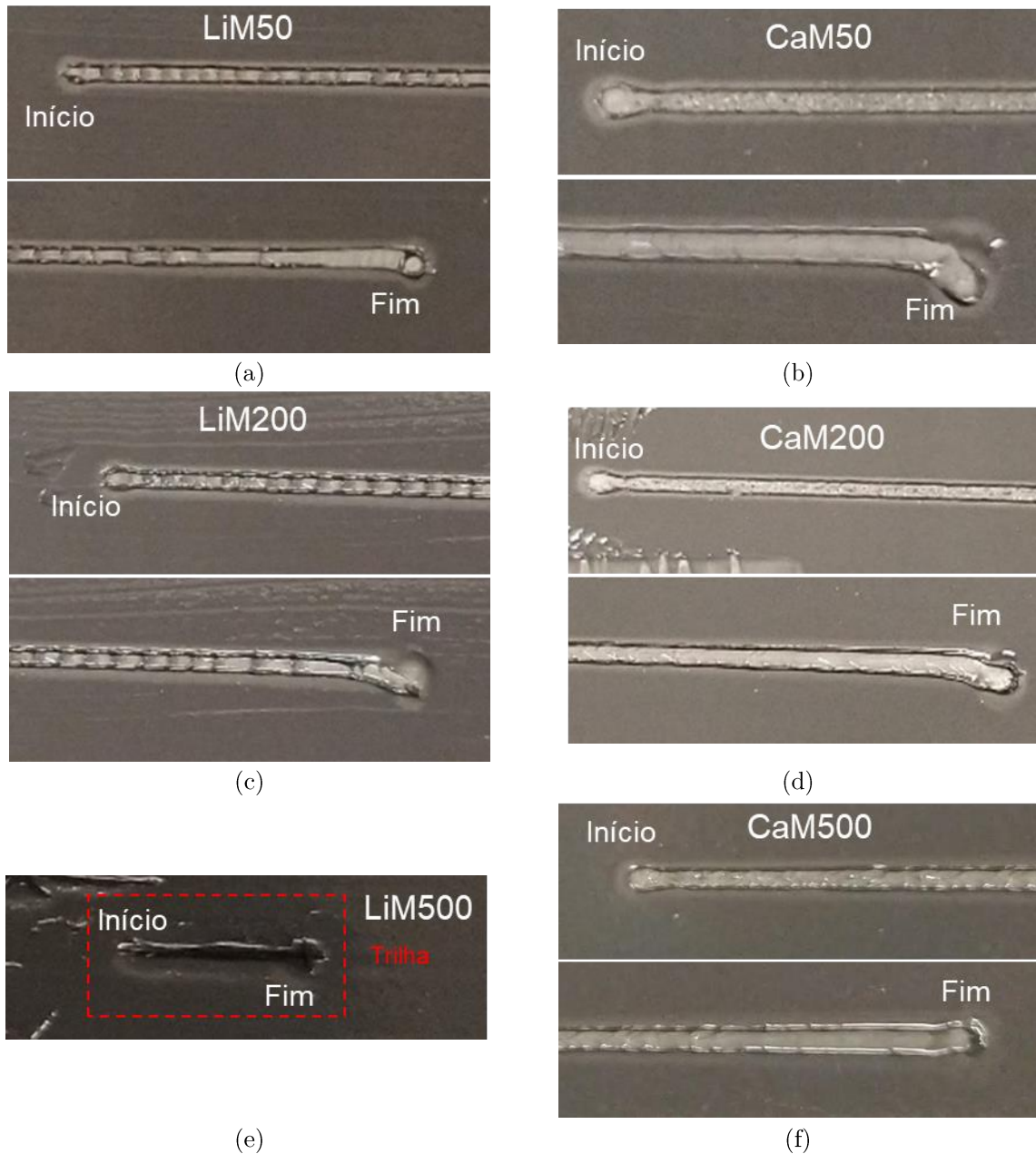
Fonte: Autoria própria

A análise da Figura 45 permite verificar uma série de tendências relevantes. Uma delas é que, independentemente do tipo de espessante ou formulação, verifica-se que quanto maior a viscosidade do óleo base da graxa (ou menor a quantidade de espessante), menor é o comprimento percorrido pela esfera, ou seja, maior a *tackiness* da graxa. Isso é esperado, uma vez que uma das forças retardantes ao movimento da esfera é o cisalhamento do filme conforme a esfera percorre a superfície e, portanto, quanto maior a viscosidade do fluido maior a força necessária para cisalhá-lo. Ao compararmos as graxas formuladas para este trabalho e isolando o efeito da viscosidade (LiM50 vs. CaM50, LiM200 vs. CaM200 e LiM500 vs. CaM500) o papel do espessante torna-se evidente. Verifica-se que as graxas formuladas com lítio apresentam constantemente maior *tackiness* (menor comprimento percorrido) que as graxas formuladas com espessante de cálcio. Tal diferença é maior para os lubrificantes de menor viscosidade. De fato, observa-se que ao aumentar a viscosidade o efeito da formulação se torna menos relevante para todas as graxas, independentemente da formulação. Isso é perceptível visto que a diferença entre

as graxas de cálcio e lítio diminuí consoante o aumento da viscosidade, e também visto que as graxas com espessantes e óleos base muito distintos (LiMS460 e CaM500) apresentam valores de *tackiness* similares. É também relevante mencionar que a adição de um óleo base sintético na graxa LiM500, que dá origem a graxa LiMS460, reduz significativamente a *tackiness* da graxa.

Analisando as trilhas formadas por cada uma das graxas de formulação própria é possível verificar diferentes padrões no escoamento durante o cisalhamento do filme de graxa após a passagem da esfera conforme apresentado pela Figura 46. As graxas formuladas com espessante de lítio apresentam no meio da trilha linhas transversais ao sentido de rolamento, como uma espécie de lombada. Já as graxas formuladas com cálcio apresentam de forma não muito clara algumas estrias que surgem das bordas da trilha para o centro, porém são mais uniformes. Durante o ensaio de *tackiness* a esfera além de rolar também desliza sobre a trilha (microdeslizamento), e ao deslizar acumula material a sua frente, de modo mais evidente para as graxas de lítio, visto que o espessante destas é um emaranhado de fibras interligadas (Figura 23) que tendem a se aglomerar ao serem arrastados, enquanto os cristais de cálcio são simplesmente dispersos para a lateral durante a passagem da esfera. A diferença de desempenho entre graxas desse trabalho e os padrões de escoamento durante a formação das trilhas pela passagem da esfera mostram que diferentes formulações como espessante e viscosidade do óleo base alteram significativamente a interação entre a superfície metálica e o filme fino de graxa.

Figura 46: Diferentes padrões de escoamento das graxas encontrados nas trilhas durante o ensaio de adesividade.



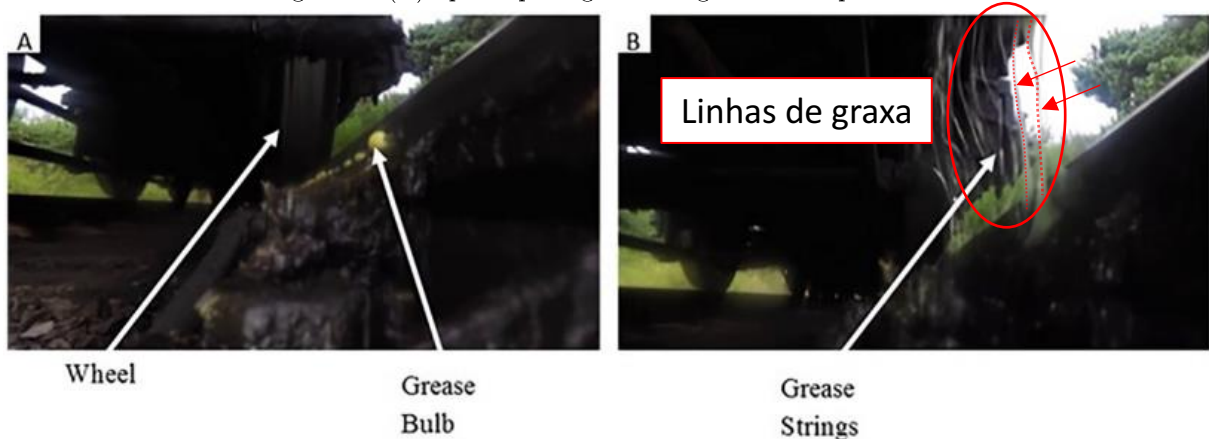
Fonte: Autoria própria

3.1.7 *Tackiness* por Estiramento

O método de *tackiness* por estiramento proposto por Harmon (2019) é derivado de observações em campo. A Figura 47 apresenta o bulbo da graxa antes e após o contato com a roda do trem. Verifica-se claramente que após a passagem da roda a graxa aderida tanto na roda quanto no trilho é estirada, formando linhas de graxa (*grease strings*)

similares as apresentadas pela Figura 43. Este estiramento representa a coesão da graxa lubrificante, ou seja, forças moleculares de atração que fazem com que as da graxa tendam a ficar unidas.

Figura 47 – Imagens capturadas por câmera (A) antes do contato entre a primeira roda do trem e o bulbo de graxa e (B) após a passagem da segunda roda pelo lubrificador.

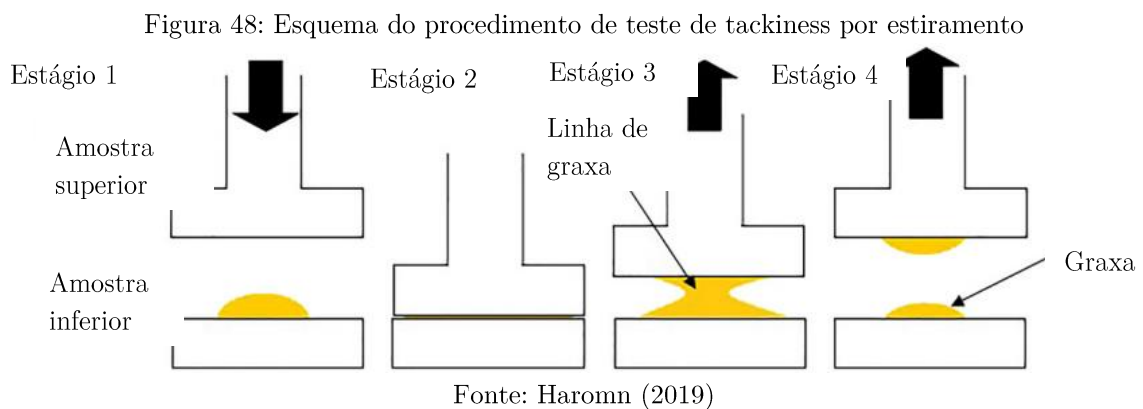


Fonte: Adaptado de Harmon (2019)

Para Harmon quanto mais longas forem as “linhas de graxa”, melhor irá ocorrer a transferência de graxa do lubrificador para a roda, e conseqüentemente melhor será o desempenho global do lubrificante (Harmon, 2019). No entanto, as concessionárias de vias permanentes associam a formação de linhas de graxa com perdas que acarretam problemas de segurança. Estas linhas de graxa alongadas, ao se romperem, costumam ir para baixo do vagão ou próximo as sapatas de freio, e por tanto, não são bem vistas pela engenharia de manutenção de via. Habitualmente esta formação está associada a adição de *tackifiers*, que são polímeros melhoradores das propriedades adesivas e coesivas das graxas. Vale mencionar que não foram incorporados *tackifiers* nas graxas de formulação própria.

Neste trabalho o experimento proposto por Harmon (2019) foi executado utilizando um reômetro HAAKE MARS III com geometria de placas paralelas com 35mm de diâmetro (Figura 48). Todos os ensaios foram realizados em temperatura de 25°C. O procedimento de ensaio consiste em i) colocar 0,5 gramas de graxa no centro do prato inferior; ii) aproximar o prato superior até uma distância pré-estabelecida de 0,5mm e

manter nesta posição por 10 minutos para estabilização da força; iii) retrain o prato com velocidade controlada de 0,05mm/s e; iv) parar o ensaio ao observar que as linhas de graxa foram rompidas. Ao aproximar o prato superior da graxa exerce-se uma força de compressão na graxa, a qual é registrada pela reação no prato superior com sinal negativo apesar da direção ser para cima, já ao retrain o prato superior exerce-se uma força trativa na graxa, a qual é representada pela reação no prato superior com sinal positivo apenas de sua direção ser para baixo.

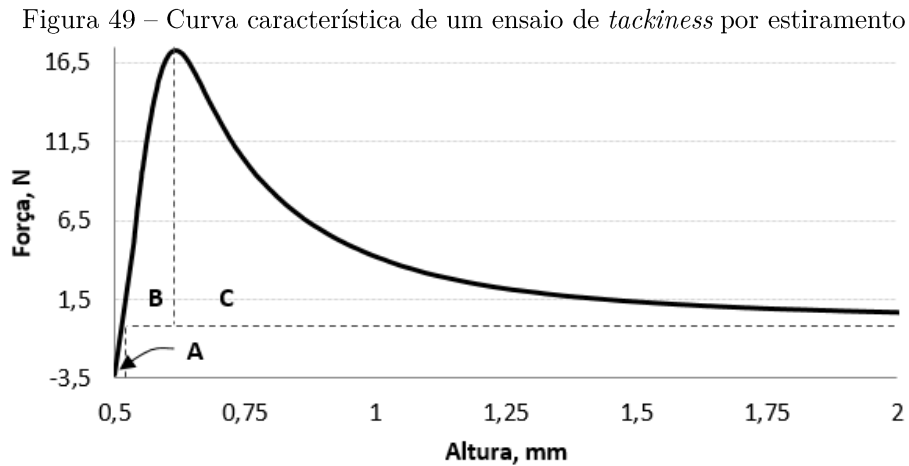


Uma curva típica do ensaio de *tackiness* por estiramento, também denominado de ensaio de aproximação – retração, é apresentada na Figura 49 apenas para a parte de retração, ou seja, para os estágios de 2 a 4 da Figura 49. Três regiões distintas são observadas:

- Região A: O trabalho realizado para realizar a descompressão da graxa após comprimir os 0,5 gramas até o gap de 0,5mm;
- Região B: O trabalho requerido para iniciar a separação da graxa, o qual é função das forças de adesão entre graxa e substrato e da coesão da graxa;
- Região C: O trabalho requerido para quebrar as linhas de graxa, ou seja, a *tackiness*.

É importante salientar que o ponto de inflexão da curva, que ocorre quando a força é máxima, indica a força necessária para separar as duas superfícies. Após atingir

esta força, devido a ruptura das linhas de graxa, a mesma decai até zero, quando já não há graxa conectando os pratos superior e inferior do reômetro.



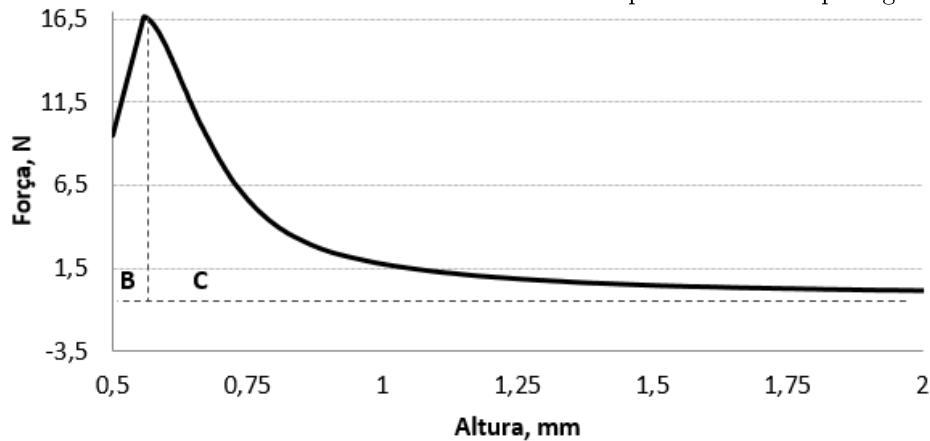
Fonte: Autoria própria (2020)

As áreas relativas as regiões A, B e C, bem como a força máxima para as graxas de formulação própria são apresentadas na Tabela 11. A análise da região A é bastante surpreendente. Tal análise indica que após o trabalho de compressão e o devido repouso de 10 minutos (estágio 2), as graxas de lítio continuam apresentando força resistiva a compressão inicialmente imposta (negativa, para cima), conforme esperado e apresentado na Figura 49. Já as graxas de cálcio apresentam força trativa (positiva, para baixo), ou seja, após serem comprimidas, além de não apresentarem reação à compressão (valores negativos) ou uma acomodação em relação a compressão (valores próximos de zero), a mesma apresenta força trativa, ou seja, a graxa está forçando que o prato superior se desloque em direção ao prato inferior em vez de deslocá-lo para cima (Figura 50). Este efeito, que deve ser estudado em detalhes em trabalhos futuros, indica que as graxas de cálcio se comportam como materiais que possuem coeficiente de Poisson negativo (auxéticos), ou seja, que se expandem contraem-se quando comprimidos.

Tabela 11 – Resultados dos ensaios de *Tackiness* por estiramento

Graxas / Região	LiM50	LiM200	LiM500	CaM50	CaM200	CaM500
A	0,041±0,03	0,091±0,07	0,01±0,015	-	-	-
B	0,84± 0,11	0,98±0,16	1,29±0,13	0,74±0,05	0,55±0,03	0,45±0,05
C	4,63±0,29	5,53±0,14	5,77±0,43	5,11± 0,27	3,33± 0,41	3,08±0,05
Max F	14,76±1,09	15,76±1,40	19,09±1,31	15,61±0,78	12,75±0,68	10,09±0,52

Fonte: Autoria própria (2020)

Figura 50 - Curva característica de um ensaio de *tackiness* por estiramento para graxas de cálcio

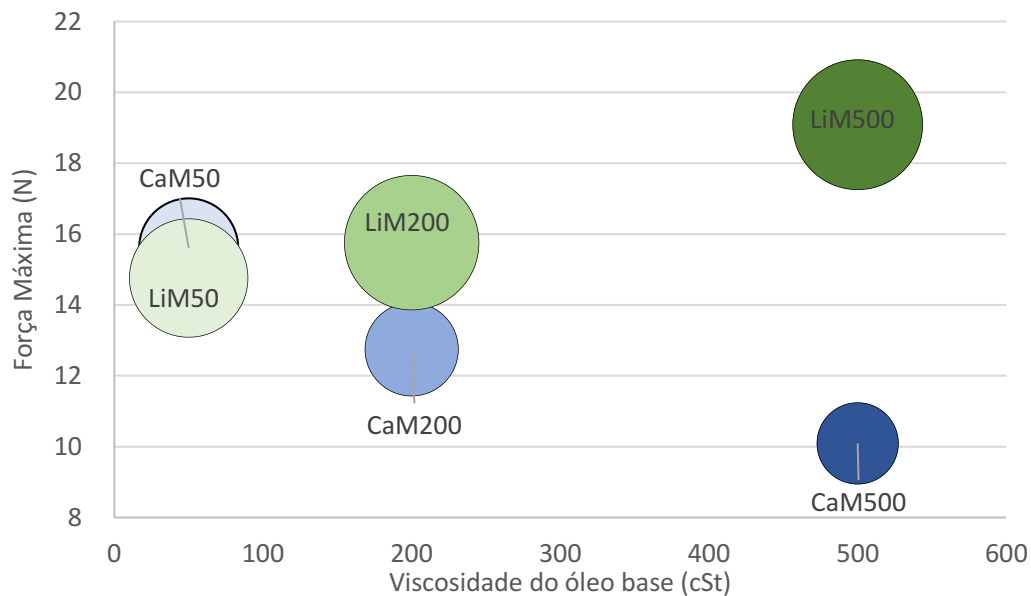
Fonte: Autoria própria (2020)

A Figura 51 apresenta a força máxima necessária para separar as superfícies em função da viscosidade do lubrificante a 40°C. O tamanho do marcador está associado ao desvio padrão das medições de atrito e, não indicam uma faixa de variação da viscosidade cujo valor corresponde somente ao valor do centro das esferas. As cores do marcador estão relacionadas ao espessante. As graxas formuladas com espessante de lítio são representadas em tons de verde, enquanto as graxas formuladas com espessante de cálcio são apresentadas em azul. A análise da Figura 51 permite verificar uma série de tendências relevantes. Uma delas é que, independentemente da viscosidade, verifica-se que as graxas de lítio apresentam maior resistência à separação dos pratos e maior desvio padrão que as graxas de cálcio. Este resultado está em consonância com os resultados de *tackiness* por rolamento, em que as graxas de lítio apresentaram maior *tackiness* por rolamento que as graxas de cálcio. No entanto, diferentemente do que foi observado nos ensaios de *tackiness* por rolamento, o efeito do espessante é maior para os lubrificantes de maior viscosidade. De fato, observa-se que ao reduzir a viscosidade o efeito da formulação se

torna menos relevante, sendo irrelevante para as graxas com viscosidade de 50 cSt (LiM50 e CaM50). Este fato é decorrente do efeito da viscosidade ser oposto para as graxas de lítio e cálcio. Ao aumentar a viscosidade observa-se aumento da força máxima de separação de 29% para as graxas de lítio e uma redução de 65% para as graxas de cálcio. Este resultado indica que os mecanismos de adesão e coesão são mais significativos nas graxas de lítio do que nas graxas de cálcio. Ainda, que o efeito da viscosidade ou do espessante não podem ser avaliados de forma isolada, visto que há um efeito sinérgico destes.

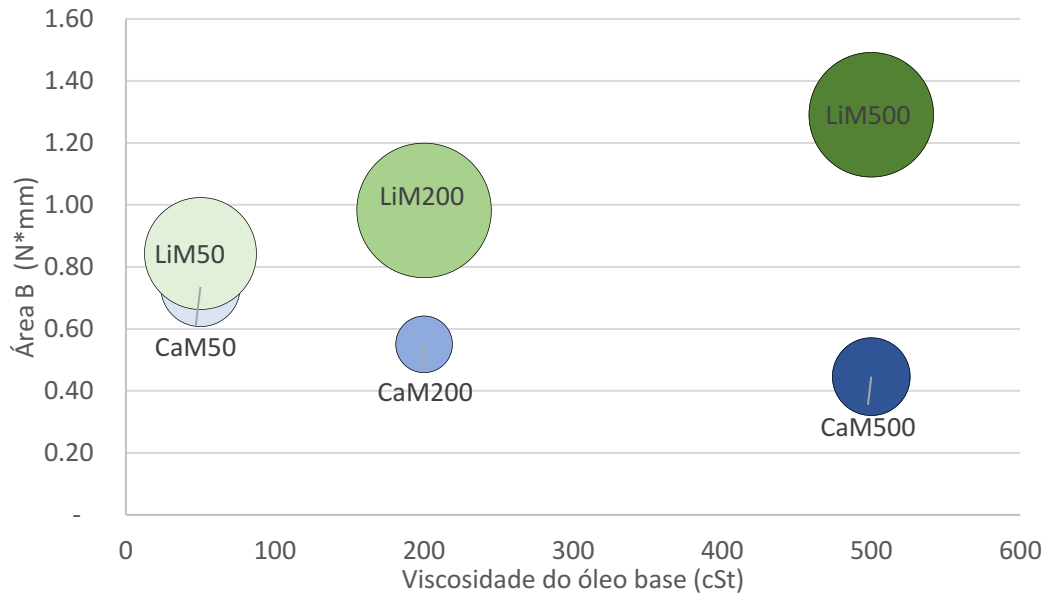
A Figura 52 representa a região B em função da viscosidade, ou seja, o trabalho requerido para iniciar a separação da graxa, o qual é função das forças de adesão entre graxa e substrato e da coesão da graxa. A área da região B é proporcional a força máxima de separação, e por tanto, análise análogo a apresentada acima pode ser feita.

Figura 51: Força máxima de separação das superfícies em função da viscosidade da graxa lubrificante a 40°C



Fonte: Autoria própria (2020)

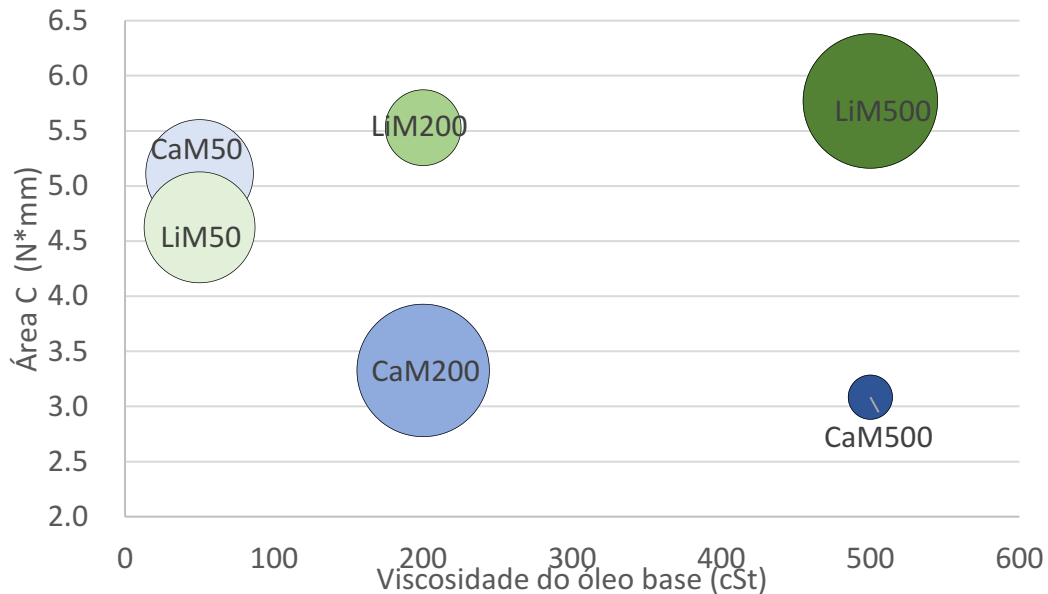
Figura 52: Região B em função da viscosidade das graxas lubrificantes a 40°C



Fonte: Autoria própria (2020)

A Figura 53 apresenta a *tackiness* ao estiramento, ou seja, o trabalho requerido para quebrar as linhas de graxa, o qual é representado pela região C da Figura 49. Esta figura apresenta as mesmas tendências observadas para a região B (Figura 52) e para a força máxima de separação (Figura 51). Ou seja, observa que o aumento da viscosidade aumenta a resistência ao estiramento das linhas de graxa para as graxas espessadas com lítio, ao passo que à diminuí para as graxas espessadas com cálcio. Também se verifica que o efeito do espessante se torna menos relevante para os baixos valores de viscosidade, situação em que as graxas de lítio e cálcio apresentam a mesma resistência ao estiramento das linhas de graxa.

Figura 53: Trabalho de *tackiness* de estiramento em função das viscosidade das graxas lubrificantes a 40°C



Fonte: Autoria própria (2020)

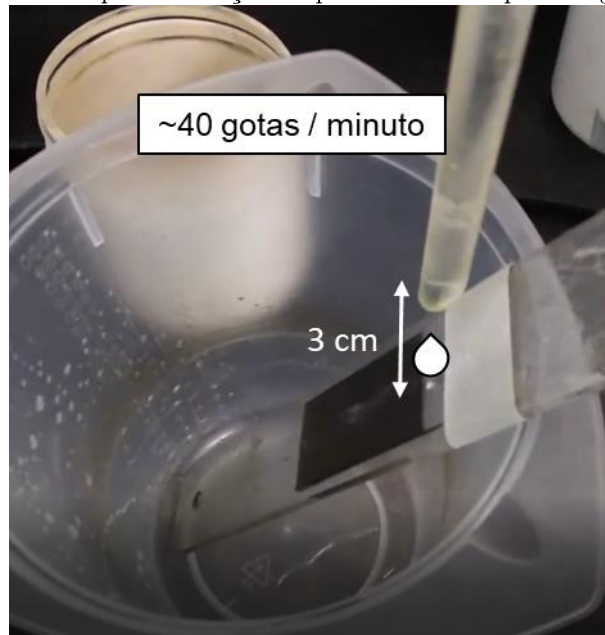
3.1.8 Perda de Massa por Lavagem por Água

A perda de massa por lavagem por água é uma propriedade que normalmente se encontra nas especificações técnicas de graxa (ASTM D-1264 e D-4049), a qual consiste na habilidade da graxa aderir uma superfície metálica quando sujeita a lavagem por água. No contexto de lubrificação roda-trilho, essa propriedade pode ser relevante nos seguintes aspectos: remoção do bulbo da graxa (Figura 18) presente nas barras lubrificadoras e remoção da graxa acumulada que fica no trilho após sucessivas passagens de rodas durante incidência de chuva e o que as operadoras ferroviárias imaginam ter uma possível correlação com a retentividade/adesividade. Sendo esse último item não embasado pela literatura, porém defendido pelos engenheiros que atuam na aplicação dos lubrificantes em campo.

A perda de massa por lavagem por água foi mensurada através de um ensaio inspirado na ASTM D-4049, onde a pulverização de água da norma é substituída pelo gotejamento de água. O teste é realizado com a aplicação de um filme de graxa de aproximadamente 1mm (0.2g) sobre uma lâmina de vidro. Essa lâmina então é posicionada

com inclinação de 150 graus por onde gotas de água com vazão controlada de ~40 gotas /minuto e a uma distância de 3cm da lâmina pingam exatamente sobre a interface do filme de graxa e a lâmina. O volume de água total despejado sobre o filme é de 400ml e após o ensaio a amostra é deixada por aproximadamente 24h em ar ambiente para a evaporação da água presente na superfície da lâmina. Foram realizadas duas repetições para cada graxa. A temperatura e umidade não foram controladas, no entanto o ensaio esteve em sob condições ambientes de laboratório (~20°C)

Figura 54 – Ensaio para avaliação da perda de massa por lavagem por água

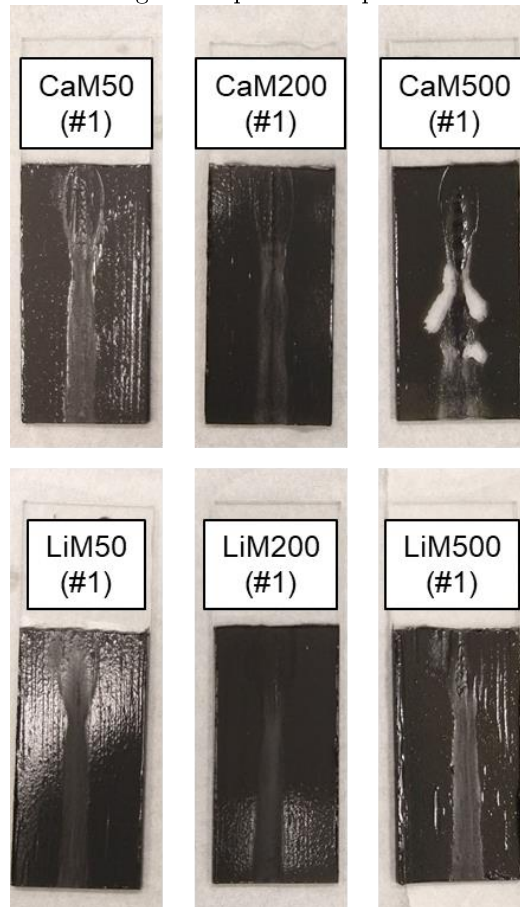


Fonte: Autoria própria (2020)

A perda de massa é calculada através da Equação (3) em que M é a massa inicial da graxa e m é a massa de graxa após o ensaio. A Figura 55 apresenta a imagem dos filmes de graxa de formulação própria após os ensaios e a Figura 56 apresenta os resultados de perda de massa em função da viscosidade do óleo base de todas as graxas.

$$M_{loss} = 100 \cdot \frac{m}{M} \quad (3)$$

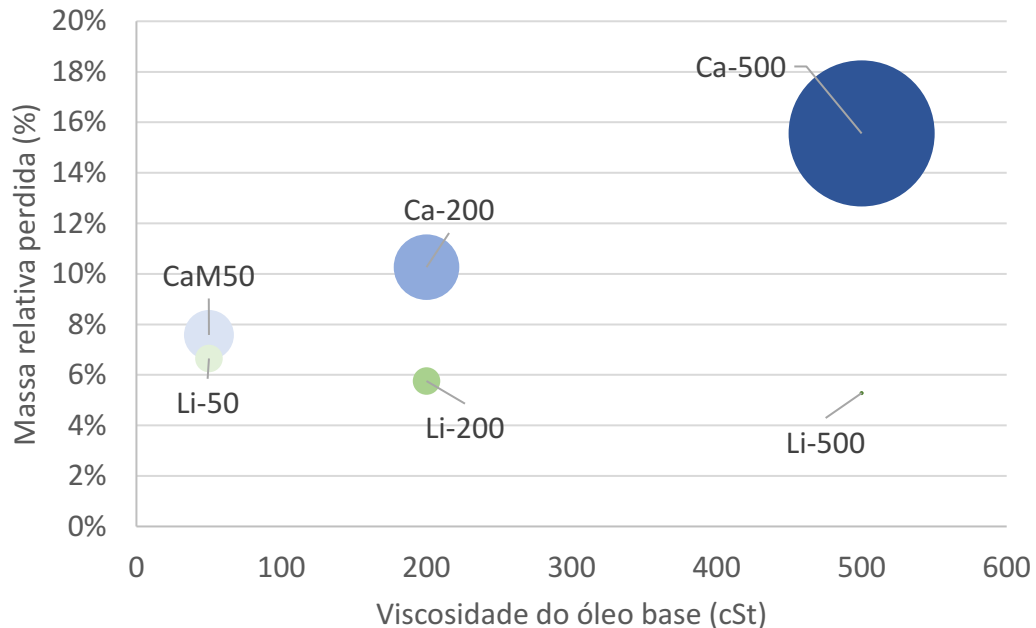
Figura 55 Imagens dos filmes das graxas após ensaio perda de massa por lavagem por água



Fonte: Autoria própria (2020)

Conforme indicado anteriormente, o tamanho do marcador está associado ao desvio padrão das medições de perda de massa, e não indicam uma faixa de variação da viscosidade cujo valor corresponde somente ao valor do centro das esferas. As cores do marcador estão relacionadas ao espessante. As graxas formuladas com espessante de lítio são representadas em tons de verde, enquanto as graxas formuladas com espessante de cálcio são apresentadas em azul. Apenas duas graxas têm formulações distintas, a graxa LiM220 cujo espessante é uma mistura de lítio e cálcio e cujo pacote de aditivos é desconhecido, e a graxa LiMS460, que apresenta óleo sintético misturado ao óleo mineral em sua composição. É importante mencionar que esta é a única diferença entre as graxas LiMS460 e LiM500.

Figura 56 – Perda de massa por lavagem por água x Viscosidade



Fonte: Autoria própria (2020)

A análise da Figura 56 permite verificar uma série de tendências relevantes. Uma delas é que, independentemente do processo de formulação ou do pacote de aditivos, verifica-se que as graxas de lítio apresentam menor perda de massa relativa e menor desvio padrão que as graxas de cálcio. Até mesmo para a graxa comercial LiCaM220, cujo pacote de aditivos e processo de fabricação não é conhecido, observou-se um comportamento intermediário entre as graxas CaM200 e LiM200, tal como esperado, visto que a graxa LiCaM220 possui os dois espessantes e óleo base similar. Este resultado está em consonância com os resultados de *tackiness* de estiramento e de rolamento, em que as graxas de lítio apresentaram maior *tackiness* que as graxas de cálcio. Ainda em concordância com os resultados de *tackiness* de rolamento, verifica-se que a adição de um óleo sintético na graxa LiM500, que dá origem a graxa LiMS460, aumentou sua perda de massa relativa. No entanto, diferentemente do que foi observado nos ensaios de *tackiness* de rolamento, mas em concordância com o que foi observado no ensaio de *tackiness* de estiramento, o efeito do espessante é maior para os lubrificantes de maior viscosidade. De fato, observa-se que ao reduzir a viscosidade o efeito da formulação se torna menos relevante para todas as graxas, independentemente da formulação. Este fato é decorrente

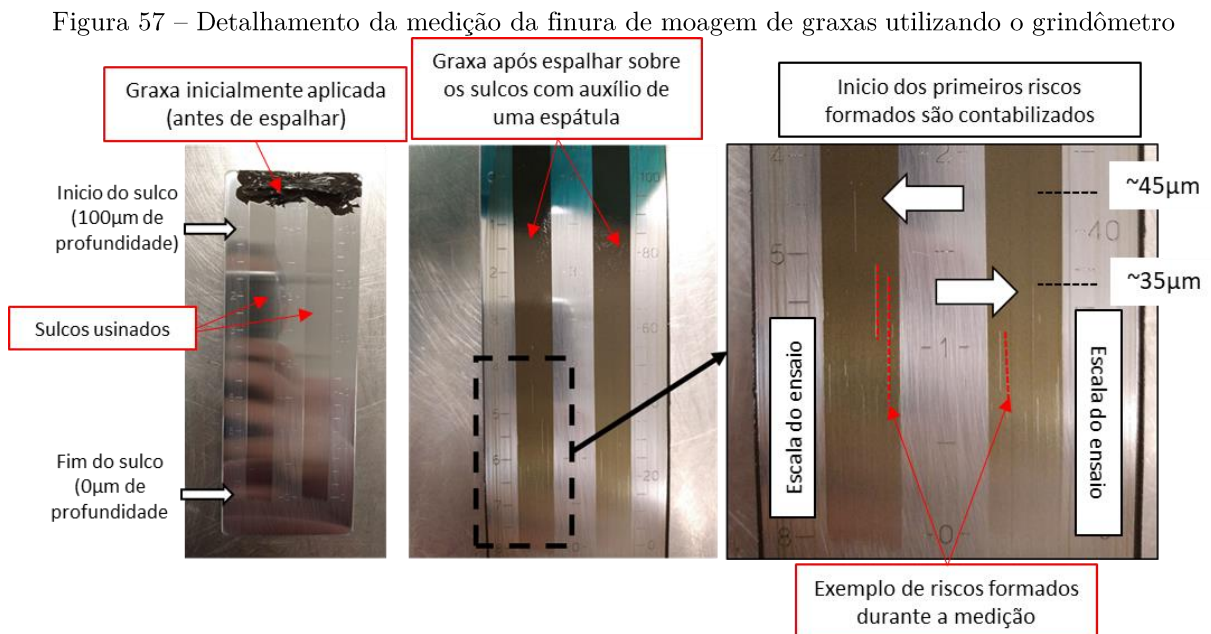
do efeito da viscosidade ser oposto para as graxas de lítio e cálcio. Ao aumentar a viscosidade observa-se aumento significativo da perda de massa para as graxas de cálcio (100%) e uma redução moderada para as graxas de lítio (20%). É natural que a correlação qualitativa entre a força necessária para remover a graxa de uma superfície tracionando-a (*tackiness* de estiramento) com a perda de massa mensurada pelo gotejamento de água seja alta, visto que em ambas as situações uma força externa está separando a graxa do substrato (adesão) e a cisalhando (coesão). Apesar de natural, este comportamento não pode ser extrapolado para todas as graxas, visto que algumas graxas perdem suas propriedades mecânicas após expostas à água, o que não é o caso das graxas estudadas para o tempo de exposição que estas permaneceram sob ação de água.

3.1.9 Finura de Moagem (Grindometro)

A técnica de finura de moagem através do instrumento conhecido como grindômetro ou em inglês como *hegman gauge* é utilizada para avaliar o tamanho de partículas grosseiras e aglomerações em uma dispersão. Esse equipamento apenas mensura o tamanho da maior partícula em uma dispersão e não uma média ou uma distribuição delas. Essa técnica normalmente é implementada na indústria de pinturas e revestimentos, porém podem ter a aplicação extrapolada para graxas lubrificantes. Durante a fabricação de graxas é comum que elas sejam submetidas a um processo de homogeneização, normalmente por moedores, para aumentar a uniformidade da distribuição do espessante e dos aditivos sólidos no óleo promovendo assim uma textura uniforme as graxas (ISHCHUK, 2006). Eventualmente a dispersão ineficiente do espessante e/ou aditivos sólidos pode gerar aglomerações e isso causa o aumento do desgaste, visto que a aglomeração de aditivos sólidos pode atuar como abrasivo (FERRER, 2020, SCHULTHEISS, 2015). Portanto, neste trabalho, esta análise objetiva verificar a qualidade dos

lubrificantes avaliados, pois eventualmente a presença desses aglomerados pode influenciar no desempenho tribológico.

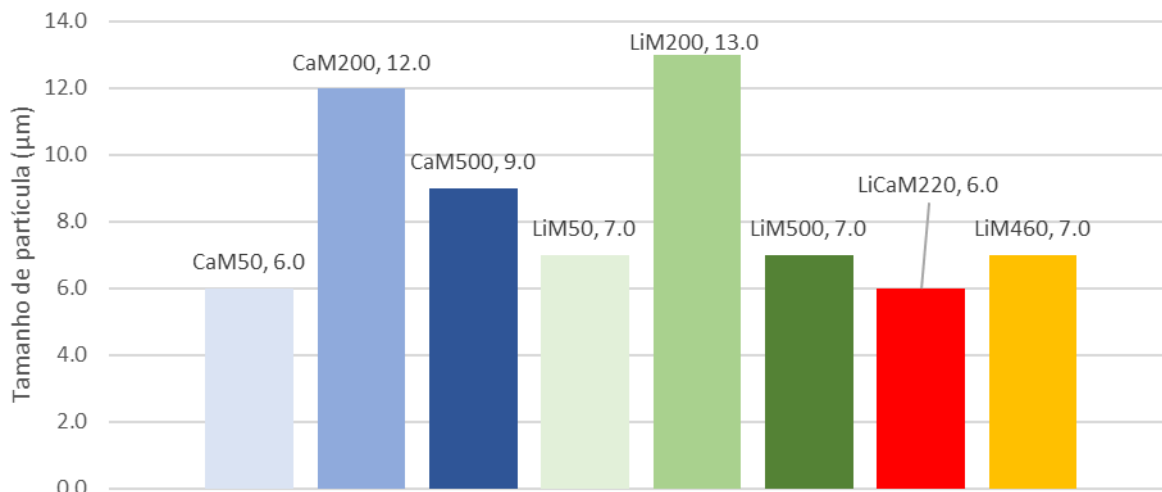
O equipamento de medição apresentado na Figura 57 é o mesmo utilizado na norma ASTM 1316 – 20, porém utiliza-se um filme de graxa ao invés de um filme de tinta. Esse equipamento, consiste em um bloco de metal, onde em uma das superfícies são usinados dois sulcos com 25,4 mm de largura, 158,7 mm de comprimento e com uma profundidade de sulco variando de 100 μm (início) até 0 μm (final). Inicialmente, a graxa é aplicada sobre a parte mais profunda desses sulcos e é espalhada com o auxílio de uma espátula metálica.



Fonte: Autoria própria (2020)

O tamanho da partícula é mensurado pela presença de riscos na superfície dos sulcos. O início do primeiro risco é usado para comparar com a marcação do gabarito (escala) indicando a profundidade do sulco e conseqüentemente o tamanho da partícula. Esse tamanho pode ser indicado em μm ou pelo número de Hegman. A Figura 58 apresenta o resultado das graxas em μm .

Figura 58 – Resultados do ensaio de finura de moagem por graxa



Fonte: Autoria própria (2020)

É possível verificar que as graxas apresentam tamanhos de partículas na parte inferior da escala do equipamento, variando entre 6 e 13 μm . Estes valores estão dentro do esperado, visto que na ficha de especificações técnicas destas graxas é mencionado a presença de aditivos sólidos com tamanho médio de 5 μm . Logo, é razoável dizer que todas as graxas apresentaram um tamanho de partículas máximo similares.

3.2 MODIFICADORES DE ATRITO A BASE DE ÁGUA

Conforme apresentado anteriormente, o modificador de atrito a base de água vem sendo utilizado e conseqüentemente estudado desde 1996, porém no Brasil há apenas uma década. De lá para cá, devido a difusão do gerenciamento de atrito nas ferrovias pelo mundo, surgiram diversos modificadores de atrito, sendo a grande maioria híbridos e a base de óleo. Como já informado anteriormente, apenas os produtos à base de água com capacidade de formar filme sólido foram abordados neste trabalho por serem biodegradáveis, não apresentarem propagação de trincas como os modificadores de atrito à base de óleo, e principalmente, por serem os produtos utilizados nas ferrovias brasileiras. No entanto, é importante salientar que as pesquisas publicadas com este tipo de material são predominantemente realizadas pelos seus fabricantes, e por tanto sabe-se pouco sobre

o efeito da composição dos modificadores de atrito a base de água no seu desempenho em termos de retentividade, coeficiente de atrito e desgaste. É relevante ressaltar que há apenas 4 empresas no mundo que fabricam modificadores de atrito à base de água, segundo os conhecimentos do autor de acordo com as pesquisas realizadas durante o período deste trabalho.

Diferentemente do que foi apresentado para graxas, para os modificadores de atrito não foi possível avaliar diferentes formulações de maneira sistemática. Logo, neste trabalho, foram utilizados apenas dois modificadores de atrito comerciais à base de água de empresas distintas, visto terem sido os únicos disponíveis para estudo. As propriedades físicas dos modificadores são apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12: Propriedades dos produtos TOR-A e TOR-B presentes nas respectivas fichas técnicas

Propriedades	Método	TOR - A	TOR - B
Base	-	Água	Água
Coloração	-	Cinza	Cinza
Viscosidade (cP)	Brookfield RV6 à 20 rpm – 25°C	22700 – 24700	-
	Brookfield, 60 rpm, Spindle 2 – 20°C	-	590
Densidade (g / cm ³)	ASTM D1475	1,07-1,09	1,08
pH	ASTM E70	9,0 – 10,0	

Fonte: Autoria própria (2020)

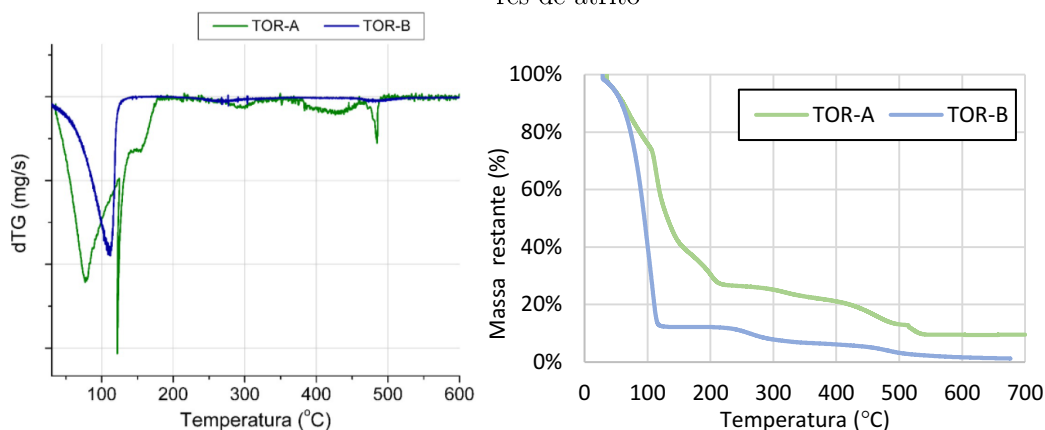
As características técnicas do produto não permitem nenhuma comparação direta, visto que a única propriedade física mensurada com o mesmo procedimento é a densidade. A viscosidade, por exemplo, foi medida para rotações e temperaturas distintas, e por tanto, não é comparável, visto que os modificadores de atrito apresentam variação da viscosidade com estas variáveis. Ainda assim, a diferença é tão grande que se pode afirmar que nas mesmas condições a viscosidade do TOR-A é maior que o do TOR-B. Diferentes viscosidades podem influenciar no efeito *splash* durante a coleta do modificador de atrito pela roda, diminuindo a quantidade de produto coletado.

A Tabela 12 evidencia que as propriedades dos modificadores de atrito carecem de informação. Isso decorre de 2 situações: i) modificadores de atrito são novos (25 anos) em relação a outros produtos altamente normalizados, como as graxas lubrificantes (centenas de anos); ii) há poucos fabricantes e utilizadores no mundo, e por tanto, o desenvolvimento do produto e do conhecimento científico sobre este evolui muito lentamente. Em decorrência, não há normas que estabeleçam ensaios padronizados para hierarquizar diferentes produtos segundo métricas bem definida. Neste sentido, uma série de caracterizações foram realizadas a fim de fornecer dados que propiciem informação relevante para a seleção dos modificadores de atrito para confrontar com seu desempenho tribológico, a fim de evoluir o conhecimento sobre a relação entre formulação e desempenho.

3.2.1 Termogravimetria (TGA)

A análise de perda de massa dos produtos sob aquecimento (TGA) e sua curva derivada (dTG) permitem estudar a composição dos controladores de atrito. Essa técnica permite identificar se existe a presença de água ou óleo nas formulações, bem como eventuais compostos orgânicos e inorgânicos presentes na amostra de acordo com as temperaturas em que ocorrem a perda de massa por evaporação ou degradação das amostras. Os testes foram conduzidos com as temperaturas das curvas de aquecimento entre 30 a 600 °C e com uma taxa de aquecimento de 10 °C/min. A Figura 59 apresenta as curvas termogravimétricas para os modificadores de atrito TOR-A e TOR-B.

Figura 59: a) Curvas de dTG e b) massa remanescente em função da temperatura para os modificadores de atrito



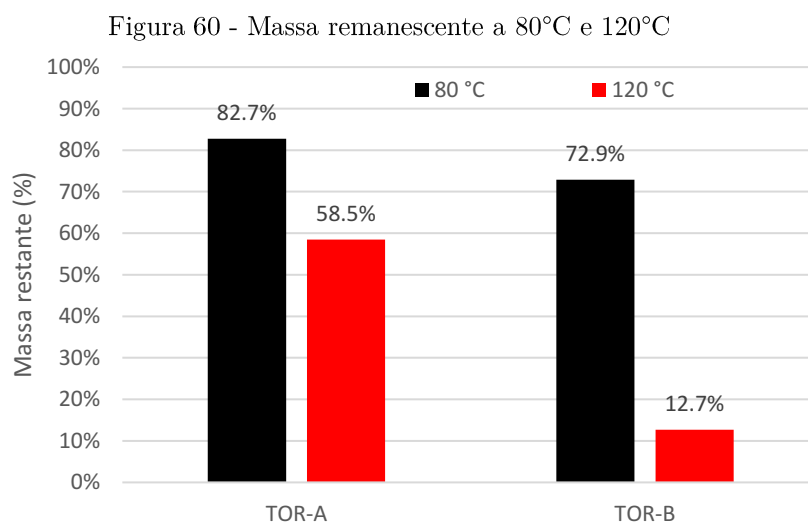
Fonte: Autoria própria (2020)

A análise destas curvas permite verificar que:

- O TOR-A apresenta vários picos de perda de massa, enquanto o TOR-B apresenta apenas um;
- A perda de massa com máximo próximo a 78 °C para o TOR-A coincide com a temperatura de ebulição do etanol. O alargamento da região de perda de massa pode ser atribuído a existência de mistura azeotrópica de água e álcoois
- A perda de massa com máximo em torno de 122°C para o TOR-A pode ser atribuída a evaporação de água de hidratação;
- A perda de massa com máximo em torno de 155°C para o TOR-A pode ser atribuída a evaporação de compostos orgânicos como álcoois de cadeia longa;
- A formulação do TOR-B é composta principalmente por água, sendo observado um sinal bastante intenso com máximo de perda de massa aproximadamente em 110°C;
- O TOR-B apresenta pequena quantidade de compostos de mais alto peso molecular que evaporam/degradam em temperaturas próximas a 269°C e 481°C, sendo essas devidas aos aditivos presentes na formulação.

Ao comparar apenas a perda de massa em função da temperatura para os dois modificadores de atrito (Figura 59b), bem como a massa restante para as temperaturas

de 80°C e 120°C (Figura 60), verifica-se que o modificador de atrito TOR-B apresenta maior quantidade de água em sua composição, porém menores quantidades de resíduos inorgânicos. A estimativa de porcentagem de cada composição está apresentada na Tabela 13.



Fonte: Autoria própria (2020)

Tabela 13: Estimativa do percentual de cada composição para os modificadores de atrito estudados

Grupo	Massa (%)	
	TOR - A	TOR - B
Água	~56%	~88%
Orgânico	~37%	~10%
Inorgânico	~7%	~2-3%

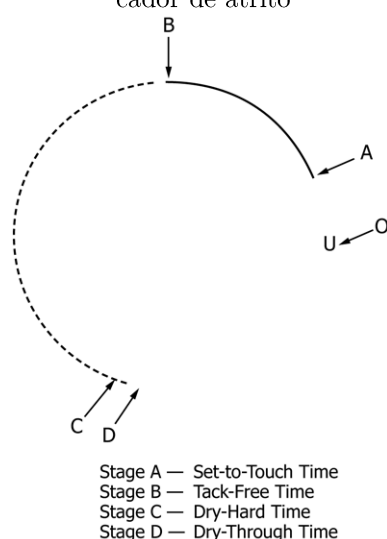
Fonte: Autoria própria (2020)

A diferença de percentual de componentes entre TOR-A e TOR-B indica que para uma mesma quantidade de produto aplicada o TOR-A vai apresentar uma maior quantidade de filme sólido após a evaporação da água que o TOR-B, porém, ainda é desconhecido o efeito dessa diferença no desempenho tribológicos dos produtos.

3.2.2 Tempo de Secagem do Filme do Modificador de Atrito (ASTM D5895-96)

Os modificadores de atrito testados neste trabalho são a base de água e que tem como objetivo formar um filme sólido na superfície da roda através da evaporação da água após a coleta do produto ainda na fase líquida sobre os trilhos (Figura 17 e Figura 19). Logo, informações sobre o tempo em que se leva para formar este filme sólido é relevante. O teste de tempo de secagem segundo a norma ASTM D5895-96 determina os vários estágios de secagem/cura na formação do filme sólido, conforme apresentado pela Figura 61. O teste consiste de um eixo motorizado com uma ponteira de teflon que toca a superfície do modificador de atrito com baixa pressão e executa um arco de 360° com velocidade constante. Entre o ponto inicial de contato (O) e o ponto (A), a marca deixada pelo ponteiro não é analisada, visto que neste estágio ocorre a acomodação do sistema. Do ponto A ao B tem-se a região em que a ponteira rompe o filme completamente visto que este ainda não está solidificado e aderido à superfície. Entre os pontos B e C ocorre a secagem do modificador de atrito, impedindo que a ponteira atinja a superfície, porém riscando o mesmo. Por fim, no estágio entre D e O não é perceptível nenhuma marca de desgaste ocasionada pelo ponteiro, indicando que o modificador de atrito se solidificou completamente.

Figura 61 Ensaio de tempo de secagem: relação entre observações e características do filme de modificador de atrito

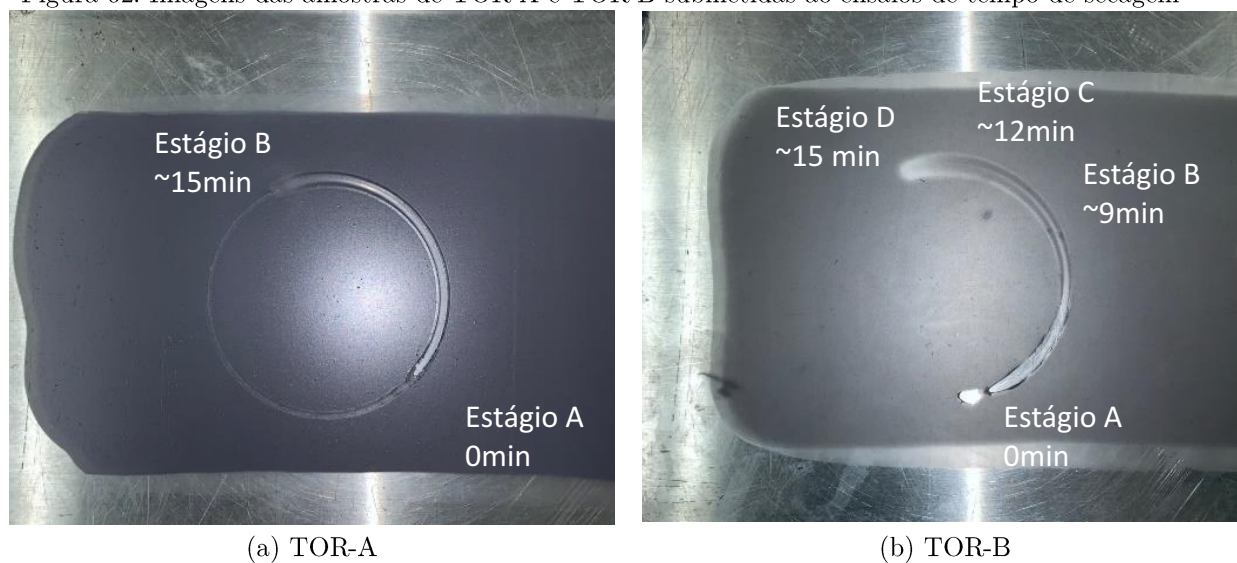


Fonte: Adaptado de ASTM D5898-96

O tempo de secagem é importante pois determina o período em que o produto pode apresentar baixos níveis de coeficiente de atrito na interface roda-trilho até a formação de um filme sólido. Produtos que demoram a evaporar, podem exibir baixos coeficientes de atrito por períodos mais longos, comprometendo a tração e frenagem perto dos pontos de aplicação. Além disso, pode afetar no condicionamento da roda após a coleta do produto sobre os trilhos. No entanto, é importante salientar que a temperatura no ensaio aqui descrito ($\sim 20^{\circ}\text{C}$) é muito mais branda que a temperatura na superfície da roda. Em contrapartida, tempo de secagem muito curto pode potencializar o entupimento das barras distribuidoras durante o período que o modificador de atrito não é coletado pela roda, como o período entre passagens de trens.

A Figura 62 apresenta o resultado do ensaio de tempo de secagem em condição ambiental ($\sim 23^{\circ}\text{C}$ e UR $\sim 40\%$) com o tempo para realizar o arco de 360° em 30 min para cada um dos modificadores de atrito TOR-A e TOR-B.

Figura 62: Imagens das amostras de TOR-A e TOR-B submetidas ao ensaios de tempo de secagem



Fonte: Autoria própria (2020)

A partir da Figura 62 é possível observar que o TOR-B é o único produto a formar um filme duro (estágio “D”), enquanto o TOR-A apresenta um filme mais macio (estágio “B”) durante os 30 minutos do ensaio. Ainda é desconhecido o impacto que a secagem mais rápida tem no desempenho tribológico do ensaio disco sobre disco ou mesmo em campo.

3.2.3 Avaliação Morfológica e Química dos Filmes de Modificadores de Atrito

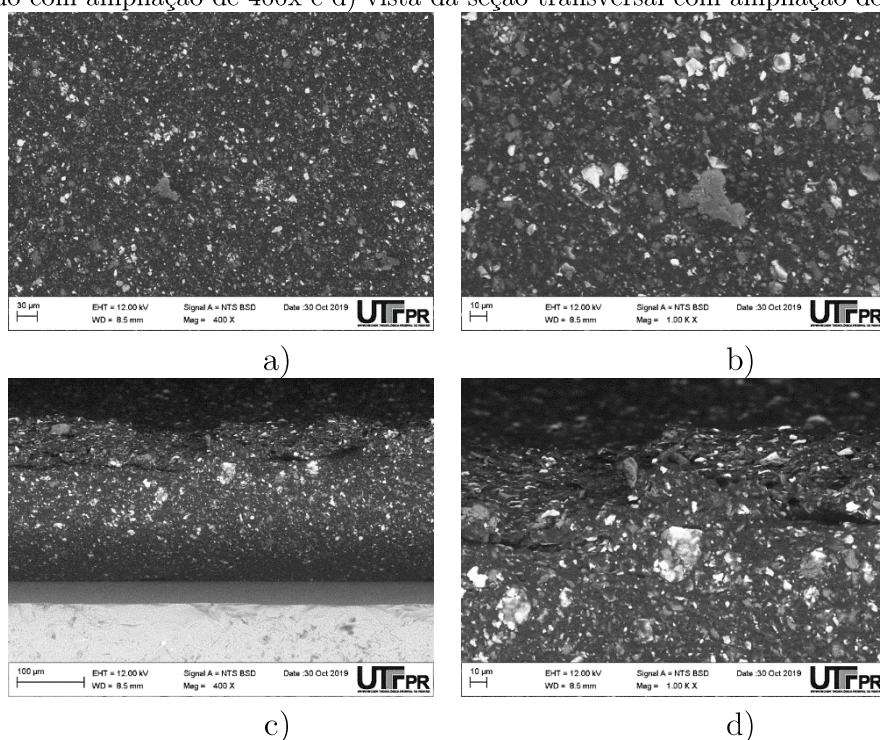
O filme sólido formado pelos modificadores de atrito TOR-A e TOR-B foi analisado por Microscopia Eletrônica de Varredura para visualização de sua morfologia e, Espectroscopia por Energia Dispersiva para analisar sua composição química. Conforme apresentado anteriormente, existem diferentes constituintes que podem formar o modificador de atrito a base de água (Tabela 6), logo as caracterizações realizadas a seguir buscam identificar tais elementos.

Neste trabalho, 5 ml de produto foram aplicados sobre lâminas de vidro e submetidos a temperatura de 60°C por 8h em uma estufa para garantir a evaporação da

água e a formação de um filme sólido. As imagens tanto de topo quanto a seção transversal do filme sólido obtidas pela análise de MEV do TOR-A e TOR-B estão apresentadas pela Figura 63 e pela Figura 64, respectivamente.

Estas figuras demonstram claramente que o TOR-A é composto de uma matriz ligante com diferentes tipos de partículas sólidas com aproximadamente $10\mu\text{m}$ de tamanho. Em contrapartida, o TOR-B praticamente não apresenta partículas numa matriz aparentemente de duas fases. É razoável descrever que TOR-A apresenta ter uma formulação mais complexa e um maior número de componentes na formulação que TOR-B.

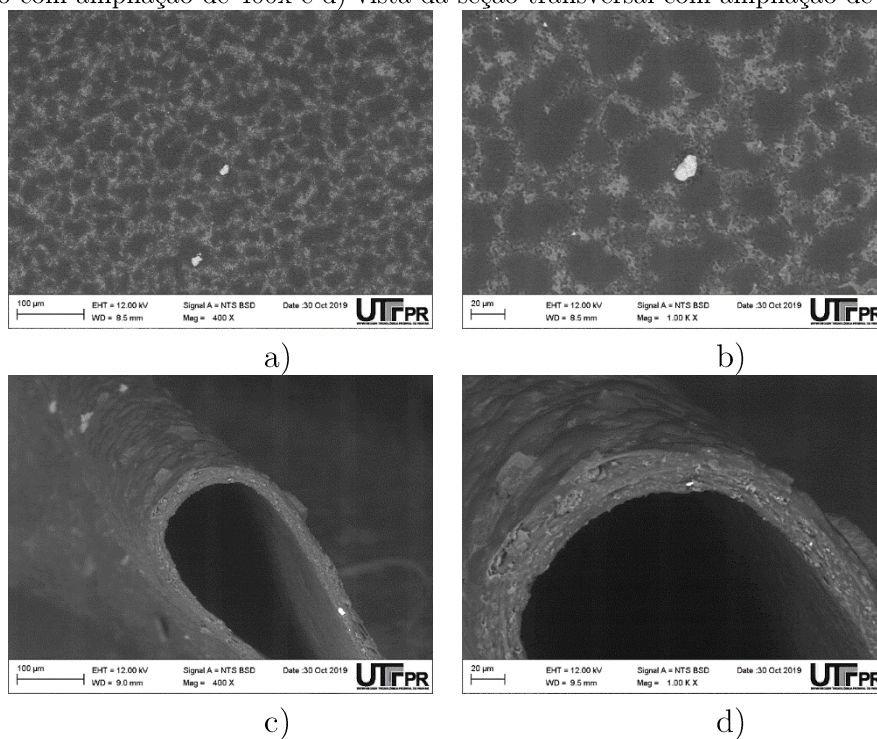
Figura 63: MEV do modificador de atrito TOR-A: a) vista de topo do filme sólido formado com ampliação de 400x b) vista de topo com ampliação de 1000x, c) vista da seção transversal do filme formado com ampliação de 400x e d) vista da seção transversal com ampliação de 1000x



Fonte: Autoria própria (2020)

Estas figuras demonstram claramente que o TOR-A é composto de uma matriz ligante com diferentes tipos de partículas sólidas com aproximadamente $10\mu\text{m}$ de tamanho. Em contrapartida, o TOR-B praticamente não apresenta partículas numa matriz aparentemente de duas fases. É razoável descrever que TOR-A apresenta ter uma formulação mais complexa e um maior número de componentes na formulação que TOR-B.

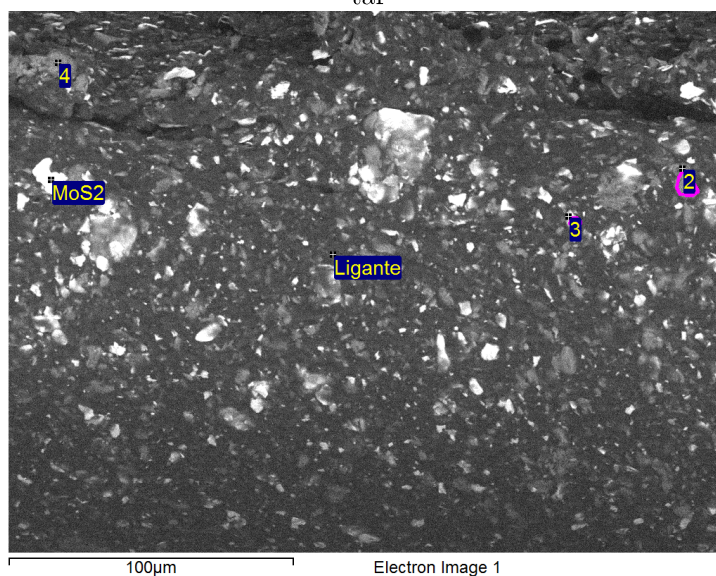
Figura 64: MEV do modificador de atrito TOR-B: a) vista de topo do filme sólido formado com ampliação de 400x b) vista de topo com ampliação de 1000x, c) vista da seção transversal do filme formado com ampliação de 400x e d) vista da seção transversal com ampliação de 1000x



Fonte: Autoria própria (2020)

A composição química e a região de análise para o produto TOR-A está apresentada na Figura 65 e Tabela 14.

Figura 65: Imagem do filme sólido TOR-A com indicação dos pontos selecionados para análise elementar



Fonte: Autoria própria (2020)

Tabela 14: Elementos identificados no filme sólido TOR-A

Região de análise	Elementos (%)								
	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Ca	Mo
MoS2	45.84	12.22	0.83	0.81	1.11	4.18	14.47	0.59	19.96
2	41.24	31.49	1.00	6.19	1.39	13.20	2.37	0.76	2.37
3	55.10	13.75	0.83	0.80	1.03	4.15	9.58	0.47	14.30
4	38.80	32.22	0.96	6.89	1.52	15.13	2.26	0.60	1.63
Ligante	65.88	19.83	1.15	1.37	1.36	6.37	3.40	0.64	

Fonte: Autoria própria (2020)

Os resultados indicam claramente a presença de Mo e S, bem como dos elementos C, O, Na, Mg, Al e Si. Além disso, verificou-se também a presença de Ca em pequenas quantidades. Comparando alguns dos elementos químicos observados na Fonte: Autoria própria (2020)

Tabela 14 com os listados na 2.3 verifica-se para o TOR-A que:

- i) Regiões MoS_2 e 3, apresentam elementos como Mo e S, que são típico de um aditivo sólido de extrema pressão bissulfeto de molibdênio (MoS_2), usualmente encontrado em lubrificantes para operação sob condições de lubrificação limítrofe e indicado pelo fabricante do produto;

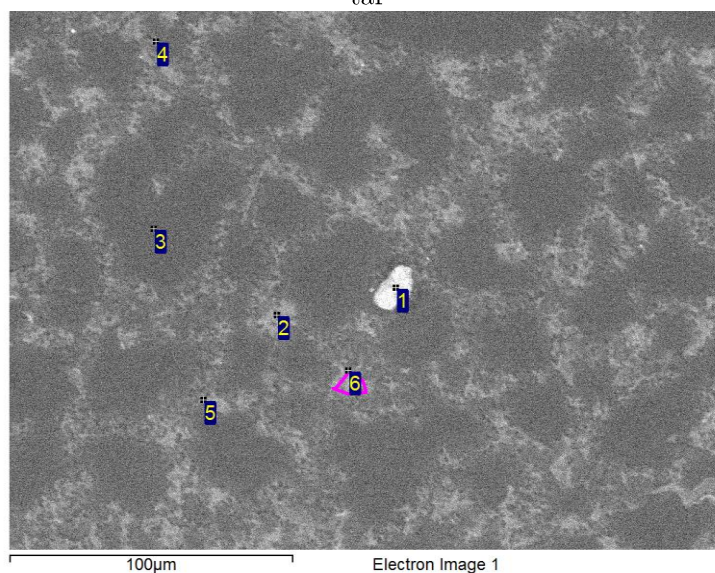
- ii) Região “ligante” apresenta elementos de Al, Na, Si, que podem estar associados a um tipo de ligante chamado bentonita ($Al_2H_2Na_2O_{13}Si_4$);
- iii) Regiões 2 e 4 apresentam com maior intensidade elementos de Mg, Si, O que podem estar associados a uma partícula mineral modificadora de atrito como o talco ($Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$);

Apesar de alguns elementos químicos coincidirem com os componentes citados acima, é importante reforçar que não é possível afirmar que esses são os componentes que formam a composição do TOR-A.

A composição química e a região de análise para o produto TOR-B estão apresentadas na Figura 66 e Fonte: Autoria própria (2020)

Tabela 15.

Figura 66: Imagem do filme sólido TOR-B com indicação dos pontos selecionados para análise elementar



Fonte: Autoria própria (2020)

Tabela 15: Elementos identificados no filme sólido TOR-B

Região de análise	Elementos (%)										
	C	O	Na	Mg	Al	Si	Cl	K	Ca	Mn	Fe
1	44.11	37.19	2.11	5.29	0.74	0.79		0.28	7.27		2.23
2	65.98	26.97	6.11				0.43	0.52			
3	81.41	14.85	3.06				0.30	0.38			
4	66.77	9.08	1.80			22.10		0.25			

5	64.96	17.66	4.86		0.48	1.04	11.00
6	59.97	30.86	7.77		0.58	0.82	

Fonte: Autoria própria (2020)

Os resultados apresentam os elementos C, O, Na, Mg, Si, Ca e Fe com percentual superior a 1% e vários outros elementos com percentual inferior. Verifica-se também a ausência de Mo e S, indicando que no TOR-B não possui bissulfeto de molibdênio como um aditivo de extrema pressão na sua composição. Grafite é uma alternativa para aditivo de extrema pressão, no entanto, devido à alta presença de C na matriz polimérica, não é possível identificar a presença de grafite neste produto com esta técnica.

A região 2 e região 3 da Figura 66 e da Tabela 16, as quais tecnicamente representariam as duas fases do TOR-B apresentam os mesmos elementos C, O, Na, Cl, e K. Devido à falta de partículas distintas bem definidas como do TOR-A (Figura 63), é possível considerar que sejam apenas cadeias poliméricas. Alguns polímeros como poliacrilato de sódio e poliacrilato de potássio são utilizados em tintas como agentes dispersantes (TOMIZAKI et al., 2013) e podem explicar a presença de sódio (Na) na composição.

A partícula analisada na região 1 parece isolada no filme sólido do TOR-B, podendo ser um contaminante. Quanto a composição, se não considerarmos os elementos Na, Cl e K discutidos acima, observam-se com mais intensidade os elementos Mg e Ca, além de Fe, Al e Si. Um mineral listado como modificador de atrito na seção 2.3 é a dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) que apresenta em sua composição Ca e Mg. Novamente, ressalva-se que não é possível ser assertivo sobre a composição dos modificadores de atrito apenas com as técnicas de análise utilizadas.

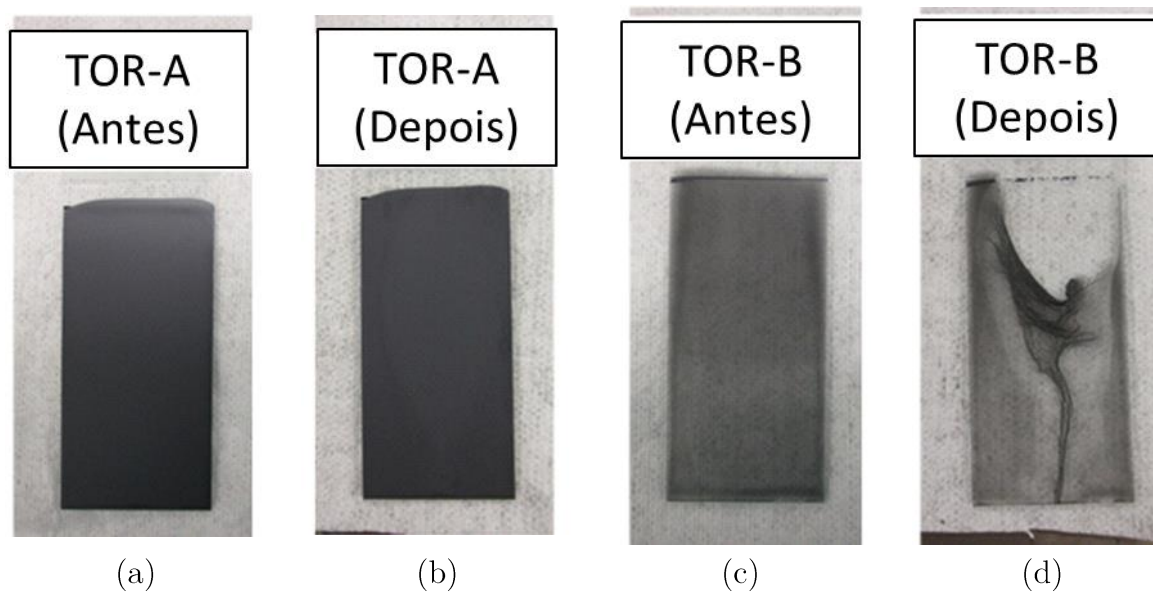
Em resumo, mesmo que a análise química discutida acima não tenha identificado com clareza a composição do filme sólido de cada modificador de atrito, as imagens obtidas por MEV puderam identificar clara diferença na aparência dos filmes sólido dos produtos TOR-A e TOR-B. TOR-A apresenta uma composição mais rica de elementos

com diferentes partículas sólidas, entre elas possivelmente talco e bissulfeto de molibdênio, enquanto TOR-B aparenta ser uma composição mais simples, formada basicamente por um filme polimérico, sem presença relevante de partículas minerais sólidas. Além disso, a avaliação das propriedades mecânicas destes filmes representa uma linha de trabalhos futuros promissor para melhor entendimento do desempenho dos modificadores de atrito.

3.2.4 Adesão por Lavagem por Água

Filmes sólidos sobre uma lâmina de vidro de TOR-A e TOR-B foram expostos a gotejamento de água em um ensaio idêntico ao apresentado pela Figura 54. Neste ensaio foi avaliado qualitativamente a diferença da adesão do filme sólido, diferentemente da perda de massa avaliada para as graxas. Os produtos foram aplicados sobre a superfície com auxílio de um raspador e deixados em uma estufa a 70°C por aproximadamente 2h. Após a evaporação da água, TOR-A apresentou um filme de 0.1g enquanto o TOR-B apresentou um filme de 0.025g. A única diferença na configuração do ensaio é o aumento da distância do gotejamento de 3cm para 12cm. Foram realizadas duas repetições sob condições ambientais de laboratório (~20°C). Os resultados do ensaio para o TOR-A e TOR-B estão apresentados na Figura 67.

Figura 67: imagens dos filmes de modificador de atrito antes e após o ensaio de lavagem por água.



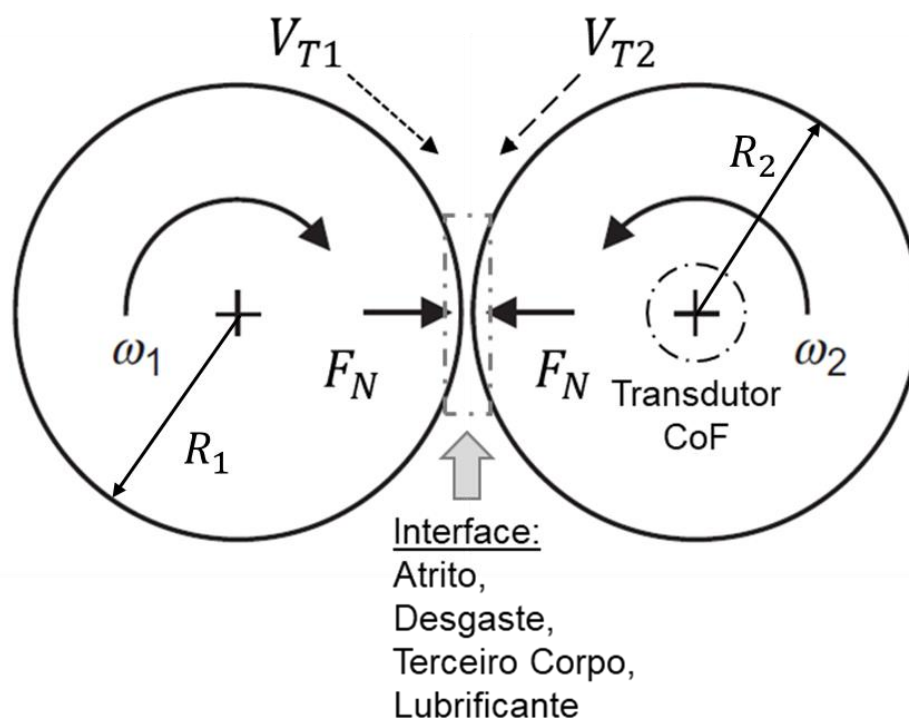
Fonte: Autoria própria (2020)

É possível verificar que as gotas de água desprenderam parte do filme sólido do TOR-B (Figura 67d), enquanto o filme do TOR-A (Figura 67b) manteve-se intacto. A perda de massa relativa foi de apenas 3% para o TOR-A e de 13% para o TOR-B. Não há motivos claros que justifiquem este resultado, porém verifica-se que os filmes mais espessos e complexos formados com o TOR-A apresentaram maior resistência a lavagem por água. Ainda, que a composição do TOR-B, com quase 90% de água (Tabela 13), é mais propensa a se misturar com a água.

3.3 EQUIPAMENTO DISCO SOBRE DISCO

O contato da roda sobre trilho está sujeito a altas pressões de contato e ao mesmo tempo movimento de deslizamento (no canto de bitola) sendo considerado ua combinação de rolamento e deslizamento (no topo de boleto). O ensaio tribológico disco sobre disco é capaz de simular essa condição de rolamento e deslizamento (longitudinal) e alguns dos mecanismos de desgaste que ocorrem em campo, além de medir o coeficiente de atrito entre as superfícies em contato. Portanto, é um dos testes tribológicos mais empregados para o estudo roda-trilho (BOLTON, P. J.; CLAYTON, P., 1984). A Figura 68 apresenta um desenho esquemático do ensaio disco sobre disco.

Figura 68: Esquemático do ensaio disco sobre disco



Fonte: Autoria própria (2020)

Neste tipo de ensaio, normalmente os eixos dos discos são posicionados paralelamente. As características geométricas dos discos, associada ao carregamento aplicado, resulta em um contato Hertziano com pressão na ordem de 1 GPa. O nível de rolamento

e escorregamento entre as superfícies em contato é controlado com a diferença das velocidades tangenciais (V_{T1}, V_{T2}), seja pela diferença dos diâmetros dos corpos de prova (AMSLER, A. J., 1922), seja pelo controle independente da velocidade angular dos eixos (equipamentos mais sofisticados como apresentado por Fletcher e Beynon, (2000)). Neste trabalho, para os equipamentos disco sobre disco utilizados o nível de escorregamento é obtido através do controle independente da velocidade angular dos eixos e pode ser calculado através da razão da velocidade de escorregamento sobre a velocidade de rolamento (Equação (4)).

$$SRR (\%) = \frac{\omega_1 R_1 - \omega_2 R_2}{1/2 (\omega_1 R_1 + \omega_2 R_2)} \quad (4)$$

Usualmente, o corpo de prova que representa a roda no ensaio apresenta maior velocidade tangencial que o disco que representa o trilho, simulando uma condição de aceleração do trem. É importante citar que atualmente, não existe um ensaio normalizado para avaliar o desempenho tribológico de produtos como graxas lubrificantes e/ou modificadores de atrito a base de água utilizados no contato roda sobre trilho. Existe uma norma europeia (EN 16028:2012) que abrange em parte esses produtos, porém não abrangem a realidade de campo e se assemelham com as informações que já estão presentes nas especificações técnicas dos produtos. Conforme apresentado por Ferrer (2020), os resultados de desgaste com diferentes graxas comerciais em um ensaio pino sobre disco não apresentaram correlação com as propriedades apresentadas nas especificações técnicas destes produtos.

Apesar de inexistência de normas para avaliação de graxas e modificadores de atrito, Lewis et al, 2017 propõem uma abordagem sistêmica para testes de desgaste utilizando ensaios tribológicos laboratoriais como disco sobre disco, pino sobre disco e ensaios em escala real. As recomendações citadas por Lewis et al. (2017) comportam as boas práticas de um ensaio tribológicos como cuidados com a retirada dos corpos de prova, acabamento superficial, temperatura, tempo de ensaio e parâmetros de contato.

Conforme já apresentado na Figura 40, neste trabalho, as graxas lubrificantes apresentadas foram avaliadas em termos de atrito, retentividade e desgaste por propagação de trincas de FCR, enquanto os modificadores de atrito foram avaliados apenas quanto a atrito e retentividade. Para tal, foram utilizados três equipamentos disco sobre disco distintos em dois laboratórios, conforme resumido na Tabela 16. Os locais de ensaios foram o laboratório de consumíveis da empresa LB Foster situado no Canadá e o laboratório do Grupo de Tribología y Superficies da Universidad Nacional de Colombia (UN). Os ensaios neste último laboratório foram realizados em parceria com a UN, onde os experimentos foram conduzidos por eles. As particularidades de cada equipamento e respectivas metodologias empregadas serão apresentadas nos subcapítulos seguintes.

Tabela 16: Tipos de ensaios realizados em cada um dos equipamentos disco sobre disco utilizados para avaliar o desempenho dos produtos lubrificantes

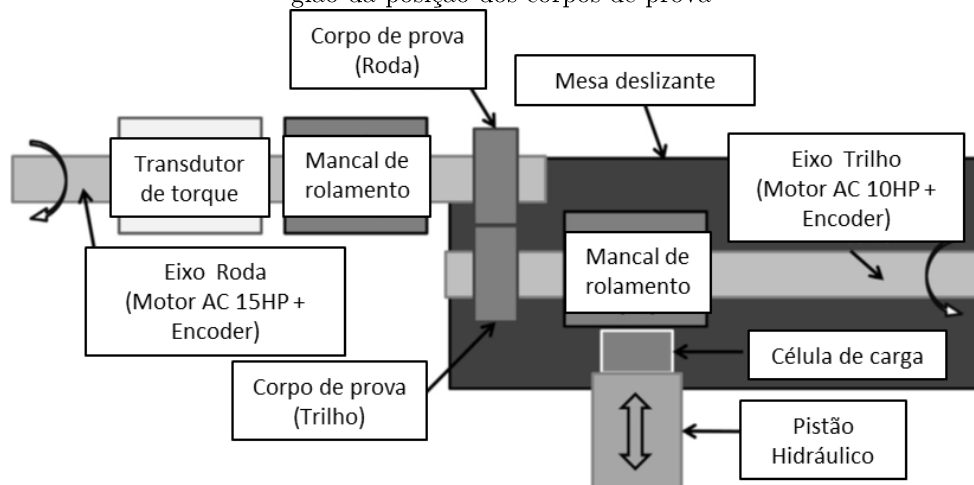
Equipamento	Produtos ensaiados	Ensaio Realizado		
		Atrito	Retentividade	Desgaste por FCR
Disco sobre Disco #1 (UN)	Graxas	X	X	X
Disco sobre Disco #2 (300mm - LBFoster)	Graxa		X	-
Disco sobre Disco #3 (LBFoster)	Mod. de Atrito	X	X	-

Fonte: Autoria própria (2020)

3.3.1 Equipamento Disco Sobre Disco #1 (UNC)

Um desenho esquemático e fotos do equipamento disco sobre disco do laboratório de tribologia e superfícies da UNC sede Medellín (MDDv2) estão apresentados na Figura 69. Uma breve descrição do equipamento é dada a seguir, porém maiores detalhes sobre o equipamento é apresentado no trabalho de Maya-Johnson (2014).

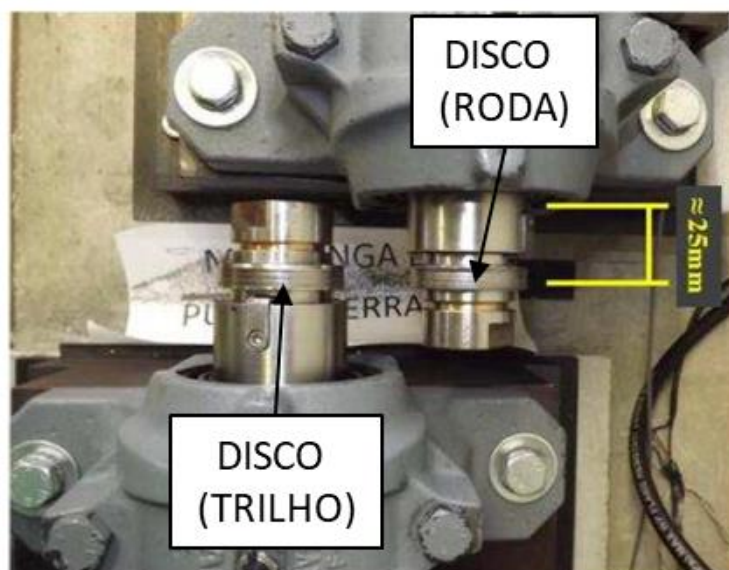
Figura 69: Equipamento disco sobre disco do laboratório de tribologia e superfícies da *Universidad Nacional de Colombia*. a) esquemático do equipamento, b) foto do equipamento, c) foto ampliada da região da posição dos corpos de prova



(a)



(b)



(c)

Fonte: Adaptado de Maya-Johnson (2014).

A partir da Figura 69a, verifica-se que a carga de ensaio é aplicada por um cilindro hidráulico que move a mesa deslizante sobre guias lineares em que o motor, eixo e corpo de prova estão fixados. Os corpos de prova (discos) utilizados neste equipamento possuem um diâmetro de 47mm. A força realizada pelo cilindro hidráulico é mensurada por uma célula de carga. A velocidade angular de cada um dos corpos de prova (discos) é controlada por motores independentes por meio de *encoders*. Esse controle independente dos eixos, permite definir a taxa de escorregamento para o ensaio. O torque é obtido por um transdutor de torque de 0 – 20 Nm de faixa de operação e com precisão de 0,1% do fundo de escala instalado no eixo do disco que representa a roda.

3.3.1.1 Materiais Disco Sobre Disco #1

Os corpos de prova utilizadas neste ensaio disco sobre disco foram retirados do boleto de um trilho novo (corpo) e da banda de rodagem de uma roda nova (contra corpo) que atualmente são utilizados na ferrovia EFVM operada pela VALE.

Os discos que simulam o trilho foram retirados de um trilho DHH370 (JIS E 1120, 2007) que possui tratamento térmico no boleto e tem uma microestrutura perlítica com composição química conforme Tabela 17. A dureza dessa especificação diz que o boleto deve apresentar valores entre 331 e 388 HBW (342-406HV).

Tabela 17 - Composição química nominal dos trilhos DHH 370

Elementos	Faixa de composição química permitida em (%m/m)
Carbono (C)	0,72 - 0,82
Manganês (Mn)	0,80 - 1,20
Fósforo (P)	Máx 0,03
Enxofre (S)	Máx 0,02
Silício (Si)	0,1 - 0,65
Cromo (Cr)	Máx 0,25
Vanádio (V)	Máx 0,03

Fonte – Adaptado de (JIS E 1120, 2007)

Já os discos que simulam a roda foram retirados de uma roda forjada classe C (AAR M-107/M108, 2011) que possui uma estrutura perlítica, conforme verificado por Chaves (2018). A composição química da roda em percentual de massa por elemento químico pré-definida na norma AAR (2009) é mostrada na Tabela 18.

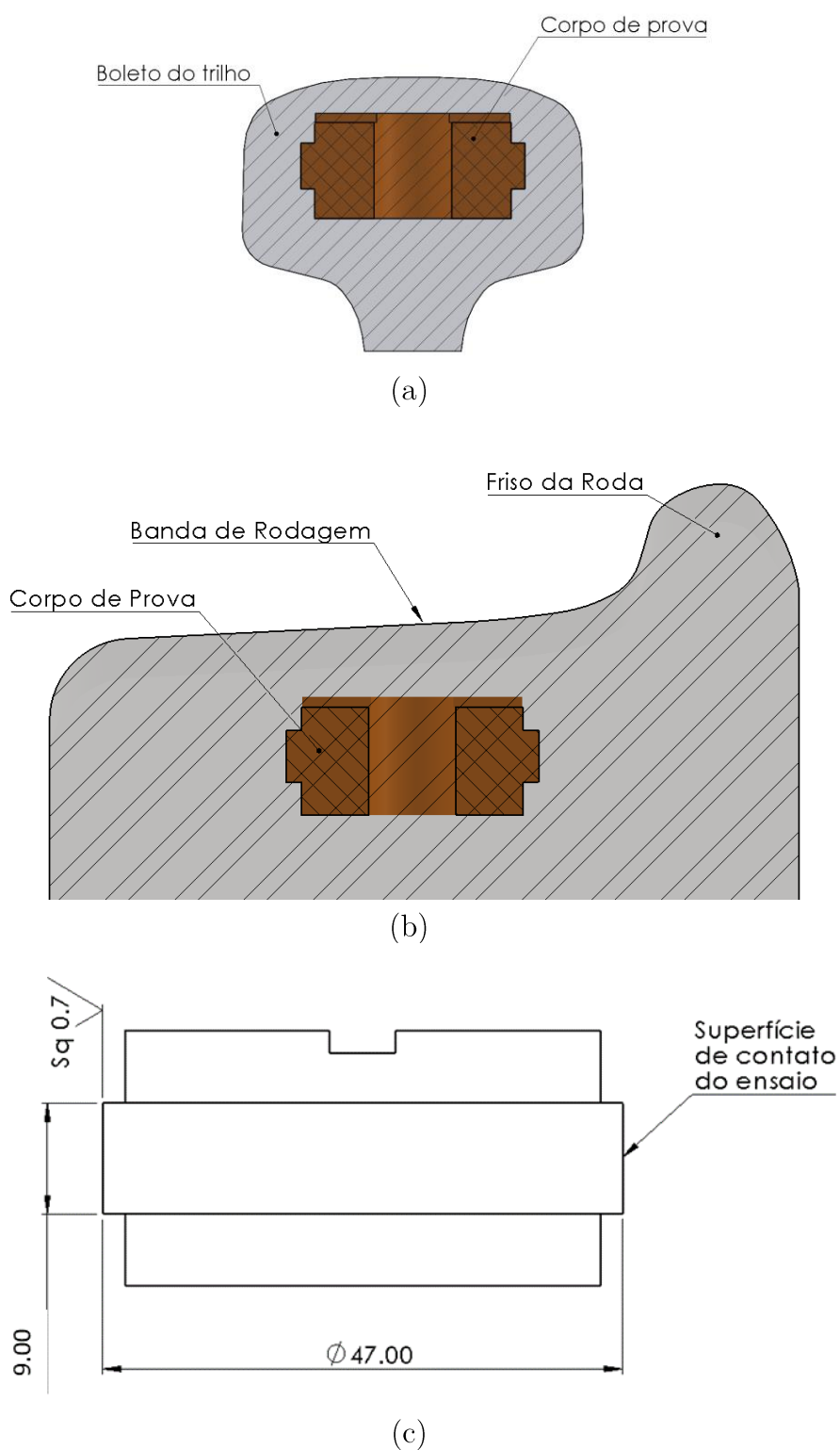
Tabela 18 – Composição química nominal da roda forjada classe C

Elementos	Faixa de composição química permitida em (%m/m)
Carbono (C)	0,67 - 0,77
Manganês (Mn)	0,60 - 0,90
Fósforo (P)	Máx 0,03
Enxofre (S)	Máx 0,02
Silício (Si)	0,15 - 1,00
Cromo (Cr)	Máx 0,25
Vanádio (V)	Máx 0,04

Fonte: AAR (2009)

A dureza dos discos de roda e trilho na região de contato foram medidas utilizando um durômetro EmcoTest com penetrador Vickers e carga de 30kgf. Foram realizadas três medições espaçadas uma da outra em 120° para 3 discos de roda e 3 discos de trilho. A dureza média dos discos extraídos do trilho é de 362 ± 2 HV e a dureza média dos discos extraídos das rodas é de 355 ± 5 HV. Considerando os casos extremos, ou seja, menor dureza de disco de trilho e maior dureza do disco de roda, e vice-versa, temos relações de dureza de 1,00 e 1,04, respectivamente. A variação de dureza observada nos discos, decorrente das variações de dureza das seções de rodas e trilhos, é pequena e não afeta os resultados em condições de contato lubrificadas, conforme demonstrado por (Viana, 2009). A região de onde os discos foram retirados do trilho e da roda, além das dimensões dos corpos de prova utilizados nesse ensaio estão apresentadas pela Figura 70.

Figura 70 Representação da região de onde foram removidos os a) discos de trilho, b) discos de rodas e c) suas dimensões



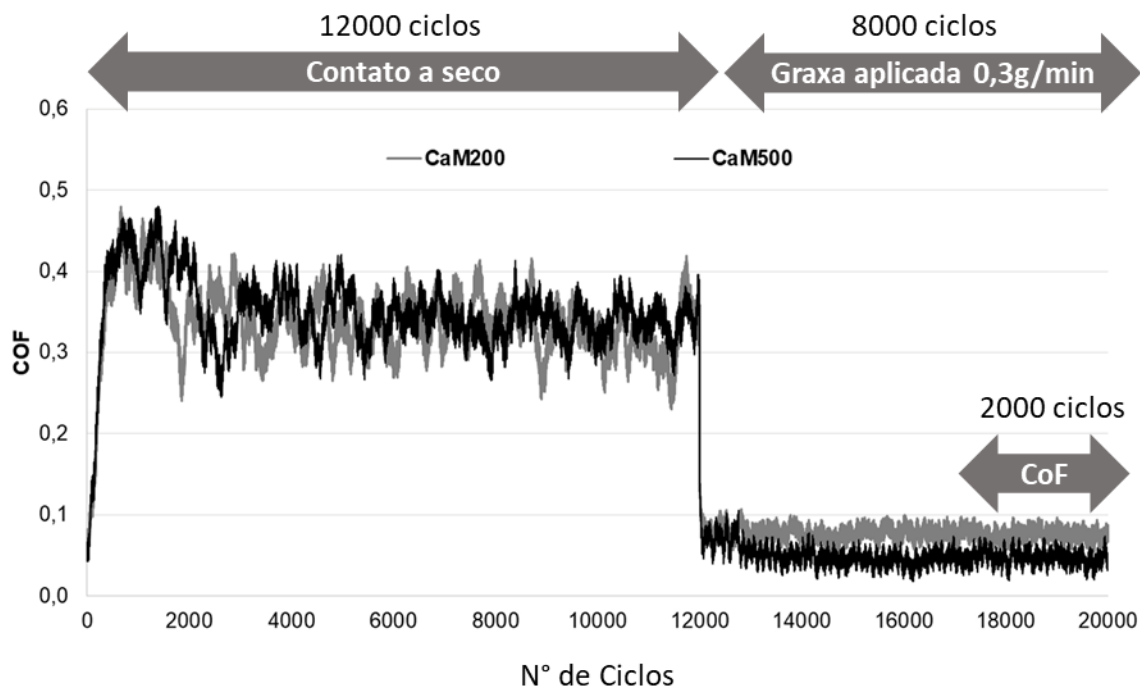
(c)
Fonte: Autoria própria (2020)

3.3.1.2 Metodologia Disco Sobre Disco #1

Conforme apresentado na Tabela 16, neste ensaio disco sobre disco buscou-se avaliar o desempenho das graxas lubrificantes quanto a desgaste por propagação de trinca de FCR, atrito e retentividade a partir de dois ensaios distintos, um para mensurar a perda de massa, denominado daqui em diante como ensaio de desgaste e outro para mensurar a retentividade dos lubrificantes, denominado como ensaio de retentividade.

O ensaio de desgaste consiste em 12.000 ciclos sob condições a seco para que ocorra a nucleação de trincas na superfície dos discos, seguido de mais 8.000 ciclos com lubrificação abundante sob uma taxa de aplicação de 0,3g/min para que se possa avaliar a propagação de trincas devido aos efeitos do lubrificante. Tais ensaios visam simular o efeito da graxa lubrificante nos *headchecks* observados em campo. A perda de massa de ambos os discos é mensurada ao se comparar a massa dos discos antes e após os ensaios utilizando uma balança com resolução de 0,01 mg. Antes e depois dos testes, todas as amostras foram limpadadas com uma escova de dente e sabão para remover resquícios de graxa e quaisquer partículas encrustadas na superfície. Posteriormente foram secadas em ar frio, inseridas em um banho de acetona no ultrassom e depois secadas de novo em ar frio. O atrito entre as diferentes graxas foi comparado calculando a média do coeficiente de atrito nos últimos 2.000 ciclos do ensaio de desgaste supramencionado. A Figura 71 apresenta a variação do coeficiente de atrito em função do número de ciclos para as graxas CaM200 e CaM500 como exemplo de curvas de atrito obtidas em um ensaio de desgaste.

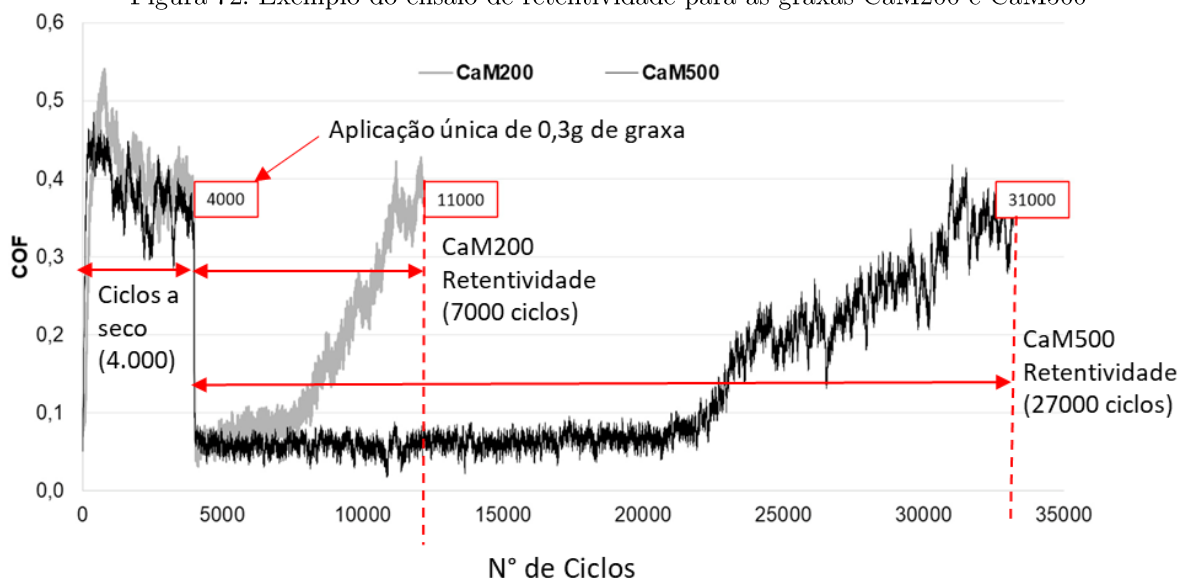
Figura 71: Exemplo do coeficiente de atrito em função do número de ciclos para as graxas lubrificantes CaM200 e CaM500 durante o teste de desgaste



Fonte: Autoria própria (2020)

O segundo ensaio, para avaliar a retentividade da graxa lubrificante, consiste em 4.000 ciclos a seco, seguido de uma única aplicação de 0,3g de graxa no contato. Logo após a aplicação da graxa, o coeficiente de atrito diminui drasticamente e, devido a não reposição do lubrificante, começa a aumentar progressivamente até chegar aos mesmos níveis do coeficiente de atrito observado antes da aplicação da graxa. O número de ciclos necessários entre a aplicação de graxa até atingir o coeficiente de atrito inicial (sem lubrificante) é definido como a retentividade da graxa. Este ensaio visa simular a retentividade em campo, ou seja, a distância do lubrificador em que a graxa assegura baixos valores de atrito. A Figura 72 apresenta a variação do coeficiente de atrito em função do número de ciclos para as graxas CaM200 e CaM500 como exemplo de curvas de atrito obtidas em um ensaio de retentividade.

Figura 72: Exemplo do ensaio de retentividade para as graxas CaM200 e CaM500



Fonte: Autoria própria (2020)

Para dois pares de disco se mediu a rugosidade em 4 pontos do disco após o período de teste a seco, ou seja, 4000 ciclos para ensaio de retentividade e 12000 ciclos para o ensaio de desgaste. A rugosidade das superfícies dos discos foi analisada para calcular a espessura específica de filme lubrificante (Equação (1)) e estimar o regime de lubrificação (Figura 22) em que cada uma das graxas operaram. Os parâmetros utilizados neste ensaio estão apresentados na Tabela 19.

Tabela 19: Condições do ensaio disco sobre disco # realizado no equipamento da Universidad Nacional de Colombia

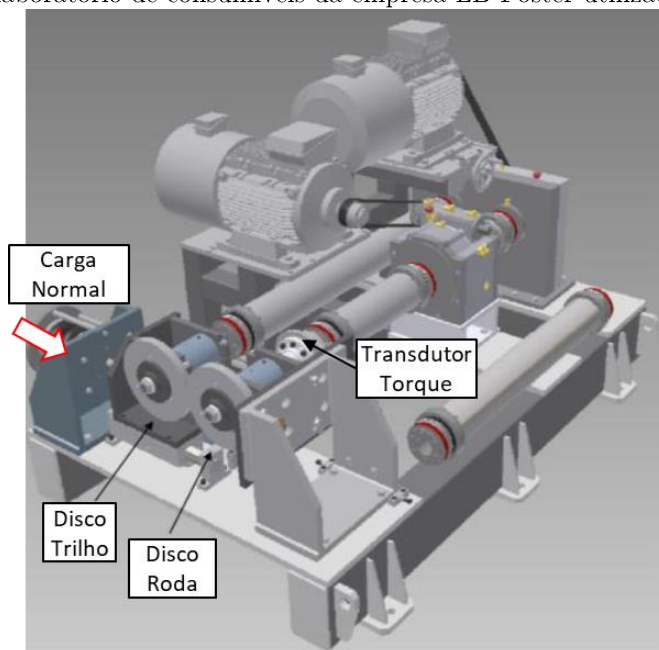
Parâmetro	Unidade	Valor	Observações
Lubrificantes	-	-	Graxas
Repetições	-	2	
Rugosidade Sq inicial	µm	0,7	Após a fabricação do corpo de prova
Rugosidade Sq	µm	1,6	Ensaio de desgaste
(após ensaio a seco)	µm	1,2	Ensaio de retentividade
Temperatura lubrificante	°C	23 ± 1	Obs: Temperatura ambiente
Diâmetro dos discos	mm	47	
Largura de contato	mm	10	
Pressão máxima de contato	MPa	1100	
Rotação do disco roda	rpm	400	
Rotação do disco trilho	rpm	396	
Velocidade tangencial	m/s	1,04	
Escorregamento	%	1,0	

Fonte: Aatoria própria (2020)

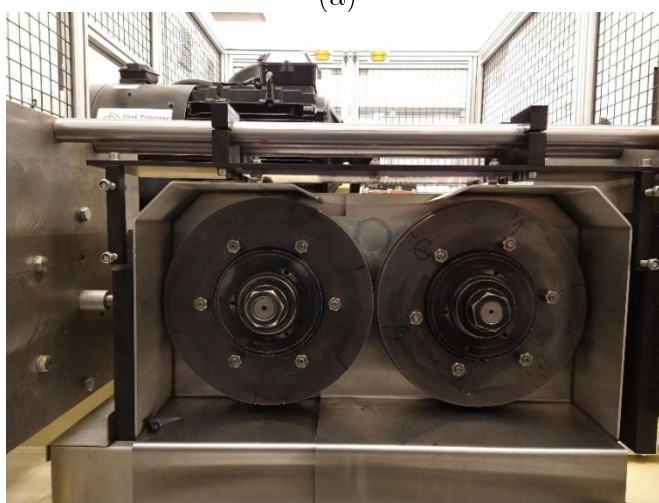
3.3.2 Equipamento Disco Sobre Disco #2 (LB Foster)

Outro equipamento disco sobre disco disponível no laboratório da empresa LB Foster possui os corpos de prova com 300mm de diâmetro e também é fabricado pela empresa Phoenix Tribology. O equipamento é similar com o apresentado na seção anterior, no entanto devido o maior diâmetro das amostras, ele é mais robusto. Neste equipamento, conforme apresentado na Tabela 16, buscou-se avaliar apenas o desempenho das graxas quanto a retentividade. O esquemático e a foto do equipamento disco sobre disco denominado TE 73H, estão apresentados na Figura 73. Uma breve descrição do equipamento é dada a seguir, sendo que maiores detalhes podem ser vistos em Gutsulyak, Stanlake e Qi (2020).

Figura 73: Desenho esquemático e fotografia do equipamento disco sobre disco (55mm de diâmetro) do laboratório de consumíveis da empresa LB Foster utilizado



(a)



(b)

Fonte: Adaptado de Gutsulyak, Stanlake e Qi (2020)

A carga de ensaio também é aplicada por uma bolsa pneumática com um transdutor de carga (incerteza de $\pm 0,25\%$). As velocidades angulares das amostras são controladas através de motores independentes, permitindo definir a taxa de escorregamento longitudinal a ser realizada no ensaio, sendo que o disco representando a roda é sempre mais rápido que o disco representando o trilho. *Encoders* de precisão são usados em ambos os motores para medir continuamente a velocidade angular (incerteza de $\pm 0,01\%$). Um transdutor de torque monitora continuamente o torque resultante do contato entre

os discos (incerteza de $\pm 0,03\%$) e esses valores são utilizados para determinar o coeficiente de atrito.

3.3.2.1 Materiais Disco Sobre Disco #2

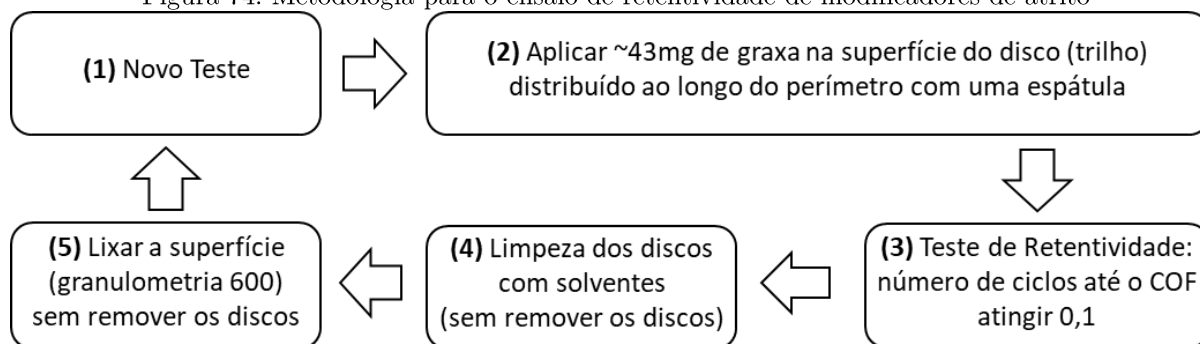
Devido as dimensões dos discos neste equipamento (300mm de diâmetro e largura de contato igual a 10mm), as amostras não puderam ser obtidas a partir de trilhos ou rodas. As amostras utilizadas foram fabricadas do aço AISI D2, os quais foram tratados termicamente para fornecer uma dureza final de 59-61 HRC. Esses discos são os mesmos que os apresentados no trabalho de Gutsulyak, Stanlake e Qi (2020).

3.3.2.2 Metodologia Disco Sobre Disco #2

Neste ensaio disco sobre disco buscou-se avaliar o desempenho das graxas lubrificantes quanto a retentividade e utilizou-se a metodologia que a LB Foster já utiliza para avaliar este tipo de produto.

A Figura 74 apresenta resumidamente na forma de diagrama de blocos a metodologia para os ensaios de retentividade. Devido à dureza dos discos e a metodologia a ser apresentada não envolver ensaios em condições de contato a seco, além da dificuldade em se substituir os discos, o mesmo par de discos são utilizados para todas as repetições dos ensaios.

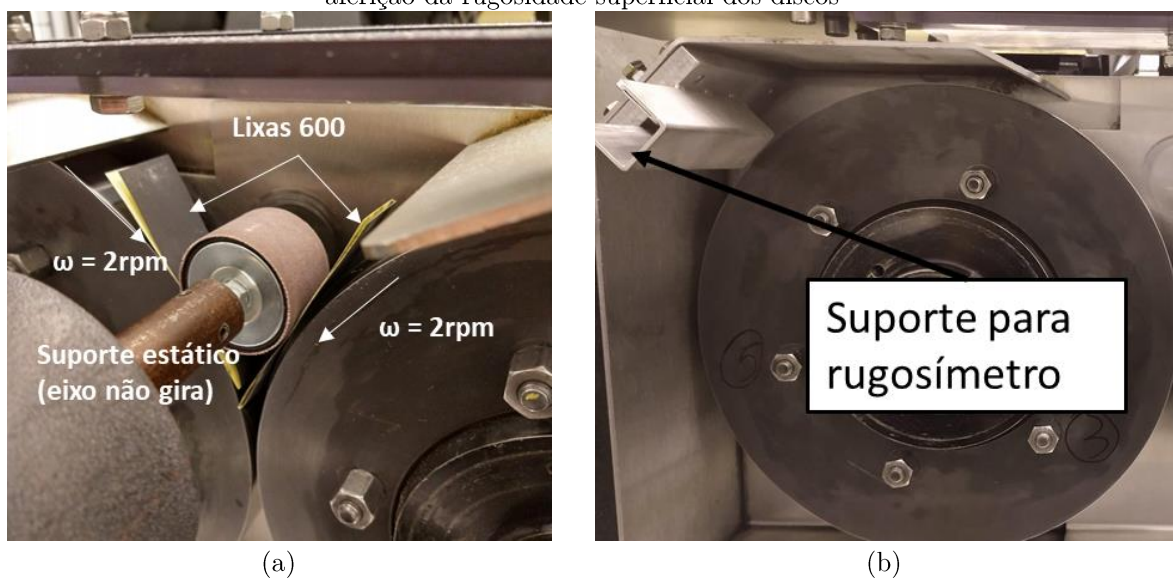
Figura 74: Metodologia para o ensaio de retentividade de modificadores de atrito



Fonte: Autoria própria (2020)

O lixamento da superfície dos discos é realizado com o auxílio de um suporte, conforme apresentado pela Figura 75a. As lixas de granulometria 600 são posicionadas na superfície de contato de ambos os discos e o suporte pressiona essa lixa sobre as amostras. O suporte é fixado na base da máquina com 4 bases magnéticas. O lixamento ocorre com os eixos girando a 2 rpm. A rugosidade superficial dos discos foi aferida no sentido transversal antes dos ensaios com um rugosímetro 2D Mitutoyo SJ-201, com auxílio de um suporte montado para permitir a medição sem a necessidade de remoção dos discos, conforme apresentado pela Figura 75b. Verificou-se que o parâmetro de rugosidade R_q (JIS 2001) dos discos em 4 regiões distintas com um *cutoff* de 0.25mm antes e após os ensaios. Os valores do parâmetro R_q permaneceram constantes, com valores médios de 0,1 μm .

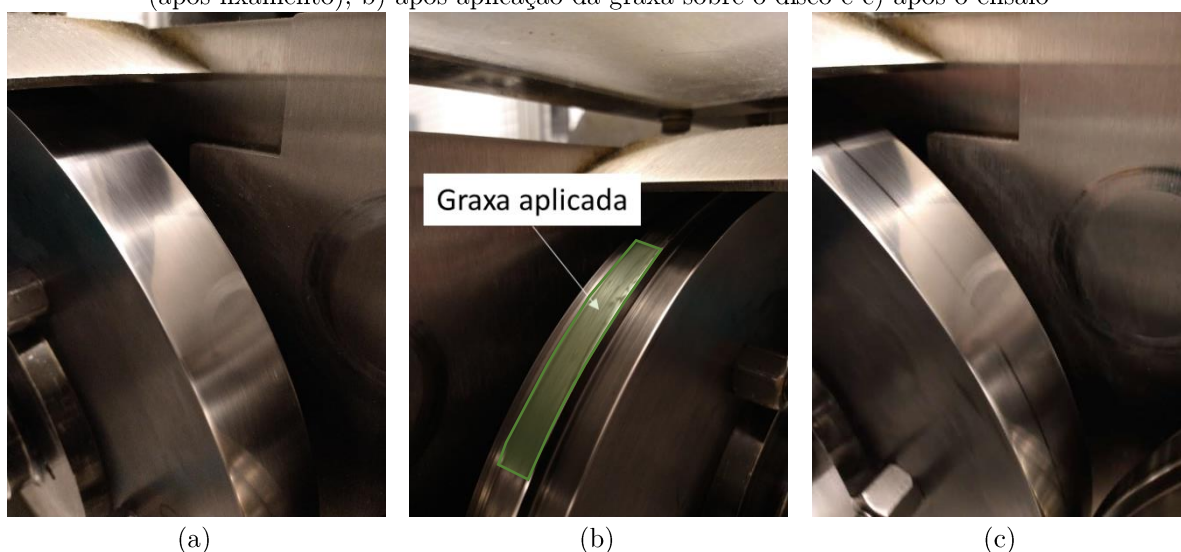
Figura 75: a) fotografia apresentando o processo de lixamento superficial das amostras b) suporte para aferição da rugosidade superficial dos discos



Fonte: Autoria própria (2020)

Antes do ensaio iniciar, aplicam-se ~43mg de graxa uniformemente sobre toda a superfície do disco (trilho) com o auxílio de uma espátula. A Figura 76 apresenta a fotografia dos discos antes do ensaio (após o lixamento), após a aplicação de graxa e após o término do ensaio. Percebe-se na Figura 76c que a superfície do disco apresenta uma marca de desgaste, porém após o lixamento (renovação da superfície) essa marca é removida (Figura 76a).

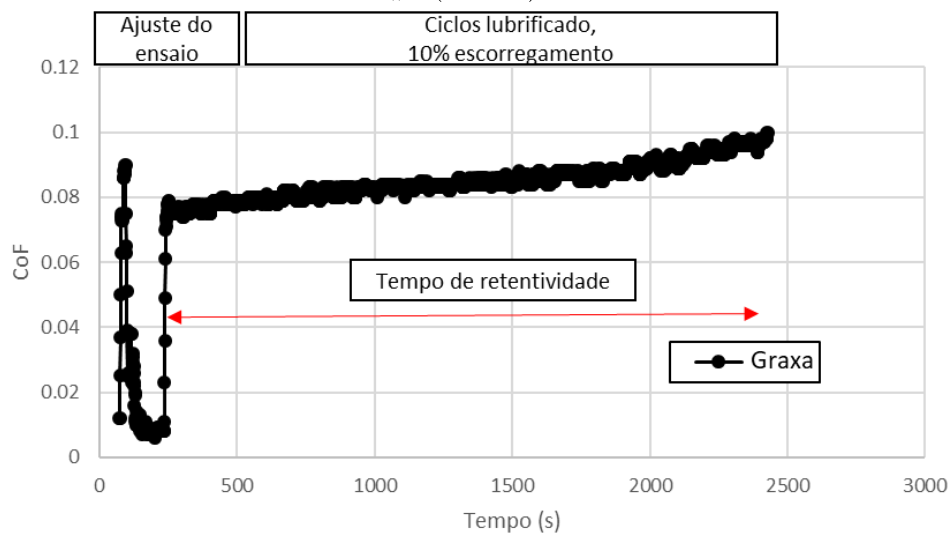
Figura 76: Fotografia apresentando as condições da superfície do disco (300mm). a) antes do ensaio (após lixamento); b) após aplicação da graxa sobre o disco e c) após o ensaio



Fonte: Autoria própria (2020)

A Figura 77 apresenta um exemplo típico da curva de coeficiente de atrito em função do tempo para o ensaio de retentividade.

Figura 77: Exemplo do ensaio de retentividade para graxas utilizando o equipamento disco sobre disco #3 (300mm)



Fonte: Autoria própria (2020)

Os parâmetros utilizados para o ensaio de retentividade estão apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 Condições do ensaio disco sobre disco #2 (diâmetro 300mm) realizado no equipamento do laboratório de consumíveis da LB Foster

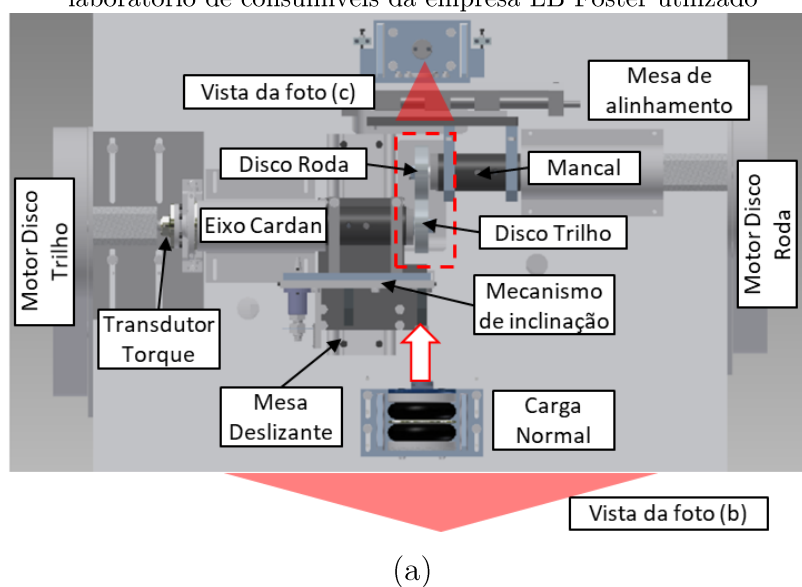
Parâmetro	Unidade	Valor	Observações
Lubrificantes	-	-	Apenas graxas (Tabela 9)
Repetições	-	2	
Rugosidade Sq inicial	μm	$0,1 \pm 0,017$	
Rugosidade Sq final	μm	$0,1 \pm 0,020$	
Temperatura	$^{\circ}\text{C}$	23 ± 1	Obs: Temperatura ambiente
Diâmetro dos discos	mm	300	
Largura de contato	mm	10	
Pressão máxima de contato	MPa	490	
Rotação do disco (roda)	rpm	100	
Rotação do disco (trilho)	rpm	90	
Velocidade tangencial	m/s	1,57	
Escorregamento	%	10	

Fonte: Autoria própria (2020)

3.3.3 Equipamento Disco Sobre Disco #3 (LB Foster)

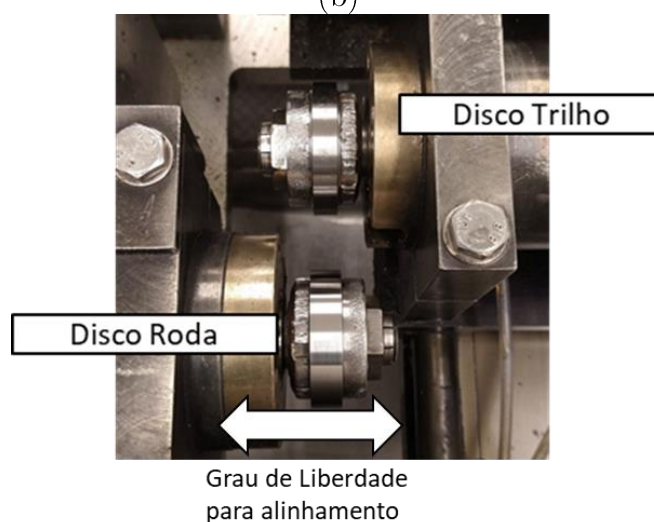
Conforme apresentado anteriormente, parte deste trabalho foi realizado no laboratório do grupo de consumíveis da empresa LB Foster. Neste laboratório a empresa possui dois equipamentos disco sobre disco similares, ambos fabricados pela Phoenix Tribology, porém um equipamento possui o corpo de prova com o diâmetro de 55mm (apresentado nesta subseção) e o outro com o diâmetro de 300mm (apresentado na próxima subseção). O esquemático e a foto do equipamento disco sobre disco com amostras de 55mm de diâmetro, denominado TE 72, estão apresentados na Figura 78. Uma breve descrição do equipamento é dada a seguir, maiores detalhes podem ser vistos em Gutsulyak, Stanlake e Qi (2020).

Figura 78: Desenho esquemático e fotografia do equipamento disco sobre disco (55mm de diâmetro) do laboratório de consumíveis da empresa LB Foster utilizado





(b)



(c)

Fonte: Adaptado de Gutsulyak, Stanlake e Qi (2020)

A Figura 78 mostra os diversos sistemas do equipamento. A carga de ensaio é aplicada por um atuador pneumático com um transdutor de carga (incerteza de $\pm 0,25\%$ do fundo de escala). As velocidades angulares das amostras são controladas através de motores independentes, permitindo definir a taxa de escorregamento longitudinal a ser realizada no ensaio, sendo que o disco representando a roda é sempre mais rápido que o disco representando o trilho. *Encoders* de precisão são usados em ambos os motores para medir continuamente a velocidade angular (incerteza de $\pm 0,01\%$). Um transdutor de torque monitora continuamente o torque resultante do contato entre os discos (incerteza de $\pm 0,03\%$) e esses valores são utilizados para determinar o coeficiente de atrito.

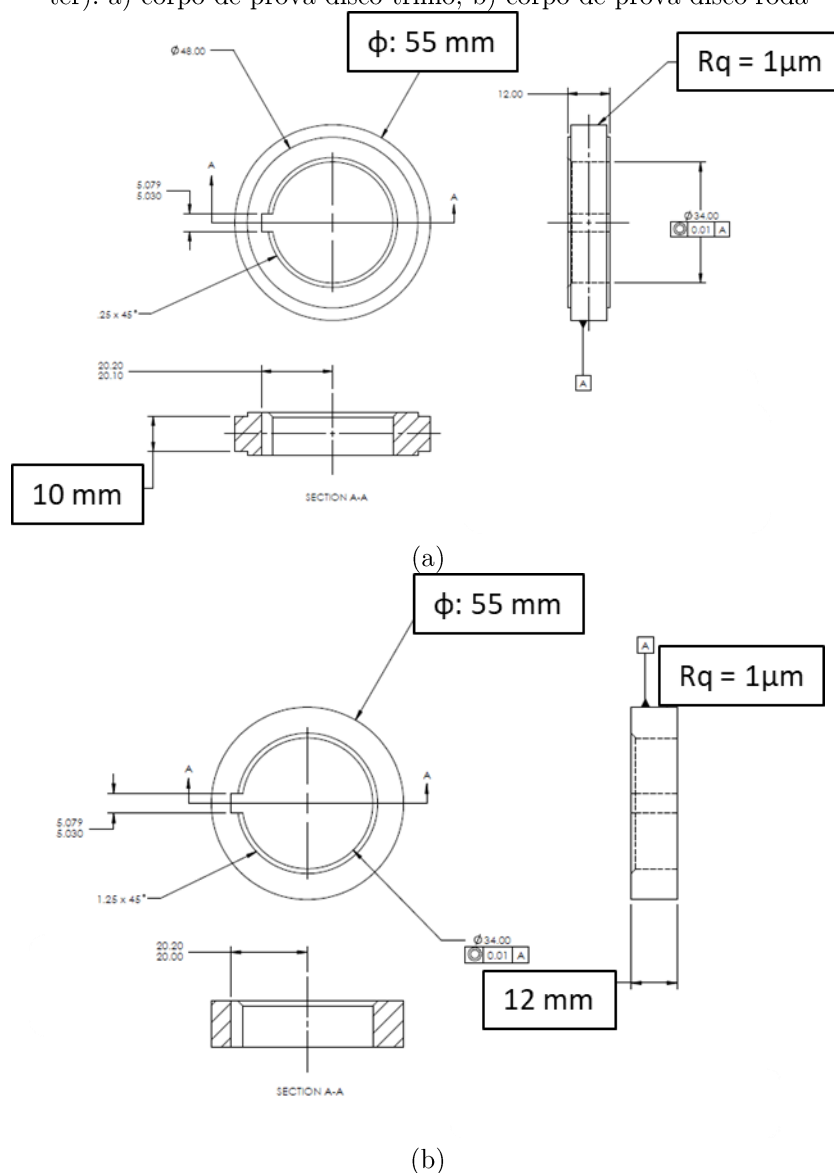
A presença do eixo cardan e a mesa deslizante permitem que amostras de diferentes diâmetros sejam empregadas. A máquina possui uma mesa de alinhamento que permite ajustar com precisão o alinhamento entre os discos em contato (Figura 78c). Uma outra característica do equipamento é que ele permite regular o ângulo de inclinação entre os discos. Essa inclinação é relevante pois adiciona uma componente de escorregamento lateral junto ao escorregamento longitudinal que é controlado pelas velocidades tangenciais dos discos. No entanto, essa funcionalidade não foi implementada neste trabalho, uma vez que ainda não estava habilitada durante o decorrer deste trabalho.

3.3.3.1 Materiais Disco Sobre Disco #3

Diferentemente dos corpos de prova apresentados utilizados nos ensaios realizado em Medellin, neste equipamento ambos os discos em contato foram removidos apenas do topo de boleto, conforme protocolo interno de testes da empresa. O trilho em que as amostras foram obtidas é o DHH 370, com a mesma composição apresentada na Tabela 17, enquanto a região de onde esses discos foram obtidos é a mesma apresentada pela Tabela 18.

As dimensões do corpo de prova utilizados neste equipamento estão apresentadas na Figura 79.

Figura 79: Dimensões dos corpos de prova do equipamento disco sobre disco #2 (55mm – LB Foster). a) corpo de prova disco trilho; b) corpo de prova disco roda

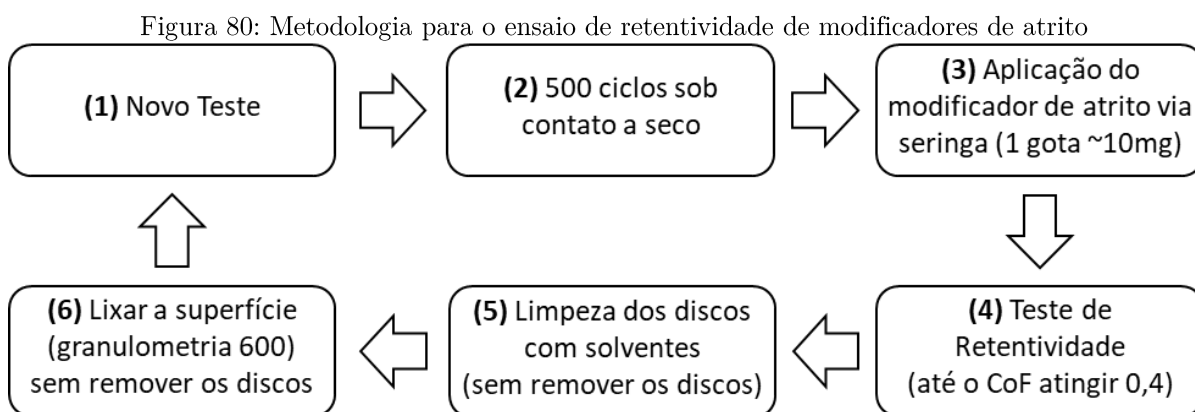


Fonte: Autoria própria (2020)

3.3.3.2 Metodologia Disco Sobre Disco #3

Conforme apresentado na Tabela 16, neste ensaio disco sobre disco buscou-se avaliar o desempenho dos modificadores de atrito a base de água quanto a retentividade e coeficiente de atrito em função da taxa de escorregamento. Em ambos os ensaios, seguiu-se a metodologia que a LB Foster já utiliza para avaliação de modificadores de atrito.

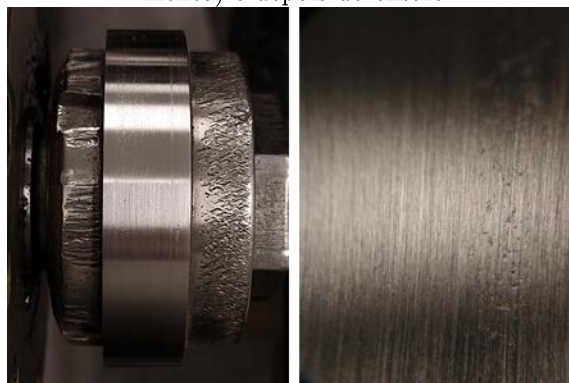
A Figura 80 apresenta resumidamente na forma de diagrama de blocos a metodologia para os ensaios de retentividade. É importante citar que foi utilizado o mesmo disco para as repetições dos ensaios, por isso a necessidade de lixar a superfície dos discos após cada ensaio.



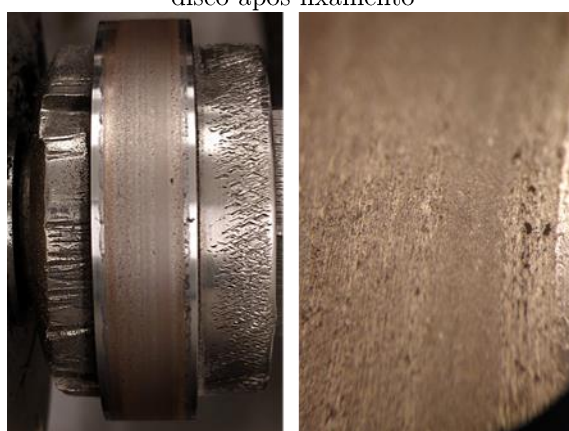
Fonte: Autoria própria (2020)

O lixamento da superfície dos discos é realizado manualmente com uma lixa de granulometria 600, onde os discos são rotacionados manualmente a aproximadamente 40 rpm enquanto se pressiona a lixa sobre o disco. Isso é realizado em ambos os discos (disco roda e disco trilho). A Figura 81 apresenta uma foto dos discos antes e depois dos ensaios para ilustrar esse processo de lixamento. É possível verificar que os discos após o ensaio apresentam uma superfície oxidada, no entanto, após o processo de lixamento, a superfície é renovada. As rugosidades superficiais dos discos não foram aferidas, uma vez que antes da aplicação do produto, os discos eram colocados em contato a seco mudando sua topografia.

Figura 81: Fotografia apresentando as condições da superfície do disco antes do ensaio (após lixamento) e depois do ensaio



disco após lixamento

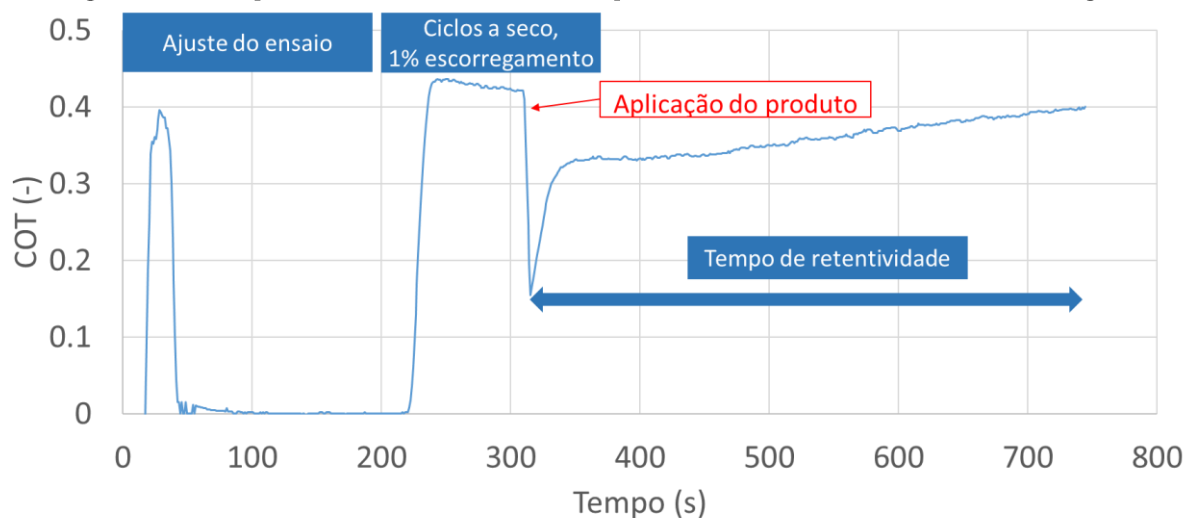


disco após ensaio

Fonte: Aatoria própria (2020)

Uma curva característica do ensaio de retentividade é apresenta na Figura 82. O primeiro pico de atrito é decorrente do contato inicial dos discos, que logo se ajustam fazendo com que o coeficiente de atrito tenda a zero, visto que no começo do ensaio os discos têm a mesma velocidade tangencial. Após a fase de estabilização (período de 3 minutos) o escorregamento desejado de 1% é imposto e mantido por mais 2 minutos. Ao se completar 5 minutos de teste 10mg de modificador de atrito são adicionadas ao contato. Neste momento observa uma redução brusca do coeficiente de atrito a seco para o coeficiente de atrito com modificador de atrito. O ensaio é encerrado quando o coeficiente de atrito atinge valor de 0,4.

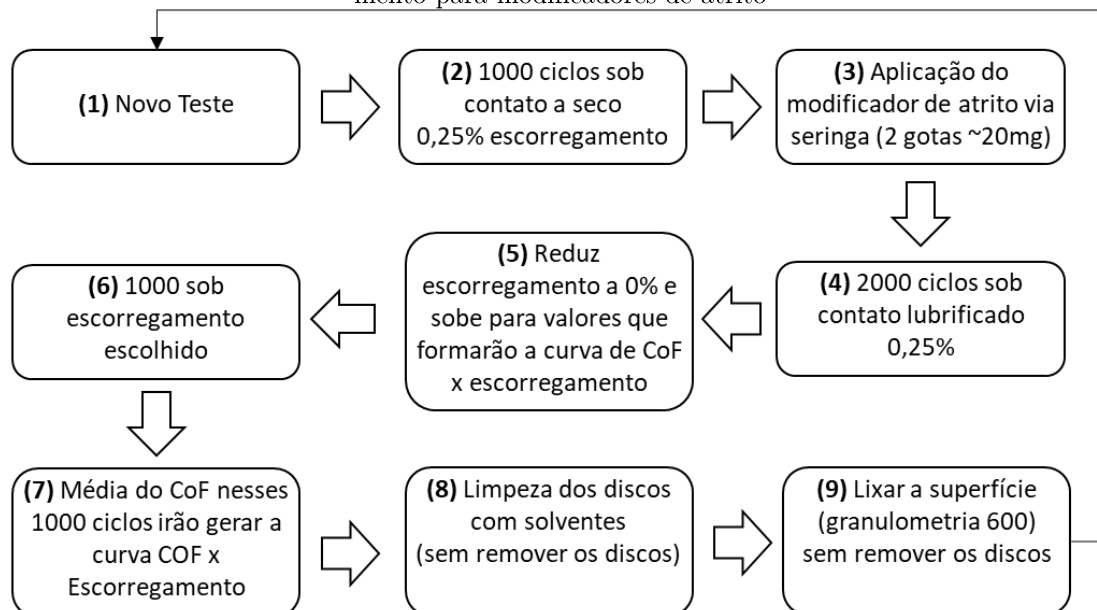
Figura 82: Exemplo do ensaio de retentividade para modificadores de atrito a base de água



Fonte: Autoria própria (2020)

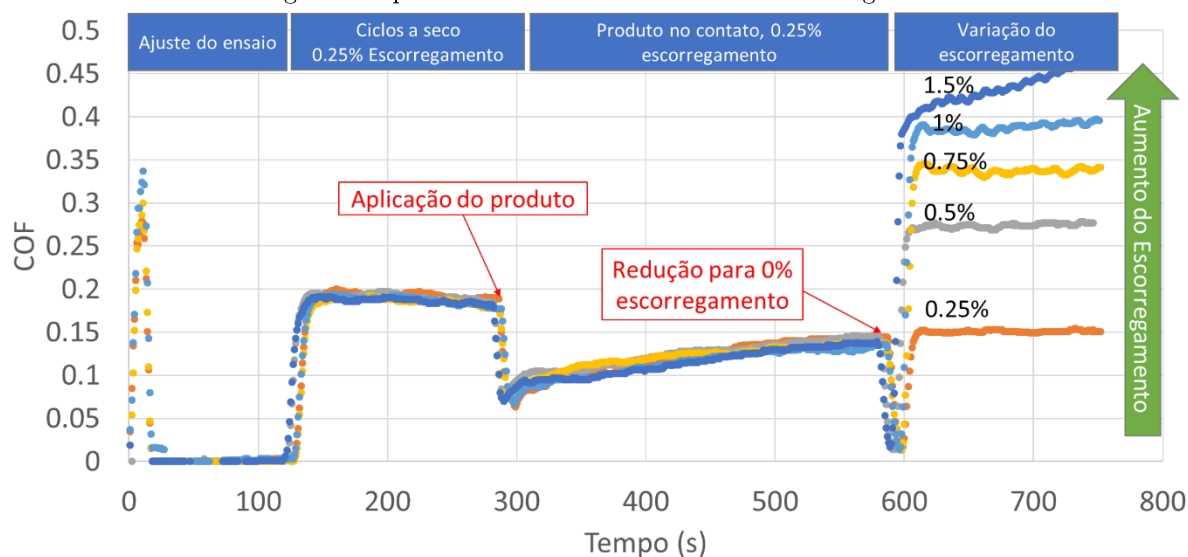
O ensaio de coeficiente de atrito em função da taxa de escorregamento, conhecido como curva de Kalker, é representado pelo diagrama de blocos da Figura 83. Para melhor visualização do ensaio, a Figura 84 apresenta as curvas de atrito obtidas seguindo tal metodologia para 0,25%, 0,5%, 0,75%, 1% e 1,5% de escorregamento. O valor médio do coeficiente de atrito nos últimos 1000 segundos de teste para cada percentual de escorregamento é usado para construção da curva de Kalker (1967) apresentada na Figura 85.

Figura 83: Metodologia para gerar a curva de coeficiente de atrito em função da taxa de escorregamento para modificadores de atrito



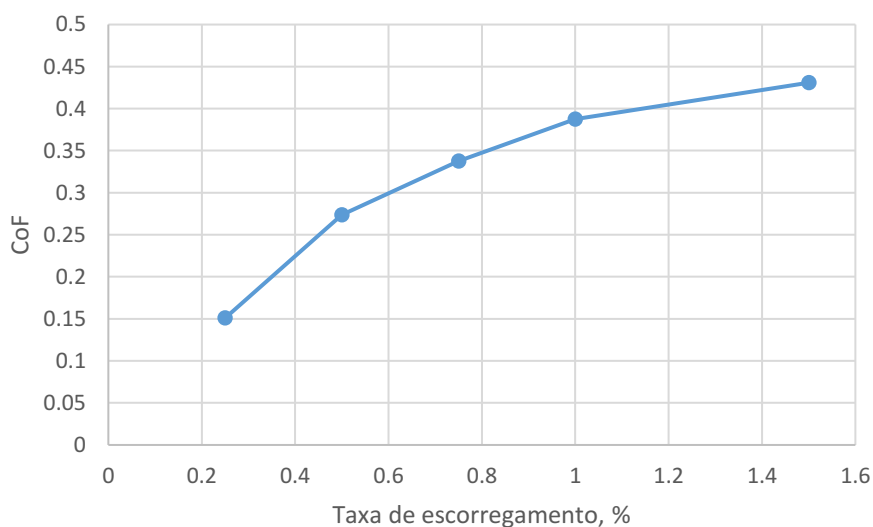
Fonte: Autoria própria (2020)

Figura 84: Exemplo do ensaio geração da curva de coeficiente de atrito em função da taxa de escorregamento para modificadores de atrito a base de água



Fonte: Autoria própria (2020)

Figura 85: Curva de coeficiente de atrito em função da taxa de escorregamento típica de modificadores de atrito à base de água obtida conforme procedimento descrito na Figura 84



Fonte: Autoria própria (2020)

Os parâmetros utilizados para o ensaio de retentividade e curva de atrito em função da taxa de escorregamento estão apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 Condições do ensaio disco sobre disco #3 (LB Foster) r

Parâmetro	Unidade	Valor	Observações
Lubrificantes	-	-	Modificadores de atrito
Repetições	-	2	
Rugosidade Sq inicial	µm	1	Após a fabricação do corpo de prova
Temperatura	°C	23 ± 1	Obs: Temperatura ambiente
Diâmetro dos discos	mm	55	
Largura de contato	mm	10	
Pressão máxima de contato	MPa	800	
Rotação nominal do disco roda	rpm	400	
Rotação do disco trilho	rpm	399; 397; 394; 390; 384	Obs: em função do tipo de ensaio e taxa de escorregamento.
Velocidade tangencial	m/s	1,15	
Escorregamento	%	1,0 0,25; 0,5; 0,75; 1,00; 1,5	Ensaio de Retentividade Curva de atrito em função da taxa de escorregamento

Fonte: Autoria própria (2020)

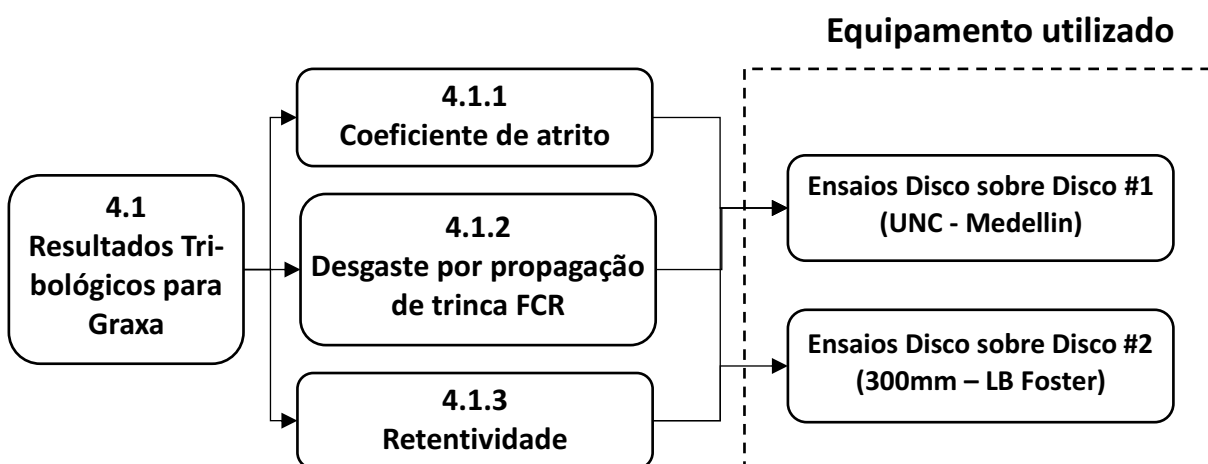
4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados dos ensaios tribológicos realizados nos diferentes equipamentos disco sobre disco apresentados na seção 3.3. Esses resultados serão apresentados separadamente entre graxas e modificadores de atrito.

4.1 RESULTADOS TRIBOLÓGICOS PARA GRAXAS

A Figura 86 apresenta a disposição de como os resultados serão apresentados e discutidos para os ensaios disco sobre disco realizados com graxa. Os ensaios de coeficiente de atrito e desgaste por propagação de trincas de FCR foram realizados apenas no equipamento disco sobre disco da UN, enquanto o ensaio de retentividade que foram utilizados ambos os equipamentos (UN e LB Foster).

Figura 86: Fluxograma da apresentação dos resultados obtidos para graxas



Fonte – Autoria própria (2020)

Todos os ensaios realizados no equipamento disco sobre disco #1 foram realizados à temperatura ambiente ($23 \pm 1^\circ\text{C}$), com velocidade de rotação do disco mais rápido igual a 400 rpm, escorregamento longitudinal de 1% e pressão de contato de 1100 MPa.

Para os ensaios de desgaste, dos quais foram extraídos os valores de atrito de perda de massa (seção 4.1.2), se utilizou lubrificação abundante (0,3 g/min) por 8000 ciclos após a realização de 12000 ciclos a seco. Já para o ensaio de retentividade, de onde foram extraídos apenas os valores de retentividade, utilizou-se apenas uma aplicação de 0,3 gramas de graxa após a realização de 4000 ciclos a seco. Em decorrência do número distinto de ciclos a seco entre os ensaios de desgaste e retentividade, a rugosidade composta dos discos também foi diferente.

Já para o equipamento disco sobre disco #2 as condições de operação estão apresentadas no subcapítulo 3.3.2 e Tabela 20.

A fim de auxiliar o leitor na discussão dos resultados para graxas, todas os parâmetros supramencionados, juntamente com a viscosidade das graxas à temperatura de operação são apresentados na Tabela 22, ou referenciados por esta. Tais valores foram utilizados para resolver as equações (1 e 14 a fim de obter os valores de espessura específica de filme lubrificante (Λ) após a introdução do lubrificante nos ensaios de retentividade e de desgaste para o equipamento disco sobre disco #1 e nos ensaios de retentividade do equipamento disco sobre disco #2. Os valores de espessura de específica de filme, juntamente com os valores de viscosidade das graxas são apresentados na Tabela 22. A apresentação destes valores é relevante visto que o regime de lubrificação, definido pela espessura específica de filme, está diretamente relacionado ao atrito e ao desgaste.

Tabela 22: Formulação das graxas, viscosidade do óleo base e espessura específica de filme (Λ) para todos os ensaios relativos a graxa

Características de formulação	Graxa LiM50	Graxa LiM200	Graxa LiM500	Graxa CaM50	Graxa CaM200	Graxa CaM500	Graxa LiCaM220	Graxa LiMS460
Classe	Form. UTFPR	Form. UTFPR	Form. UTFPR	Form. UTFPR	Form. UTFPR	Form. UTFPR	Comercial	Comercial Mineral
Tipo do óleo base	Mineral	Mineral	Mineral	Mineral	Mineral	Mineral	Mineral	+ Sintético
Viscosidade do óleo base à 40°C (mm ² /s)	50	200	500	50	200	500	220	460
Viscosidade do óleo base à 100°C (mm ² /s)	4.1	15.5	32.6	4.1	15.5	32.6	19	36
Tipo de espessante	Sabão de Lítio	Sabão de Lítio	Sabão de Lítio	Sabão de Cálcio	Sabão de Cálcio	Sabão de Cálcio	Lítio + Cálcio	Lítio
Concentração (%m/m) de espessante ⁴	10	8,5	7	10	8,5	7	-	-
Concentração (%m/m) e tipo de aditivos sólidos	4% (<i>MoS</i> ₂ + Grafite)	4% (<i>MoS</i> ₂ + Grafite)	4% (<i>MoS</i> ₂ + Grafite)	4% (<i>MoS</i> ₂ + Grafite)	4% (<i>MoS</i> ₂ + Grafite)	4% (<i>MoS</i> ₂ + Grafite)	5% <i>MoS</i> ₂	4% (<i>MoS</i> ₂ + Grafite)
Espessura de filme para equipamento disco sobre disco #1 (UNC)								
Λ nominal @ Ensaio de retentividade	0,77	1,99	3,89	0,77	1,99	3,89	2,02	3,44
Λ nominal @ Ensaio de desgaste	0,58	1,49	2,92	0,58	1,49	2,92	1,58	2,51
Espessura de filme para equipamento disco sobre disco #2 (LB Foster)								
Λ nominal @ Ensaio de retentividade	8	19,2	31,7	8	19,2	31,7	20,1	30,3

Fonte: Autoria própria (2020)

4.1.1 Atrito

A Figura 87 apresenta o coeficiente de atrito médio dos últimos 2000 ciclos de ensaio em função da viscosidade do óleo base para cada uma das graxas avaliadas e da espessura específica nominal de filme lubrificante. O tamanho do marcador está associado ao desvio padrão das medições de atrito e, não indicam uma faixa de variação da visco-

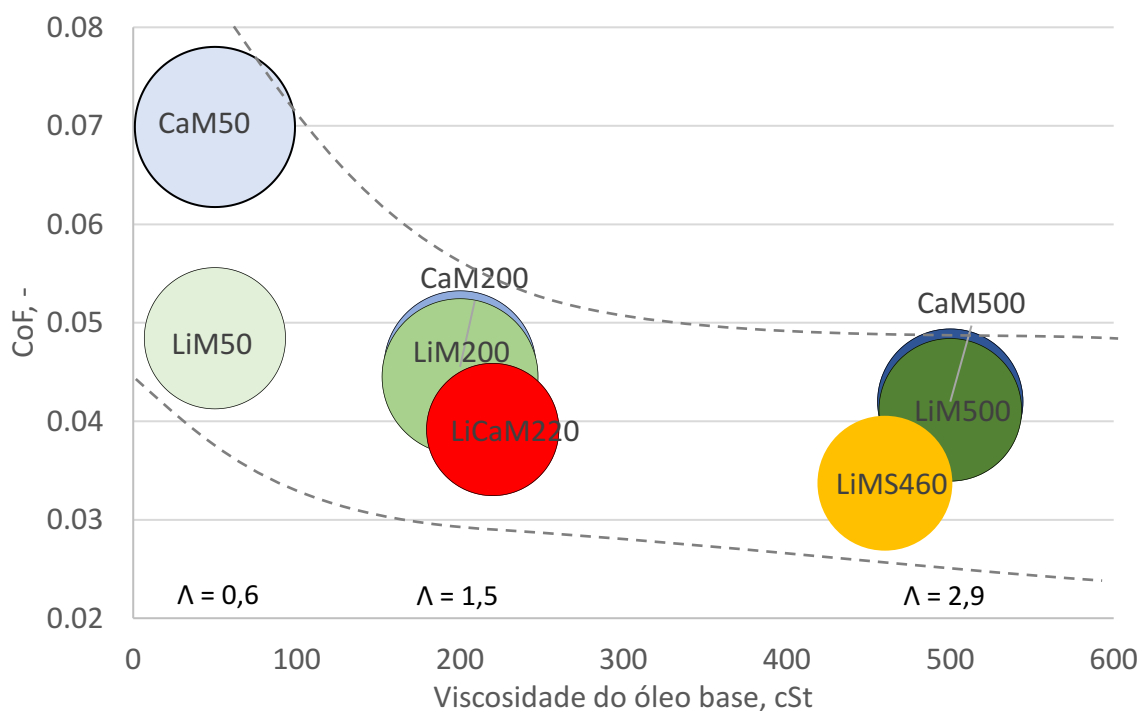
⁴ Valores aproximados

sidade cujo valor corresponde somente ao valor do centro dos círculos. As cores do marcador estão relacionadas ao espessante. As graxas formuladas com espessante de lítio são representadas em tons de verde, enquanto as graxas formuladas com espessante de cálcio são apresentadas em azul. Apenas duas graxas têm formulações distintas, a graxa LiM220 cujo espessante é uma mistura de lítio e cálcio e cujo pacote de aditivos é desconhecido, e a graxa LiMS460, que apresenta óleo sintético misturado ao óleo mineral em sua composição. É importante mencionar que esta é a única diferença entre as graxas LiMS460 e LiM500. A análise desta Figura apresenta claramente um decréscimo do coeficiente de atrito com o aumento da viscosidade. Além disso, verifica-se que ao reduzir a viscosidade dos lubrificantes, transitando as condições de operação do regime completo para o regime limítrofe, o efeito do espessante torna-se mais relevante. De fato, para as graxas com viscosidade de 50 cSt ($\Lambda = 0,58$), verifica-se que o coeficiente de atrito da graxa formulada com cálcio é superior ao coeficiente de atrito da graxa formulada com lítio.

É importante mencionar que todos os testes foram realizados com velocidade tangencial moderada ($U \approx 1$ m/s). Tal velocidade é superior a qualquer velocidade de transição (transição em que o filme é composto predominantemente pelo espessante para região em que é caracterizada predominantemente pelo óleo base) reportada na literatura para medições de espessura de filme realizadas a temperatura ambiente. No entanto, Kanazawa et al. (2017) mostraram que é a espessura de filme e não a velocidade que define o ponto de transição. Baseado nos trabalhos de Chinas-Castillo e Spikes (2004) e Chinas-Castillo e Spikes (2005). Kanazawa et al. (2017) verificaram que a razão entre tamanho de partículas e espessura de filme é o fator que determina o ponto de transição. Além disso, Cyriac et al. (2016) mostraram experimentalmente que mesmo quando as partículas de espessante ou aditivos sólidos não afetam a forma tradicional da curva de atrito ($h \propto U^{0,67}$), estas alteram os valores da espessura de filme lubrificante. Levando em consideração a baixa espessura específica nominal de filme ($\Lambda = 0,58$) para as graxas LiM50 e CaM50, e considerando que estas graxas tem o mesmo óleo base e pacote de

aditivos, é consequente indicar que o espessante tem um papel fundamental no coeficiente de atrito. Logo, a observação que graxas espessadas com cálcio apresentam maior coeficiente que graxas espessadas com lítio, já verificadas por outros pesquisadores (DE LAURENTIS et al, 2016; GONÇALVES et al., 2017), pode ser atribuída a maior probabilidade das partículas de espessante de cálcio passarem pelo contato e se depositarem formando filmes mais espessos que as graxas de lítio (CYRIAC et al., 2016), os quais possuem intrinsecamente maiores valores de atrito. Para maiores valores de espessura específica nominal de filme lubrificante ($\Lambda > 1,5$), o coeficiente de atrito das graxas com o mesmo pacote de aditivos e viscosidade do óleo base (LiM200-Ca200; LiM500-CaM500), apresentam valores muito semelhantes do coeficiente de atrito, indicando que os testes foram realizados acima do ponto de transição, ou seja, na região dominada pelas propriedades do óleo lubrificante, onde o efeito do espessante é menos relevante. De fato, até mesmo as graxas comerciais com formulação desconhecida apresentam valores de atrito semelhantes às graxas de formulação própria com viscosidade similar, o que reforça as hipóteses apresentadas.

Figura 87: Coeficiente de atrito em função da viscosidade do óleo base das graxas

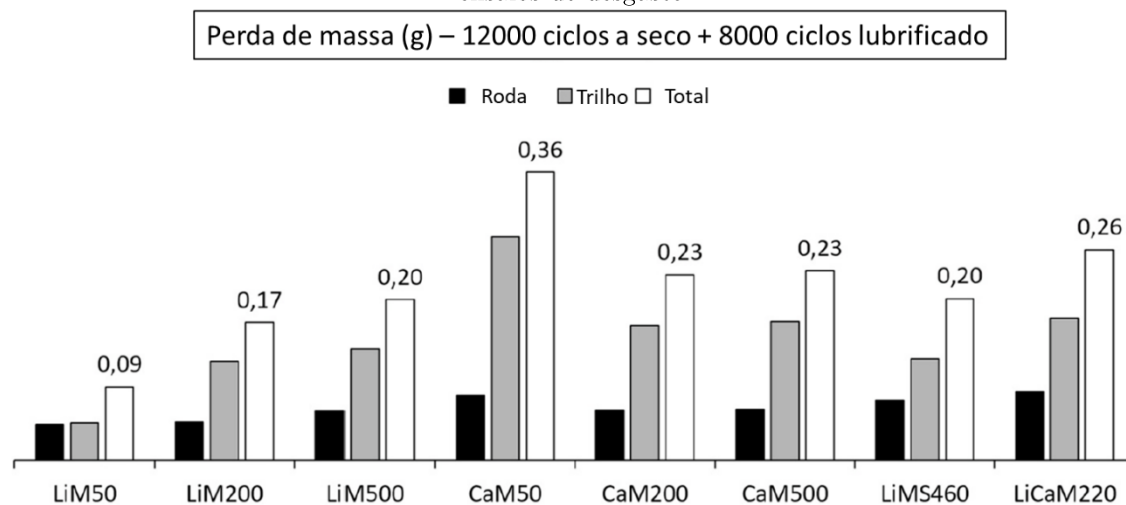


Fonte: Autoria própria (2020)

4.1.2 Desgaste por Propagação de Trincas por FCR

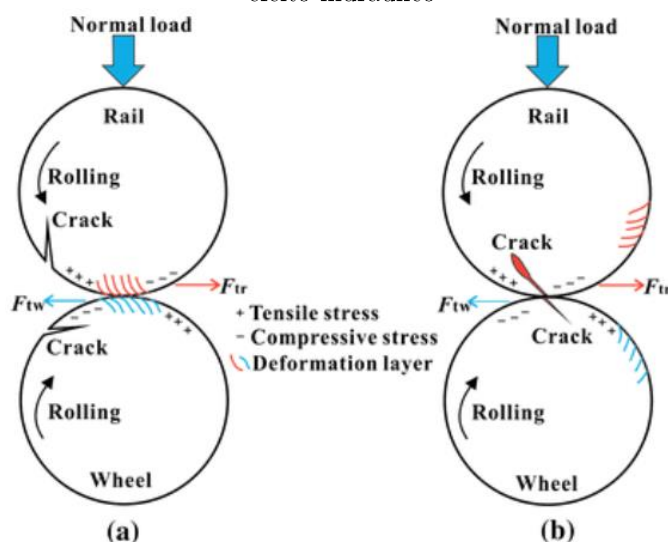
A Figura 92 apresenta a perda de massa dos discos de roda e de trilho após a realização do teste de desgaste para todas as graxas avaliadas. Esta figura mostra claramente que os discos de trilho apresentaram maior perda de massa que os discos de roda. Isto ocorre porque o principal mecanismo de remoção de material é fadiga de contato de rolamento, que ocorre devido a iniciação de trincas, que procede com a sua propagação devido à incapacidade do material continuar se deformando elasticamente (*ratchetting*) até que ocorra a delaminação do material severamente deformando. As trincas são originadas nos primeiros 12000 ciclos a seco, e então, ao se introduzir graxa no contato, a taxa de propagação das trincas pré-existentes é significativamente acelerada nos discos de trilho devido ao efeito hidráulico combinado com tensões cisalhantes próximas a superfície dos corpos de prova. Tal fenômeno é bem representado pela Figura 89 (WANG et al, 2017), que mostra que para o disco feito de roda as tensão compressivas tendem a fechar a entra das trincas pré-existentes ligeiramente antes da trinca passar pela região de alta pressão, evitando que o lubrificante entre na trinca. Já para os discos de trilho, tensões trativas tendem a abrir as trincas pré-existentes promovendo entrada de graxa nas trincas, que ao passarem pela zona de alta pressão são pressurizadas para dentro da trinca, acelerando sua propagação.

Figura 88 – Perda de massa dos discos de roda e trilho juntamente com o desgaste total medido nos ensaios de desgaste



Fonte: Autoria própria (2020)

Figura 89: Efeito do tipo de tensão na propagação de trincas nos discos de roda e trilho devido ao efeito hidráulico



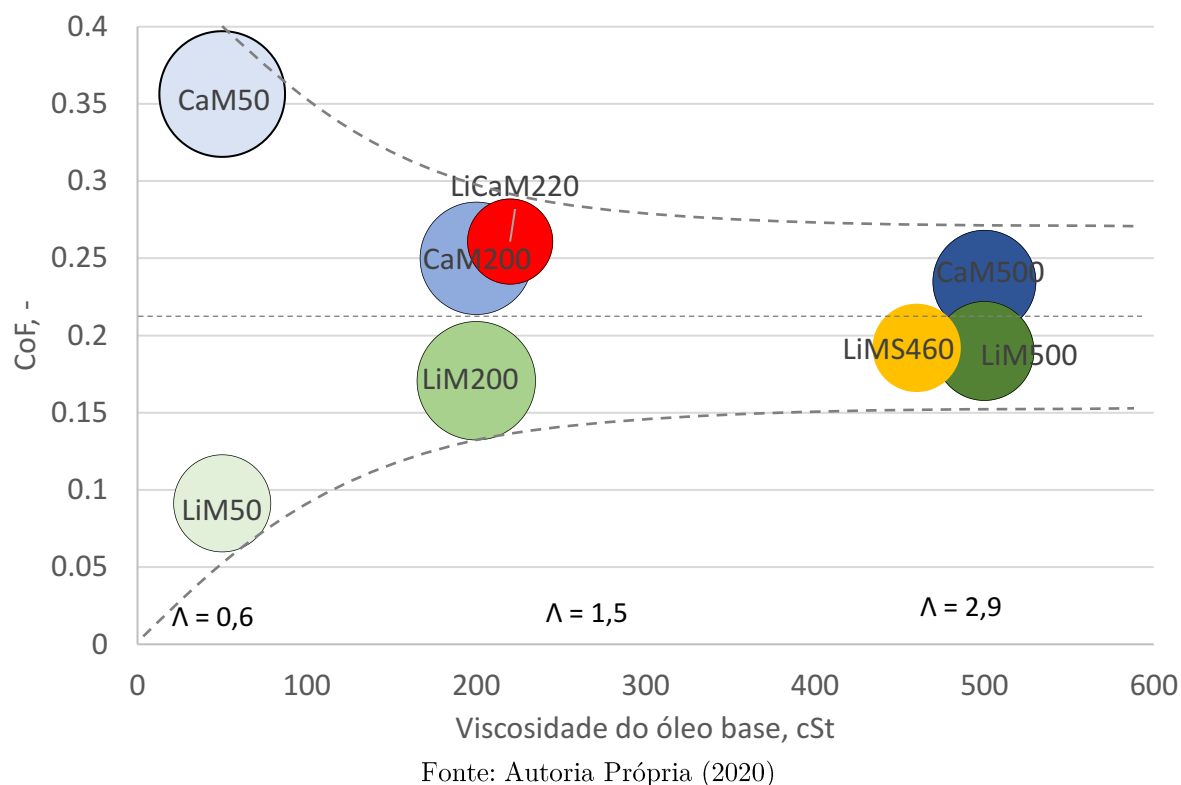
Fonte: Wang et al., (2017)

Ao gerar o gráfico da perda de massa total em função da viscosidade dos lubrificantes a 40°C e da espessura específica nominal de filme lubrificante (Figura 90) várias tendências são observadas. Para altos valores de espessura de filme ($\Lambda = 2,9$) a viscosidade do óleo base parece controlar a perda de massa por propagação de trincas, visto que todas as graxas apresentam valores similares de perda de massa independentemente do tipo de espessante e de óleo base (CaM500, LiM500 e LiMS460). Conforme a espessura específica nominal de filme lubrificante é reduzida e o regime de lubrificação transita para

limítrofe o efeito do tipo de espessante torna-se mais evidente. O espessante de lítio proporciona redução significativa do desgaste enquanto o espessante de cálcio o aumenta (LiM200 e LiM50 vs. CaM200 e CaM50). Para o regime de lubrificação misto ($\Lambda = 1,5$) observa-se que a graxa comercial LiCaM220 apresenta perda de massa estatisticamente igual a graxa CaM200. Visto que a graxa comercial é espessada com lítio e cálcio poderia se esperar que esta tivesse um comportamento intermediário entre as graxas LiM200 e CaM200, visto que todas possuem viscosidades semelhantes. Este resultado pode estar associado a diferentes fatores, e por tanto, é possível apenas especular com os resultados obtidos. Um destes fatores é que a presença de espessante de cálcio, mesmo que em pequenas quantidades, já é suficiente para acelerar a perda de massa por propagação de trincas. No entanto, visto que o percentual de cálcio e lítio na composição da graxa LiCaM200, bem como o seu pacote de aditivos, ambos que afetam o desgaste, não são conhecidos.

Os resultados provenientes da análise da Figura 90 indicam que as características do espessante são mais relevantes que a viscosidade do óleo base em termos de propagação de trincas, e por tanto, as conclusões gerais apresentadas por vários autores (WANG, et al., 2017; RICO, et al., 2003 e WONG et al., 1996), indicando que a propagação de trincas por FCR assistida por efeito hidráulico ocorre mais rapidamente para fluidos de baixa viscosidade não podem ser aplicadas para graxas lubrificantes. Para o caso das graxas de lítio avaliadas neste trabalho, por exemplo, a redução da viscosidade leva a menores perdas de massa dos corpos de prova. Também é relevante mencionar que o prognóstico que altos valores de coeficiente de atrito promovem propagação de trincas, conforme observado por Fletcher et al (2009), só é válido para condições específicas, as quais certamente não incluem graxas com espessante de lítio.

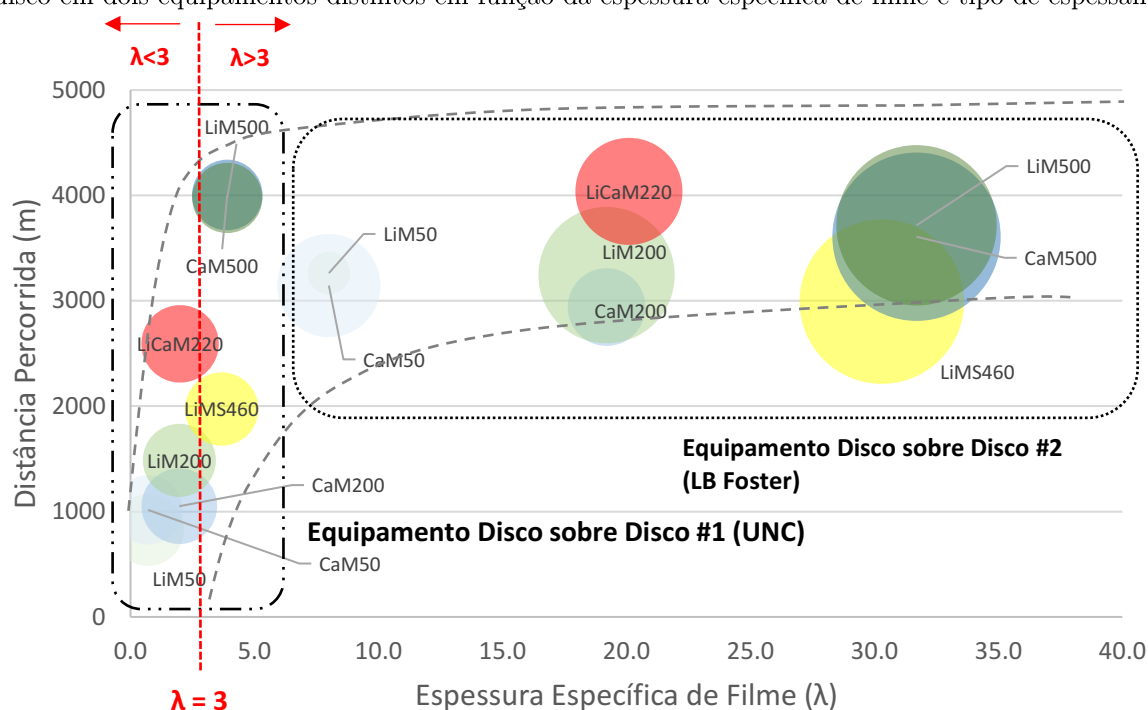
Figura 90 – Perda de massa total em função do óleo base das graxas, tipo de espessante e espessura específica nominal de filme lubrificante



4.1.3 Retentividade

Para o ensaio de retentividade foram utilizados os equipamentos disco sobre disco #1 (UNC) e disco sobre disco #2 (LB Foster). A Figura 91 apresenta os resultados dos ensaios de ambos os equipamentos de forma adimensionalizada, onde converteram-se a retentividade de número de ciclos do disco mais rápido para distância percorrida, uma vez que os equipamentos possuem corpos de prova com diâmetros diferentes, e a viscosidade do óleo base das graxas para a espessura específica de filme como forma de comparar as condições operacionais de cada equipamento.

Figura 91: Retentividade adimensionalizada em função da distância percorrida para ensaios disco sobre disco em dois equipamentos distintos em função da espessura específica de filme e tipo de espessante



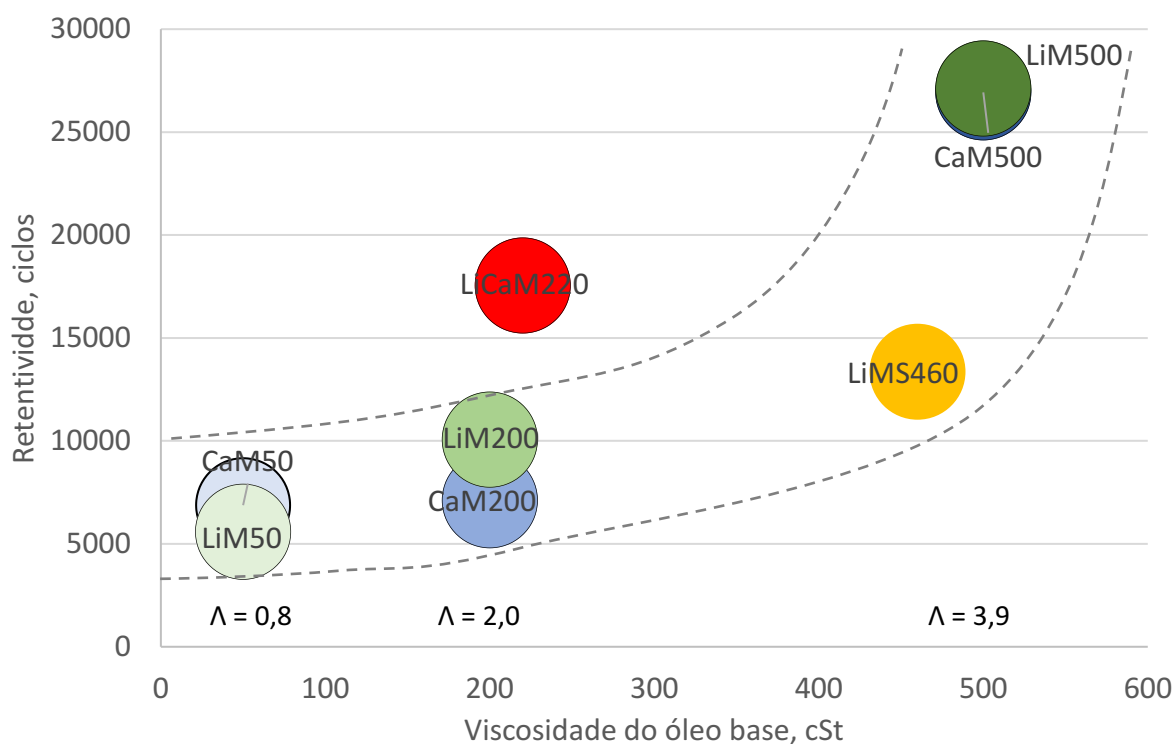
Fonte: Autoria própria (2020)

Esses resultados apresentam que a viscosidade do óleo base da graxa, a qual tem influência direta na espessura de filme lubrificante (Equação 1), é um parâmetro muito relevante, e que a partir do momento que a espessura específica de filme é aproximadamente maior que três, as graxas tendem a apresentar o mesmo comportamento independentemente da formulação. Isto significa que a viscosidade tem grande influência em situações de regime de lubrificação limítrofe ($\lambda < 1$) e misto ($1 < \lambda < 3$), mas não a partir do momento que o regime de lubrificação se torna filme completo ($\lambda > 3$). Ou seja, para os ensaios realizados no disco sobre disco #2 (LB Foster), este equipamento não foi capaz de diferenciar os efeitos de formulação das graxas testadas, uma vez que $\lambda > 8$ para todas as graxas testadas. Nesse regime, o efeito dos aditivos e espessantes não deveriam ser relevantes, apenas as propriedades associadas ao óleo base. Porém, no contato roda-trilho, essa espessura específica de filme indica ser menor que três, já que é possível observar

diferentes mecanismos de desgastes como adesivo e abrasão no canto de bitola (FERRER, 2020).

A Figura 92 é uma ampliação da região de operação do equipamento disco sobre disco UNC onde apresenta a retentividade de cada uma das graxas em função da viscosidade do óleo base a 40°C e da espessura específica de filme lubrificante.

Figura 92 – Retentividade em função da viscosidade do óleo base, tipo do espessante e espessura específica de filme.



Fonte: Autoria própria (2020)

A análise desta Figura mostra que a retentividade aumenta ligeiramente com o aumento da viscosidade até certo ponto, a partir do qual este efeito é intensificado para as graxas de formulação de própria. Já a graxa comercial LiCaM220 não seguiu o comportamento supramencionado, apresentando retentividade superior à das graxas LiM200 e CaM200 de viscosidade similar. Logo, assume-se que tal diferença é decorrente predominantemente do seu diferente pacote de aditivos. Diferentemente do que foi observado nos ensaios de atrito e desgaste, realizados com lubrificação abundante, em que o efeito

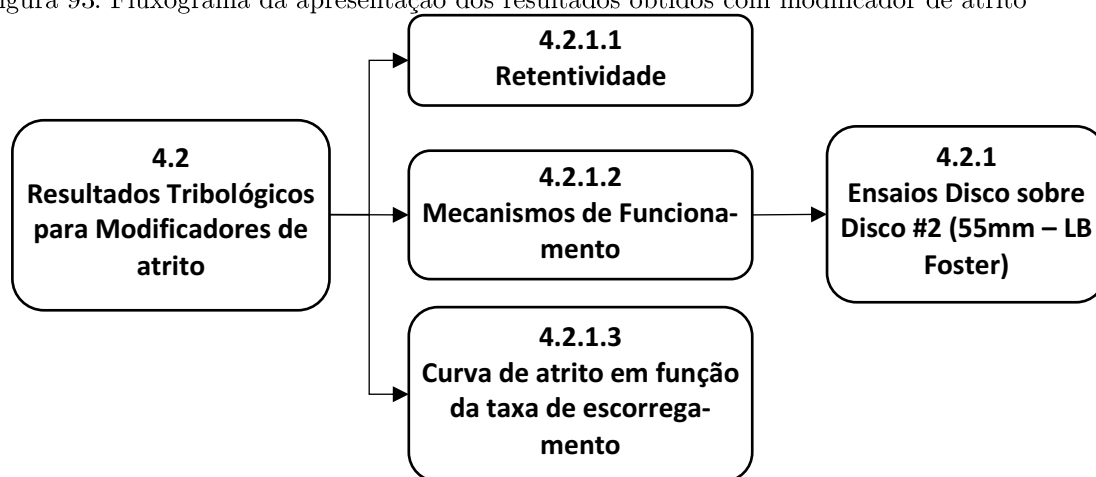
do espessante foi preponderante, para os ensaios de retentividade o espessante se mostrou irrelevante.

O aumento da retentividade com a viscosidade observado neste trabalho está em concordância com observações de McEwen et al (1987), que mostrou, em testes de campo e ensaios em escala 1:1, que a retentividade pode ser melhorada com a utilização de óleos mais viscosos. Em resumo, os resultados mostram que a retentividade aumenta com a viscosidade, e que o efeito do espessante é irrelevante para as graxas com o mesmo pacote de aditivos. Também, que pacote de aditivos distintos podem aumentar significativamente a retentividade para graxas com o mesmo tipo de óleo base com viscosidade similar (LiCaM220 vs. LiM200 e CaM200).

4.2 RESULTADOS TRIBOLÓGICOS PARA MODIFICADOR DE ATRITO

A Figura 93 apresenta a disposição de como os resultados serão apresentados e discutidos para os ensaios disco sobre disco realizados com graxa.

Figura 93: Fluxograma da apresentação dos resultados obtidos com modificador de atrito

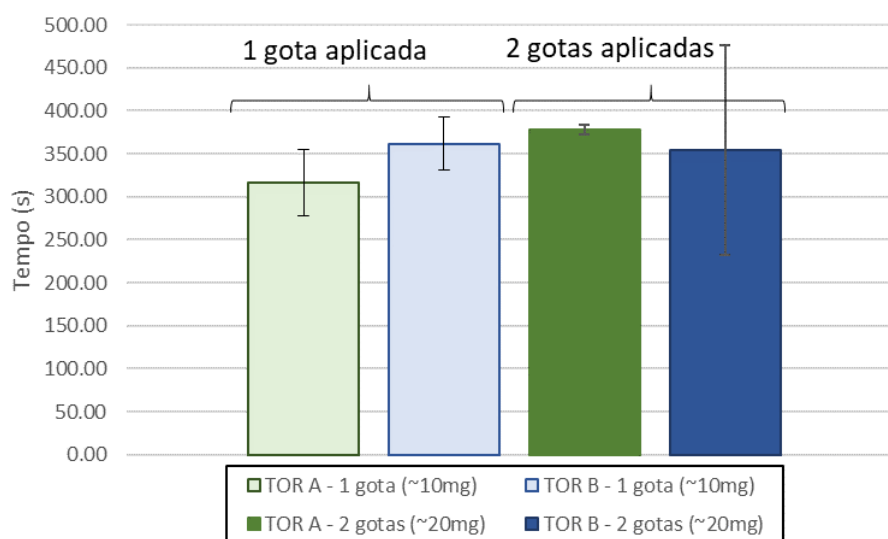


Fonte – Autoria própria (2020)

4.2.1 Retentividade

A primeira propriedade avaliada entre os modificadores de atrito TOR-A e TOR-B é a retentividade e ela está ilustrada pela Figura 94. Dessa Figura 94 é possível extrair duas informações relevantes: i) que os modificadores de atrito TOR-A e TOR-B não apresentam diferenças relevantes quanto a retentividade e ii) a retentividade do TOR-A e TOR-B são pouco dependentes da quantidade de produto aplicada no contato (10mg e 20mg).

Figura 94: Resultados do ensaio de retentividade para o TOR-A e TOR-B sob a aplicação de uma e duas gotas de produto (10mg e 20mg respectivamente) em condições de 1% de escorregamento



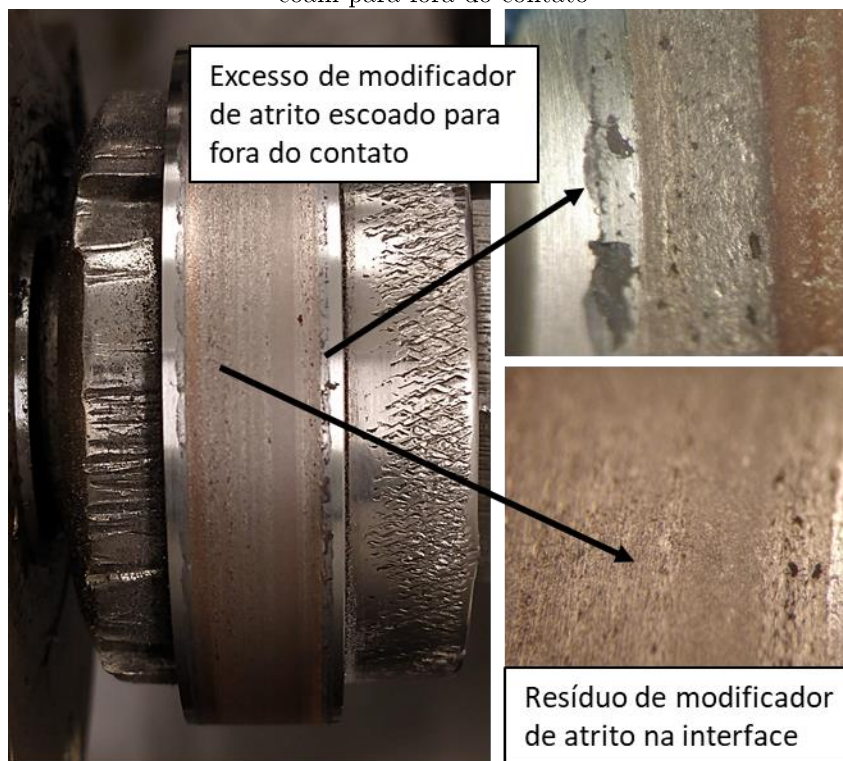
Fonte: Autoria própria (2020)

Em relação ao primeiro item, ambos os produtos possuem a capacidade de formar um filme sólido após a evaporação da água e são essas partículas sólidas do modificador de atrito que interagem com o terceiro corpo presente na interface dos discos. Logo, imaginava-se que com as diferenças na composição do filme sólido dos produtos apresentados na seção 4.2 se traduzissem em diferenças no desempenho nas entre TOR-A e TOR-B nas condições avaliadas neste ensaio, o que não aconteceu nesse caso. Galas et al (2018) em um ensaio bola sobre disco verificaram que para modificadores de atrito a base de água de formulação completa (produto composto por água, ligante e partículas de fricção

positiva) o desempenho desses produtos estão principalmente relacionados ao efeito da água e do agente ligante apenas.

Após os testes, verificou-se qualitativamente que na superfície dos discos em contato há presença de resíduos dos modificadores de atrito (Figura 95), indicando que as partículas sólidas ficam presas na interface do contato e contribuem no coeficiente de atrito. No entanto, percebe-se também que parte do produto é escoado para fora do contato, devido o modificador de atrito estar ainda na fase líquida (sem evaporação da água) logo após aplicar uma gota do produto. Isso pode explicar em partes porque o acréscimo em quantidade de produto aplicado não resulta em uma maior retentividade do mesmo, já que devido à baixa viscosidade do líquido, o mesmo é expulso da interface dos discos devido à pressão de contato.

Figura 95: Fotografia do disco (roda) após o ensaio de retentividade com o modificador de atrito ilustrando a presença de resíduo de produto na interface entre os discos e os excessos de produto que escoam para fora do contato



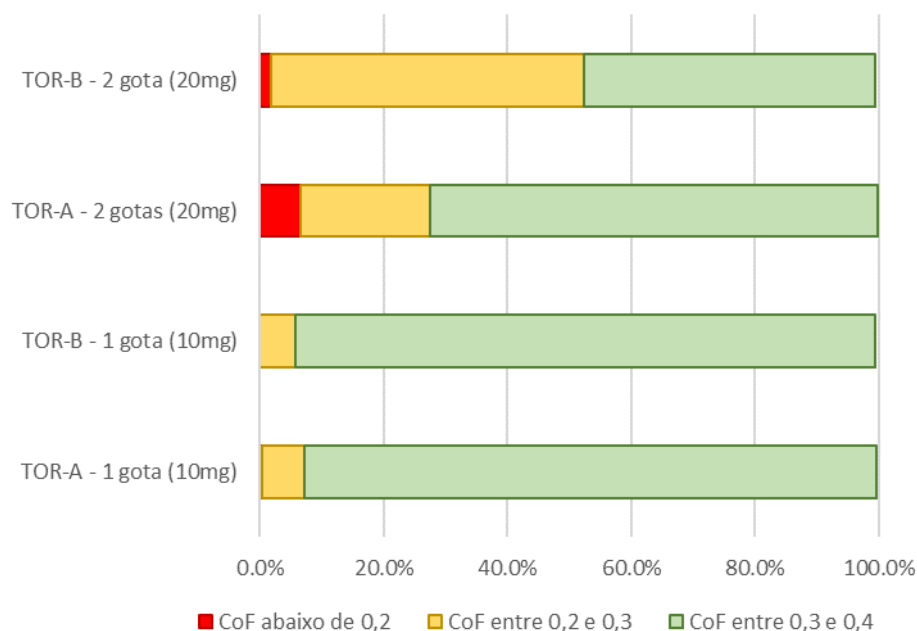
Fonte: Autoria própria (2020)

Esse efeito é observado em campo também após alguns metros do aplicador de modificador de atrito posicionado ao lado da via férrea. Khan et al (2018) verificaram

que alguns metros após a roda coletar o modificador de atrito do trilho, o mesmo é escoado para fora da região de contato. No entanto, devido ao deslocamento lateral da roda sobre trilho ao longo da curva, existe a possibilidade desse modificador de atrito voltar para dentro do contato e ser reutilizado, diferentemente do que ocorre neste ensaio disco sobre disco.

Conforme apresentado por Gutsulyak, Stanlake e Qi (2020), um dos motivos de se utilizar modificadores de atrito a base de água ao invés de a base de óleo ou graxa é em relação ao nível mínimo do coeficiente atrito atingido ao aplicar o produto no contato e o tempo em que esse coeficiente de atrito permanece em níveis criticamente baixos. A partir das curvas de coeficiente de atrito em função do tempo utilizadas para gerar os gráficos de retentividade apresentados na Figura 94, analisou-se o nível do coeficiente de atrito para os dois produtos TOR-A e TOR-B ao longo do ensaio, similarmente ao realizado por Galas et al (2016), conforme apresentado pela Figura 96.

Figura 96: Faixa do coeficiente de atrito dos produtos TOR-A e TOR-B ao longo do ensaio de retentividade de acordo com a quantidade produto aplicado



Fonte: Autoria própria (2020)

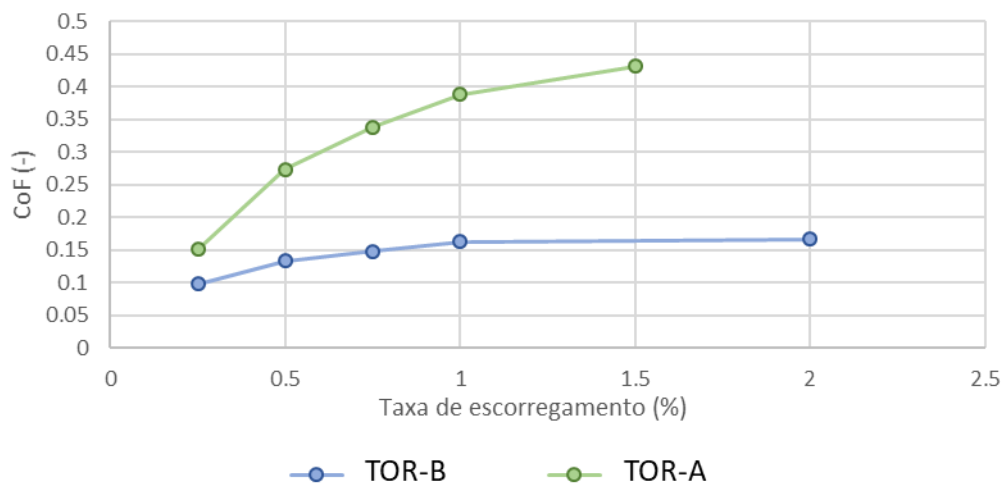
Observa-se a partir da Figura 96, que quanto maior a quantidade de produto aplicado (2 gotas ~10mg), mais tempo o coeficiente de atrito fica em níveis abaixo do

valor ideal (COF entre 0,3 e 0,4). Quanto mais produto aplicado, maior o tempo para a água presente no modificador de atrito evaporar. Neste caso, o TOR-A apresentou um maior tempo no regime de COF abaixo de 0,2 que o TOR-B (8% vs 2%) enquanto para o regime de COF entre 0,2 e 0,3 o TOR-A apresentou menos tempo que o TOR-B (20% vs 50%). Já para o caso de uma gota apenas, os produtos TOR-A e TOR-B apresentaram aproximadamente o mesmo desempenho. Baseando-se somente neste ensaio, é possível inferir que o produto TOR-A tende a apresentar valores de coeficiente de atrito dentro do recomendado (0,3-0,4) por mais tempo que o TOR-B. No entanto, é importante destacar que os valores de COF encontrados em função da quantidade de produto aplicado nesta condição de ensaio não pode ser generalizado para o contato real da roda sobre o trilho, devido as diferenças das condições de operação e ambientais. Isso pode indicar uma lacuna nas metodologias de ensaio de retentividade disco sobre disco, uma vez que mesmo com produtos dissimilares como TOR-A e TOR-B, conforme resultados apresentados no subcapítulo 3.2, este ensaio não foi capaz de diferenciar os produtos. Logo, é relevante realizar maiores investigações a respeito da retentividade para estes dois produtos.

4.2.2 Coeficiente de Atrito em Função da Taxa de Escorregamento

A curva de atrito em função da taxa de escorregamento foi obtida através da metodologia apresentada na seção 4.2 e os resultados para os modificadores de atrito TOR-A e TOR-B estão apresentados na Figura 97.

Figura 97: Curva de coeficiente de atrito em função da taxa de escorregamento para os modificadores de atrito TOR-A e TOR-B



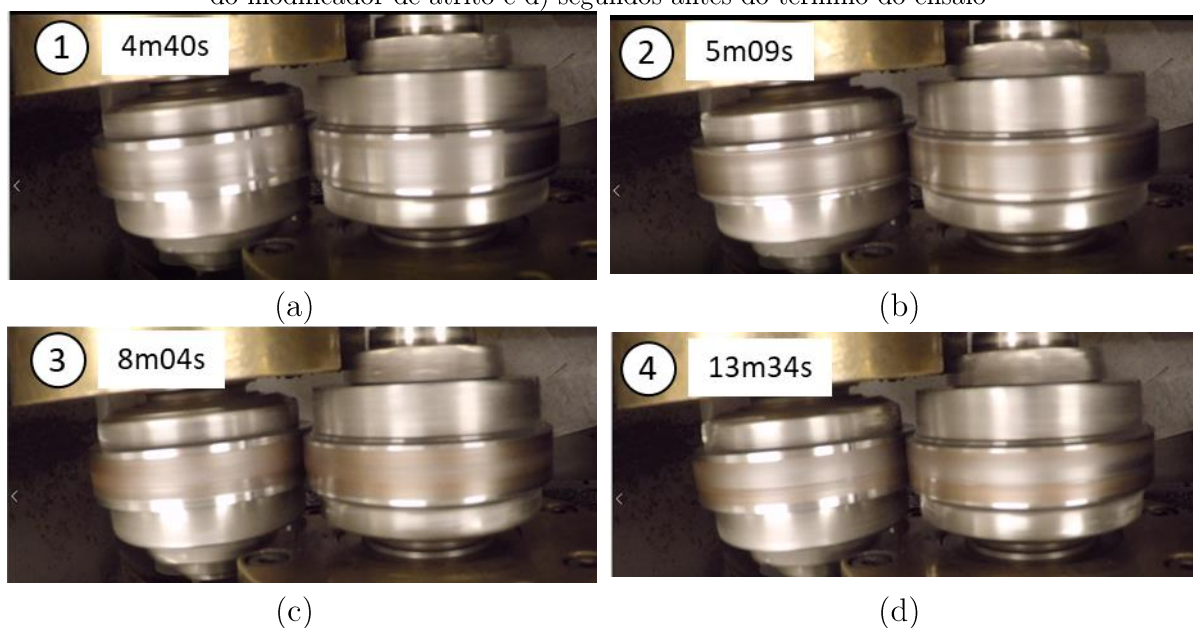
Fonte: Autoria própria (2020)

A partir dos dados expostos das curvas apresentadas pela Figura 97, o produto TOR-B apresenta piores características de gradiente positivo (Figura 27) e menores valores de atrito quando comparado com o produto TOR-A. Esse tipo de comportamento pode resultar em piores desempenhos quanto a tração e frenagem da roda sobre o trilho (GUTSULYAK, STANLAKE; QI, 2020). No entanto, surpreende-se quando os valores de atrito apresentados para 1% de escorregamento da Figura 97 são comparados com as faixas de coeficiente de atrito apresentadas pela Figura 96. Esses valores são incompatíveis mesmo estando sob a mesma condição de escorregamento e de contato. As condições de contato antes e depois da aplicação para gerar as curvas de retentividade (Figura 82) e do coeficiente de atrito em função do escorregamento (Figura 84) são distintas. É possível estimar que o baixo valor de escorregamento (0,25%), aqueça menos os discos comparado com o escorregamento de 1% dos ensaios de retentividade, portanto, evita a evaporação do modificador de atrito TOR-B até atingir o escorregamento programado para obter os dados de coeficiente atrito necessário para gerar a curva apresentada pela Figura 97. De qualquer maneira, infelizmente não houve disponibilidade da máquina para realizar os ensaios novamente para confirmar os dados.

4.2.3 Mecanismos de Funcionamento

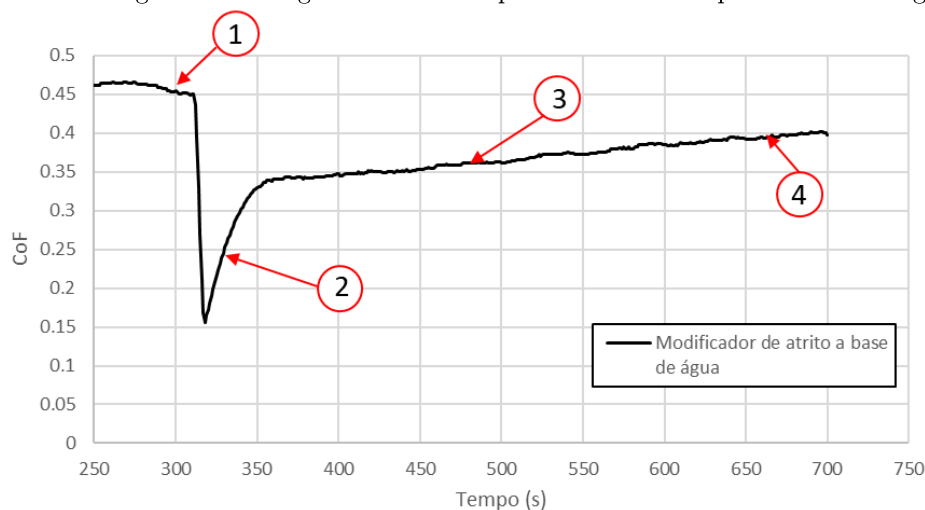
Durante os ensaios de retentividade, verificou-se que a coloração da superfície dos discos mudava após a aplicação dos modificadores de atrito a base de água. A sequência de fotos do exemplo de um ensaio é apresentado pela Figura 98. É possível verificar que antes da aplicação do produto TOR não é muito evidente a camada de óxido na superfície (Figura 98a). Logo após a aplicação do produto no contato, ele é espalhado na superfície, porém não é evidente a formação do filme sólido na superfície (Figura 98b). Após aproximadamente três minutos da aplicação, é possível verificar a presença de uma coloração avermelhada na superfície dos discos (Figura 98c). Imagine-se que essa mudança de cor é devida o surgimento de óxidos na superfície devido a evaporação da água presente nos modificadores de atrito a base de água. Próximo ao fim do ensaio, essa camada começa a ser consumida (Figura 98d). A Figura 98 apresenta o coeficiente de atrito em função do tempo para este ensaio especificamente apresentado.

Figura 98: Sequência de fotos do ensaio de retentividade: a) segundos antes da aplicação do modificador de atrito; b) segundos após a aplicação do modificador de atrito; c) três minutos após a aplicação do modificador de atrito e d) segundos antes do término do ensaio



Fonte: Autoria própria (2020)

Figura 99: Coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio de retentividade para o modificador de atrito a base de água com as regiões numeradas parada cada foto apresentada na Figura 98



Fonte: Autoria própria (2020)

Do exposto acima, é razoável inferir que a retentividade e o coeficiente de atrito dos modificadores de atrito quando aplicados no ensaio disco sobre disco estão de alguma forma ligados com a formação e remoção dessa camada avermelhada. De fato, após os ensaios é possível verificar que as superfícies dos discos (Figura 100) apresentam algumas regiões do contato mais avermelhadas (possível presença de óxidos) e além da presença de resíduos sólidos dos modificadores de atrito. Lewis, S, R et al (2012) realizaram uma análise por GDOES (*Glow-discharge optical emission spectroscopy*) da superfície do disco após um ensaio pino sobre disco lubrificado com modificadores de atrito a base de água. Eles verificaram que a profundidade de transformação da superfície com a aplicação de modificador de atrito é $2\mu\text{m}$ a $3\mu\text{m}$. Isso indica que a transformação é da mesma ordem das asperezas em contato, logo possuem influência no coeficiente de atrito. Nessa superfície foram detectados elementos como Cálcio (Ca), Sódio (Na) e Enxofre (S) que fazem parte da composição dos modificadores de atrito, porém esses elementos não foram discutidos no trabalho.

Figura 100: Fotografia da superfície do disco após o ensaio de retentividade com o modificador de atrito a base de água



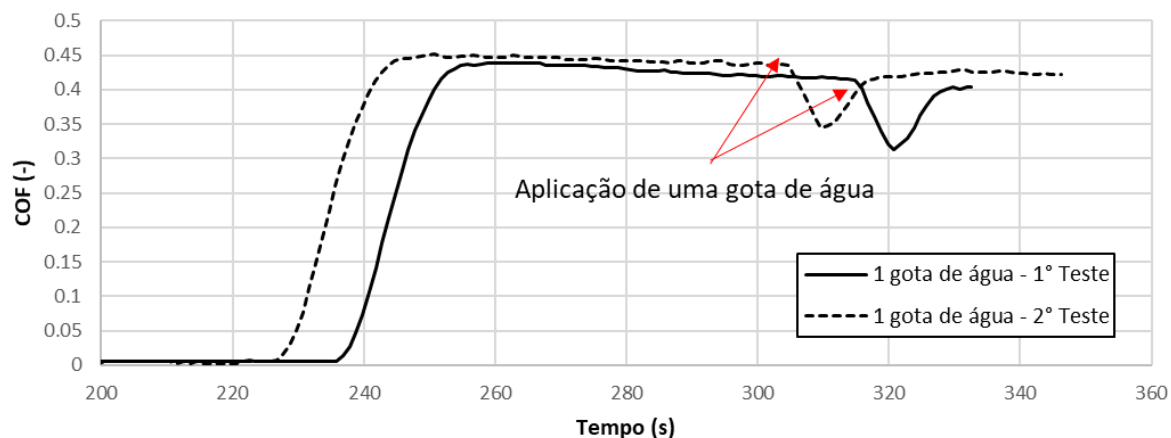
Fonte: A autoria própria (2020)

Partindo da hipótese que a mudança de cor na superfície dos discos é causada pela oxidação devido a presença de água no produto, realizou-se uma série de testes para avaliar qual é o tamanho do impacto da água em relação ao mecanismo do controle de atrito pelos modificadores de atrito. Os testes foram realizados no mesmo equipamento disco sobre disco e estão listados a seguir:

- i Desempenho quanto a retentividade lubrificação por uma gota de água;
- ii Desempenho quanto ao nível de coeficiente de atrito a partir da aplicação contínua de água sob diferentes taxas de aplicação (0,1g/min e 0,2g/min);
- iii Desempenho dos modificadores de atrito TOR-A e TOR-B após a aplicação de uma gota de água;
- iv Desempenho dos modificadores de atrito TOR-A e TOR-B após a aplicação contínua de água com 0,1g/min de taxa de aplicação.

A Figura 101 apresenta o desempenho de uma gota de água quanto a variação do coeficiente do atrito e é possível verificar que ela não é capaz de manter o nível do coeficiente de atrito mais baixo que o contato a seco por um tempo relevante, devido ao escoamento da água para fora do contato e pela rápida evaporação da mesma durante o contato. Analisando a superfície dos discos durante a aplicação da água (Figura 102) é possível perceber que tanto a formação quanto a remoção da camada avermelhada acontece mais rapidamente do que quando o contato é lubrificado com o modificador de atrito a base de água. Isso indica que são os elementos que compõe o modificador de atrito atuam na manutenção do nível do coeficiente de atrito após a evaporação da água.

Figura 101: Variação do coeficiente de atrito em função do tempo durante a aplicação de uma gota de água no contato disco sobre disco a seco



Fonte: Autoria própria (2020)

Figura 102: Sequência de fotografia da superfície dos discos durante a aplicação de uma gota de água no contato a) antes da aplicação, b) instantes após a aplicação e c) 10 segundos após a aplicação

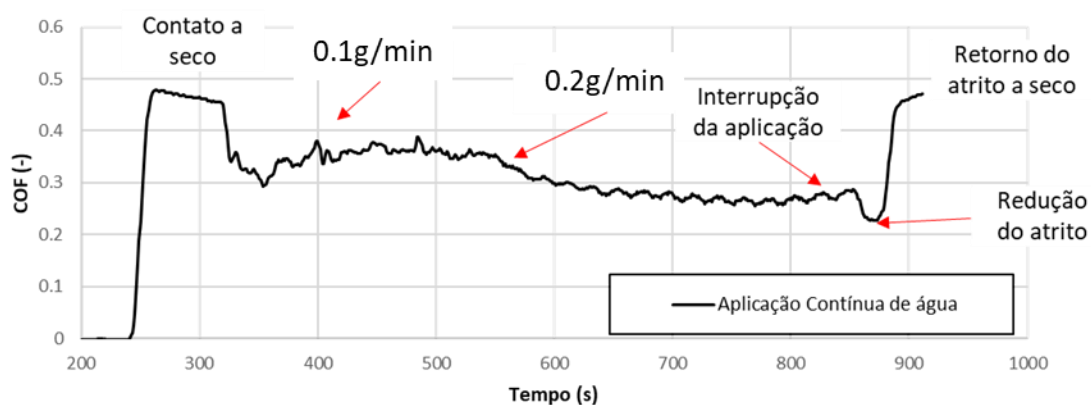


Fonte: Autoria própria (2020)

A aplicação contínua de água no contato é apresentada pela Figura 103. Verifica-se que o nível do coeficiente de atrito depende da taxa de aplicação de água no contato. Para a taxa de 0,1g/min o coeficiente de atrito gira em torno de 0,35 e é possível verificar a gota de água ser consumida no contato antes da próxima gota ser aplicada. Já para a taxa de 0,2g/min o coeficiente de atrito reduz a valores mais baixos que 0,3 e na entrada do contato é possível verificar o acúmulo de água, indicando que a mesma não é consumida antes da próxima gota ser aplicada. Após a interrupção da aplicação de água o

coeficiente de atrito reduz a valores menores do que quando estavam sendo lubrificados em abundância antes de subir ao nível a seco. Essa redução é o efeito de uma pasta viscosa formada por uma proporção específica de água e partículas de desgaste presentes no contato (BEAGLE, T., M., PRITCHARD, C., 1975).

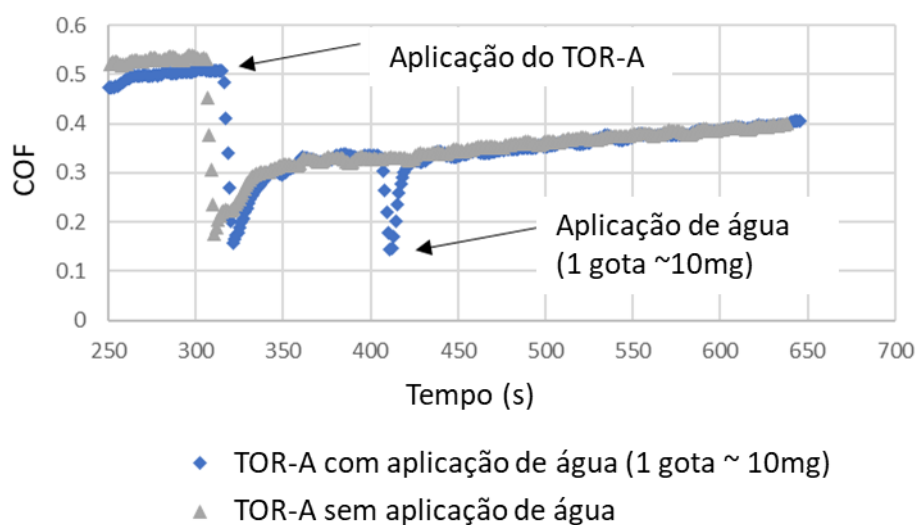
Figura 103: Coeficiente de atrito em função do tempo com a aplicação contínua de água com taxas de aplicação de 0,1g/min e 0,2g/min



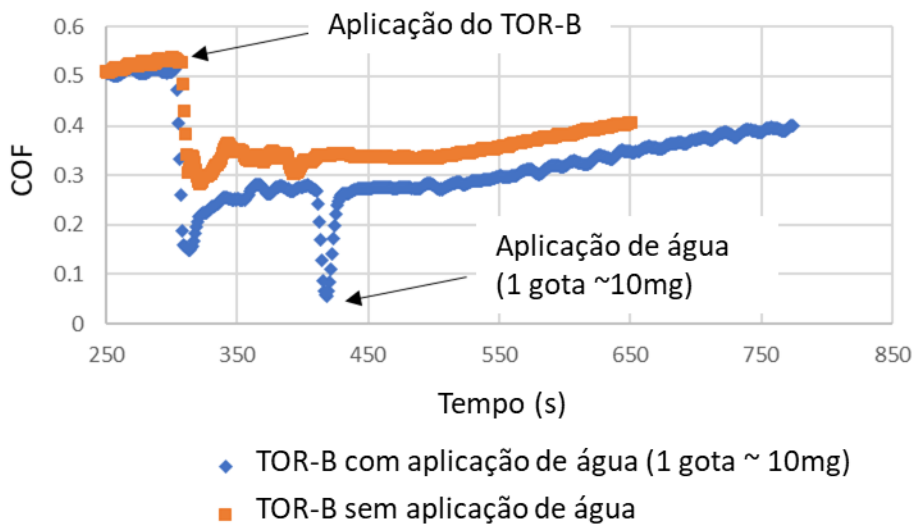
Fonte: Autoria própria (2020)

A Figura 104 apresenta a curva do coeficiente de atrito em função do tempo dos modificadores de atrito TOR-A e TOR-B quanto a aplicação de uma gota de água durante o teste de retentividade. É possível perceber que a água em quantidades pequenas não influencia no desempenho dos modificadores de atrito TOR-A e TOR-B. No entanto, quando aplica-se água sob uma taxa constante de 0,1g/min, verifica-se que os níveis do coeficiente de atrito podem reduzir a valores tão baixos quanto 0,1. (Figura 105). Esses resultados indicam que presença a água pode alterar a reologia do terceiro corpo, neste caso filme sólido dos modificadores de atrito e partículas de desgaste reduzindo a níveis indesejados de coeficiente de atrito.

Figura 104: Influência de uma gota de água como um contaminante durante a aplicação dos modificadores de atrito a) TOR-A e b) TOR-B



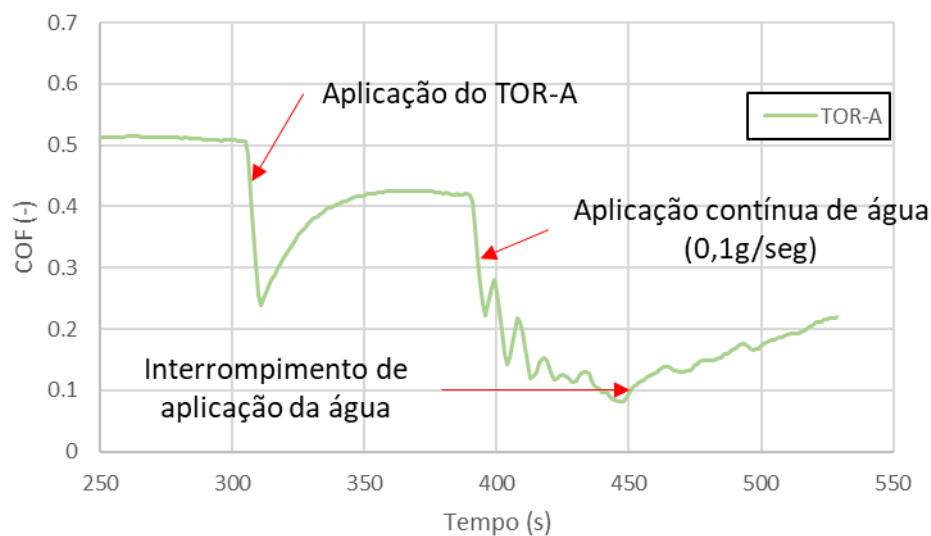
(a)



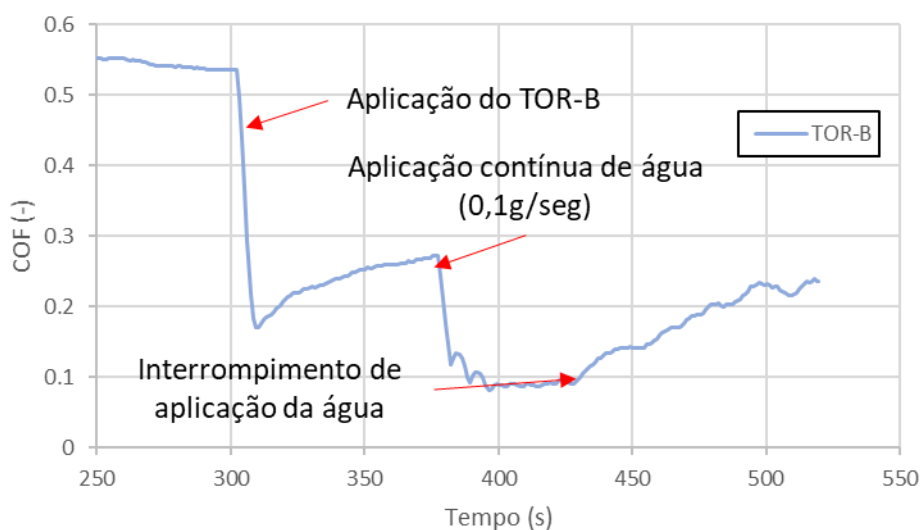
(b)

Fonte: Autoria própria (2020)

Figura 105: Influência da aplicação contínua de água (0,1g/min) como um contaminante durante a aplicação dos modificadores de atrito a) TOR-A e b) TOR-B



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria (2020)

Com os resultados dispostos verificou-se que a água presente na composição dos modificadores de atrito é capaz de induzir mudanças na superfície dos discos em contato, com a formação de uma camada superficial avermelhada. No entanto, somente com a presença do filme sólido dos modificadores de atrito é que o coeficiente de atrito é capaz de permanecer na faixa recomendada de 0,3 a 0,4 por maiores tempos. A sinergia entre as partículas de desgaste presente no contato a seco mais a aplicação do modificador de atrito a base de água formando um novo terceiro corpo na interface do contato ainda

não é bem estabelecida. No entanto, caracterizações superficiais mais detalhadas podem ser empregadas para entender como a interação do terceiro corpo já presente é afetada com a aplicação dos modificadores de atrito.

5 DISCUSSÕES

5.1 GRAXAS

No capítulo 2 apresentou-se uma revisão da literatura para graxas de canto de bitola com foco na relação entre formulação e propriedades com o desempenho tribológico em termos de atrito, desgaste por propagação de trinca e retentividade. Identificou-se que a falta de estudos sistemáticos em campo e laboratório impõe dificuldades às concessionárias de vias férreas para identificação e seleção de graxas lubrificantes. Apresentou-se então um estudo sistemático com 6 graxas de formulação própria para avaliar o efeito isolado da viscosidade do óleo base e do tipo de espessante no desempenho das graxas. Os resultados foram comparados com duas graxas comerciais, sendo uma delas utilizada nas ferrovias Brasileiras. Tal comparação permitiu, de maneira não sistemática, avaliar também o efeito do pacote de aditivos e de um óleo base sintético no desempenho das graxas. A discussão dos resultados foi toda baseada na literatura associada a rolamentos lubrificados por graxas, a qual é muito mais detalhada que a literatura sobre lubrificação de trilhos. Os resultados apresentam evidências diretas e tendências relevantes a lubrificação de canto de bitola.

Ao comparar as graxas de formulação própria é possível afirmar que as graxas espessadas com cálcio são mais propícias a passar pelo contato e se depositar nas superfícies, formando filmes mais espessos que as graxas de lítio. No entanto, o filme espesso formado pelo espessante de cálcio exibe maiores valores de coeficiente de atrito que os filmes finos formados pelo espessante de lítio. Tal observação sugere que, diferentemente

das conclusões de (Kanazawa et al. 2017), a espessura específica “real⁵” de filme lubrificante não é um parâmetro relevante para prever o coeficiente de atrito de contatos lubrificadas por graxa, visto que uma curva típica de coeficiente de atrito versus espessura específica de filme lubrificante, conforme observada para óleos, não será observada para graxas devido as propriedades distintas do filme de espessante.

Comparando os valores absolutos de coeficiente de atrito, perda de massa, verifica-se que o uso de graxas de lítio gerou menores valores de atrito e perda de massa em comparação as graxas de cálcio, com as maiores diferenças observadas nas condições mais severas de operação, caracterizadas pela lubrificação limítrofe, ou seja, baixos valores de viscosidade e de espessura específica nominal de filme lubrificante. Em termos de retentividade, foram realizados ensaios em dois equipamentos distintos, os parâmetros de retentividade foram adimensionalizados de ciclos para distância percorrida e a viscosidade do óleo base das graxas para espessura específica de filme para promover uma análise conjunta. Os resultados apontaram que para altos valores espessura de filme $\lambda \gg 3$, as graxas apresentaram resultados semelhantes, independentemente de sua viscosidade e espessante. No entanto, na situação roda sobre trilho em campo, a espessura específica de filme indica ser sempre menor que três ($\lambda < 3$), visto ser possível observar diferentes mecanismos de desgaste no canto de bitola. Ou seja, a análise é mais próxima da realidade quando analisamos a região de lubrificação mista e limítrofe. Nesta região, observou-se que o efeito do espessante também foi irrelevante, porém a viscosidade do óleo base foi dominante, com a retentividade aumentando com a viscosidade.

Estes resultados indicam que uma formulação adequada de uma graxa espessada com lítio e óleo base mineral de alta viscosidade pode assegurar alta retentividade com baixo coeficiente de atrito enquanto oferece proteção satisfatória em relação a propagação de trincas. Tais características fazem esta formulação bastante adequada para graxas de canto de bitola, visto que retentividade é uma das propriedades mais relevantes por

⁵ Espessura de filme lubrificante medida

assegurar que a graxa cubra todo percurso entre dois lubrificadores. A relevância da retentividade se dá pelo fato que o desgaste e o atrito de uma região não lubrificada, devido à baixa retentividade apresentada por uma graxa, é uma ordem de grandeza superior à de uma região lubrificada. No entanto, é importante destacar que o sistema tribológico roda-trilho é caracterizado por uma série de fatores não apresentados neste trabalho e que afetam o desempenho das graxas de maneiras distintas, tais como armazenamento e bombeamento da graxa para o trilho, ejeção da graxa para fora das áreas de interesse durante a passagem da roda pelos lubrificadores, períodos de chuva, variação do perfil de rodas e trilhos entre outros. Destas variáveis, a influência das condições meteorológicas já foi avaliada por Zhu et al (2013), porém as demais são desconhecidas.

Quanto aos ensaios de caracterização, verificou-se que as graxas de lítio em relação as de cálcio apresentam menor separação de óleo, maior adesividade mensurada por *tackiness* por rolamento, maior energia necessária para separá-la de um substrato (adesão) e para cisalha-lá (coesão) mensurada por *tackiness* por estiramento e maior resistência a lavagem por água. Ao passo que o efeito da separação de óleo não foi verificado em nenhum ensaio de desempenho, e que em campo, no que tange armazenagem e bombeamento de graxa é desejável baixa separação de óleo, verifica-se que tal resultado é vantajoso para as graxas de lítio, que apresentaram menor perda de óleo que as graxas de cálcio. O aumento da adesão e coesão das graxas, desde que pertencente ao grau NLGI 2 para evitar problemas de bombeamento, estão associados ao aumento de retentividade da graxa, visto que os mecanismos de coleta da graxa pelo friso da roda são melhorados para graxas com maior “*tackiness*” (Harmon, 2019), o que também faz com que as graxas de lítio apresentem vantagens sobre as de cálcio. Por fim, a maior resistência a lavagem por água, de alta relevância em dias de chuva, também foi verificada para graxas de lítio. Além disso, verificou-se que para as graxas de lítio o aumento da viscosidade aumentou a adesividade e a coesão em ambos os ensaios de *tackiness*, e aumento também a resis-

tência a lavagem por água. Já para as graxas de cálcio, o aumento da viscosidade promoveu o aumento da adesividade por *tackiness* de rolamento, mas reduziu a adesividade e coesão medida por *tackiness* de estiramento, bem como a resistência a lavagem por água.

As propriedades mencionadas acima, bem como as propriedades apresentadas na ficha técnica dos produtos, como carga de soldagem por 4 esferas, consistência e ponto de gota foram correlacionadas com os ensaios de tribológicos. No entanto, nenhum coeficiente de correlação superior a $R^2 = 0,57$ foi encontrado. Tal observação indica que as informações fornecidas pelo fabricante, bem como as caracterizações realizadas neste trabalho não se mostraram relevantes para o entendimento dos ensaios tribológicos realizados para avaliação do desempenho das graxas, e por tanto, estudos adicionais são necessários de modo a associar propriedades intrínsecas do lubrificante com seu desempenho no contato. No entanto, quanto a formulação ficou claro que graxas de lítio com alta viscosidade apresentam melhor desempenho.

5.2 MODIFICADORES DE ATRITO

No capítulo 2 apresentou-se uma revisão da literatura para os modificadores de atrito que são aplicados no topo do boleto. Verificou que atualmente existem diferentes tipos de modificadores de atrito e que eles são caracterizados pela sua capacidade de evaporação. Atualmente, as ferrovias brasileiras utilizam majoritariamente os modificadores a base de água. Para esse produto apresentou-se o mecanismo de funcionamento e também os principais componentes presentes na formulação com suas respectivas funções, visto que existe pouca informação a respeito na descrição técnica dos mesmos. A falta de variedade de modificadores de atrito a base de água no mercado dificulta qualquer estudo sistemático. No mais, avaliou-se dois modificadores de atrito a base de água que possuem mesmas características de evaporação durante o contato.

Quanto as caracterizações desses produtos, verificou-se através da termogravimetria que o modificador de atrito TOR-B apresenta elementos mais voláteis como álcoois em sua composição, fazendo com que apresente rápida evaporação, além de ser composto predominantemente por água (88%). Já o TOR-A apresenta uma mistura mais complexa, contendo aproximadamente 56% de água, sendo o restante compostos orgânicos e inorgânicos. Essa diferença se traduziu no tempo de secagem e nas características do filme formado. O TOR-B formou um filme sólido mais rapidamente, porém mais fino que o TOR-A. Isso é esperado visto que após a evaporação o TOR-B tem apenas 12% de material que fica depositado sobre a superfície, enquanto o TOR-A tem aproximadamente 44%. As análises de MEV-EDS corroboram com o descrito anteriormente. Verificou-se que o TOR-A apresenta um filme mais espesso e complexo (3.2.1 e 3.2.2), formado por uma matriz ligante com componentes variados como bentonita, talco e bissulfeto de molibdênio. Já o TOR-B apresenta um filme fino composto aparentemente de uma matriz de duas fases sem componentes adicionais aparentes. Quando estes filmes foram submetidos a lavagem por água, o TOR-B, mais fino e composto predominantemente por água, se despreendeu facilmente do contato.

Apesar de todas as diferenças citadas acima, os modificadores de atrito apresentaram o mesmo desempenho em termos de retentividade nas condições de ensaio empregadas neste trabalho. É possível levantar dois pontos a respeito desse resultado. Primeiro, tal resultado sugere que, apenas levando em conta a retentividade, modificadores de atrito a base de água com de composição mais simples apresentam desempenho equivalente às aquelas de composição mais complexa. No entanto, ao se considerar os resultados de lavagem por água e a secagem extra rápida do modificador TOR-B, é importante destacar a variação de desempenho em dias de chuva, bem como a possibilidade de entupimento dos lubrificadores, visto que outras propriedades além da retentividade são relevantes em campo. Segundo, esse resultado pode indicar que a metodologia de ensaio de retentividade no disco sobre disco atualmente utilizada não é robusta o suficiente para

diferenciar dois modificadores de atrito a base de água e, portanto, outras maneiras de se avaliar propriedades como *tackiness*, carreamento, retentividade, *splash* são necessárias. A variação dos valores de coeficiente de atrito no ensaio de COF em função da taxa de escorregamento com os valores obtidos no ensaio de retentividade para o TOR-B nas mesmas condições de escorregamento (1%) reforçam esse ponto. Ambas hipóteses devem ser avaliadas em trabalhos futuros.

Por fim, verificou-se visualmente que a durante a aplicação dos modificadores nos ensaios de retentividade as superfícies dos discos em contato tornavam-se avermelhadas e que a retentividade dos produtos está ligada com a formação e remoção dessa camada avermelhada. Uma hipótese de que a quantidade de água presente no modificador de atrito a base de água é suficiente para oxidar a superfície dos discos foi levantada. Ensaio exploratório com a aplicação de água e modificador de atrito foram realizados. Verificou-se que uma gota de água é capaz de oxidar a superfície dos discos, porém não é capaz de manter o coeficiente de atrito nos níveis adequados. A aplicação contínua de água com diferentes vazões apontou que para uma certa concentração de óxidos e água no contato, é possível atingir níveis de coeficiente de atrito tão baixos quanto $\text{COF} < 0,1$. A aplicação de uma gota de água após a aplicação do modificador de atrito não foi o suficiente para alterar o desempenho dos modificadores de atrito. No entanto, a aplicação contínua de água após a aplicação dos modificadores de atrito foi capaz de reduzir o coeficiente de atrito para valores e $\text{COF} \approx 0,1$. Todos esses ensaios citados anteriormente foram apenas exploratórios e não possuem nenhuma análise mais profunda que possa explicar os fenômenos ocorridos, no entanto, foram importantes para trazer atenção quanto a lacuna que existe ainda na literatura quanto aos mecanismos de funcionamento desses produtos em um ensaio de laboratório.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÃO

Os resultados dos ensaios disco sobre disco para todas as graxas analisadas apresentam evidências diretas, bem como tendências consistentes e relevantes a lubrificação de canto de bitola. As principais conclusões são: a formulação das graxas afeta o atrito, desgaste por FCR e retentividade de formas distintas, dependendo da espessura específica de filme lubrificante:

Espessura específica nominal de filme lubrificante baixa: Nesta condição a espessura de filme lubrificante é muito maior que os valores previstos usando a teoria da lubrificação elastohidrodinâmica tradicional e a viscosidade do óleo base. Isto ocorre porque nestas condições o espessante passa pelo contato e se deposita nas superfícies. Nesta região o filme que separa as superfícies é formado predominantemente por espessante. A espessura desse filme está associada as características dimensionais das fibras/partículas de espessante e a sua tendência de se depositar nas superfícies de contato. Para graxas formuladas com óleo mineral, as partículas do espessante de cálcio apresentam maior probabilidade de passar pelo contato e formar filmes espessos em relação as fibras de lítio. Como consequência da maior probabilidade de formar filme e do maior coeficiente de atrito dos filmes, a perda de massa devido a propagação de trincas é muito maior para as graxas de cálcio do que para as graxas de lítio. Isto ocorre porque atritos mais altos aceleram a propagação de trinca em modo I, e a deposição de espessante dentro das trincas previne que estas se fechem. A retentividade não foi afetada pela composição ou propriedades do filme lubrificante, apesar destes serem bastante distintos nessa região.

Espessura específica nominal de filme lubrificante alta: Nesta condição a espessura de filme lubrificante pode ser estimada razoavelmente usando a teoria da

lubrificação elastohidrodinâmica tradicional e as propriedades do óleo base da graxa, apesar do espessante contribuir um pouco no aumento da espessura de filme lubrificante. Nesta região o filme é formado predominantemente pelo óleo base da graxa, e o aumento do filme, observado para algumas graxas, decorre da passagem de espessante pelo contato, o qual é dependente das dimensões características do espessante e da razão entre óleo e espessante contidos na graxa. O aumento da espessura de filme decorrente da passagem de espessante pelo contato nessa região é muito menor em comparação ao que se observa na região de baixa espessura específica nominal de filme lubrificante, e por tanto o impacto do espessante no atrito, desgaste e retentividade também é muito pequeno. Logo, verifica-se que o desempenho das graxas lubrificantes nesta região é dominado pelas propriedades do óleo base. Ainda assim, para óleos minerais, verifica-se que o espessante de cálcio apresenta maior tendência de passar pelo contato e formar filmes espessos em relação as graxas de lítio. Como consequência a perda de massa por propagação de trincas nessa região também é mais elevada para graxas de cálcio em relação a graxas de lítio, apesar da diferença ser muito menor. Em termos de atrito e retentividade as diferenças são irrelevantes.

Quanto aos ensaios adicionais de caracterização, conclui-se que: as graxas de lítio em relação as de cálcio apresentam menor separação de óleo, maior adesividade mensurada por *tackiness* por rolamento, maior energia necessária para separá-la de um substrato (adesão) e para cisalha-lá (coesão) mensurada por *tackiness* por estiramento e maior resistência a lavagem por água. O aumento da adesão e coesão das graxas, desde que pertencente ao grau NLGI 2 para evitar problemas de bombeamento, estão associados ao aumento de retentividade da graxa, visto que os mecanismos de coleta da graxa pelo friso da roda são melhorados para graxas com maior “*tackiness*” (Harmon, 2019), o que também faz com que as graxas de lítio apresentem vantagens sobre as de cálcio. Por fim, a maior resistência a lavagem por água, de alta relevância em dias de chuva, também foi verificada para graxas de lítio. Baseado em todos esses resultados, uma graxa espessada

com Lítio e com alta viscosidade do óleo base é a mais indicada para as operações ferroviárias.

Para os modificadores de atrito a base de água analisados, resultados quanto a atrito e retentividade se mostraram semelhantes independente das diferenças observadas na composição do filme sólido formado após a evaporação da água. Ambos os produtos apresentaram a formação de uma camada avermelhada na superfície dos discos após a aplicação do produto e a resposta deles quanto retentividade estiveram em função da remoção dessa camada durante o ensaio. A literatura ainda pouco explorou os mecanismos de interação de diferentes modificadores de atrito a base de água com a superfície dos materiais e conseqüentemente formação de filme sólido no contato.

Do exposto acima, verifica-se que o objetivo principal do trabalho foi atingido, principalmente em relação a graxas, visto que lacunas na literatura foram cobertas com os resultados aqui apresentados. Ensaio adicionais de caracterização, sendo o *tackiness* e lavagem por água os mais promissores por apresentarem tendências similares, foram testados para que se possa evoluir os nos requisitos de quais propriedades de graxas são as mais relevantes no desempenho global do produto na lubrificação ferroviária. Das propriedades analisadas, a retentividade deve ser atualmente a principal propriedade a se levar em conta na escolha de graxas para aplicação ferroviária, visto a diferença de desempenho quando comparado a um contato a seco. Quanto aos modificadores de atrito, não foi possível obter o mesmo nível de retorno. Porém, é possível que, para trabalhos futuros seguindo a mesma metodologia realizada no trabalho das graxas, atinjam-se resultados mais promissores conforme será apresentado no subcapítulo a seguir.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere a seguir três principais possibilidades para novos trabalhos a partir de assuntos levantados durante a dissertação ou por lacunas que esse trabalho não estudou:

Quanto a **caracterização de superfícies:**

- Caracterizar o filme que é formado na superfície dos discos quanto a presença dos modificadores de atrito a base água;
- Investigar os mecanismos que envolvem na interação das partículas sólidas residuais dos modificadores de atrito a base de água e o terceiro corpo presente na interface do contato através da coleta e análise dos *debris* formados antes e após a aplicação dos modificadores de atrito;
- Aferir através de técnicas de caracterização a presença do espessante dentro das trincas;

Quanto a **formulação de modificadores de atrito:**

- Realizar um estudo de diferentes propriedades e formulações de modificadores de atrito a base de água conforme realizado por Galas et al. (2018) e realizado para graxas neste trabalho;
- Avaliar propriedade como *tackiness* por estiramento para os modificadores de atrito;

Quanto a **ensaios de retentividade:**

- Desenvolver uma metodologia mais robusta para quantificar retentividade;

Quanto a **análise em campo:**

- Desenvolver novas metodologias a fim de analisar o comportamento dos lubrificantes em campo durante o contato da roda sobre o trilho (o escoamento da graxa ao longo do carreamento);

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AAR – ASSOCIATION OF AMERICAN RAILROAD. M-107/M-208: **Manual of Standards and Recommended Practices Wheels and Axles - Section G**. Washington, 2009.

AREMA - AMERICAN RAILWAY ENGINEERING AND MAINTENANCE-OF-WAY ASSOCIATION. **Manual for railway engineering**. Washington, 2010.

AMSLER, A. J. **Abnützungsmaschine für metalle (Wear machine for metals)**, Z. VDI, v. 66, n. 15, p. 377-378, 1922.

ANTT, AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. **Plano Trienal de Investimentos – PTI**, 2019. Disponível em: <http://www.antt.gov.br>>. Acesso em Set 2019

AREIZA, Y. A. et al. **Field measurement of coefficient of friction in rails using a hand-pushed tribometer**. Tribology International, v. 82, p. 274-279, 2015.

ARIAS-CUEVAS, O. et al. **Rolling–sliding laboratory tests of friction modifiers in dry and wet wheel–rail contacts**. Wear, v. 268, n. 3-4, p. 543-551, 2010.

BEAGLEY, T. M.; PRITCHARD, C. **Wheel/rail adhesion—the overriding influence of water**. Wear, v. 35, n. 2, p. 299-313, 1975.

BHAT, Shariq Ahmad; CHAROO, M. S. **Effect of Additives on the Tribological Properties of Various Greases-A Review**. Materials Today: Proceedings, v. 18, p. 4416-4420, 2019.

BIAZON, L et al. **Correlations between rail grease formulation and friction, wear and RCF of a wheel/rail tribological pair.** Tribology International, 2021.

BOLTON, P. J.; CLAYTON, P. **Rolling—sliding wear damage in rail and tyre steels.** Wear, v. 93, n. 2, p. 145-165, 1984.

BOWER, A. F. **The influence of crack face friction and trapped fluid on surface initiated rolling contact fatigue cracks.** Journal of tribology, v. 110, n. 4, p. 704-711, 1988.

CEN, Hui; LUGT, Piet M.; MORALES-ESPEJEL, Guillermo. **Film thickness of mechanically worked lubricating grease at very low speeds.** Tribology transactions, v. 57, n. 6, p. 1066-1071, 2014.

CHAVES, A. P. G. **Rodas ferroviárias: análise, microestrutura e propostas de melhoria.** Dissertação (Dissertação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – USP. São Paulo, 2016.

CHIDDICK, Kelvin. **Solid lubricants and friction modifiers for heavy loads and rail applications.** U.S. Patent n. 6,136,757, 24 out. 2000.

CHINAS-CASTILLO, F.; SPIKES, H. A. **The behavior of diluted sooted oils in lubricated contacts.** Tribology Letters, v. 16, n. 4, p. 317-322, 2004.

CHINAS-CASTILLO, F.; SPIKES, H. A. **Mechanism of action of colloidal solid dispersions.** J. Trib., v. 125, n. 3, p. 552-557, 2003.

CNT. CONFEDERACAO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Anuário CNT do transporte: estatísticas consolidadas 2018..** Disponível em: <<http://www.cnt.org.br>>.

Acesso em Set 2019

COLAVITE, Alessandro Serrano; KONISHI, Fabio. **A matriz do transporte no Brasil: uma análise comparativa para a competitividade.** Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia, v. 12, p. 28, 2015.

COTTER, John. **Friction control composition with enhanced retentivity.** U.S. Patent n. 6,759,372, 6 jul. 2004.

COUSSEAU, Tiago. **Film thickness and friction in grease lubricated contacts. Application to rolling bearing torque loss.** 2013.

CYRIAC, F. et al. **Effect of thickener particle geometry and concentration on the grease EHL film thickness at medium speeds.** Tribology letters, v. 61, n. 2, p. 18, 2016.

CZARNY, Ryszard. **Effects of changes in grease structure on sliding friction.** Industrial Lubrication and Tribology, 1995.

DE LAURENTIS, Nicola et al. **The influence of bearing grease composition on friction in rolling/sliding concentrated contacts.** Tribology International, v. 94, p. 624-632, 2016.

DELGADO, M.; SÁNCHEZ, M.; VALENCIA, C.; FRANCO, J.; GALLEGOS, C. **Relationship among microstructure, rheology and processing of a lithium lubricating grease**. Chemical Engineering Research and Design, Elsevier, v. 83, n. 9, p. 1085–1092, 2005.

DESCARTES, Sylvie et al. **Presence and role of the third body in a wheel–rail contact**. Wear, v. 258, n. 7-8, p. 1081-1090, 2005.

DOLLEVOET, R. **Design of an anti head check profile based on stress relief**. University of Twente, 2010.

DO CARMO, R. C. **Procedimento Para Implantação De Gerenciamento Do Atrito Em Uma Ferrovia**. Dissertação (Dissertação em Engenharia de Transportes) – IME. Rio De Janeiro, 2012

DOWSON, Duncan; HIGGINSON, Gordon R.; NIELSEN, Klaus W. **Elasto-Hydrodynamic Lubrication** (International Series in Material, Science and Technology, Vol. 23). 1978.

EADIE, Donald T. et al. **The effects of top of rail friction modifier on wear and rolling contact fatigue: Full-scale rail–wheel test rig evaluation, analysis and modelling**. Wear, v. 265, n. 9-10, p. 1222-1230, 2008.

EIA. U.S ENERGY INFORMATION ASSOCIATION. **International Energy Outlook 2017**. Disponível em: <<https://www.eia.gov/outlooks/ieo/>>. Acesso em Set 2019

EKBERG, Anders; KABO, Elena. **Fatigue of railway wheels and rails under rolling contact and thermal loading—an overview.** *Wear*, v. 258, n. 7-8, p. 1288-1300, 2005.

EKBERG, Anders; ÅKESSON, Bengt; KABO, Elena. **Wheel/rail rolling contact fatigue—probe, predict, prevent.** *Wear*, v. 314, n. 1-2, p. 2-12, 2014.

FERRER, B. P. **Avaliação em laboratório do efeito da formulação e das propriedades de graxas lubrificantes no desempenho tribológico do contato rodatrilho.** Dissertação (Dissertação em Engenharia Mecânica e de Materiais) – UTFPR. Curitiba, 2020.

FLETCHER, David I.; BEYNON, John H. **Development of a machine for closely controlled rolling contact fatigue and wear testing.** *Journal of testing and evaluation*, v. 28, n. 4, p. 267-275, 2000.

FLETCHER, D. I.; SMITH, L.; KAPOOR, A. **Rail rolling contact fatigue dependence on friction, predicted using fracture mechanics with a three-dimensional boundary element model.** *Engineering Fracture Mechanics*, v. 76, n. 17, p. 2612-2625, 2009.

GALAS, Radovan et al. **Laboratory investigation of ability of oil-based friction modifiers to control adhesion at wheel-rail interface.** *Wear*, v. 368, p. 230-238, 2016.

GALAS, Radovan et al. **The role of constituents contained in water-based friction modifiers for top-of-rail application.** *Tribology International*, v. 117, p. 87-97, 2018.

GALLARDO-HERNANDEZ, Ezequiel Alberto; LEWIS, R. **Twin disc assessment of wheel/rail adhesion.** *Wear*, v. 265, n. 9-10, p. 1309-1316, 2008.

GEORGIOU, E. P. et al. **Can We Put a Value on the Adhesion and Tackiness of Greases?** *Tribology Letters*, v. 66, n. 2, p. 1-12, 2018.

GOLD, P. W. et al. **Viscosity–pressure–temperature behaviour of mineral and synthetic oils.** *Journal of Synthetic Lubrication*, v. 18, n. 1, p. 51-79, 2001.

GONCALVES, David et al. **Friction torque in thrust roller bearings lubricated with greases, their base oils and bleed-oils.** *Tribology International*, v. 107, p. 306-319, 2017.

GRUBIN, A. N.; VINOGRADOVA, I. E. **Central scientific research institute for technology and mechanical engineering.** Moscow, Book, v. 30, 1949.

GUTSULYAK, Dmitry V.; STANLAKE, Louisa JE; QI, Hao. **Twin disc evaluation of third body materials in the wheel/rail interface.** *Tribology-Materials, Surfaces & Interfaces*, p. 1-12, 2020.

HAMROCK, Bernard J.; SCHMID, Steven R.; JACOBSON, Bo O. **Fundamentals of fluid film lubrication.** CRC press, 2004.

HARMON, Matthew. **Understanding Application and Tribological Mechanisms of Lubricants and Friction Modifiers in the Wheel-Rail Interface.** 2018. Tese de Doutorado. University of Sheffield.

HARMON, M.; LEWIS, R. **New laboratory methodologies to analyse the top of rail friction modifier performance across different test scales.** Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, p. 0954409720913759, 2020.

HARMON, Matt et al. **Development of Grease Tackiness Test.** Tribology Transactions, v. 62, n. 2, p. 207-217, 2019.

HEYDER, René; BREHMER, Marcel. **Empirical studies of head check propagation on the DB network.** Wear, v. 314, n. 1-2, p. 36-43, 2014.

HUANG, Lu; GUO, Dan; SHIZHU, Wen. **Film thickness decay and replenishment in point contact lubricated with different greases: A study into oil bleeding and the evolution of lubricant reservoir.** Tribology International, v. 93, p. 620-627, 2016.

INTERNATIONAL HEAVY HAUL ASSOCIATION et al. **Guidelines to best practices for heavy haul railway operations: wheel and rail interface issues.** International Heavy Haul Association, 2001.

ISHCHUK, Yu L. **Lubricating grease manufacturing technology.** New Age International, 2006.

IWNICKI, Simon. **Handbook of railway vehicle dynamics.** CRC press, 2006.

JENDEL, Tomas; BERG, Mats. **Prediction of wheel profile wear: methodology and verification.** Vehicle System Dynamics, v. 37, n. sup1, p. 502-513, 2002.

KALKER, Joost Jacques. **On the rolling contact of two elastic bodies in the presence of dry friction.** 1967.

KALOUSEK, J. Modifying and managing friction. **Railway track & structures**, 1997.

KANAZAWA, Yuta; SAYLES, Richard S.; KADIRIC, Amir. **Film formation and friction in grease lubricated rolling-sliding non-conformal contacts.** Tribology International, v. 109, p. 505-518, 2017.

KHAN, Arman Mohammad et al. **Acid treatment of diamond-like carbon surfaces for enhanced adsorption of friction modifiers and friction performance.** Tribology Letters, v. 66, n. 4, p. 128, 2018.

KHAN, Saad Ahmed. **Effects of top-of-rail friction modifiers on the friction, wear and cracks of railway rails.** 2019. Tese de Doutorado. Luleå University of Technology.

LEWIS, R. et al. **Towards a standard approach for the wear testing of wheel and rail materials.** Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, Sage Publications Sage UK: London, England, v. 231, n. 7 , p. 760–774, 2017.

LEWIS, R.; OLOFSSON, U. **Wheel-rail interface handbook.** [S.l.]: Elsevier, 2009.

Lewis, S. R., Lewis, R., Olofsson, U., Eadie, D. T., Cotter, J., & Lu, X. (2013). **Effect of humidity, temperature and railhead contamination on the performance of friction modifiers: Pin-on-disk study.** *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 227(2), 115-127.

LEWIS, R. et al. **Tribology of the wheel-rail contact: the effect of third body materials.** *International Journal of Railway Technology*, v. 1, n. 1, p. 167-194, 2012.

LU, X.; COTTER, J.; EADIE, D. T. **Laboratory study of the tribological properties of friction modifier thin films for friction control at the wheel/rail interface.** *Wear*, v. 259, n. 7-12, p. 1262-1269, 2005.

LUGT, Piet M. **Grease lubrication in rolling bearings.** John Wiley & Sons, 2012.

MAGEL, Eric E. et al. **Rolling contact fatigue: a comprehensive review.** United States. Federal Railroad Administration. Office of Railroad Policy and Development, 2011.

MANG, Theo; DRESEL, Wilfried; WILEY, John (Ed.). **Lubricants and lubrication.** Weinheim, Germany: Wiley-Vch, 2007

MAYA-JOHNSON, Santiago; SANTA, Juan Felipe; TORO, Alejandro. **Dry and lubricated wear of rail steel under rolling contact fatigue-Wear mechanisms and crack growth.** *Wear*, v. 380, p. 240-250, 2017.

MCEWEN, I. J.; HARVEY, R. F. **Wheel/rail wear and lubrication-laboratory studies and their relevance to field situations.** GM Gladwell, H. Ghonem and J. Kalousek (eds.), Contact mechanics and Wear of Wheel Rail Systems II, 1987.

MEHEUX, Mathilde et al. **Effect of lubricant additives in rolling contact fatigue.** Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, v. 224, n. 9, p. 947-955, 2010.

MEIERHOFER, Alexander et al. **Third body layer—experimental results and a model describing its influence on the traction coefficient.** Wear, v. 314, n. 1-2, p. 148-154, 2014.

OLOFSSON, Ulf; LYU, Yezhe. **Open system tribology in the wheel–rail contact—a literature review.** Applied Mechanics Reviews, v. 69, n. 6, 2017.

PROFILLIDIS, Vassilios. **Railway management and engineering.** Routledge, 2016.

RICO, JE Fernandez; BATTEZ, A. Hernandez; CUERVO, D. Garcia. **Rolling contact fatigue in lubricated contacts.** Tribology International, v. 36, n. 1, p. 35-40, 2003.

RONEY, M. et al. Total friction management on Canadian Pacific. In: **Proceedings of the IHHA Conference, Shanghai, China.** 2009.

SCHULTHEISS, Hansjörg; TOBIE, Thomas; STAHL, Karsten. **The effect of selected grease components on the wear behavior of grease-lubricated gears.** Journal of Tribology, v. 138, n. 1, 2016.

SEABRA, Jorge HO. **Mecânica do contacto hertziano**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003.

SEABRA, Jorge; CAMPOS, Armando; SOTTOMAYOR, Alexandre. **Lubrificação elastohidrodinâmica**. FEUP, 2002.

SIMS, Roger D.; MILLER, Keith A.; SCHEPMANN JR, Gilbert F. **Device for determining coefficient of friction and level of lubrication**. U.S. Patent n. 5,992,212, 30 nov. 1999.

SKF. **Catálogo geral de rolamentos**. SKF, 2015. 1375p.

SROBA, P. et al. **Canadian Pacific Railway's 100% effective lubrication initiative**. In: Proceedings of the Presentation for AREMA 2001 Conference & Exhibition, Chicago, Illinois. 2001. p. 9-12.

STACHOWIAK, Gwidon; BATCHELOR, Andrew W. **Engineering tribology**. Butterworth-Heinemann, 2013.

STOCK, R. et al. **Top of rail friction control for heavy haul: status and opportunities**. In: AusRAIL PLUS 2015, Doing it Smarter. People, Power, Performance, 24-26 November 2015, Melbourne, Victoria, Australia. 2015.

STOCK, Richard et al. **Material concepts for top of rail friction management – Classification, characterisation and application**. Wear, v. 366, p. 225-232, 2016.

TOURNAY, H. **Guidelines to best practices for heavy haul railway operations: wheel and rail interface issues**. International Heavy Haulage Association–IHHA, Missouri, USA, 2001.

UDDIN, Md Gyas et al. **Wayside lubricator placement model for heavy haul lines in Australia**. In: Conference on Railway Engineering (CORE 2010). 2010.

UDDIN, Md Gyas; CHATTOPADHYAY, Gopi; RASUL, Mohammad. **Development of effective performance measures for wayside rail curve lubrication in heavy haul lines**. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, v. 228, n. 5, p. 481-495, 2014.

VALE, S. A. **Relatórios Técnicos Projeto Lubrificação de Ferrovias**. Acervo técnico Vale SA, 2018.

VIANA, T. **Estudo do desgaste por deslizamento em aços de trilhos e roda: efeito da força normal, dureza e lubrificação em ensaios pino contra disco**. (Projeto de Tese em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – USP. São Paulo, 2019.

VIDON, F. **Fundamentos Do Gerenciamento Do Atrito**. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Engenharia de Transporte Ferroviário de Carga) – IME, Rio de Janeiro, 2012.

VIDON, F.; SOARES, L. S.; DO CARMO SANTORO, R. C. **O impacto da Gestão do Atrito na Manutenção da Via Permanente-Uma avaliação do emprego em ferrovias mundiais**. 2013.

WAARA, Patric. **Lubricant influence on flange wear in sharp railroad curves.** Industrial lubrication and tribology, v. 53, n. 4, p. 161-168, 2001.

WANG, W. J. et al. **Influence of different application of lubricants on wear and pre-existing rolling contact fatigue cracks of rail materials.** Tribology Letters, v. 65, n. 2, p. 58, 2017.

WONG, S. L. et al. **A branch criterion for shallow angled rolling contact fatigue cracks in rails.** Wear, v. 191, n. 1-2, p. 45-53, 1996.

YANG, Limin; MOAN, Torgeir. **Cylinder bore wear damage analysis of a heaving-buoy wave energy converter with hydraulic power take-off.** In: ASME 2010 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers, 2010. p. 345-355.

ZHOU, Yu et al. **Field and laboratory investigation of the relationship between rail head check and wear in a heavy-haul railway.** Wear, v. 315, n. 1-2, p. 68-77, 2014.

ZHOU, Yu et al. **Modeling of rail head checks by X-ray computed tomography scan technology.** International Journal of Fatigue, v. 100, p. 21-31, 2017.

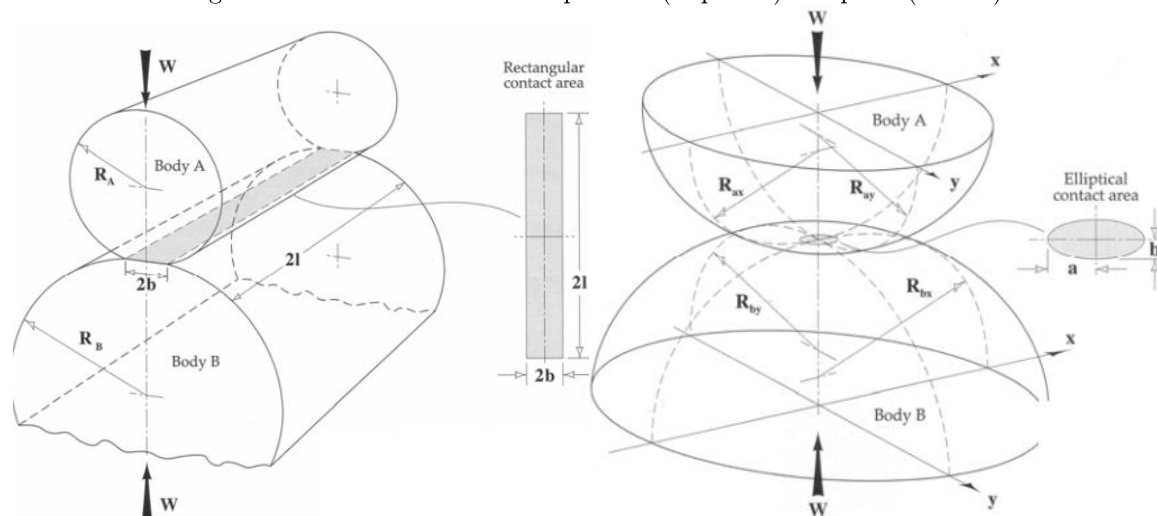
ZHU, Yi, SUNDH, Jon, and OLOFSSON, Ulf. **"A tribological view of wheel-rail wear maps."** International journal of railway technology 2.3 (2013b): 79-91.

ANEXO A – MECÂNICA DO CONTATO

Em 1882, Heinrich Hertz publicou um trabalho intitulado “*On the contact of elastic bodies*”, o qual é considerado o início da Mecânica do Contato enquanto assunto de interesse científico. Desde esse momento inúmeros trabalhos têm sido publicados neste domínio, o que atesta sua relevância científica e tecnológica, já que são muitos os elementos de máquinas cujo bom desempenho está diretamente relacionado com os conceitos da Mecânica do Contato Hertziano, tal como o sistema roda-trilho (SEABRA, 2003).

A teoria de mecânica do contato se aplica quando dois sólidos elásticos de revolução são postos em contato um com o outro, tocam-se, inicialmente, num único ponto ou segundo uma linha. Ao serem solicitados por uma determinada carga, mesmo que de pequena intensidade, eles deformam-se na vizinhança do ponto inicial de contato, originando uma pequena área de contato de pequenas dimensões quando comparadas com as dos dois corpos. Na Figura 106 mostra-se um exemplo de dois problemas típicos de contato submetidos à ação de uma força normal. O contato linear (esquerda) representa o tipo de contato associado ao início dos ensaios de laboratório disco sobre disco que foram apresentados na seção 4, enquanto o contato elíptico (direita) representa a situação de campo, conforme indicado no capítulo 2.

Figura 106 – Contato hertziano pontual (esquerda) e elíptico (direita)



Fonte: Stachowiak (2013)

Para ser possível analisar este problema, é necessária uma Teoria de Contato, que permita determinar a forma da área de contato e a sua evolução com o aumento da carga, bem como a intensidade e a distribuição das pressões superficiais, normais e eventualmente tangenciais, transmitidas através da superfície de contato. Finalmente, conhecida essa distribuição de pressões superficiais, pode-se determinar as tensões a que está submetido cada um dos sólidos na vizinhança dessa área de contato (SEABRA, 2003).

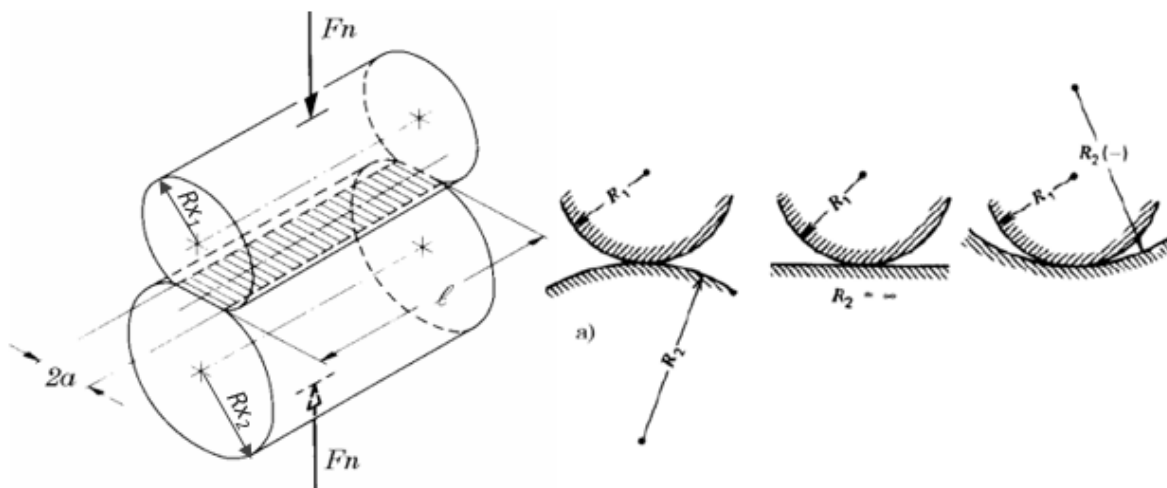
SOLUÇÃO DE HERTZ PARA O CONTATO LINEAR

Para o contato linear, objeto de estudo deste trabalho, o problema de hertz tem solução analítica simples, a qual passa pela resolução das equações 5 a 10, resumidas na Tabela 23. As figuras de suporte para resolução destas equações também são referenciadas na Tabela 23.

Tabela 23 – Resumo das equações de Hertz para resolução do contato elíptico

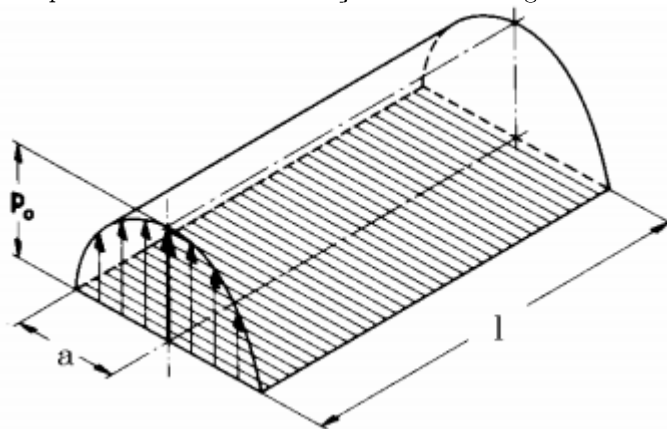
Eq.	Parâmetro	Desig.	Expressão	und
5	Módulo de Young equivalente	E^*	$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2}$	Pa
6	Raio equivalente segundo X, Figura 107	R_x	$\frac{1}{R_x} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{x1}} + \frac{1}{R_{x2}} \right)$	m
7	Curvaturas equivalente,	A	$A = 1/R_x$	m
8	Semi-largura de contato, Figura 108	a	$a = C_a \left[\frac{F_n}{(A+B)E^*} \right]^{1/3}$	m
9	Área de Contato	A_c	$A_c = 2al$	m ²
10	Pressão máxima de Hertz - Figura 108	$P_0, P_{\text{máx}}$	$P_0 = \frac{3}{2} \frac{F_n}{\pi ab}$	N/ m ²

Figura 107 – Geometria de um contato linear entre sólidos de revolução: R_{X1} , R_{X2} , raios de curvatura. Indicação de sinal positivo ou negativo consoante forma do contato.



Fonte: Seabra (2003)

Figura 108 - Distribuição de pressão no interior de um contato elíptico entre sólidos de revolução com superfícies lisas com indicação das semi-larguras de contato



Fonte: Seabra (2003)

LUBRIFICAÇÃO ELASTOHIDRODINÂMICA

A primeira demonstração da teoria da lubrificação EHD foi apresentada por Grubin e Vinogradova (1949), e com o tempo desenvolvida por vários outros pesquisadores. Nesta época, a teoria da lubrificação hidrodinâmica já estava estabelecida, porém não permitia prever o comportamento de contatos não conformes. Então, ainda nos anos 50 foi verificado que quando um contato hertziano está animado de velocidades na presença de um lubrificante, este é arrastado para o interior do contato devido à cinemática e à geometria das superfícies (efeito de cunha convergente) sendo fortemente comprimido entre as superfícies dos sólidos por ação da solitação exterior. As elevadas pressões que se desenvolvem no interior do contato provocam a deformação elástica das superfícies. A diferença de velocidade entre as superfícies e a pequena espessura do filme lubrificante geram elevadas velocidades de deformação do lubrificante provocando uma dissipação de energia e um aquecimento significativo do lubrificante. Tais pressões e temperaturas desenvolvidas provocam modificações significativas das propriedades do lubrificante no interior do contato (HAMROCK et al, 2004).

De fato, verifica-se que em contatos concentrados o lubrificante atravessa o contato num período de tempo da ordem de 1 ms, com uma espessura de filme de aproximadamente 1 μm , sofrendo um choque de pressão da ordem de 1 GPa ou superior, sendo submetido a velocidades de deformação que podem atingir 10^7 s^{-1} e elevações de temperatura superiores a 100°C . Tais condições, caracterizadas pelas elevadas e rápidas variações de pressão e temperatura a que estão submetidas as superfícies em contato e o filme lubrificante que as separa, justificam as significativas alterações das propriedades do lubrificante e a deformação elástica dos sólidos em contato que são observadas experimentalmente e determinadas teoricamente.

Em termos práticos, a Teoria da Lubrificação Elastohidrodinâmica (EHD) é fundamental para a compreensão dos fenômenos de lubrificação, de atrito e energéticos

no contato Hertziano. A lubrificação EHD permite avaliar três aspectos cruciais no desempenho de um contato hertziano lubrificado (ou elastohidrodinâmico):

- i) Determinar a espessura do filme lubrificante gerada entre as superfícies em contato, acompanhada da deformação elástica dos sólidos;
- ii) Avaliar o atrito entre as superfícies em contato devido à deformação viscoelastoplástica do filme lubrificante, tendo em conta o comportamento reológico do lubrificante, e;
- iii) Estabelecer o balanço energético do contato, tendo em atenção a dissipação de potência no filme lubrificante devido às tensões de corte instaladas e a evacuação de calor através da vazão de lubrificante e das superfícies em contato.

No contexto deste trabalho, a lubrificação EHD está diretamente associada ao atrito e desgaste por FCR.

SOLUÇÃO DA LUBRIFICAÇÃO EHD PARA O CONTATO LINEAR

A solução do problema elastohidrodinâmico tendo em conta todos os fenômenos físicos já referidos demandam a solução simultânea da equação de Reynolds, da equação de equilíbrio da carga, da equação da geometria do filme lubrificante, da equação do comportamento reológico do lubrificante e da equação da energia, o que é extremamente complexo. A solução analítica destas equações é desconhecida até hoje. E por tanto, é necessário o desenvolvimento de algoritmos para determinar a espessura de filme lubrificante num contato EHL. Porém, Dowson e Higginson (1978) apresentaram outra abordagem. Estes propuseram uma solução empírica baseada em centenas de medições de espessura de filme lubrificante para contatos elíticos e lineares.

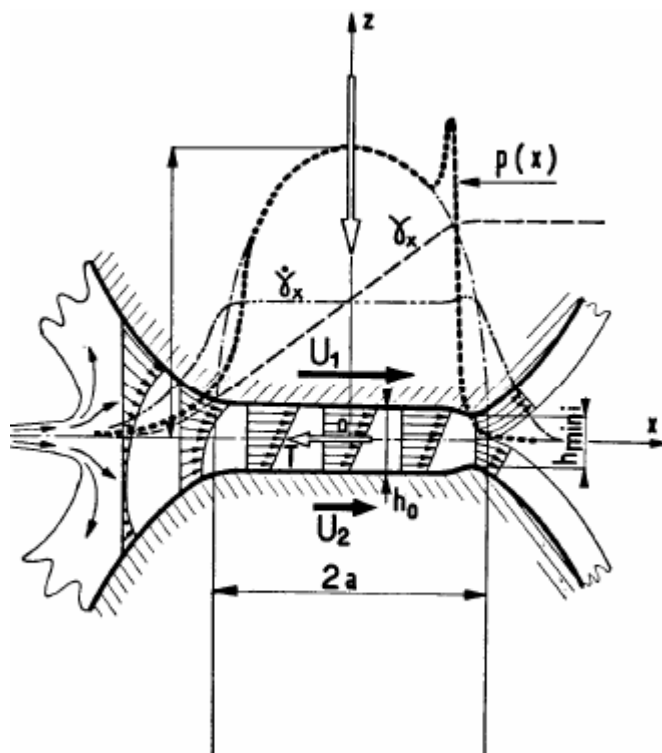
A solução da lubrificação EHL para um contato linear, objeto de estudo deste trabalho, passa pela resolução das Equações 11 a 18, sumarizadas na Tabela 24. As

figuras de suporte para resolução destas equações também são referenciadas na tabela. Observe que nestas equações o efeito do aquecimento do lubrificante é levado em conta pelo parâmetro (φ_T) e a rugosidade pelo parâmetro topográfico que representa o desvio médio quadrático das asperezas (Sq). Não é realizada nenhuma correção para quantidade de lubrificante, visto que os ensaios foram todos realizados em condição de lubrificação abundante, conforme descrito no capítulo 4.

Tabela 24 - Resumo das equações da lubrificação EHL para resolução do contato linear14

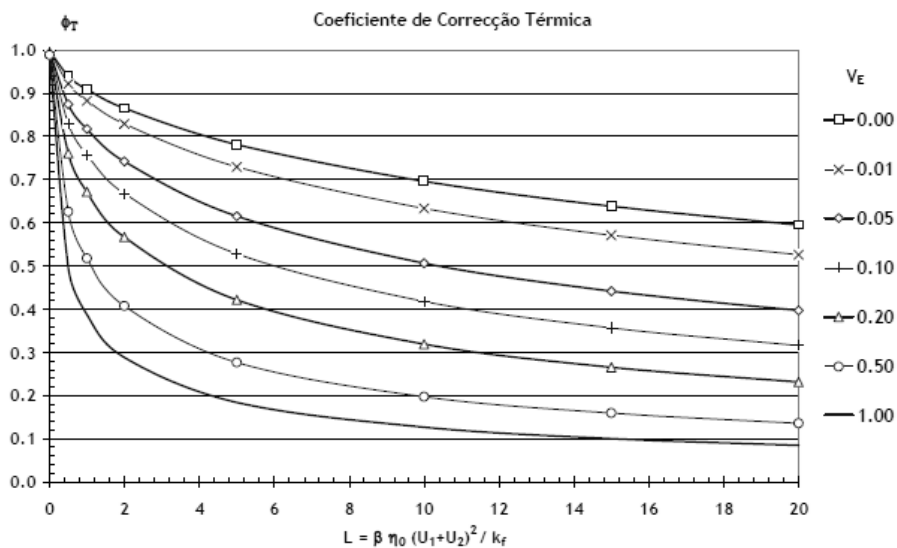
Eq.	Parâmetro	Desig.	Expressão	und
11	Parâmetro velocidade	U	$U = \frac{\eta_0(U_1 + U_2)}{2R_x E^*}$	/
12	Parâmetro material	G	$G = 2\alpha E^*$	/
13	Parâmetro carga	W	$W = \frac{F_n}{R_x l E^*}$	/
	Espessura do filme lubrificante no centro do contato -			
14		h_0	$h_0 = 0,975R_x U^{0,727} G^{0,727} W^{-0,091}$	m
	Figura 109			
15	Parâmetro térmico do lubrificante - Figura 110	L	$L = \frac{\beta\eta_0(U_1 + U_2)^2}{K}$	/
16	Influência do aquecimento no convergente - Figura 110	φ_T	$\varphi_T = [1 + 0,1(1 + 14,8V_e^{0,83})L^{0,64}]^{-1}$	m
	Taxa de escorregamento	V_e	$V_e = \frac{ U_1 - U_2 }{U_1 + U_2}$	
17	Espessura do filme lubrificante corrigida	h_{0c}	$h_{0c} = h_0\varphi_T$	m
18	Espessura específica do filme lubrificante	Λ	$\Lambda = \frac{h_{0c}}{\sqrt{Sq_1^2 + Sq_2^2}}$	/

Figura 109 - Espessura do filme lubrificante no interior de um contato EHD



Fonte: Seabra (2002)

Figura 110 - Coeficiente de correção térmica da espessura do filme lubrificante



Fonte: Seabra (2002)

Observe que para resolução do problema EHL apenas duas propriedades do lubrificante são utilizadas: viscosidade (ν) e piezoviscosidade (α). A viscosidade pode ser medida por reometria. A prática corrente é utilizar a viscosidade de óleo base, a qual é

fornecida pelo fabricante 40 e 100°C. Para obter seu valor em outras temperaturas, basta aplicar a norma ASTM D431 (Equação (19)).

$$\log(\log(v + a)) = n - m\log(T) \quad (19)$$

Onde v é a viscosidade cinemática (em cSt), T a temperatura (°K), m , n , a - constante dependente de cada lubrificante. No caso de óleos minerais e cujo valores de viscosidade não sejam menores que 2cSt, a constante a tem o valor de 0,7 cSt. As constantes m e n podem ser resolvidas via um sistema de equações utilizando as viscosidades cinemáticas a duas temperaturas diferentes na Equação (19) ($v(40^{\circ}\text{C})$ e $v(100^{\circ}\text{C})$ como citado acima).

A piezoviscosidade é simplesmente calculada pela Equação (20) (GOLD et al, 2001).

$$\alpha = sv^t \quad (20)$$

Onde s e t são constantes que dependem da natureza do óleo base. Para óleos minerais $s = 9.9040$ e $t = 0.1390$