GRACILIANO PEREIRA FERNANDES

**Aplicação da Tribologia na Pesquisa e Desenvolvimento de Materiais para
Embreagens Automotivas: estudo do atrito e do desgaste com foco na origem
do desenvolvimento, estabilidade e deterioração do tribofilme**

São Paulo

2016

GRACILIANO PEREIRA FERNANDES

Aplicação da Tribologia na Pesquisa e Desenvolvimento de Materiais para
Embreagens Automotivas: estudo do atrito e do desgaste com foco na origem do
desenvolvimento, estabilidade e deterioração do tribofilme

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Doutor em Engenharia
Mecânica

Orientador: Prof. Livre-Docente
Amilton Sinatora

São Paulo
2016

GRACILIANO PEREIRA FERNANDES

Aplicação da Tribologia na Pesquisa e Desenvolvimento de Materiais para
Embreagens Automotivas: estudo do atrito e do desgaste com foco na origem do
desenvolvimento, estabilidade e deterioração do tribofilme

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Doutor em Engenharia
Mecânica

Área de concentração:
Engenharia Mecânica e de Fabricação

Orientador: Prof. Livre-Docente
Amilton Sinatora

São Paulo
2016

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Pereira Fernandes, Graciliano

Aplicação da Tribologia na Pesquisa e Desenvolvimento de Materiais para Embreagens Automotivas: estudo do atrito e do desgaste com foco na origem do desenvolvimento, estabilidade e deterioração do tribofilme / G. Pereira Fernandes -- versão corr. -- São Paulo, 2016.

357 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Contato por deslizamento a seco 2.Embreagem automotiva 3.Material de fricção 4.Tribofilme 5.Tribômetro pino-disco I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

DEDICATÓRIA

A Deus, pela proteção, benção
força, sabedoria
e inspiração para vencer a cada dia.

A minha esposa Aline Farias Tavares

Aos meus pais Alair e Lúcia,
as minhas avós: Nadir e Lina.

AGRADECIMENTOS

A Empresa ZF BU TNB - CV (SBC-SP) por proporcionar esta oportunidade, pelo apoio financeiro e, por autorizar as publicações dos resultados deste trabalho.

A minha esposa e companheira Aline Faria Tavares por sempre me amparar, incentivar e, lutar ao meu lado nas minhas decisões. Por me dar forças aonde eu já pensava que não existia. Sem você esse desafio teria sido muito mais árduo.

Aos meus pais Alair Fernandes Gomes e Lúcia Helena Pereira pelas incansáveis orientações e encorajamento. Pela atenção e amor nos momentos de dificuldades, desânimos e até mesmo quando pensei em desistir.

Ao professor e orientador Amilton Sinatora pelo precioso tempo disponibilizado, pela experiência compartilhada e por suas eficientes recomendações e sugestões. Acima de tudo, pelos debates filosóficos proporcionados, por extrair de nós (alunos), o potencial que muitas vezes acreditamos não ter ou que não enxergamos e, dessa forma, nos proporciona ao final da jornada, não apenas mais um trabalho acadêmico, mas sim uma evolução do pensamento crítico e como ser humano.

A todos os meus colegas de trabalho, por tornar esta trajetória menos cansativa e mais prazerosa. Em especial a área de Pesquisa e Desenvolvimento de Materiais de Fricção.

Ao diretor da unidade de negócios TNB CV Walter Haertel Jr. pelas inúmeras cobranças, apoio e, por acreditar no meu potencial e na relevância do trabalho para os negócios da empresa.

Ao gerente Paulo Zanotto pela grandiosa orientação, apoio e, sugestões que foram fundamentais para a concretização deste trabalho e, ao atual diretor do setor de Materiais de Fricção, Flávio Rosso, pela compreensão e suporte na fase final.

Agradeço os estagiários Caio Ricci, Danilo Sidrão, Rafael Lopes e Rodrigo França que participaram ativamente em diferentes momentos e em várias etapas deste projeto, dando suporte nos ensaios laboratoriais e nas caracterizações, além das numerosas discussões e sugestões que enriqueceram ainda esse estudo.

Aos colegas do Departamento de Laboratório de Metalografia da ZF TNB CV, pelo suporte técnico no desenvolvimento de algumas etapas deste trabalho.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP) e as secretárias Silene, Marisa e Regianne.

Ao prof. Roberto Martins de Souza pelos trabalhos realizados em parceria e pelo grandioso apoio. Ao aluno de iniciação científica Felipe Mazuco, que também participou e desenvolveu atividades em uma importante etapa.

Aos alunos de graduação e pós-graduação do Laboratório Fenômeno de Superfície (LFS) que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho. A turma do futebol das terças-feiras.

As avós Nadir e Lina pelas numerosas, grandiosas e fervorosas orações que sempre me fortalecem espiritualmente.

A todos os meus familiares, irmão e irmãs, tios e tias e amigos que sempre me ajudaram, apoiaram, incentivaram e acreditam no meu potencial.

EPÍGRAFE

**“Simplicidade é extrair
da complexidade o substancial.”**

(Graciliano P. F.)

“Tenha sempre fé em Deus”.

**“Se não duvidar
mas crer que acontecerá o que disser,
então isto será feito.**

**Sempre que desejar alguma coisa
creia que já a tem,
e assim tudo lhe será dado”.**

(Mc: 12, 22-24)

RESUMO

Durante a transmissão do torque do motor para a caixa de transmissão por meio da embreagem, há contato por deslizamento entre um material polimérico multifásico e um contracorpo metálico e, o nível do coeficiente de atrito deve ser alto e estável, para proporcionar uma transmissão de torque eficiente e regular. No entanto, uma nova superfície (denominada de tribofilme) é desenvolvida devido à transferência de materiais entre as superfícies. Compreender as suas características tornou-se fundamental para desenvolver sistemas mais eficientes. Todavia, muitos ensaios são necessários para compreender os aspectos tribológicos e, viabilizar a escolha das matérias primas e dos processos envolvidos de maneira mais assertiva. Para reduzir tempo e custos e, ter um maior controle sobre as variáveis de ensaio, busca-se simular em laboratório com equipamentos mais simples, ensaios mais rápidos e menos complexos, a reprodução das interações tribológicas em condições reais. Na primeira fase deste trabalho, identificaram-se os mecanismos de desenvolvimento do tribofilme para três níveis de severidade em aplicações reais e, posteriormente correlacionou esses mecanismos com os reproduzidos em laboratório. Constatou-se que as características do tribofilme dependem da severidade da aplicação e que num tribômetro pino-disco é possível reproduzir tais mecanismos, pois houve paridade nas características do tribossistema do modelo de ensaio com o da condição real. Na segunda fase, investigou-se a influência do tribossistema no desempenho funcional do par tribológico (atrito e desgaste). Os ensaios tribométricos tradicionais revelaram uma transição no regime moderado de desgaste para o severo para temperaturas superiores a 250°C. A remoção dos debris de desgaste do meio interfacial elevou o nível do atrito e reduziu o da taxa de desgaste. Já a adição de debris de desgaste, aumentou o desgaste e reduziu drasticamente o atrito. Ensaios empregando discos pré-condicionados revelaram potencial ganho na eficiência do sistema embreagem, pois a taxa de desgaste e o coeficiente de atrito foram otimizados, principalmente em níveis de severidade mais elevados.

Palavras chave:

Contato por deslizamento a seco; Embreagem automotiva; Material de fricção; Tribofilme; Tribômetro pino-disco.

ABSTRACT

The torque transmission from combustion-engine to a gear box is done by a clutch system and sliding contact between a multiphase friction material and a gray iron rotor occurs. The friction level among the tribological couples has to be relatively high and stable to allow an efficient and regular performance. Material is transferred from one surface to the other and as consequence, a new surface, also known as tribofilm, is developed. This surface governs the clutch system performance and understanding the tribofilm characteristics is very important to improve the development of efficient clutch systems. However, a large number of tests are necessary to understand the tribological behavior of the raw materials. Such investigation is highly empirical and in order to have a consistent data it's necessary to carry out several friction tests repetitions. Alternatively, to save time and money, and have better control over the test variables, the real tribological interactions can be simulated in laboratory by using simple equipment, faster and simpler tests. The simplicity of device allows evaluating a larger number of alternative materials. In the first part of this work the tribofilm development mechanisms in three severity levels on the field application were investigate. Then these mechanisms were correlated with those simulated in laboratory. It was found that the tribofilm characteristics depend on the severity of application. In addition, the pin-on-disc tribometer can reproduce the tribofilm mechanisms development due to the parity between the tribosystem characteristics of test model and field condition. In the second part of this work, the influences of tribosystem on tribological couple performance (friction and wear) were evaluated. Standard tribometer tests presented a transition from moderate to severe wear regime for temperatures up to 250°C. Removing the wear debris from the interfacial contact increased the friction level and reduced the wear rate. By adding wear debris it raised the wear rate and reduced the friction level dramatically. However, experiments performed by using pre-conditioned discs, pointed out potential gain in the clutch system efficiency, due to the optimization on wear rate and friction coefficient level, particularly at higher severity levels.

Key words:

Automotive clutch; Dry sliding; Friction material; Pin-on-disc tribometer; Tribofilm.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1.1:	Perdas energéticas em um veículo automotor (HOLMBERG, ANDERSSON e ERDEMIR, 2012).....	1
Figura 1.1.2:	Powertrain de um veículo automotor (PEUGEOT RCZ – POWERTRAIN, 2010).....	4
Figura 2.1.1:	(a) Localização da embreagem manual a seco no interior do veículo e (b) detalhe da instalação entre o motor e a caixa de transmissão; os três principais componentes: (c) volante do motor, (d) material de fricção rebitado no disco da embreagem e (e) placa de pressão fixada no platô (GRUPO ZF - BU TNB CV, 2015).....	9
Figura 2.2.1:	Tipos de <i>running in</i> no coeficiente de atrito (BLAU, 2005).....	13
Figura 2.2.2:	Esquema exemplificando o desenvolvimento de óxidos nos picos das asperidades em função da elevação da temperatura nessas regiões, formando novos pontos de contato; (a) desenvolvimento, (b) destruição e (c) contato através dos óxidos, o que reduz à adesão entre as superfícies (STACHOWIAK e BATCHELOR, 2001).....	15
Figura 2.2.3:	Transição nos regimes das taxas de desgaste obtidos no ensaio por deslizamento a seco metal-metal (STACHOWIAK e BATCHELOR, 2001; adaptado de WELSH, 1964).....	16
Figura 2.3.1:	Representação esquemática de um tribossistema ou sistema tribológico. Neste exemplo, estabeleceu-se, arbitrariamente que as saídas podem ser úteis ou perdas.....	17
Figura 2.3.2:	Classificação dos diferentes modelos de ensaios tribológicos para reproduzir o tribossistema real: ensaio veicular em (a) campo [categoria I], (b) no laboratório [categoria II] e (c) no banco de prova [categoria III]; (d) componente de estudo reduzido a um subsistema [categoria IV] e (e) apenas um componente do subsistema [categoria V]; (f) em escala reduzida e simplificada [categoria VI] (a - b CZICHOS, 1985; c - f ZUM GAHR, 1987).....	18
Figura 2.3.3:	Reprodução do tribossistema da embreagem automotiva – ensaio em escala real (a) no campo e (b) em laboratório no banco de prova; (c) ensaio em escala reduzida e simplificada no tribômetro pino-disco.....	19
Figura 2.3.4:	Correlação dos mecanismos de desgaste observados no material de fricção ensaiado em campo em escala real, com os mecanismos que foram reproduzidos em laboratório com escala reduzida utilizando um tribômetro pino-disco (FERNANDES, 2007).....	22

Figura 2.3.5:	Taxa de desgaste dos materiais de fricção (a) A e (b) B em função da temperatura do ensaie da energia específica de atrito dos ensaios no dinamômetro inercial (GREGORI, ZANOTTO e HAERTEL JR., 2005; citado por FERNANDES, 2007).....	23
Figura 2.3.6:	Correlação entre a taxa desgaste simulada no tribômetro [escala reduzida e simplificada] com as obtidas no dinamômetro [escala real] (FERNANDES, 2007).....	23
Figura 2.3.7:	Evolução do transiente inicial da taxa desgaste em função da evolução topográfica da superfície do material de fricção durante o desenvolvimento da metodologia simplificada e acelerada no tribômetro (FERNANDES <i>et al.</i> , 2009 e 2010-a).....	24
Figura 2.3.8:	Limites térmicos das aplicações da embreagem automotiva (DREXL, 1990).....	25
Figura 2.3.9:	(a) amostra de um material de fricção após ensaio com elevada carga térmica [temperatura próxima a 300°C]; (b) superfície observada por MEV; (c) superfície da placa de pressão observada por MEV e (d) detalhe evidenciando a transferência e adesão de material na sua superfície (GRUPO ZF BU TNB - CV, 2015).....	27
Figura 2.4.1:	Influência da rugosidade do contracorpo metálico nos mecanismos de desgaste por: (a) adesão e (b) abrasão do material polimérico (STACHOWIAK e BATCHELOR, 2001)...	30
Figura 2.4.2:	Coeficiente de desgaste de um material polimérico em função do acabamento superficial do contracorpo metálico (DOWSON, GODET e TAYLOR, 1976; citado por HUTCHINGS, 1992).....	31
Figura 2.4.3:	Transição da taxa de desgaste de materiais poliméricos que deslizaram a seco contra superfícies metálicas: em função da (a) força normal aplicada e da (b) velocidade de deslizamento (EVANS e LANCASTER, 1979; citado por HUTCHINGS, 1992).....	32
Figura 2.5.1:	Sistema de freio automotiva disco: (a) real (CENTRO AUTOMOTIVO, 20??); (b) representação esquemática dos componentes e do funcionamento (HOW THE BRAKING SYSTEM WORKS, 2015); (c) pastilha de freio formada pelo material de fricção (CG AUTO, 2008); e (d) sua microestrutura revelando a morfologia e a distribuição das matérias-primas (CHAN e STACHOWIAK, 2004).....	34
Figura 2.5.2:	Superfície do contracorpo metálico após ensaio no dinamômetro caracterizado em seção transversal por M.O; tribofilme desenvolvido nos regimes (a) moderado e (b) severo (LIU, RHEE e LAWSON, 1980).....	35

Figura 2.5.3:	Representação esquemática da (a) superfície de contato da pastilha de freio; (b) platôs de contato existentes em uma pequena porção da superfície de contato; (c) momentâneos picos de representando a área real de contato (ERIKSSON e JACOBSON, 2000).....	36
Figura 2.5.4:	Representação tridimensional (a) do mecanismo de desenvolvimento do tribofilme no sistema frenagem automotiva; (b) platô secundário de contato desenvolvido a partir dos platôs primários (fio de aço - dois círculos brancos); esquerda MEV no modo SE e direita BSE (ERIKSSON e JACOBSON, 2000).....	37
Figura 2.5.5:	Evolução do (a) coeficiente de atrito em função da pressão de frenagem; tribofilme desenvolvido na superfície do material de fricção após testes em (b) baixa e (c) alta pressão e temperatura observado por MEV [note as diferenças na escala] - direção de deslizamento da direita para a esquerda; (c) superfície de contato e seção transversal do tribofilme observada por MEV revelando uma camada fina, homogênea e bem compacta no topo (ERIKSSON e JACOBSON, 2000).....	39
Figura 2.5.6:	Mecanismo de nucleação, formação e destruição do tribofilme em função da presença de uma partícula dura na matriz polimérica (OSTERLE <i>et al.</i> , 2001).....	40
Figura 2.5.7:	(a - c) Distribuição da tensão normal na superfície de contato à medida que a partícula inserida na matriz fica exposta; mecanismos de (d) nucleação, (e) desenvolvimento e (f) destruição do platô secundário em função da energia gerada por atrito [força normal e velocidade de deslizamento] (OSTERMEYER, 2003).....	42
Figura 2.5.8:	Caracterização da superfície do material de fricção em seção transversal e por MEV após ensaio dinamométrico a 700°C; (a) tribofilme desenvolvido sobre elementos estruturais e (b) detalhe; (c) variação da espessura em função da temperatura do ensaio (200° e 700°C) (FILIP, WEISS e RAFAJA, 2002).....	43
Figura 2.5.9:	Variação da (a) espessura do tribofilme na superfície do (b) contracorpo metálico em função da temperatura do ensaio (a- CHO <i>et al.</i> , 2005; b- CHO <i>et al.</i> , 2001).....	44
Figura 2.5.10:	Mecanismos de desgaste em função da condição do ensaio simulado em laboratório utilizando escala reduzida e simplificada; (a) adesão; (b) fadiga de contato; (c) delaminação; (d) abrasão; e (e) térmico (TALIB, MUCHTAR e AZHARI, 2003).....	46

Figura 2.5.11: Metodologias de ensaio de diferentes geometrias de contato utilizadas para reproduzir as características de tribossistemas reais de freios; material de fricção em escala (a) real, (b) reduzida e (c) reduzida e simplificada (BLAU e JOLLY, 2005).....	47
Figura 2.5.12: Superfície de atrito do material de fricção após teste de frenagem caracterizada por (a) MEV e (b) FIB; (c) espectro EDS de raios X referente à análise qualitativa na superfície do contracorpo [Platôs primário (PP) e secundário (PS)] (OSTERLE e URBAN, 2004).....	48
Figura 2.5.13: Elementos estruturais do material de fricção caracterizados por SIM; estrutura do tribofilme na superfície do (a) fio de latão e da (b) matriz polimérica (OSTERLE e URBAN, 2006)	49
Figura 2.5.14: Tribofilme não contínuo desenvolvido (a) na superfície do contracorpo e caracterizado em (b) seção transversal por MEV; (c) espectro qualitativo EDS de raios X obtido na região do tribofilme (ROUBICEK <i>et al.</i> , 2008).....	51
Figura 2.5.15: Modelo algorítmico para estudar a interdependência das variáveis de entrada (topografia, força normal e temperatura) e de saída (atrito e desgaste) do tribossistema no desempenho do par tribológico de freios (MULLER e OSTERMEYER, 2007).....	52
Figura 2.5.16: Superfície de atrito do material de fricção em escala reduzida na forma de (a) pino; superfície caracterizada por MEV após o ensaio tribométrico (b) sem aquecimento [tribofilme mais desenvolvido] e (c) com o disco aquecido até 515°C [tribofilme parcialmente destruído] (CRISTOL-BULTHÉ <i>et al.</i> , 2008).....	53
Figura 2.5.17: Variação da área real de contato em função da força normal aplicada; (a) baixa e (b) alta força; (c) elementos estruturais em contato direto com o contracorpo devido a remoção dos debris por um fluxo de água contínuo (EL-TAYEB e LIEW, 2009).....	54
Figura 2.5.18: Valores médios do (a) coeficiente de atrito e (b) temperatura obtidos nos ensaios tribométricos realizados com dois materiais de fricção com PV variando de 1,9 a 6,5 MPa ms ⁻¹ (STRAFFELINI e MAINES, 2013).....	55
Figura 2.5.19: Taxa de desgaste dos (a) materiais de fricção e dos (b) respectivos contracorpo de ferro fundido, que foram obtidas com PV variando de 1,9 a 6,5 MPa ms ⁻¹ (STRAFFELINI e MAINES, 2013).....	56

Figura 2.5.20:	Evolução do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio e superfície desgastada do material de fricção caracterizada por MEV após testes nos diferentes regimes de severidade simulados num tribômetro pino-disco: (a - b) baixa - T1; (c - d) moderado - T2; e (e-f) alta severidade - T3 (KCHAOU <i>et al.</i> , 2013) [Platôs primário (PP) e secundário (PS)].....	57
Figura 2.5.21:	(a) Evolução do coeficiente de atrito e da temperatura medida durante o ensaio em função do tempo e (b - c) superfície do material de fricção observada via MEV após o ensaio (SELLAMI <i>et al.</i> , 2013).....	58
Figura 4.1.1:	Conjuntos de embreagens ensaiados em campo e que foram coletados: (a) platô e placa de pressão; (b) disco do material de fricção que deslizou contra o lado do platô.....	64
Figura 4.2.1:	Amostra do material de fricção utilizada para a realização das simulações laboratoriais: escala (a) real e (b) reduzida...	65
Figura 4.2.2:	Amostra do contracorpo metálico utilizado nas simulações em laboratório: escala (a) real e (b) reduzida.....	66
Figura 4.2.3:	Equipamento tribômetro utilizado para a realização das simulações laboratoriais.....	67
Figura 4.2.4:	Configuração do ensaio tribométrico utilizado na série (a) A e (b) B.....	70
Figura 4.2.5:	Disco de ferro fundido utilizado nos ensaios tribométricos com adição de debris de desgaste (Série C); (a) modificações e adaptações e (b) detalhe da montagem do pino-disco.....	70
Figura 4.2.6:	Procedimento adotado para adicionar os debris de desgaste nos ensaios laboratoriais tribométricos; (a) medida da quantidade de debris e (b) debris espalhados sobre a superfície do disco antes do início do ensaio – série C.....	71
Figura 4.2.7:	Discos de ferro fundido utilizados nos ensaios tribométricos da série D com a topografia de superfície pré-condicionada na rugosidade média de (a) 1,2 e (b) 0,2 μm	72
Figura 4.2.8:	Curva característica da temperatura e do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio; (a) macro e (b) detalhe do regime <i>running in</i> do coeficiente de atrito.....	73
Figura 4.2.9:	Medição da espessura do material de fricção com auxílio do micrometro digital: (a) no centro da amostra (3,595 mm) e (b) em uma das bordas (3,602 mm).....	75
Figura 4.2.10:	Variação da coloração superficial de amostras de aço que foram submetidas a diferentes faixas de temperatura de tratamento isotérmico (WIKIPÉDIA-c).....	76

Figura 4.2.11:	Variação da coloração superficial de amostras de cobre que foram submetidas as diferentes faixas de temperatura de tratamento isotérmico (HINGGS, 1971).....	77
Figura 4.3.1:	(a) Representação esquemática da matriz de nano-indentação de 10 x 10 μm , com espaçamento de 10 μm entre as indentações; (b) marcas de nano-indentações no tribofilme formando a matriz.....	78
Figura 4.3.2:	Método de deposição de níquel na superfície do disco após o ensaio tribométrico para caracterização em seção transversal.....	80
Figura 4.3.3:	Método desenvolvido para proteger o tribofilme durante a preparação metalográfica e possibilitar a sua caracterização em seção transversal; (a) aplicação da resina protetora na amostra laboratorial; (b) processo de cura por luz UV; e (c) superfície do material de fricção de campo protegida pela resina após a cura.....	81
Figura 5.1:	Diagrama da sequência da apresentação dos resultados.....	86
Figura 5.1.1:	Material de fricção – elementos estruturais observados por MEV modo <i>BSE</i> pela (1) superfície de atrito e (2) em seção transversal; (a) macro; (b) matriz polimérica [MP], (c) roving das fibras de vidro [RFV] e (d) fio de cobre [FC].....	88
Figura 5.1.2:	Espectro qualitativo EDS de raios X característico dos elementos estruturais do material de fricção: (a) matriz polimérica; (b) roving das fibras de vidro; e (c) fio de cobre.....	89
Figura 5.1.3:	Contracorpo – microestrutura característica: (a) matriz perlítica obtida por M.O; (b) morfologia e distribuição dos veios de grafita obtida por MEV modo <i>BSE</i> ; superfície observada no modo <i>SE</i> : (c) macro e (d) em maior ampliação; (e) espectro EDS de raios X característico da superfície de atrito.....	90
Figura 5.1.4:	Topografia de superfície do disco de ferro fundido na sua condição sem uso com rugosidade média igual a (a) 3, (b) 1,2 e (c) 0,2 μm	92
Figura 5.1.5:	Diagrama da evolução da apresentação dos resultados.....	93
Figura 5.2.1:	Correlação entre as superfícies (a) da placa de pressão do conjunto A e (b) do disco de ferro fundido tratado isotermicamente na temperatura de 150°C.....	94
Figura 5.2.2:	Correlação entre as superfícies (a) da placa de pressão do conjunto B e dos discos tratados isotermicamente nas temperaturas de (b) 200°C, (c) 250°C e (d) 300°C.....	95
Figura 5.2.3:	Correlação entre as superfícies (a) da placa de pressão do conjunto C e dos discos tratados isotermicamente nas temperaturas de (b) 300°C, (c) 350°C e (d) 400°C.....	96

Figura 5.2.4:	Superfície de atrito do material de fricção dos conjuntos (a) A, (b) B e (c) C após o ensaio em campo em três diferentes condições de trabalho.....	97
Figura 5.2.5:	Material de fricção do conjunto embreagem A - superfície de atrito após ensaio em campo no regime de baixa severidade observada de forma macro por MEV modo (a) <i>SE</i> e (b) <i>BSE</i> - [RFV: roving das fibras de vidro; FC: fio de cobre].....	100
Figura 5.2.6:	Material de fricção – matriz polimérica após o ensaio em campo no regime de baixa severidade observada pela superfície de atrito por MEV modo (a) <i>SE</i> e (b) <i>BSE</i> ; (c) detalhe dos fragmentos de fibra vidro; (d) em seção transversal no modo <i>BSE</i> evidenciando o acúmulo de debris de desgaste na cavidade que se formou.....	101
Figura 5.2.7:	Material de fricção – roving das fibras de vidro após ensaio em campo no regime de baixa severidade e observado pela superfície de atrito por MEV modo (a - b) <i>SE</i> e (c - d) <i>BSE</i> ; espectro EDS de raios X obtido no ponto (e) A e (f) B - [TB: tribofilme].....	102
Figura 5.2.8:	Material de fricção – roving das fibras de vidro após ensaio em campo no regime de baixa severidade observado em seção transversal por MEV modo <i>BSE</i> : desenvolvimento do platô (a) primário (PP) e secundário (PS); (b) várias camadas do PS de diferentes espessuras e composição química.....	103
Figura 5.2.9:	Material de fricção – fio de cobre após ensaio em campo no regime de baixa severidade observado pela superfície de atrito por MEV modo (a - b) <i>SE</i> e (c - f) <i>BSE</i> ; (g) espectro EDS de raios X obtido no ponto A - [TB: tribofilme].....	104
Figura 5.2.10:	Material de fricção – fio de cobre após ensaio em campo no regime de baixa severidade observado em seção transversal por MEV modo <i>BSE</i> : (a) fio deformado e platô secundário (PS) desenvolvido na sua superfície; (b) detalhe do PS; (c) mapa composicional dos elementos químicos obtido por EDS.....	105
Figura 5.2.11:	Material de fricção do conjunto embreagem B - superfície de atrito após ensaio em campo no regime de média severidade observada de forma macro por MEV modo (a) <i>SE</i> e (b) <i>BSE</i> - [TB: tribofilme].....	107
Figura 5.2.12:	Material de fricção – matriz polimérica após ensaio em campo no regime de média severidade observada pela superfície de atrito por MEV modo (a - b) <i>SE</i> e (c - d) <i>BSE</i> - [TB: tribofilme].....	108

Figura 5.2.13:	Material de fricção – matriz polimérica após ensaio em campo no regime de média severidade observada em seção transversal por MEV modo <i>BSE</i> : (a) macro e (b) detalhes dos platôs primário (PP) e secundário (PS) mais morfologia e espessura do PS; (c) espectro EDS de raios X obtido no ponto A.....	109
Figura 5.2.14:	Material de fricção – roving das fibras de vidro após ensaio em campo no regime de média severidade observado pela superfície de atrito por MEV modo (a - b) <i>SE</i> e (c - d) <i>BSE</i> ; (e) espectro EDS de raios X obtido no ponto A - [TB: tribofilme].....	110
Figura 5.2.15:	Material de fricção – roving da fibra de vidro após ensaio em campo no regime de média severidade observado em seção transversal por MEV modo <i>BSE</i> : (a) macro e (b) tribofilme (TB) e (c-d) detalhes da sua morfologia e espessura.....	111
Figura 5.2.16:	Material de fricção – fio de cobre após ensaio em campo no regime de média severidade observado pela superfície de atrito por MEV modo (a) <i>SE</i> e (b) <i>BSE</i> ; (c) espectro EDS de raios X obtido no ponto A.....	112
Figura 5.2.17:	Material de fricção – fio de cobre após ensaio em campo no regime de média severidade observado em seção transversal por MEV modo <i>BSE</i> : (a) macro, (b) deformação do fio e (c - d) detalhes dos platôs secundários de contato desenvolvidos.....	113
Figura 5.2.18:	Material de fricção do conjunto embreagem C - superfície de atrito após ensaio em campo no regime de alta severidade observada de forma macro por MEV modo (a) <i>SE</i> e (b) <i>BSE</i> - [TB: tribofilme].....	115
Figura 5.2.19:	Material de fricção – matriz polimérica após ensaio em campo no regime de alta severidade observada pela superfície de atrito por MEV modo (a) <i>SE</i> e (b - d) <i>BSE</i> ; espectro EDS de raios X obtido no ponto (e) A e (f) B.....	116
Figura 5.2.20:	Material de fricção – matriz polimérica após ensaio em campo no regime de alta severidade observada em seção transversal por MEV modo <i>BSE</i> : (a) macro e (b) estrutura do tribofilme.....	117
Figura 5.2.21:	Material de fricção – roving das fibras de vidro após ensaio em campo no regime de alta severidade observado pela superfície de atrito por MEV modo (a - b) <i>BSE</i> e (c - d) <i>SE</i>	118

Figura 5.2.22:	Material de fricção – roving das fibras de vidro após ensaio em campo no regime de alta severidade observado em seção transversal por MEV modo <i>BSE</i> : (a) macro, (b) espessura e (c) detalhes das camadas do tribofilme da área azul; (d) detalhes da morfologia e espessura do tribofilme da área laranja; (e) mapa composicional dos elementos químicos obtido por EDS.....	118
Figura 5.2.23:	Material de fricção – fio de cobre após ensaio em campo no regime de alta severidade observado pela superfície de atrito por MEV modo (a - b) <i>SE</i> e (c - d) <i>BSE</i>	120
Figura 5.2.24:	Material de fricção – fio de cobre após ensaio em campo no regime de alta severidade observado em seção transversal por MEV modo <i>BSE</i> : (a) macro e (b) tribofilme e (c) espessura e morfologia da camada (d) 1, (e) 2 e (f) 3.....	121
Figura 5.2.25:	Material de fricção – espectros EDS de raios X obtidos nos pontos (a) 1, (b) 2 e (c) 3 dispostos na figura 5.2.24.....	122
Figura 5.2.26:	Comparação entre as intensidades das energias de raios X dos elementos químicos identificados no tribofilme desenvolvido sobre a matriz polimérica dos materiais de fricção ensaiados em campo nos regimes de média e alta severidade.....	125
Figura 5.2.27:	Comparação entre as intensidades das energias de raios X dos elementos químicos identificados no tribofilme desenvolvido no roving das fibras de vidro dos materiais de fricção ensaiados em campo nos regimes de baixa e média severidade.....	126
Figura 5.2.28:	Comparação entre as intensidades das energias de raios X dos elementos químicos identificados no tribofilme desenvolvido no fio de cobre dos materiais de fricção ensaiados em campo nos regimes de baixa, média e alta severidade.....	127
Figura 5.2.29:	Comparação entre as espessuras médias do tribofilme desenvolvido sobre os elementos estruturais do material de fricção em função das diferentes condições de ensaio em campo (baixa, média e alta severidade).....	128
Figura 5.2.30:	Material de fricção – marcas de nano-indentação e curvas de carregamento da força normal vs profundidade indentadas na microestrutura do tribofilme, para os diferentes regimes de severidade em campo: (a) baixa, (b) moderado e (c) alta severidade.....	129
Figura 5.2.31:	Módulo de elasticidade e dureza do tribofilme desenvolvido no material de fricção que foi ensaiado em campo nos diferentes regimes de severidade.....	130
Figura 5.2.32:	Diagrama da evolução da apresentação dos resultados.....	132

Figura 5.3.1:	Evolução do (a) coeficiente de atrito em função do tempo do ensaio tribométrico tradicional (Série A1 - $2,05 \text{ ms}^{-1}$); (b) detalhe do <i>running in</i>	134
Figura 5.3.2:	Evolução do (a) coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio tribométrico tradicional (Série A2 - $3,27 \text{ ms}^{-1}$); (b) detalhe do <i>running in</i>	136
Figura 5.3.3:	Temperatura e coeficiente de atrito médio dos ensaios tribométricos tradicionais (Série A) em função de PV. OBS: a escala da temperatura cresce de cima para baixo.....	137
Figura 5.3.4:	Coeficiente de atrito médio em função da temperatura média dos ensaios tribométricos tradicionais (Série A).....	138
Figura 5.3.5:	Taxa de desgaste do par tribológico (material de fricção e disco) dos ensaios tribométricos tradicionais em função da força normal e da velocidade de deslizamento - Séries A1 ($2,05 \text{ ms}^{-1}$) e A2 ($3,27 \text{ ms}^{-1}$).....	139
Figura 5.3.6:	Taxa de desgaste do par tribológico em função da temperatura média e do PV para os ensaios tribométricos tradicionais (Série A).....	140
Figura 5.3.7:	Taxa de desgaste do par tribológico em função da temperatura média dos ensaios tribométricos tradicionais (Série A).....	141
Figura 5.3.8:	Taxa de desgaste (a) do disco e (b) somente do material de fricção, ambas em função da temperatura média dos ensaios tribométricos tradicionais – Séries (A1 - $2,05 \text{ ms}^{-1}$) e (A2 - $3,27 \text{ ms}^{-1}$).....	143
Figura 5.3.9:	Material de Fricção - superfície de atrito após ensaio tribométrico tradicional (Série A) no PV de $3,08 \text{ MPa ms}^{-1}$ observada de forma macro por: (a) MO e (b) MEV modo <i>BSE</i>	145
Figura 5.3.10:	Material de fricção - matriz polimérica após ensaio tribométrico tradicional (Série A) no PV de $3,08 \text{ MPa ms}^{-1}$ observada pela superfície de atrito por: (a) MO e MEV modo (b) <i>SE</i> e (c) <i>BSE</i> ; em seção transversal no modo <i>BSE</i> : (d) espessura do tribofilme e (e-f) acúmulo de debris na cavidade formada na resina em função do seu desgaste – [Platôs: primário (PP) e secundário (PS); tribofilme (TB)].....	146
Figura 5.3.11:	Material de fricção - mapa composicional dos elementos químicos detectados no tribofilme visualizado na figura 5.3.10-e obtido por meio da análise qualitativa por EDS.....	147

Figura 5.3.12:	Material de fricção – roving das fibras de vidro após o ensaio tribométrico tradicional (Série A) no PV de 3,08 MPa ms ⁻¹ observado pela superfície de atrito por: (a) MO e MEV modo (b) SE e (c-d) BSE; em seção transversal no modo BSE: (e) macro e (f) detalhe da morfologia dos debris e do desenvolvimento de uma fina camada na superfície de contato - [Platôs: primário (PP) e secundário (PS)].....	148
Figura 5.3.13:	Material de fricção - espectro EDS de raios X obtido no ponto (a) A e (b) B dispostos na figura 5.3.12-d.....	150
Figura 5.3.14:	Material de fricção – fio de cobre após ensaio tribométrico tradicional (Série A) no PV de 3,08 MPa ms ⁻¹ , observado pela superfície de atrito por: (a) MO e MEV modo (b) SE e (c) BSE; em seção transversal no modo BSE: (d) macro e (e) detalhe do tribofilme (TB) sobre o fio de cobre; (f) espectro EDS de raios X obtido no ponto A.....	151
Figura 5.3.15:	Material de Fricção - superfície de atrito após ensaio tribométrico tradicional (Série A) no PV de 7,88 MPa ms ⁻¹ observada de forma macro por: (a) MO e (b) MEV modo BSE - [TB: tribofilme].....	153
Figura 5.3.16:	Material de fricção - matriz polimérica após o ensaio tribométrico tradicional (Série A) no PV de 7,88 MPa ms ⁻¹ observada pela superfície de atrito por: (a) MO e MEV modo (b) BSE; em seção transversal: (c) macro e (d - e) detalhes dos platôs primário (PP) e secundário (PS); (f) mapa composicional dos elementos químicos obtido por EDS.....	154
Figura 5.3.17:	Material de fricção – roving das fibras de vidro após o ensaio tribométrico tradicional (Série A) no PV de 7,88 MPa ms ⁻¹ observado pela superfície de atrito por: (a) MO e MEV modo (b) SE e (c-f) BSE; (g) espectro EDS de raios X obtido no ponto A – [Platôs: primário (PP) e secundário (PS)].....	155
Figura 5.3.18:	Material de fricção – roving das fibras de vidro após o ensaio tribométrico tradicional (Série A) no PV de 7,88 MPa ms ⁻¹ observado em seção transversal por MEV modo BSE: (a) estrutura macro e (b - d) detalhes do tribofilme.....	157
Figura 5.3.19:	Material de fricção – fio de cobre após o ensaio tribométrico tradicional (Série A) no PV de 7,88 MPa ms ⁻¹ observado pela superfície de atrito por: (a) MO e MEV modo (b) SE e (c - d) BSE.....	158
Figura 5.3.20:	Material de fricção – fio de cobre após o ensaio tribométrico tradicional (Série A) no PV de 7,88 MPa ms ⁻¹ observado em seção transversal por MEV no modo BSE: (a) macro, (b) detalhe do tribofilme e, (c) espectro EDS de raios X obtido no ponto A.....	159

Figura 5.3.21:	Material de Fricção - superfície de atrito após ensaio tribométrico tradicional (Série A) no PV de 10,09 MPa ms ⁻¹ observada de forma macro por: (a) MO e (b) MEV modo <i>BSE</i>	161
Figura 5.3.22:	Material de fricção - matriz polimérica após o ensaio tribométrico tradicional (Série A) no PV de 10,09 MPa ms ⁻¹ observada pela superfície de atrito por: (a) MO e MEV modo (b) <i>BSE</i> e (c - d) <i>SE</i> ; em seção transversal: (e - f) tribofilme em detalhes – [Platôs: primário (PP) e secundário (PS)].....	162
Figura 5.3.23:	Material de fricção – espectro EDS de raios X do ponto A disposto na figura 5.3.22.....	163
Figura 5.3.24:	Material de fricção – roving das fibras de vidro após o ensaio tribométrico tradicional (Série A) no PV de 10,09 MPa ms ⁻¹ observado pela superfície de atrito por: (a) MO e MEV modo (b - c) <i>se</i> e (d - f) <i>BSE</i> – [Platôs: primário (PP) e secundário (PS)].....	164
Figura 5.3.25:	Material de fricção – espectro EDS de raios X do ponto A disposto na figura 5.3.24.....	165
Figura 5.3.26:	Material de fricção – roving das fibras de vidro após o ensaio tribométrico tradicional (Série A) no PV de 10,09 MPa ms ⁻¹ observado em seção transversal por MEV modo <i>BSE</i> : (a) macro (b - d) detalhe do tribofilme (TB) sobre os filamentos.....	166
Figura 5.3.27:	Material de fricção – fio de cobre após o ensaio tribométrico tradicional (Série A) no PV de 10,09 MPa ms ⁻¹ observado pela superfície de atrito por: (a - b) M.O e MEV modo (c - d) <i>SE</i> e (e - f) <i>BSE</i> ; (g) espectro EDS de raios X obtido no ponto A.....	168
Figura 5.3.28:	Material de fricção – fio de cobre após o ensaio tribométrico tradicional (Série A) no PV de 10,09 MPa ms ⁻¹ observado em seção transversal por MEV modo <i>BSE</i> : (a) macro (b) detalhe do tribofilme e (c) detalhe da camada formada sobre o tribofilme.....	169
Figura 5.3.29:	Comparação entre as intensidades das energias de raios X dos elementos químicos identificados no tribofilme desenvolvido sobre o roving das fibras de vidro dos materiais de fricção ensaiados de maneira tradicional no tribômetro (Série A) nos PVs de 3,08, 7,88 e 10,09 MPa ms ⁻¹	171
Figura 5.3.30:	Comparação entre as intensidades das energias de raios X dos elementos químicos identificados no tribofilme desenvolvido sobre o fio de cobre dos materiais de fricção ensaiados tradicionalmente no tribômetro (Série A) nos PVs de 3,08, 7,88 e 10,09 MPa ms ⁻¹	172

Figura 5.3.31:	Comparação entre as espessuras médias do tribofilme desenvolvido sobre os elementos estruturais do material de fricção [MP: matriz polimérica; RFV: roving fibras de vidro; FC: fio de cobre] em função dos ensaios tribométricos tradicionais (Série A) nos PVs de 3,08, 7,88 e 10,09 MPa ms ⁻¹	174
Figura 5.3.32:	Material de fricção – marcas de indentação e curvas de carregamento da força normal vs profundidade indentada na microestrutura do tribofilme, para as diferentes condições de severidade laboratorial: (a) 3,08; (b) 7,88; e (c) 10,09 MPa ms ⁻¹	175
Figura 5.3.33:	Módulo de elasticidade e dureza do tribofilme desenvolvido no material de fricção utilizado nos ensaios tribométricos tradicionais (Série A) nos PVs de 3,08, 7,88 e 10,09 MPa ms ⁻¹	176
Figura 5.3.34:	Diagrama da evolução da apresentação dos resultados.....	177
Figura 5.3.35:	Disco – superfície após ensaio tribométrico tradicional (Série A) no PV de 3,08 MPa ms ⁻¹ : (a) topografia; caracterização por MEV modo BSE: (b) macro e (c - d) detalhes; (e) em seção transversal.....	178
Figura 5.3.36:	Disco - superfície após ensaio tribométrico tradicional (Série A) no PV de 7,88 MPa ms ⁻¹ : (a) topografia; caracterização por MEV modo BSE: (b) macro e (c) detalhe; (d) em seção transversal macro e (e) detalhe do tribofilme.....	179
Figura 5.3.37:	Disco - superfície após ensaio tribométrico tradicional (Série A) no PV de 10,09 MPa ms ⁻¹ : (a) topografia; caracterização por MEV modo BSE: (b) macro e (c) em detalhe.....	181
Figura 5.3.38:	Disco – superfície após ensaio tribométrico tradicional (Série A) no PV de 10,09 MPa ms ⁻¹ observada em seção transversal no MEV modo BSE: (a) macro e (b) detalhes das regiões com e (c - f) sem tribofilme.....	182
Figura 5.3.39:	Rugosidade média da superfície do disco após os ensaios tribométricos tradicionais (Série A) empregando os PVs de 3,08, 7,88 e 10,09 MPa ms ⁻¹	183
Figura 5.3.40:	Espectro EDS de raios X característicos dos círculos (a) A, (b) B e (c) C dispostos nas superfícies dos discos que foram submetidos aos ensaios tribométricos tradicionais (Série A) nos PVs de 3,08, 7,88 e 10,09 MPa ms ⁻¹	184
Figura 5.3.41:	Comparação entre as intensidades das energias de raios X dos elementos químicos ferro, cobre, enxofre e silício identificados no tribofilme desenvolvido na superfície dos discos ensaiados de maneira tradicional no tribômetro (Série A) nos PVs de 3,08, 7,88 e 10,09 MPa ms ⁻¹	185

Figura 5.3.42:	Espessura média do tribofilme desenvolvido na superfície do disco ensaiado de forma tradicional no tribômetro (Série A) nos PVs de: 3,08; 7,88; e 10,09 MPa ms ⁻¹	186
Figura 5.3.43:	Diagrama da evolução da apresentação dos resultados.....	189
Figura 5.4.1:	Correlação entre os mecanismos de desenvolvimento do tribofilme identificados na amostra ensaiada em campo no regime de baixa severidade e os reproduzidos em laboratório no tribômetro pino-disco no PV de 3,08 MPa ms ⁻¹ – MEV modo <i>BSE</i> ; [TB: tribofilme].....	191
Figura 5.4.2:	Correlação entre os mecanismos de desenvolvimento do tribofilme identificados na amostra ensaiada em campo no regime de média severidade e os reproduzidos em laboratório no tribômetro pino-disco no PV de 7,88 MPa ms ⁻¹ – MEV modo <i>BSE</i> ; [TB: tribofilme].....	194
Figura 5.4.3:	Correlação entre os mecanismos de desenvolvimento do tribofilme identificados na amostra ensaiada em campo no regime de alta severidade e os reproduzidos em laboratório no tribômetro pino-disco no PV de 10,09 MPa ms ⁻¹ – (a-d-e-h) MEV modo <i>BSE</i> ; (b-c-f-g) MEV modo <i>SE</i> ; [TB: tribofilme].....	196
Figura 5.4.4:	Correlação entre a espessura média do tribofilme que se desenvolveu em campo <i>versus</i> o reproduzido em laboratório, em função dos elementos estruturais do material de fricção e das condições dos ensaios.....	198
Figura 5.4.5:	Correlação entre a espessura média do tribofilme que se desenvolveu em campo <i>versus</i> o reproduzido em laboratório, em função dos elementos estruturais do material de fricção e das condições dos ensaios.....	199
Figura 5.4.6:	Diagrama da evolução da apresentação dos resultados.....	202
Figura 5.5.1:	Evolução do (a) coeficiente de atrito em função do tempo do ensaio tribométrico com remoção dos debris de desgaste (Série B1 - 2,05 ms ⁻¹); (b) detalhe do <i>running in</i>	204
Figura 5.5.2:	Evolução do (a) coeficiente de atrito em função do tempo do ensaio tribométrico com remoção dos debris de desgaste (Série B2 - 3,27 ms ⁻¹); (b) detalhe do <i>running in</i>	205
Figura 5.5.3:	Temperatura e coeficiente de atrito médio do ensaio tribométrico com remoção dos debris de desgaste (Série B) (a) em função de PV. OBS: a escala da temperatura cresce de cima para baixo; (b) coeficiente de atrito médio em função da temperatura.....	207
Figura 5.5.4:	Taxa de desgaste do par tribológico em função da força normal e da velocidade de deslizamento para os ensaios tribométricos com remoção dos debris de desgaste - Séries (B1 - 2,05 ms ⁻¹) e (B2 - 3,27 ms ⁻¹).....	209

Figura 5.5.5:	Taxa de desgaste do par tribológico para o ensaio tribométrico com remoção dos debris de desgaste (Série B): (a) em função da temperatura média do ensaio e de PV; (b) em função somente da temperatura média.....	209
Figura 5.5.6:	Taxa de desgaste do disco em função da temperatura média do ensaio tribométrico com remoção dos debris de desgaste (Série B).....	210
Figura 5.5.7:	Material de fricção – superfície de atrito após ensaio tribométrico no PV de 3,08 MPa ms ⁻¹ e com remoção dos debris de desgaste (Série B), caracterizada por MEV modo <i>BSE</i> : (a) macro; elementos estruturais: (b) matriz polimérica [MP], (c) roving das fibras de vidro [RFV] e, (d) fio de cobre [FC] – [Platôs: primário (PP) e secundário (PS)].....	212
Figura 5.5.8:	Material de fricção – superfície de atrito após ensaio tribométrico no PV de 7,88 MPa ms ⁻¹ e com remoção dos debris de desgaste (Série B), caracterizada por MEV modo <i>BSE</i> : (a) macro; elementos estruturais: (b) matriz polimérica [MP], (c) roving das fibras de vidro [RFV] e, (d) fio de cobre [FC] – [Platôs: primário (PP) e secundário (PS)].....	213
Figura 5.5.9:	Material de fricção – superfície de atrito após ensaio tribométrico no PV de 10,09 MPa ms ⁻¹ e com remoção dos debris de desgaste (Série B), caracterizada por MEV modo <i>BSE</i> : (a) macro; elementos estruturais: (b) matriz polimérica [MP], (c) roving das fibras de vidro [RFV] e, (d) fio de cobre [FC] – [Platôs: primário (PP) e secundário (PS)].....	214
Figura 5.5.10:	Disco – superfície após ensaio tribométrico no PV de 3,08 MPa ms ⁻¹ e com remoção dos debris de desgaste (Série B): (a) topografia; caracterização por MEV modo <i>BSE</i> : (b) macro e (c) detalhes.....	216
Figura 5.5.11:	Disco – superfície após ensaio tribométrico no PV de 7,88 MPa ms ⁻¹ e com remoção dos debris de desgaste (Série B): (a) topografia; caracterização por MEV modo <i>BSE</i> : (b) macro e (c) detalhes.....	217
Figura 5.5.12:	Disco – superfície após ensaio tribométrico no PV de 10,09 MPa ms ⁻¹ e com remoção dos debris de desgaste (Série B): (a) topografia; caracterização por MEV modo <i>BSE</i> : (b) macro e (c) detalhes.....	218
Figura 5.5.13:	Rugosidade média da superfície do disco após o ensaio tribométrico com remoção dos debris de desgaste (Série B) empregando os PVs de 3,08, 7,88 e 10,09 MPa ms ⁻¹	218
Figura 5.5.14:	Diagrama da evolução da apresentação dos resultados.....	220

Figura 5.6.1:	Evolução do (a) coeficiente de atrito em função do tempo do ensaio tribométrico com adição de debris de desgaste (Série C); (b) detalhe do <i>running in</i>	222
Figura 5.6.2:	Coeficiente de atrito médio em função da temperatura média dos ensaios tribométricos com adição de debris de desgaste (Série C).....	223
Figura 5.6.3:	Taxa de desgaste em $\text{mm}^3 \text{MJ}^{-1}$ (a) do par tribológico e (b) do disco em função da temperatura média do ensaio tribométrico com adição de debris de desgaste (Série C).....	225
Figura 5.6.4:	Material de fricção – superfície de atrito após ensaio tribométrico no PV de $3,08 \text{ MPa ms}^{-1}$ e com adição de debris de desgaste (Série C), caracterizada por MEV no modo <i>BSE</i> ; (a) macro; elementos estruturais: (b) matriz polimérica [MP]; (c) roving das fibras de vidro [RFV]; e (d) fio de cobre [FC] – [Platôs: primário (PP) e secundário (PS)].....	226
Figura 5.6.5:	Material de fricção – superfície de atrito após ensaio tribométrico no PV de $7,88 \text{ MPa ms}^{-1}$ e com adição de debris de desgaste (Série C), caracterizada por MEV no modo <i>BSE</i> ; (a) macro; elementos estruturais: (b) matriz polimérica [MP]; (c) roving das fibras de vidro [RFV]; e (d) fio de cobre [FC].....	227
Figura 5.6.6:	Material de fricção – superfície de atrito após ensaio tribométrico no PV de $10,09 \text{ MPa ms}^{-1}$ e com adição de debris de desgaste (Série C), caracterizada por MEV no modo <i>BSE</i> ; (a) macro; elementos estruturais: (b) matriz polimérica [MP]; (c) roving das fibras de vidro [RFV]; e (d) fio de cobre [FC].....	228
Figura 5.6.7:	Disco – superfície após ensaio tribométrico no PV de $3,08 \text{ MPa ms}^{-1}$ e com adição dos debris de desgaste (Série C): (a) topografia; caracterização por MEV modo <i>BSE</i> : (b) macro e (c) detalhes.....	230
Figura 5.6.8:	Disco – superfície após ensaio tribométrico no PV de $7,88 \text{ MPa ms}^{-1}$ e com adição dos debris de desgaste (Série C): (a) topografia; caracterização por MEV modo <i>BSE</i> : (b) macro e (c) detalhes.....	231
Figura 5.6.9:	Disco – superfície após ensaio tribométrico no PV de $10,09 \text{ MPa ms}^{-1}$ e com adição dos debris de desgaste (Série C): (a) topografia; caracterização por MEV modo <i>BSE</i> : (b) macro e (c) detalhes.....	233
Figura 5.6.10:	Rugosidade média da superfície do disco após ensaio tribométrico com a adição dos debris de desgaste (Série C) empregando os PVs de $3,08$, $7,88$ e $10,09 \text{ MPa ms}^{-1}$	233
Figura 5.6.11:	Diagrama da evolução da apresentação dos resultados.....	235

Figura 5.7.1:	Evolução do (a) coeficiente de atrito em função do tempo do ensaio tribométrico utilizando o disco pré-condicionado no Ra 0,2 μm (Série D1); (b) detalhe do <i>running in</i>	237
Figura 5.7.2:	Evolução do (a) coeficiente de atrito em função do tempo do ensaio tribométrico utilizando o disco pré-condicionado - Ra 1,2 μm (Série D2); (b) detalhe do <i>running in</i>	238
Figura 5.7.3:	Coeficiente de atrito médio em função da temperatura média dos ensaios tribométricos utilizando discos pré-condicionados - Ra 0,2 μm (Série D1) e Ra 1,2 μm (Série D2).....	239
Figura 5.7.4:	Taxa de desgaste (a) do par tribológico e (b) do disco em função da temperatura média dos ensaios tribométricos utilizando discos pré-condicionados - Ra 0,2 μm (Série D1) e Ra 1,2 μm (Série D2).....	241
Figura 5.7.5:	Material de fricção – superfície de atrito após ensaio tribométrico no PV de 3,08 MPa ms ⁻¹ e utilizando disco pré-condicionado [Ra 0,2 μm (Série D1)], caracterizada por MEV modo <i>BSE</i> : (a) macro; detalhes dos elementos estruturais: (b) matriz polimérica [MP], (c) roving das fibras de vidro [RFV] e (c) fio de cobre [FC] – [Platôs: primário (PP) e secundário (PS)].....	242
Figura 5.7.6:	Material de fricção – superfície de atrito após ensaio tribométrico no PV de 7,88 MPa ms ⁻¹ e utilizando disco pré-condicionado [Ra 0,2 μm (Série D1)], caracterizada por MEV modo <i>BSE</i> : (a) macro; detalhes dos elementos estruturais: (b) matriz polimérica [MP], (c) roving das fibras de vidro [RFV] e (c) fio de cobre [FC] – [Platôs: primário (PP) e secundário (PS)].....	243
Figura 5.7.7:	Material de fricção – superfície de atrito após ensaio tribométrico no PV de 10,09 MPa ms ⁻¹ e utilizando disco pré-condicionado [Ra 0,2 μm (Série D1)], caracterizada por MEV modo <i>BSE</i> : (a) macro; detalhes dos elementos estruturais: (b) matriz polimérica [MP], (c) roving das fibras de vidro [RFV] e, (c) fio de cobre [FC] – [Platôs: primário (PP) e secundário (PS)].....	244
Figura 5.7.8:	Disco pré-condicionado [Ra 0,2 μm (Série D1) – superfície após ensaio tribométrico no PV de 3,08 MPa ms ⁻¹ : (a) topografia; caracterização por MEV modo <i>BSE</i> : (b) macro e (c) detalhes.....	246
Figura 5.7.9:	Disco pré-condicionado [Ra 0,2 μm (Série D1) – superfície após ensaio tribométrico no PV de 7,88 MPa ms ⁻¹ : (a) topografia; caracterização por MEV modo <i>BSE</i> : (b) macro e (c) detalhes.....	247

Figura 5.7.10:	Disco pré-condicionado [Ra 0,2 μm (Série D1)] – superfície após ensaio tribométrico no PV de 10,09 MPa ms ⁻¹ : (a) topografia; caracterização por MEV modo <i>BSE</i> : (b) macro e (c) detalhes.....	248
Figura 5.7.11:	Rugosidade média da superfície do disco pré-condicionado [Ra 0,2 μm (Série D1)] após os ensaios tribométricos empregando os PVs de 3,08, 7,88 e 10,09 MPa ms ⁻¹	249
Figura 5.7.12:	Material de fricção – superfície de atrito após ensaio tribométrico no PV de 3,08 MPa ms ⁻¹ e utilizando disco pré-condicionado [Ra 1,2 μm (Série D2)], caracterizada por MEV modo <i>BSE</i> : (a) macro; detalhes dos elementos estruturais: (b) matriz polimérica [MP], (c) roving das fibras de vidro [RFV] e (c) fio de cobre [FC] – [Platôs: primário (PP) e secundário (PS)].....	250
Figura 5.7.13:	Material de fricção – superfície de atrito após ensaio tribométrico no PV de 7,88 MPa ms ⁻¹ e utilizando disco pré-condicionado [Ra 1,2 μm (Série D2)], caracterizada por MEV modo <i>BSE</i> : (a) macro; detalhes dos elementos estruturais: (b) matriz polimérica [MP], (c) roving das fibras de vidro [RFV] e (c) fio de cobre [FC] – [Platôs: primário (PP) e secundário (PS)].....	251
Figura 5.7.14:	Material de fricção – superfície de atrito após ensaio tribométrico no PV de 10,09 MPa ms ⁻¹ e utilizando disco pré-condicionado [Ra 1,2 μm (Série D2)], caracterizada por MEV modo <i>BSE</i> : (a) macro; detalhes dos elementos estruturais: (b) matriz polimérica [MP], (c) roving das fibras de vidro [RFV] e (c) fio de cobre [FC] – [Platôs: primário (PP) e secundário (PS)].....	252
Figura 5.7.15:	Disco pré-condicionado [Ra 1,2 μm (Série D2)] – superfície após ensaio tribométrico no PV de 3,08 MPa ms ⁻¹ : (a) topografia; caracterização por MEV modo <i>BSE</i> : (b) macro e (c) detalhes.....	254
Figura 5.7.16:	Disco pré-condicionado [Ra 1,2 μm (Série D2)] – superfície após ensaio tribométrico no PV de 7,88 MPa ms ⁻¹ : (a) topografia; caracterização por MEV modo <i>BSE</i> : (b) macro e (c) detalhes.....	255
Figura 5.7.17:	Disco pré-condicionado [Ra inicial de 1,2 μm (Série D2)] após ensaio tribométrico no PV de 10,09 MPa ms ⁻¹ : (a) topografia de superfície; caracterização por MEV modo <i>BSE</i> : (b) superfície de atrito macro e (c) detalhes.....	256
Figura 5.7.18:	Rugosidade média da superfície do disco pré-condicionado [Ra 1,2 μm (Série D2)] após os ensaios tribométricos empregando os PVs de 3,08, 7,88 e 10,09 MPa ms ⁻¹	257
Figura 5.7.19:	Diagrama da evolução da apresentação dos resultados.....	259

Figura 5.8.1:	Coeficiente de atrito médio dos ensaios tribométricos tradicionais (Série A) versus com remoção dos debris de desgaste (Série B) em função da temperatura média.....	260
Figura 5.8.2:	Relação entre as taxas de desgaste obtidas com os ensaios tribométricos tradicionais (Série A) versus com remoção dos debris de desgaste (Série B) em função da temperatura média: (a) par tribológico e (b) disco [A1: 2,05 ms ⁻¹ ; A2: 3,27 ms ⁻¹].....	262
Figura 5.8.3:	Evolução dos (a) coeficientes de atrito obtidos nas diferentes séries de ensaios tribométricos no PV de 3,08 MPa ms ⁻¹ , em função do tempo; (b) detalhe do <i>running in</i>	264
Figura 5.8.4:	Evolução dos (a) coeficientes de atrito obtidos nas diferentes séries de ensaios tribométricos no PV de 7,88 MPa ms ⁻¹ , em função do tempo; (b) detalhe do <i>running in</i>	266
Figura 5.8.5:	Evolução dos (a) coeficientes de atrito obtidos nas diferentes séries de ensaios tribométricos no PV de 10,09 MPa ms ⁻¹ , em função do tempo; (b) detalhe do <i>running in</i>	267
Figura 5.8.6:	Correlação entre os coeficientes de atrito médios obtidos com as diferentes séries de ensaios tribométricos para os diferentes níveis de energia, em função da temperatura média dos ensaios.....	268
Figura 5.8.7:	Correlação entre as taxas de desgaste do par tribológico obtidas com as diferentes séries de ensaios, em função do (a) PV e da (b) temperatura média.....	269
Figura 5.8.8:	Correlação entre as taxas de desgaste do disco (mm ³ MJ ⁻¹) obtidas nas diferentes séries em função da temperatura média do ensaio - (eixo da ordenada está na escala logarítmica).....	271
Figura 5.8.9:	Diagrama da evolução da apresentação dos resultados.....	274

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1.1:	Características mínimas e máximas da embreagem usada na linha pesada.....	63
Tabela 4.1.2:	Síntese dos conjuntos embreagens coletados de campo para caracterizar e identificar os mecanismos de desenvolvimento do tribofilme.....	63
Tabela 4.2.1:	Valores de PV determinados para as diferentes condições de ensaios tribométricos.....	68
Tabela 4.2.2:	Séries de ensaios tribométricos adotadas para as simulações em laboratório.....	68
Tabela 4.2.3:	PVs que foram empregados em cada série de ensaio tribométrico.....	69
Tabela 4.3.1:	Parâmetros empregados nas caracterizações por MEV e EDS.....	82
Tabela 5.1.1:	Contracorpo - propriedades da microestrutura – Especificado vs Determinado.....	91
Tabela 5.2.1:	Classificação dos regimes de severidade em campo dos conjuntos das embreagens caracterizados.....	98
Tabela 5.2.2:	Características das condições operacionais da embreagem nos diferentes regimes de trabalho em campo (GRUPO ZF BU TNB - CV, 2015).....	98
Tabela 5.2.3:	Síntese das caracterizações realizadas nos elementos estruturais do material de fricção após ensaio em campo em baixa severidade: [MP: matriz polimérica; RFV: roving das fibras de vidro; FC: fio de cobre].....	106
Tabela 5.2.4:	Síntese das caracterizações realizadas nos elementos estruturais do material de fricção após o uso em campo no regime de média severidade: [MP: matriz polimérica; RFV: roving das fibras de vidro; FC: fio de cobre].....	114
Tabela 5.2.5:	Síntese das caracterizações realizadas nos elementos estruturais do material de fricção após o uso em campo no regime de alta severidade: [MP: matriz polimérica; RFV: roving das fibras de vidro; FC: fio de cobre].....	123
Tabela 5.2.6:	Síntese das caracterizações realizadas nos elementos estruturais dos materiais de fricção ensaiados em campo nos diferentes regimes - [E.E: Elemento estrutural; MP: matriz polimérica; RFV: roving das fibras de vidro; FC: fio de cobre; TB: tribofilme].....	124
Tabela 5.3.1:	Temperatura média (°C) dos ensaios tribométricos tradicionais (Série A).....	133
Tabela 5.3.2:	Coeficiente de atrito médio calculado a partir do regime permanente dos ensaios tribométricos tradicionais (Série A).	137

Tabela 5.3.3:	Taxa de desgaste do par tribológico em $\text{mm}^3 \text{MJ}^{-1}$ obtida para os testes tribométricos tradicionais (Série A).....	139
Tabela 5.3.4:	Síntese das caracterizações dos elementos estruturais do material de fricção após ensaio tribométrico tradicional (Série A) no PV de $3,08 \text{ MPa ms}^{-1}$ - [MP: matriz polimérica; RFV: roving das fibras de vidro; FC: fio de cobre].....	152
Tabela 5.3.5:	Síntese das caracterizações dos elementos estruturais do material de fricção após ensaio tribométrico tradicional (Série A) no PV de $7,88 \text{ MPa ms}^{-1}$ - [MP: matriz polimérica; RFV: roving das fibras de vidro; FC: fio de cobre].....	160
Tabela 5.3.6:	Síntese das caracterizações dos elementos estruturais do material de fricção após ensaio tribométrico tradicional (Série A) no PV de $10,09 \text{ MPa ms}^{-1}$ - [MP: matriz polimérica; RFV: roving das fibras de vidro; FC: fio de cobre].....	170
Tabela 5.3.7:	Síntese das caracterizações realizadas nos elementos estruturais dos materiais de fricção ensaiados em laboratório nos diferentes PVs - [E.E: Elemento estrutural; MP: matriz polimérica; RFV: roving das fibras de vidro; FC: fio de cobre; TB: tribofilme].....	170
Tabela 5.4.1:	Correlação das características dos elementos estruturais e, dos tribofilmes desenvolvidos nos materiais de fricção ensaiados em campo no regime de baixa severidade e no laboratório no PV de $3,08 \text{ MPa ms}^{-1}$ - [E.E: Elemento estrutural; MP: matriz polimérica; RFV: roving das fibras de vidro; FC: fio de cobre].....	192
Tabela 5.4.2:	Correlação das características dos elementos estruturais e, dos tribofilmes desenvolvidos nos materiais de fricção ensaiados em campo no regime de média severidade e no laboratório no PV de $7,88 \text{ MPa ms}^{-1}$ - [E.E: Elemento estrutural; MP: matriz polimérica; RFV: roving das fibras de vidro; FC: fio de cobre].....	195
Tabela 5.4.3:	Correlação das características dos elementos estruturais e, dos tribofilmes desenvolvidos nos materiais de fricção ensaiados em campo no regime de alta severidade e no laboratório no PV de $10,09 \text{ MPa ms}^{-1}$ - [E.E: Elemento estrutural; MP: matriz polimérica; RFV: roving das fibras de vidro; FC: fio de cobre].....	197
Tabela 5.5.1:	Temperatura média ($^{\circ}\text{C}$) dos ensaios tribométricos com remoção dos debris (Série B).....	
Tabela 5.5.2:	Coeficiente de atrito médio calculado a partir do regime permanente dos ensaios tribométricos com remoção dos debris de desgaste (Série B).....	

Tabela 5.5.3:	Taxa de desgaste do par tribológico em $\text{mm}^3 \text{MJ}^{-1}$ obtida para os ensaios tribométricos com remoção dos debris de desgaste (Série B).....	203
Tabela 5.5.4:	Síntese das caracterizações realizadas nos elementos estruturais dos materiais de fricção ensaiados em laboratório nos diferentes PVs - [E.E: Elemento estrutural; MP: matriz polimérica; RFV: roving das fibras de vidro; FC: fio de cobre; TB: tribofilme].....	206
Tabela 5.6.1:	Temperatura média ($^{\circ}\text{C}$) dos ensaios tribométricos com adição de debris (Série C).....	221
Tabela 5.6.2:	Coeficiente de atrito médio calculado para os ensaios tribométricos com adição de debris de desgaste (Série C).....	223
Tabela 5.6.3:	Taxa de desgaste do par tribológico em $\text{mm}^3 \text{MJ}^{-1}$ obtidas para os ensaios tribométricos com adição de debris de desgaste (Série C).....	224
Tabela 5.6.4:	Síntese das caracterizações realizadas nos elementos estruturais dos materiais de fricção ensaiados em laboratório nos diferentes PVs - [E.E: Elemento estrutural; MP: matriz polimérica; RFV: roving das fibras de vidro; FC: fio de cobre; TB: tribofilme].....	229
Tabela 5.7.1:	Temperatura média ($^{\circ}\text{C}$) dos ensaios tribométricos utilizando os discos pré-condicionados em: Ra 0,2 μm (Série D1) e Ra 1,2 μm (Série D2).....	236
Tabela 5.7.2:	Coeficiente de atrito médio calculado para os ensaios tribométricos utilizando discos pré-condicionados - Ra 0,2 μm (Série D1) e Ra 1,2 μm (Série D2).....	239
Tabela 5.7.3:	Taxa de desgaste do par tribológico em $\text{mm}^3 \text{MJ}^{-1}$ obtida nos ensaios tribométricos utilizando discos pré-condicionados - Ra 0,2 μm (Série D1) e Ra 1,2 μm (Série D2).....	240
Tabela 5.7.4:	Síntese das caracterizações realizadas nos elementos estruturais dos materiais de fricção ensaiados em laboratório nos diferentes PVs - [E.E: Elemento estrutural; MP: matriz polimérica; RFV: roving das fibras de vidro; FC: fio de cobre; TB: tribofilme].....	245
Tabela 5.7.5:	Síntese das caracterizações realizadas nos elementos estruturais dos materiais de fricção ensaiados em laboratório nos diferentes PVs - [E.E: Elemento estrutural; MP: matriz polimérica; RFV: roving das fibras de vidro; FC: fio de cobre; TB: tribofilme].....	253

LISTA DE ABREVIATURAS

ANFAVEA	Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores
ANFAP	Associação Nacional dos Fabricantes de Autopeças
BSE	Elétrons retroespalhados
COF	Coeficiente de atrito
EDS	Espectroscopia dispersiva de raios X
FC	Fio de cobre
FIB	Focus ion beam
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
M.O	Microscópio ótico
MP	Matriz polimérica
PP	Platô primário de contato
PS	Platô secundário de contato
Ra	Rugosidade média do perfil topográfico
Sa	Rugosidade média da área topográfica
SE	Elétrons secundários
SIM	Scanning ion microscopy
RFV	Roving das fibras de vidro
TB	Tribofilme

LISTA DE SÍMBOLOS

μm	Micrômetro
μ	Coeficiente de atrito
$\mu_{\text{máx}}$	Coeficiente de atrito máximo
$\mu_{\text{mín}}$	Coeficiente de atrito mínimo
$\Delta\mu_{12}$	Diferença entre o coeficiente de atrito máximo e o mínimo
$\Delta\mu_{23}$	Diferença entre o coeficiente de atrito mínimo e o médio
$\Delta\mu_{13}$	Diferença entre o coeficiente de atrito máximo e o médio
t_1	Tempo para atingir o coeficiente de atrito máximo
t_2	Tempo para atingir o coeficiente de atrito mínimo
t_3	Tempo para o coeficiente de atrito entrar no regime permanente
Δt_{12}	Diferença entre o tempo para atingir o coeficiente de atrito máximo e o mínimo
Δt_{23}	Diferença entre o tempo para atingir o coeficiente de atrito mínimo e o médio
Δt_{13}	Diferença entre o tempo para atingir o coeficiente de atrito máximo e o médio
PV	Produto entre a pressão específica e a velocidade de deslizamento
MPa ms^{-1}	MegaPascal por metros por segundos
$\text{mm}^3 \text{ MJ}^{-1}$	Milímetro cúbico por MegaJoule

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
2.1 Embreagem Automotiva Manual a Seco.....	9
2.2 Fundamentos da Tribologia.....	13
2.3 Ensaios Para Avaliação Funcional da Embreagem.....	17
2.4 Resposta Tribológica de Polímeros Quando Deslizados Contra Superfícies Metálicas.....	29
2.5 Tribofilme no Par Tribológico: Material de Fricção e Disco de Ferro Fundido.....	33
3 OBJETIVOS.....	61
4 MATERIAIS e MÉTODOS.....	62
4.1 Amostra de Campo.....	63
4.2 Ensaios Laboratoriais.....	65
4.2.1 Materiais.....	65
4.2.2 Equipamento Utilizado nos Ensaios Laboratoriais.....	66
4.2.3 Condições dos Ensaios.....	67
4.2.4 Parâmetros Tribológicos.....	73
4.2.4.1 Temperatura e Coeficiente de Atrito.....	73
4.2.4.2 Taxa de Desgaste.....	74
4.2.5 Tratamento Isotérmico do Disco.....	75
4.2.6 Variação da Coloração do Cobre.....	76
4.3 Caracterizações.....	77
4.3.1 Ensaios Mecânicos – Dureza.....	77
4.3.2 Ensaios Mecânicos – Nano-dureza.....	78
4.3.3 Microestrutura.....	79
4.3.3.1 Superfície de Atrito.....	79
4.3.3.2 Seção Transversal.....	80
4.3.4 Microscopia Ótica.....	82
4.3.5 Microscopia Eletrônica de Varredura.....	82
4.3.6 Topografia de Superfície.....	83
5 RESULTADOS.....	85
5.1 Caracterização dos Materiais na Condição Sem Uso.....	87
5.1.1 Material de Fricção.....	87
5.1.2 Placa de Pressão e Disco (Contracorpo metálico).....	90
5.2 Ensaios de Campo.....	94
5.2.1 Classificação dos Regimes de Severidade.....	94
5.2.2 Caracterização do Material de Fricção na Superfície de Atrito e em Seção Transversal.....	99
5.2.2.1 Regime de Baixa Severidade.....	100
5.2.2.2 Regime de Média Severidade.....	107
5.2.2.3 Regime de Alta Severidade.....	115

5.2.3	Análise da Intensidade dos Picos dos Elementos Químicos, Espessura, Dureza e Módulo de Elasticidade do Tribofilme Desenvolvido no Material de Fricção.....	124
5.2.4	Conclusões Parciais.....	131
5.3	Ensaio Laboratoriais - Série A: Tradicionais.....	133
5.3.1	Temperatura e Coeficiente de Atrito.....	133
5.3.2	Taxa de Desgaste.....	138
5.3.3	Caracterização do Material de Fricção na Superfície de Atrito e em Seção Transversal.....	144
5.3.3.1	PV 3,08 MPa ms ⁻¹	145
5.3.3.2	PV 7,88 MPa ms ⁻¹	153
5.3.3.3	PV 10,09 MPa ms ⁻¹	161
5.3.4	Análise da Intensidade dos Picos dos Elementos Químicos, Espessura, Dureza e Módulo de Elasticidade do Tribofilme Desenvolvido no Material de Fricção.....	171
5.3.5	Caracterização do Disco na Superfície de Atrito e em Seção Transversal.....	177
5.3.5.1	PV 3,08 MPa ms ⁻¹	177
5.3.5.2	PV 7,88 MPa ms ⁻¹	179
5.3.5.3	PV 10,09 MPa ms ⁻¹	180
5.3.6	Análise Topográfica, da Intensidade dos Picos dos Elementos Químicos e da Espessura do Tribofilme Desenvolvido no Disco.....	183
5.3.7	Discussão.....	186
5.3.8	Conclusões Parciais.....	188
5.4	Correlação: Ensaio de Campo vs Laboratoriais no Tribômetro Pino-disco.....	190
5.4.1	Mecanismos de Desenvolvimento do Tribofilme.....	190
5.4.2	Dureza e Módulo de Elasticidade do Tribofilme.....	198
5.4.3	Conclusões Parciais.....	200
5.5	Ensaio Laboratoriais - Série B: Remoção dos Debris de Desgaste.....	203
5.5.1	Temperatura e Coeficiente de Atrito.....	203
5.5.2	Taxa de Desgaste.....	208
5.5.3	Caracterização do Material de Fricção na Superfície de Atrito.....	211
5.5.4	Caracterização do Disco na Superfície de Atrito.....	215
5.5.5	Conclusões Parciais.....	219
5.6	Ensaio Laboratoriais - Série C: Adição de Debris de Desgaste....	221
5.6.1	Temperatura e Coeficiente de Atrito.....	221
5.6.2	Taxa de Desgaste.....	224
5.6.3	Caracterização do Material de Fricção na Superfície de Atrito.....	226
5.6.4	Caracterização do Disco na Superfície de Atrito.....	230

5.6.5 Conclusões Parciais.....	234
5.7 Ensaios Laboratoriais - Série D: Discos Pré-condicionados.....	236
5.7.1 Temperatura e Coeficiente de Atrito.....	236
5.7.2 Taxa de Desgaste.....	240
5.7.3 Caracterização do Par Tribológico na Superfície de Atrito....	242
5.7.3.1 Material de fricção - Ra inicial do disco igual a 0,2 µm.....	242
5.7.3.2 Disco - Ra inicial igual a 0,2 µm.....	246
5.7.3.3 Material de fricção - Ra inicial do disco igual a 1,2 µm.....	250
5.7.3.4 Disco - Ra inicial igual a 1,2 µm.....	254
5.7.5 Conclusões Parciais.....	257
5.8 Séries Laboratoriais: Comparação dos Resultados.....	260
5.8.1 Tradicional (Série A) <i>versus</i> Com Remoção dos Debris de Desgaste (Série B).....	260
5.8.2 Todas as Séries.....	264
5.8.2.1 Coeficiente de Atrito.....	264
5.8.2.2 Taxa de Desgaste.....	269
5.8.2.3 Discussão.....	271
6 CONCLUSÕES FINAIS.....	275
7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	279
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	281
APÊNDICE 1 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA ESCOVA DE REMOÇÃO DOS DEBRIS DE DESGASTE.....	289
APÊNDICE 2 CARACTERIZAÇÃO DOS DEBRIS DE DESGASTE.....	293
APÊNDICE 3 METODOLOGIAS DE PROTEÇÃO DO TRIBOFILME.....	295
APÊNDICE 4 CARACTERIZAÇÃO DA SUPERFÍCIE DE ATRITO DA PLACA DE PRESSÃO ENSAIADA EM CAMPO.....	297
APÊNDICE 5A CURVAS DA TEMPERATURA E DO COEFICIENTE DE ATRITO OBTIDAS PARA OS ENSAIOS TRADICIONAIS – SÉRIE A.....	308
APÊNDICE 5B CURVAS DA TEMPERATURA E DO COEFICIENTE DE ATRITO OBTIDAS PARA OS ENSAIOS COM REMOÇÃO DOS DEBRIS DE DESGASTE – SÉRIE B.....	321
APÊNDICE 5C CURVAS DA TEMPERATURA E DO COEFICIENTE DE ATRITO OBTIDAS PARA OS ENSAIOS COM ADIÇÃO DE DEBRIS DE DESGASTE – SÉRIE C.....	334
APÊNDICE 5D CURVAS DA TEMPERATURA E DO COEFICIENTE DE ATRITO OBTIDAS PARA OS ENSAIOS COM OS DISCOS PRÉ-CONDICIONADOS – SÉRIE D.....	340
APÊNDICE 6 CARACTERIZAÇÃO TOPOGRÁFICA DO MATERIAL DE FRICÇÃO.....	349

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Um veículo automotor para deslocar-se necessita somente de 21,5% da energia gerada pelo motor de combustão interna; 33% da energia produzida é desperdiçada na exaustão e 29% no resfriamento; ou seja, 62% da energia total não é aproveitada. Dos 38% que restam, 5% perde-se com a resistência aerodinâmica e, 33% com o atrito entre os componentes. No motor e na transmissão, as perdas por atrito representam 11,5% e 5%, respectivamente. Os outros 16,5% da energia são gastos para vencer o atrito no rolamento dos pneus com o solo (11,5%) e na frenagem (5%) (HOLMBERG, ANDERSSON e ERDEMIR, 2012). A figura 1.1.1 ilustra os dados apresentados.

Figura 1.1.1: Perdas energéticas em um veículo automotor (HOLMBERG, ANDERSSON e ERDEMIR, 2012).

No caso da embreagem, um dos itens que compõe a transmissão e tema de estudo desta tese, deseja-se que o nível do atrito entre os pares tribológicos seja alto e estável. Desta forma, a transmissão do torque do motor para a caixa de engrenagens será eficiente e regular e, conseqüentemente as perdas energéticas serão reduzidas. Isto demonstra que benefícios nem sempre serão obtidos somente por meio da redução do atrito entre os componentes. Ou seja, decidir por reduzir ou aumentar o nível do atrito para otimizar a eficiência do sistema, dependerá da função que o componente exerce no tribossistema ao qual está inserido.

Holmberg, Andersson e Erdemir (2012) demonstraram que investimentos em novas tecnologias com o propósito de desenvolver componentes veiculares mais eficientes, proporcionariam ganhos econômicos, além de reduzir o consumo de combustível e a emissão de CO₂ em 18% no curto prazo (5 – 10 anos) e 61% no longo prazo (15 – 25 anos). Em todo o mundo, em termos econômicos, os ganhos no curto e longo prazo seriam na ordem de 174 e 576 milhões de euros, respectivamente, considerando somente as perdas por atrito. A redução no consumo de combustível, na devida ordem, seria de aproximadamente 117 e 385 milhões de litros e, a emissão de CO₂ cairia para 290 e 960 milhões de toneladas.

A importância econômica da tribologia, a necessidade por pesquisas sistemáticas e, o aprimoramento da transferência do conhecimento teórico para a prática, tem sido extensivamente assentido nas últimas décadas. A economia alcançada aplicando as práticas tribológicas em casos peculiares é muito pequena, porém em razão da enorme quantidade de contatos tribológicos existentes, uma pequena economia em cada um deles possibilita alcançar somas significativas para uma nação. Isto permite deduzir que projetos tribológicos mais eficientes têm um significado considerável no futuro da humanidade. Por este motivo que governos de sociedades industrializadas têm dado crescente ênfase nos aspectos econômicos da tribologia.

O governo inglês foi o pioneiro na adoção de tal prática, no ano de 1966, quando *Peter Jost* (1966) relatou que a Inglaterra poderia economizar, naquela ocasião, até 0,5% do seu PIB, somente aplicando os conhecimentos já existentes.

Posteriormente, países como EUA e Alemanha apontaram perdas econômicas de 1% a 2,5% do PIB por causa do atrito e do desgaste. Entretanto, num subsequente estudo feito pelo governo Alemão, foi revelado que o desgaste e a

corrosão juntos contribuíam para perdas de 4,5% do PIB do seu país (ZUM GAHR, 1987).

Rabinowicz (1984), por sua vez, salientou que as perdas por desgaste somente na indústria automotiva dos EUA chegariam a 6% do PIB e, *Jost* (1990) reiterou que as economias obtidas reduzindo o desgaste somente empregando o conhecimento existente, poderiam chegar a 20% do PIB. Ainda segundo *Jost* (2005), para se chegar a tais ganhos, as nações precisariam investir menos de 50% do total economizado.

Com base nas informações apresentadas, considerando que o PIB do Brasil em 2014 foi de R\$ 5,52 trilhões (SUA PESQUISA, 2014), as perdas seriam de R\$ 55,2 bilhões e R\$ 331,2 bilhões (1% e 6% do PIB, respectivamente). As economias poderiam ser de R\$ 11,04 bilhões e R\$ 66,24 bilhões, considerando uma economia de 20% somente aplicando os conhecimentos já existentes.

No ano de 1966, a indústria automobilística japonesa produziu 0,9 milhão de veículos; vinte e cinco anos depois a sua produção anual passou para 9,8 milhões de unidades. O Japão atribuiu o salto produtivo de sua cadeia automobilística ao desenvolvimento de novas tecnologias juntamente com a aplicação dos conceitos e práticas tribológicas (LIN, 1994).

A indústria automobilística tem passado por várias e importantes mudanças em razão da competitividade para criar novos produtos e para o avanço do processo de globalização. Os desenvolvimentos de novos veículos caminham para inovações e tecnologias que favoreçam o meio ambiente, a mobilidade urbana e a segurança no trânsito. Tudo isso têm provocado uma verdadeira revolução tecnológica nos centros mundiais de pesquisa e desenvolvimento deste segmento. São projetos que enfatizam carros compactos e que proporcionem conectividades, com motorização mais eficiente para reduzir o consumo e as emissões de poluentes, além da possibilidade de utilizarem combustíveis alternativos aos derivados de petróleo.

Novos materiais e a nanotecnologia (ciência das micropartículas) tornarão os veículos mais leves e também mais recicláveis ao fim do seu ciclo de vida. Com o processo dinâmico da tecnologia, os veículos, sejam automóveis, caminhões ou ônibus, serão mais sustentáveis.

Hoje 25% dos componentes veiculares são feitos de materiais poliméricos e estimativas apontam que em 2020 essa parcela chegue a 40%. Além da redução do

peso proporcionado pela substituição dos materiais metálicos, os componentes plásticos ou compósitos poliméricos potencializam o processo produtivo. Outro fator que será impactado pela utilização da família dos polímeros será o custo de produção, que consequentemente poderá reduzir o custo final do veículo (RIELLO NETO, 2012).

O foco do desenvolvimento das novas tecnologias tem sido para tornar mais eficiente o sistema powertrain, que é definido como todo o conjunto que realiza trabalho mecânico, térmico ou elétrico. Do powertrain fazem parte as rodas e os pneus; os eixos e semieixos; o motor e a transmissão, como mostra a figura 1.1.2 (REVISTA AUTOMOTIVE BIUSINESS, 2010).

Figura 1.1.2: Powertrain de um veículo automotor (PEUGEOT RCZ – POWERTRAIN, 2010).

Para evidenciar a dimensão do mercado global automotivo, no ano de 2014 foi produzido um total de 89.747.430 de unidades em todo o mundo e a projeção é que esse número chegue a 110 milhões em 2020, um crescimento de quase 25% no período de cinco anos (WIKIPÉDIA, 2015).

No Brasil, já foram produzidos 63 milhões de veículos desde a instalação da primeira indústria automobilística em 1956. Atualmente a frota brasileira é calculada em cerca de 39,7 milhões (2013), o que atribui um veículo para cada 5,1 habitantes, número ainda modesto quando comparado aos EUA que tem um veículo por habitante e 1,3 por habitantes para a Europa (WIKIPÉDIA, 2015-a).

Em 2013 a indústria automobilística brasileira teve um recorde de produção quando fabricou 3,74 milhões de unidades - um aumento de mais de 300% em relação a 1990. Este número colocou o Brasil na quarta posição em termos de mercado e na sétima na lista dos dez maiores produtores de automóveis do mundo. Além disto, foi responsável por 25% do PIB industrial e cerca de 5% do PIB nacional. Esses números foram favorecidos por meio da abertura econômica ocorrida nos anos 90, marcada pela implantação de políticas de incentivos fiscais a novos investimentos e a redução dos impostos para os veículos produzidos no país. Isto favoreceu a reestruturação da cadeia de suprimentos da indústria automobilística, contribuindo para a modernização de todo o parque industrial e para a elevação da demanda doméstica.

Projeções indicavam que no médio e longo prazo o mercado brasileiro poderia adquirir mais de 6,3 milhões de veículos por ano, com cerca de 70 milhões de unidades, chegando à proporção de um veículo para cada três habitantes em 2020. Estas estimativas levaram em consideração o crescimento populacional e do mercado automotivo e, também o sucateamento de veículos ao fim de seu ciclo de vida (ABDI, 2009). Todavia, a Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA 2014 e 2015) projetou uma taxa de motorização de um veículo para 2,4 pessoas em 2034. Segundo esta entidade, o desafio atual é garantir competitividade ao setor, pois a indústria automobilística agrupa inúmeras e importantes cadeias econômicas, inclusive na escala social, multiplicando as possibilidades de emprego, de qualidade de vida e de ascensão social.

Um conjunto de atividades que vai desde a aquisição da matéria-prima, passando pelo processo de manufatura e montagem, armazenamento, controle de estoques, distribuição e entrega ao consumidor final define a cadeia de suprimentos (CNI, 2012). Um dos setores que a compõe é o de autopeças. De acordo com o último levantamento realizado pela Associação Nacional dos Fabricantes de Autopeças (ANFAP, 2013), no Brasil tal setor é formado por mais de 1.000 fábricas, sendo responsável por cerca de 1% do PIB brasileiro. Nos anos anteriores a 1990 os investimentos foram inferiores a meio milhão de dólares. Porém, após este período os investimentos no setor foram mais expressivos e ano de 2013 os valores investidos foram próximos de 2,5 bilhões de dólares.

Por razões das estratégias globais adotadas pelo segmento automobilístico, a sua cadeia de suprimentos está sendo pressionada para concorrer nos mercados mundiais e, como efeito deve ser capaz de fornecer, de forma competitiva, diversos produtos para diferentes regiões do mundo (MIZUTANI, 2011; CONFESSOR, 2012).

Além do que, a escala mínima necessária para a produção local foi elevada para reduzir custos e garantir competitividade global. Em vista disto, a produção brasileira de veículos e de autopeças deverá não somente atender o seu mercado interno, mas também o mercado de outros países. Inclusive, a produção local deverá conviver e competir no mercado doméstico com produtos importados. Para isto, o Governo Federal juntamente com o Ministério do Desenvolvimento desenvolveu o programa Inovar-auto. O objetivo deste projeto é criar condições de competitividade e incentivar as empresas a fabricar carros mais econômicos e mais seguros, investir em engenharia, na tecnologia industrial básica, na pesquisa e desenvolvimento e na capacitação de seus fornecedores.

Para atender as exigências globais, no desenvolvimento de um novo componente, muitos testes são necessários para que se possa entender como uma ou várias matérias-primas se comportam em relação aos aspectos tribológicos. Como exemplo, no caso da embreagem automotiva, o tribofilme que se desenvolve na superfície dos componentes atritantes, favorece ou prejudica o desempenho funcional do sistema? Qual é a sua relação com o nível do coeficiente de atrito e a taxa de desgaste do par tribológico? Neste tipo de desenvolvimento, surge a necessidade de repetir os testes inúmeras vezes, para compreender os fenômenos envolvidos e fazer as escolhas mais assertivas tanto das matérias-primas quanto dos processos de manufatura.

A realização de testes em equipamentos que utilizam amostras em escala real (testes veiculares e dinamométricos) tornam os ensaios demorados, além de demandar alto consumo de energia. Além do que, a caracterização do tribofilme requer a utilização de técnicas e equipamentos complexos, cujos custos das análises em tais equipamentos são elevados. Tudo isso, torna dispendioso os gastos com novas pesquisas. Como alternativa, busca-se simular em laboratório com equipamentos em escala reduzida e mais simples, com tempo e custos dos ensaios reduzidos, a reprodução das interações tribológicas em condições reais. Além disso, amostras em escala reduzida e simplificada são mais fáceis de caracterizar, além de facilitar ou até mesmo eliminar algumas etapas de preparação.

Nesta tese de doutorado, foi realizado um estudo experimental para simular num tribômetro de laboratório na configuração pino-disco, as interações tribológicas da embreagem automotiva a seco, em maiores níveis de energia onde temperaturas mais elevadas são obtidas. O principal elemento de investigação foi a origem do desenvolvimento, a estabilidade e a deterioração do tribofilme.

Com este propósito, amostras representativas de aplicações práticas foram caracterizadas para identificar os mecanismos operantes e, na sequência ensaios tribométricos foram realizados. As características tribológicas foram confrontadas a fim de validar a utilização do tribômetro como uma ferramenta alternativa no desenvolvimento de novos materiais para embreagens automotivas. Além disso, diferentes séries de ensaios laboratoriais foram realizadas, com o propósito de estudar a influência das variáveis do tribossistema (força normal; velocidade de deslizamento; meio interfacial; etc) na resposta tribológica (atrito e desgaste) do par.

No próximo capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica pertinente a esta tese. Na primeira parte será feita uma abordagem sobre a embreagem automotiva e seus componentes e, as metodologias empregadas nas avaliações funcionais. Na parte final é realizada uma síntese acerca da evolução no entendimento das características tribológicas do tribofilme, desenvolvido nos pares atritantes da frenagem automotiva, em consequência da carência de referências bibliográficas para embreagens.

No capítulo 3 são propostos o objetivo macro e os específicos desta tese.

Os materiais empregados e analisados, as metodologias desenvolvidas para a realização deste estudo, bem como os ensaios laboratoriais e os equipamentos utilizados, são descritos no capítulo 4.

A caracterização e identificação dos mecanismos de desenvolvimento do tribofilme nas aplicações práticas da embreagem, bem como a sua correlação com os que foram reproduzidos em laboratório, são retratados na primeira parte do capítulo 5. Na segunda parte, são expostos os resultados obtidos com as diferentes séries de ensaios laboratoriais, além das correlações entre estes resultados.

No capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões extraídas desta tese de doutorado.

Na sequência são descritas as sugestões de trabalhos futuros.

As referências bibliográficas consultadas e os Apêndices são disponibilizados na parte final.

Capítulo 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo iniciará apresentando a embreagem automotiva, os seus componentes, as suas principais funções e, as propriedades demandadas. Posteriormente são descritos as características dos materiais que a compõe, com uma abordagem um pouco mais detalhada sobre o material de fricção.

Na sequência será feita uma revisão concisa sobre a definição de tribologia, coeficiente de atrito e desgaste por deslizamento.

Prosseguindo, é realizada uma curta explicação do conceito de tribossistema e em seguida os tipos de ensaios tribológicos empregados para avaliar as características funcionais da embreagem, principalmente na fase de desenvolvimento de novos produtos. São discutidas as vantagens e desvantagens em utilizar tais procedimentos.

Progredindo, apresenta-se as soluções adotadas para potencializar a avaliação funcional da embreagem com foco na redução do tempo e custos, bem como as suas limitações.

Na continuidade faz-se uma rápida síntese bibliográfica sobre a resposta tribológica quando materiais poliméricos deslizam contra superfícies metálicas.

E na parte final do capítulo, é apresentada uma revisão bibliográfica relevante para esta tese focada nas características do tribofilme desenvolvido no par tribológico utilizado no sistema de freio automotivo, em função da carência bibliográfica referente ao tribofilme no par tribológico da embreagem automotiva.

2.1 Embreagem Automotiva Manual a Seco

A embreagem automotiva é um sistema mecânico instalado entre o motor de combustão interna e a caixa de transmissão e é composto basicamente por três componentes: o volante do motor, o disco da embreagem e o platô. O volante é parafusado no virabrequim e gira solidário a este e, no platô está fixada a placa de pressão. O disco da embreagem localiza-se entre o volante do motor e o platô e, por meio de estrias encaixa no eixo primário da caixa de câmbio (transmissão). No disco da embreagem são rebitados dois materiais de fricção, um de cada lado.

As figuras 2.1.1-a e 2.1.2-b (em maior aumento) apresentam a localização da embreagem no interior de um veículo e, as figuras 2.1.1-c à 2.1.1-e apresentam os três principais componentes.

Figura 2.1.1: (a) Localização da embreagem manual a seco no interior do veículo e (b) detalhe da instalação entre o motor e a caixa de transmissão; os três principais componentes: (c) volante do motor, (d) material de fricção rebitado no disco da embreagem e (e) placa de pressão fixada no platô (GRUPO ZF - BU TNB CV, 2015).

A embreagem, por intermédio do pedal de acionamento, tem por finalidade acoplar e desacoplar o motor da caixa de transmissão, para possibilitar a troca de marchas. Ao acionar o pedal, o platô recua a placa de pressão que está atuando sobre o disco da embreagem e essa ação faz com que o disco fique totalmente livre, sem nenhum contato com a placa de pressão ou com o volante do motor.

À medida que o pedal é liberado, o platô faz com que a placa de pressão avance sobre o disco, comprimindo-o contra o volante. Durante esse período há contato e deslizamento entre os pares atritantes. Quando o pedal de acionamento está na posição de repouso, a embreagem está totalmente acoplada e toda a força é exercida sobre a placa de pressão. Nessa situação prevalece o contato estático.

Conforme a norma NBR 6050 (1995), a principal função da embreagem é transmitir o torque do motor de combustão interna para a caixa de transmissão, de forma eficiente e regular. Para isso, é desejável que o nível do coeficiente de atrito entre as superfícies atritantes seja de no mínimo 0,27.

Além de um coeficiente de atrito satisfatório, os materiais devem atender as demais características: baixo custo e densidade; durabilidade; estabilidade geométrica; resistência mecânica e térmica. Além dessas, deseja-se também que sejam ambientalmente responsáveis; isto é, materiais nos quais sejam empregadas matérias-primas que não causem danos ao meio ambiente ou que coloque em risco a saúde dos usuários diretos e indiretos.

O volante do motor e a placa de pressão são usualmente constituídos de ferro fundido cinzento perlítico, contendo de 3 a 4% de carbono, que também aparece livre na matriz perlítica na forma de veios de grafita. O ferro fundido é utilizado como contracorpo, pois além de apresentar propriedades térmicas desejáveis, apresenta boa resistência mecânica, resistência ao desgaste satisfatória, boa capacidade de amortecimento de vibrações, além do baixo custo e da fácil manufacturabilidade (GUESSER e GUEDES, 1997; RIAHI e ALPAS, 2003; CHIAVERINE, 2005; RADZIKOWSKA, 2005).

Já no material de fricção pode ser empregado mais de dez diferentes tipos de matérias-primas, que estão divididas em cinco grupos: matriz orgânica, fibras de reforço e fios metálicos, cargas e aditivos (JACKO e RHEE, 1992; ERIKSSON, BERGMAN e JACOBSON, 2002; BETTEN, 2003; CHAN e STACHOWIAK, 2004).

A matriz orgânica é usualmente composta por resinas poliméricas e elastômeros [os mais usuais são o butadieno estireno (SBR) e o acrilonitrila butadieno (NBR)], que além de serem de baixo custo e de favorecer a processabilidade, é um meio adesivo para conectar os outros ingredientes. Isto é, além de apresentarem resistência ao desgaste satisfatória, ligam as fibras de reforço umas as outras, as protegem contra danos superficiais e, atuam como uma barreira para minimizar a propagação de trincas. Além disso, formam um núcleo tenaz, favorecendo o amortecimento e absorção das vibrações que são geradas por impactos decorrentes do uso inadequado da embreagem.

As fibras de reforço têm por principal finalidade elevar a resistência mecânica à tração do material de fricção e, conseqüentemente aumentar a sua resistência a ruptura em velocidades de rotação elevadas. As fibras de reforço mais comuns são: a poliamida aromática (arâmida), a poliacrilonitrila (acrílico) e a fibra de vidro.

Os fios metálicos como o cobre, as ligas de cobre e o aço de baixo carbono, aumentam a capacidade de dissipação térmica do material de fricção. Contribuem para dissipar o calor gerado pelo atrito, proporcionando uma maior estabilidade térmica e minimizando a possibilidade da degradação térmica dos constituintes orgânicos.

As cargas adicionadas à matriz são divididas em dois grupos: as de enchimento e as abrasivas. No primeiro grupo estão as cargas de baixo custo, cuja finalidade primária é dar volume ao material e reduzir custos, porém sem prejudicar as propriedades funcionais. Cita-se como exemplos o carbonato de cálcio, a vermiculita e os materiais a base de sílica, como as argilas. Já no segundo grupo, encontram-se as cargas conhecidas como modificadoras, pois são adicionadas para elevar o nível do coeficiente de atrito e limpar a superfície do contracorpo. Dessa forma controlam a sua rugosidade e removem as camadas de óxidos, ou outras camadas que se formam na superfície metálica. São exemplos de cargas abrasivas: a alumina, a sílica e a barita.

Os aditivos são os lubrificantes sólidos, que são adicionados para estabilizar o coeficiente de atrito, principalmente em temperaturas mais elevadas. A mais conhecida e utilizada é a grafita.

Os materiais de fricção diferenciam-se um dos outros, principalmente, por sua composição química. A seleção das matérias-primas bem como os parâmetros dos processos de manufatura dependerá das propriedades que se deseja obter, que por sua vez, dependem das condições de aplicação da embreagem.

O ciclo de manufatura do material de fricção é dividido em três processos: o químico, o térmico e o mecânico.

No processo químico, as fibras de reforço juntamente com os fios metálicos são mergulhadas numa solução polimérica para serem impregnados por essa solução e dessa maneira formar uma fita, que na sequência é tramada para dar a forma circular ao material de fricção.

No processo térmico, as peças tramadas são moldadas a quente, com pressão e temperatura controladas. Nesta etapa já é proporcionado ao material de fricção uma pré-vulcanização. As peças conformadas vão para o tratamento térmico onde permanecem de 10 a 20 horas dentro de fornos, com temperatura definida e rigorosamente controlada. Esta fase é de fundamental importância, pois é onde o material vulcanizará por completo; ou seja, será curado para adquirir as propriedades desejadas.

No processo mecânico, o material de fricção é retificado para obter a espessura, o paralelismo e o acabamento superficial conforme a especificação. Por fim, é furado para possibilitar a sua rebitagem no disco e na sequência, são inspecionados e, estando em conformidade, são liberados para comercialização.

O desempenho funcional da embreagem é bastante influenciado pelos tipos e proporções das matérias-primas utilizadas no material de fricção, além das condições de manufatura. Tudo isso promove um conflito de interesses, uma vez que, é muito complexo e desafiador desenvolver um novo material, no qual se busca otimizar uma propriedade sem comprometer outra já obtida.

No sistema embreagem há contato por deslizamento, desgaste dos componentes atritantes e demanda por um coeficiente de atrito de nível satisfatório. Logo a aplicação dos conceitos e princípios da tribologia se fazem pertinentes para potencializar a sua eficiência.

2.2 Fundamentos da Tribologia

A tribologia é a ciência que estuda o atrito, o desgaste e a lubrificação (DOWSON, 1979). A sua primeira citação foi feita por *Peter Jost* no ano de 1966 (JOST, 1966), que a definiu da seguinte forma: “ciência e tecnologia de superfícies interagindo em movimento relativo e das práticas e assuntos associados”.

O coeficiente de atrito é definido como a razão entre a força tangencial à interface de contato F_t (força de atrito) e a força normal F_n . Segundo *Hutchings* (1992) força de atrito é a resistência encontrada por um corpo em direção contrária a seu movimento sobre outro.

Nos primeiros períodos de contato por deslizamento entre duas superfícies sólidas que ainda não foram desgastadas, o coeficiente de atrito pode apresentar um comportamento instável em função da acomodação entre as faces de contato. Na literatura, esta instabilidade é denominada de *running in*, também conhecido como regime transiente ou de amaciamento. A figura 2.2.1 exemplifica alguns tipos clássicos que foram apresentados e discutidos por *Blau* (2005).

Figura 2.2.1: Tipos de *running in* no coeficiente de atrito (BLAU, 2005).

O período de *running in* exemplificado na figura 2.2.1-a ocorre por causa da topografia inicialmente rugosa, que eleva o nível do coeficiente de atrito durante a conformação da superfície e com o alisamento topográfico, o nível do atrito é reduzido. O decréscimo pode também ser decorrente do cisalhamento dos picos das irregularidades ou devido o cisalhamento do filme que se forma na superfície dos materiais.

A evolução do atrito apresentado na figura 2.2.1-b têm características semelhantes às descritas para a figura 2.2.1-a. No entanto, o aumento no seu nível após atingir o nível mínimo está associado ao rompimento do filme.

Para *Blau* (2005) o tempo de duração do *running in* é dependente da pressão de contato. Maiores pressões tendem a reduzir o tempo de transição para o regime permanente, que corresponde aquele em que a força de atrito ou o coeficiente de atrito permanecem em níveis constantes, ou seja, estáveis. A figura 2.2.1-c exemplifica uma aplicação com elevada pressão de contato, que reduziu significativamente o período de *running in* e o nível do coeficiente de atrito.

O comportamento da figura 2.2.1-d é típico de contato a seco, que se caracteriza por ter uma pequena quantidade de contaminação na superfície, por óxido, ou debris de desgaste. Como a contaminação ainda não se espalhou sobre a superfície, o atrito cresce rapidamente logo com os primeiros ciclos de contato por deslizamento. Porém quando a superfície é contaminada, o atrito estabiliza.

O *running in* muitas vezes é ignorado ou considerado como característica normal de operação. No entanto, dependendo da aplicação, o desempenho do componente pode ser otimizado minimizando essa instabilidade inicial.

No caso da embreagem, não é desejável que o coeficiente de atrito tenha comportamentos parecidos com os apresentados nas figuras 2.2.1-a, 2.2.1-b e 2.1.2-c, pois a transmissão de torque será irregular, principalmente nos primeiros ciclos de acoplamento. Dependendo do nível mínimo do atrito no *running in*, a transmissão do torque será ineficiente e a embreagem perderá a sua funcionalidade.

Espera-se para o atrito, uma evolução similar à apresentada na figura 2.2.1-d e num nível maior do que 0,27. O valor de 0,27 é pré-requisito técnico que foi definido e acordado entre os desenvolvedores e fabricantes de materiais de fricção para embreagens automotivas. Dessa forma a transmissão de torque será regular e satisfatória.

Desgaste por deslizamento é o dano causado a uma superfície sólida, envolvendo geralmente perda progressiva de material em função do seu movimento relativo sobre outra superfície ou, em relação a uma partícula / substância (HUTCHINGS, 1992).

Da mesma forma que se tem o *running in* no coeficiente de atrito, há também para o desgaste, que também é conhecido por *break-in* ou *wear-in*. Isto significa que a evolução da perda de material no *running in* não ocorre de forma linear.

A perda de material ou o dano à superfície está relacionado ao mecanismo de desgaste operante. Apesar de vários mecanismos ocorrerem de forma simultânea, usualmente um deles opera de forma dominante e estabelece o nível de desgaste correspondente. Os mecanismos de desgaste mais corriqueiros no desgaste por deslizamento são: o adesivo, o abrasivo, a fadiga de contato e o oxidativo. A predominância do tipo de mecanismo depende das propriedades dos materiais envolvidos e da natureza da aplicação (ZUM GAHR, 1987).

O mecanismo oxidativo consiste na formação de óxidos nas superfícies dos materiais, como consequência da elevação da temperatura nos pontos de contato (STACHOWIAK e BATCHELOR, 2001). A formação dos óxidos reduz o contato entre as superfícies originais, diminuindo a formação de junções, pois os óxidos se comportam como lubrificantes sólidos na superfície, podendo contribuir para reduzir os danos às superfícies. A figura 2.2.2 mostra um esquema do desenvolvimento de camadas de óxidos nos pontos de contato entre as superfícies.

Figura 2.2.2: Esquema exemplificando o desenvolvimento de óxidos nos picos das asperidades em função da elevação da temperatura nessas regiões, formando novos pontos de contato; (a) desenvolvimento, (b) destruição e (c) contato através dos óxidos, o que reduz a adesão entre as superfícies (STACHOWIAK e BATCHELOR, 2001).

Welsh (1964) foi um dos primeiros a investigar a influência do desenvolvimento das camadas de óxidos na taxa de desgaste de pares metálicos durante ensaios por deslizamento a seco. Na figura 2.2.3 é apresentada a evolução da taxa de desgaste do pino em função da variação da força normal aplicada.

Figura 2.2.3: Transição nos regimes das taxas de desgaste obtidos no ensaio por deslizamento a seco metal-metal (STACHOWIAK e BATCHELOR, 2001; adaptado de WELSH, 1964).

Welsh (1964) observou com o aumento da força normal duas transições na taxa de desgaste, que foram denominadas de T1 e T2. Os regimes antes da T1 e após a T2 foram denominados de moderado e o regime acima da T1 e antes da T2, foi denominado de severo.

No regime moderado antes da T1, por causa das pequenas forças normais empregadas, camadas de óxidos foram geradas na superfície dos materiais, lubrificando e atenuando o desgaste. A rugosidade da superfície de contato após o ensaio foi menor em relação a inicial.

No regime severo, altas cargas foram impostas, predominando o mecanismo de adesão entre as superfícies, que deram origem a partículas metálicas grandes, contribuindo para o aumento do desgaste. A rugosidade da superfície desgastada foi maior em relação a original.

Já no segundo regime moderado (após T2), forças normais ainda maiores foram aplicadas e isto aumentou a temperatura da interface, que favoreceu a formação das camadas de óxidos. A taxa de desenvolvimento destas camadas foi superior a sua ruptura ou remoção e, por essa razão, o desgaste foi reduzido.

2.3 Ensaios Para Avaliação Funcional da Embreagem

Os aspectos relevantes para este trabalho são que o estudo do atrito e do desgaste deve ser feito de forma sistêmica e, que ambos são respostas das interações dos materiais com as variáveis operacionais as quais são submetidos, e não apenas propriedades intrínsecas dos materiais envolvidos.

Para facilitar o estudo da influência das variáveis no desempenho dos componentes em serviço e viabilizar o seu controle, foi criado um conceito de sistema bem definido de modo a delimitar o campo de validade das propriedades tribológicas. A este conceito foi atribuído o nome de “Tribossistema” ou “Sistema Tribológico”. Este termo foi criado e muito utilizado por *Czichos* (1974) no decorrer da década de 70 e, em 1979 foi inserido na norma DIN 50320 (1979-12). A sua estrutura é constituída por quatro elementos que forma o sistema: o corpo, o contracorpo, o meio interfacial e o ambiente.

A figura 2.3.1 apresenta um esquema de um sistema tribológico, que foi delimitado por uma fronteira, por meio da qual ocorrem as entradas, as saídas e as trocas com o meio exterior. Como entradas para o sistema pode-se ter: movimentos impostos, força, velocidade, calor, etc; resultando em saídas úteis como movimento, ou gerando perdas como produtos de desgaste, calor, vibrações, ruídos, etc. As saídas são diretamente afetadas pelos quatro elementos do tribossistema. No entanto, nem todos precisam, necessariamente, estar presente simultaneamente, podendo ser amplamente variada à ação sobre eles ou as suas interações.

Figura 2.3.1: Representação esquemática de um tribossistema ou sistema tribológico. Neste exemplo, estabeleceu-se, arbitrariamente que as saídas podem ser úteis ou perdas.

Uma forma de reproduzir as características de tribossistemas reais é recorrendo à realização de ensaios tribológicos e, para este fim, há seis categorias distintas. Os vários modelos de ensaios foram propostos e apresentados por Czichos (1985) e, são ilustrados na figura 2.3.2.

Figura 2.3.2: Classificação dos diferentes modelos de ensaios tribológicos para reproduzir o tribossistema real: ensaio veicular em (a) campo [categoria I], (b) no laboratório [categoria II] e (c) no banco de prova [categoria III]; (d) componente de estudo reduzido a um subsistema [categoria IV] e (e) apenas um componente do subsistema [categoria V]; (f) em escala reduzida e simplificada [categoria VI] (a - b CZICHOS, 1985; c - f ZUM GAHR, 1987).

A figura 2.3.3, por sua vez, demonstra o uso de alguns dos modelos de ensaios apresentados na figura 2.3.2 na avaliação funcional da embreagem.

A figura 2.3.3-a retrata a categoria I. Nesta categoria, os ensaios são realizados no veículo e em campo, nos quais as condições são muito similares à realidade. Estes ensaios por terem longos períodos de duração, geralmente são executados após o material ter sido aprovado nos ensaios realizados em laboratório nos bancos de prova dinamométricos (categoria III). A finalidade é verificar se a estimativa obtida na bancada condiz com a aplicação real.

No banco de prova (figura 2.3.3-b), estuda-se também em escala real, apenas o subsistema do veículo de interesse, neste caso, a embreagem. Nesses ensaios tradicionalmente avalia-se a taxa de desgaste do conjunto (material de fricção + placa de pressão) e o nível do coeficiente de atrito, para avaliar a vida útil da embreagem e certificar se o torque será transmitido de maneira apropriada e regular.

Uma das vantagens deste tipo de ensaio é que podem ser realizados em menor período de tempo e variáveis como temperatura, força normal e velocidade de deslizamento, que dificilmente são medidas e controladas em campo, podem ser monitoradas no laboratório. No entanto, há uma grande demanda de energia elétrica para a sua realização, e praticamente toda a energia consumida não é reaproveitada.

Figura 2.3.3: Reprodução do tribossistema da embreagem automotiva – ensaio em escala real (a) no campo e (b) em laboratório no banco de prova; (c) ensaio em escala reduzida e simplificada no tribômetro pino-disco.

- a -

- b -

- c -

Os benefícios de realizar ensaios veiculares ou em bancada estão na reprodutibilidade do tribossistema. Entretanto, por utilizar amostras em tamanho real e, por causa das dificuldades em controlar e modificar os parâmetros de ensaio, estes modelos de ensaio tornam-se bastante complexos e demorados. Com isso, o tempo para desenvolver um novo produto, estudar e/ou homologar uma nova matéria-prima ou até mesmo um novo fornecedor, cumprindo todas as etapas de validação, torna-se muito extenso e eleva significativamente os custos.

Portanto, o grande desafio da engenharia experimental é reduzir drasticamente o tempo com a avaliação do desempenho de novos materiais, sem por em risco a sua qualidade e segurança para alcançar tais propósitos. Testes bem delineados tornaram-se ferramentas decisivas para o desenvolvimento de novos produtos.

O modelo de ensaio da figura 2.3.2-f - categoria VI - é em escala reduzida e simplificada, onde são reproduzidas as características tribológicas consideradas essenciais dos dois componentes do tribossistema, como por exemplo, o modo de deslizamento, a pressão específica de contato e a energia de atrito. Além do que, neste modelo, os parâmetros de ensaio são previamente definidos, mantidos constantes, controlados e, podem ser facilmente modificados com repetibilidade. Isto possibilita estudar diversos materiais, até mesmo em condições de aplicação extremamente severas, num menor período de tempo e com custos reduzidos.

A escolha da configuração do modelo de ensaio não depende apenas das interações tribológicas que serão investigadas ou se pretende simular, mas também dos objetivos. A reprodução da característica do sistema tribológico real no modelo simplificado pode ser falha devido à falta de informações sobre as propriedades dos materiais, dos mecanismos de desgaste operantes, das limitações das condições de ensaios do modelo e até mesmo pela ausência de ferramentas que tornem possível avaliar a equivalência entre os tribossistemas. Uma vez que o tribossistema é simulado de forma equivocada, os resultados obtidos podem ser totalmente o oposto em relação às expectativas iniciais. A transferência dos resultados do modelo de ensaio para a condição real só poderá ocorrer se houver paridade entre as características dos tribossistemas e das respostas tribológicas (ZUM GAHR, 1987).

Utilizando o conceito apresentado, o Grupo ZF BU TNB - CV por meio de uma parceria tecnológica com o Grupo de Pesquisa do Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) desenvolveu um

modelo de ensaio acelerado para avaliar o desempenho funcional de embreagens automotivas a seco (FERNANDES, 2007; FERNANDES *et al.*, 2007 e 2009).

Na primeira fase deste trabalho, amostras de embreagens que foram ensaiadas em campo, foram coletadas aleatoriamente, isto é, sem critério e, foram posteriormente caracterizadas para identificar os mecanismos de desgaste operantes. Na continuidade, ensaios foram realizados num tribômetro de laboratório na configuração pino-disco, utilizando amostras em escala reduzida e simplificada. A configuração e as amostras são exibidas na figura 2.3.3-c. Esses ensaios tiveram por objetivo avaliar se no tribômetro era possível reproduzir os mecanismos que foram identificados em campo.

A figura 2.3.4 apresenta e confronta os mecanismos de desgaste que foram observados no material de fricção de campo e, os que foram reproduzidos no tribômetro de laboratório. Os modos de desgaste reproduzidos em laboratório foram muito semelhantes aos identificados nas amostras de campo. Dessa maneira, concluiu-se que por meio de ensaios tribométricos em escala reduzida e simplificada, é possível reproduzir em laboratório os mecanismos que operam nas aplicações veiculares reais (FERNANDES, 2007).

No entanto, as respostas tribológicas quantitativas (atrito e desgaste) dos diferentes pares atritantes (material de fricção + contracorpo metálico) utilizados na simulação laboratorial, não apresentaram correlações com os resultados de campo e nem mesmo com os ensaios realizados no dinamômetro (FERNANDES, 2007).

Sendo assim, a segunda parte do trabalho consistiu em desenvolver o método que viabilizasse simular a resposta tribológica (atrito e desgaste) dos diferentes pares. Utilizou-se como referência a variação da taxa de desgaste de dois diferentes materiais de fricção em função da energia específica (em Joules por cm^2) e da temperatura do ensaio. Estes resultados foram obtidos por meio da realização de ensaios dinamométricos (GREGORI, ZANOTTO e HAERTEL JR., 2005).

Como mostra a figura 2.3.5, na energia específica de 160 J/cm^2 (indicada pela seta azul), o material A apresentou uma maior taxa de desgaste em relação ao B. Desta forma, buscou-se reproduzir no tribômetro este nível de energia específica e, para tal fim, manteve-se a velocidade de deslizamento constante em 750 rpm ($2,05 \text{ ms}^{-1}$), variando a força normal em 70, 150 e 200N. Estas forças corresponderam às energias específicas teóricas de 52, 110 e 160 J/cm^2 (FERNANDES, 2007).

Figura 2.3.4: Correlação dos mecanismos de desgaste observados no material de fricção ensaiado em campo em escala real, com os mecanismos que foram reproduzidos em laboratório com escala reduzida utilizando um tribômetro pino-disco (FERNANDES, 2007).

Figura 2.3.5: Taxa de desgaste dos materiais de fricção (a) A e (b) B em função da temperatura do ensaie da energia específica de atrito dos ensaios no dinamômetro inercial (GREGORI, ZANOTTO e HAERTEL JR., 2005; citado por FERNANDES, 2007).

As taxas de desgaste determinadas no tribômetro para as energias específicas de 52 e 110 J/cm² divergiram das apresentadas no mapa de desgaste. Porém, quando foi empregada a energia de 160 J/cm² (força normal de 200N), as taxas de desgaste dos materiais A e B obtidas com o ensaio tribométrico foram condizentes com o mapa de desgaste (FERNANDES, 2007; FERNANDES *et al.*, 2009).

Posteriormente, os materiais C e D foram avaliados com o mesmo método, isto é, aplicando a força normal de 200N e velocidade de deslizamento de 750 rpm. A figura 2.3.6 correlaciona, para os quatro materiais ensaiados, as taxas de desgaste que foram obtidas no tribômetro com as que foram determinadas no dinamômetro.

Figura 2.3.6: Correlação entre a taxa desgaste simulada no tribômetro [escala reduzida e simplificada] com as obtidas no dinamômetro [escala real] (FERNANDES, 2007).

Conforme revelou a figura 2.3.6, o material C foi o de melhor desempenho tanto no tribômetro quanto no dinamômetro. Mesma analogia pôde ser feita para o material A, que apresentou a pior performance em ambos os modelos de ensaio.

A maior contribuição obtida com este método é que quando empregado com sucesso, mantém como no ensaio dinamométrico, o coeficiente de atrito e a taxa de desgaste do par tribológico como variáveis de saída. Esta metodologia possibilita, após 3 horas de ensaio, prever o desempenho funcional da embreagem, enquanto que no dinamômetro são necessárias, no mínimo, 240 horas.

Durante o desenvolvimento do modelo de ensaio constatou-se que a taxa de desgaste do par tribológico foi bastante influenciada pela natureza topográfica do material de fricção, como ilustra a figura 2.3.7.

Figura 2.3.7: Evolução do transiente inicial da taxa desgaste em função da evolução topográfica da superfície do material de fricção durante o desenvolvimento da metodologia simplificada e acelerada no tribômetro (FERNANDES *et al.*, 2009 e 2010-a).

O regime transiente da taxa de desgaste estava associado ao condicionamento da topografia da superfície. Isto é, quando a rugosidade quadrática média (S_q) diminuiu, a taxa de desgaste decresceu e a área real de contato aumentou (T_p). À medida que a rugosidade quadrática média tendeu a estabilização, tanto a taxa de desgaste do par tribológico quanto à área real de contato, caminharam para o regime permanente. O parâmetro T_p foi determinado por meio da curva de Abbot-Firestone (FERNANDES, 2007; FERNANDES *et al.*, 2009 e 2010).

Estes resultados indicaram grande potencialidade de aprimoramento do sistema embreagem por meio do pré-condicionamento inicial da topografia de superfície dos materiais de fricção. Acreditava-se que eliminando a fase do transiente inicial, taxas de desgaste menores e coeficientes de atrito mais estáveis seriam alcançados e, como consequência, a vida útil e a eficiência da transmissão de torque, aumentariam. Contudo, os resultados obtidos realizando ensaios tribológicos com materiais de fricção pré-condicionados em várias condições, não foram satisfatórios e o estudo foi temporariamente interrompido (FERNANDES, 2007; FERNANDES *et al.*, 2009, 2010-a e 2010-b).

O modelo de ensaio tribométrico desenvolvido possibilita avaliar o desempenho funcional do par tribológico somente para aplicações veiculares em campo, cujas faixas de trabalho correspondem a fase C que está apresentada na figura 2.3.8.

Figura 2.3.8: Limites térmicos das aplicações da embreagem automotiva (DREXL, 1990).

A figura 2.3.8 apresenta os limites térmicos do material de fricção para diferentes níveis de energia. Na abscissa está o tempo de utilização da embreagem (em segundos, minutos e horas) até a sua perda de funcionalidade. A ordenada da esquerda refere-se a potência média gerada por atrito, e a da direita a temperatura. Normalmente avalia-se o desempenho funcional da embreagem dentro das linhas superiores e inferiores no centro do gráfico (linhas verde, vermelha e azul).

Na fase C a embreagem geralmente opera abaixo de 1 Watt por cm^2 (definida como de baixo nível de energia), em faixas de temperaturas entre 80°C e 150 °C, porém em longos períodos de tempo. Nesta condição, a taxa de desgaste e o nível do atrito serão constantes. Até uma década atrás, as embreagens trabalhavam 85% da sua vida útil nesta circunstância (Grupo ZF BU TNB – CV, 2015).

Todavia, as condições de trabalho das embreagens foram alteradas. Primeiro em razão da evolução tecnológica dos motores de combustão interna, que estão sendo desenvolvidos para gerar mais torque e potência. Além do que, como os motores ficaram mais compactos, isto os faz trabalhar em rotações mais elevadas. Segundo, o tráfego urbano está mais congestionado e, com isso a embreagem é solicitada com mais frequência em menos tempo. Por essas razões, as embreagens passaram a trabalhar num maior período de tempo nas fases A e B.

A fase A representa períodos de deslizamento curtos, entre 10 e 30 segundos, mas com elevada potência, geralmente acima de 10 W/cm^2 (alto nível de energia). Nesta condição altas temperaturas são atingidas e ocorre na embreagem um fenômeno conhecido por *fading*, que é definido como a redução progressiva do nível do coeficiente de atrito com o aumento da temperatura. Entretanto, conforme demonstrou Drexel (1998), se o aquecimento do sistema for interrompido de forma que permita o seu resfriamento, a embreagem irá recuperar a sua capacidade de transmissão de torque, desde que somente a superfície de atrito do material de fricção tenha sido termicamente degradada.

A fase B caracteriza uma faixa de trabalho cuja potência vai de 1 a 10 W/cm^2 e os níveis de temperaturas ficam entre 250°C e 300°C. Nestas condições, se o uso da embreagem for prolongado, a temperatura se elevará na superfície do material de fricção e também no seu interior. Como consequência, ocorrerá a sua destruição térmica devido a degradação térmica dos seus componentes orgânicos.

Há casos em que os níveis de temperaturas nas superfícies de contato da placa de pressão foram tão elevados que a microestrutura mudou de perlita para martensita, como demonstraram *Fernandes et al.* (2010).

O atual desafio é desenvolver materiais cujo desempenho atenda as especificações técnicas do produto, principalmente em condições de elevadas cargas térmicas (fases B e C da figura 2.3.8). Entretanto, atualmente não existem modelos de ensaios em escala reduzida e simplificada que possibilitam estudar de forma acelerada o desempenho dos pares tribológicos em tais condições.

Ademais, a influência das matérias-primas, das condições operacionais e dos fenômenos físico-químicos (interações superficiais) no desempenho funcional da embreagem, ainda não são bem compreendidos.

A figura 2.3.9-a exemplifica um material de fricção que foi ensaiado em campo numa condição equivalente a fase B da figura 2.3.8.

Figura 2.3.9: (a) amostra de um material de fricção após ensaio com elevada carga térmica [temperatura próxima a 300°C]; (b) superfície observada por MEV; (c) superfície da placa de pressão observada por MEV e (d) detalhe evidenciando a transferência e adesão de material na sua superfície (GRUPO ZF BU TNB - CV, 2015).

Em função da severidade da aplicação, parte do material de fricção degradou termicamente e as fibras de reforço (indicada pela seta vermelha) foram expostas a superfície de contato. Na parte inferior da superfície de atrito, conforme indica a seta azul, foi identificada uma região mais compactada / plana, com características de que uma nova superfície se desenvolveu sobre a superfície primitiva do material de fricção. A caracterização da superfície por MEV, figura 2.3.9-b, comprovou as evidências descritas, ou seja, como consequência da degradação térmica, parte da nova superfície desenvolvida se rompeu e expôs as fibras de reforço do material de fricção à superfície de atrito, como indica a seta verde.

O desenvolvimento de uma nova superfície foi também observado sobre a superfície da placa de pressão, conforme mostraram as figuras 2.3.9-c e 2.3.9-d. Especula-se que o desenvolvimento dessa nova superfície foi favorecido pela elevada carga térmica a qual o par tribológico foi submetido. Porém, não foi possível assimilar se a funcionalidade da embreagem foi afetada em decorrência da transferência e adesão de materiais entre as superfícies.

Várias são as nomenclaturas na literatura que fazem referência a nova superfície que se desenvolve. Dentre as mais utilizadas, citam-se: camada de fricção, camada tribológica ou tribo-química, filme fino, filme de fricção, terceiro-corpo, tribocamada e tribofilme.

Nesta tese, como forma de padronização de nomenclatura, a nova superfície desenvolvida será referenciada, descrita e tratada por tribofilme.

Godet (1984) foi o pioneiro na apresentação do conceito de tribofilme como uma forma de identificar o meio existente entre duas superfícies sólidas em contato. No contato a seco, o meio-interfacial é formado pelas partículas de desgaste, porém em algumas aplicações o tribofilme pode ser imposto ao sistema, como por exemplo, através da adição de lubrificantes sólidos a interface de contato. Uma vez que o tribofilme se desenvolve, este pode apresentar diferentes propriedades mecânicas e químicas, e aspectos topográficos. Com isso os mecanismos de desgaste podem ser alterados.

Em outro trabalho, *Godet* (1990) relatou que os mecanismos de desgaste são mecanismos que geram partículas de desgaste, mas que não necessariamente o material está perdendo matéria, isto é, está se desgastando. Para *Godet* (1990), o desgaste é representado pela diferença entre a taxa de nucleação do tribofilme e a

sua taxa de destruição. Ou seja, quando a taxa de destruição for maior que a de nucleação, haverá real perda de massa do material. *Godet* (1990) ressalta também que após se desenvolver, o tribofilme suportará a carga aplicada, além de separar as superfícies uma das outras, evitando o contato direto.

Os trabalhos de *Godet* (1984 e 1990) estabeleceram a importância na compreensão dos fenômenos que envolvem transferência de material de uma superfície para outra. Além disso, possibilitaram posteriores estudos sobre tais fenômenos.

O sistema embreagem automotiva tem a peculiaridade de que um dos corpos é predominantemente polimérico e que desliza contra uma superfície metálica. Uma vez que este tipo tribossistema é envolvido, na sequência é apresentada uma breve revisão para compreender a resposta tribológica desse par.

2.4 Resposta Tribológica de Polímeros Quando Deslizados Contra Superfícies Metálicas

Num sistema tribológico onde uma superfície de material polimérico desliza contra uma superfície metálica, transferência e adesão de materiais ocorrem, na maior parte das aplicações, da superfície do primeiro para o segundo material. Como o material transferido apresenta menor resistência ao cisalhamento, ele irá agir como um lubrificante sólido na interface de contato e este processo exercerá influência no comportamento tribológico do par, reduzindo o seu coeficiente de atrito e a sua taxa de desgaste (RHEE, 1970; JAIN e BAHADUR, 1980; FRIEDRICH, KARGER-KOCSIS e LU, 1991; HUTCHINGS, 1992; BAHADUR, 2000; STACHOWIAK e BATCHELOR, 2001; UNAL, SEM e MIMAROGLU, 2004; da SILVA e SINATORA, 2007).

A figura 2.4.1 traz uma representação esquemática referente a influência do acabamento superficial do contracorpo metálico no processo de transferência e adesão de material de uma superfície para outra.

Figura 2.4.1: Influência da rugosidade do contracorpo metálico nos mecanismos de desgaste por: (a) adesão e (b) abrasão do material polimérico (STACHOWIAK e BATCHELOR, 2001).

Conforme demonstra a figura 2.4.1-a, se a sua superfície for lisa / polida, predominará o mecanismo de adesão, onde haverá deformações somente nas camadas superficiais do material polimérico. Por outro lado, se o contracorpo apresentar uma superfície rugosa, como ilustra a figura 2.4.1-b, os picos das asperidades causarão danos mais profundos na estrutura do material polimérico. Nesse tipo de contato, prevalecerá o mecanismo por abrasão associada com deformações plásticas do material polimérico, ou fadiga de contato devido a nucleação e propagação de trincas.

A figura 2.4.1 evidencia que tanto na predominância do mecanismo de adesão quanto no de abrasão, haverá transferência e adesão de material na superfície do contracorpo, gerando uma nova superfície de atrito.

A figura 2.4.2 apresenta o coeficiente de desgaste de um material polimérico que foi ensaiado contra um contracorpo metálico com acabamento topográfico variado. O gráfico revela que quando a rugosidade do contracorpo foi reduzida de 1 para 0,1 μm , o coeficiente de desgaste do material polimérico diminuiu como consequência da redução das ações abrasivas e das deformações plásticas. Em contrapartida, quando o contracorpo teve rugosidades menores do que 0,1 μm , o coeficiente de desgaste tornou a aumentar em função do aumento da adesão do material polimérico à superfície do material metálico.

Figura 2.4.2: Coeficiente de desgaste de um material polimérico em função do acabamento superficial do contracorpo metálico (DOWSON, GODET e TAYLOR, 1976; citado por HUTCHINGS, 1992).

Da mesma forma que se tem o período de *running in* na taxa de desgaste dos materiais metálicos, há também nos poliméricos. No regime permanente a taxa de desgaste será proporcional à força normal aplicada, como ilustra a figura 2.4.3-a. Todavia, em uma determinada força, a taxa de desgaste cresceu significativamente, o que caracterizou uma transição entre os regimes de desgaste. Esta transição pode variar de material para material e dependendo da propriedade do polímero, pode ocorrer em função da temperatura de transição vítrea, que quando atingida, favorece a adesão entre as superfícies. Com isso, a perda de material aumentará.

A figura 2.4.3-b mostra a transição na taxa de desgaste de um material polimérico quando os ensaios foram realizados em função da velocidade de deslizamento. A transição ocorreu quando a velocidade foi de 10 ms^{-1} e a temperatura na interface de contato foi em torno de 250°C , o que ocasionou a degradação térmica do material polimérico.

Figura 2.4.3: Transição da taxa de desgaste de materiais poliméricos que deslizaram a seco contra superfícies metálicas: em função da (a) força normal aplicada e da (b) velocidade de deslizamento (EVANS e LANCASTER, 1979; citado por HUTCHINGS, 1992).

2.5 Tribofilme no Par Tribológico: Material de Fricção e Disco de Ferro Fundido

Na literatura poucos são os trabalhos sobre estudos do desempenho tribológico da embreagem automotiva a seco. Até o presente momento, apenas um trabalho fez referência ao tribofilme desenvolvido na superfície dos pares atritantes deste componente (PANTAZOPOULOS *et al.*, 2015). Ainda assim, a sua contribuição foi pouco relevante, pois não foram apresentados ou discutidos os mecanismos de desenvolvimento do tribofilme e o seu efeito no desempenho funcional do par tribológico empregado neste sistema. Portanto, o entendimento de tais fenômenos continua pouco compreendido.

Contudo, o par tribológico utilizado no sistema de frenagem automotiva tem sido extensivamente estudado e os resultados amplamente publicados, pela razão deste componente ser um item crítico de segurança veicular.

Os pares tribológicos utilizados nos sistemas embreagem e frenagem automotiva têm determinadas semelhanças. Na maior parte das duas aplicações, os materiais de fricção deslizam contra uma superfície metálica, geralmente de ferro fundido cinzento. Além do mais, os materiais de fricção tradicionalmente empregados, utilizam as mesmas matérias-primas (CHAN e STACHOWIAK, 2004).

Ressalta-se, no entanto, que o balanceamento das formulações diverge, pois está relacionado aos pré-requisitos técnicos dos produtos. Este fator, mais os processos de manufatura e as geometrias das peças que também são bem distintos, afetam a morfologia da microestrutura do material de fricção. Além do que, os tribossistemas das aplicações são dessemelhantes.

Na frenagem, a pressão específica de contato é maior e a velocidade de deslizamento é menor. Ademais, o tribossistema permanece exposto ao meio externo e somente parte da superfície de atrito do material de fricção permanece em contato com a do contracorpo (ver figura 2.5.1-a). Isto beneficia o resfriamento do sistema, resultando numa menor temperatura de trabalho. Já a embreagem está totalmente enclausurada e isolada do meio externo.

Apesar das dissimilaridades, nas próximas páginas será apresentada uma síntese bibliográfica dos pontos mais relevantes para esta obra, que foram investigados para o sistema de freios. Desta maneira, espera-se, ao menos, suprir de forma parcial a carência bibliográfica sobre tribofilmes no sistema embreagem automotiva a seco.

Figura 2.5.1: Sistema de freio automotiva disco: (a) real (CENTRO AUTOMOTIVO, 20??); (b) representação esquemática dos componentes e do funcionamento (HOW THE BRAKING SYSTEM WORKS, 2015); (c) pastilha de freio formada pelo material de fricção (CG AUTO, 2008); e (d) sua microestrutura revelando a morfologia e a distribuição das matérias-primas (CHAN e STACHOWIAK, 2004).

O material de fricção do freio é confeccionado misturando as matérias-primas a seco, que na sequência são prensadas em determinadas faixas de temperatura para dar forma a uma pastilha, como mostra a figura 2.5.1-c.

A sua microestrutura característica é apresentada na figura 2.5.1-d, que revela a morfologia e a distribuição das diferentes matérias-primas empregadas. A letra A refere-se a fibra metálica de reforço adicionada a matriz polimérica, enquanto que a letra B indica as fibras de vidro (elemento de reforço) e o sulfeto de bário (carga abrasiva). A letra C, por sua vez, faz referência ao silicato de zircônia (carga de enchimento) e a letra D, a matriz (área escura) que é formada por resinas que são misturadas as borrachas.

As primeiras contribuições sobre a morfologia e espessura do tribofilme desenvolvido nos pares tribológicos do freio, foram apresentadas por *Liu, Rhee e Lawson* (1980). Estes pesquisadores testaram, num dinamômetro, dois materiais de fricção de composições químicas distintas, e as condições dos ensaios foram denominadas por eles de moderado e severo. Os testes foram realizados aplicando duas forças normais e duas velocidades de deslizamento, sendo a força normal e a velocidade de deslizamento na condição severa o dobro da moderada.

Liu, Rhee e Lawson identificaram na superfície do contracorpo tribofilmes com espessuras que variaram de 1 a 7 μm , sendo o mais espesso na condição mais severa. Observaram também que o tribofilme desenvolvido controlou a taxa de desgaste do par tribológico, pois protegeu a superfície e atuou como um lubrificante.

A figura 2.5.2 apresenta as superfícies dos contracorpo que foram, após os ensaios, caracterizadas em seção transversal por M.O.

Figura 2.5.2: Superfície do contracorpo metálico após ensaio no dinamômetro caracterizado em seção transversal por M.O; tribofilme desenvolvido nos regimes (a) moderado e (b) severo (LIU, RHEE e LAWSON, 1980).

Nos anos decorrentes, vários estudos foram realizados com o intuito de melhorar o desempenho funcional do sistema de frenagem automotiva. Na sequência são apresentadas algumas referências que investigaram as seguintes variáveis: composição química do material de fricção (ZHAO e BAHADUR, 1999; KIM e JANG, 2000; BIJWE, MAJUMDAR e SATAPATHY, 2005; HEE e FILIP, 2005; CHO *et al.*, 2005; GURUNATH e BIJWE, 2007; CHO *et al.*, 2008; MATJEKA *et al.*,

2010; KUMAR *et al.*, 2011; SAFFAR e SHOJAEI, 2012) e, do contracorpo (SUGISHITA e FUJIYOSHI, 1982; CHEN *et al.*, 2003; HINRICHS *et al.*, 2011); força normal (JACKO, TSANG e RHEE, 1989; QI e DAY, 2007; MULLER, e OSTERMEYER, 2007 e 2008); velocidade de deslizamento (MULLER, e OSTERMEYER, 2007 e 2008); temperatura do ensaio (QI e DAY, 2007; MULLER, e OSTERMEYER, 2007 e 2008); características topográficas (MULLER, e OSTERMEYER, 2007 e 2008); e até mesmo do tribossistema (EL-TAYEB e LIEW, 2009; BIAN, G. e WU, 2015).

Apesar da diversidade dos trabalhos, as contribuições mais significativas para a compreensão dos mecanismos de desenvolvimento do tribofilme na interface de contato, foram apresentadas pelo grupo de pesquisa coordenado por *Eriksson* e *Jacobson* (ERIKSSON, BERGMAN e JACOBSSON 1999; ERIKSSON e JACOBSSON, 2000; ERIKSSON, LORD e JACOBSSON, 2001; ERIKSSON, BERGMAN e JACOBSSON 2002).

Primeiramente, *Eriksson* e *Jacobson* (2000) observaram que a área real de contato é muito menor em relação à área total, constatando que apenas uma fração da superfície do material de fricção está em contato com a do disco. A figura 2.5.3-a traz uma representação esquemática para exemplificar a área real de contato na superfície de uma pastilha de material de fricção.

Figura 2.5.3: Representação esquemática da (a) superfície de contato da pastilha de freio; (b) platôs de contato existentes em uma pequena porção da superfície de contato; (c) momentâneos picos de representando a área real de contato (ERIKSSON e JACOBSON, 2000).

Eriksson e *Jacobson* (2000) concluíram também que a força de atrito será transmitida através das áreas reais, que são formadas pelos platôs de contato (pequenas áreas dentro do círculo apresentado na figura 2.5.3-b). Em casos extremos, o contato se dará por meio dos picos topográficos que se formam momentaneamente nestes platôs de contato, como mostra a figura 2.5.3-c.

Na continuidade, *Eriksson* e *Jacobson* (2000) propuseram um modelo tridimensional para exemplificar os mecanismos de desenvolvimento do tribofilme. Para *Eriksson* e *Jacobson* (2000), os elementos estruturais do material de fricção como as fibras de reforço e os fios metálicos são os que exercem maior ação durante a formação do tribofilme. Estes elementos estruturais por serem mecanicamente mais resistentes e estáveis em relação à matriz polimérica terão uma menor taxa de desgaste. Consequentemente, a matriz polímera sofrerá um desgaste mais acentuado e irá expor os elementos estruturais à superfície de contato. Como decorrência, os elementos estruturais agirão como platôs primários de contato e favorecerão a nucleação e o crescimento dos platôs secundários (tribofilme), que são formados pelos debris de desgaste.

A figura 2.5.4-a apresenta o modelo tridimensional que foi elaborado por *Eriksson* e *Jacobson* (2000), exemplificando o desenvolvimento dos platôs secundários a partir dos primários. Este modelo ainda é uma das principais referências no assunto.

Figura 2.5.4: Representação tridimensional (a) do mecanismo de desenvolvimento do tribofilme no sistema frenagem automotiva; (b) platô secundário de contato desenvolvido a partir dos platôs primários (fio de aço - dois círculos brancos); esquerda MEV no modo SE e direita BSE (ERIKSSON e JACOBSON, 2000).

Com o movimento relativo entre as superfícies de contato, os debris de desgaste são arrastados ou se movem entre as superfícies, e quando encontram os platôs primários, ancoram e aglomeram nos seus entornos. Mediante a pressão de contato, os debris são compactados, originando os platôs secundários.

A figura 2.5.4-b revela na superfície de um material de fricção que foi ensaiado em laboratório, um platô secundário que se desenvolveu a partir de dois platôs primários. Estes platôs foram caracterizados por MEV nos modos *SE* e *BSE*. Os dois fios metálicos (áreas branca) representam os platôs primários, e a sua esquerda encontra-se o platô secundário, formado em razão da aglomeração e compactação dos debris de desgaste.

Ademais, *Eriksson e Jacobson* (2000), investigaram por meio de ensaios laboratoriais, a influência da pressão de contato na eficiência do sistema de freio. Para isso, mantiveram a velocidade de deslizamento constante e variaram somente a pressão de frenagem. Em menores pressões o coeficiente de atrito médio foi maior em relação ao alcançado quando maiores pressões foram aplicadas. A figura 2.5.5-a apresenta estes resultados.

Quando *Eriksson e Jacobson* (2000) caracterizaram as superfícies atritadas utilizando um MEV de alta resolução, eles identificaram um tribofilme mais desenvolvido no material ensaiado na condição mais severa, como mostram as figuras 2.5.5-b e 2.5.5-c. *Eriksson e Jacobson* (2000) relacionaram o aumento do atrito nos primeiros ciclos de acoplamento à formação dos platôs primários, que aumentou a área real. Porém, maiores pressões favorecem a geração dos platôs secundários, reduzindo o atrito, enquanto que menores pressões os deterioram.

Figura 2.5.5: Evolução do (a) coeficiente de atrito em função da pressão de frenagem; tribofilme desenvolvido na superfície do material de fricção após testes em (b) baixa e (c) alta pressão e temperatura observado por MEV [note as diferenças na escala] - direção de deslizamento da direita para a esquerda; (c) superfície de contato e seção transversal do tribofilme observada por MEV revelando uma camada fina, homogênea e bem compacta no topo (ERIKSSON e JACOBSON, 2000).

Eriksson e Jacobson (2000) caracterizaram também a morfologia do tribofilme em seção transversal e constataram que a sua microestrutura variou à medida que a profundidade em relação à superfície de contato aumentou (ver figura 2.5.5-d).

Próximo à superfície, o tribofilme aparece mais denso, contínuo e homogêneo, e de espessura nanométrica, sendo formado por partículas extremamente pequenas. Abaixo desta camada, a estrutura observada foi mais espessa, porosa e heterogênea, pois foi desenvolvida por maiores debris de desgaste, que já não foram tão condensados quanto as partículas da camada superior.

Os trabalhos realizados pelo grupo de pesquisa coordenado por *Eriksson e Jacobson* contribuíram significativamente para a compreensão dos mecanismos de desenvolvimento do tribofilme e a sua influência no desempenho funcional do par tribológico que é empregado no sistema de frenagem veicular.

Posteriormente, *Osterle et al.* (2001) constataram que caso a matriz polimérica tenha uma alta taxa de desgaste ou seja termicamente degradada, determinadas partículas abrasivas serão preservadas e começarão a agir como platôs primários de contato, favorecendo o desenvolvimento do tribofilme. A figura 2.5.6-a apresenta um modelo que foi proposto por *Osterle et al.* (2001) para exemplificar a formação do platô secundário quando há uma partícula dura na matriz polimérica.

Figura 2.5.6: Mecanismo de nucleação, formação e destruição do tribofilme em função da presença de uma partícula dura na matriz polimérica (OSTERLE *et al.*, 2001).

Como a matriz polimérica tem menor resistência em relação à partícula, o seu desgaste será mais acentuado e, à medida que o contato por deslizamento evolui, a partícula fica cada vez mais exposta à superfície de contato. Com esta exposição, o contato predominará através da sua superfície, e as ações das partículas de desgaste serão mais intensas na matriz polimérica. Como consequência, uma cavidade se desenvolverá ao redor da partícula dura, como aponta a seta na figura 2.5.6-b.

Debris de desgaste que se movem na direção do deslizamento, se acomodarão na cavidade formada, aglomerando ao redor da partícula dura (ver figura 2.5.6-c). Com a pressão de contato, os debris serão compactados, formando o platô secundário de contato, como mostra a figura 2.5.6-d. Esses novos platôs exercerão influência nas tensões superficiais de contato, e o sistema será desestabilizado. Como efeito, trincas irão nuclear e propagar na estrutura do tribofilme, como revela a figura 2.5.6-e. Se a perturbação do sistema prevalecer, em um dado momento os platôs primário e secundário se romperão e novos debris de desgaste serão gerados (figuras 2.5.6-f), que provavelmente irão formar novos platôs de contato em outra região da superfície do material.

Pouco tempo depois, *Ostermeyer* (2003) complementou o modelo de *Osterle et al.* (2001), retratando a distribuição da tensão normal à medida que a partícula inserida na matriz polimérica fica mais exposta à superfície de contato. A figura 2.5.7 exemplifica a distribuição da tensão normal.

Quando a partícula ainda está totalmente dentro da matriz, a tensão normal de contato é pequena, porém já é maior sobre a região na qual a partícula se localiza como revela a figura 2.5.7-a. À medida que a partícula se expõe, a tensão normal aumenta e o contato predomina na sua superfície, como mostram as figuras 2.5.7-b e 2.5.7-c.

Para *Ostermeyer* (2003) a velocidade de deslizamento contribui na geração e aumento da energia por atrito, elevando a temperatura na interface e, desestabilizando o platô secundário. Como exemplificam as figuras 2.5.7-d a 2.5.7-f, se este for pequeno, logo romperá, mas se for grande e mecanicamente resistente, trincas nuclearão e propagarão na sua estrutura, e em um determinado instante a sua estrutura se deteriorará.

Figura 2.5.7: (a - c) Distribuição da tensão normal na superfície de contato à medida que a partícula inserida na matriz fica exposta; mecanismos de (d) nucleação, (e) desenvolvimento e (f) destruição do platô secundário em função da energia gerada por atrito [força normal e velocidade de deslizamento] (OSTERMEYER, 2003).

Ostermeyer (2003) concluiu o seu trabalho afirmando que o desenvolvimento do tribofilme nos pares tribológicos é essencial para o desempenho satisfatório do sistema de freio. Para ele, o fenômeno *fading* está vinculado à taxa de destruição temporária do tribofilme, que é maior que a sua taxa de nucleação e crescimento, principalmente em tribossistemas nos quais as forças normais e velocidades de deslizamento são elevadas. Quando a energia do sistema é reduzida, este entra novamente em equilíbrio.

Apesar dos mecanismos de desenvolvimento do tribofilme já serem compreendidos, as suas propriedades até então, tinham sido pouco exploradas. Logo, Filip, Weiss e Rafaja (2002) divulgaram importantes informações após investigarem a natureza do tribofilme por meio de ensaios dinamométricos em temperaturas que variaram de 25°C à 700°C.

Esses pesquisadores, além de reforçarem as evidências de Liu, Rhee e Lawson (1980), isto é, um tribofilme mais espesso em maiores faixas de temperatura, identificaram também fases cristalinas na estrutura do tribofilme. As fases caracterizadas foram óxidos de ferro e óxido de cobre, mais sulfeto de cobre, além de produtos carbonáceos provenientes de reações químicas.

A figura 2.5.8-a apresenta uma região da superfície do material de fricção que foi caracterizada em seção transversal por MEV após ter sido ensaiada na temperatura de 700°C. Antes do embutimento, sobre a superfície atritada foi depositada uma fina camada de níquel químico para proteger o tribofilme contra eventuais danos durante o processo de preparação metalográfica da amostra (detalhe da camada de níquel na figura 2.5.8-b).

Figura 2.5.8: Caracterização da superfície do material de fricção em seção transversal e por MEV após ensaio dinamométrico a 700°C; (a) tribofilme desenvolvido sobre elementos estruturais e (b) detalhe; (c) variação da espessura em função da temperatura do ensaio (200° e 700°C) (FILIP, WEISS e RAFAJA, 2002).

A espessura do tribofilme, que foi medida em pontos seleccionados ao longo da seção transversal, é apresentada na figura 2.5.8-c. A média foi de 2,5 µm em 200°C e 5 µm em 700°C. Esses resultados foram associados a degradação térmica dos

constituintes orgânicos, que favoreceu a geração de debris de desgaste, principalmente em temperaturas mais elevadas.

Na figura 2.5.8-c observa-se que para alguns pontos o valor da espessura foi igual à zero, o que indica que o tribofilme não foi identificado neste ponto de medição. Esta constatação é feita principalmente para a condição de menor temperatura. Também foi observado que a espessura do tribofilme variou ao longo da seção transversal, revelando que o seu desenvolvimento não foi uniforme.

Kim et al. (2004) e *Cho et al.* (2005) também correlacionaram a espessura do tribofilme com a temperatura do ensaio, porém o que se desenvolveu na superfície do contracorpo. Como exibe a figura 2.5.9-a, a espessura do tribofilme aumentou com o aumento da temperatura. No entanto, em temperatura superior a 250°C, o valor da espessura diminuiu. De acordo com *Cho et al.* (2005), essa redução na espessura ocorreu por causa da menor adesão do tribofilme à superfície do contracorpo, em função da decomposição térmica dos elementos orgânicos e dos lubrificantes sólidos. Na figura 2.5.9-b é apresentado o tribofilme desenvolvido na superfície do contracorpo, que foi caracterizado em seção transversal por M.O.

Figura 2.5.9: Variação da (a) espessura do tribofilme na superfície do (b) contracorpo metálico em função da temperatura do ensaio (a- CHO *et al.*, 2005; b- CHO *et al.*, 2001).

Anteriormente, *Cho et al.* (2001) já haviam correlacionado a resistência do material de fricção ao *fading* e o seu coeficiente de atrito médio com a espessura do tribofilme, porém não obtiveram êxito. Naquela ocasião, *Cho et al.* (2001) chegaram

a conclusões semelhantes as de *Wirth, Eggleston e Whitaker (1994)*, isto é, o desempenho do par tribológico é mais afetado pela composição química do tribofilme do que por sua espessura.

Contudo, *Cho et al. (2001)* constataram que tribofilmes mais espessos tendem a deixar o coeficiente de atrito mais estável. Conclusões que posteriormente foram repetidas e confirmados por *Cristol-bulthé et al. (2008)*.

Talib, Muchtar e Azhari (2003) investigaram os mecanismos de desgaste que agem durante o deslizamento do par tribológico que são utilizados em freios automotivos. Esses pesquisadores realizaram os ensaios tribológicos empregando amostras em escala reduzida e simplificada. A força normal aplicada foi variada de 100 a 800N e os ciclos de frenagem de 3 a 15 minutos. A velocidade de deslizamento foi mantida constante.

A figura 2.5.10-a revela os mecanismos de adesão que ocorreram em função da deformação dos picos das asperidades do material de fricção, favorecendo a formação de junções metálicas. Por causa dos ciclos de frenagem, a superfície foi coberta por multicamadas que foram compactadas, cisalhadas e alisadas.

O mecanismo de fadiga de contato foi observado logo após o início das deformações plásticas, que resultaram na formação de estrias por razão dos acoplamentos cíclicos, como ilustra a figura 2.5.10-b. *Talib, Muchtar e Azhari (2003)* observaram que o espaçamento entre as estrias aumentou com o aumento da força normal.

O mecanismo de delaminação também teve início após as deformações plásticas iniciarem, porém com deslocamento de material no núcleo. Como efeito, trincas nuclearam e propagaram na sub-superfície e paralela à superfície de contato (ver figura 2.5.10-c), formando finas placas de desgaste na superfície de contato.

A figura 2.5.10-d exibe as marcas de desgaste que foram geradas pelos picos das asperezas do contracorpo metálico, evidenciando o mecanismo de abrasão a dois corpos. *Talib, Muchtar e Azhari (2003)* notaram que a superfície do material de fricção ficou mais rugosa quando aplicadas maiores forças normais foram.

Já na figura 2.5.10-e são apresentadas micropartículas de desgaste que foram geradas em consequência dos elevados níveis de estresse térmicos na superfície de contato do material de fricção. Micro trincas térmicas foram visualizadas entre as partículas de desgaste (indicadas pelas setas vermelha).

Figura 2.5.10: Mecanismos de desgaste em função da condição do ensaio simulado em laboratório utilizando escala reduzida e simplificada; (a) adesão; (b) fadiga de contato; (c) delaminação; (d) abrasão; e (e) térmico (TALIB, MUCHTAR e AZHARI, 2003).

Como vários trabalhos / estudos estavam sendo realizados por meio de ensaios realizados em equipamentos de escala reduzida e simplificada, *Blau e Jolly* (2005) chamaram a atenção para a confiabilidade e representatividade na reprodução das características de tribossistemas reais de sistema de freio.

Sendo assim, *Blau e Jolly* (2005) investigaram dentre três metodologias de ensaio de diferentes geometrias de contato, qual reproduziria melhor as características do tribossistema real. Os métodos investigados são apresentados na figura 2.5.11.

Figura 2.5.11: Metodologias de ensaio de diferentes geometrias de contato utilizadas para reproduzir as características de tribossistemas reais de freios; material de fricção em escala (a) real, (b) reduzida e (c) reduzida e simplificada (BLAU e JOLLY, 2005).

Blau e Jolly (2005) constataram que, dentre os diversos materiais investigados, os materiais apresentaram desempenho equivalentes nos três métodos avaliados. Entretanto as escalas das taxas de desgaste foram diferentes. A diferença de escala para um mesmo material, se deu em razão dos tribofilmes se desenvolverem de modo distintos. Isto é, as geometrias de contato intervêm no processo de eliminação ou arrastamento dos debris de desgaste para o meio interfacial.

Segundo *Blau e Jolly* (2005) a configuração apresentada na figura 2.5.11-a favorece a eliminação dos debris, enquanto que a geometria mostrada na figura 2.5.11-c beneficia o arrastamento dos debris para o meio interfacial.

Com este trabalho, *Blau e Jolly* (2005) concluíram que o método mais eficiente é o que reproduz de maneira mais representativa as interações tribológicas do tribossistema em estudo. Isto é, deve-se avaliar se os resultados reproduzidos em laboratório condizem com a prática, validando desta forma a metodologia escolhida.

Osterle e Urban (2004 e 2006) trouxeram novas contribuições quando estudaram as características do tribofilme por meio do uso das ferramentas de análise FIB (do inglês *focus ion beam*) e SIM (do inglês *scanning ion microscopy*). Com estas técnicas Osterle e Urban observaram que, dependendo da composição química do material de fricção, um tribofilme composto por 3 diferentes camadas poderá se desenvolver, e as suas características serão as seguintes:

- Camada de aproximadamente 100 nm de espessura no topo da superfície de contato, composta por partículas de óxidos metálicos nanocristalinos e amorfos que foram enriquecidos por enxofre;
- Camada intermediária e nanocristalina formada por debris de desgaste compactados que darão origem a rugosidade superficial do material;
- Camada metálica severamente deformada que suportará as duas anteriores.

Exemplificando as constatações de Osterle e Urban, a figura 2.5.12-a apresenta um platô secundário gerado a partir do primário e, que foram identificados na superfície do material de fricção por MEV. Quando a mesma região em que estes platôs se encontram foi caracterizada por FIB (figura 2.5.12-b), uma fina camada que se desenvolveu sobre eles foi revelada. Até então esta camada de espessura nanométrica não tinha sido observada por outras técnicas de caracterização.

Figura 2.5.12: Superfície de atrito do material de fricção após teste de frenagem caracterizada por (a) MEV e (b) FIB; (c) espectro EDS de raios X referente à análise qualitativa na superfície do contracorpo [Platôs primário (PP) e secundário (PS)] (OSTERLE e URBAN, 2004).

O espectro EDS de raios X apresentado na figura 2.5.12-c, revelou que a maioria dos elementos químicos que foram detectados na superfície do contracorpo, compõe a formulação do material de fricção. Citam-se: o cobre, o zinco, o silício, o enxofre e o cálcio.

A figura 2.5.13, por sua vez, apresenta os resultados das caracterizações realizadas por SIM em dois elementos estruturais do material de fricção utilizado em freios. Neste caso os elementos foram: um fio de latão e uma matriz polimérica.

Figura 2.5.13: Elementos estruturais do material de fricção caracterizados por SIM; estrutura do tribofilme na superfície do (a) fio de latão e da (b) matriz polimérica (OSTERLE e URBAN, 2006).

A técnica de análise SIM revelou sobre a superfície do fio de latão um tribofilme contendo três camadas de espessuras nanométricas. Como mostra a figura 2.5.13-a, a primeira camada foi denominada de filme de fricção, e a segunda, de camada de fricção. A terceira camada foi formada pela microestrutura deformada do fio e que dá sustentação as duas superiores. Sobre a matriz polimérica foi identificado um tribofilme com espessura próxima de 100 nm, como exhibe a figura 2.5.13-b.

Osterle e Urban (2004), de forma semelhante ao Filip, Weiss e Rafaja (2002), comprovaram que boa parte dos debris de desgaste foram formados por óxidos de ferro na estrutura Fe_2O_3 e Fe_3O_4 , e que sua adesão ao material de fricção foi inferior a dos debris formados por Cu_2O e CuFeO_2 .

Osterle e Urban (2004) afirmaram que a degradação térmica dos materiais orgânicos além de reduzir o nível do coeficiente de atrito em temperaturas elevadas, é também responsável pelo período de *running in* na curva do atrito, que posteriormente foram investigadas, obtendo-se as seguintes conclusões (OSTERLE e URBAN, 2006):

- O tribofilme se desenvolve tanto na superfície do material de fricção quanto na do contracorpo, sendo formado por uma microestrutura nanocristalina;
- A composição química do tribofilme é influenciada principalmente pelos lubrificantes sólidos utilizados na formulação do material de fricção;
- A estabilidade do tribofilme bem como das camadas ou dos materiais que o suporta, tem um papel fundamental na estabilidade do coeficiente de atrito e da taxa de desgaste;
- A ação do tribofilme no desempenho do par tribológico não é ainda totalmente compreendida.

Roubicek et al. (2008) evidenciaram com testes dinamométricos, que as composições químicas e morfologias dos tribofilmes no material de fricção e no contracorpo, são diferentes. Além disso, como mostra a figura 2.5.14-a, o tribofilme não se desenvolveu de forma homogênea na superfície do contracorpo, pois os veios de grafita que não foram cobertos permaneceram expostos.

Figura 2.5.14: Tribofilme não contínuo desenvolvido (a) na superfície do contracorpo e caracterizado em (b) seção transversal por MEV; (c) espectro qualitativo EDS de raios X obtido na região do tribofilme (ROUBICEK *et al.*, 2008).

Para Roubicek *et al.* (2008) os veios de grafita dificultam a adesão do tribofilme à superfície de contato, além de auxiliar na sua remoção. Esta afirmação faz oposição aos argumentos de Cho *et al.*, (2001), que concluíram que os lubrificantes sólidos favorecem o desenvolvimento do tribofilme.

Além de partículas metálicas, que são indicadas pela seta na figura 2.5.14-b, no tribofilme que se desenvolveu na superfície do contracorpo, foram identificados os elementos químicos magnésio, alumínio, silício, enxofre, estanho e cobre, como exhibe o espectro EDS de raios X disposto na figura 2.5.14-c. Esses resultados evidenciaram a transferência e adesão de materiais do material de fricção para a superfície do contracorpo.

A complexidade do comportamento tribológico do sistema de freio automotivo envolve reações de naturezas física e química, com interdependências entre as variáveis do tribossistema. Deste modo, *Muller e Ostermeyer* (2007 e 2008) propuseram um modelo algorítmico para facilitar o estudo e compreensão das interdependências das variáveis de forma simultânea. A figura 2.5.15 apresenta o modelo proposto.

Figura 2.5.15: Modelo algorítmico para estudar a interdependência das variáveis de entrada (topografia, força normal e temperatura) e de saída (atrito e desgaste) do tribossistema no desempenho do par tribológico de freios (MULLER e OSTERMEYER, 2007).

Muller e Ostermeyer (2007 e 2008) descreveram as interdependências entre as variáveis da seguinte maneira:

1. O desgaste forma a topografia pela formação dos platôs a partir dos debris de desgaste;
2. As áreas mais resistentes tem menor desgaste;
3. A força normal causa deformações elásticas e plásticas, alterando as condições topográficas;
4. A topografia é responsável pela distribuição da carga na superfície;
5. A temperatura exerce influência na formação dos platôs e nas deformações elástica e plástica;
6. Calor é gerado nas superfícies dos platôs mais resistentes;
7. O atrito é dependente das interações entre as asperidades que depende da condição topográfica;
8. Os platôs mais resistentes absorvem a maior parte do calor gerado;
9. Parte do calor gerado é dissipada na destruição de platôs de contato e na geração de novas partículas de desgaste;
10. A taxa de desgaste depende da força normal aplicada;
11. O calor produzido também depende da força normal;
12. Parte da energia de atrito é transmitida pela geração de calor.

A relação entre a degradação térmica, em elevadas temperaturas, dos constituintes orgânicos do material de fricção utilizados em freios, com o atrito e o mecanismo de formação e destruição do tribofilme foi realizada por *Cristol-bulthé et al.* (2008). Neste estudo foram realizadas duas séries de ensaios tribométricos, nas quais a força normal e a velocidade de deslizamento foram mantidas constantes. Na primeira série o ensaio foi realizado na temperatura ambiente e na segunda, o disco foi aquecido até 515°C com o auxílio de uma resistência elétrica. Durante a evolução dos ensaios tribométricos, os gases que foram gerados foram coletados e analisados por meio de um espectrômetro de massa.

Cristol-bulthé et al. (2008) observaram que a degradação térmica da matriz polimérica ocorreu em três estágios. No primeiro estágio houve liberação das moléculas de água e dos gases que estavam contidos no material. No segundo, a resina fenólica degradou termicamente, liberando H₂O e CO₂. Para *Cristol-bulthé et al.* (2008) o fenômeno *fading* ocorre por causa da liberação de H₂O durante essa fase. Já no terceiro estágio, ocorreu a degradação de outros constituintes, o que produziu mais CO₂. Em maiores temperaturas, haverá maior degradação térmica dos constituintes orgânicos, o que irá gerar mais debris de desgaste. Além do que, os constituintes inorgânicos ficarão mais expostos a superfície de contato e favorecerá o desenvolvimento de um tribofilme mais espesso, que tornará o atrito mais estável. Entretanto, a taxa de desgaste do material de fricção aumentará.

A figura 2.5.16 apresenta a amostra do material de fricção, sua superfície observada no MEV após os ensaios e um esquema do mecanismo de desenvolvimento do tribofilme.

Figura 2.5.16: Superfície de atrito do material de fricção em escala reduzida na forma de (a) pino; superfície caracterizada por MEV após o ensaio tribométrico (b) sem aquecimento [tribofilme mais desenvolvido] e (c) com o disco aquecido até 515°C [tribofilme parcialmente destruído] (CRISTOL-BULTHÉ *et al.*, 2008).

Até aqui se viu que o coeficiente de atrito tende a reduzir quando a energia do sistema gerada por atrito aumenta, por razão da elevação da força normal e, como efeito, a temperatura na interface sobe, desestabilizando o tribofilme.

Adversamente, *El-tayeb* e *Liew* (2009) obtiveram um nível de atrito mais elevado aplicando maiores pressões de contato. Tais ganhos foram associados ao aumento da área real de contato com o aumento da força normal, além de aumentar à adesão das fibras metálicas do material de fricção à superfície do contracorpo.

As figuras 2.5.17-a e 2.5.17-b exemplificam o aumento da área real com o aumento da força normal, proporcionando maiores interações entre as superfícies.

Figura 2.5.17: Variação da área real de contato em função da força normal aplicada; (a) baixa e (b) alta força; (c) elementos estruturais em contato direto com o contracorpo devido a remoção dos debrís por um fluxo de água contínuo (EL-TAYEB e LIEW, 2009).

Além do mais, *El-tayeb* e *Liew* (2009) investigaram o efeito de um contínuo fluxo de água no meio interfacial, no desempenho funcional do par tribológico. Por causa do fluxo de água os debrís de desgaste foram expulsos do meio interfacial e como efeito, o tribofilme não se desenvolveu. Em razão disto, os elementos

estruturais tiveram contato direto com a superfície do disco, como mostra a figura 2.5.17-c. Com a eliminação dos debris, a ação abrasiva foi minimizada, reduzindo a taxa de desgaste. Os níveis de atrito também diminuíram, no entanto, por causa do efeito lubrificante proporcionado pelo fluxo de água.

Na frenagem automotiva, o produto PV varia de 0,3 a 20 MPa ms⁻¹. Para investigar o efeito desta variável no desempenho funcional do freio, *Straffelini e Maines* (2013) realizaram ensaios tribométricos variando a força normal de 100 à 700N enquanto mantiveram a velocidade de deslizamento constante em 0,94 ms⁻¹. Esses parâmetros corresponderam a PVs que variaram de 1,9 a 6,5 MPa ms⁻¹. Dois materiais de fricção distintos foram empregados nesse estudo.

A figura 2.5.18-a apresenta, para os materiais de fricção A e B, a evolução do coeficiente de atrito médio e, a figura 2.5.18-b mostra a evolução da temperatura do ensaio, ambos em função da força normal. *Straffelini e Maines* (2013) observaram que o atrito médio diminuiu e a temperatura aumentou, a medida que a força normal foi elevada. As diferenças nos resultados entres os materiais de fricção A e B foram relacionadas as distinções das composições químicas dos materiais.

Figura 2.5.18: Valores médios do (a) coeficiente de atrito e (b) temperatura obtidos nos ensaios tribométricos realizados com dois materiais de fricção com PV variando de 1,9 a 6,5 MPa ms⁻¹ (STRAFFELINI e MAINES, 2013).

Para a taxa de desgaste, *Straffelini e Maines* (2013) identificaram dois regimes: o primeiro em baixas forças normais aplicadas, e o segundo em altas, que são visualizados na figura 2.5.19.

Figura 2.5.19: Taxa de desgaste dos (a) materiais de fricção e dos (b) respectivos contracorpo de ferro fundido, que foram obtidas com PV variando de 1,9 a 6,5 MPa ms⁻¹ (STRAFFELINI e MAINES, 2013).

Os dois regimes de desgaste foram observados tanto para o material de fricção A quanto para o B, inclusive para os respectivos contracorpo. As transições ocorreram para temperaturas entre 310 e 350°C. No regime de menor desgaste, predominou o mecanismo de abrasão, sendo que a variação da taxa de desgaste foi baixa quando a força normal e a temperatura cresceram. Já no de maior severidade, a taxa de desgaste foi bastante afetada, devido a degradação térmica da matriz polimérica (STRAFFELINI e MAINES, 2013).

Paralelamente, *Kchaou et al.* (2013) ensaiaram um material de fricção num tribômetro pino-disco em três regimes de severidade, que foram denominados de T1 - para baixa severidade, T2 - para moderado e T3 - para alta severidade. Em cada regime foram adotadas diferentes velocidade de deslizamento e força normal.

A temperatura de ensaio em T1 variou de 100-150°C, enquanto em T2 ficou entre 200-250°C e para T3 em torno de 300-350°C. Os níveis do atrito foram correlacionados com as evidências observadas por MEV nas superfícies desgastadas do material de fricção.

Kchaou et al. (2013) observaram para T1 que o atrito manteve-se crescente com a evolução do ensaio (ver figura 2.5.20-a), e que o tribofilme se desenvolveu de forma parcial (ver figura 2.5.20-b). Na superfície do material de fricção, fibras de vidro permaneceram expostas com debris de desgaste entre os filamentos. Para *Kchaou et al.* (2013) a exposição das fibras de vidro elevaram o nível do atrito.

Figura 2.5.20: Evolução do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio e superfície desgastada do material de fricção caracterizada por MEV após testes nos diferentes regimes de severidade simulados num tribômetro pino-disco: (a - b) baixa - T1; (c - d) moderado - T2; e (e-f) alta severidade - T3 (KCHAOU *et al.*, 2013) [Platôs primário (PP) e secundário (PS)].

No regime T2 (moderado), o coeficiente de atrito permaneceu estabilizado num nível satisfatório para as aplicações de frenagem (na média em torno de 0,45). Um tribofilme mais desenvolvido foi identificado, e a sua estabilidade manteve o atrito estável. As figuras 2.5.20-c e 2.5.20-d mostram esses resultados que foram obtidos por *Kchaou et al.* (2013).

Já para T3, o nível do atrito foi abaixo de 0,25 e decrescente com a evolução do ensaio, como mostra a figura 2.5.20-e. *Kchaou et al.* (2013) atribuíram esse comportamento como efeito da degradação térmica da matriz polimérica, que além de desestabilizar o tribofilme, reduziu a área real de contato. A figura 2.5.20-f revela uma partícula dura com marcas de desgaste, sinalizando a predominância do contato na sua superfície.

Sellami et al. (2014), similarmente, relacionaram o desempenho tribológico do freio (coeficiente de atrito) com as propriedades mecânicas, a distribuição dos elementos e as interações entre as microestruturas, do material de fricção.

Conforme mostra a figura 2.5.21-a, *Sellami et al.* (2014) observaram dois regimes na curva do coeficiente de atrito. O primeiro durou 30 minutos, e a temperatura chegou a 300°C. Nesse regime, o atrito foi instável, atingindo o nível máximo de 0,7 logo no início do ensaio, e na sequência reduzindo de maneira acelerada até 0,5 quando a temperatura atingiu 250°C. As flutuações e reduções no nível do atrito foram conectadas a degradação térmica da matriz polimérica.

No regime permanente, o coeficiente de atrito permaneceu mais estável, e esse desempenho foi atribuído à estabilização da temperatura, que manteve o sistema em equilíbrio.

Figura 2.5.21: (a) Evolução do coeficiente de atrito e da temperatura medida durante o ensaio em função do tempo e (b - c) superfície do material de fricção observada via MEV após o ensaio (SELLAMI *et al.*, 2013).

A figura 2.5.21-b mostra a superfície do material de fricção caracterizada por MEV após o ensaio tribológico, revelando que o tribofilme formou de maneira parcial sobre a estrutura dos rovings das fibras de vidro. Já a figura 2.5.21-c, evidência o desprendimento de uma partícula dura por causa da degradação térmica da matriz polimérica.

Com esse trabalho *Sellami et al.* (2014) mostraram a relevância da natureza das partículas, o seu tamanho e a sua distribuição na microestrutura do material de fricção, no desempenho funcional do freio.

Com esta revisão bibliográfica pode-se dizer que o entendimento da dinâmica de desenvolvimento do tribofilme em materiais de fricção já é de certa forma, compreendido. No entanto, o seu total entendimento torna-se fundamental para o desenvolvimento de materiais cada vez mais eficazes, principalmente para embreagens automotivas, que carece de referências neste campo.

Além do mais, esta revisão mostrou que as propriedades tribológicas do tribofilme, a sua taxa de nucleação, de crescimento, estabilidade e destruição dependerão do tribossistema. Pode-se dizer que dê certo modo o desenvolvimento do tribofilme no par tribológico (material de fricção e contracorpo metálico) é em parte desejável, pois tende a reduzir a taxa de desgaste e mantém o coeficiente de atrito mais estável, apesar de reduzir o seu nível.

O grande desafio é desenvolver novos materiais que além de reduzir a taxa de desgaste, mantêm o nível do coeficiente de atrito num patamar satisfatório e constante, garantindo a funcionalidade do sistema, sem colocar em risco a sua qualidade e segurança.

A realização de ensaios em escala real para investigar tais fenômenos além de tornar o tribossistema bastante complexo, é demorada e dispendiosa, conforme apresentado e discutido.

Busca-se por meio desta revisão utilizar os conceitos, métodos de ensaios e técnicas de caracterização como material de referência para estudar os fenômenos tribológicos envolvidos no desempenho funcional do sistema embreagem, bem como para auxiliar na compreensão e discussão dos resultados obtidos com esta tese.

Dessa forma espera-se compreender, de maneira simplificada e acelerada a dinâmica do desenvolvimento do tribofilme e a sua influência no comportamento tribológico da embreagem, principalmente em níveis de energia mais elevados.

Capítulo 3

OBJETIVO DO ESTUDO DESTA TESE

Busca-se desenvolver um método de ensaio simplificado e acelerado, que possibilite avaliar em laboratório utilizando um tribômetro pino-disco em escala reduzida, o comportamento tribológico (atrito e desgaste) de novos materiais alternativos para embreagem automotiva, principalmente em condições de maior severidade, onde elevados níveis de energia são atingidos.

De forma específica espera-se:

- i. Determinar os tipos de mecanismos de desgaste e de desenvolvimento do tribofilme, operantes nos pares tribológicos que são submetidos a diferentes condições operacionais em campo;
- ii. Reproduzir no laboratório, através do modelo simplificado e acelerado, os mecanismos que foram identificados em campo, e dessa forma validar o método desenvolvido;
- iii. Estudar a influência do tribossistema (condições operacionais) nos mecanismos de desenvolvimento do tribofilme e o seu efeito no comportamento tribológico (atrito e desgaste) dos pares atritantes;
- iv. Contribuir para suprir a lacuna de conceitos na relação dos mecanismos de desenvolvimento do tribofilme com a composição química do material de fricção, e o seu efeito no comportamento tribológico dos atuais e futuros materiais para embreagem automotiva.

Capítulo 4

MATERIAIS e MÉTODOS

Este trabalho foi realizado no Centro de Competência Mundial em Pesquisa e Desenvolvimento de Materiais de Fricção para Embreagens Automotivas a Seco do Grupo ZF BU TNB - CV, em parceria tecnológica com o Laboratório de Fenômenos de Superfície (LFS) do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (PME-EPUSP).

A estrutura do trabalho está dividida em duas partes. A primeira parte consistiu em coletar conjuntos de embreagens que foram ensaiados em campo em três diferentes condições, para posteriormente caracterizá-los e identificar os mecanismos de desenvolvimento do tribofilme operantes. Os resultados foram posteriormente utilizados como referência para as simulações em laboratório.

Na segunda parte, foram realizados ensaios num equipamento tribômetro pino-disco, utilizando amostras em escala reduzida e simplificada, com intenção de reproduzir as condições operacionais nas quais as embreagens foram submetidas na prática.

Em laboratório, foram também realizadas diferentes séries de ensaios tribométricos para investigar a influência do tribossistema na resposta tribológica (atrito e desgaste) do par atritante da embreagem.

Além do que, neste capítulo serão apresentadas as metodologias de ensaios empregadas, as técnicas de análises utilizadas, e a que foi desenvolvida para viabilizar a caracterização do tribofilme em seção transversal.

4.1 Amostras de Campo

A tabela 4.1.1 apresenta as dimensões mínima e máxima, a carga de placa, além das rotações mínima e máxima das embreagens para a linha pesada (*heavy duty*). São também apresentados os respectivos produtos PV que foram determinados a partir destas características. O produto PV sinaliza o nível de energia que é gerado durante a aplicação da embreagem. Na linha pesada o PV varia de 2 a 15 MPa ms⁻¹.

Tabela 4.1.1: Características mínimas e máximas da embreagem usada na linha pesada.

CARACTERÍSTICAS	MÍNIMA	MÁXIMA
Dimensão (mm)	330	430
Carga de Placa (N)	10.000	40.000
Rotação (RPM)	900	2500
PV (MPa ms ⁻¹)	2	15

Para identificar os mecanismos de desenvolvimento do tribofilme e suas características, coletaram-se três conjuntos de embreagem que foram ensaiados no campo em aplicações veiculares da linha pesada (*heavy-duty*). Isto é, em caminhões utilizados para diversos fins. As dimensões das embreagens foram de 430 mm de diâmetro externo por 240 mm de diâmetro interno. Por esta razão, amostras representativas foram obtidas para a realização das caracterizações.

A tabela 4.1.2 apresenta as principais características dos conjuntos, e a figura 4.1.1 apresenta as superfícies de atrito da placa de pressão e do material de fricção. Os furos existentes no material de fricção foram gerados no processo de manufatura para possibilitar a sua rebitagem no disco da embreagem.

Tabela 4.1.2: Síntese dos conjuntos embreagens coletados de campo para caracterizar e identificar os mecanismos de desenvolvimento do tribofilme.

Conjunto	Aplicação	Km rodado (Aproximado)	Material caracterizado
A	Rodoviário	12.000	-Placa de pressão - Material de fricção
B	Ônibus urbano	27.000	
C	Cana-de-açúcar	18.000	

Figura 4.1.1: Conjuntos de embreagens ensaiados em campo e que foram coletados: (a) platô e placa de pressão; (b) disco do material de fricção que deslizou contra o lado do platô.

PLACA DE PRESSÃO

MATERIAL DE FRICÇÃO

CONJUNTO A

- a -

- b -

CONJUNTO B

- c -

- d -

CONJUNTO C

- e -

- f -

4.2 Ensaios Laboratoriais

4.2.1 Materiais

O material de fricção utilizado na realização das simulações laboratoriais foi o mesmo que foi empregado nos conjuntos das embreagens ensaiadas em campo. Esse material é comercial e específico para a aplicação veicular da linha pesada.

Para a simulação laboratorial foram utilizadas amostras em escala reduzida, conforme metodologia previamente desenvolvida (FERNANDES, 2007).

As amostras em escala reduzida tanto do material de fricção quanto do disco (contracorpo) foram retiradas de peças em escala real. A amostra do material de fricção foi cortada utilizando uma serra copo de 15 mm de diâmetro, e a do disco por meio da usinagem.

As figuras 4.2.1-a e 4.2.1-b apresentam, respectivamente, o material de fricção em escala real e reduzida. A peça em escala real tinha 200 mm de diâmetro externo por 134 mm de diâmetro interno, enquanto que a amostra na escala reduzida teve 13 mm de diâmetro externo. Ambas as amostras tinham 3,5 mm de espessura.

Figura 4.2.1: Amostra do material de fricção utilizada para a realização das simulações laboratoriais: escala (a) real e (b) reduzida.

A figura 4.2.2 apresenta o contracorpo metálico tanto na escala real quanto na reduzida. As dimensões da placa de pressão (figura 4.2.2-a) foram as mesmas do material de fricção, enquanto que a amostra do disco (figura 4.2.2-b) tinha 74 mm de diâmetro externo por 5 mm de espessura.

Figura 4.2.2: Amostra do contracorpo metálico utilizado nas simulações em laboratório: escala (a) real e (b) reduzida.

4.2.2 Equipamento Utilizado nos Ensaios Laboratoriais

Os ensaios por deslizamento foram realizados utilizando o modelo de ensaio que foi desenvolvido pelo Grupo ZF BU TNB - CV em parceria tecnológica com o Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM) (FERNANDES 2007; FERNANDES *et al.*, 2007 e 2009). Todos os ensaios foram realizados no equipamento tribômetro disponível no laboratório de testes funcionais de material de fricção do Grupo ZF BU TNB - CV. Este equipamento foi projetado e construído em razão dos resultados satisfatórios obtidos com a parceria tecnológica.

Este tribômetro é equipado com controles computadorizado, possibilitando a realização de ensaios na configuração pino sobre disco, onde a força normal pode ser variada de 10 a 450 N por meio de um sistema de peso morto. A rotação e o raio de contato máximo é de 1200 rpm e 0,085 m, respectivamente. Estes parâmetros tornam possível a realização dos ensaios numa velocidade de deslizamento máxima de $10,7 \text{ ms}^{-1}$.

A amostra do material de fricção é mantida em uma montagem que não se move no plano horizontal, permanecendo apoiada sobre a superfície do disco, quando é aplicada uma força normal constante e conhecida.

Como o disco gira numa velocidade constante durante o ensaio, e sendo à distância do centro do disco à amostra do material de fricção também constante, com isso a velocidade de deslizamento não varia com o tempo.

A figura 4.2.3 apresenta o equipamento tribômetro.

Figura 4.2.3: Equipamento tribômetro utilizado para a realização das simulações laboratoriais.

Esse tribômetro dispõe de um torquímetro, que está instalado abaixo do disco, no eixo de rotação, e tem capacidade máxima de medição de torque de 15 Nm. Por meio da razão entre o torque medido e o raio de contato, chega-se a força tangencial, que quando dividida pela força normal, obtém-se o coeficiente de atrito.

O monitoramento da temperatura do ensaio é realizada utilizando um sensor (termopar) do tipo pt-100 modelo KWT 2 fios fabricado pela empresa Dostmann. Esse sensor fica instalado na parte de trás do disco, no centro da trilha de desgaste, e a 2 mm da superfície de deslizamento.

O tribômetro é interligado a um microcomputador que armazena os dados colhidos na forma de uma planilha. A taxa de aquisição de dados pode ser variada de 1 a 10 Hz. Neste trabalho foi de um ponto a cada 10 segundos.

Os parâmetros monitorados durante os ensaios são: torque, coeficiente de atrito, temperatura, tempo de ensaio e a distância deslizada.

4.2.3 Condições dos Ensaios

Para a realização dos ensaios tribométricos foram adotadas duas diferentes rotações: 750 e 1200 rpm. O raio de contato foi de 0,026 metros. Estes parâmetros asseguram velocidades de deslizamento de 2,05 e 3,27 ms^{-1} , respectivamente. Na velocidade de 2,05 ms^{-1} a força normal foi variada em 200, 320, 410 e 450 Newtons.

Na de $3,27 \text{ ms}^{-1}$, além das anteriores, foram também empregadas as forças normais de 350 e 380 Newtons.

O tempo de cada ensaio foi de 3 horas contínuas, pois como demonstrou *Fernandes (2007)*, após este tempo a taxa de desgaste do par tribológico entra em regime permanente. Foram realizados ao menos cinco ensaios em cada condição a fim de viabilizar análises estatísticas dos resultados.

Calculou-se também o respectivo produto PV (pressão específica x velocidade de deslizamento) de cada condição. Os valores são apresentados na tabela 4.2.1. Ressalta-se que nas diferentes condições de ensaio (320N e 750 rpm) e (200N e 1200 rpm) iguais valores para PV foram obtidos, isto é, de $4,92 \text{ MPa ms}^{-1}$.

Tabela 4.2.1: Valores de PV determinados para as diferentes condições de ensaios tribométricos.

Vel.	$2,05 \text{ ms}^{-1}$ (750 rpm)				$3,27 \text{ ms}^{-1}$ (1200 rpm)					
Força (N)	200	320	410	450	200	320	350	380	410	450
PV MPa ms^{-1}	3,08	4,92	6,31	6,92	4,92	7,88	8,62	9,35	10,09	11,08

Os ensaios tribométricos foram realizados em cinco diferentes séries, e que são descritas na tabela 4.2.2. A tabela 4.2.3 traz as condições de PVs aplicadas em cada série.

Tabela 4.2.2: Séries de ensaios tribométricos adotadas para as simulações em laboratório.

SÉRIE	CONDIÇÃO DE ENSAIO
A	tradicional
B	remoção dos debrís de desgaste
C	adição de debrís de desgaste
D1	contracorpo pré-condicionado - superfície com R_a igual a $0,2 \mu\text{m}$
D2	contracorpo pré-condicionado - superfície com R_a igual a $1,2 \mu\text{m}$

Na série A, os ensaios foram realizados conforme metodologia previamente desenvolvida pelo Grupo ZF BU TNB - CV, alterando somente os parâmetros de ensaio para obter os respectivos PVs. Estes ensaios serão chamados de ensaios tradicionais.

Tabela 4.2.3: PVs que foram empregados em cada série de ensaio tribométrico.

	PV (MPa ms ⁻¹)									
Série	3,08	4,92	6,31	6,92	4,92	7,88	8,62	9,35	10,09	11,08
A1	•	•	•	•						
A2					•	•	•	•	•	•
B1	•	•	•	•						
B2					•	•	•	•	•	•
C	•					•			•	
D1	•					•			•	
D2	•					•			•	

Na série B, a superfície do disco foi varrida de forma contínua durante todo o ensaio, com o objetivo de remover os debris de desgaste. Para isto, utilizou-se uma escova de cerda vegetal, que foi especificamente fabricada para este propósito, sendo necessário adaptá-la ao equipamento tribômetro. Essa escova era acionada por um motor elétrico e girava com uma rotação fixa de 1500 rpm, sendo superior a rotação máxima do disco (1200 rpm), garantindo que a cada volta do disco toda a sua superfície fosse varrida. As configurações empregadas nas duas primeiras séries de ensaios são apresentadas na figura 4.2.4.

Antes de iniciar os ensaios com remoção dos debris, avaliou-se se a escova de remoção exerceria algum tipo de influência no coeficiente de atrito e na temperatura. Para isso experimentos foram realizados nas duas velocidades de deslizamento e de duas formas.

Na primeira, o atrito e a temperatura foram monitorados com o disco girando sem nenhuma carga aplicada sobre a sua superfície. Na segunda, também sem nenhuma força normal aplicada, colocou-se a escova para varrer a superfície do disco e monitorou mais uma vez o atrito e a temperatura. Foram realizados três ensaios de uma hora de duração para cada condição, utilizando um disco novo a cada ensaio. Com esta investigação concluiu-se que a escova de limpeza não exerceu influência no tribossistema. Os resultados deste experimento encontram-se disponíveis no Apêndice 1.

Figura 4.2.4: Configuração do ensaio tribométrico utilizado na série (a) A e (b) B.

Na série C, debris de desgaste foram adicionados ao tribossistema. Porém foi necessário realizar algumas modificações e adaptações no contracorpo para garantir uma melhor eficiência do ensaio. Na trilha de deslizamento do disco foi realizado um rebaixo de 2 mm de profundidade por 14 mm de largura, conforme demonstra a figura 4.2.5-a. Além disto, na lateral do disco foi fixado um material polimérico para minimizar a perda de debris para o meio externo, em função das forças de centrifugação geradas pela rotação do disco (ver figura 4.2.5-b).

Figura 4.2.5: Disco de ferro fundido utilizado nos ensaios tribométricos com adição de debris de desgaste (Série C); (a) modificações e adaptações e (b) detalhe da montagem do pino-disco.

Os debris de desgaste foram adicionados ao ensaio com o sistema pino-disco já montado, porém estático. A medida utilizada em cada adição foi de $0,50728 \pm 0,00793$ gramas, pesado na balança Shimadzu AUW 220D que tem precisão de 10^{-5} gramas e capacidade máxima de pesagem de 200 gramas. A figura 4.2.6-a exemplifica esta quantidade. Adotou-se este procedimento para garantir que em todos os ensaios as quantidades de debris adicionados fossem sempre equivalentes. Uma vez colocados na trilha de deslizamento, os debris foram espalhados sobre a superfície do disco, como ilustra a figura 4.2.6-b.

Figura 4.2.6: Procedimento adotado para adicionar os debris de desgaste nos ensaios laboratoriais tribométricos; (a) medida da quantidade de debris e (b) debris espalhados sobre a superfície do disco antes do início do ensaio – série C.

Os debris que foram adicionados nos ensaios tribométricos foram coletados dos ensaios dinamométricos, em razão da pouca quantidade de debris gerados durante os ensaios no tribômetro, assim como à falta de recursos apropriados para coletá-los.

No entanto, para garantir a representatividade dos ensaios, os debris dos ensaios dinamométricos foram comparados com os debris gerados nos ensaios tribométricos quando empregado PV de $3,08 \text{ MPa ms}^{-1}$. Como demonstrou *Fernandes (2007)*, esta condição tribométrica equivale a condição dinamométrica em baixa energia. Os debris coletados em ambos os ensaios foram caracterizados por MEV e concluiu-se que as morfologias e as composições químicas dos debris estavam equivalentes. Os resultados são apresentados no Apêndice 2.

A série D consistiu em realizar ensaios com discos pré-condicionados, reduzindo a sua rugosidade superficial média em relação a do disco tradicional. Decidiu por reduzir a rugosidade superficial, pois como demonstraram *Dowson, Godet e Taylor* (1976 - apud HUTCHINGS, 1992), a rugosidade do contracorpo exerce uma grande influência nos mecanismos de desgaste e no de desenvolvimento do tribofilme, durante o contato por deslizamento de um polímero contra uma superfície metálica.

Além do que, não foram obtidos resultados satisfatórios quando foram realizados ensaios tribométricos com a superfície do material de fricção pré-condicionada (FERNANDES, 2007).

Desta forma optou-se pelo pré-condicionamento da superfície do contracorpo, por também apresentar uma microestrutura mais homogênea.

As rugosidades médias adotadas foram de 1,2 e 0,2 μm . Foram definidas essas condições pelos seguintes critérios: como a rugosidade média do disco tradicional foi de 3 μm , definiu-se que a primeira condição seria a metade desta, ou seja, 1,5 μm ; o outro critério foi com base na curva apresentada na figura 2.4.2, que mostrou que contracorpos metálicos com rugosidades menores do que 0,1 μm tendem a aumentar a taxa de desgaste do material polimérico. Por isso, os discos foram confeccionados com R_a igual a 0,2 μm , submetendo-os ao processo de usinagem de fresamento até obterem as rugosidades superficiais pré-estabelecidas. Na figura 4.2.7 são apresentados os discos pré-condicionados.

Figura 4.2.7: Discos de ferro fundido utilizados nos ensaios tribométricos da série D com a topografia de superfície pré-condicionada na rugosidade média de (a) 1,2 e (b) 0,2 μm .

4.2.4 Parâmetros Tribológicos

4.2.4.1 Temperatura e Coeficiente de Atrito

A partir dos dados gerados, as curvas da temperatura e do coeficiente de atrito foram construídas em função do tempo de ensaio, como exemplifica a figura 4.2.8.

A temperatura teve um crescimento rápido no início do ensaio e após aproximadamente 40 minutos entrou no regime permanente. Após a sua estabilização, calculou-se o seu valor médio correspondente a este regime.

Figura 4.2.8: Curva característica da temperatura e do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio; (a) macro e (b) detalhe do regime *running in* do coeficiente de atrito.

Para o coeficiente de atrito dois regimes foram obtidos: o *running in* e o permanente.

No *running in* foram determinados os valores do atrito máximo (ponto 1) e do mínimo (ponto 2), bem como os tempos necessários para atingir tais níveis (tempo t_1 para o máximo e t_2 para o mínimo). Além disso, calculou-se também a variação entre o atrito máximo e o mínimo ($\Delta\mu_{12}$); o mínimo e o permanente ($\Delta\mu_{23}$) e o máximo e o permanente ($\Delta\mu_{13}$), assim como a variação do tempo entre esses níveis, que foram Δt_{12} , Δt_{23} e Δt_{13} , sendo o Δt_{13} mais o tempo t_1 , o tempo necessário para o coeficiente de atrito estabilizar.

Foi também determinado o valor do coeficiente de atrito médio após este entrar no regime permanente.

4.2.4.2 Taxa de Desgaste

A taxa de desgaste do material de fricção foi determinada medindo a sua espessura antes e após cada ensaio. Para isso foi utilizado um micrômetro digital do fabricante Mitutoyo de precisão 0,001 mm. Foram medidos três pontos: dois nas bordas da amostra e um no centro, como exemplifica a figura 4.2.9. Determinou-se então a média desses três valores.

Para o disco, a taxa de desgaste foi determinada através da pesagem, também realizada antes e após cada ensaio. Antes da pesagem os discos foram limpos utilizando acetona no ultrassom por um tempo de aproximadamente dois minutos. Após este processo, os discos foram secos com o auxílio de um fluxo de ar quente gerado por um secador de cabelo. Para a pesagem utilizou-se a balança Shimadzu AUW 220D, que tem precisão de 10^{-5} gramas e capacidade máxima de pesagem de 200 gramas.

Após medir a variação da espessura do material de fricção e a variação da massa do disco, foram calculados os seus respectivos volumes desgastados. Para o disco adotou-se a densidade de $7,35 \text{ g/cm}^3$, valor este obtido na norma interna do Grupo ZF BU TNB - CV (NS 974 1001).

A taxa de desgaste foi determinada dividindo o volume desgastado pela energia gerada por atrito. A energia foi calculada por meio da Eq. (4.1), conforme demonstraram Gregori, Haertel Jr. e Zanotto, (2005) e Fernandes (2007).

Figura 4.2.9: Medição da espessura do material de fricção com auxílio do micrometro digital: (a) no centro da amostra (3,595 mm) e (b) em uma das bordas (3,602 mm).

$$E = Torque * \Delta W * \Delta_{Tempo} \quad (4.1)$$

Onde:

$$Torque = F_{normal} * \mu * raio \quad (4.2)$$

Δ_{Tempo} = Variação do tempo

W = Velocidade angular constante

4.2.5 Tratamento Isotérmico do Disco

Para estimar os níveis de temperaturas de trabalho das embreagens ensaiadas em campo, foi utilizada como parâmetro de referência a cor da camada de óxidos que se forma na superfície de ligas ferro-carbono quando submetidas a um tratamento isotérmico. As camadas dos óxidos apresentam diferentes cores em função da temperatura e do tempo de aquecimento a qual a liga é submetida.

A espessura da camada aumenta com o aumento da temperatura. Parte da luz irradiada sobre o material passa pela camada superior refletindo a camada abaixo da camada de óxidos e a outra parcela da luz reflete a camada superficial. Este fenômeno é chamado interferência da camada fina, que produz colorações na superfície (GORDON, 1979).

Na figura 4.2.10 é exemplificado a variação da coloração na superfície de amostras de uma liga de aço que foram submetidas ao tratamento isotérmico em diferentes faixas de temperaturas.

Utilizando este material como referência, amostras de disco de ferro fundido cinzento foram submetidas ao tratamento isotérmico. O tempo de permanência no forno foi de 3 horas, após a temperatura se estabilizar, e o resfriamento ocorreu ao ar livre. Foram adotadas sete diferentes faixa de temperaturas. A mínima foi de 100°C e a máxima de 400°C, com acréscimos de 50°C. Para cada faixa de temperatura foram utilizados sempre dois discos que ainda não tinham sido utilizados.

Figura 4.2.10: Variação da coloração superficial de amostras de aço que foram submetidas a diferentes faixas de temperatura de tratamento isotérmico (WIKIPÉDIA-c).

4.2.6 Variação da Coloração do Cobre

A figura 4.2.11 exemplifica a variação da coloração do cobre quando submetido a diferentes faixas de temperatura. Neste exemplo a temperatura variou de 538 °C a 1371 °C (HIGGINS, 1971), e a sua coloração variou de vermelho escuro a amarelo claro. Essas colorações foram utilizadas como referência para estimar a temperatura na interface de contato durante os ensaios laboratórios tribométricos. Como será visto na seção 5.3.3, as colorações das superfícies dos fios de cobre foram comparadas as colorações apresentadas na figura 4.2.11.

Figura 4.2.11: Variação da coloração superficial de amostras de cobre que foram submetidas as diferentes faixas de temperatura de tratamento isotérmico (HINGGS, 1971).

4.3 Caracterizações

Amostras representativas do material de fricção e do contracorpo foram caracterizadas antes e após os ensaios pela superfície de atrito e em seção transversal. Estas caracterizações tiveram por finalidade avaliar a microestrutura, a composição química e os mecanismos de desgaste em ação. Além disto, investigar o mecanismo de desenvolvimento do tribofilme, tal como a morfologia, espessura e composição química deste elemento. Para isto, algumas técnicas de caracterização foram adotadas, como serão descritas na sequência.

4.3.1 Ensaios Mecânicos - Dureza

Os ensaios de dureza foram realizados na superfície ativa do disco na sua condição sem uso. O método utilizado foi o Brinell através de um Durômetro Universal da marca Wolpert, com indentador esférico de diâmetro 2,5 mm. A carga aplicada foi de 187,5 kg, e o tempo de aplicação da carga foi de trinta segundos. Três discos foram utilizados e em cada um foram realizados cinco indentações. Optou-se por este método em razão da existência dos veios de grafita na microestrutura do disco. Assim, a área de contato do indentador é maior.

4.3.2 Ensaios Mecânicos – Nano-dureza

Os ensaios de nano-dureza instrumentada foram realizados no Laboratório de Fenômeno de Superfícies (LFS) da Escola Politécnica da USP, no equipamento Triboindenter TI 950 do fabricante HYSITRON.

Os ensaios foram realizados primeiramente nas superfícies de amostras representativas dos materiais de fricção que foram ensaiados no campo nos três diferentes regimes de severidade.

Inicialmente foram definidos os seguintes parâmetros de ensaios: força normal, matriz de varredura e quantidade de áreas que seriam caracterizadas por amostra. Definiu-se a força normal de 5 mN e matriz de varredura de 10 x 10 indentações. O espaçamento entre as indentações foi de 10 μm , para aumentar o tamanho da área a ser caracterizada. Cada área investigada foi composta por 100 indentações gerando dessa forma uma área varrida de 900 x 900 μm . As áreas foram escolhidas de forma aleatória. Todos os ensaios foram realizados em temperatura ambiente.

A figura 4.3.1-a traz uma representação esquemática da matriz de indentação. Cada bolinha dentro do quadrado representa uma marca de indentação. Na figura 4.3.1-b é possível notar essas marcas na superfície do tribofilme desenvolvido na superfície do material de fricção, conforme apontam as setas.

Figura 4.3.1: (a) Representação esquemática da matriz de nano-indentação de 10 x 10 μm , com espaçamento de 10 μm entre as indentações; (b) marcas de nano-indentações no tribofilme formando a matriz.

Posteriormente amostras de material de fricção que foram ensaiadas no tribômetro na condição tradicional (Série A) utilizando os PVs de 3,08, 7,88 e 10,09 MPa ms⁻¹, foram também submetidas a ensaios de nano-indentação instrumentada. Nesta fase também foi adotada uma matriz de 10 x 10, com espaçamento de 10 µm entre as indentações. Cada área ensaiada foi também composta por um total de 100 indentações. Foram caracterizadas duas áreas para cada condição de ensaio.

4.3.3 Microestrutura

A microestrutura dos materiais foi determinada por análise plastográfica e metalográfica.

Para certificar se a microestrutura das placas de pressão fabricadas pelo fornecedor estava em conformidade com a especificação interna do Grupo ZF BU TNB - CV (NS974 1001), duas amostras de disco que foram confeccionadas a partir das placas de pressão, foram aleatoriamente selecionadas. As amostras foram cortadas utilizando um disco diamantado e refrigerado, e na sequência foram embutidas a quente em resina epóxi com fibra mineral utilizando o equipamento Tempopress 2 (Struers).

Para obter as amostras de material de fricção, foi utilizada uma cortadeira de precisão com disco diamantado que foi rotacionado a baixa velocidade para garantir a não geração de defeitos na microestrutura.

4.3.3.1 Superfície de Atrito

Na preparação metalográfica das amostras do disco utilizou-se as lixas abrasivas de #320, #400, #600, #800 e #1200. Em seguida as amostras foram polidas no pano de polimento duro e utilizando pasta diamantada de 1 µm diluída em álcool.

A amostra do material de fricção foi plastograficamente preparada utilizando lixas abrasivas de #600, #800 e #1200, e por fim polida com solução de alumina de 1 µm diluída em água, porém com pano de polimento macio.

4.3.3.2 Seção Transversal

Para caracterizar os discos em seção transversal, os mesmos foram cortados na cortadeira de precisão utilizando um disco diamantado. Após o corte, foi depositada nas superfícies das amostras obtidas uma fina camada de níquel, com o objetivo de proteger a superfície desgastada durante o processo de preparação metalográfica.

A figura 4.3.2 apresenta o aparato utilizado no processo de deposição do níquel sobre a superfície da amostra do disco.

Figura 4.3.2: Método de deposição de níquel na superfície do disco após o ensaio tribométrico para caracterização em seção transversal.

O procedimento de deposição da solução de níquel foi realizado em três etapas. Na primeira misturou-se 75 ml das soluções EDGEMET A e B resultando numa única solução de 150 ml, que foi colocada num béquer, protegendo sua superfície com papel alumínio. Perfurou-se o papel alumínio com um termômetro para controlar a temperatura da solução e garantir uma deposição homogênea. Manteve-se a chapa quente numa temperatura em torno de 100°C para que a solução ficasse na temperatura ideal de deposição, que foi entre 82°C e 87°C, conforme recomendação do fabricante.

Assim que a amostra foi inserida dentro da solução observou-se após 1 minuto houve formação de bolhas finas na superfície da amostra, pois essas bolhas são indícios de que a deposição do níquel está ocorrendo de forma correta. As amostras permaneceram nesse banho por no mínimo duas horas.

Após a deposição da camada de níquel, as amostras foram embutidas e em seguida foram novamente submetidas ao corte na cortadeira de precisão, porém com o disco em baixa rotação, para minimizar os danos a seção transversal que seria analisada. O corte realizado após o embutimento foi para garantir a não contaminação da região a ser analisada pela resina de embutimento.

Para realizar a caracterização do material de fricção em seção transversal, foi necessário desenvolver uma metodologia. Para chegar ao método que será descrito, diversos procedimentos foram realizados. O tempo para desenvolver o método atual foi de aproximadamente 18 meses. No Apêndice 3 são apresentados os resultados de algumas metodologias que foram trabalhadas, porém sem sucesso.

O atual método consistiu em aplicar uma camada homogênea de resina desenvolvida especificamente pelo Grupo ZF BU TNB - CV. Por razões de sigilo industrial, o seu nome e sua fórmula química não poderão ser divulgados. Esta camada de resina tem uma espessura aproximada de um mm. Após a aplicação da resina nas superfícies das amostras, estas foram expostas diretamente a luz UV por um tempo de aproximadamente 30 segundos, para que a resina aplicada fosse curada. Após a cura da resina, as amostras foram embutidas, cortadas na cortadeira de precisão e preparadas plastograficamente, conforme procedimento já descrito. A figura 4.3.3 apresenta as etapas deste método.

Figura 4.3.3: Método desenvolvido para proteger o tribofilme durante a preparação metalográfica e possibilitar a sua caracterização em seção transversal; (a) aplicação da resina protetora na amostra laboratorial; (b) processo de cura por luz UV; (c) superfície do material de fricção de campo protegida pela resina após a cura.

4.3.4 Microscopia Ótica

Foi utilizado o microscópio ótico modelo Axioplan do fabricante Zeiss com fonte de luz branca. As imagens foram obtidas com as objetivas de 10x e 20x e também através de uma câmera digital do fabricante Sony, modelo Cyber-shot, adaptada ao microscópio.

4.3.5 Microscopia Eletrônica de Varredura

Foi utilizado o MEV do fabricante Jeol e modelo 6610LV para caracterizar o tribofilme e os seus mecanismos de desenvolvimento. Este equipamento é equipado com um sensor que possibilita a realização de análise elementar ou caracterização química de forma qualitativa e semi-quantitativa de uma amostra, através da espectroscopia de raios X por dispersão em energia (EDS). O detector utilizado foi o SDD (*Silicon Drift Detector*) modelo *Ultradry* do fabricante *Thermo Scientific*.

A tabela 4.3.1 sintetiza as principais condições e parâmetros de ensaios que foram adotados na realização das caracterizações. As amostras do material de fricção caracterizadas no modo alto vácuo foram recobertas por uma fina camada de ouro pelo processo de *sputtering*, com auxílio do equipamento Denton Vacuum modelo Desk V.

Tabela 4.3.1: Parâmetros empregados nas caracterizações por MEV e EDS.

Parâmetro	Material de Fricção	Disco
Modo	- baixo e alto vácuo	- alto vácuo
Distância de trabalho	10 mm	
Voltagem	10 e 15 kV (baixo vácuo) 20 kV (alto vácuo)	20 kV
Abertura do Spot Size	de 50 a 70	
Ampliações	30; 100; 150; 250; 500; 1000; 1500; 2500; 5000; e 10000	
Detector de Elétrons	- SE (somente no alto vácuo) - BSE	- SE - BSE

A análise espectroscópica consiste na medida de raios X emitidos de uma região microscópica da amostra bombardeada por um feixe de elétrons. As energias de raios X são características específicas do número atômico do material, e podem ser utilizadas para identificar o elemento que está emitindo a radiação. As energias de raios X detectadas são convertidas em uma contagem eletrônica, que resulta em um espectro que representa a análise química da amostra.

Espectros de raios X podem ser obtidos para todos os elementos da tabela periódica, com exceção do hidrogênio. Entretanto, a emissão dos dez primeiros elementos de baixo número atômico consiste de bandas na região de baixa energia, onde as perdas por absorção na amostra são grandes. Além disto, a precisão do espectro EDS de raios X em um microscópio eletrônico pode ser influenciada por diferentes fatores. Um deles está relacionado as janelas que se encontram na frente do detector, as quais podem absorver energias mais baixas de raios X, causando uma redução na capacidade de detecção de elementos químicos de baixo número atômico (DEDAVID, GOMES e MACHADO, 2007).

Por esta razão, elementos como carbono e nitrogênio são frequentemente determinados por outras técnicas analíticas, e por essa razão a análise desses dois elementos não será considerada nessa tese.

4.3.6 Topografia de Superfície

As caracterizações da topografia da superfície foram também realizadas no Laboratório de Fenômeno de Superfícies (LFS) da Escola Politécnica da USP, no equipamento perfilômetro óptico 3D CCI-MP, fabricação Taylor-Hobson.

As caracterizações topográficas foram realizadas tanto nos discos quanto no do material de fricção. As superfícies foram analisadas na condição sem uso e após os ensaios em campo e tribométricos nas diversas séries, porém somente para os PVs de 3,08, 7,88 e 10,09 MPa ms⁻¹.

Para cada série e em cada nível de energia, foram caracterizadas a superfície de dois discos. Para o material de fricção caracterizou-se a superfície somente de uma amostra, tanto na condição sem uso quanto após os ensaios.

O perfilômetro óptico CCI-MP produz uma matriz de 1024 x 1024 elementos (correspondentes a pixels da imagem da superfície), cada um deles registrando um valor da altura “Z” do ponto, em relação a um plano horizontal de referência. A malha de 1024 x 1024 pontos está associada a um sistema de eixos X e Y, e é aplicada ao campo de visão da lente utilizada, constituindo uma representação em três dimensões da superfície analisada: $Z = f(X,Y)$. Dessa forma, a lente de 20X, que foi adotada em todas as caracterizações topográficas neste trabalho, tem o seu campo de visão dividido em pixels de 845 nm x 845 nm. A área total varrida em cada amostra foi de aproximadamente de 5 mm x 5 mm.

Na etapa posterior à obtenção da matriz básica, um software específico – Talymap fez o tratamento dessa matriz, extraíndo dela parâmetros 3D para a caracterização da superfície e diversas outras informações relevantes tais como imagens e orientações de texturas.

O tratamento da matriz acima foi feito por meio de um recurso de software, cuja aplicação é definida em um template, capaz de mecanizar sua atuação sucessiva. O uso de templates é um recurso extremamente útil quando se tem uma série de corpos de prova dos quais se deseja extrair o mesmo conjunto de informações. Neste trabalho as operações utilizadas foram: nivelamento, rotação e retoque. A caracterização das superfícies teve por objetivo obter os valores numéricos do parâmetro de caracterização de superfícies S_a (rugosidade média). Definiu-se o parâmetro S_a por esse ser o mais utilizado para avaliar o acabamento superficial da placa de pressão, e verificar se o acabamento está em conformidade com a norma interna do processo de manufatura.

Capítulo 5

RESULTADOS

Neste capítulo, na primeira parte, serão apresentados os resultados das caracterizações das amostras do material de fricção e do contracorpo na sua condição sem uso. É realizada uma curta descrição da microestrutura e da composição química desses materiais, além das propriedades mecânicas do contracorpo.

Na sequência, serão descritos os resultados dos diferentes regimes de severidade nos quais os conjuntos embreagens foram ensaiados no campo e, as respectivas faixas de temperatura de serviço que foram estabelecidas para as diferentes condições de aplicação veicular.

Posteriormente, são apresentados os resultados mais relevantes obtidos por meio das caracterizações das amostras do material de fricção após terem sido utilizadas nas aplicações práticas.

Dando continuidade, os resultados obtidos com as diferentes séries de ensaios tribométricos são descritos. Num primeiro momento, os resultados obtidos em cada série de ensaio tribométrico são apresentados e discutidos de maneira individual. Fechando o capítulo, os resultados de todas as séries são comparados e uma discussão é realizada.

A figura 5.1 esquematiza a estrutura elaborada para a apresentação dos resultados serão apresentados. Ao final de cada tópico, um organograma será apresentado indicando a evolução da exposição dos resultados.

Figura 5.1: Diagrama da sequência da apresentação dos resultados.

5.1 Caracterização dos Materiais na Condição Sem Uso

5.1.1 Material de Fricção

Na figura 5.1.1 é apresentada a microestrutura do material de fricção que foi obtida por MEV no modo *BSE*. A microestrutura foi dividida em três elementos estruturais: **matriz polimérica (MP)**, **roving (termo em inglês para torção) das fibras de vidro (RFV)** e **fio de cobre (FC)**.

A figura 5.1.1-a1 apresenta de modo macro a superfície de atrito, na qual os três elementos estruturais foram identificados. As figuras 5.1.1-b1, 5.1.1-c1 e 5.1.1-d1 exibem as morfologias desses elementos, que foram obtidas em maior ampliação a partir das áreas **MP**, **RFV** e **FC**.

Na matriz polimérica, os diferentes ingredientes foram revelados pelo MEV modo *BSE*. Na estrutura do roving, as fibras de vidro foram observadas paralelas umas com as outras, e na superfície do fio de cobre notou-se marcas de desgaste (riscos) que foram geradas pela ação dos grãos abrasivos do rebolo durante a etapa de retificação do processo de manufatura.

A figura 5.1.1-a2, por sua vez, apresenta também de maneira macro, a microestrutura do material de fricção em seção transversal. As áreas circulares brancas são os fios de cobre, e as regiões cinza nos entornos representam os rovings das fibras de vidro.

A figura 5.1.1-b2 traz a área **MP** da figura 5.1.1-a2 em maior ampliação. Esta é composta pela resina mais a borracha, além das cargas abrasivas, de enchimento e o lubrificante sólido. A mistura foi heterogênea, pois a resina não foi totalmente incorporada à borracha, e regiões com concentração de material (áreas escuras indicadas por setas amarelas) foram formadas. Esta figura evidência também a carga abrasiva barita (pontos brancos indicados pelas setas azuis) e o bióxido de manganês (carga cinza referenciada por setas vermelhas).

Já as figuras 5.1.1-c2 e 5.1.1-d2 apresentam, similarmente e em maiores ampliações, a morfologia dos elementos estruturais roving das fibras de vidro e fio de cobre. A área cinza na parte superior da imagem é a resina que foi adicionada na superfície do material de fricção para protegê-la durante o processo de preparação plastográfica e assim possibilitar a sua caracterização em seção transversal.

Figura 5.1.1: Material de fricção – elementos estruturais observados por MEV modo BSE pela (1) superfície de atrito e (2) em seção transversal; (a) macro; (b) matriz polimérica [MP], (c) roving das fibras de vidro [RFV] e (d) fio de cobre [FC].

A figura 5.1.2 traz os espectros qualitativos EDS de raios X característicos da matriz polimérica, do roving das fibras de vidro e do fio de cobre. Na matriz, foram identificados em maior intensidade os elementos oxigênio e enxofre, depois o cobre e o zinco, e em menores intensidades o alumínio, silício, cálcio, bário e manganês. No roving, os elementos de destaque foram oxigênio, silício, cálcio e alumínio, composição característica da fibra de vidro, e em menores intensidades os elementos cobre, zinco, magnésio e enxofre. Já no fio de cobre, obteve-se em alta intensidade o elemento cobre. Os elementos oxigênio, alumínio, silício, cálcio e enxofre foram também obtidos, porém em intensidades bem menores (detalhe).

Figura 5.1.2: Espectro qualitativo EDS de raios X característico dos elementos estruturais do material de fricção: (a) matriz polimérica; (b) roving das fibras de vidro; e (c) fio de cobre.

5.1.2 Placa de Pressão e Disco Utilizado no Ensaio Tribométrico (Contracorpo metálico)

A figura 5.1.3 apresenta a microestrutura típica do contracorpo de ferro fundido cinzento na sua condição sem uso.

Figura 5.1.3: Contracorpo – microestrutura característica: (a) matriz perlítica obtida por M.O; (b) morfologia e distribuição dos veios de grafita obtida por MEV modo *BSE*; superfície observada no modo *SE*: (c) macro e (d) em maior ampliação; (e) espectro EDS de raios X característico da superfície de atrito.

Na figura 5.1.3-a é apresentada a microestrutura, obtida por M.O, formada por uma matriz perlítica com pequena quantidade de ferrita (menos de 5%), mais os veios de grafita característicos. A morfologia e a distribuição dos veios da grafita foram obtidos por MEV modo *BSE*, e são apresentados na figura 5.1.3-b.

Na figura 5.1.3-c é apresentada a superfície de atrito que foi caracterizada por MEV modo *SE*. As irregularidades na superfície foram geradas pela ação da ferramenta de usinagem que faz o acabamento superficial. As áreas escuras são os veios de grafita presentes na superfície (em detalhes na figura 5.1.3-d).

Na figura 5.1.3-e está apresentado o espectro EDS de raios X característico da superfície do contracorpo, que foi obtido por meio da análise qualitativa. Foi identificado em maior intensidade o elemento químico ferro, e em intensidades menores os elementos químicos oxigênio, manganês e silício (vide detalhe na figura).

A tabela 5.1.1 apresenta os resultados obtidos a partir da caracterização de três amostras representativas, e que foram comparados com a especificação interna - NS 9971001 – do Grupo ZF BU TNB - CV para o fornecimento de contracorpo (placas de pressão). Os resultados estão em conformidade com as especificações. Com isso, concluiu-se que as amostras estavam aptas para serem utilizadas.

Tabela 5.1.1: Contracorpo - propriedades da microestrutura – Especificado vs Determinado.

ESPECIFICAÇÃO NS 9971001	OBTIDO
Estrutura	
Perlítica min. 90%, sem carbonetos significativos.	Perlítica 95%
Grafita	
Forma: veios ou lamelas	Veios
Tipo: A – C em geral; D – E partes finas	A - C
Tamanho: 3 a 5; referência IA	4 – 5
Dureza	
190 a 230 HB	200 ± 5 HB
Característica Topográfica	
Ra	3 µm

É importante deixar registrado que os discos de ferro fundido cinzento utilizados nos ensaios laboratoriais tribométricos foram confeccionados a partir de placas de pressão, garantindo assim as mesmas propriedades mecânicas.

Na figura 5.1.4 são apresentados o perfil topográfico característico dos discos que foram utilizados nos ensaios das séries A, B e C (3 μm) e, dos discos que foram pré-condicionadas nas rugosidades de 0,2 μm (série D1) e 1,2 μm (série D2).

Figura 5.1.4: Topografia de superfície do disco de ferro fundido na sua condição sem uso com rugosidade média igual a (a) 3, (b) 1,2 e (c) 0,2 μm .

A figura 5.1.5 mostra a evolução da apresentação dos resultados. Até aqui foram concluídos a descrição dos resultados dos materiais na sua condição sem uso.

Figura 5.1.5: Diagrama da evolução da apresentação dos resultados.

Na próxima seção (5.2), serão descritos os critérios adotados para classificar os regimes de severidade em campo (tópico 5.2.1), e na sequência, são apresentados os resultados das caracterizações dos materiais de fricção que foram ensaiados em campo nos diferentes regimes de severidade (tópico 5.2.2).

5.2 Ensaio de Campo

5.2.1 Classificação dos Regimes de Severidade

Os critérios praticados para categorizar os regimes de severidade nos quais os conjuntos de embreagens foram submetidos em campo, foram com base nas características físicas apresentadas pelo conjunto platô e placa de pressão, e pelo conjunto disco da embreagem nos quais são rebitados os materiais de fricção.

Para estimar as faixas de temperatura de serviço, as diferentes cores existentes nas superfícies das placas de pressão foram comparadas às cores dos discos de ferro fundido que foram tratados isotermicamente.

A figura 5.2.1-a apresenta a superfície da placa de pressão do conjunto A, na qual não se observou características de superaquecimento, quando investigada a olho nu. Comparando-a com a coloração do disco tratado isotermicamente na temperatura de 150°C, além da semelhança na cor acinzentada, houve similaridades no amarelo fraco que aparecem mais intensificados na borda externa e no centro da superfície da placa de pressão. Estas evidências demonstram que o contato não foi uniforme ao longo da superfície de atrito. O contato na borda interna da placa de pressão foi menos intenso em relação ao centro e a borda externa.

Desta maneira concluiu-se que a temperatura de trabalho do conjunto A (ver tabela 4.1.2 e figura 4.1.1) não foi superior a 150 °C.

Figura 5.2.1: Correlação entre as superfícies (a) da placa de pressão do conjunto A e (b) do disco de ferro fundido tratado isotermicamente na temperatura de 150°C.

A figura 5.2.2-a apresenta a superfície de trabalho da placa de pressão do conjunto B, e as figuras 5.2.2-b à 5.2.2-d apresentam as superfícies dos discos que foram tratados isotermicamente nas temperaturas de 150°, 200° e 250°C.

Figura 5.2.2: Correlação entre as superfícies (a) da placa de pressão do conjunto B e dos discos tratados isotermicamente nas temperaturas de (b) 200°C, (c) 250°C e (d) 300°C.

Na superfície da placa foi observada uma mistura de coloração bege e azul nas regiões da borda externa e do centro e, na borda interna um amarelo mais fraco. Estas características sinalizaram predominância de contato por deslizamento na borda externa e no centro, devido o maior nível térmico nestas regiões. A cor azul foi menos intensa em relação a disco tratado a 300°C. Porém, a cor bege se assemelhou a do disco em 250°C, além do que as cores na borda interna foi similar a do disco tratado isotermicamente na temperatura de 200°C. Deste modo concluiu-se que a faixa de temperatura de serviço do conjunto B foi entre 200°C e 250°C.

Na figura 5.2.3-a é apresentada a superfície de atrito da placa de pressão do conjunto C, e nas figuras de 5.2.3-b à 5.2.3-d são apresentadas as superfícies dos discos tratados isotermicamente nas temperaturas de 300°, 350° e 400°C.

Figura 5.2.3: Correlação entre as superfícies (a) da placa de pressão do conjunto C e dos discos tratados isotermicamente nas temperaturas de (b) 300°C, (c) 350°C e (d) 400°C.

Foram observadas na superfície da placa características de escoamento plástico de material e trincas térmicas, o que indicou um regime de trabalho de elevado nível térmico. A figura 5.2.3 revelou na região próxima do ponto A, uma mistura das cores amarela e azul, e que as cores de determinadas localidades se assemelharam à do disco tratado isotermicamente em 300°C.

Já em outras regiões a cor foi similar a do disco tratado em 400°. Desta forma concluiu-se que a faixa de temperatura de trabalho do Conjunto C foi em torno de 280 a 400°C.

A figura 5.2.4 apresenta as superfícies de atrito dos materiais de fricção que atritaram com as superfícies das placas de pressão apresentadas anteriormente. Em maiores temperatura de serviço, mais perceptíveis foram as marcas de desgaste na superfície de atrito do material de fricção.

Figura 5.2.4: Superfície de atrito do material de fricção dos conjuntos (a) A, (b) B e (c) C após o ensaio em campo em três diferentes condições de trabalho.

A tabela 5.2.1 sintetiza a classificação dos regimes de severidade de acordo com a aplicação, as faixas de temperatura estimadas em serviços, e a expectativa de vida útil das embreagens quando utilizadas em tais condições. A tabela 5.2.2, por sua vez, descreve para os deferentes regimes de severidade, as principais características das condições operacionais da embreagem em campo.

Tanto a tabela 5.2.1 quanto a 5.2.2 revelam que quanto maior é o regime de severidade, menor é a vida útil da embreagem. Dessa forma busca-se com esse trabalho aumentar a vida útil projetada do sistema em altas severidades de trabalho.

Tabela 5.2.1: Classificação dos regimes de severidade em campo dos conjuntos das embreagens caracterizados.

Nível de Severidade	BAIXO	MÉDIO	ALTO
Aplicação em Campo	Operação Rodoviária	Operação urbana em grandes centros	Operação fora de estrada (pavimento misto)
Faixa de Temperatura (°C)	Até 150	200 - 250	280 - 400
Durabilidade Projetada (km x10 ³)	300 a 500	150 a 250	50 a 120

Tabela 5.2.2: Características das condições operacionais da embreagem nos diferentes regimes de trabalho em campo (GRUPO ZF BU TNB - CV, 2015).

SEVERIDADE	CONDIÇÕES OPERACIONAIS
BAIXA	<ol style="list-style-type: none"> 1. Operação rodoviária 2. Frequência de acionamento > 10 / km 3. Nenhuma partida em 2º marcha 4. Solicitação térmica < 120 °C 5. Capacidade total de carga até 20 toneladas 6. Transporte de longa e média distância 7. Aplicação: ônibus rodoviário, intermunicipal, interestadual e fretamento; caminhão de entrega (baú e carga leve) 8. Vida útil projetada: de 300 a 500 mil km.
MÉDIA	<ol style="list-style-type: none"> 1. Operação urbana em grandes centros 2. Frequência de acionamento > 15 / km 3. Até 20% das partidas em 2º marcha 4. Solicitação térmica entre 120 e 180 °C 5. Capacidade total de carga até 20 toneladas 6. Transporte de curta e média distância 7. Aplicação: ônibus urbano, intermunicipal seletivo e micro-ônibus; caminhão de coleta de lixo 8. Vida útil projetada: de 150 a 250 mil km
ALTA	<ol style="list-style-type: none"> 1. Operação urbana em grandes centros, fora de estrada em pavimento misto e topografia acidentada 2. Frequência de acionamento > 15 / km 3. Mínimo de 50% das partidas em 2º marcha 4. Solicitação térmica > 180 °C 5. Capacidade total de carga até 45 toneladas 6. Transporte de curta distância 7. Aplicação: ônibus urbano; caminhão utilizado no transporte de cana de açúcar, mineração, madeireiro e basculante. 8. Vida útil projetada: de 50 a 120 mil km

5.2.2 Caracterização do Material de Fricção pela Superfície de Atrito e em Seção Transversal

Para cada regime de severidade de campo (baixo, moderado e severo), o material de fricção foi primeiramente caracterizado de forma macro. Posteriormente foram realizadas caracterizações mais detalhadas nos três elementos estruturais: matriz polimérica, roving das fibras de vidro e fio de cobre.

Os resultados serão apresentados seguindo este raciocínio, e no final de cada tópico referente ao nível da severidade, são sintetizadas as principais conclusões extraídas dos resultados retratados.

As caracterizações foram realizadas por MEV nos modos *SE* e *BSE* tanto pela superfície de atrito quanto em seção transversal. Ademais, análises qualitativas por EDS foram realizadas de forma pontual e por meio do mapa químico da distribuição dos elementos.

Com o objetivo de tornar este trabalho o mais conciso possível, os termos **platô primário** e **secundário** serão, em determinadas circunstâncias, abreviados por **PP** e **PS**, e o termo **tribofilme** por **TB**.

Os termos platô secundário de contato e tribofilme referem-se ao mesmo elemento, porém conforme a necessidade de explicação e discussão dos resultados e mecanismos, nas figuras ou no texto os dois termos poderão estar presentes.

Os resultados das caracterizações realizadas na superfície da placa de pressão para os três regimes de severidade estão disponibilizados no Apêndice 4, e os resultados das caracterizações topográficas dos materiais de fricção, após os ensaios em campo, são disponibilizados no Apêndice 6.

5.2.2.1 Regime de Baixa Severidade

A figura 5.2.5-a exibe a superfície de atrito do conjunto A que foi obtida de forma macro por MEV modo *SE*, revelando os rovings das fibras de vidro expostos à superfície de contato. Com o MEV modo *BSE*, além dos rovings, foi também visualizado os fios de cobre expostos à superfície, como mostra a figura 5.2.5-b.

Figura 5.2.5: Material de fricção do conjunto embreagem A - superfície de atrito após ensaio em campo no regime de baixa severidade observada de forma macro por MEV modo (a) *SE* e (b) *BSE* - [RFV: roving das fibras de vidro; FC: fio de cobre].

A figura 5.2.6-a traz a matriz polimérica em maior ampliação. Além das marcas de desgaste, foram identificadas regiões claras e escuras. As regiões escuras são os aglomerados de resina polimérica que se formaram em consequência da não homogeneidade da mistura das matérias-primas na etapa de processamento.

Como mostra a figura 5.2.6-b, as regiões mais desgastadas foram as que se encontram nos entornos das áreas escuras. Entretanto, não foi observado o desenvolvimento do tribofilme na região da matriz polimérica, apesar de terem sido evidenciadas partículas de desgaste soltas sobre as regiões mais desgastadas (ver figura 5.2.6-c – MEV modo *BSE*). Alguns debris de desgaste foram gerados por causa da quebra das fibras de vidro, como apontam as setas vermelhas.

A caracterização em seção transversal reforçou a evidência do não desenvolvimento do tribofilme. Como expõe a figura 5.2.6-d, em determinadas localidades ocorreu somente o acúmulo de debris de desgaste nas cavidades que se formaram na estrutura da matriz polimérica em função do desgaste.

Figura 5.2.6: Material de fricção – matriz polimérica após o ensaio em campo no regime de baixa severidade observada pela superfície de atrito por MEV modo (a) *SE* e (b) *BSE*; (c) detalhe dos fragmentos de fibra vidro; (d) em seção transversal no modo *BSE* evidenciando o acúmulo de debris de desgaste na cavidade que se formou.

A figura 5.2.7-a apresenta a estrutura do roving que foi obtida em ampliação maior por MEV modo *SE*, reforçando as evidências da exposição das fibras de vidro à superfície e as suas pontas desgastadas (figura 5.2.7-b).

O MEV modo *BSE* denunciou o acúmulo de debris de desgaste entre as fibras de vidro e o início do desenvolvimento do tribofilme nos seus topos que foram desgastados. As figuras 5.2.7-c e 5.2.7-d (área azul ampliada ressaltando o tribofilme na ponta gasta da fibra) comprovam estas evidências.

Análises qualitativas por EDS feitas nos pontos A (debris soltos) e B (tribofilme) revelaram que os elementos químicos encontrados nos debris foram semelhantes aos do tribofilme, porém com picos menos intensos. O oxigênio foi o de maior intensidade. O ferro transferiu da placa de pressão e juntamente com o cobre e o enxofre foram mais intensos nos debris. O magnésio, o alumínio, o silício e o cálcio estão relacionados à fibra de vidro. Os espectros estão nas figuras 5.2.7-e e 5.2.7-f.

Figura 5.2.7: Material de fricção – roving das fibras de vidro após ensaio em campo no regime de baixa severidade e observado pela superfície de atrito por MEV modo (a - b) SE e (c - d) BSE; espectro EDS de raios X obtido no ponto (e) A e (f) B - [TB: tribofilme].

A caracterização do roving das fibras de vidro em seção transversal revelou uma fibra de vidro que desempenhou a função de platô primário, favorecendo o desenvolvimento do platô secundário a sua esquerda, como exhibe a figura 5.2.8-a. A estrutura deste platô foi formada por três camadas de diferentes morfologias e espessuras, como traz em detalhe a figura 5.2.8-b. As espessuras médias das camadas 1 e 2 foram de 0,5 μm , enquanto que a da 3 foi de 1,5 μm .

Figura 5.2.8: Material de fricção – roving das fibras de vidro após ensaio em campo no regime de baixa severidade observado em seção transversal por MEV modo *BSE*: desenvolvimento do platô (a) primário (PP) e secundário (PS); (b) várias camadas do PS de diferentes espessuras e composição química.

O fio de cobre foi visualizado deformado quando caracterizado no MEV modo *SE* (figura 5.2.9-a). No entanto, como ilustra a figura 5.2.9-b, a deformação foi mais intensa na sua ponta, indicando que o contato prevaleceu nesta parte do fio.

Figura 5.2.9: Material de fricção – fio de cobre após ensaio em campo no regime de baixa severidade observado pela superfície de atrito por MEV modo (a - b) SE e (c - f) BSE; (g) espectro EDS de raios X obtido no ponto A - [TB: tribofilme].

Já o MEV modo *BSE* (figura 5.2.9-c) expôs o tribofilme desenvolvido na superfície do fio de cobre, sendo as áreas cinza sobre a região mais clara. O contraste em maior aumento evidenciou melhor a sua formação (ver figura 5.2.9-d). A área mais clara é a superfície do fio que se manteve exposta e descoberta.

Em determinada região da superfície do fio de cobre, o tribofilme estava em fase de formação, pois ao mesmo tempo em que aparece em parte desenvolvido, foram notados debris de desgaste aglomerados no seu entorno. A figura 5.2.9-e ilustra esta constatação. Já noutra região da superfície do fio de cobre, fragmentos de fibras de vidro aparecem como parte do tribofilme (setas na figura 5.2.9-f).

Na composição do tribofilme (ponto A) foram identificados em menor intensidade, vários elementos químicos do material de fricção, como o alumínio, o cálcio, o bário e o manganês. Em intensidades maiores identificou-se o silício e o enxofre. Além destes, foi também detectado em baixa intensidade, o elemento químico ferro, que se transferiu da superfície da placa de pressão para a superfície do fio de cobre. A figura 5.2.9-g apresenta o espectro EDS de raios X.

O sentido da deformação plástica do fio de cobre, que foi identificado em seção transversal, apontou a direção de deslizamento. Neste caso, foi da esquerda para a direita. A deformação do fio ocorreu em função das tensões superficiais de contato, além do que o contato neste regime de severidade foi mais acentuado nas pontas dos fios de cobre e das fibras de vidro. Como efeito da deformação, o fio de cobre encobriu o roving das fibras de vidro, como mostra a figura 5.2.10-a.

Figura 5.2.10: Material de fricção – fio de cobre após ensaio em campo no regime de baixa severidade observado em seção transversal por MEV modo *BSE*: (a) fio deformado e platô secundário (PS) desenvolvido na sua superfície; (b) detalhe do PS; (c) mapa composicional dos elementos químicos obtido por EDS.

Sobre a superfície deformada do fio de cobre um tribofilme desenvolvido foi identificado, composto na sua maior parte por fragmentos de fibras de vidro (detalhes na figura 5.2.10-b), em razão do desgaste das pontas das fibras, gerando debris e que foram arrastados até a superfície do fio. A espessura média deste tribofilme foi de 5,8 μm . A figura 5.2.10-c apresenta o mapa composicional dos elementos químicos, que foi obtido por EDS de maneira qualitativa. Destacaram-se os elementos das fibras de vidro (alumínio, cálcio e silício), além do enxofre.

A tabela 5.2.3 sintetiza as principais conclusões extraídas com a caracterização do material de fricção do conjunto embreagem A.

Tabela 5.2.3: Síntese das caracterizações realizadas nos elementos estruturais do material de fricção após ensaio em campo em baixa severidade: [MP: matriz polimérica; RFV: roving das fibras de vidro; FC: fio de cobre].

Macro	- fibras de vidro e fios de cobre expostos à superfície de contato, revelando que o desenvolvimento do tribofilme foi parcial
MP	- debris de desgaste aglomerados e soltos na superfície de contato - debris de desgaste formados por fragmentos de fibras de vidro - sem o desenvolvimento do tribofilme
RFV	- expostos à superfície de contato - pontas das fibras de vidro desgastadas - debris de desgaste acumulados e soltos entre as fibras - início do desenvolvimento do tribofilme nas pontas gastas das fibras de vidro - fibras de vidro agiram como platôs primários favorecendo o desenvolvimento dos platôs secundários (tribofilme)
FC	- plasticamente deformado e como efeito espalhou-se sobre o roving das fibras de vidro, além de indicar a direção de deslizamento; - tribofilme parcialmente desenvolvido sobre sua superfície, sendo composto por fragmentos de fibras de vidro e elementos químicos do material de fricção mais o ferro da placa de pressão.

5.2.2.2 Regime de Média Severidade

Na superfície do material de fricção do conjunto B, o MEV modo *SE* - figura 5.2.11-a - não revelou os rovings das fibras de vidro expostos à superfície. O modo *BSE* evidenciou o tribofilme, que é as áreas mais claras que se destacam na figura 5.2.11-b. A caracterização por MEV exibiu, para esse regime de severidade, um tribofilme bem mais desenvolvido.

Figura 5.2.11: Material de fricção do conjunto embreagem B - superfície de atrito após ensaio em campo no regime de média severidade observada de forma macro por MEV modo (a) *SE* e (b) *BSE* - [TB: tribofilme].

O aspecto topográfico da matriz polimérica que foi obtido por MEV modo *SE* é mostrado na figura 5.2.12-a, que exibiu uma superfície mais lisa. Em maior aumento, figura 5.2.12-b, as regiões formadas por resina ficaram mais evidentes. No entanto, nestas havia estrias (indicadas pela seta azul), caracterizando a fadiga de contato. Este mecanismo de desgaste se assemelha ao observado por *Talib, Muchtar e Azhari* (2003), também na superfície de uma matriz polimérica de freios. As regiões mais claras no entorno das resinas são os tribofilmes que foram gerados.

O MEV modo *BSE* revelou que a estrutura do tribofilme era composta, na sua maior parte, por fragmentos de fibras de vidro e do fio de cobre, devido às regiões mais claras nas figuras 5.2.12-c e 5.2.12-d. Novamente, por causa da heterogeneidade da microestrutura do material de fricção, o desgaste foi mais acentuado nos entornos dos aglomerados de resina, o que favoreceu o acúmulo de debris de desgaste e o desenvolvimento do tribofilme.

Figura 5.2.12: Material de fricção – matriz polimérica após ensaio em campo no regime de média severidade observada pela superfície de atrito por MEV modo (a - b) SE e (c - d) BSE - [TB: tribofilme].

A caracterização em seção transversal revelou que a resina polimérica atuou como um platô primário de contato (indicado pela seta azul na figura 5.2.13-a), favorecendo o desenvolvimento do platô secundário, que está indicado pelas setas amarela. A espessura deste platô foi de $2,2 \pm 1 \mu\text{m}$. A figura 5.2.13-b apresenta a área azul em maior ampliação, revelando o platô secundário em detalhe.

O mecanismo identificado nesta matriz polimérica se assemelha ao que foi proposto por *Osterle et al* (2001), onde uma partícula dura existente dentro da matriz atua como platô primário para a formação do platô secundário. No caso apresentado nas figuras 5.2.12 e 5.2.13, quem exerceu o papel da partícula dura foi o aglomerado de resina polimérica.

Alta intensidade para os elementos químicos oxigênio foi identificada no ponto A. Em intensidades menores identificaram-se os elementos cobre, silício e enxofre. Os elementos químicos ferro e alumínio tiveram intensidades próximas, porém

inferiores as dos elementos já descritos. Com baixa intensidade foram detectados o cálcio e o bário. Esta análise revelou um tribofilme de composição química heterogênea e com predominância dos elementos químicos do material de fricção. O espectro EDS de raios X está na figura 5.2.13-c.

Figura 5.2.13: Material de fricção – matriz polimérica após ensaio em campo no regime de média severidade observada em seção transversal por MEV modo *BSE*: (a) macro e (b) detalhes dos platôs primário (PP) e secundário (PS) mais morfologia e espessura do PS; (c) espectro EDS de raios X obtido no ponto A.

O MEV modo *SE* mostrou a partir da superfície de atrito, que o roving das fibras de vidro visto teve praticamente toda a sua estrutura encoberta pelo tribofilme, como exibe a figura 5.2.14-a. A ampliação da área azul trazida na figura 5.2.14-b, revelou que partes das fibras de vidro não foram cobertas, ou seja, ficaram expostas à superfície. O MEV modo *BSE* (figura 5.2.14-c) revelou outra estrutura do roving que foi, similarmente, totalmente encoberta pelo tribofilme. A sua topografia alisada está evidenciada na figura 5.2.14-d (ampliação da área vermelha).

Figura 5.2.14: Material de fricção – roving das fibras de vidro após ensaio em campo no regime de média severidade observado pela superfície de atrito por MEV modo (a - b) *SE* e (c - d) *BSE*; (e) espectro EDS de raios X obtido no ponto A - [TB: tribofilme].

No ponto A foram detectados, em alta intensidade, os elementos químicos oxigênio e cobre, e em intensidade menor, porém equivalentes, os elementos silício e enxofre. O alumínio e o ferro tiveram intensidades similares, no entanto menores que a do silício e do enxofre. Os elementos cálcio e bário foram os de baixa intensidade. O espectro EDS de raios X está apresentado na figura 5.2.14-e.

A figura 5.2.15-a traz o roving das fibras de vidro caracterizado em seção transversal por MEV modo *BSE*, reforçando as evidências obtidas pela superfície de atrito. Isto é, um tribofilme desenvolvido sobre toda a sua estrutura formando um platô de contato. Observou-se também que o fio de cobre que se espalhou entre as fibras de vidro, suportou o tribofilme (ver figura 5.2.15-b em detalhe). Já na figura 5.2.15-c foi revelada a sua morfologia e espessura, que na média foi de $1 \pm 0,2 \mu\text{m}$.

Figura 5.2.15: Material de fricção – roving da fibra de vidro após ensaio em campo no regime de média severidade observado em seção transversal por MEV modo *BSE*: (a) macro e (b) tribofilme (TB) e (c-d) detalhes da sua morfologia e espessura.

A figura 5.2.16-a apresenta a topografia da superfície do fio de cobre obtida por MEV modo *SE*, revelando que o tribofilme também se desenvolveu sobre este elemento estrutural. No MEV modo *BSE*, o tribofilme é as regiões de cor cinza que aparecem na figura 5.2.16-b.

Figura 5.2.16: Material de fricção – fio de cobre após ensaio em campo no regime de média severidade observado pela superfície de atrito por MEV modo (a) *SE* e (b) *BSE*; (c) espectro EDS de raios X obtido no ponto A.

O espectro EDS de raios X do ponto A (figura 5.2.16-c) revelou mais uma vez em alta intensidade os elementos químicos oxigênio e cobre, e com intensidade similar, porém menor, o silício e o enxofre. Também com intensidades equivalentes o ferro e o alumínio, e em baixa intensidade o cálcio e o bário.

A caracterização do fio de cobre em seção transversal evidenciou mais uma vez um fio plasticamente deformado, indicando a direção de deslizamento, que nesta situação, foi da direita para a esquerda, como exibem as figuras 5.2.17-a de forma macro e 5.2.17-b em detalhe.

Figura 5.2.17: Material de fricção – fio de cobre após ensaio em campo no regime de média severidade observado em seção transversal por MEV modo *BSE*: (a) macro, (b) deformação do fio e (c - d) detalhes dos platôs secundários de contato desenvolvidos.

Para esta condição de ensaio no campo (regime moderado) o fio de cobre foi mais deformado em relação ao visualizado no regime de baixa severidade, e de novo como consequência da deformação plástica do fio, o roving das fibras de vidro foi recoberto. A figura 5.2.17-b ilustra este fenômeno.

Sobre a superfície do fio plasticamente deformado, foram identificados dois platôs secundários de contato, e que estão apresentados em maiores aumentos nas figuras 5.2.17-c e 5.2.17-d. As características topográficas destes platôs evidenciaram que o contato entre as superfícies ocorreu predominantemente por meio deles. A espessura média do fio de cobre deformado foi de 16,5 μm , enquanto que a dos platôs secundários foi de 2,5 μm .

A tabela 5.2.4 sumariza as principais conclusões obtidas com as caracterizações do material de fricção do conjunto embreagem B, que foi utilizado em campo no regime de média severidade.

Tabela 5.2.4: Síntese das caracterizações realizadas nos elementos estruturais do material de fricção após o uso em campo no regime de média severidade: [MP: matriz polimérica; RFV: roving das fibras de vidro; FC: fio de cobre].

Macro	<ul style="list-style-type: none"> - fibras de vidro não expostas à superfície de contato - tribofilme desenvolvido, sobretudo nas estruturas dos rovings
MP	<ul style="list-style-type: none"> - aglomerado de resina polimérica agindo como platô primário e favorecendo o desenvolvimento do platô secundário (tribofilme) - fragmentos de fibras de vidro comportando-se como platôs primários
RFV	<ul style="list-style-type: none"> - estrutura totalmente encoberta pelo tribofilme por causa da facilidade de alojamento dos debris entre as fibras de vidro - fibras de vidro atuam como platôs primários para o desenvolvimento dos platôs secundários
FC	<ul style="list-style-type: none"> - plasticamente mais deformado em relação ao do regime de baixa severidade - espalhou-se sobre o roving das fibras de vidro além de apontar a direção de deslizamento - platôs secundários de contato desenvolvidos sobre a superfície do fio de cobre plasticamente deformado

5.2.2.3 Regime de Alta Severidade

A análise macro no MEV modo *SE*, como mostra a figura 5.2.18-a, não revelou os roving das fibras de vidro expostos à superfície de contato do material de fricção do conjunto C. O modo *BSE* - figura 5.2.18-b - mais uma vez, mostrou a predominância do tribofilme sobre a estrutura dos rovings.

Figura 5.2.18: Material de fricção do conjunto embreagem C - superfície de atrito após ensaio em campo no regime de alta severidade observada de forma macro por MEV modo (a) *SE* e (b) *BSE* - [TB: tribofilme].

Na superfície da matriz polimérica foram identificadas marcas de desgaste que se assemelharam ao modo de desgaste por abrasão (riscos paralelos). Essas marcas são exibidas na figura 5.2.19-a. *Talib, Muchtar e Azhari (2003)* também notaram na matriz polimérica de freios, marcas de desgaste abrasivo similar a esta.

No MEV modo *BSE*, figura 5.2.19-b, foram revelados o tribofilme e os debris de desgaste que se agruparam nas cavidades geradas na matriz polimérica como decorrência da heterogeneidade da microestrutura. Uma parte dos debris foi compactada e a outra permaneceu livre na cavidade. A sua morfologia é apresentada na figura 5.2.19-c, e a caracterização da superfície do tribofilme em maior aumento, revelaram trincas na estrutura, como exhibe a figura 5.2.19-d.

As intensidades dos elementos químicos detectados por EDS nos pontos A (tribofilme) e B (debris soltos) foram equivalentes. As figuras 5.2.19-e e 5.2.19-f mostram maiores intensidades para o oxigênio e o cobre, e um pouco menor para o ferro, o silício e o enxofre e, baixa intensidade para o alumínio, o cálcio e o bário.

Figura 5.2.19: Material de fricção – matriz polimérica após ensaio em campo no regime de alta severidade observada pela superfície de atrito por MEV modo (a) SE e (b - d) BSE; espectro EDS de raios X obtido no ponto (e) A e (f) B.

Em seção transversal, o MEV modo *BSE* revelou sobre a matriz polimérica um tribofilme de estrutura bem heterogênea, tanto na composição química quanto nas camadas que o compõe (ver figura 5.2.20-a). As espessuras dessas camadas variaram de 11 a 57 μm . A morfologia do tribofilme é mostrada na figura 5.2.20-b.

Figura 5.2.20: Material de fricção – matriz polimérica após ensaio em campo no regime de alta severidade observada em seção transversal por MEV modo *BSE*: (a) macro e (b) estrutura do tribofilme.

A estrutura do roving das fibras de vidro vista no MEV modo *SE* foi encontrada totalmente coberta pelo tribofilme, como mostra a figura 5.2.21-a. No entanto, trincas na superfície do platô secundário foram identificadas quando a estrutura do roving foi caracterizada em maior ampliação, como traz a figura 5.2.21-b.

Em outros rovings, como traz a figura 5.2.21-c, foi identificado o tribofilme também desenvolvido. Mas, em razão da severidade da aplicação, parte do tribofilme se rompeu, pois como exhibe a figura 5.2.21-d, uma parte da estrutura do roving das fibras de vidro ainda estava coberta pelo tribofilme, e noutra parte, as fibras de vidro estavam expostas a superfície e com as pontas desgastadas.

Em seção transversal e no MEV modo *BSE*, foi identificado um tribofilme heterogêneo na sua composição química, estrutura das camadas e espessura. A figura 5.2.22-a mostra que num mesmo roving formou-se um tribofilme de diferentes morfologias. A espessura do tribofilme visualizado na figura 5.2.22-b variou de 6 a 12 μm e, foi formado por 3 diferentes camadas, como mostra em detalhe a figura 5.2.22-c. A camada 1 é a mais fina e está mais próxima a superfície de atrito. Já a espessura média do tribofilme apresentado na figura 5.2.22-d foi em torno de 12 μm .

Figura 5.2.21: Material de fricção – roving das fibras de vidro após ensaio em campo no regime de alta severidade observado pela superfície de atrito por MEV modo (a - b) BSE e (c - d) SE.

Figura 5.2.22: Material de fricção – roving das fibras de vidro após ensaio em campo no regime de alta severidade observado em seção transversal por MEV modo BSE: (a) macro, (b) espessura e (c) detalhes das camadas do tribofilme da área azul; (d) detalhes da morfologia e espessura do tribofilme da área laranja; (e) mapa composicional dos elementos químicos obtido por EDS.

- c -

- d -

- e -

A distribuição dos elementos através do mapa composicional que foi obtido por EDS e que está apresentado na figura 5.2.22-e, revelou na camada 1 uma maior intensidade dos elementos químicos cobre, enxofre e ferro.

O fio de cobre foi também observado plasticamente deformado por MEV modo *SE* (ver figura 5.2.23-a), e com traz a figura 5.2.23-b, sobre a sua superfície foi desenvolvido um tribofilme de várias camadas. Em outro fio de cobre, que foi caracterizado no modo *BSE*, o tribofilme foi também visto bem desenvolvido sobre este elemento estrutural, como mostram as figuras 5.2.23-c, e 5.2.23-d em detalhe.

Figura 5.2.23: Material de fricção – fio de cobre após ensaio em campo no regime de alta severidade observado pela superfície de atrito por MEV modo (a - b) *SE* e (c - d) *BSE*.

A figura 5.2.24-a traz o fio de cobre em seção transversal após caracterização no MEV modo *BSE*. Novamente foi visualizado um tribofilme heterogêneo. De acordo com a figura 5.2.24-b, a sua espessura variou de 7 a 35 µm. Em maior ampliação - figura 5.2.24-c, foram identificadas três camadas. Notou-se, em maiores aumentos, que os debris de desgaste estavam mais compactados na camada 1, a mais superior – figura 5.2.24-d. Na camada 2 (intermediária), mais áreas escuras foram identificadas (figura 5.2.24-e), o que indicou uma maior quantidade de vazios.

Figura 5.2.24: Material de fricção – fio de cobre após ensaio em campo no regime de alta severidade observado em seção transversal por MEV modo *BSE*: (a) macro e (b) tribofilme e (c) espessura e morfologia da camada (d) 1, (e) 2 e (f) 3.

Os debris ficaram mais densos na camada que se encontra mais próxima a superfície de atrito, devido às tensões de contato e a temperatura serem maiores nessa região. Desta forma, a sinterização das partículas de desgaste foi maior e mais intensa, o que originou uma camada mais compactada.

As análises qualitativas por EDS revelaram que a intensidade do elemento químico ferro aumentou da camada 3 para 1, e a dos elementos oxigênio, cobre, enxofre e silício aumentaram no sentido inverso, isto é, da 1 para a 3. A figura 5.2.25 apresenta os espectros EDS de raios X obtidos para as respectivas camadas.

Figura 5.2.25: Material de fricção – espectros EDS de raios X obtidos nos pontos (a) 1, (b) 2 e (c) 3 dispostos na figura 5.2.24.

A maior intensidade do elemento químico ferro na camada 1 está relacionada ao fato do contato ser mais intenso desta camada com a superfície do contracorpo de ferro fundido. Como esta camada está mais densa e aparentemente mais

sintetizada em relação as camadas 2 e 3, a sua dureza pode também ser superior. No entanto esta propriedade precisa ser investigada. Desta forma, esta camada pode ter desgastado mais a superfície do contracorpo, o que provavelmente gerou maior quantidade de partículas metálicas.

Uma hipótese para a redução da intensidade dos elementos químicos pertencentes ao material de fricção da camada 1 para a 3 é que durante os primeiros ciclos de contato entre as superfícies, há uma maior geração de partículas de desgaste do material de fricção. Essas partículas se movimentam entre as superfícies e alojam-se nas cavidades existentes principalmente na superfície do material de fricção. À medida que o tribofilme se desenvolve, este protege a superfície contra o desgaste, e a quantidade de partículas geradas tende a diminuir. A maior intensidade do elemento químico cobre na camada 3 em relação a 1, se dá pelo fato do tribofilme ter se desenvolvido sobre a superfície do fio de cobre.

A tabela 5.2.5 sintetiza as principais conclusões obtidas com os resultados apresentados com a caracterização do material de fricção utilizado em campo no regime de alta severidade.

Tabela 5.2.5: Síntese das caracterizações realizadas nos elementos estruturais do material de fricção após o uso em campo no regime de alta severidade: [MP: matriz polimérica; RFV: roving das fibras de vidro; FC: fio de cobre].

Macro	<ul style="list-style-type: none"> - fibras de vidro não expostas à superfície de contato - tribofilme desenvolvido, sobretudo nas estruturas dos rovings
MP	<ul style="list-style-type: none"> - tribofilme mais desenvolvido em relação ao regime de média severidade - matriz polimérica agindo como platôs primários - trincas na estrutura do tribofilme - composição química do tribofilme similar à dos debris de desgaste
RFV	<ul style="list-style-type: none"> - estrutura totalmente encoberta pelo tribofilme que apresentou formação e propagação de trincas - tribofilmes rompidos em determinados rovings expondo as fibras de vidro à superfície de contato - tribofilme formado por três diferentes camadas, sendo a de menor espessura e mais compacta a que está mais próxima à superfície de contato
FC	<ul style="list-style-type: none"> - plasticamente deformado e espalhado sobre o roving das fibras de vidro - tribofilme que se desenvolveu formado por três camadas; de composições químicas diferentes, sendo a mais compacta a que está mais próxima à superfície de contato

A tabela 5.2.6, por sua vez, apresenta, para as três condições de ensaio em campo, uma síntese das principais características dos elementos estruturais e do tribofilme, que foram identificados e caracterizados por meio das análises no MEV.

Tabela 5.2.6: Síntese das caracterizações realizadas nos elementos estruturais dos materiais de fricção ensaiados em campo nos diferentes regimes - [E.E: Elemento estrutural; MP: matriz polimérica; RFV: roving das fibras de vidro; FC: fio de cobre; TB: tribofilme].

	SEVERIDADE DO ENSAIO EM CAMPO		
E. E	BAIXA	MÉDIA	ALTA
MP	- debrís soltos na superfície - TB não desenvolvido	- TB parcialmente desenvolvido	- TB bem desenvolvido - trincas na estrutura do TB
RFV	- fibras de vidro expostas à superfície - debrís soltos entre as fibras de vidro - TB parcialmente desenvolvido	- fibras de vidro não expostas à superfície - rovings encobertos pelo TB bem desenvolvido - ausência de trincas na estrutura do TB	- rovings encobertos pelo TB - trincas na estrutura do TB - rovings com o TB rompido - TB formado por 3 camadas de espessuras distintas
FC	- plasticamente deformado e encobrindo o RFV - TB parcialmente desenvolvido	- plasticamente mais deformado e encobrindo o RFV - Platôs de contato formado sobre o TB	- plasticamente deformado e recobrindo o RFV - TB formado por 3 camadas de diferentes compactações

5.2.3 Análise da Intensidade dos Picos dos Elementos Químicos, Espessura, Dureza e Módulo de Elasticidade do Tribofilme Desenvolvido no Material de Fricção

As intensidades, dos picos dos elementos químicos apresentadas nos tópicos anteriores por meio dos espectros EDS de raios X, foram sintetizadas e serão correlacionadas neste tópico.

A figura 5.2.26 apresenta as intensidades dos picos dos elementos químicos que foram identificados no tribofilme que se desenvolveu sobre a matriz polimérica dos materiais de fricção que foram ensaiados em campo nos regimes de média e alta severidade. Essas intensidades foram obtidas a partir dos espectros apresentados nas figuras 5.2.13-c e 5.2.19-e, respectivamente.

Figura 5.2.26: Comparação entre as intensidades das energias de raios X dos elementos químicos identificados no tribofilme desenvolvido sobre a matriz polimérica dos materiais de fricção ensaiados em campo nos regimes de média e alta severidade.

Como na matriz polimérica do material de fricção que foi ensaiado no regime de baixa severidade foram identificados somente debris de desgaste livres, como mostrou a figura 5.2.6, dessa forma não foi gerado o espectro com a intensidade dos picos dos elementos químicos para essa condição de ensaio.

A intensidade dos picos dos elementos químicos oxigênio, ferro, cobre, silício e enxofre foram maiores para o tribofilme desenvolvido no regime de alta severidade. Isto foi consequência da condição do ensaio, pois nesta condição, o contato entre as superfícies foi mais intenso e a temperatura de trabalho foi entre 280° e 400°C. Como efeito, uma maior quantidade de debris de desgaste foi gerada. Este resultado está alinhado com a constatação feita por *Filip, Weiss e Rafaja* (2002), que também observaram uma maior geração de debris de desgaste durante os ensaios dinâmométricos realizados com materiais de fricção aplicados em freios em temperaturas mais elevadas.

A alta intensidade do pico do elemento químico cobre no regime severo pode está relacionada a maior taxa de deformação do fio de cobre neste regime quando comparado ao de média severidade. No entanto, como as análises por EDS foram realizadas num único ponto dos tribofilmes, a análise realizada no tribofilme desenvolvido no regime de alta severidade pode ter sido feita num ponto com maior concentração de cobre em relação ao do regime de média severidade.

A intensidade dos picos dos elementos químicos identificados nos tribofilmes desenvolvidos na estrutura dos rovings das fibras de vidro foi obtida a partir dos espectros EDS de raios X que foram apresentados nas figuras 5.2.7-f e 5.2.14-e.

Como mostra a figura 5.2.27, a intensidade dos picos dos elementos químicos oxigênio e silício diminuíram, e o do cobre e do enxofre aumentou, e a do ferro praticamente não alterou quando o ensaio em campo mudou de baixa para média severidade. No roving que foi ensaiado no regime de alta severidade, obteve-se o mapa composicional dos elementos químicos.

Figura 5.2.27: Comparação entre as intensidades das energias de raios X dos elementos químicos identificados no tribofilme desenvolvido no roving das fibras de vidro dos materiais de fricção ensaiados em campo nos regimes de baixa e média severidade.

A maior intensidade do pico do elemento enxofre pode estar relacionada a maior quantidade de debris que foram gerados a partir da matriz polimérica. A redução da intensidade dos picos do silício e do oxigênio no regime moderado pode ser associada ao tribofilme mais desenvolvido nesta condição, deixando as fibras de vidro menos exposta a superfície de contato. E a maior intensidade do pico do cobre é consequência da maior taxa de deformação do fio, que foi maior no regime de média severidade em relação ao de baixa severidade.

Para os tribofilmes desenvolvidos sobre os fios de cobre, a intensidade dos picos dos elementos químicos foi obtida dos espectros EDS de raios X que foram apresentados nas figuras 5.2.9-g, 5.2.16-c, 5.2.25-a.

A figura 5.2.28 revela que as intensidades dos picos dos elementos químicos oxigênio e silício diminuíram com o aumento da severidade, e a do ferro foram equivalentes nos regimes de baixa e média, porém dez vezes maior no de alta severidade. Já as intensidades dos picos do elemento químico cobre foram similares nos regimes de média e alta severidade e superiores em relação ao de baixa severidade.

Figura 5.2.28: Comparação entre as intensidades das energias de raios X dos elementos químicos identificados no tribofilme desenvolvido no fio de cobre dos materiais de fricção ensaiados em campo nos regimes de baixa, média e alta severidade.

A maior intensidade dos picos para os elementos químicos oxigênio e silício no regime de baixa severidade está associada a maior exposição das fibras de vidro à superfície de contato. Já a do elemento químico ferro no regime de alta, está relacionada a maior intensidade do contato entre as superfícies atritantes. O menor pico de intensidade do cobre é relacionado a taxa de deformação do fio, que foi menor no regime de baixa severidade.

A figura 5.2.29 correlaciona as espessuras médias dos tribofilmes desenvolvidos sobre os elementos estruturais (matriz polimérica, roving das fibras de vidro e fio de cobre) do material de fricção, em função das condições de ensaio em campo. Como não foi identificado o tribofilme na matriz polimérica para a condição de baixa severidade, o valor da sua espessura foi considerado igual à zero.

Figura 5.2.29: Comparação entre as espessuras médias do tribofilme desenvolvido sobre os elementos estruturais do material de fricção em função das diferentes condições de ensaio em campo (baixa, média e alta severidade).

De maneira geral, a figura 5.2.29 revela que a espessura dos tribofilmes desenvolvidos sobre o roving das fibras de vidro foi menor em relação aos que se formaram sobre a matriz polimérica e o fio de cobre. Este comportamento pode estar relacionado ao fato da resistência mecânica da fibra de vidro ser superior a da matriz polimérica e a do fio de cobre. Por essa razão, a fibra de vidro tem menor deformação em relação ao fio de cobre, e é mais resistente ao desgaste em relação a matriz polimérica. Estes fatores contribuíram significativamente para o desenvolvimento do tribofilme nesses elementos estruturais. Fato que é reforçado pelas maiores dispersões das espessuras medidas nos tribofilmes que se desenvolveram sobre esses dois elementos estruturais.

A figura 5.2.29 revelou também que as espessuras médias dos tribofilme tenderam a aumentar com o aumento da severidade da aplicação. No entanto, não houve diferenças, estatísticas, entre as condições de baixa e média severidade.

A figura 5.2.30 apresenta as marcas das indentações e as curvas de carregamento, ambas obtidas com os ensaios de nano-indentação na microestrutura do tribofilme que se desenvolveu na superfície do material de fricção, em função do regime de severidade de ensaio em campo.

Figura 5.2.30: Material de fricção – marcas de nano-indentação e curvas de carregamento da força normal vs profundidade indentadas na microestrutura do tribofilme, para os diferentes regimes de severidade em campo: (a) baixa, (b) moderado e (c) alta severidade.

As curvas de carregamento e descarregamento da força aplicada em função da profundidade indentada, revelou que os ensaios realizados nas amostras do regime de baixa severidade e moderado, tiveram uma maior dispersão. As imagens obtidas das regiões indentadas revelaram para essas duas condições perfis topográficos mais irregulares, exercendo influência nos resultados.

A figura 5.2.31 apresenta os valores do módulo de elasticidade e da dureza que foram determinados para as três condições de ensaio em campo. A dureza do tribofilme, estatisticamente, aumentou do regime de baixa severidade para o moderado. No entanto, para os regimes moderado e severo, as durezas dos tribofilmes foram, estatisticamente, equivalentes.

Figura 5.2.31: Módulo de elasticidade e dureza do tribofilme desenvolvido no material de fricção que foi ensaiado em campo nos diferentes regimes de severidade.

O módulo de elasticidade do tribofilme também aumentou quando a aplicação veicular mudou do regime de baixa severidade para o moderado. Entretanto, da condição de média severidade para a de alta, o módulo de elasticidade, estatisticamente, diminuiu. Já o módulo obtido na condição de maior severidade foi estatisticamente menor em relação ao módulo obtido no regime de baixa severidade.

A variação no módulo de elasticidade, principalmente do regime moderado para o de alta severidade, pode estar associado a dois fatores. O primeiro refere-se as regiões indentadas, que neste caso são desconhecidas, pois não foi possível identificá-las durante a realização dos ensaios. O segundo está relacionado a variação na composição química ou microestrutura do tribofilme, fator que é reforçado pela variação da intensidade dos picos dos elementos químicos de um regime para outro, conforme foi apresentado e discutido anteriormente.

5.2.4 Conclusões Parciais

Em concordância com os resultados analisados e descritos, sintetizam-se as seguintes conclusões:

- O método utilizado para estimar a faixa de temperatura de trabalho das embreagens em campo submetidas nos diferentes regimes de severidade, por meio da correlação da coloração da superfície das placas de pressão ensaiadas em campo com a dos discos que foram tratados isotermicamente, mostrou-se ser bastante eficiente;
- O contato por deslizamento entre as superfícies do par tribológico ocorre de forma dominante por meio dos rovings das fibras de vidro e do fio de cobre, e como efeito o tribofilme se desenvolve mais intensamente sobre esses elementos;
- O mecanismo de desenvolvimento do tribofilme é dependente da distribuição e da disposição dos elementos estruturais do material de fricção, que desempenham o papel de platôs primários de contato, favorecendo a geração dos platôs secundários (tribofilme);
- A natureza do tribofilme (microestrutura, morfologia, espessura, composição química) e propriedades mecânicas dependem do nível da severidade da aplicação em campo;
- No tribofilme desenvolvido na superfície do material de fricção houve a predominância dos elementos químicos cobre, enxofre, silício e ferro. Esse último foi transferido da placa de pressão, e quanto maior foi o nível da severidade da aplicação em campo, mais intenso foi detectado no tribofilme.
- O desenvolvimento do tribofilme torna-se mais intenso à medida que o nível da severidade se eleva, porém até determinado nível, pois em condições de extrema severidade, onde elevadas temperaturas são alcançadas, a estrutura do tribofilme tende a se deteriorar e romper.

A figura 5.2.32 mostra a evolução da apresentação e discussão dos resultados até o momento. Foram apresentadas as características e as propriedades dos materiais na sua condição sem uso, e os mecanismos de desenvolvimento do tribofilme operantes no material de fricção ensaiado no campo em diferentes condições.

Figura 5.2.32: Diagrama da evolução da apresentação dos resultados.

A seção 5.3 iniciará apresentando os resultados para a temperatura e o coeficiente de atrito que foram obtidos com os ensaios tribométricos tradicionais (Série A), cuja finalidade foi reproduzir os mecanismos de desenvolvimento do tribofilme que foram identificados em campo e, estudar a influência das variáveis do tribossistema (força normal e velocidade de deslizamento) no desempenho funcional do par tribológico da embreagem.

5.3 Ensaios Laboratoriais - Série A: Tradicionais

5.3.1 Temperatura e Coeficiente de Atrito

Todas as curvas da temperatura estão dispostas no Apêndice 5A. A tabela 5.3.1 traz os resultados da temperatura média de cada ensaio, e que foi determinada à partir do regime permanente. Esta tabela traz também a média e o desvio padrão dos cinco calculados para os cinco resultados que foram obtidos para cada condição de PV.

Tabela 5.3.1: Temperatura média (°C) dos ensaios tribométricos tradicionais (Série A).

	Série A1 (2,05 ms ⁻¹)				Série A2 (3,27 ms ⁻¹)					
PV	3,08	4,92	6,31	6,92	4,92	7,88	8,62	9,35	10,09	11,08
R0	155	196	235	248	179	252	266	270	309	320
R1	153	186	224	231	187	242	272	256	316	329
R2	140	183	230	245	183	254	260	274	321	343
R3	143	196	247	228	175	251	257	265	319	302
R4	135	193	211	239	185	249	267	259	324	303
Média	145	191	229	238	182	250	264	265	318	320
Desvio	8	6	13	9	5	5	6	7	6	17

A tabela 5.3.1 revela que a temperatura média aumentou à medida que o PV subiu. Para os mesmos PVs (4,92 MPa ms⁻¹) níveis de temperatura, estatisticamente equivalentes, foram alcançados. A diferença entre as médias foi em torno de 10°C.

A evolução do **coeficiente de atrito (COF)** em função do tempo de ensaio para a série A1 (2,05 ms⁻¹) é apresentada na figura 5.3.1. Como as curvas do **COF** apresentaram repetibilidade para uma mesma condição de ensaio, cada curva na figura 5.3.1-a corresponde a média das cinco curvas obtidas. Todas as curvas do **COF** estão disponíveis no Apêndice 5A.

Nessas curvas foram observadas as regiões correspondentes ao período de *running in*, que é apresentado em detalhe na figura 5.3.1-b, e do regime permanente. Esses regimes são característicos de ensaios de desgaste por deslizamento. O *running in* da série A1 é análogo ao proposto por Blau (2005) e que foi apresentado na figura 2.2.1-b, isto é, ora está crescente e ora decrescente.

Figura 5.3.1: Evolução do (a) coeficiente de atrito em função do tempo do ensaio tribométrico tradicional (Série A1 - $2,05 \text{ ms}^{-1}$); (b) detalhe do *running in*.

Os **COF** após atingirem os níveis máximos logo no início dos ensaios, em torno de 0,4 para $3,08 \text{ MPa ms}^{-1}$ e 0,43 para as outras condições, decresceram até atingir um valor mínimo, entre 0,33 e 0,36. Para a condição de $6,31 \text{ MPa ms}^{-1}$, após tocar o nível mínimo, o **COF** tendeu para o regime permanente e decresceu lentamente até

o final do ensaio. Nas outras condições, após chegar ao mínimo, o **COF** voltou a crescer até entrar em regime de estabilização. Na sequência ficou crescente no PV de $3,08 \text{ MPa ms}^{-1}$, e decresceu vagarosamente nos PVs de $4,92$ e $6,92 \text{ MPa ms}^{-1}$.

O tempo para o **COF** alcançar o regime permanente variou com a condição do ensaio. No PV de $3,08 \text{ MPa ms}^{-1}$, este estabilizou após 1,2 horas, enquanto que nos PVs de $4,92$ e $6,92 \text{ MPa ms}^{-1}$, o **COF** ficou constante após 40 minutos e 1 hora, respectivamente. Para o PV de $6,31 \text{ MPa ms}^{-1}$ o *running in* durou somente 25 minutos, e o comportamento do **COF** neste período foi semelhante ao apresentado na figura 2.2.1-a.

A figura 5.3.2 apresenta as curvas do **COF** obtidas com a série A2 ($3,27 \text{ ms}^{-1}$) de ensaio. Nesta série foram também observados os regimes de *running in* e permanente. Em todas as condições de PV, o **COF** tendeu a estabilização antes da primeira meia hora de ensaio, com ressalva para o PV de $4,92 \text{ MPa ms}^{-1}$, onde o *running in* se estendeu até os 40 minutos. Este tempo foi similar ao observado para igual PV, no entanto da série A1.

Na figura 5.3.2-a, a curva média do **COF** obtida no PV de $11,08 \text{ MPa ms}^{-1}$ está descontinuada logo após o ensaio completar 1 hora. Este comportamento está relacionado a interrupção proposital dos ensaios durante as repetições. Como será visto mais adiante, estritamente nesta condição, o desgaste do material de fricção foi muito acentuado. Para impedir o contato do pino metálico onde se fixa a amostra com a superfície do disco, foi necessário interromper os ensaios, a fim de evitar possíveis danos aos componentes mecânicos do tribômetro e a descaracterização dos resultados.

O *running in* em detalhe, como exhibe a figura 5.3.2-b, revela que nos PVs de $4,92$ e $7,88 \text{ MPa ms}^{-1}$, o crescimento do **COF** foi muito rápido logo no início, e após tocar o pico máximo, o **COF** decresceu até um nível mínimo, e tornou a crescer na sequência até ficar permanente com a evolução do ensaio. O comportamento apresentado nas duas condições é bastante similar ao que foi apresentado na figura 2.2.1-b

Nos outros PVs, o **COF** após passar pelo máximo e mínimo, ficou constante e tendeu a um crescimento lento até o final do ensaio. Nessas condições o comportamento do **COF** é equivalente ao visualizado na figura 2.2.1-a.

Figura 5.3.2: Evolução do (a) coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio tribométrico tradicional (Série A2 - $3,27 \text{ ms}^{-1}$); (b) detalhe do *running in*.

No Apêndice 5A encontra-se disponibilizada uma tabela com os valores determinados para os **COF** máximo e mínimo, a diferença entre os valores máximo e mínimo, entre o valor do **COF** mínimo e do médio, além dos respectivos tempos para alcançarem tais níveis.

A tabela 5.3.2 mostra o **COF** médio, que foi determinado a partir do regime permanente, de cada ensaio tribométrico realizado de maneira tradicional (Série A). Além deste, a tabela mostra também a média e o desvio padrão calculados para os cinco resultados obtidos em cada PV.

Tabela 5.3.2: Coeficiente de atrito médio calculado a partir do regime permanente dos ensaios tribométricos tradicionais (Série A).

	Série A1 (2,05 ms ⁻¹)				Série A2 (3,27 ms ⁻¹)					
PV	3,08	4,92	6,31	6,92	4,92	7,88	8,62	9,35	10,09	11,08
R0	0,42	0,39	0,36	0,33	0,38	0,35	0,32	0,31	0,28	0,26
R1	0,41	0,39	0,35	0,32	0,40	0,31	0,32	0,30	0,30	0,27
R2	0,40	0,41	0,36	0,33	0,39	0,35	0,30	0,33	0,30	0,29
R3	0,41	0,39	0,37	0,31	0,37	0,35	0,28	0,32	0,29	0,25
R4	0,39	0,40	0,33	0,33	0,40	0,34	0,32	0,31	0,30	0,29
Média	0,41	0,40	0,36	0,33	0,39	0,34	0,31	0,31	0,29	0,27
Desvio	0,013	0,010	0,013	0,008	0,013	0,017	0,018	0,009	0,010	0,018

A figura 5.3.3 exibe a temperatura média e o **COF** médio plotados em função de PV. Esta figura evidencia níveis de atrito equivalentes para os PVs de 4,92 MPa ms⁻¹. Além disso, mostra que o **COF** médio diminuiu com o aumento de PV.

Figura 5.3.3: Temperatura e coeficiente de atrito médio dos ensaios tribométricos tradicionais (Série A) em função de PV. OBS: a escala da temperatura cresce de cima para baixo.

Na figura 5.3.4 o **COF** médio está plotado somente em função da temperatura média do ensaio, revelando que o COF decresceu quando a temperatura do ensaio subiu. O desempenho do par tribológico da embreagem quando simulado em laboratório foi similar ao apresentado pelo par do sistema de freio, isto é, os níveis de **COF** diminuíram com o aumento da temperatura, conforme demonstraram *Eriksson e Jacobson (2000)*, *Straffelini e Maines (2013)*, *Kchaou et al (2013)* e *Sellami et al (2014)*.

Figura 5.3.4: Coeficiente de atrito médio em função da temperatura média dos ensaios tribométricos tradicionais (Série A).

5.3.2 Taxa de Desgaste

No sistema embreagem o que se avalia como uma das variáveis de saída, é a taxa de desgaste do conjunto, isto é, a taxa de desgaste do material de fricção somada com a da placa de pressão. Deste modo, a tabela 5.3.3 apresenta a taxa de desgaste do par tribológico (material de fricção somada com a do disco de ferro fundido), que foi definida somando os respectivos volumes desgastados dos materiais e dividindo-os pela energia de atrito. A energia de atrito foi determinada através da equação 4.1, conforme foi apresentado no capítulo 4.

No apêndice 5A é apresentado para todos os ensaios o volume desgastado do material de fricção e do disco, e também a energia de atrito.

Tabela 5.3.3: Taxa de desgaste do par tribológico em $\text{mm}^3 \text{MJ}^{-1}$ obtida para os testes tribométricos tradicionais (Série A).

	Série A1 ($2,05 \text{ ms}^{-1}$)				Série A2 ($3,27 \text{ ms}^{-1}$)					
	3,08	4,92	6,31	6,92	4,92	7,88	8,62	9,35	10,09	11,08
R0	24,48	22,53	23,01	22,86	15,65	20,73	31,41	30,89	66,68	62,28
R1	21,95	25,68	23,72	18,91	18,28	20,26	27,75	32,68	46,36	74,48
R2	23,24	27,90	25,20	24,90	15,42	19,37	26,38	32,06	49,92	59,73
R3	20,89	23,88	26,78	26,74	17,88	19,08	24,16	27,17	50,10	64,66
R4	20,97	22,98	25,60	23,10	18,51	20,23	32,15	31,41	66,89	54,23
Média	20,97	23,99	22,82	19,45	21,64	18,66	31,21	34,35	56,14	59,45
Desvio	1,54	2,21	1,51	2,91	1,48	0,68	3,38	2,16	4,62	5,61

A figura 5.3.5 apresenta a taxa de desgaste do par tribológico em função da força normal e da velocidade de deslizamento (Série A1 - $2,05 \text{ ms}^{-1}$) e (Série A2 - $3,27 \text{ ms}^{-1}$).

Figura 5.3.5: Taxa de desgaste do par tribológico (material de fricção e disco) dos ensaios tribométricos tradicionais em função da força normal e da velocidade de deslizamento - Séries A1 ($2,05 \text{ ms}^{-1}$) e A2 ($3,27 \text{ ms}^{-1}$).

Na série A1, as taxas de desgaste dos pares tribológicos permaneceram, estatisticamente, constantes, mesmo com o aumento da força normal de 200 até 450N. Na série A2, as taxas de desgaste obtidas com as forças normais de 200 e

320N foram também, estatisticamente, equivalentes. No entanto, quando a força normal passou de 320 para 350 até 450N, a taxa de desgaste cresceu à medida que a força normal foi aumentada. Estes resultados assinalaram uma transição no regime de desgaste, passando de moderado para severo, pois, conforme demonstrou *Welsh* (1964), taxas de desgaste no regime severo são expressivamente superiores em relação às que foram obtidas no regime moderado.

Além do que, a transição apresentada na série A2 se assemelha à transição observada por *Straffelini e Maines* (2013), quando variaram a força normal e mantiveram a velocidade de deslizamento constante.

A figura 5.3.6 apresenta a taxa de desgaste do par tribológico e a temperatura média em função de PV.

Figura 5.3.6: Taxa de desgaste do par tribológico em função da temperatura média e do PV para os ensaios tribométricos tradicionais (Série A).

Esta figura mostra que para os iguais PVs, as taxas de desgaste e as temperaturas médias foram, estatisticamente, equivalentes. Quando o PV variou de 3,08 até 7,88 MPa ms⁻¹, o crescimento da temperatura foi linear e a taxa de desgaste manteve-se constante - em torno de 20 mm³ MJ⁻¹. Porém, quando PV passou de 7,88 para 8,62 até 11,08 MPa ms⁻¹, a evolução da temperatura não foi mais linear, e a taxa de desgaste subiu para valores próximos de 60 mm³ MJ⁻¹.

A diferença de até três ordens de grandeza na taxa de desgaste, mais uma vez, evidenciou a transição do regime de desgaste moderado para o severo. Todavia, a variação da temperatura foi menos expressiva quando comparada a da taxa de desgaste, como mostra a figura 5.3.7.

Figura 5.3.7: Taxa de desgaste do par tribológico em função da temperatura média dos ensaios tribométricos tradicionais (Série A).

No regime moderado, entre os PVs de 3,08 até 7,88 MPa ms^{-1} , o aumento da temperatura foi de até 100°C , ou seja, um acréscimo de 72%. No entanto, a taxa de desgaste não variou. Já no regime severo, de 7,88 para 9,35 MPa ms^{-1} , enquanto que a temperatura subiu somente 5%, o aumento na taxa de desgaste foi de 50%. De 7,88 até 11,08 MPa ms^{-1} , a taxa de desgaste ascendeu em 195% contra apenas 28% da temperatura. Com esta análise, concluiu-se que o nível de energia do ensaio foi a variável de maior influência na transição entre os regimes de desgaste.

A evolução da taxa de desgaste do par tribológico apresentada na figura 5.3.7 tem semelhança com a evolução da taxa de desgaste de um material polimérico que foi investigado por Lancaster (1979), cujo resultado está apresentado na figura 2.4.3-b. Nesta figura foi mostrada uma transição na taxa de desgaste do polímero quando a temperatura do ensaio foi superior a 250°C .

O volume desgastado do material de fricção foi de 5 a 30 vezes superior ao do disco (dados disponíveis no Apêndice 5A), considerando a diferença entre a condição de menor e de maior PV. Esta discrepância está relacionada a diferença de dureza entre os materiais, sendo a do disco muito maior em relação a do material de fricção. Todavia, durante o processo de desenvolvimento de um novo material de fricção, investiga-se também a taxa de desgaste do contracorpo metálico, pois é um indicador utilizado para avaliar se o material de fricção tem ou não a tendência de ser um material agressivo. O termo agressivo é muito comum e bastante utilizado na indústria de desenvolvimento e manufatura de material de fricção.

Se o material de fricção apresentar características de agressividade, poderá desgastar o contracorpo de maneira acentuada, e como consequência, a funcionalidade da embreagem será afetada e a sua vida útil reduzida, conforme demonstraram *Fernandes et al* (2010).

Sendo assim, neste trabalho a taxa de desgaste do disco foi também avaliada e a figura 5.3.8-a a apresenta em função da temperatura média do ensaio.

Para a série A1, a taxa de desgaste do disco, estatisticamente, diminuiu de 3,6 para 2 mm³ MJ⁻¹ à medida que a temperatura média se elevou. Na série A2, a taxa de desgaste ficou entre 1 - 1,5 mm³ MJ⁻¹ quando as para temperaturas dos ensaios ficaram em torno de 180° e 260°C. Em temperaturas superiores a 300°C, a taxa de desgaste quase que dobrou. Desta maneira, concluiu-se que ocorreu também uma transição entre regimes de desgaste, de moderado para severo, quando os ensaios foram realizados na série A2. *Straffelini e Maines* (2013) também obtiveram, com o aumento da severidade do ensaio, uma transição na taxa de desgaste do contracorpo utilizado no sistema de freio.

Conforme foi apresentado na tabela 5.3.3 e na figura 5.3.7 a taxa de desgaste do par tribológico variou de 20 até 60 mm³ MJ⁻¹, e a figura 5.3.8-a revelou que a taxa de desgaste do contracorpo ficou entre 1 e 3,6 MJ⁻¹. Esses resultados demonstraram que a taxa de desgaste do material de fricção foi muito superior à taxa de desgaste do disco, e sendo responsável por aproximadamente 90% da taxa de desgaste do par tribológico. Dessa maneira, a taxa de desgaste somente do material de fricção foi avaliada em função da temperatura média do ensaio, como traz a figura 5.3.8-b. Essa figura revelou que o comportamento da taxa de desgaste do material de fricção foi idêntico ao do par tribológico apresentado na figura 5.3.7.

Figura 5.3.8: Taxa de desgaste (a) do disco e (b) somente do material de fricção, ambas em função da temperatura média dos ensaios tribométricos tradicionais – Séries (A1 - $2,05 \text{ ms}^{-1}$) e (A2 - $3,27 \text{ ms}^{-1}$).

Esta análise mostra que a vida útil do sistema embreagem é muito mais dependente do desempenho do material de fricção do que do contracampo metálico. Desta forma, para que o sistema embreagem apresente um desempenho funcional satisfatório em elevados níveis de severidade, é de fundamental importância aprimorar as propriedades mecânicas e térmicas do material de fricção, conforme demonstraram as figuras 5.3.7 e 5.3.8-b

5.3.3 Caracterização do Material de Fricção pela Superfície de Atrito e em Seção Transversal

Para caracterizar a superfície desgastada, amostras representativas tanto do material de fricção quanto do disco, foram selecionadas. Caracterizou-se as amostras que foram submetidas aos ensaios tribométricos utilizando os PVs de 3,08, 7,88 e 10,09 MPa ms⁻¹.

Definiu-se a condição de 10,09 MPa ms⁻¹ ao invés de 11,08 MPa ms⁻¹, pois conforme os resultados apresentados, os ensaios realizados no PV de 11,08 MPa ms⁻¹ não tiveram duração de 3 horas, por causa do desgaste excessivo do material de fricção. Por esta razão e para possibilitar posteriores correlações, decidiu-se por caracterizar amostras que foram ensaiadas em condições equivalentes. O critério estabelecido foi o ensaio por 3 horas ininterruptas. Ademais, os resultados obtidos adotando PV de 10,09 MPa ms⁻¹ foram muito semelhantes ao PV de 11,08 MPa ms⁻¹, tanto para o **COF** quanto para a taxa de desgaste.

As três condições previamente definidas representam as condições de menor severidade, intermediária (ponto de transição) e a de maior severidade. Desta forma, na continuidade serão apresentados os resultados das caracterizações realizadas, tanto pela superfície de atrito quanto em seção transversal, nas amostras do material de fricção.

Para os três níveis de energia o material de fricção foi primeiramente caracterizado de forma macro. Posteriormente foram realizadas, de maneira separada, caracterizações mais detalhadas nos três elementos estruturais: **matriz polimérica [MP]**, **roving das fibras de vidro [RFV]** e **fio de cobre [FC]**.

Os resultados serão apresentados seguindo esta lógica, e ao final de cada tópico relativo a cada nível de energia, são sintetizadas as principais conclusões extraídas dos resultados retratados.

Nesta seção os termos **platôs primário** e **secundário** aparecerão também abreviados por **PP** e **PS**, e o termo **tribofilme** por **TB**.

Os resultados da caracterização da topografia da superfície do material de fricção são apresentados no Apêndice 6.

5.3.3.1 PV 3,08 MPa ms⁻¹

Na figura 5.3.9 é apresentada a superfície do material de fricção após o ensaio em 3,08 MPa ms⁻¹, que foi observada de forma macro por M.O e MEV no modo *BSE*. Foram identificadas duas regiões distintas, uma clara e outra escura, tanto nas observações feitas por M.O quanto por MEV. As tonalidades claras correspondem as áreas desgastadas, e as escuras, as não desgastadas. Marcas de desgaste no sentido do deslizamento, possivelmente geradas pelas cristas das ondulações existentes na topografia inicial do disco, foram também observadas.

Figura 5.3.9: Material de Fricção - superfície de atrito após ensaio tribométrico tradicional (Série A) no PV de 3,08 MPa ms⁻¹ observada de forma macro por: (a) MO e (b) MEV modo *BSE*.

As figuras 5.3.10-a e 5.3.10-b exibem, em maior ampliação, a superfície da matriz polimérica também observada por M.O e MEV no modo *SE*, revelando o tribofilme desenvolvido. Como mostra a figura 5.3.10-c, o platô primário foi identificado no MEV modo *BSE*. Este se formou em função da heterogeneidade da microestrutura do material de fricção, o que ocasionou o desgaste irregular da matriz polimérica, conforme já foi discutido no tópico 5.2.

O mecanismo de início do desenvolvimento do tribofilme ocorreu devido o desgaste mais acentuado no entorno dos aglomerados de resina polimérica, que exerceram o papel de platôs primários. Com isso, debris de desgaste foram acumulados na cavidade que se formou no seu entorno, e posteriormente foram compactados, e como efeito originou o platô secundário de contato.

As figuras 5.3.10-d e 5.3.10-e trazem a matriz polimérica caracterizada em seção transversal. O tribofilme se desenvolveu na cavidade que se formou devido o desprendimento de material do aglomerado de resina polimérica.

Figura 5.3.10: Material de fricção - matriz polimérica após ensaio tribométrico tradicional (Série A) no PV de $3,08 \text{ MPa ms}^{-1}$ observada pela superfície de atrito por: (a) MO e MEV modo (b) SE e (c) BSE; em seção transversal no modo BSE: (d) espessura do tribofilme e (e-f) acúmulo de debris na cavidade formada na resina em função do seu desgaste – [Platôs: primário (PP) e secundário (PS); tribofilme (TB)].

Sua espessura média variou de $1,2 \pm 0,3 \mu\text{m}$ - figura 5.3.10-d -, até $\pm 30 \mu\text{m}$ - figura 5.3.10-e. A figura 5.3.10-f mostra que a morfologia dos debris foi bem heterogênea quanto ao tamanho, além de estarem mais compactos nas regiões próximas à superfície de contato. Os debris ficaram mais compactados nesta região, pois na interface de contato as tensões e a temperatura são mais elevadas, e isto favorece a compactação e sinterização dos debris de desgaste. Este mecanismo de desenvolvimento do tribofilme na matriz polimérica é idêntico ao modelo que foi proposto por *Osterle et al* (2001) e apresentado na figura 2.5.6.

Por meio do mapa composicional dos elementos químicos exibidos na figura 5.3.11 revelou na estrutura do tribofilme a existência dos elementos químicos oxigênio, bário, alumínio, cálcio, silício, enxofre, cobre e ferro na estrutura do tribofilme. Ressalta-se a ausência do elemento carbono na região onde o tribofilme foi originado.

Figura 5.3.11: Material de fricção - mapa composicional dos elementos químicos detectados no tribofilme visualizado na figura 5.3.10-e obtido por meio da análise qualitativa por EDS.

A figura 5.3.12-a apresenta a estrutura do roving das fibras de vidro observada em maior aumento por M.O. Por causa das irregularidades, não foi possível obter uma imagem com boa resolução. Mesmo assim, um fragmentado tribofilme foi notado sobre a estrutura deste elemento.

Figura 5.3.12: Material de fricção – roving das fibras de vidro após o ensaio tribométrico tradicional (Série A) no PV de $3,08 \text{ MPa ms}^{-1}$ observado pela superfície de atrito por: (a) MO, e MEV modo (b) SE e (c-d) BSE; em seção transversal no modo BSE: (e) macro e (f) detalhe da morfologia dos debris e do desenvolvimento de uma fina camada na superfície de contato - [Platôs: primário (PP) e secundário (PS)].

Como mostra a figura 5.3.12-b, as fibras de vidro no centro do roving que as fibras de vidro estavam expostas à superfície de contato, e partículas de desgaste se aglomeraram entre os filamentos das fibras.

No MEV modo *BSE* foi identificado o início do desenvolvimento do tribofilme, como ilustram as figuras 5.3.12-c e 5.3.12-d (área azul ampliada). As pontas das fibras de vidro além de terem sido desgastadas, exerceram a função de platôs primários, beneficiando o acúmulo de debris de desgaste na sua vizinhança, que foram condensados, e deram origem aos platôs secundários de contato. Este mecanismo de nucleação e desenvolvimento do tribofilme é idêntico ao modelo proposto por *Eriksson e Jacobson* (2000).

Nesta condição de ensaio (PV de $3,08 \text{ MPa ms}^{-1}$), a intensidade do desenvolvimento do tribofilme foi pequena. Além disto, ocorreu preferencialmente nos arredores da estrutura dos rovings das fibras de vidro.

Como exhibe a figura 5.3.12-e, a caracterização em seção transversal frisou os debris de desgaste agrupados entre as fibras de vidro. Além disto, evidenciou também sobre os debris de desgaste uma camada mais compactada e mais fina de espessura média de $1,4 \pm 0,8 \text{ }\mu\text{m}$. No entanto, esta camada apresentava características de estar ainda em estágio de desenvolvimento - figura 5.3.12-f.

As análises qualitativas realizadas por EDS no ponto A (platô secundário) e no ponto B (debris de desgaste soltos entre as fibras de vidro) indicaram, em maior quantidade, para ambos os pontos, os elementos químicos relacionados as matérias primas empregadas no material de fricção.

No ponto A identificaram-se em maior intensidade os elementos químicos oxigênio, ferro e cobre e, em intensidade um pouco menor, os elementos silício e enxofre. Foram também identificados os elementos alumínio, cálcio, bário e manganês, porém, estes foram em baixa intensidade.

Nos debris livres (ponto B), o elemento de maior intensidade foi o oxigênio. Já os elementos ferro, cobre, silício e enxofre apresentaram intensidades similares, enquanto que os elementos alumínio, cálcio, bário e manganês, foram os de menor intensidade. Os espectros EDS de raios X estão apresentados na figura 5.3.13.

A intensidade dos elementos químicos presentes nos debris de desgaste foi menor em relação a dos elementos do tribofilme. Neste, a intensidade do ferro e do cobre aumentaram, como efeito da predominância do contato por esta estrutura.

Figura 5.3.13: Material de fricção - espectro EDS de raios X obtido no ponto (a) A e (b) B dispostos na figura 5.3.12-d.

A figura 5.3.14-a apresenta o fio de cobre caracterizado por M.O, revelando duas regiões distintas, sendo uma de tom mais brilhante no centro da superfície atritada e a outra mais opaca nas bordas do fio. Estas características evidenciaram que o tribofilme se desenvolveu nas periferias da superfície do fio, enquanto o centro continuou exposto.

Como mostra a figura 5.3.14-b, o MEV modo *SE*, evidenciou o fio de cobre plasticamente deformado, e o modo *BSE* além do fio deformado, revelou também o tribofilme, que são as áreas de tons cinza visualizadas na figura 5.3.14-c.

Em seção transversal, o fio de cobre deformado se sobrepôs à estrutura do roving das fibras de vidro - ver figura 5.3.14-d. Na sua superfície identificou-se um tribofilme homogêneo quanto à composição química, e com espessura média de $7,6 \pm 2,4 \mu\text{m}$ (em maior aumento na figura 5.3.14-e).

O espectro EDS de raios X obtido no ponto A (figura 5.3.14-f) detectou em maior intensidade os elementos químicos oxigênio e cobre, e o ferro com intensidade um pouco inferior, o que sinaliza o predomínio do contato por meio do fio de cobre. Os elementos silício e enxofre aparecem em intensidades menores, e em baixa o alumínio, o cálcio, o manganês e o bário.

Figura 5.3.14: Material de fricção – fio de cobre após ensaio tribométrico tradicional (Série A) no PV de $3,08 \text{ MPa ms}^{-1}$, observado pela superfície de atrito por: (a) MO e MEV modo (b) *SE* e (c) *BSE*; em seção transversal no modo *BSE*: (d) macro e (e) detalhe do tribofilme (TB) sobre o fio de cobre; (f) espectro EDS de raios X obtido no ponto A.

A tabela 5.3.4 sintetiza as principais conclusões que foram extraídas da caracterização do material de fricção, ensaiado em laboratório de maneira tradicional no tribômetro pino-disco no PV de $3,08 \text{ MPa ms}^{-1}$.

Tabela 5.3.4: Síntese das caracterizações dos elementos estruturais do material de fricção após ensaio tribométrico tradicional (Série A) no PV de $3,08 \text{ MPa ms}^{-1}$ - [MP: matriz polimérica; RFV: roving das fibras de vidro; FC: fio de cobre].

Macro	<ul style="list-style-type: none"> - marcas de desgaste na superfície do material de fricção possivelmente geradas pela topografia inicial do disco - fibras de vidro expostas à superfície de contato revelando que o desenvolvimento do tribofilme ocorreu de maneira parcial
MP	<ul style="list-style-type: none"> - fase de resina polimérica agindo como platô primário e favorecendo o desenvolvimento do platô secundário (tribofilme) - tribofilme com diferentes morfologia e espessuras como efeito do desgaste irregular devido a heterogeneidade da microestrutura
RFV	<ul style="list-style-type: none"> - expostos à superfície de contato - pontas das fibras de vidro desgastadas - debris de desgaste aglomerados e soltos entre as fibras de vidro - início do desenvolvimento do tribofilme nas pontas gastas das fibras de vidro - fibra de vidro agiu como platô primário favorecendo o desenvolvimento do platô secundário (tribofilme)
FC	<ul style="list-style-type: none"> - plasticamente deformado e como efeito espalhou-se sobre o roving das fibras de vidro, além de indicar a direção de deslizamento - tribofilme parcialmente desenvolvido sobre a sua superfície, sendo composto em maior parte pelos elementos químicos do material de fricção mais o ferro do disco

5.3.3.2 PV 7,88 MPa ms⁻¹

A figura 5.3.15 apresenta a superfície do material de fricção caracterizada de forma macro por M.O e MEV no modo *BSE* após o ensaio no PV de 7,88 MPa ms⁻¹.

Figura 5.3.15: Material de Fricção - superfície de atrito após ensaio tribométrico tradicional (Série A) no PV de 7,88 MPa ms⁻¹ observada de forma macro por: (a) MO e (b) MEV modo *BSE* - [TB: tribofilme].

Nesta superfície foi também identificadas regiões claras e escuras. Nesta condição a clara se destacou, o que assinalou a formação do tribofilme. Marcas de desgaste promovidas pela topografia inicial do disco não foram visualizadas, sinalizando que neste nível de ensaio a intensidade com que o tribofilme se desenvolveu foi maior quando comparado ao formado com o PV de 3,08 MPa ms⁻¹.

Na superfície da matriz polimérica foi notado um tribofilme com diferentes tons de cores, quando esta foi caracterizada em maior ampliação por M.O, como mostra a figura 5.3.16-a. Essas cores estão associadas aos níveis da temperatura na interface com o decorrer do ensaio, favorecendo algum tipo de reação de oxidação.

A figura 5.3.16-b ilustra a matriz polimérica no MEV modo *BSE*. Além das fases de resina agir como platôs primários, fragmentos de fibras de vidro que agruparam entre as fases também o papel de platôs primários, e favoreceram a formação dos platôs secundários.

Em seção transversal, foi notado mais uma vez que a heterogeneidade da microestrutura favoreceu a formação do tribofilme (figuras 5.3.16-c e 5.3.16-d). A sua espessura média foi de $7,7 \pm 2,7 \mu\text{m}$, como traz a figura 5.3.16-e. O mapa químico obtido por EDS revelou os elementos químicos cobre e enxofre (ver figura 5.3.16-f).

A superfície do roving das fibras de vidro caracterizada por M.O é apresentada na figura 5.3.17-a, e a figura 5.3.17-b traz este elemento estrutural caracterizado por MEV no modo *BSE*. Ambas as técnicas revelaram todo o roving recoberto pelo tribofilme. A seta branca indica algumas fibras de vidro que ficaram expostas.

Figura 5.3.17: Material de fricção – roving das fibras de vidro após o ensaio tribométrico tradicional (Série A) no PV de $7,88 \text{ MPa ms}^{-1}$ observado pela superfície de atrito por: (a) MO e MEV modo (b) *SE* e (c-f) *BSE*; (g) espectro EDS de raios X obtido no ponto A – [Platôs: primário (PP) e secundário (PS)].

O modo *BSE* (figura 5.3.17-c) além de reforçar as evidências, revelou duas regiões de características peculiares. Numa região apesar do tribofilme estar claramente desenvolvido, os topos das fibras de vidro desgastados permaneceram expostos à superfície, como mostra em maior aumento a figura 5.3.17-d. Como revela a figura 5.3.17-e, no topo de uma das fibras o platô secundário se formou. Na outra região do roving, as fibras de vidro foram plenamente encobertas pelo tribofilme, como exhibe em detalhe a figura 5.3.17-f.

No ponto A, foram os obtidos em maior intensidade, pela análise por EDS, os elementos químicos oxigênio e silício. A intensidade dos elementos magnésio, alumínio e cálcio apareceram em maior intensidade nesse espectro EDS de raios X (ver figura 5.3.17-g) em relação aos outros espectros, pois esses elementos químicos compõem a fibra de vidro. No tribofilme foram identificados os elementos químico ferro, cobre e enxofre. Entre esses, o cobre foi o de maior intensidade.

A figura 5.3.18-a apresenta a estrutura do roving das fibras de vidro caracterizada em seção transversal, realçando a formação do tribofilme sobre toda a sua estrutura, e que como decorrência originou num platô de contato.

A figura 5.3.18-b mostra que o fio de cobre que impregnou entre as fibras de vidro propiciou sustentabilidade ao tribofilme. Sua espessura média foi de $11,1 \pm 4,3$ μm , como revela a figura 5.3.18-c. Na figura 5.3.18-d uma fina camada que está mais compactada e formada sobre os debris de desgaste, é exibida na região da superfície de contato.

Figura 5.3.18: Material de fricção – roving das fibras de vidro após o ensaio tribométrico tradicional (Série A) no PV de $7,88 \text{ MPa ms}^{-1}$ observado em seção transversal por MEV modo BSE: (a) estrutura macro e (b - d) detalhes do tribofilme.

A figura 5.3.19-a apresenta a superfície do fio de cobre caracterizada por M.O, na qual se nota uma tonalidade de cor laranja tendendo para o vermelho, e sobre a superfície do fio, o tribofilme. No MEV modo *SE*, figura 5.3.19-b, além de revelar que a superfície do tribofilme estava bastante alisada, mostrou também que o fio de cobre após se deformar encobriu as fibras de vidro. O modo *BSE* evidenciou o tribofilme na superfície do fio, como mostra a figura 5.3.19-c. Este tribofilme apresentou uma característica de ser bastante espesso, como traz a figura 5.3.19-d.

Figura 5.3.19: Material de fricção – fio de cobre após o ensaio tribométrico tradicional (Série A) no PV de $7,88 \text{ MPa ms}^{-1}$ observado pela superfície de atrito por: (a) MO e MEV modo (b) *SE*, e (c - d) *BSE*.

Em seção transversal, figura 5.3.20-a, o fio de cobre apareceu mais deformado em relação ao que foi identificado no material ensaiado no PV de $3,08 \text{ MPa ms}^{-1}$. Além do que, esta figura exibiu o roving das fibras de vidro sobreposto pelo fio de cobre deformado, e a direção de deslizamento, que foi da direita para a esquerda. A espessura média do tribofilme foi de $26,30 \pm 9 \text{ µm}$ (ver figura 5.3.20-b).

Figura 5.3.20: Material de fricção – fio de cobre após o ensaio tribométrico tradicional (Série A) no PV de $7,88 \text{ MPa ms}^{-1}$ observado em seção transversal por MEV no modo BSE: (a) macro, (b) detalhe do tribofilme, e (c) espectro EDS de raios X obtido no ponto A.

A análise por EDS no ponto A identificou em maior intensidade os elementos químicos do material de fricção, destacando mais uma vez a intensidade do silício e enxofre, além do ferro (ver figura 5.3.20-c). Em intensidades menores foram identificados os elementos magnésio, alumínio e cálcio, provavelmente devido a presença de fragmentos de fibras de vidro no tribofilme, mas que não foram observados com a caracterização em seção transversal.

A tabela 5.3.5 sumariza as principais conclusões que foram extraídas da caracterização do material de fricção que foi ensaiado em laboratório de maneira tradicional no tribômetro pino-disco no PV de $7,88 \text{ MPa ms}^{-1}$.

Tabela 5.3.5: Síntese das caracterizações dos elementos estruturais do material de fricção após ensaio tribométrico tradicional (Série A) no PV de $7,88 \text{ MPa ms}^{-1}$ - [MP: matriz polimérica; RFV: roving das fibras de vidro; FC: fio de cobre].

Macro	- fibras de vidro não expostas à superfície de contato - tribofilme desenvolvido, sobretudo nas estruturas dos rovings
MP	- fase de resina polimérica agindo como platô primário favorecendo o desenvolvimento do platô secundário (tribofilme) - fragmentos de fibras de vidro comportando-se como platôs primários
RFV	- estrutura totalmente encoberta pelo tribofilme por causa da facilidade de alojamento dos debrís entre as fibras de vidro - fibras de vidro atuam como platôs primários para o desenvolvimento dos platôs secundários
FC	- plasticamente mais deformado em relação ao que foi ensaiado em $3,08 \text{ MPa ms}^{-1}$; - espalhou-se sobre o roving das fibras de vidro além de indicar a direção de deslizamento;

5.3.3.3 PV 10,09 MPa ms⁻¹

A figura 5.3.21 apresenta a superfície desgastada do material de fricção após o ensaio no PV de 10,09 MPa ms⁻¹, e que foi caracterizada de forma macro por M.O e MEV no modo *BSE*. As existências das regiões claras e escuras foram também notadas, porém o que se destacou foram os rovings das fibras de vidro expostos à superfície de contato, como mostra a imagem obtida por M.O - figura 5.3.21-a.

Figura 5.3.21: Material de Fricção - superfície de atrito após ensaio tribométrico tradicional (Série A) no PV de 10,09 MPa ms⁻¹ observada de forma macro por: (a) MO e (b) MEV modo *BSE*.

Pela intensidade de regiões claras concluiu-se, que após as três horas de ensaio, a área relativa ao tribofilme existente na superfície do material de fricção foi menor em relação ao visualizado na superfície da amostra ensaiada no PV de 7,88 MPa ms⁻¹.

Os diferentes tons de cores apresentados pelas superfícies dos fios de cobre revelaram que elevados níveis de temperatura foram atingidos durante a evolução do ensaio. Conforme resultado apresentado na tabela 5.3.1, a temperatura média do ensaio quando empregado o PV de 10,09 MPa ms⁻¹, foi superior a 300°C.

Na matriz polimérica, o tribofilme foi identificado por meio da M.O, como mostra a figura 5.3.22-a. No entanto, a maior parte da sua estrutura estava extremamente avariada. O MEV no modo *SE* revelou marcas de desgaste como sulcos que provavelmente foram gerados por ações de partículas abrasivas, sendo essas partículas um dos agentes de destruição do tribofilme - figura 5.3.22-b.

Figura 5.3.22: Material de fricção - matriz polimérica após o ensaio tribométrico tradicional (Série A) no PV de $10,09 \text{ MPa ms}^{-1}$ observada pela superfície de atrito por: (a) MO e MEV modo (b) BSE e (c - d) SE; em seção transversal: (e - f) tribofilme em detalhes – [Platôs: primário (PP) e secundário (PS)].

Noutra região da matriz polimérica foram observadas características típicas de degradação térmica, como ilustra a figura 5.3.22-c. A matriz polimérica degradou termicamente em consequência dos elevados níveis de temperatura atingidos no decorrer do ensaio.

Em decorrência da degradação térmica da matriz polimérica e a destruição do tribofilme, os fragmentos de fibras de vidro que agiram como platôs primários na região da matriz polimérica, foram novamente expostos à superfície de contato, como retrata a figura 5.3.22-d.

A figura 5.3.22-e salienta os fragmentos de fibras de vidro existentes na matriz polimérica e que também foram identificadas por meio da caracterização em seção transversal. Por sua vez, a figura 5.3.22-f mostra o tribofilme gerado pelas partículas desgastadas que acumularam sobre a estrutura formada pela resina polimérica. A sua espessura média foi de $3,2 \pm 1,8 \mu\text{m}$.

O espectro EDS de raios X obtido no ponto A (parte da matriz polimérica degradada) e que está disposto na figura 5.3.23, revelou altas intensidades para os elementos químicos oxigênio, cobre e enxofre, e menor para o silício. Em baixa intensidade foram identificados os elementos alumínio, cálcio, bário e manganês.

Figura 5.3.23: Material de fricção – espectro EDS de raios X do ponto A disposto na figura 5.3.22.

Com essas análises concluiu-se que a degradação térmica da matriz polimérica contribuiu para a deterioração e rompimento do tribofilme, pois além de agir como platô primário para a sua formação, propiciava sua sustentabilidade. Além do mais, como efeito da degradação da matriz, os rovings das fibras de vidro e os fios de cobre ficaram mais expostos à superfície de contato, por serem elementos mecanicamente e termicamente mais resistentes em relação a matriz polimérica, principalmente em temperaturas mais elevadas.

A figura 5.3.24-a revela a estrutura do roving das fibras de vidro caracterizada por M.O, onde numa parte o tribofilme estava desenvolvido e noutra diversas pontas de fibras de vidro desgastadas ficaram expostas à superfície. Os topos das fibras são os pontos que brilham na parte inferior da figura.

Figura 5.3.24: Material de fricção – roving das fibras de vidro após o ensaio tribométrico tradicional (Série A) no PV de $10,09 \text{ MPa ms}^{-1}$ observado pela superfície de atrito por: (a) MO e MEV modo (b - c) se e (d - f) BSE – [Platôs: primário (PP) e secundário (PS)].

As constatações feitas por M.O foram também comprovadas por MEV no modo SE, como mostram as figuras 5.3.24-b e 5.3.24-c (ampliação da área azul), revelando parte do tribofilme remanescente no roving das fibras de vidro. Essas investigações assinalaram que nesta condição de ensaio ($10,09 \text{ MPa ms}^{-1}$) também

ocorreu o desenvolvimento do tribofilme, porém como consequência da alta severidade, parte do tribofilme foi danificado, e acabou se rompendo, expondo novamente as fibras de vidro à superfície.

No modo *BSE*, noutro roving foi também visualizado somente parte do tribofilme sobre este elemento estrutural, como mostra a figura 5.3.24-d. Além do que, na estrutura do tribofilme foram identificadas trincas que nuclearam e propagaram - figura 5.3.24-e -, contribuindo posteriormente para o encadeamento da sua destruição. Como mostra a figura 5.3.24-f em maior aumento, as pontas das fibras desgastadas e expostas à superfície como efeito da destruição do tribofilme.

Recorrendo a análise qualitativa por EDS no ponto A (estrutura do tribofilme), o cobre foi o elemento químico identificado em maior intensidade, seguido pelo oxigênio. Silício e enxofre apareceram em intensidades menores, e equivalentes, e os elementos alumínio, cálcio e ferro tiveram baixa intensidade. O espectro EDS de raios X é apresentado na figura 5.3.25.

Figura 5.3.25: Material de fricção – espectro EDS de raios X do ponto A disposto na figura 5.3.24.

A caracterização do roving das fibras de vidro em seção transversal também revelou que parte do tribofilme havia se rompido, como exhibe a figura 5.3.26-a. Já a figura 5.3.26-b (área azul amplificada) revela um platô secundário remanescente sobre a estrutura do roving, e a sua esquerda debris de desgaste acumulados e soltos no meio das fibras de vidro. Já em outra parte do roving, um tribofilme altamente heterogêneo na sua estrutura e espessura foi identificado. A sua espessura média foi de $0,9 \pm 0,4 \mu\text{m}$, como apresenta a figura 5.3.26-c. Além deste, noutro ponto da estrutura, uma fina camada de espessura média de $0,5 \pm 0,1 \mu\text{m}$ se formou na superfície ativa da fibra de vidro - figura 5.3.26-d.

Figura 5.3.26: Material de fricção – roving das fibras de vidro após o ensaio tribométrico tradicional (Série A) no PV de $10,09 \text{ MPa ms}^{-1}$ observado em seção transversal por MEV modo BSE: (a) macro (b - d) detalhe do tribofilme (TB) sobre os filamentos.

A deterioração do tribofilme ocorreu como consequência da severidade do ensaio, que com a degradação térmica da matriz polimérica, as tensões na superfície de contato aumentaram em função da diminuição da área real de contato. Conforme foi apresentado, o contato sucede predominantemente por meio da estrutura dos rovings, e com o aumento das tensões de contato, perturbações no sistema ocorrem. A sua desestabilização favorecerá a nucleação e propagação de trincas nos platôs primários e secundários, e em um dado momento o tribofilme se romperá, expondo novamente as fibras de vidro à superfície de contato. O mecanismo de desenvolvimento, formação e destruição do tribofilme observado é equivalente aos que foram descritos por *Osterle et al* (2001) e *Ostermeyer* (2003).

A figura 5.3.27-a apresenta a superfície do fio de cobre caracterizada por M.O, sobre a qual se visualizou o tribofilme espalhado. Já a figura 5.3.27-b evidencia os diferentes tons de cores na superfície do fio de cobre, que acusaram elevados níveis de temperatura. O cobre quando apresenta a cor vermelho intenso, sinaliza que foi submetido a uma temperatura na faixa de 700° a 800°C (ver figura 4.2.11).

Constatou-se através das figuras 5.3.27-a e 5.3.27-b que somente uma parte da superfície do fio de cobre aparece encoberta pelo tribofilme. Pressupõe-se que parte da estrutura do tribofilme degradou termicamente como efeito do elevado nível de temperatura, como demonstrou *Cho et al.* (2005). Além do que, as observações por MEV nos modos *SE* e *BSE* revelaram fragmentos de fibras de vidro aderidos à superfície do fio de cobre, como mostram as figuras 5.3.27-c a 5.3.27-f. Com a predominância do contato por meio do fio de cobre em razão da degradação térmica da matriz polimérica, a temperatura na superfície de contato aumentou, e o fio amoleceu, facilitando a adesão da fibra de vidro, que é termicamente mais resistente a altas temperaturas. Como discutido anteriormente, o contato por deslizamento ocorre também de forma mais intensa através dos rovings das fibras de vidro, o que colabora para gerar fragmentos de fibras de vidro.

A análise por EDS realizada no ponto A na superfície do fio de cobre identificaram em alta intensidade os elementos químicos oxigênio, zinco, e em intensidade um pouco inferior os elementos silício e enxofre. Já em baixa intensidade identificou-se os elementos alumínio, cálcio, bário, manganês e ferro. O espectro EDS de raios X está disposto na figura 5.3.27-g.

Em seção transversal, notou-se debris de desgaste formados por fragmentos de fibras de vidro na superfície do fio de cobre, como revela a figura 5.3.28-a.

Figura 5.3.27: Material de fricção – fio de cobre após o ensaio tribométrico tradicional (Série A) no PV de $10,09 \text{ MPa ms}^{-1}$ observado pela superfície de atrito por: (a - b) M.O e MEV modo (c - d) SE e (e - f) BSE; (g) espectro EDS de raios X obtido no ponto A.

Figura 5.3.28: Material de fricção – fio de cobre após o ensaio tribométrico tradicional (Série A) no PV de 10,09 MPa ms⁻¹ observado em seção transversal por MEV modo BSE: (a) macro (b) detalhe do tribofilme e (c) detalhe da camada formada sobre o tribofilme.

A espessura média do tribofilme foi de $13,4 \pm 7,6 \mu\text{m}$, como exhibe a figura 5.3.28-b, que traz a área azul ampliada. Quando a estrutura do tribofilme foi observada em maior aumento, como mostra a figura 5.3.28-c, foi identificada uma fina camada de espessura média de $0,5 \pm 0,1 \mu\text{m}$, próxima a superfície de contato.

A tabela 5.3.6 sumariza as principais conclusões extraídas da caracterização do material de fricção ensaiado de forma tradicional no tribômetro pino-disco no PV de 10,09 MPa ms⁻¹. A tabela 5.3.7, por sua vez, traz, para as três condições de ensaio em laboratório uma síntese uma das principais características dos elementos estruturais e do tribofilme, identificadas por meio das análises no MEV.

Tabela 5.3.6: Síntese das caracterizações dos elementos estruturais do material de fricção após ensaio tribométrico tradicional (Série A) no PV de 10,09 MPa ms⁻¹ - [MP: matriz polimérica; RFV: roving das fibras de vidro; FC: fio de cobre].

Macro	<ul style="list-style-type: none"> - fibras de vidro e fios de cobre expostos à superfície - tribofilme parcialmente desenvolvido - contato prevaleceu através dos rovings das fibras de vidro e do fio de cobre
MP	<ul style="list-style-type: none"> - tribofilme menos desenvolvido e mais danificado em relação ao observado na condição de 7,88 MPa ms⁻¹ - matriz polimérica termicamente degradada, contribuindo para destruição do tribofilme
RFV	<ul style="list-style-type: none"> - estrutura parcialmente encoberta pelo tribofilme - parte da estrutura apresentou formação e propagação de trincas, e como efeito houve a deterioração do tribofilme - tribofilmes rompidos em determinados rovings, expondo as fibras de vidro à superfície de contato
FC	<ul style="list-style-type: none"> - severamente deformado devido as elevadas tensões de contato e as elevadas temperaturas atingidas durante o ensaio; - fibras de vidro aderidas na superfície do fio em função da sua deformação plástica - fina camada desenvolvida sobre a estrutura do tribofilme

Tabela 5.3.7: Síntese das caracterizações realizadas nos elementos estruturais dos materiais de fricção ensaiados em laboratório nos diferentes PVs - [E.E: Elemento estrutural; MP: matriz polimérica; RFV: roving das fibras de vidro; FC: fio de cobre; TB: tribofilme].

	SEVERIDADE DO ENSAIO LABORATORIAL NO TRIBÔMETRO		
E. E	3,08 MPa ms⁻¹	7,88 MPa ms⁻¹	10,09 MPa ms⁻¹
MP	<ul style="list-style-type: none"> - debris soltos na superfície - TB se formando 	<ul style="list-style-type: none"> - TB mais desenvolvido 	<ul style="list-style-type: none"> - TB danificado e pouco desenvolvido - degradação térmica
RFV	<ul style="list-style-type: none"> - fibras de vidro expostas à superfície - debris soltos entre as fibras de vidro - TB parcialmente desenvolvido 	<ul style="list-style-type: none"> - fibras de vidro não expostas à superfície - rovings encobertos pelo TB bem desenvolvido - ausência de trincas na estrutura do TB 	<ul style="list-style-type: none"> - fibras de vidro expostas e gastas - trincas na estrutura do TB - rovings com o TB rompido
FC	<ul style="list-style-type: none"> - plasticamente deformado e encobrindo o roving - TB parcialmente desenvolvido 	<ul style="list-style-type: none"> - plasticamente mais deformado e encobrindo o roving - platôs de contato formado sobre o TB 	<ul style="list-style-type: none"> - expostos à superfície e plasticamente deformados - fragmentos de fibras de vidro aderidos na sua superfície

5.3.4 Análise da Intensidade dos Picos dos Elementos Químicos, Espessura, Dureza e Módulo de Elasticidade do Tribofilme Desenvolvido no Material de Fricção

A composição química do tribofilme que se desenvolveu na matriz polimérica dos materiais de fricção ensaiados nos PVs de 3,08 e 7,88 MPa ms⁻¹, foi obtida por meio do mapa composicional dos elementos químicos. Da amostra que foi ensaiada em 10,09 MPa ms⁻¹, obteve-se o espectro EDS de raios X da matriz polimérica termicamente degradada.

Dessa forma, a figura 5.3.29 traz a intensidade dos picos das energias de raios X dos elementos químicos identificados nos tribofilmes que se formaram na estrutura dos rovings das fibras de vidro. A intensidade dos picos dos elementos químicos foi obtida a partir dos espectros apresentados nas figuras 5.3.13-a, 5.3.17-g e 5.3.25.

Figura 5.3.29: Comparação entre as intensidades das energias de raios X dos elementos químicos identificados no tribofilme desenvolvido sobre o roving das fibras de vidro dos materiais de fricção ensaiados de maneira tradicional no tribômetro (Série A) nos PVs de 3,08, 7,88 e 10,09 MPa ms⁻¹.

De modo geral foi observado que a intensidade dos picos dos elementos químicos diminuíram a medida que a condição do ensaio tribométrico ficou mais severa. As exceções foram para os elementos cobre e silício. No caso do cobre, a sua intensidade diminuiu de 3,08 para 7,88 MPa ms⁻¹. No entanto, em 10,09 MPa

ms^{-1} , a sua intensidade foi a mesma de $3,08 \text{ MPa ms}^{-1}$. Já a intensidade do silício reduziu de $3,08$ para $10,09 \text{ MPa ms}^{-1}$, e no PV de $7,88 \text{ MPa ms}^{-1}$, foi superior.

Não foi possível explicar porque a intensidade do pico do elemento químico oxigênio diminuiu quando a severidade do ensaio aumentou. A maior intensidade do pico do elemento químico ferro na condição de menor severidade pode ser associada a maior taxa de desgaste do disco nessa condição de ensaio, o que gerou maior quantidade de partículas metálicas. No entanto, a taxa de desgaste do disco na condição mais severa foi maior em relação a moderada, conforme demonstrou a figura 5.3.8-a. Porém, a intensidade do pico do elemento químico ferro foi o oposto a taxa de desgaste, isto é, diminuiu com o aumento da severidade. Essa divergência pode ser justificada pelo rompimento do tribofilme que ocorreu no nível mais severo, e como consequência o elemento químico ferro foi eliminado juntamente com o tribofilme.

A figura 5.3.30 compara a intensidade dos picos dos elementos químicos dos tribofilmes desenvolvidos sobre os fios de cobre. A intensidade dos picos foi obtida por meio dos espectros EDS de raios X que foram apresentados nas figuras 5.3.14-f, 5.3.20-c e 5.3.27-g. As intensidades dos picos dos elementos químicos oxigênio e ferro apresentaram comportamento semelhante ao que foi descrito para o roving das fibras de vidro.

Figura 5.3.30: Comparação entre as intensidades das energias de raios X dos elementos químicos identificados no tribofilme desenvolvido sobre o fio de cobre dos materiais de fricção ensaiados tradicionalmente no tribômetro (Série A) nos PVs de $3,08$, $7,88$ e $10,09 \text{ MPa ms}^{-1}$.

Novamente não foi possível explicar a redução na intensidade do pico do oxigênio com o aumento da severidade, e a variação na intensidade do pico do ferro está relacionada à variação na taxa de desgaste do disco, conforme foi discutido anteriormente. A intensidade do pico do elemento químico cobre reduziu de 3,08 para 10,09 MPa ms⁻¹, e no PV de 7,88 MPa ms⁻¹, foi superior as outras duas condições. A elevada intensidade do pico do cobre na condição de 7,88 MPa ms⁻¹ está associada a alta taxa de deformação do fio de cobre, conforme foi apresentado na figura 5.3.20. Com a deformação do fio de cobre e o desenvolvimento do tribofilme sobre a superfície deformada do fio, o tribofilme foi contaminado pelo elemento químico cobre. Já na condição mais severa, como mostrou a figura 5.3.27, o tribofilme se desenvolveu principalmente sobre a superfície do fio, devido a degradação térmica da matriz polimérica. Por essa razão a intensidade do pico do elemento químico cobre foi praticamente igual a zero, porque o tribofilme foi formado, principalmente, pelos elementos que compõe a matriz polimérica.

Já a intensidade do pico do silício aumentou quando o PV passou de 3,08 para 7,88 MPa ms⁻¹, e tornou a reduzir quando o PV subiu para 10,09 MPa ms⁻¹. Esse resultado está associado à exposição das fibras de vidro, que foi maior na condição menos severa, diminuindo na moderada devido o desenvolvimento do tribofilme e tornando a ficar exposta na severa em função do rompimento do tribofilme. O elemento enxofre apresentou maior intensidade em 7,88 MPa ms⁻¹, e iguais nas outras duas condições. Esse resultado também está associado a geração de debris de desgaste, desenvolvimento e estabilidade, e rompimento do tribofilme.

A figura 5.3.31, por sua vez, compara a espessura dos tribofilmes que se desenvolveram sobre os elementos estruturais do material de fricção. A espessura média aumentou quando o ensaio tribométrico passou de 3,08 para 7,88 MPa ms⁻¹, e foi menor na condição mais severa (PV de 10,09 MPa ms⁻¹). Para os três níveis de ensaio, o tribofilme formado sobre o fio de cobre foi o que teve, estatisticamente, maior espessura. O contato entre as superfícies ocorre predominantemente por meio do roving das fibras de vidro e do fio de cobre, e o cobre tem maior taxa de deformação em relação as fibras de vidro. Por essa razão a espessura média do tribofilme foi maior no fio de cobre. A maior taxa de deformação desse elemento pode estar associada a sua maior adesão à superfície metálica do disco.

Figura 5.3.31: Comparação entre as espessuras médias do tribofilme desenvolvido sobre os elementos estruturais do material de fricção [MP: matriz polimérica; RFV: roving fibras de vidro; FC: fio de cobre] em função dos ensaios tribométricos tradicionais (Série A) nos PVs de 3,08, 7,88 e 10,09 MPa ms⁻¹.

Ressalta-se que a taxa de desgaste do par tribológico na condição mais severa foi a maior, e consequentemente maior quantidade de debris de desgaste foram gerados, o que contribuiria para o desenvolvimento de tribofilmes mais espessos, conforme demonstrou *Filip, Weiss e Rafaja* (2002). No entanto, a espessura média do tribofilme foi menor quando comparada a condição intermediária (7,88 MPa ms⁻¹). A redução na sua espessura ocorreu como consequência da severidade do ensaio, que favoreceu a destruição térmica da matriz polimérica e como efeito, a deterioração do tribofilme. Além do que, em regimes de maiores severidades, as perturbações na interface de contato tendem a serem mais intensas, conforme reportaram *Osterle et al* (2001) e *Ostermeyer* (2003), e isso desestabiliza o sistema, favorecendo a destruição do tribofilme.

A figura 5.3.32 traz as marcas das indentações que foram geradas na superfície do tribofilme e as curvas de carregamento e descarregamento da força normal em função da profundidade penetrada. Ambas foram obtidas por meio da realização dos ensaios de nanoindentação.

Uma maior dispersão para as curvas de carregamento e descarregamento foram notadas para os ensaios realizados nas amostras ensaiadas nos PVs de 3,08 e 10,09 MPa ms⁻¹, como mostram as figuras 5.3.32-a e 5.3.32-c, respectivamente.

Figura 5.3.32: Material de fricção – marcas de indentação e curvas de carregamento da força normal vs profundidade indentada na microestrutura do tribofilme, para as diferentes condições de severidade laboratorial: (a) 3,08; (b) 7,88; e (c) 10,09 MPa ms⁻¹.

As dispersões podem ser justificadas por meio das irregularidades topográficas dos tribofilmes. Em 3,08 MPa ms⁻¹, o tribofilme ainda estava se desenvolvendo, e na condição mais severa, o tribofilme foi destruído de forma desordenada.

A topografia do tribofilme que se desenvolveu na condição de $7,88 \text{ MPa ms}^{-1}$ está mais alisada e plana (ver figura 5.2.32-b). Por isso, as curvas de carregamento e descarregamento para essa condição foram mais homogêneas.

Na figura 5.3.33 é revelado, de maneira geral, que tanto o módulo de elasticidade quanto a dureza do tribofilme, estatisticamente aumentaram, à medida que o nível do PV aumentou de 3,08 para $10,09 \text{ MPa ms}^{-1}$. O aumento na dureza é atribuído a severidade do ensaio. Já a variação no módulo de elasticidade pode estar associado a mudança na composição química do tribofilme.

Figura 5.3.33: Módulo de elasticidade e dureza do tribofilme desenvolvido no material de fricção utilizado nos ensaios tribométricos tradicionais (Série A) nos PVs de 3,08, 7,88 e $10,09 \text{ MPa ms}^{-1}$.

Nesta seção, até aqui, como mostra a figura 5.3.34, foram apresentados os resultados para a temperatura, o coeficiente de atrito e a taxa de desgaste que foram obtidos com os ensaios tribométricos tradicionais (Série A). Além desses, foram também descritos os mecanismos de desenvolvimento do tribofilme para três níveis de severidade. Inclusive foi apresentada uma síntese da composição química, da espessura e das propriedades mecânicas do tribofilme.

No próximo tópico 5.3.5 serão apresentados os resultados das caracterizações realizadas no disco, e no final dessa seção serão sintetizados as principais conclusões extraídas.

Figura 5.3.34: Diagrama da evolução da apresentação dos resultados.

5.3.5 Caracterização do Disco pela Superfície de Atrito e em Seção Transversal

5.3.5.1 PV 3,08 MPa ms⁻¹

A figura 5.3.35-a apresenta o aspecto topográfico do disco após o ensaio no PV de 3,08 MPa ms⁻¹. Já a figura 5.3.35-b, mostra o resultado da caracterização no modo *BSE*, que evidenciou a transferência e adesão de materiais à superfície do disco, contribuindo para o desenvolvimento do tribofilme. Nessa situação, a tonalidade característica do tribofilme é a mais escura, sendo oposta à identificada na superfície do material de fricção, que foi mais clara. No disco, as regiões claras representam a sua superfície que ficaram expostas.

As regiões cinza que aparecem na figura do perfil topográfico são as não desgastadas, pois como o ensaio foi realizado numa condição de baixa severidade, os picos das ondulações não foram totalmente gastos, foram apenas reduzidos.

Essas constatações revelaram que o tribofilme foi gerado parcialmente na superfície do disco. Além disso, pode-se dizer que a sua formação se deu nas cristas das ondulações desgastadas, como indicam as setas azuis.

Em maior ampliação, o tribofilme aparentou estar bem aderido à superfície do disco (ver figura 5.3.35-c). As características da sua morfologia revelaram compactação e espalhamento de debris de desgaste e a formação de várias camadas, como mostra a figura 5.3.35-d. Na sua estrutura apareceram estrias (seta vermelha indicando). Esse mecanismo se assemelha ao de delaminação.

Figura 5.3.35: Disco – superfície após ensaio tribométrico tradicional (Série A) no PV de 3,08 MPa ms^{-1} : (a) topografia; caracterização por MEV modo BSE: (b) macro e (c - d) detalhes; (e) em seção transversal.

A caracterização em seção transversal revelou um tribofilme com espessura média de $5,4 \pm 1 \mu\text{m}$, nos pontos onde foi possível identificá-lo, como mostra a figura 5.3.35-e.

5.3.5.2 PV 7,88 MPa ms⁻¹

A figuras 5.3.36-a apresenta a topografia da superfície do disco após o ensaio no PV de 7,88 MPa ms⁻¹.

Figura 5.3.36: Disco - superfície após ensaio tribométrico tradicional (Série A) no PV de 7,88 MPa ms⁻¹: (a) topografia; caracterização por MEV modo BSE: (b) macro e (c) detalhe; (d) em seção transversal macro e (e) detalhe do tribofilme.

Nessa condição a superfície do disco já se encontra bem mais lisa em relação a condição de baixa severidade, e os picos das ondulações não foram observados. Os pequenos pontos cinza que aparecem na imagem estão relacionados as falhas de leitura ótica que ocorreram durante a caracterização da superfície.

A figura 5.3.36-b revela um tribofilme já mais desenvolvido sobre a superfície do disco, se destacando em toda a trilha de desgaste. Como mostra a figura 5.3.36-c, as suas características morfológicas deram indícios desse ser mais espesso em relação ao identificado na superfície do disco ensaiado no PV de $3,08 \text{ MPa ms}^{-1}$.

A caracterização em seção transversal evidenciou o desenvolvimento do tribofilme de forma contínua ao longo da superfície de atrito do contracorpo, como mostra a figura 5.3.36-d. A sua espessura média foi de $10,80 \pm 2,15 \text{ }\mu\text{m}$, como traz em maior aumento a figura 5.3.36-e.

5.3.5.3 PV $10,09 \text{ MPa ms}^{-1}$

A figura 5.3.37-a apresenta o aspecto topográfico do disco após o ensaio no PV de $10,09 \text{ MPa ms}^{-1}$. Essa superfície aparentou também estar mais lisa, no entanto, os picos das ondulações foram novamente visualizados, mesmo aparecendo em intensidades menores.

Quando a superfície foi observada no modo *BSE*, como traz a figura 5.3.37-b, notou-se que o tribofilme encontrava-se aderido somente em parte da superfície de atrito. Na parte da superfície exposta, os veios de grafita foram notados.

Em maior ampliação (figura 5.3.37-c) o tribofilme aparentou ser menos espesso em relação ao que foi caracterizado na superfície do disco ensaiado no PV de $7,88 \text{ MPa ms}^{-1}$.

A caracterização macro em seção transversal, figura 5.3.38-a, revelou que nem o desenvolvimento do tribofilme nem a sua espessura foram contínuos ao longo da superfície de atrito.

A figura 5.3.38-b apresenta a região A ampliada, na qual notou-se que o tribofilme não estava presente, pois a camada de níquel foi depositada diretamente sobre a superfície do disco. No entanto, quando a região B foi ampliada, percebeu-se a sua existência, e aderido a superfície do disco, como revela a figura 5.2.38-c.

Figura 5.3.37: Disco - superfície após ensaio tribométrico tradicional (Série A) no PV de 10,09 MPa ms⁻¹: (a) topografia; caracterização por MEV modo BSE: (b) macro e (c) em detalhe.

De acordo com a figura 5.3.38-d, a espessura média do tribofilme foi de $1,47 \pm 0,18 \mu\text{m}$. Já em outras regiões foram identificados tribofilmes com espessura média de $6,41 \pm 0,67 \mu\text{m}$ (figura 5.3.38-e) e $3,66 \pm 0,10 \mu\text{m}$ (figura 5.3.38-f).

A figura 5.3.38-f revelou que a largura do veio de grafita foi maior do que a espessura do tribofilme, e que na região aonde o veio despontou na superfície do disco, o tribofilme foi danificado devido a ausência de sustentabilidade. Esse efeito pode justificar a conclusão de *Roubicek et al* (2008), que constatou que os veios de grafita dificultam a adesão do tribofilme na superfície do disco.

Figura 5.3.38: Disco – superfície após ensaio tribométrico tradicional (Série A) no PV de 10,09 MPa ms^{-1} observada em seção transversal no MEV modo BSE: (a) macro e (b) detalhes das regiões com e (c - f) sem tribofilme.

5.3.6 Análise Topográfica, da Intensidade dos Picos dos Elementos Químicos e da Espessura do Tribofilme Desenvolvido no Disco

A figura 5.3.39 apresenta a variação da rugosidade média da superfície do disco após o ensaio tribológico e em função da severidade. A sua rugosidade média, estatisticamente, diminuiu com o aumento da severidade do ensaio.

Figura 5.3.39: Rugosidade média da superfície do disco após os ensaios tribométricos tradicionais (Série A) empregando os PVs de 3,08, 7,88 e 10,09 MPa ms⁻¹.

A figura 5.3.40 correlaciona os espectros EDS de raios X que foram obtidos por meio das análises qualitativas nos círculos A, B e C, dispostos nas superfícies dos discos e que estão apresentados nas figuras 5.3.35, 5.3.36 e 5.3.37, na devida ordem.

No círculo A foram identificados em maior intensidade os elementos químicos cobre e oxigênio. Na sequência apareceu o ferro, próprio do disco, o silício e o enxofre, e em intensidades menores os elementos alumínio, cálcio, bário e manganês.

No círculo B foi identificado em maior intensidade os elementos cobre e enxofre, depois oxigênio e ferro e em menor intensidade os elementos silício bário e manganês.

A análise por EDS no círculo C revelou em elevada intensidade o elemento químico ferro, evidenciando um tribofilme de pouca espessura. Já os elementos cobre e enxofre foram identificados em baixa intensidade. A intensidade do silício é maior em relação ao cobre e enxofre, porém menor que a do ferro.

Figura 5.3.40: Espectro EDS de raios X característicos dos círculos (a) A, (b) B e (c) C dispostos nas superfícies dos discos que foram submetidos aos ensaios tribométricos tradicionais (Série A) nos PVs de 3,08, 7,88 e 10,09 MPa ms⁻¹.

Por meio dos espectros EDS de raios X, observou-se que a intensidade do pico do elemento químico ferro permaneceu igual quando o PV mudou de 3,08 para 7,88 MPa ms⁻¹, e aumentou de 7,88 para 10,09 MPa ms⁻¹. Para os elementos cobre, e enxofre notou-se que quando o PV subiu de 3,08 para 7,88 MPa ms⁻¹, a intensidade do pico desses elementos aumentou. Porém diminuiu quando o PV passou de 7,88 para 10,09 MPa ms⁻¹. Comportamento no sentido oposto foi observado para o elemento químico silício, isto é, a intensidade do seu pico diminuiu de 3,08 para 7,88 MPa ms⁻¹ e aumentou de 7,88 para 10,09 MPa ms⁻¹. A figura 5.3.41 apresenta os resultados descritos.

Figura 5.3.41: Comparação entre as intensidades das energias de raios X dos elementos químicos ferro, cobre, enxofre e silício identificados no tribofilme desenvolvido na superfície dos discos ensaiados de maneira tradicional no tribômetro (Série A) nos PVs de 3,08, 7,88 e 10,09 MPa ms⁻¹.

Dessa forma concluiu-se que o desenvolvimento do tribofilme tende a ser mais regular e contínuo na condição de 7,88 MPa ms⁻¹, como foi também observado no material de fricção. No PV de 10,09 MPa ms⁻¹, ocorre a sua degradação em função das altas temperaturas, e desestabilização devido o aumento das tensões superficiais com a redução da área real de contato em razão da degradação térmica da matriz polimérica. Com isso, o tribofilme se deteriora e desprende da superfície do disco.

Na figura 5.3.42 é apresentada a variação da espessura do tribofilme em função das diferentes condições de ensaios laboratoriais. A espessura cresceu quando PV passou de 3,08 para 7,88 MPa ms⁻¹, e diminuiu quando aumentou de 7,88 para 10,09 MPa ms⁻¹. Esse resultado é bastante semelhante ao que foi obtido por *Cho et al* (2005) que constatarem um aumento na espessura do tribofilme também desenvolvido na superfície do disco com o aumento da temperatura. No entanto, essa regra foi válida para temperaturas até 250°C. Recordando que a temperatura média do ensaio na condição de 7,88 MPa ms⁻¹ foi de 250°C, e a figura 5.3.41 mostra que acima dessa temperatura a espessura do tribofilme diminuiu.

Figura 5.3.42: Espessura média do tribofilme desenvolvido na superfície do disco ensaiado de forma tradicional no tribômetro (Série A) nos PVs de: 3,08; 7,88; e 10,09 MPa ms⁻¹.

5.3.7 Discussão

De maneira geral, a redução praticamente linear do nível do **COF** de atrito em função do aumento da temperatura média do ensaio, pode estar relacionada à liberação de gases e moléculas de água que são liberadas à medida que a temperatura no núcleo do material de fricção aumenta. Este fenômeno foi comprovado por *Cristol-bulthé et al.* (2008), porém em materiais de fricção utilizados em freios. Os gases liberados podem atuar na interface de contato como um colchão de ar, e dessa maneira, diminuir a resistência de contato entre as superfícies. Por sua vez, a água, pode agir como um filme lubrificante. De acordo com os estudos de

Cristol-bulthé et al. (2008), quanto maior a temperatura do ensaio, maior é a quantidade de gases liberados, devido a decomposição térmica dos ingredientes orgânicos do material de fricção.

O crescimento contínuo do **COF** no PV de $3,08 \text{ MPa ms}^{-1}$ está relacionado a exposição das fibras de vidro e dos fios de cobre à superfície de contato. Conforme demonstraram as caracterizações por M.O e MEV, nesta condição e após as três horas de ensaio, o tribofilme foi observado em estágio de desenvolvimento. Esta analogia é sustentada pelos resultados de *Kchaou et al.* (2013), que observaram um nível de atrito crescente quando as fibras de vidro, do material de fricção de freios utilizado em freios, ficou exposta à superfície de contato.

No regime intermediário de severidade (PV de $7,88 \text{ MPa ms}^{-1}$), apesar do nível do **COF** ter sido menor, este foi mais estável. Esta estabilidade está relacionada ao que foi tribofilme mais desenvolvido na superfície dos materiais, tanto do corpo quanto do contracorpo, conforme foi apresentado nos tópicos anteriores. Como constataram *Cho et al.* (2001), *Cristol-bulthé et al.* (2008), *Kchaou et al.* (2013) e *Sellami et al.* (2014), o desenvolvimento do tribofilme reduz o nível do **COF**, no entanto, o deixa mais estável.

Na condição mais severa (PV $10,09 \text{ MPa ms}^{-1}$) o **COF** foi ainda menor em relação aos regimes anteriores, porém tendeu a ficar crescente com a evolução do ensaio. Este comportamento pode ter sido influenciado pela destruição e formação do tribofilme. De acordo com os resultados apresentados, a temperatura do ensaio neste nível de PV foi superior a 300°C e, a matriz polimérica degradou termicamente. Além de este elemento estrutural sustentar o tribofilme, a área real de contato foi reduzida e o sistema ficou desestabilizado. Com isso, parte do tribofilme desenvolvido sobre a estrutura dos rovings das fibras de vidro foi também rompido, e expôs novamente as fibras à superfície de contato. Esta exposição pode ter contribuído para manter o nível do atrito crescente com o decorrer do ensaio.

O bom desenvolvimento do tribofilme contribuiu para manter a taxa de desgaste do par tribológico constante quando PV variou de $3,08$ até $7,88 \text{ MPa ms}^{-1}$, e a temperatura entre 150° e 250°C . O tribofilme protegeu as superfícies de contato dos pares tribológicos, e reduziu a perda de material. No regime severo, partículas de desgaste de dureza superior foram geradas por causa do rompimento do tribofilme, e isto deixou a interface de contato mais severa / abrasiva. Este fenômeno mais a degradação térmica da matriz polimérica elevou a taxa de desgaste do par.

5.3.8 Conclusões Parciais

Em conformidade com os resultados apresentados e discutidos para os ensaios tribométricos tradicionais (Série A), sintetizam-se as principais conclusões:

- O contato por deslizamento entre as superfícies do par tribológico ocorre predominantemente através dos rovings das fibras de vidro e do fio de cobre, e o mecanismo de desenvolvimento do tribofilme é dependente da distribuição e da disposição dos elementos estruturais do material de fricção;
- Os elementos estruturais desempenham a função de platôs primários de contato e como efeito contribui para a formação dos platôs secundários;
- A natureza do tribofilme (microestrutura, morfologia, espessura, composição química) e propriedades mecânicas, são dependentes da severidade da condição de ensaio (nível do PV);
- Por meio dos ensaios tribométricos constatou-se que o tribofilme além de descontínuo, é pouco espesso quando baixo e alto níveis de energia são empregados ($3,08$ e $10,09 \text{ MPa ms}^{-1}$), enquanto que em níveis intermediários de energia, o tribofilme é mais espesso e contínuo;
- Tribofilmes contínuos favorecem a redução da taxa de desgaste do par tribológico e do contracorpo, além de reduzir os níveis do coeficiente de atrito, porém deixando-os mais estáveis;
- O tribofilme controla a transição do regime moderado de desgaste para o severo, e a sua continuidade é dependente do PV. Maiores produtos PV aumentam a temperatura na interface, desestabilizam e deterioram o tribofilme, favorecendo o seu rompimento. Como efeito, há a transição no regime de desgaste e o aumento na taxa de desgaste devido a geração de partículas de desgaste de durezas superiores;
- Equivalentes temperaturas de ensaio, níveis de coeficiente de atrito e taxa de desgaste do par tribológico, foram obtidos para igual produto PV ($4,92 \text{ MPa ms}^{-1}$) que foram gerados empregando diferentes parâmetros de ensaio.

A figura 5.3.43 mostra que a apresentação dos resultados obtidos com a Série A (ensaios tribométricos tradicionais) foi concluída. Na próxima seção (5.4) serão realizadas e as correlações entre os mecanismos de desenvolvimento do tribofilme identificados em campo, com os que foram simulados em laboratório, para as três condições de ensaios que foram adotadas, tanto na aplicação prática quanto no modelo de ensaio.

Figura 5.3.43: Diagrama da evolução da apresentação dos resultados.

5.4 Correlação: Ensaios de Campo vs Laboratoriais no Tribômetro Pino-disco

5.4.1 Mecanismos de Desenvolvimento do Tribofilme no Material de Fricção

A figura 5.4.1 apresenta, de maneira geral, as características das superfícies e os mecanismos de desenvolvimento do tribofilme operantes nas amostras que foram ensaiadas em campo no regime de baixa severidade, e os mecanismos que foram reproduzidos em laboratório adotando o PV de $3,08 \text{ MPa ms}^{-1}$.

Nas observações macros, figuras 5.4.1-a e 5.4.1-e, as superfícies apresentam aspectos bastante equivalentes, ou seja, há bastantes similaridades entre os mecanismos de desenvolvimento do tribofilme reproduzidos em laboratório quando comparados com os das condições reais. Essas figuras revelam os rovings das fibras de vidro e os fios de cobre expostos à superfície de contato e o tribofilme pouco desenvolvido.

Em maiores aumentos, ficam ainda mais evidentes as similaridades entre os mecanismos do campo com os reproduzidos no laboratório. No roving das fibras de vidro (ver figuras 5.4.1-b e 5.4.1-f) os topos dos filamentos estão desgastados e atuaram como platôs primários, favorecendo a formação do tribofilme. Os fios de cobre (figuras 5.4.1-c e 5.4.1-g) são muito semelhantes tanto na formação parcial do tribofilme na sua superfície, quanto na deformação plástica, indicando a direção do deslizamento e espalhado sobre a estrutura do roving (ver figuras 5.4.1-d e 5.4.1-h).

A tabela 5.4.1 compara as características dos elementos estruturais dos materiais de fricção e as características dos tribofilmes desenvolvidos sobre esses elementos, tanto para os ensaios realizados em campo no regime de baixa severidade quanto o simulado em laboratório com o PV de $3,08 \text{ MPa ms}^{-1}$.

A figura 5.4.2, por sua vez, apresenta as características do tribofilme que foram identificadas na amostra que trabalhou em campo no regime moderado, e na amostra ensaiada em laboratório no PV de $7,88 \text{ MPa ms}^{-1}$.

A observação macro (figuras 5.4.2-a e 5.4.2-e) mostra equivalências na formação do tribofilme, além de que esses aparecem bem mais desenvolvidos em relação aos regimes de menores severidades. Em maiores aumentos, figuras 5.4.2-b e 5.4.2-f, se vê que tanto na amostra de campo quanto na utilizada em laboratório, aglomerados de resinas formados por causa da heterogeneidade da mistura, atuaram como platôs primários, e nos seus entornos o tribofilme foi desenvolvido.

Figura 5.4.1: Correlação entre os mecanismos de desenvolvimento do tribofilme identificados na amostra ensaiada em campo no regime de baixa severidade e os reproduzidos em laboratório no tribômetro pino-disco no PV de $3,08 \text{ MPa ms}^{-1}$ – MEV modo *BSE*; [TB: tribofilme].

Tabela 5.4.1: Correlação das características dos elementos estruturais, e dos tribofilmes desenvolvidos nos materiais de fricção ensaiados em campo no regime de baixa severidade e no laboratório no PV de 3,08 MPa ms⁻¹ - [E.E: Elemento estrutural; MP: matriz polimérica; RFV: roving das fibras de vidro; FC: fio de cobre].

	REGIME DE SEVERIDADE	
E.E	CAMPO - Baixa	LABORATÓRIO – 3,08 MPa ms ⁻¹
Macro	<ul style="list-style-type: none"> - fibras de vidro e fios de cobre expostos à superfície de contato, revelando que o desenvolvimento do tribofilme foi parcial 	<ul style="list-style-type: none"> - marcas de desgaste na superfície do material de fricção possivelmente geradas pela topografia inicial do disco - fibras de vidro expostas à superfície de contato revelando que o desenvolvimento do tribofilme ocorreu de maneira parcial
MP	<ul style="list-style-type: none"> - debris de desgaste aglomerados e soltos na superfície de contato - debris de desgaste formados por fragmentos de fibras de vidro - sem o desenvolvimento do tribofilme 	<ul style="list-style-type: none"> - fase de resina polimérica agindo como platô primário e favorecendo o desenvolvimento do platô secundário (tribofilme) - tribofilme com diferentes morfologia e espessuras como efeito do desgaste irregular devido a heterogeneidade da microestrutura
RFV	<ul style="list-style-type: none"> - expostos à superfície de contato - pontas das fibras de vidro desgastadas - debris de desgaste acumulados e soltos entre as fibras - início do desenvolvimento do tribofilme nas pontas gastas das fibras de vidro - fibras de vidro agiram como platôs primários favorecendo o desenvolvimento dos platôs secundários (tribofilme) 	<ul style="list-style-type: none"> - expostos à superfície de contato - pontas das fibras de vidro desgastadas - debris de desgaste aglomerados e soltos entre as fibras de vidro - início do desenvolvimento do tribofilme nas pontas gastas das fibras de vidro - fibra de vidro agiu como platô primário favorecendo o desenvolvimento do platô secundário (tribofilme)
FC	<ul style="list-style-type: none"> - plasticamente deformado e como efeito espalhou-se sobre o roving das fibras de vidro, além de indicar a direção de deslizamento - tribofilme parcialmente desenvolvido sobre sua superfície, sendo composto por fragmentos de fibras de vidro e elementos químicos do material de fricção mais o ferro da placa de pressão. 	<ul style="list-style-type: none"> - plasticamente deformado e como efeito espalhou-se sobre o roving das fibras de vidro, além de indicar a direção de deslizamento - tribofilme parcialmente desenvolvido sobre a sua superfície, sendo composto em maior parte pelos elementos químicos do material de fricção mais o ferro do disco

Para o roving das fibras de vidro se vê nas figuras 5.4.2-c e 5.4.2-g que em ambas as condições, toda a estrutura está totalmente coberta pelo tribofilme.

Já as figuras 5.4.2-d e 5.4.2-h mostram as equivalências na deformação dos fios de cobre, indicando a direção de deslizamento e o seu espalhamento sobre a estrutura do roving das fibras de vidro, além de estarem mais deformados em relação ao dos regimes de menor severidade.

A figura 5.4.3, por sua vez, apresenta os mecanismos de desenvolvimento do tribofilme que foram observados na amostra ensaiada em campo no regime de alta severidade, e os mecanismos reproduzidos em laboratório empregando o PV de $10,09 \text{ MPa ms}^{-1}$.

As observações macros já revelaram certas divergências entre as superfícies. Na amostra de campo o tribofilme aparece bem mais desenvolvido em relação ao simulado laboratorialmente, como revelam as figuras 5.4.3-a e 5.4.3-e.

Marcas de desgaste causadas pela ação de partículas abrasivas são observadas na superfície da matriz polimérica da amostra de campo. Na superfície da amostra laboratorial há também marcas de desgaste, porém em intensidade muito maior em relação à do campo. Além disso, a matriz polimérica da amostra laboratorial degradou termicamente (ver figuras 5.4.3-b e 5.4.3-f).

Na estrutura do roving das fibras de vidro foram observadas certas semelhanças, como revelam as figuras 5.4.3-c e 5.4.3-g. Na amostra de campo o tribofilme se desenvolveu sobre o roving, porém em função da severidade, se rompeu, expondo novamente as fibras de vidro à superfície. Mecanismo similar foi observado nas estruturas do roving da amostra laboratorial. Ou seja, o tribofilme se desenvolveu, rompendo posteriormente e deixando as fibras de vidro expostas.

Já na superfície do fio de cobre os mecanismos de desenvolvimento do tribofilme foram diferentes. Na amostra de campo, o tribofilme foi formado por debris de desgaste compactados, enquanto que na amostra de laboratório, fragmentos de fibras de vidro foram aderidos à superfície do fio (ver figuras 5.43-d e 5.43-h).

As tabelas 5.4.2 e 5.4.3 comparam as características dos elementos estruturais e dos tribofilmes que se desenvolveram durante os ensaios realizados em campo nos regimes de média e alta severidade, e nas simulações em laboratório com os PVs de 7,88 e $10,09 \text{ MPa ms}^{-1}$.

Figura 5.4.2: Correlação entre os mecanismos de desenvolvimento do tribofilme identificados na amostra ensaiada em campo no regime de média severidade e os reproduzidos em laboratório no tribômetro pino-disco no PV de $7,88 \text{ MPa ms}^{-1}$ – MEV modo *BSE*; [TB: tribofilme].

Tabela 5.4.2: Correlação das características dos elementos estruturais, e dos tribofilmes desenvolvidos nos materiais de fricção ensaiados em campo no regime de média severidade e no laboratório no PV de 7,88 MPa ms⁻¹ - [E.E: Elemento estrutural; MP: matriz polimérica; RFV: roving das fibras de vidro; FC: fio de cobre].

	REGIME DE SEVERIDADE	
E.E	CAMPO - Moderado	LABORATÓRIO – 7,88 MPa ms ⁻¹
Macro	<ul style="list-style-type: none"> - fibras de vidro não expostas à superfície de contato - tribofilme desenvolvido, sobretudo nas estruturas dos rovings 	<ul style="list-style-type: none"> - fibras de vidro não expostas à superfície de contato - tribofilme desenvolvido, sobretudo nas estruturas dos rovings
MP	<ul style="list-style-type: none"> - aglomerado de resina polimérica agindo como platô primário e favorecendo o desenvolvimento do platô secundário (tribofilme) - fragmentos de fibras de vidro comportando-se como platôs primários 	<ul style="list-style-type: none"> - fase de resina polimérica agindo como platô primário favorecendo o desenvolvimento do platô secundário (tribofilme) - fragmentos de fibras de vidro comportando-se como platôs primários
RFV	<ul style="list-style-type: none"> - estrutura totalmente encoberta pelo tribofilme por causa da facilidade de alojamento dos debrís entre as fibras de vidro - fibras de vidro atuam como platôs primários para o desenvolvimento dos platôs secundários 	<ul style="list-style-type: none"> - estrutura totalmente encoberta pelo tribofilme por causa da facilidade de alojamento dos debrís entre as fibras de vidro - fibras de vidro atuam como platôs primários para o desenvolvimento dos platôs secundários
FC	<ul style="list-style-type: none"> - plasticamente mais deformado em relação ao do regime de baixa severidade - espalhou-se sobre o roving das fibras de vidro além de apontar a direção de deslizamento - platôs secundários de contato desenvolvidos sobre a superfície do fio de cobre plasticamente deformado 	<ul style="list-style-type: none"> - plasticamente mais deformado em relação ao que foi ensaiado em 3,08 MPa ms⁻¹ - espalhou-se sobre o roving das fibras de vidro além de indicar a direção de deslizamento;

Figura 5.4.3: Correlação entre os mecanismos de desenvolvimento do tribofilme identificados na amostra ensaiada em campo no regime de alta severidade e os reproduzidos em laboratório no tribômetro pino-disco no PV de 10,09 MPa ms⁻¹ – (a-d-e-h) MEV modo BSE; (b-c-f-g) MEV modo SE; [TB: tribofilme].

Tabela 5.4.3: Correlação das características dos elementos estruturais, e dos tribofilmes desenvolvidos nos materiais de fricção ensaiados em campo no regime de alta severidade e no laboratório no PV de 10,09 MPa ms⁻¹ - [E.E: Elemento estrutural; MP: matriz polimérica; RFV: roving das fibras de vidro; FC: fio de cobre].

	REGIME DE SEVERIDADE	
E.E	CAMPO - Alta	LABORATÓRIO – 10,09 MPa ms ⁻¹
Macro	<ul style="list-style-type: none"> - fibras de vidro não expostas à superfície - tribofilme desenvolvido, sobretudo nas estruturas dos rovings 	<ul style="list-style-type: none"> - fibras de vidro e fios de cobre expostos à superfície - tribofilme parcialmente desenvolvido - contato prevaleceu através dos rovings das fibras de vidro e do fio de cobre
MP	<ul style="list-style-type: none"> - tribofilme mais desenvolvido em relação ao regime de média severidade - matriz polimérica atuando como platôs primários - trincas na estrutura do tribofilme - composição química do tribofilme similar à dos debrís de desgaste 	<ul style="list-style-type: none"> - tribofilme menos desenvolvido e mais danificado em relação ao observado na condição de 7,88 MPa ms⁻¹ - matriz polimérica termicamente degradada, contribuindo para destruição do tribofilme
RFV	<ul style="list-style-type: none"> - estrutura totalmente encoberta pelo tribofilme que apresentou formação e propagação de trincas - tribofilmes rompidos em determinados rovings expondo as fibras de vidro à superfície de contato - tribofilme formado por três diferentes camadas, sendo a de menor espessura e mais compacta a que está mais próxima à superfície de contato 	<ul style="list-style-type: none"> - estrutura parcialmente encoberta pelo tribofilme - parte da estrutura apresentou formação e propagação de trincas, e como efeito houve a deterioração do tribofilme - tribofilmes rompidos em determinados rovings, expondo as fibras de vidro à superfície de contato
FC	<ul style="list-style-type: none"> - plasticamente deformado e espalhado sobre o roving das fibras de vidro - tribofilme que se desenvolveu formado por três camadas; de composições químicas diferentes, sendo a mais compacta a que está mais próxima à superfície de contato 	<ul style="list-style-type: none"> - severamente deformado devido as elevadas tensões de contato e as elevadas temperaturas atingidas durante o ensaio; - fibras de vidro aderidas na superfície do fio em função da sua deformação plástica - fina camada desenvolvida sobre a estrutura do tribofilme

5.4.2 Dureza e Módulo de Elasticidade do Tribofilme

Na figura 5.4.4 a espessura média do tribofilme identificado nas amostras do material de fricção que foram ensaiadas em campo, é comparada à espessura média do tribofilme reproduzido em laboratório no tribômetro.

Para as condições de baixa severidade em campo e PV de $3,08 \text{ MPa ms}^{-1}$ no tribômetro, as espessuras médias do tribofilme foram estatisticamente equivalentes. Já em relação ao regime de média severidade e a condição laboratorial de $7,88 \text{ MPa ms}^{-1}$, a espessura média do tribofilme desenvolvido nessa condição foi, estatisticamente, maior do que naquela. E para as condições de maior severidade, os tribofilmes que se desenvolveram no ensaio laboratorial foram, estatisticamente, menores em relação aos desenvolvidos no ensaio de campo.

Figura 5.4.4: Correlação entre a espessura média do tribofilme que se desenvolveu em campo *versus* o reproduzido em laboratório, em função dos elementos estruturais do material de fricção e das condições dos ensaios.

A figura 5.4.4 mostra que a espessura média do tribofilme desenvolvido nos elementos estruturais da amostra ensaiada em campo no regime de alta severidade é praticamente equivalente ao obtido com o regime moderado, com exceção do tribofilme na matriz polimérica, que foi maior no regime mais severo. Para a condição laboratorial, a espessura média do tribofilme desenvolvido na condição de mais alta energia foi menor em relação ao regime intermediário.

A diferença de resultado pode estar relacionada a alguns fatores como, por exemplo, a amostragem e a diferença entre os níveis de energia de campo e laboratório. De campo foi avaliada somente uma amostra do material de fricção, enquanto que do laboratório foram avaliadas três amostras. Os resultados das caracterizações das amostras de laboratório (apresentados no tópico 5.3.3.3) revelaram características de que o ensaio tribométrico no PV de $10,09 \text{ MPa ms}^{-1}$ foi muito mais severo em relação ao ensaio de campo que foi denominado de alta severidade. Outra hipótese pode ser que a condição de ensaio em campo não represente a severidade do ensaio laboratorial no PV de $10,09 \text{ MPa ms}^{-1}$.

Na figura 5.4.5 é apresentada a correlação entre a dureza e o módulo de elasticidade do tribofilme que foi identificado em campo com o que foi reproduzido em laboratório.

Figura 5.4.5: Correlação entre a espessura média do tribofilme que se desenvolveu em campo *versus* o reproduzido em laboratório, em função dos elementos estruturais do material de fricção e das condições dos ensaios.

Para as condições de baixa e média severidade em campo, as durezas e os módulos de elasticidade foram estatisticamente superiores, em relação aos obtidos no laboratório. Na condição de alta severidade, as durezas foram estatisticamente equivalentes, enquanto que o módulo de elasticidade do tribofilme desenvolvido no

ensaio tribométrico foi superior ao caracterizado na amostra ensaiada em campo. De modo geral, observou-se que, apesar das divergências nos valores das durezas e módulos de elasticidade para as condições de menor severidade e intermediária, os resultados apresentaram mesma tendência.

Ou seja, tanto o módulo de elasticidade quanto a dureza do tribofilme aumentaram quando as condições dos ensaios passaram de baixa para média severidade em campo, e de 3,08 para 7,88 MPa ms⁻¹ no laboratório.

As diferenças observadas nos resultados em termos de grandezas podem estar associadas as condições operacionais práticas e as simuladas em laboratório. Um possível justificativa está no tempo de ensaio, que em campo é muito superior em relação a simulação laboratorial. Essa variável pode de certa forma ter contribuindo para as diferenças apresentadas entre as propriedades mecânicas do tribofilme. Outra justificativa está relacionada ao desconhecimento das regiões da superfície da amostra do material de fricção e microestruturas do tribofilme que foram indentadas. Ou seja, não se sabe se as áreas das amostras em campo seriam equivalentes as das amostras laboratoriais. Com isso, cria-se outro efeito. Uma vez que essas áreas não são equivalentes, as suas composições químicas podem ser diferentes, e o resultado do módulo de elasticidade é influenciado por essa variável. A terceira hipótese é referente a baixa amostragem do material que foi ensaiado em campo. Isto é, foi coletada somente uma amostra para ser caracterizada, e talvez uma amostra que não represente a condição de severidade do ensaio no laboratório.

5.4.3 Conclusões Parciais

A partir dos resultados que foram apresentados e discutidos, sintetizam-se as seguintes conclusões:

- Ensaios tribométricos na configuração pino-disco mostraram-se capazes de simular em escala reduzida e simplificada, e de maneira acelerada, as diferentes condições operacionais ou os diferentes regimes de severidade aos quais embreagens são submetidas em campo.

- Ensaios tribométricos reproduziram de forma equivalente os diferentes mecanismos de desenvolvimento do tribofilme, nos diferentes elementos estruturais do material de fricção (matriz polimérica, roving das fibras de vidro e fio de cobre).
- Ensaio laboratorial empregando um PV de $3,08 \text{ MPa ms}^{-1}$ simula uma condição de trabalho de baixa severidade em campo, enquanto que o PV de $7,88 \text{ MPa ms}^{-1}$ equivale a uma condição de média severidade.
- Apesar de terem sido observadas determinadas divergências em relação aos mecanismos identificados em campo no regime de alta severidade, com o reproduzido em laboratório no PV de $10,09 \text{ MPa ms}^{-1}$, conclui-se que a condição laboratorial simula o desempenho funcional da embreagem em extrema severidade. Talvez o conjunto embreagem coletado não tenha sido o mais representativo para a severidade reproduzida em laboratório.
- O modelo de ensaio desenvolvido pelo Grupo ZF BU TNB - CV em parceria tecnológica com o LTM-UFU (FERNANDES, 2007) foi validado quanto a reprodução dos mecanismos de desenvolvimento do tribofilme adotando o PV de $3,08 \text{ MPa ms}^{-1}$. Naquela ocasião o modelo tinha sido validado somente para resposta tribológica do tribossistema (atrito e desgaste) quando empregado força normal de 200N e velocidade de deslizamento de $2,05 \text{ ms}^{-1}$, que corresponde ao PV de $3,08 \text{ MPa ms}^{-1}$.
- O tribômetro mostrou-se ser uma ferramenta alternativa e útil para o estudo e desenvolvimento de novos materiais para embreagens automotivas, principalmente em níveis de energia mais elevados (condições mais severas), de forma mais simples e com o tempo dos ensaios reduzidos, pois houve paridade na transferência das características do tribossistema do modelo de ensaio para o da condição real.

Uma vez que o modelo de ensaio foi validado por meio do uso do tribômetro de laboratório, na continuidade, serão apresentados os resultados obtidos com as demais séries de ensaio, como esquematiza a figura 5.4.6.

Na próxima seção serão apresentados os resultados obtidos com os ensaios tribométricos quando os debris de desgaste foram removidos do meio interfacial (Série B).

Figura 5.4.6: Diagrama da evolução da apresentação dos resultados.

5.5 Ensaios Laboratoriais - Série B: Remoção dos Debris de Desgaste

5.5.1 Temperatura e Coeficiente de Atrito

As cinco curvas da temperatura que foram obtidas para cada condição de PV estão disponibilizadas no Apêndice 5B. Após a temperatura entrar no regime permanente, calculou-se o seu valor médio correspondente a este regime. Na tabela 5.5.1 é apresentada a temperatura média de cada ensaio tribométrico, bem como a média e o desvio padrão determinados para os cinco resultados obtidos em cada condição de PV. De maneira geral, a temperatura média aumentou com o aumento do PV, e as temperaturas médias dos ensaios realizados nos dois PVs de 4,92 MPa ms⁻¹ foram, estatisticamente, diferentes.

Tabela 5.5.1: Temperatura média (°C) dos ensaios tribométricos com remoção dos debris (Série B).

	Série B1 (2,05 ms ⁻¹)				Série B2 (3,27 ms ⁻¹)					
PV	3,08	4,92	6,31	6,92	4,92	7,88	8,62	9,35	10,09	11,08
R0	131	175	200	202	150	206	222	234	245	258
R1	135	170	213	217	145	219	237	238	240	265
R2	124	166	210	213	147	216	232	230	235	240
R3	128	179	217	210	157	224	219	223	235	275
R4	126	185	204	219	145	210	211	226	229	265
Média	129	175	209	212	149	215	224	230	237	261
Desvio	4	7	7	7	5	7	10	6	6	13

A evolução do **coeficiente de atrito (COF)** em função do tempo de ensaio para a série B1 (2,05 ms⁻¹) é apresentada na figura 5.5.1, e cada curva é a média dos cinco ensaios que foram geradas. Todas as curvas do **COF** estão dispostas no Apêndice 5B.

Essas curvas também apresentaram as regiões correspondentes aos períodos de *running-in* e regime permanente. Após os **COF** atingirem os valores máximos logo no início dos ensaios, esses decresceram até um determinado nível mínimo, com exceção para a condição de 3,08 MPa ms⁻¹, onde o **COF** entrou em regime permanente após atingir o nível máximo. Este comportamento é semelhante ao apresentado na figura 2.2.1-d.

Figura 5.5.1: Evolução do (a) coeficiente de atrito em função do tempo do ensaio tribométrico com remoção dos debris de desgaste (Série B1 - $2,05 \text{ ms}^{-1}$); (b) detalhe do *running in*.

Nas demais condições, após o **COF** atingir o mínimo, este voltou a crescer até entrar em regime permanente, e tendeu a diminuir levemente o seu nível até o final do ensaio. Este comportamento se assemelha ao que foi apresentado na figura 2.2.1-b. O tempo para atingir o regime permanente foi de 20 minutos para $3,08 \text{ MPa m/s}$ e de 40 minutos para as demais condições de PV.

A figura 5.5.2 apresenta a evolução do **COF** em função do tempo de ensaio para a série B2 ($3,27 \text{ ms}^{-1}$). Nesta série foram também identificados os períodos de *running in* e regime permanente e, para todas as condições de ensaio, o tempo para o **COF** estabilizar foi de 40 minutos. As características destas curvas se igualam a da curva apresentada na figura 2.2.1-a.

Figura 5.5.2: Evolução do (a) coeficiente de atrito em função do tempo do ensaio tribométrico com remoção dos debris de desgaste (Série B2 - $3,27 \text{ ms}^{-1}$); (b) detalhe do *running in*.

A evolução do **COF** na condição de $4,92 \text{ MPa ms}^{-1}$ foi semelhante a obtida com o mesmo PV da série B1. Até mesmo os tempos de estabilização foram equivalentes. Entretanto, os níveis do **COF** foram diferentes, sendo maior o que foi obtido na série B2.

Como mostra a figura 5.5.2, nas condições de $4,92$, $7,88$ e $8,62 \text{ MPa ms}^{-1}$, o **COF** cresceu rapidamente logo após o ensaio ter iniciado, e após atingir o valor máximo, decresceu até um nível mínimo. Na sequência voltou a crescer até entrar no regime de estabilização, permanecendo assim até o final do ensaio. Para as demais condições, o **COF** após atingir o pico máximo e o mínimo, entrou no regime permanente, porém tendendo a um lento crescimento com a evolução do ensaio.

No Apêndice 5B está disponibilizada uma síntese dos níveis do **COF** máximo e mínimo, a diferença entre o máximo e mínimo, entre o mínimo e médio e os respectivos tempos para atingirem tais níveis.

A tabela 5.5.2 mostra o valor médio do **COF** (determinado do regime permanente) para cada ensaio realizado na série B, bem como a média e o desvio padrão calculados para os cinco resultados obtidos com cada condição de PV.

Tabela 5.5.2: Coeficiente de atrito médio calculado a partir do regime permanente dos ensaios tribométricos com remoção dos debris de desgaste (Série B).

	Série B1 ($2,05 \text{ ms}^{-1}$)				Série B2 ($3,27 \text{ ms}^{-1}$)					
PV	3,08	4,92	6,31	6,92	4,92	7,88	8,62	9,35	10,09	11,08
R0	0,46	0,43	0,38	0,38	0,43	0,37	0,35	0,36	0,34	0,30
R1	0,46	0,37	0,41	0,43	0,41	0,40	0,41	0,38	0,33	0,31
R2	0,43	0,41	0,39	0,41	0,42	0,38	0,40	0,36	0,32	0,25
R3	0,45	0,39	0,41	0,41	0,46	0,41	0,35	0,35	0,33	0,33
R4	0,43	0,42	0,38	0,43	0,41	0,37	0,35	0,36	0,31	0,31
Média	0,45	0,40	0,39	0,41	0,43	0,39	0,37	0,36	0,33	0,30
Desvio	0,01	0,03	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,01	0,01	0,03

A figura 5.5.3-a apresenta a temperatura média e o **COF** médio em função de PV. Esta figura evidência para os mesmos níveis de PV, **COF** médios e níveis de temperatura, estatisticamente, diferentes. Como revela a figura 5.5.3-b, mesmo com a remoção dos debris de desgaste do meio interfacial, o **COF** médio diminuiu com o aumento da temperatura, que por sua vez aumentou quando PV subiu.

Figura 5.5.3: Temperatura e coeficiente de atrito médio do ensaio tribométrico com remoção dos debris de desgaste (Série B) (a) em função de PV. OBS: a escala da temperatura cresce de cima para baixo; (b) coeficiente de atrito médio em função da temperatura.

A redução do **COF** médio com o aumento da temperatura média do ensaio nesta série foi praticamente linear. Conforme discutido, acredita-se que a queda do **COF** com o aumento da temperatura esteja associada às reações químicas que ocorrem, sobretudo, nas matérias-primas do material de fricção. Durante as reações, gases e moléculas de água são gerados e liberados na interface de contato, o que afeta o desempenho funcional do par tribológico (CRISTOL-BULTHÉ *et al.*, 2008).

5.5.2 Taxa de Desgaste

Na tabela 5.5.3 estão disponibilizados, para cada ensaio, a taxa de desgaste do par tribológico, além da média e do desvio padrão calculada para cada condição. A taxa de desgaste do par foi determinada somando os volumes desgastados do material de fricção e do disco, e dividindo-os pela energia de atrito. Os resultados dos volumes desgastados e das energias de atrito encontram-se no Apêndice 5B.

Tabela 5.5.3: Taxa de desgaste do par tribológico em $\text{mm}^3 \text{MJ}^{-1}$ obtida para os ensaios tribométricos com remoção dos debris de desgaste (Série B).

	Série B1 ($2,05 \text{ ms}^{-1}$)				Série B2 ($3,27 \text{ ms}^{-1}$)					
PV	3,08	4,92	6,31	6,92	4,92	7,88	8,62	9,35	10,09	11,08
R0	10,92	18,64	23,63	20,66	11,65	18,65	25,15	24,49	27,23	35,25
R1	13,15	20,87	22,31	19,63	13,30	20,89	22,06	28,33	29,50	36,32
R2	13,08	19,08	21,68	23,05	11,99	18,75	23,27	24,16	29,08	30,75
R3	13,84	21,56	23,98	22,09	10,68	17,45	24,74	23,70	32,92	31,87
R4	12,36	20,80	22,46	20,28	11,52	22,86	23,59	27,55	28,80	34,00
Média	12,67	20,19	22,81	21,14	11,83	19,72	23,76	25,65	29,51	33,64
Desvio	1,11	1,26	0,96	1,40	0,95	2,15	1,23	2,13	2,09	2,32

A figura 5.5.4 apresenta a taxa de desgaste do par tribológico em função da força normal aplicada e da velocidade de deslizamento (B1 – $2,04 \text{ ms}^{-1}$ e B2 – $3,27 \text{ ms}^{-1}$). Na série B1 a taxa de desgaste cresceu quando a força normal aumentou de 200 para 320N, porém permaneceu constante de 320 para 450N. Para os ensaios realizados na maior velocidade, a taxa de desgaste aumentou à medida que a força normal foi elevada. Entretanto, não foram observadas taxas de desgaste expressivamente superiores que pudessem caracterizar uma transição entre regimes de desgaste.

Para os mesmos PVs de $4,92 \text{ MPa ms}^{-1}$, as taxas de desgaste foram, estatisticamente diferentes, sendo maior na série B1, como mostra a figura 5.5.5-a. Esta figura mostra também que a taxa de desgaste subiu a medida que o PV aumentou. Mais uma vez não foi observada uma zona que evidenciasse uma possível transição do regime moderado de desgaste para o severo. A evolução da taxa de desgaste foi linear quando plotada em função somente da temperatura média do ensaio, como ilustra a figura 5.5.5-b.

Os resultados das taxas de desgaste apresentados neste tópico serão na seção 5.7 comparados com os resultados que foram obtidos com a série de ensaios tribométricos tradicionais (Série A).

Figura 5.5.4: Taxa de desgaste do par tribológico em função da força normal e da velocidade de deslizamento para os ensaios tribométricos com remoção dos debris de desgaste - Séries (B1 - $2,05 \text{ ms}^{-1}$) e (B2 - $3,27 \text{ ms}^{-1}$).

Figura 5.5.5: Taxa de desgaste do par tribológico para o ensaio tribométrico com remoção dos debris de desgaste (Série B): (a) em função da temperatura média do ensaio e de PV; (b) em função somente da temperatura média.

A figura 5.5.6 apresenta a taxa de desgaste do disco de ferro fundido em função da temperatura média do ensaio. De maneira geral, o desgaste do disco foi praticamente constante, não apresentando variações significativas. No entanto, os discos ensaiados em $2,05 \text{ ms}^{-1}$ (Série B1) apresentaram, estatisticamente, maiores taxas de desgaste em relação aos discos que foram ensaiados na maior velocidade de deslizamento (Série B2).

Figura 5.5.6: Taxa de desgaste do disco em função da temperatura média do ensaio tribométrico com remoção dos debris de desgaste (Série B).

5.5.3 Caracterização do Material de Fricção na Superfície de Atrito

Para esta série de ensaios tribométricos, foram também caracterizadas amostras do material de fricção ensaiados nos PVs de 3,08, 7,88 e 10,09 MPa ms⁻¹. Entretanto, as caracterizações dessas amostras não foram tão detalhadas quanto às das amostras ensaiadas em campo e no laboratório de maneira tradicional (Série A).

Conquanto, para os três níveis de energia, a superfície atritada foi observada de forma macro, e os três elementos estruturais (**matriz polimérica [MP]**, **roving das fibras de vidro [RFV]** e **fio de cobre [FC]**) em maiores ampliações.

A figura 5.5.7-a apresenta, de forma macro, a superfície de atrito do material de fricção que foi caracterizada por MEV no modo *BSE* após ter sido ensaiada no PV de 3,08 MPa ms⁻¹. Além dos rovings das fibras de vidro e o fio de cobre expostos, marcas de desgaste na superfície foram identificadas.

Como mostra a figura 5.5.7-b em maior ampliação, na matriz polimérica os aglomerados formados por resina polimérica (regiões mais escuras), atuaram como platôs primários e favoreceram o desenvolvimento dos platôs secundários (regiões mais claras). Debris de desgaste soltos neste elemento estrutural não foram identificados, o que de certa forma era de se esperar, uma vez que, determinada quantidade dos debris gerados foi removida do meio interfacial.

Na estrutura do roving das fibras de vidro os topos das fibras encontravam-se bastante desgastados, além do que havia uma pequena quantidade de debris soltos entre os filamentos. Além disto, pequenas frações de tribofilme desenvolvido nos topos das fibras gastas foram identificadas, como exhibe a figura 5.5.7-c.

Sobre a superfície do fio de cobre foi identificado um tribofilme aparentemente fino e homogêneo, como revela a figura 5.5.7-d. Neste tribofilme, havia marcas de desgaste paralelas que, possivelmente, foram geradas pelas cristas das ondulações existentes na superfície do disco.

A exposição das fibras de vidro juntamente com o baixo desenvolvimento do tribofilme nos topos desgastados, pode ter contribuído para a eliminação do *running in* na curva do **COF** para o PV de 3,08 MPa ms⁻¹ (ver figura 5.5.1). A formação do tribofilme na matriz polimérica e no fio de cobre pode ter colaborado para manter o atrito constante. Já a eliminação dos debris de desgaste, favoreceu a redução da taxa de desgaste do par tribológico, pois diminuiu a abrasividade no meio interfacial.

Figura 5.5.7: Material de fricção – superfície de atrito após ensaio tribométrico no PV de 3,08 MPa ms⁻¹ e com remoção dos debris de desgaste (Série B), caracterizada por MEV modo BSE: (a) macro; elementos estruturais: (b) matriz polimérica [MP], (c) roving das fibras de vidro [RFV], e (d) fio de cobre [FC] – [Platôs: primário (PP) e secundário (PS)].

A superfície de atrito do material de fricção que foi ensaiado no PV de 7,88 MPa ms⁻¹ é apresentada na figura 5.5.8, e nesta condição, a caracterização macro revelou um tribofilme mais desenvolvido em relação ao que se desenvolveu na condição anterior (3,08 MPa ms⁻¹). Como mostra a figura 5.5.8-a, os rovings das fibras de vidro e fio de cobre já não estavam tão expostos à superfície de contato do material de fricção.

Na matriz polimérica (figura 5.5.8-b) o tribofilme se desenvolveu entre os aglomerados de resina polimérica, além da existência de uma pequena quantidade de debris livres. No roving das fibras de vidro, parte da sua estrutura foi encoberta pelo tribofilme, e em outra parte havia somente debris de desgaste soltos, como exhibe a figura 5.5.8-c. A figura 5.5.8-d mostra que na superfície do fio de cobre, um tribofilme de composição química heterogênea também foi desenvolvido.

Figura 5.5.8: Material de fricção – superfície de atrito após ensaio tribométrico no PV de 7,88 MPa ms^{-1} e com remoção dos debris de desgaste (Série B), caracterizada por MEV modo BSE: (a) macro; elementos estruturais: (b) matriz polimérica [MP], (c) roving das fibras de vidro [RFV], e (d) fio de cobre [FC] – [Platôs: primário (PP) e secundário (PS)].

A figura 5.5.9-a, por sua vez, apresenta, de maneira macro, a superfície de atrito do material de fricção após o ensaio no PV de 10,09 MPa ms^{-1} . Nesta superfície, o contato com o disco predominou através dos rovings das fibras de vidro e do fio de cobre, pois parte da estrutura dos rovings estava exposta a superfície e parte encoberta pelo tribofilme, além do fio de cobre está plasticamente deformado.

Na matriz polimérica, em maior aumento como traz a figura 5.5.9-b, não foram detectados debris de desgaste livres entre os aglomerados de resina polimérica, que mais uma vez exerceram o papel de platô primário de contato, favorecendo o desenvolvimento de um tribofilme com característica de ter sido bem compactado,.

Como se vê através da figura 5.5.9-c, a estrutura do roving das fibras de vidro foi totalmente encoberta pelo tribofilme. No entanto, não foram observadas trincas na sua estrutura ou sinal de que havia sido em partes, rompido.

A figura 5.5.9-d revelou, além do fio de cobre plasticamente deformado encobrindo o roving das fibras de vidro, fragmentos de fibras de vidro aderidos à sua superfície e o tribofilme em determinadas regiões desenvolvido.

Figura 5.5.9: Material de fricção – superfície de atrito após ensaio tribométrico no PV de 10,09 MPa ms^{-1} e com remoção dos debris de desgaste (Série B), caracterizada por MEV modo BSE: (a) macro; elementos estruturais: (b) matriz polimérica [MP], (c) roving das fibras de vidro [RFV], e (d) fio de cobre [FC] – [Platôs: primário (PP) e secundário (PS)].

A remoção dos debris de desgaste do meio interfacial favorece a não destruição e eliminação do tribofilme da superfície de atrito do material de fricção no regime de maior severidade. Além do que, o desenvolvimento de forma mais intensificada do tribofilme nesta condição de ensaio reduziu o nível do coeficiente de atrito, porém o manteve mais estável, como mostrou a figura 5.5.2.

A tabela 5.5.4 sintetiza para as três condições de ensaio em laboratório, as principais características dos elementos estruturais e do tribofilme, obtidas por MEV.

Tabela 5.5.4: Síntese das caracterizações realizadas nos elementos estruturais dos materiais de fricção ensaiados em laboratório nos diferentes PVs - [E.E: Elemento estrutural; MP: matriz polimérica; RFV: roving das fibras de vidro; FC: fio de cobre; TB: tribofilme].

	SEVERIDADE DO ENSAIO LABORATORIAL NO TRIBÔMETRO		
E. E	3,08 MPa ms⁻¹	7,88 MPa ms⁻¹	10,09 MPa ms⁻¹
MP	- TB pouco desenvolvido - sem debrís soltos	- TB em desenvolvimento	- TB mais desenvolvido - sem degradação térmica
RFV	- fibras de vidro expostas à superfície - baixa quantidade de debrís soltos entre as fibras de vidro - TB não desenvolvido	- fibras de vidro parcialmente expostas à superfície - rovings parcialmente encobertos pelo TB - maior quantidade de debrís soltos entre as fibras de vidro	- fibras de vidro não expostas - TB bem desenvolvido em toda a estrutura do roving - sem trincas na estrutura do TB
FC	- TB parcialmente desenvolvido - marcas de desgaste geradas pelo disco	- TB parcialmente desenvolvido sobre o fio de cobre	- plasticamente deformado, recobrimdo os rovings das fibras de vidro - TB parcialmente desenvolvido

5.5.4 Caracterização do Disco na Superfície de Atrito

Na figura 5.5.10-a é apresentado o aspecto topográfico do disco após o ensaio no PV de 3,08 MPa ms⁻¹ com a remoção dos debrís de desgaste. Após o ensaio, as cristas das ondulações ainda estavam presentes na superfície, como indica a seta. Os pontos cinza que aparecem são defeitos gerados em função da perda de foco durante a caracterização topográfica.

Quando o disco foi caracterizado por MEV no modo *BSE* (ver figura 5.5.10-b), regiões de tonalidades escura e clara foram notadas, indicando que o tribofilme havia se desenvolvido, porém somente em determinadas regiões da superfície atritada. O tribofilme é as regiões escuras, que mais uma vez se formou nas cristas das ondulações, como indica a seta. As regiões claras é a superfície do disco que ficou descoberta onde os veios de grafita que permaneceram expostos à superfície, aparecem. A figura 5.5.10-c evidencia melhor esses veios, e mostra também um tribofilme não homogêneo e nem contínuo e aparentemente de pouca espessura.

Figura 5.5.10: Disco – superfície após ensaio tribométrico no PV de $3,08 \text{ MPa ms}^{-1}$ e com remoção dos debris de desgaste (Série B): (a) topografia; caracterização por MEV modo *BSE*: (b) macro e (c) detalhes.

Na topografia do disco que foi ensaiado no PV de $7,88 \text{ MPa ms}^{-1}$, as cristas das ondulações também foram identificadas, porém com picos menos intensos, como mostra a figura 5.5.11-a. Uma hipótese para a existência dos picos após o ensaio nesta condição seria que com a remoção dos debris de desgaste, os vales não foram totalmente preenchidos pelos debris de desgaste, o que deixaria a topografia do disco alisada.

Apesar da existência dos picos, o tribofilme ficou mais desenvolvido em relação ao obtido no PV de $3,08 \text{ MPa ms}^{-1}$ - como mostra a figura 5.5.11-b – e, mesmo que parte da superfície ainda tenha ficado exposta, como exhibe em maior aumento a figura 5.5.11-c.

Figura 5.5.11: Disco – superfície após ensaio tribométrico no PV de $7,88 \text{ MPa ms}^{-1}$ e com remoção dos debris de desgaste (Série B): (a) topografia; caracterização por MEV modo *BSE*: (b) macro e (c) detalhes.

É apresentada na figura 5.5.12-a o aspecto topográfico do disco ensaiado na condição de maior energia ($10,09 \text{ MPa ms}^{-1}$), no qual também foram notados as cristas das ondulações, porém com picos menos intensos.

Um tribofilme bem desenvolvido, mais homogêneo e contínuo foi identificado quando o disco foi caracterizado de forma macro por MEV modo *BSE* (vide figura 5.5.12-b). Além do que, este tribofilme recobriu praticamente toda a trilha de desgaste e, como mostra a figura 5.5.12-c em maior aumento, aparentou ser mais espesso em relação aos que foram desenvolvidos nas condições menos severas.

A figura 5.5.13 apresenta a rugosidade média do disco após a realização do ensaio tribológico e em função de PV. A rugosidade média, estatisticamente, diminuiu à medida que a severidade do ensaio aumentou.

Figura 5.5.12: Disco – superfície após ensaio tribométrico no PV de $10,09 \text{ MPa ms}^{-1}$ e com remoção dos debris de desgaste (Série B): (a) topografia; caracterização por MEV modo *BSE*: (b) macro e (c) detalhes.

Figura 5.5.13: Rugosidade média da superfície do disco após o ensaio tribométrico com remoção dos debris de desgaste (Série B) empregando os PVs de $3,08$, $7,88$ e $10,09 \text{ MPa ms}^{-1}$.

Conforme foi visto, a medida que a condição do ensaio ficou mais severa, a intensidade dos picos das cristas das ondulações reduziu e o desenvolvimento do tribofilme se intensificou, justificando então, a diminuição da rugosidade média da superfície do disco com o aumento da energia do ensaio.

Essas rugosidades médias serão na seção 5.7 comparadas com as rugosidades médias dos discos ensaiados na série A (ensaio tradicionais).

5.5.5 Conclusões Parciais

De acordo os resultados apresentados e discutidos para os ensaios tribométricos com remoção dos debris de desgaste (Série B), seguem as principais conclusões:

- A remoção dos debris de desgaste do meio interfacial revelou a predominância do contato por deslizamento entre as superfícies do par tribológico ocorrer através dos rovings das fibras de vidro e do fio de cobre;
- Diferentes temperaturas de ensaio, níveis de coeficiente de atrito e taxa de desgaste do par tribológico, foram obtidos para igual produto PV ($4,92 \text{ MPa ms}^{-1}$) que foram gerados empregando diferentes parâmetros de ensaio;
- Constatou-se que no regime de baixa severidade (PV de $3,08 \text{ MPa ms}^{-1}$) o tribofilme foi muito pouco desenvolvido. Já no regime moderado (PV de $7,88 \text{ MPa ms}^{-1}$), o tribofilme estava em desenvolvimento, e no regime severo (PV de $10,09 \text{ MPa ms}^{-1}$), o tribofilme encontrava-se bem desenvolvido sobre os elementos estruturais do material de fricção;
- O nível do coeficiente de atrito diminuiu a medida que o nível de PV aumentou, e não foi observada uma transição no regime moderado de desgaste para severo com o aumento da energia do ensaio;
- O tribofilme mais desenvolvido na condição de maior severidade manteve a taxa de desgaste do par tribológico no regime moderado de desgaste, além de favorecer a redução da taxa de desgaste do disco.

A figura 5.5.14 mostra que a apresentação dos resultados da Série B (ensaios tribométricos com remoção dos debris de desgaste) foi concluída.

Figura 5.5.14: Diagrama da evolução da apresentação dos resultados.

Na seção 5.5 (na sequência) serão apresentados os resultados obtidos quando os ensaios tribométricos foram realizados adicionando debris de desgaste no meio interfacial.

5.6 Ensaios Laboratoriais - Série C: Adição de Debris de Desgaste

5.6.1 Temperatura e Coeficiente de Atrito

Na tabela 5.6.1 é apresentado o valor da temperatura média de cada ensaio que foi determinado somente no regime permanente. Além desse, a tabela traz a média e o desvio padrão calculados para cada condição de PV (3,08, 7,88 e 10,09 MPa ms⁻¹) empregada nesta série. Todas as curvas da temperatura estão disponibilizadas no Apêndice 5C.

Tabela 5.6.1: Temperatura média (°C) dos ensaios tribométricos com adição de debris (Série C).

	Série C		
PV	3,08	7,88	10,09
R0	107	232	196
R1	104	212	233
R2	152	244	219
R3	154	238	208
R4	147	196	254
Média	133	224	222
Desvio	25	20	22

A figura 5.6.1 traz, para os três níveis de energia, a evolução do **coeficiente de atrito (COF)** em função do tempo de ensaio. Cada curva é a média das cinco curvas que foram geradas em cada condição. Todas as curvas estão dispostas no Apêndice 5C. As curvas do **COF** desta série também apresentaram os regimes de *running in* e permanente.

Os **COF** após atingirem os valores máximos no início dos ensaios decresceram até um nível mínimo. Na sequência, no PV de 3,08 MPa ms⁻¹, o **COF** apresentou uma curta reação de crescimento, porém permaneceu em queda até o final do ensaio. No PV de 7,88 MPa ms⁻¹, o **COF** após atingir o mínimo, tornou novamente a ficar crescente até a primeira hora, e depois ficou decrescente até o ensaio ser concluído. Em 10,09 MPa ms⁻¹ o **COF** apresentou uma rápida e curta reação de recuperação após o nível mínimo (figura 5.6.1-b em detalhe), porém entrou em estágio decrescente com a evolução do ensaio, e assim permaneceu até o fim.

Figura 5.6.1: Evolução do (a) coeficiente de atrito em função do tempo do ensaio tribométrico com adição de debris de desgaste (Série C); (b) detalhe do *running in*.

A síntese do **COF** máximo, mínimo e médio, além dos respectivos tempos para atingirem tais níveis, está disponibilizada no Apêndice 5C, que traz também a diferença entre o **COF** máximo e o mínimo, e a diferença entre o mínimo e o médio.

A tabela 5.6.2 mostra os resultados do **COF** médio, que foram calculados a partir do regime permanente, para todos os ensaios tribológicos. Além deste, mostra a média e o desvio padrão dos cinco resultados que foram obtidos em todos os PV.

Tabela 5.6.2: Coeficiente de atrito médio calculado para os ensaios tribométricos com adição de debris de desgaste (Série C).

	Série C		
PV	3,08	7,88	10,09
R0	0,22	0,28	0,18
R1	0,21	0,25	0,24
R2	0,20	0,27	0,20
R3	0,22	0,28	0,19
R4	0,20	0,22	0,26
Média	0,21	0,26	0,21
Desvio	0,01	0,03	0,03

A figura 5.6.2 apresenta o **COF** médio em função da temperatura média do ensaio. O **COF** obtido em 7,88 MPa ms⁻¹ foi, estatisticamente, o maior e, os das outras duas condições foram, estatisticamente, iguais. Quando os debris de desgaste foram adicionados ao meio interfacial, os níveis do **COF** médios (entre 0,20 e 0,25) ficaram abaixo do valor especificado no pré-requisito técnico do produto, que é de 0,27, conforme foi apresentado no Capítulo 2 - página 54.

Figura 5.6.2: Coeficiente de atrito médio em função da temperatura média dos ensaios tribométricos com adição de debris de desgaste (Série C).

Esses resultados do **COF** serão na seção 5.7, comparados com os resultados obtidos nas séries A e B dos ensaios tribométricos.

5.6.2 Taxa de Desgaste

A tabela 5.6.3 traz a taxa de desgaste do par tribológico, que foi obtida somando o volume desgastado do material de fricção mais o do disco, e dividindo-os pela energia de atrito. Todos os resultados dos volumes desgastados do material de fricção e do disco, mais as energias de atrito estão disponibilizados no Apêndice 5C.

Tabela 5.6.3: Taxa de desgaste do par tribológico em $\text{mm}^3 \text{MJ}^{-1}$ obtidas para os ensaios tribométricos com adição de debris de desgaste (Série C).

	Série C		
PV	3,08	7,88	10,09
R0	71,56	37,62	69,74
R1	57,34	50,68	45,33
R2	61,07	44,31	64,12
R3	68,05	45,23	73,72
R4	59,31	84,65	84,14
Média	63,47	52,50	67,41
Desvio Padrão	6,06	18,56	14,35

A taxa de desgaste do par tribológico em função da temperatura média do ensaio é apresentada na figura 5.6.3-a. As taxas de desgaste médias ficaram entre 50 e 70 $\text{mm}^3 \text{MJ}^{-1}$, além de terem apresentado elevadas dispersões. Isto é consequência da adição dos debris de desgaste ao meio interfacial. Como parte dos debris de desgaste foi formado por fragmentos de fibras de vidro e partículas metálicas (ver Apêndice 2), o aumento da taxa de desgaste do par tribológico pode estar associado a ação abrasiva dessas partículas no meio interfacial.

A figura 5.6.3-b apresenta a taxa de desgaste do disco também em função da temperatura média do ensaio. Para os três PVs, as taxas de desgaste foram, estatisticamente, iguais e com grande dispersão. As médias ficaram entre 2 e 2,5 $\text{mm}^3 \text{MJ}^{-1}$. Uma das possíveis causas da elevada dispersão está associada as características morfológicas das partículas de desgaste adicionadas. Em cada ensaio tribométrico, foi adicionada, em gramas, a mesma quantidade. No entanto, isto não garantiu que toda vez que partículas de desgaste eram adicionadas ao meio interfacial, as mesmas características morfológicas eram mantidas.

Figura 5.6.3: Taxa de desgaste em $\text{mm}^3 \text{MJ}^{-1}$ (a) do par tribológico e (b) do disco em função da temperatura média do ensaio tribométrico com adição de debris de desgaste (Série C).

O disco ensaiado em $3,08 \text{ MPa ms}^{-1}$ apresentou uma maior tendência ao desgaste, que é justificada pela menor velocidade de deslizamento e pressão de contato nesta condição, favorecendo dessa forma, a permanência e ação dos debris de desgaste no meio interfacial, uma vez que sua compactação foi menor.

Esses resultados das taxas de desgaste serão na seção 5.7, comparados com os resultados obtidos com as séries A e B dos ensaios tribométricos.

5.6.3 Caracterização do Material de Fricção na Superfície de Atrito

Nesta série de ensaio tribométrico foram também caracterizadas as amostras de material de fricção submetidas aos PVs de 3,08, 7,88 e 10,09 MPa ms⁻¹. Estas caracterizações também não foram tão detalhadas. Contudo, para os três níveis de energia, a superfície atritada foi observada de forma macro, e os três elementos estruturais (**matriz polimérica [MP]**, **roving das fibras de vidro [RFV]** e **fio de cobre [FC]**) em maiores ampliações.

A figura 5.6.4-a apresenta - de forma macro - a superfície de atrito do material de fricção após o ensaio no PV de 3,08 MPa ms⁻¹. Aparentemente toda a superfície foi coberta pelo tribofilme, pois nem os rovings das fibras de vidro nem os fios de cobre ficaram expostos à superfície de contato.

Figura 5.6.4: Material de fricção – superfície de atrito após ensaio tribométrico no PV de 3,08 MPa ms⁻¹ e com adição de debris de desgaste (Série C), caracterizada por MEV no modo BSE; (a) macro; elementos estruturais: (b) matriz polimérica [MP]; (c) roving das fibras de vidro [RFV]; e (d) fio de cobre [FC] – [Platôs: primário (PP) e secundário (PS)].

Em maiores aumentos, foi evidenciado o desenvolvimento do tribofilme na superfície dos elementos estruturais, como mostram as figuras 5.6.4-b (matriz polimérica), 5.6.4-c (roving das fibras de vidro) e 5.6.4-d (fio de cobre).

Na matriz polimérica os aglomerados de resina não apareceram expostos a superfície e agindo como platôs primários. Na estrutura do roving, algumas pontas de fibras de vidro, que atuaram como platôs primários, ainda permaneceram expostas à superfície. Sobre o fio de cobre, o tribofilme desenvolvido aparentou características de ter sido bastante espesso.

A figura 5.6.5-a traz a caracterização macro realizada na superfície do material de fricção que foi ensaiado na condição de $7,88 \text{ MPa ms}^{-1}$. Nesta condição, o tribofilme foi visualizado sobre toda a superfície atritada.

Figura 5.6.5: Material de fricção – superfície de atrito após ensaio tribométrico no PV de $7,88 \text{ MPa ms}^{-1}$ e com adição de debris de desgaste (Série C), caracterizada por MEV no modo BSE; (a) macro; elementos estruturais: (b) matriz polimérica [MP]; (c) roving das fibras de vidro [RFV]; e (d) fio de cobre [FC].

Com exibem as figuras 5.6.5-b a 5.6.5-d em maiores ampliações, sobre os elementos estruturais do material de fricção, um tribofilme aparentemente espesso e formado por diversas camadas foi identificado.

Por sua vez, a figura 5.6.6 apresenta a superfície do material de fricção que foi submetido ao ensaio na condição mais severa, isto é, no PV de $10,09 \text{ MPa ms}^{-1}$.

Figura 5.6.6: Material de fricção – superfície de atrito após ensaio tribométrico no PV de $10,09 \text{ MPa ms}^{-1}$ e com adição de debris de desgaste (Série C), caracterizada por MEV no modo BSE; (a) macro; elementos estruturais: (b) matriz polimérica [MP]; (c) roving das fibras de vidro [RFV]; e (d) fio de cobre [FC].

A observação macro, como traz a figura 5.6.7-a, revelou a predominância do desenvolvimento do tribofilme sobre a estrutura dos rovings das fibras de vidro e do fio de cobre. Com isso o contato com a superfície do disco passou a ocorrer através dessa estrutura. Certamente nesta condição de ensaio, devido as maiores pressões de contato, o desenvolvimento do tribofilme acelerado e intensificado sobre os elementos estruturais roving das fibras de vidro e fio de cobre.

Na matriz polimérica a caracterização revelou onde o tribofilme não se desenvolveu. Essas regiões são as mais escuras. Em maior aumento, como traz a figura 5.6.6-b, ficou bem evidenciado que o tribofilme se desenvolveu somente em parte da superfície de atrito.

Por outro lado, toda a estrutura do roving foi recoberta pelo tribofilme, pois nem mesmo os topos das fibras foram visualizados expostos à superfície de contato, como exibe em maior aumento a figura 5.6.6-c.

Na superfície do fio de cobre, os debris de desgaste que foram bem compactados, deram origem a um tribofilme mais homogêneo e formado por várias camadas, como revela a figura 5.6.6-d.

A tabela 5.6.4 sintetiza para as três condições ensaiadas, as principais características dos elementos estruturais e do tribofilme, obtidas por MEV.

Tabela 5.6.4: Síntese das caracterizações realizadas nos elementos estruturais dos materiais de fricção ensaiados em laboratório nos diferentes PVs - [E.E: Elemento estrutural; MP: matriz polimérica; RFV: roving das fibras de vidro; FC: fio de cobre; TB: tribofilme].

	SEVERIDADE DO ENSAIO LABORATORIAL NO TRIBÔMETRO		
E. E	3,08 MPa ms⁻¹	7,88 MPa ms⁻¹	10,09 MPa ms⁻¹
MP	- TB bem desenvolvido	- TB bem desenvolvido	- TB bem desenvolvido, porém determinadas regiões da matriz exposta - sem trincas na estrutura do TB
RFV	- TB bem desenvolvido - estrutura do roving totalmente encoberta pelo TB	- TB bem desenvolvido - estrutura do roving totalmente encoberta pelo TB	- TB bem desenvolvido - estrutura do roving totalmente encoberta pelo TB - sem trincas na estrutura do TB
FC	- TB bem desenvolvido - superfície do fio totalmente encoberta pelo TB	- TB bem desenvolvido - superfície do fio totalmente encoberta pelo TB	- TB bem desenvolvido - superfície do fio totalmente encoberta pelo TB - sem trincas na estrutura do TB

5.6.4 Caracterização do Disco na Superfície de Atrito

A figura 5.6.7-a apresenta o perfil topográfico do disco após ter sido ensaiado no PV de $3,08 \text{ MPa ms}^{-1}$ e com debris de desgaste adicionados ao meio interfacial. As cristas das ondulações não foram visualizadas. Os picos cinza que aparecem são defeitos que foram gerados devido a perda de foco durante a caracterização topográfica.

Figura 5.6.7: Disco – superfície após ensaio tribométrico no PV de $3,08 \text{ MPa ms}^{-1}$ e com adição dos debris de desgaste (Série C): (a) topografia; caracterização por MEV modo *BSE*: (b) macro e (c) detalhes.

A topografia indicou que os vales das ondulações foram preenchidos com os debris de desgaste que foram adicionados. No entanto, o MEV modo *BSE* revelou, que após 3 horas de ensaio, um tribofilme parcialmente desenvolvido na superfície do disco, como mostra a figura 5.6.7-b. Além do que, não foi bem evidenciada a

predominância do desenvolvimento do tribofilme nas cristas das ondulações. Em maior aumento, figura 5.6.7-c, o tribofilme aparenta estar bem aderido à superfície.

Nesta condição de ensaio, a pressão de contato exercida não foi suficiente para compactar os debris de desgaste e assim, favorecer o desenvolvimento de um tribofilme mais espesso. Julga-se que determinados debris de desgaste ficaram livres entre as superfícies de contato, e atuaram como partículas abrasivas, removendo as cristas das ondulações e a camada do tribofilme que havia se desenvolvido. Vale ressaltar que a taxa de desgaste média deste disco foi em torno de $2,5 \text{ mm}^3 \text{ MJ}^{-1}$, e com grande dispersão.

Na figura 5.6.8-a é apresentada a topografia da superfície do disco após o ensaio no PV de $7,88 \text{ MPa ms}^{-1}$, na qual também não foram visualizadas as cristas das ondulações.

Figura 5.6.8: Disco – superfície após ensaio tribométrico no PV de $7,88 \text{ MPa ms}^{-1}$ e com adição dos debris de desgaste (Série C): (a) topografia; caracterização por MEV modo BSE: (b) macro e (c) detalhes.

Este perfil topográfico está mais liso, e por meio da observação macro no MEV modo *BSE* (figura 5.6.8-b) foi visto, após as 3 horas de ensaio, um tribofilme desenvolvido sobre toda a trilha de desgaste. Como neste ensaio o nível da energia foi maior, os debris foram mais compactados, além da sua maior adesão à superfície do disco. Em maior aumento (ver figura 5.6.8-c) o tribofilme aparenta ser mais espesso em relação ao obtido no PV de $3,08 \text{ MPa ms}^{-1}$.

A taxa de desgaste média deste disco foi, estatisticamente, igual a do disco ensaiado em $3,08 \text{ MPa ms}^{-1}$. Entretanto, a compactação dos debris de desgaste e a formação do tribofilme podem ter contribuído para reduzir a variação da taxa de desgaste, conforme foi observada por meio do desvio padrão dos resultados.

A figura 5.6.9-a, por sua vez, traz a topografia do disco que foi ensaiado no PV de $10,09 \text{ MPa ms}^{-1}$. Mais uma vez as cristas das ondulações não foram identificadas, e a superfície apresenta um aspecto topográfico bastante liso.

O MEV modo *BSE*, conforme mostra a figura 5.6.9-b, revelou o tribofilme presente em toda trilha de desgaste. No entanto, regiões aleatórias da superfície do disco expostas foram observadas, o que induziu a concluir que o tribofilme se desenvolveu em toda à superfície do disco. Conquanto, em função da elevada severidade do ensaio, perturbações foram geradas no sistema e parte do tribofilme foi rompido. Esta hipótese justifica o elevado desvio padrão da taxa de desgaste deste disco, apesar do valor médio ser um pouco inferior a $2,0 \text{ mm}^3 \text{ MJ}^{-1}$, e estatisticamente igual ao do disco ensaiado em $7,88 \text{ MPa ms}^{-1}$.

A figura 5.6.10 apresenta a rugosidade média da superfície do disco após os ensaios tribométricos com adição dos debris de desgaste. A rugosidade do disco que foi utilizado em $3,08 \text{ MPa ms}^{-1}$ aumentou após o ensaio, fato que é justificado pela ação das partículas abrasivas na sua superfície, devido a menor pressão de contato nesta condição.

Já para as outras duas condições ($7,88$ e $10,09 \text{ MPa ms}^{-1}$) a rugosidade média, estatisticamente, diminuiu em relação a do disco na sua condição sem uso, sendo que a média de menor valor foi para a condição mais severa.

Esses resultados serão na seção 5.7, comparados com os resultados das rugosidades médias dos discos obtidos para as séries A e B dos ensaios tribométricos.

Figura 5.6.9: Disco – superfície após ensaio tribométrico no PV de $10,09 \text{ MPa ms}^{-1}$ e com adição dos debris de desgaste (Série C): (a) topografia; caracterização por MEV modo BSE: (b) macro e (c) detalhes.

Figura 5.6.10: Rugosidade média da superfície do disco após ensaio tribométrico com a adição dos debris de desgaste (Série C) empregando os PVs de 3,08, 7,88 e $10,09 \text{ MPa ms}^{-1}$.

5.6.5 Conclusões Parciais

De acordo os resultados apresentados e discutidos para os ensaios tribométricos com adição dos debris de desgaste (Série C), seguem as principais conclusões:

- A adição de debris de desgaste ao meio interfacial fez com que o nível do coeficiente de atrito permanecesse decrescente com a evolução do ensaio. Além disso aumentou a taxa de desgaste do par tribológico (entre 50 e 70 $\text{mm}^3 \text{MJ}^{-1}$), para os três níveis de ensaios tribométricos empregados;
- Provavelmente os debris de desgaste aumentaram a severidade na interface de contato durante o período de *running in*, elevando a taxa de desgaste do par tribológico. Entretanto, após determinado tempo de ensaio, os debris adicionados favoreceram o desenvolvimento do tribofilme, que reduziu o nível do coeficiente de atrito;
- Para os três níveis de ensaios tribométricos, foram identificados tribofilmes bem desenvolvidos sobre os elementos estruturais do material de fricção.

Conforme mostra a figura 5.6.11, a apresentação dos resultados da Série C (adição dos debris de desgaste) foi concluída. Na seção 5.7 serão relatados os resultados alcançados quando foram utilizados discos pré-condicionados e com rugosidades médias iniciais de 0,2 e 1,2 μm (Série D).

Figura 5.6.11: Diagrama da evolução da apresentação dos resultados.

5.7 Ensaios Laboratoriais - Série D: Discos Pré-Condicionados

5.7.1 Temperatura e Coeficiente de atrito

A tabela 5.7.1 traz o valor médio da temperatura no regime permanente, que foi determinado para todos os ensaios realizados nos três níveis de PV (3,08; 7,88; e 10,09 MPa ms⁻¹) empregados nesta série. Todas as curvas são apresentadas no Apêndice 5D.

A tabela traz também a temperatura média e o desvio padrão dos cinco resultados obtidos em todos os PV. Para as duas condições de pré-condicionamento [disco de rugosidade média inicial de 0,2 µm (Série D1) e 1,2 µm (Série D2)], a temperatura média aumentou com o aumento do PV.

Tabela 5.7.1: Temperatura média (°C) dos ensaios tribométricos utilizando os discos pré-condicionados em: Ra 0,2 µm (Série D1) e Ra 1,2 µm (Série D2).

	Série D1 (Ra 0,2 µm)			Série D2 (Ra 1,2 µm)		
PV	3,08	7,88	10,09	3,08	7,88	10,09
R0	165	264	318	162	276	321
R1	168	266	323	158	254	332
R2	168	317	331	154	267	322
R3	159	291	344	140	232	312
R4	167	277	328	168	271	328
Média	165	283	329	156	260	323
Desvio	4	22	10	10	18	8

A figura 5.7.1 apresenta a evolução do **coeficiente de atrito (COF)** em função do tempo de ensaio para a série D1, e cada curva é a média dos cinco ensaios realizados em todos os PV. Todas as curvas estão dispostas no Apêndice 5D.

Após os **COF** atingirem os picos máximos no início dos ensaios, em 3,08 MPa ms⁻¹, o atrito continuou crescente, porém de forma mais lenta, e na sequência tendeu a estabilização. Nos PVs de 7,88 e 10,09 MPa ms⁻¹, após o pico máximo, os níveis do atrito decresceram até atingir um mínimo. Em 7,88 MPa ms⁻¹, tornou a subir e tendeu a estabilização. Já em 10,09 MPa ms⁻¹, o **COF** após atingir o mínimo permaneceu estável por um curto período de tempo, e na sequência ficou lentamente crescente.

Figura 5.7.1: Evolução do (a) coeficiente de atrito em função do tempo do ensaio tribométrico utilizando o disco pré-condicionado no Ra 0,2 μm (Série D1); (b) detalhe do *running in*.

A figura 5.7.2, por sua vez, apresenta a evolução do **COF** da série D2, também em função do tempo de ensaio. O comportamento do **COF** foi semelhante ao da série D1, porém num nível menor. Além do que, o nível do atrito no *running in*, em 3,08 MPa ms^{-1} da série D1, foi mais estável e maior em relação ao da série D2. Para os três níveis de PVs, o **COF** tendeu a estabilização após uma hora e meia de ensaio.

Figura 5.7.2: Evolução do (a) coeficiente de atrito em função do tempo do ensaio tribométrico utilizando o disco pré-condicionado - Ra 1,2 μm (Série D2); (b) detalhe do *running in*.

No Apêndice 5D estão disponibilizados os valores dos níveis do **COF** máximo e mínimo, a diferença entre o máximo e o mínimo; mínimo e médio; e os respectivos tempos para atingirem tais níveis.

A tabela 5.7.2 traz, para cada ensaio tribométrico realizado nas duas séries, o resultado do **COF** médio calculado a partir do regime permanente. Traz também a média e do desvio padrão determinados para os cinco resultados de cada PV.

Tabela 5.7.2: Coeficiente de atrito médio calculado para os ensaios tribométricos utilizando discos pré-condicionados - Ra 0,2 μm (Série D1) e Ra 1,2 μm (Série D2).

	Série D1 (Ra 0,2 μm)			Série D2 (Ra 1,2 μm)		
	3,08	7,88	10,09	3,08	7,88	10,09
R0	0,41	0,33	0,33	0,42	0,34	0,31
R1	0,44	0,33	0,34	0,37	0,32	0,34
R2	0,42	0,41	0,35	0,40	0,33	0,34
R3	0,40	0,37	0,36	0,36	0,28	0,32
R4	0,41	0,35	0,34	0,43	0,35	0,33
Média	0,42	0,36	0,34	0,40	0,33	0,33
D. P.	0,02	0,03	0,01	0,03	0,03	0,01

Na figura 5.7.3, o **COF** médio é apresentado em função da temperatura média do ensaio. Para os três diferentes níveis de severidade, os **COF** médios obtidos com os discos de Ra de 0,2 μm e 1,2 μm foram, estatisticamente, iguais. Quando PV aumentou de 3,08 para 7,88 MPa ms⁻¹ o **COF** médio foi menor. De 7,88 para 10,09 MPa ms⁻¹ não houve variação no nível do **COF** médio. As temperaturas médias para o mesmo PV foram também, estatisticamente, equivalentes. Esses resultados serão comparados com os resultados obtidos com as séries A, B e C, na seção 5.7.

Figura 5.7.3: Coeficiente de atrito médio em função da temperatura média dos ensaios tribométricos utilizando discos pré-condicionados - Ra 0,2 μm (Série D1) e Ra 1,2 μm (Série D2).

5.7.2 Taxa de Desgaste

A tabela 5.7.3 mostra a taxa de desgaste do par tribológico determinada para cada ensaio tribométrico. A média e o desvio padrão dos cinco resultados obtidos em cada condição de PV também são apresentados. A taxa de desgaste foi, mais uma vez, calculada somando o volume desgastado do material de fricção mais o do disco e dividindo-os pela energia de atrito. Os valores dos volumes desgastados e das energias de atrito encontram-se disponíveis no Apêndice 5D.

Tabela 5.7.3: Taxa de desgaste do par tribológico em $\text{mm}^3 \text{MJ}^{-1}$ obtida nos ensaios tribométricos utilizando discos pré-condicionados - Ra 0,2 μm (Série D1) e Ra 1,2 μm (Série D2).

	Série D1 (Ra 0,2 μm)			Série D2 (Ra 1,2 μm)		
	3,08	7,88	10,09	3,08	7,88	10,09
R0	13,44	16,42	35,47	15,05	22,07	37,88
R1	18,05	21,79	35,70	16,64	18,16	40,42
R2	17,51	27,38	33,23	18,01	24,78	36,49
R3	21,23	18,21	32,24	24,70	15,12	40,3
R4	14,19	12,70	36,05	19,42	27,48	42,44
Média	16,96	19,34	34,54	18,77	21,58	39,51
D. P.	3,15	5,58	1,70	3,69	4,97	2,34

A figura 5.7.4-a apresenta a taxa de desgaste do par tribológico em função da temperatura média do ensaio. Para ambas as séries, nos PVs de 3,08 e 7,88 MPa ms^{-1} , as taxas de desgaste foram, estatisticamente, equivalentes. Em ambas as séries, na condição mais severa (PV igual a 10,09 MPa ms^{-1}), as taxas de desgaste foram superiores em relação as obtidas nas condições menos severas. Além do que, a taxa de desgaste do par tribológico obtida quando empregado o disco pré-condicionado em 1,2 μm , foi, estatisticamente, maior em relação à obtida quando foi utilizado o disco de rugosidade média inicial igual a 0,2 μm .

Em relação a taxa de desgaste do disco, a figura 5.7.4-b mostra que houve uma redução quando a condição do ensaio variou de 3,08 para 7,88 MPa ms^{-1} , e elevou quando o nível de energia subiu de 7,88 para 10,09 MPa ms^{-1} . Nos dois primeiros níveis de energia, a taxa de desgaste do disco pré-condicionado em 1,2 μm foi, estatisticamente, maior. Já na condição mais severa, as taxas de desgaste foram, estatisticamente, semelhantes.

Figura 5.7.4: Taxa de desgaste (a) do par tribológico e (b) do disco em função da temperatura média dos ensaios tribométricos utilizando discos pré-condicionados - Ra 0,2 μm (Série D1) e Ra 1,2 μm (Série D2).

Os resultados das taxas de desgaste obtidos com as séries D1 e D2 serão na seção 5.7, comparados com os resultados obtidos com as séries de ensaios tribométricos A, B e C.

5.7.3 Caracterização do Par Tribológico na Superfície de Atrito

Para os três diferentes níveis de PV, o material de fricção foi caracterizado de forma macro e em maiores aumentos nos três elementos estruturais: **matriz polimérica (MP)**, **roving das fibras de vidro (RFV)** e **fio de cobre (FC)**.

5.7.3.1 Material de fricção - Ra inicial do disco igual a 0,2 μm

Na figura 5.7.5 é apresentada a superfície do material de fricção após o ensaio em 3,08 MPa ms⁻¹, quando foi utilizado o disco de Ra inicial igual a 0,2 μm .

Figura 5.7.5: Material de fricção – superfície de atrito após ensaio tribométrico no PV de 3,08 MPa ms⁻¹ e utilizando disco pré-condicionado [Ra 0,2 μm (Série D1)], caracterizada por MEV modo BSE: (a) macro; detalhes dos elementos estruturais: (b) matriz polimérica [MP], (c) roving das fibras de vidro [RFV] e (c) fio de cobre [FC] – [Platôs: primário (PP) e secundário (PS)].

A observação macro, figura 5.7.5-a, mostrou que o desenvolvimento do tribofilme (regiões claras) ocorreu em maior intensidade sobre as estruturas dos rovings das fibras de vidro e na superfície do fio de cobre. A figura 5.7.5-b mostra que o tribofilme também se desenvolveu na matriz polimérica, porém somente em algumas regiões e ainda assim foi favorecido pelos platôs primários.

O roving, em maior aumento na figura 5.7.5-c, foi identificado recoberto pelo tribofilme. No entanto, alguns topos de fibras de vidro desgastados ficaram expostos à superfície de contato.

Ao longo da superfície do fio de cobre, como traz a figura 5.7.6-d, o tribofilme encontrava-se aparentemente homogêneo e alisado.

A figura 5.7.6-a apresenta de forma macro a superfície do material de fricção que foi ensaiado no PV de $7,88 \text{ MPa ms}^{-1}$.

Figura 5.7.6: Material de fricção – superfície de atrito após ensaio tribométrico no PV de $7,88 \text{ MPa ms}^{-1}$ e utilizando disco pré-condicionado [$R_a 0,2 \mu\text{m}$ (Série D1)], caracterizada por MEV modo *BSE*: (a) macro; detalhes dos elementos estruturais: (b) matriz polimérica [MP], (c) roving das fibras de vidro [RFV] e (d) fio de cobre [FC] – [Platôs: primário (PP) e secundário (PS)].

A observação macro desta condição revelou que de maneira similar a condição anterior, o tribofilme formou-se predominantemente sobre as estruturas dos rovings das fibras de vidro e do fio de cobre. Esta constatação foi melhor evidenciada observando a matriz polimérica em maior ampliação - figura 5.7.6-b -, onde não se observou o tribofilme desenvolvido.

Para o roving das fibras de vidro, parte da sua estrutura continuou exposta a superfície de contato. Porém, na região onde o tribofilme foi gerado, todas as fibras de vidro foram recobertas, como evidencia a figura 5.7.6-c.

O fio de cobre também teve toda a sua superfície recoberta pelo tribofilme como exibe a figura 5.7.6-d.

Por sua vez, a figura 5.7.7 apresenta a superfície do material de fricção que foi ensaiado no PV de $10,09 \text{ MPa ms}^{-1}$.

Figura 5.7.7: Material de fricção – superfície de atrito após ensaio tribométrico no PV de $10,09 \text{ MPa ms}^{-1}$ e utilizando disco pré-condicionado [$R_a 0,2 \text{ }\mu\text{m}$ (Série D1)], caracterizada por MEV modo *BSE*: (a) macro; detalhes dos elementos estruturais: (b) matriz polimérica [MP], (c) roving das fibras de vidro [RFV], e (d) fio de cobre [FC] – [Platôs: primário (PP) e secundário (PS)].

A caracterização macro - figura 5.7.7-a – revelou que o desenvolvimento do tribofilme foi menos intenso na condição mais severa quando comparado ao formado nas outras duas condições. Neste nível, uma quantidade maior de fibras de vidro foi visualizada exposta à superfície de contato.

Na matriz polimérica, cuja superfície é apresentada em maior aumento na figura 5.7.7-b, não foram observados debris de desgaste soltos. No entanto, um tribofilme, presumivelmente mais compactado e desenvolvido entre os platôs primários de contato, foi constatado.

A figura 5.7.7-c revela, em maior ampliação, parte da estrutura do roving das fibras de vidro encoberta pelo tribofilme e parte exposta à superfície de contato. Não foram identificados nem debris de desgaste desprendidos entre as fibras, nem características de que houve a deterioração e o rompimento do tribofilme formado.

Para o fio de cobre também se observou parte da sua superfície encoberta pelo tribofilme e parte exposta a superfície de contato, como mostra a figura 5.7.7-d.

A tabela 5.7.4 sintetiza para as três condições de ensaio em laboratório as principais características dos elementos estruturais e do tribofilme, obtidas por MEV.

Tabela 5.7.4: Síntese das caracterizações realizadas nos elementos estruturais dos materiais de fricção ensaiados em laboratório nos diferentes PVs - [E.E: Elemento estrutural; MP: matriz polimérica; RFV: roving das fibras de vidro; FC: fio de cobre; TB: tribofilme].

	SEVERIDADE DO ENSAIO LABORATORIAL NO TRIBÔMETRO		
E. E	3,08 MPa ms⁻¹	7,88 MPa ms⁻¹	10,09 MPa ms⁻¹
MP	-TB parcialmente desenvolvido	-TB não desenvolvido	-TB bem desenvolvido
RFV	- TB bem desenvolvido - topos das fibras de vidro gastos e expostos nos rovings	- TB bem desenvolvido - topos das fibras de vidro gastos, porém não expostos nos rovings	- TB parcialmente desenvolvido na estrutura do roving - fibras de vidro expostas a superfície de contato
FC	- TB bem desenvolvido e homogêneo	- TB bem desenvolvido e homogêneo	- TB parcialmente desenvolvido - não foram identificadas trincas na estrutura do tribofilme

5.7.3.2 Disco - Ra inicial igual a 0,2 μm

A figura 5.7.8-a traz o aspecto topográfico do disco após o ensaio em 3,08 MPa ms^{-1} . Esta condição foi a de menor nível de energia.

Figura 5.7.8: Disco pré-condicionado [Ra 0,2 μm (Série D1) – superfície após ensaio tribométrico no PV de 3,08 MPa ms^{-1} : (a) topografia; caracterização por MEV modo BSE: (b) macro e (c) detalhes.

Como as cristas das ondulações foram eliminadas durante o processo de pré-condicionamento da superfície, não era de se esperar a sua observação após o ensaio. A superfície do disco permaneceu lisa, contudo, alguns riscos foram gerados pelos elementos estruturais do material de fricção, como por exemplo, os topos das fibras de vidro, ou até mesmo pelos debris de desgaste que foram gerados com a evolução do ensaio.

O MEV modo *BSE* revelou a existência do tribofilme na superfície do disco, no entanto, parte da sua superfície permaneceu descoberta (regiões mais claras). Além do que, o tribofilme apresentou características de ser aparentemente fino, como exhibe de maneira macro a figura 5.7.8-b.

Em maior aumento (figura 5.7.8-c), o tribofilme aparentou ser homogêneo e estar bem aderido a superfície do disco. Fatores que podem ter sido favorecidos devido a não presença das cristas das ondulações, pois com a sua eliminação, a área real de contato aumentou, como efeito a pressão específica de contato diminuiu, pois foi distribuída ao longo de toda a superfície de contato.

Na figura 5.7.9-a está apresentado a topografia da superfície do disco que foi ensaiado no PV de $7,88 \text{ MPa ms}^{-1}$.

Figura 5.7.9: Disco pré-condicionado [Ra $0,2 \text{ }\mu\text{m}$ (Série D1) – superfície após ensaio tribométrico no PV de $7,88 \text{ MPa ms}^{-1}$: (a) topografia; caracterização por MEV modo *BSE*: (b) macro e (c) detalhes.

Após o ensaio, a topografia continuou alisada, e o MEV modo *BSE* (ver figura 5.7.9-b) revelou, de forma macro, que o desenvolvimento do tribofilme ocorreu numa maior área da superfície do disco. Regiões claras não foram observadas, o que indicou que a superfície do disco não ficou exposta.

Em maior aumento, como mostra a figura 5.7.9-c, foi constatado um tribofilme com características de ter sido mais espesso em relação ao obtido com o ensaio tribométrico no menor nível de energia.

Já a figura 5.7.10-a traz, por sua vez, a topografia do disco ensaiado no nível de maior energia. Esta superfície também apresentou um aspecto plano, suavizado.

Figura 5.7.10: Disco pré-condicionado [Ra 0,2 μm (Série D1)] – superfície após ensaio tribométrico no PV de 10,09 MPa ms^{-1} : (a) topografia; caracterização por MEV modo *BSE*: (b) macro e (c) detalhes.

Todavia, a maior parte da superfície de atrito do disco permaneceu exposta após as 3 horas de ensaio, como mostrou o MEV modo *BSE*. Os riscos verticais que aparecem na figura 5.7.10-b foram gerados pela ferramenta de acabamento superficial durante o processo de pré-condicionamento. E foram justamente esses defeitos que contribuíram para o desenvolvimento do tribofilme em determinadas localidades da superfície do disco. A análise em maior aumento - figura 5.7.10-c – reforçou o tribofilme pouco desenvolvido.

A figura 5.7.11 apresenta a rugosidade média do disco pré-condicionado no R_a de $0,2\ \mu\text{m}$, antes e após os ensaios tribométricos. Em $3,08$ e $10,09\ \text{MPa ms}^{-1}$, a rugosidade média dos discos ao final dos ensaios foi maior em relação a do disco na condição sem uso. O aumento da rugosidade foi devido a ação dos elementos estruturais (topos das fibras de vidro) ou das partículas de desgaste na superfície do disco, devido, respectivamente, a menor e maior pressão de contato nestas duas condições, pois, conforme foi apresentado, os tribofilmes foram identificados menos desenvolvidos.

Em $7,88\ \text{MPa ms}^{-1}$ a rugosidade média foi, estatisticamente, igual a do disco não ensaiado. O fato do tribofilme ter se desenvolvido de maneira mais homogênea, pode ter protegido a superfície do disco contra danos, e mantendo-a com baixa rugosidade ao final do ensaio. Estes resultados serão comparados na seção 5.7 com os resultados obtidos com as demais séries de ensaios tribométricos.

Figura 5.7.11: Rugosidade média da superfície do disco pré-condicionado [$R_a\ 0,2\ \mu\text{m}$ (Série D1)] após os ensaios tribométricos empregando os PVs de $3,08$, $7,88$ e $10,09\ \text{MPa ms}^{-1}$.

5.7.3.3 Material de fricção - Ra inicial do disco igual a 1,2 µm

Na superfície do material de fricção que foi ensaiado no PV de $3,08 \text{ MPa ms}^{-1}$ e contra o disco pré-condicionado em $1,2 \text{ µm}$, as características observadas foram semelhantes às identificadas na amostra ensaiada contra o disco de $0,2 \text{ µm}$. A caracterização macro, como mostra a figura 5.7.12-a, revelou mais uma vez a predominância do desenvolvimento do tribofilme sobre a estrutura dos rovings das fibras de vidro e na superfície do fio de cobre.

Figura 5.7.12: Material de fricção – superfície de atrito após ensaio tribométrico no PV de $3,08 \text{ MPa ms}^{-1}$ e utilizando disco pré-condicionado [$R_a 1,2 \text{ µm}$ (Série D2)], caracterizada por MEV modo *BSE*: (a) macro; detalhes dos elementos estruturais: (b) matriz polimérica [MP], (c) roving das fibras de vidro [RFV] e (c) fio de cobre [FC] – [Platôs: primário (PP) e secundário (PS)].

Por causa da existência dos platôs primários na matriz polimérica, o tribofilme se formou, porém de forma localizada. O tribofilme é os pontos claros que se destacam na figura 5.7.12-b.

Na região do roving das fibras de vidro, onde o tribofilme se desenvolveu, toda a estrutura foi recoberta, pois os topos desgastados das fibras não ficaram expostos à superfície de contato, como revela a figura 5.7.12-c.

Já na superfície do fio de cobre - figura 5.7.12-d - o tribofilme foi bem desenvolvido, homogêneo e, ao que tudo indica espesso e formado por várias camadas.

Na superfície do material de fricção que foi ensaiado no PV de $7,88 \text{ MPa ms}^{-1}$, também foram observadas características topográficas similares as identificadas quando se utilizou o disco de $0,2 \text{ }\mu\text{m}$. A figura 5.7.13-a apresenta a superfície de forma macro.

Figura 5.7.13: Material de fricção – superfície de atrito após ensaio tribométrico no PV de $7,88 \text{ MPa ms}^{-1}$ e utilizando disco pré-condicionado [$R_a 1,2 \text{ }\mu\text{m}$ (Série D2)], caracterizada por MEV modo BSE: (a) macro; detalhes dos elementos estruturais: (b) matriz polimérica [MP], (c) roving das fibras de vidro [RFV] e (d) fio de cobre [FC] – [Platôs: primário (PP) e secundário (PS)].

O tribofilme apareceu pouco desenvolvido sobre a matriz polimérica, além de ter sido favorecido pela presença dos platôs primários de contato, como mostra a figura 5.7.13-b.

Por outro lado, como revelam as figuras 5.7.13-c e 5.7.13-d, novamente, o roving das fibras de vidro e o fio de cobre tiveram sobre suas estruturas um tribofilme mais homogeneamente desenvolvido.

Já a figura 5.7.14 apresenta as características superficiais da amostra do material de fricção ensaiada no PV de $10,09 \text{ MPa ms}^{-1}$, também utilizando o contracorpo de $1,2 \text{ }\mu\text{m}$ de rugosidade inicial. Esta superfície também teve características topográficas similares em relação a superfície do material de fricção que deslizou contra o disco de $0,2 \text{ }\mu\text{m}$.

Figura 5.7.14: Material de fricção – superfície de atrito após ensaio tribométrico no PV de $10,09 \text{ MPa ms}^{-1}$ e utilizando disco pré-condicionado [$R_a 1,2 \text{ }\mu\text{m}$ (Série D2)], caracterizada por MEV modo *BSE*: (a) macro; detalhes dos elementos estruturais: (b) matriz polimérica [MP], (c) roving das fibras de vidro [RFV] e (c) fio de cobre [FC] – [Platôs: primário (PP) e secundário (PS)].

A observação macro - figura 5.7.14-a - evidenciou um tribofilme menos desenvolvido em relação às outras duas condições de menor nível de energia. Uma maior quantidade de fibras de vidro ficou exposta à superfície de contato. Na matriz polimérica, não foram observados debris de desgaste livres na superfície, mas sim um tribofilme bem compactado e de característica topográfica alisada, que se desenvolveu entre os platôs primários (ver figura 5.7.14-b).

No roving das fibras de vidro, figura 5.7.14-c, mais uma vez, parte da estrutura foi encoberta pelo tribofilme e a outra parte permaneceu exposta. Também não foram observados debris de desgaste livres entre os filamentos das fibras de vidro, ou sinais de deterioração ou rompimento do tribofilme.

No fio de cobre, como mostra a figura 5.7.14-d, grandes quantidades de fragmentos de fibras de vidro aderiram à sua superfície, e podem ter atuado como platôs primários, favorecendo o desenvolvimento dos platôs secundários nos seus entornos.

A tabela 5.7.5 sintetiza para as três condições de ensaio em laboratório as principais características dos elementos estruturais e do tribofilme, obtidas por MEV.

Tabela 5.7.5: Síntese das caracterizações realizadas nos elementos estruturais dos materiais de fricção ensaiados em laboratório nos diferentes PVs - [E.E: Elemento estrutural; MP: matriz polimérica; RFV: roving das fibras de vidro; FC: fio de cobre; TB: tribofilme].

	SEVERIDADE DO ENSAIO LABORATORIAL NO TRIBÔMETRO		
E. E	3,08 MPa ms⁻¹	7,88 MPa ms⁻¹	10,09 MPa ms⁻¹
MP	-TB parcialmente desenvolvido	-TB parcialmente desenvolvido	-TB bem desenvolvido
RFV	- TB parcialmente desenvolvido sobre estrutura do roving - topos das fibras de vidro gastos e não expostos nos rovings	- TB bem desenvolvido - topos das fibras de vidro gastos e não expostos nos rovings	- TB parcialmente desenvolvido na estrutura do roving - fibras de vidro expostas a superfície de contato
FC	- TB bem desenvolvido e homogêneo	- TB bem desenvolvido e homogêneo	- TB bem desenvolvido - fragmentos de fibras de vidro agindo como platôs primários - não foram observadas trincas na estrutura do tribofilme

5.7.3.4 Disco - Ra inicial igual a 1,2 μm

A figura 5.7.15-a apresenta a topografia da superfície do disco após o ensaio em 3,08 MPa ms⁻¹. As cristas das ondulações foram identificadas, e a superfície ao final do ensaio apresentou marcas de desgaste que podem ter sido geradas pelos elementos estruturais do material de fricção, ou por debris de desgaste que permaneceram no meio interfacial.

Figura 5.7.15: Disco pré-condicionado [Ra 1,2 μm (Série D2)] – superfície após ensaio tribométrico no PV de 3,08 MPa ms⁻¹: (a) topografia; caracterização por MEV modo BSE: (b) macro e (c) detalhes.

O MEV modo BSE - figura 5.7.15-b - revelou, mais uma vez, a presença do tribofilme na superfície do disco. No entanto, somente em determinadas regiões, pois parte da superfície continuou exposta (regiões claras). Em maior aumento - figura 5.7.15-c - o tribofilme apresentou características de ser homogêneo e liso.

Na figura 5.7.16-a está apresentada a superfície topográfica do disco após ter sido ensaio em $7,88 \text{ MPa ms}^{-1}$. Novamente foram visualizadas as cristas das ondulações. A topografia apresentou, após o ensaio, um aspecto liso.

Figura 5.7.16: Disco pré-condicionado [Ra $1,2 \mu\text{m}$ (Série D2) – superfície após ensaio tribométrico no PV de $7,88 \text{ MPa ms}^{-1}$: (a) topografia; caracterização por MEV modo BSE: (b) macro e (c) detalhes.

Pelo MEV modo BSE - de maneira macro - figura 5.7.16-b -, ficou evidenciado que nesta condição e série, o tribofilme, também se desenvolveu numa maior área da superfície do disco, pois regiões claras não foram observadas, indicando mais uma vez que a superfície de contato do disco não permaneceu exposta.

Em maior aumento - figura 5.7.16-c -, o tribofilme aparentou ser mais espesso em relação ao obtido com o ensaio tribométrico no PV de $3,08 \text{ MPa ms}^{-1}$ para esta mesma série.

A figura 5.7.10-a, por sua vez, apresenta a topografia do disco ensaiado no PV de $10,09 \text{ MPa ms}^{-1}$. Esta topografia também apresentou um perfil liso, porém com marcas de desgaste. O MEV modo *BSE* indicou, após as 3 horas de ensaio, grande parte da superfície de atrito do disco exposta. No entanto, a intensidade do tribofilme desenvolvido neste nível de energia foi maior em relação ao que se desenvolveu no nível de energia equivalente, porém na série D1. Em maior aumento - figura 5.7.10-c - o tribofilme ficou melhor evidenciado na superfície do disco.

Figura 5.7.17: Disco pré-condicionado [Ra inicial de $1,2 \mu\text{m}$ (Série D2) após ensaio tribométrico no PV de $10,09 \text{ MPa ms}^{-1}$: (a) topografia de superfície; caracterização por MEV modo *BSE*: (b) superfície de atrito macro e (c) detalhes.

A figura 5.7.18 apresenta a rugosidade média do disco pré-condicionado no Sa de $1,2 \mu\text{m}$ após o ensaio tribométrico. Ao final do ensaio, a rugosidade do disco ensaiado em $3,08 \text{ MPa ms}^{-1}$ foi, estatisticamente, maior em relação a rugosidade

inicial. Este resultado, mais uma vez, é justificado pela possível ação dos elementos estruturais ou das partículas de desgaste na superfície do disco, devido a uma menor pressão de contato.

Para os ensaios realizados em 7,88 e 10,09 MPa ms⁻¹ a rugosidade média do discos foram, estatisticamente, menor em relação a do disco não utilizado. O fato do tribofilme ter se desenvolvido de maneira mais homogênea na condição de 7,88 MPa ms⁻¹, pode ter contribuído para a redução da rugosidade média. Já em 10,09 MPa ms⁻¹, pressupõe-se que a rugosidade diminuiu por causa da maior pressão específica de contato nesta condição, o que contribuiu para eliminar ou reduzir as irregularidades iniciais causadas pela ferramenta de pré-condicionamento.

Figura 5.7.18: Rugosidade média da superfície do disco pré-condicionado [Ra 1,2 µm (Série D2)] após os ensaios tribométricos empregando os PVs de 3,08, 7,88 e 10,09 MPa ms⁻¹.

Os resultados das rugosidades médias da série D2, serão na próxima seção, comparados com os resultados obtidos com as demais séries de ensaios.

5.7.4 Conclusões Parciais

Por meio dos resultados apresentados e discutidos para os ensaios tribométricos realizados empregando os discos pré-condicionados no Sa inicial de 0,2 e 1,2 µm (Série D), seguem as principais conclusões:

- O pré-condicionamento topográfico reduziu a rugosidade média da superfície do disco de 3 μm (tradicional) para 1,2 e 0,2 μm . Essa redução exerceu influência na resposta tribológica (atrito e desgaste) do par atritante (material de fricção e contracorpo de ferro fundido cinzento). Isto é, elevou o nível do coeficiente de atrito e reduziu a taxa de desgaste, principalmente em condições de extrema severidade;
- O pré-condicionamento topográfico reduziu a taxa de desgaste do contracorpo, pois as cristas das ondulações foram eliminadas, eliminando o regime transiente de desgaste. Além do que, a área real de contato aumentou, diminuindo a pressão específica de contato. Como consequência, os danos causados as superfícies de contato foram reduzidos;

Por meio da figura 5.7.19 ver-se que a apresentação dos resultados da Série D (discos pré-condicionados em 0,2 e 1,2 μm) foi também concluída. Na continuidade os resultados obtidos com as diferentes séries de ensaios serão correlacionados.

Inicialmente serão comparados os resultados da série tradicional (A) com os que foram obtidos removendo os debris de desgaste (série B), pois nessas duas séries os ensaios foram realizados em todos os níveis de energia (PV).

Em seguida, serão confrontados os resultados obtidos com todas as séries, porém para os PVs de 3,08, 7,88 e 10,09 MPa ms⁻¹. No final da seção será feita uma discussão dos resultados mais importantes.

Figura 5.7.19: Diagrama da evolução da apresentação dos resultados.

5.8 Séries Laboratoriais: Comparação dos Resultados

5.8.1 Tradicional (Série A) vs Com Remoção dos Debris de Desgaste (Série B)

A figura 5.8.1 compara os **coeficientes de atrito (COF)** médios dos ensaios tribométricos tradicionais versus os que foram obtidos quando os debris de desgaste foram removidos do meio interfacial. Os **COF** médios das duas séries foram plotados em função da temperatura média do ensaio.

Figura 5.8.1: Coeficiente de atrito médio dos ensaios tribométricos tradicionais (Série A) versus com remoção dos debris de desgaste (Série B) em função da temperatura média.

Para ambas as séries, a redução do **COF** médio foi praticamente linear com o aumento da temperatura do ensaio. Em todos os níveis de PV, o **COF** médio do par tribológico foi, estatisticamente, maior quando os ensaios foram realizados removendo os debris de desgaste. Para o PV de 3,08 MPa ms⁻¹ o **COF** médio sem debris foi de 0,45 contra 0,40 para os com debris. Em 7,88 MPa ms⁻¹, com o ensaio tradicional obteve-se um **COF** médio de 0,35 contra 0,40 obtido no ensaio com remoção dos debris. Já na condição mais severa (PV de 11,08 MPa ms⁻¹), o nível do **COF** médio com o ensaio tradicional foi de 0,25, e quando os debris foram removidos, o nível do atrito médio subiu para 0,30. Ressalta-se que as temperaturas

médias dos ensaios com remoção dos debris de desgaste foi menor em relação as obtidas por meio dos ensaios tradicionais.

De acordo com os resultados apresentados nas seções 5.3.3.1 e na 5.5.3, após as três horas de ensaios, em ambas amostras ensaiadas no PV de 3,08 MPa ms⁻¹, os rovings das fibras de vidro encontravam-se expostos à superfície de contato dos materiais de fricção. Entretanto, na ensaiada tradicionalmente, o tribofilme já estava mais desenvolvido, enquanto que no ensaio com remoção o desenvolvimento do tribofilme nos topos desgastados das fibras de vidro foi muito pequeno. Essa diferença justifica o maior nível de **COF** no ensaio da série B.

No PV de 7,88 MPa ms⁻¹, foi notado na superfície do material ensaiado na série A que o tribofilme foi bem desenvolvido sobre os elementos estruturais, e na amostra ensaiada com a remoção dos debris, o tribofilme estava parcialmente formado. Isto é, apenas em determinadas partes dos elementos estruturais, e na apresentação dos resultados da série C, foi visto que quando o tribofilme é bem desenvolvido, o nível do **COF** é reduzido.

Na condição mais severa (PV de 10,09 MPa ms⁻¹), no ensaio tradicional, o tribofilme foi destruído, enquanto que na série B, foi identificado bem desenvolvido. Além do que, a matriz polimérica do material de fricção ensaiado na série A degradou termicamente, enquanto que este fenômeno não ocorreu nos ensaios com a remoção dos debris dos debris. A temperatura do ensaio na série B foi menor (em torno de 260°C) contra 320°C na série A. Conforme já discutido, em maiores níveis de temperatura, maiores são as reações químicas que ocorrem no material de fricção e maior é a quantidade de gases e moléculas de água geradas (CRISTOL-BULTHÉ *et al.*, 2008). Por estas razões que neste nível de energia, o **COF** no ensaio tradicional foi menor em relação ao do ensaio com remoção dos debris.

Acredita-se que a menor taxa de desenvolvimento do tribofilme nas superfícies de contato dos pares tribológicos ensaiados na série B favoreceu a dissipação do calor gerado pelo atrito, e como consequência reduziu a temperatura média do ensaio.

A figura 5.8.2, por sua vez, compara as taxas de desgaste do par tribológico e do disco, ambas obtidas com os ensaios tribométricos tradicional e com os ensaios nos quais os debris de desgaste foram varridos do meio interfacial. As taxas de desgaste são apresentadas em função das temperaturas médias dos ensaios.

Figura 5.8.2: Relação entre as taxas de desgaste obtidas com os ensaios tribométricos tradicionais (Série A) versus com remoção dos debris de desgaste (Série B) em função da temperatura média: (a) par tribológico e (b) disco [A1: $2,05 \text{ ms}^{-1}$; A2: $3,27 \text{ ms}^{-1}$].

A figura 5.8.2-a reforça as evidências já retratadas nas seções 5.3 e 5.5. Ou seja, enquanto que nos ensaios tradicionais houve uma transição do regime de desgaste, de moderado para o severo, nos ensaios com remoção dos debris, a taxa de desgaste apresentou uma correlação linear com a temperatura média do ensaio.

Além disso, com a remoção dos debris, a taxa de desgaste do par tribológico foi reduzida. A diminuição foi de quase 40% no menor nível de energia (PV de 3,08 MPa ms⁻¹) e em torno de 47% para o PV de 10,09 MPa ms⁻¹. Já para o PV de 7,88 MPa ms⁻¹, as taxas de desgaste foram, estatisticamente, equivalentes.

Como traz a figura 5.8.2-b, a taxa de desgaste dos discos utilizados nos ensaios tradicionais foi superior em relação às dos discos empregados nos ensaios com remoção dos debris. Este resultado foi observado para todas as condições de PV.

A figura 5.8.2-b revela também que quando os ensaios foram realizados na maior velocidade de deslizamento (3,27 ms⁻¹ - Séries A2 e B2), para ambas as séries, a taxa de desgaste dos discos foram menores.

Tanto o aumento na capacidade de transmissão de torque da embreagem quanto na sua vida útil, foram otimizados simplesmente removendo parte dos debris de desgaste do meio interfacial. A eliminação dos debris de desgaste do meio interfacial reduz a taxa de desenvolvimento do tribofilme na superfície do material de fricção. Isto deixa os elementos estruturais roving das fibras de vidro e fio de cobre mais expostos a superfície de contato.

Além disso, reduz também o desenvolvimento do tribofilme na superfície de atrito do disco. Com menor quantidade de tribofilme e superfícies mais expostas, acredita-se que são fatores relevantes para elevar o nível do **COF**. Conforme constataram *Kchaou et al.* (2013) e *Sellami et al* (2014), quando os elementos estruturais do material de fricção utilizados em freios ficaram mais expostos a superfície, o nível do **COF** foi maior.

A queda nas taxas de desgaste está associada à redução na ação das partículas de desgaste como abrasivos nas interfaces de contato, que diminui a intensidade dos mecanismos de desgaste como, por exemplo, o de abrasão.

Acredita-se também que a redução na temperatura média do ensaio pode estar associada ao aumento da dissipação do calor gerado por atrito em função da minimização do desenvolvimento do tribofilme nas superfícies atritantes, principalmente na do disco.

5.8.2 Todas as Séries

5.8.2.1 Coeficiente de Atrito

A figura 5.8.3 compara, em função do tempo de ensaio, as evoluções dos **COF** obtidos nas diferentes séries de ensaio quando foi adotado o PV de $3,08 \text{ MPa ms}^{-1}$.

Figura 5.8.3: Evolução dos (a) coeficientes de atrito obtidos nas diferentes séries de ensaios tribométricos no PV de $3,08 \text{ MPa ms}^{-1}$, em função do tempo; (b) detalhe do *running in*.

Quando os debris de desgaste foram removidos do meio interfacial (Série B), o *running in* foi eliminado e o nível do **COF** foi maior e mais estável em relação ao do ensaio tradicional (Série A). Por outro lado, quando os debris foram adicionados (Série C), o nível do **COF** foi significativamente reduzido.

Empregando o disco com superfície inicial pré-condicionada na rugosidade média de 1,2 μm (Série D2), a evolução do **COF** foi praticamente igual à apresentada no ensaio tradicional. No entanto, houve divergência na diferença entre o **COF** máximo e mínimo, sendo menor a variação na série D2. Já com o disco de rugosidade inicial de 0,2 μm (Série D1), o *running in* foi eliminado e o nível do **COF** foi maior e mais estável na primeira metade do ensaio. Entretanto, na metade final, o nível do **COF** foi igual aos obtidos com o ensaio tradicional e com o disco de 1,2 μm .

Nos ensaios realizados com o PV de 7,88 MPa ms⁻¹, a variação entre o **COF** máximo e mínimo, entre o **COF** máximo e médio, e o tempo para atingir o regime permanente, do ensaio com remoção dos debris (Série B) foi um pouco menor em relação ao tradicional (Série A). Nessa condição de ensaio, o **COF** ficou decrescente com a evolução do tempo quando debris de desgaste foram adicionados ao meio interfacial (Série C). O ganho proporcionado pelo pré-condicionando topográfico do disco nesse nível de energia, foi no período de *running in*, que foi reduzido, principalmente na amplitude de queda do **COF** máximo para o mínimo. No regime permanente, o nível do **COF** obtido tanto com o disco de Sa igual a 0,2 μm (Série D1) quanto o de 1,2 μm (Série D2), foi igual ao obtido com o ensaio tradicional (Série A). Esses resultados estão apresentados na figura 5.8.4.

A figura 5.8.5 apresenta as curvas do **COF** que foram obtidas quando os ensaios tribométricos foram realizados no PV de 10,09 MPa ms⁻¹. Nesse nível de energia, a adição de debris na interface de contato (Série C), mais uma vez, reduziu o nível do **COF** do par tribológico.

Já com o disco inicialmente pré-condicionado na rugosidade média de 1,2 μm (Série D2), o nível do **COF** foi equivalente ao obtido no ensaio onde os debris de desgaste foram removidos (Série B). Quando utilizado o disco de rugosidade inicial de 0,2 μm (Série D1), o nível do **COF** foi um pouco superior. Isto é, além de ter minimizado o regime do *running in*, o **COF** após atingir o mínimo, ficou crescente durante toda a evolução do ensaio, além de permanecer num nível superior ao que foi obtido com o ensaio tradicional (Série A).

Figura 5.8.4: Evolução dos (a) coeficientes de atrito obtidos nas diferentes séries de ensaios tribométricos no PV de $7,88 \text{ MPa ms}^{-1}$, em função do tempo; (b) detalhe do *running in*.

A figura 5.8.6, por sua vez, apresenta para todas as séries e para os diferentes níveis de PV os **COF** médios (aqueles determinados somente do regime permanente) em função da temperatura média do ensaio.

Para os três diferentes PVs, as temperaturas médias das Séries B e C foram menores em relação a dos ensaios tradicionais (Série A). Já as temperaturas médias das séries D1 e D2, foram superiores.

Figura 5.8.5: Evolução dos (a) coeficientes de atrito obtidos nas diferentes séries de ensaios tribométricos no PV de $10,09 \text{ MPa ms}^{-1}$, em função do tempo; (b) detalhe do *running in*.

Na figura 5.8.6, ver-se que no PV de $3,08 \text{ MPa ms}^{-1}$ os **COF** médios obtidos com a série de ensaio tradicional (Série A) e com os discos pré-condicionados em 0,2 (Série D1) e 1,2 (Série D2) μm , foram estatisticamente iguais. Entretanto, o **COF** médio foi maior quando os debris foram removidos (Série B) e, menor quando debris de desgaste (Série C) foram adicionados ao meio interfacial.

Figura 5.8.6: Correlação entre os coeficientes de atrito médios obtidos com as diferentes séries de ensaios tribométricos para os diferentes níveis de energia, em função da temperatura média dos ensaios.

Para os ensaios realizados no PV de $7,88 \text{ MPa ms}^{-1}$, a remoção dos debris (Série B) mais uma vez aumentou o **COF** médio, e a adição (Série C) reduziu. Com o disco pré-condicionando em $1,2 \mu\text{m}$ (Série D2), o nível do **COF** médio foi igual ao obtido com o disco tradicional (Série A). No entanto, quando foi utilizado o disco de $0,2 \mu\text{m}$ (Série D1), o nível do **COF** médio foi maior, pois ficou acima de 0,35 para temperaturas próximas a 280°C . No ensaio tradicional, o **COF** médio ficou abaixo de 0,35 com temperatura média de 250°C .

Ganhos realmente significativos foram obtidos no regime severo ($10,09 \text{ MPa ms}^{-1}$) quando os discos pré-condicionados foram adotados. Obtiveram-se níveis de **COF** médios tanto com o disco de $0,2 \mu\text{m}$ (Série D1) quanto o de $1,2 \mu\text{m}$ (Série D2), estatisticamente superiores ao que se obteve com o ensaio tradicional (Série A).

Como revelou a figura 5.8.6, os níveis de **COF** médio atingidos quando utilizados os discos pré-condicionados, foram no mínimo equivalentes ao obtido com os ensaios removendo os debris (Série B). No entanto nessa série a temperatura média foi de 240°C , enquanto que naquelas, as temperaturas médias foram quase 100°C superiores.

5.8.2.2 Taxa de Desgaste

A figura 5.8.7-a traz a correlação entre as taxas de desgaste médias dos pares tribológicos determinadas para as diferentes séries de ensaios tribométricos em função do PV. As taxas de desgaste dos pares tribológicos ensaiados nos PVs de 3,08 e 7,88 MPa ms⁻¹ foram, estatisticamente, equivalentes, com exceção para o par da série C, que teve para as duas condições, taxas de desgaste muito superiores.

Figura 5.8.7: Correlação entre as taxas de desgaste do par tribológico obtidas com as diferentes séries de ensaios, em função do (a) PV e da (b) temperatura média.

Da forma como as taxas de desgaste estão apresentadas na figura 5.8.7-a, concluiu-se que na condição mais severa ($10,09 \text{ MPa ms}^{-1}$) o par tribológico ensaiado na série B (remoção dos debris de desgaste) foi o que teve o desempenho mais satisfatório, pois foi o que apresentou menor taxa de desgaste.

No entanto, quando as taxas de desgaste dos pares tribológicos foram projetadas em função da temperatura média do ensaio, como traz a figura 5.8.7-b, o par tribológico de melhor desempenho no PV de $10,09 \text{ MPa ms}^{-1}$, foi o que utilizou o disco pré-condicionado em $0,2 \mu\text{m}$ (Série D1). A taxa de desgaste desse par foi quase 50% menor em relação a do par ensaiado tradicionalmente (Série A), e apenas 17% superior a do par utilizado na série B (remoção dos debris). Apesar da sua taxa de desgaste ter sido um pouco maior, chegou-se a conclusão de que o seu desempenho foi muito superior, pois, a variação entre as temperaturas das séries B e D1, foi de quase 100°C , sendo maior na série D1 (em torno de 320°C).

O disco inicialmente pré-condicionamento em $1,2 \mu\text{m}$ (Série D2) também favoreceu o desempenho funcional do par tribológico, essencialmente no regime mais severo, pois a taxa de desgaste desse par foi, estatisticamente, menor em relação ao que foi utilizado no ensaio tradicional. Comparado ao par tribológico ensaiado na condição de remoção dos debris de desgaste (Série B), a sua taxa de desgaste foi 50% superior. No entanto, a temperatura de ensaio do par tribológico da Série D2 foi 50% superior em relação ao da série B, e equivalente ao da série A.

As taxas de desgaste obtidas na Série C (adição dos debris de desgaste) para os dois primeiros níveis de PVs foram superiores as obtidas com as demais séries. Já em $10,09 \text{ MPa ms}^{-1}$, a taxa de desgaste da série C foi, estatisticamente, equivalente a da série A, porém com maior dispersão.

A figura 5.8.8 apresenta a taxa de desgaste do disco de ferro fundido cinzento que foi também determinada para as diferentes séries de ensaios tribométricos em função da temperatura média. Quando a condição do ensaio passou de baixa severidade ($3,08 \text{ MPa ms}^{-1}$) para média ($7,88 \text{ MPa ms}^{-1}$), a taxa de desgaste do disco reduziu. Porém aumentou quando a severidade foi de moderada para severa ($10,09 \text{ MPa ms}^{-1}$). Somente para a série C (adição de debris) que a taxa de desgaste não apresentou o comportamento descrito. Nesta série, além de apresentaram alta dispersão, as taxas de desgaste foram equivalentes às obtidas na série A.

Figura 5.8.8: Correlação entre as taxas de desgaste do disco ($\text{mm}^3 \text{MJ}^{-1}$) obtidas nas diferentes séries em função da temperatura média do ensaio - (eixo da ordenada está na escala logarítmica).

O contracorpo de menor taxa de desgaste foi o que teve a sua superfície pré-condicionada em 0,2 μm . O disco pré-condicionado apresentou melhor desempenho em relação ao disco utilizado no ensaio com remoção dos debrís, no PV de 10,09 MPa ms⁻¹, pois além de ter apresentado menor taxa de desgaste, a sua temperatura média de ensaio foi muito superior.

5.8.2.3 Discussão

Como as respostas tribológicas (coeficiente de atrito e taxa de desgaste), obtidas por meio da realização das diferentes séries de ensaios num tribômetro de laboratório, foram mais significativas na condição de maior nível de energia (10,09 MPa ms⁻¹). Desta forma a discussão dos resultados se concentrará para este regime de severidade.

A redução da taxa de desgaste do par tribológico ensaiado na Série B foi favorecida pela eliminação ou redução dos debrís de desgaste do meio interfacial, o que contribuiu para diminuir a ação das partículas abrasivas na interface de contato.

Além do que, com a varredura dos debris, o desenvolvimento do tribofilme foi amenizado. Acredita-se que a presença dos tribofilmes menos espessos nas superfícies atritantes, favoreceu o aumento da dissipação do calor gerado por atrito e como efeito, minimizaram a destruição térmica da matriz polimérica.

Quando os debris de desgaste foram adicionados, as superfícies de atrito tanto do material de fricção quanto a do disco ficaram totalmente recobertas pelo tribofilme desenvolvido - figura 5.7.10-b. Ao mesmo tempo em que a adição das partículas de desgaste contribuiu para aumentar a taxa de desgaste do par tribológico, favoreceu a redução do nível do coeficiente de atrito.

As caracterizações dos rovings das fibras de vidro revelaram para a série B que o tribofilme se desenvolveu em toda a estrutura do roving. Entretanto, os filamentos das fibras de vidro ficaram expostos à superfície de contato. O tribofilme desenvolvido no PV de $10,09 \text{ MPa ms}^{-1}$ apresentou características semelhantes ao que se formou na superfície do material de fricção que foi ensaiado na condição tradicional (Série A) e no PV de $7,88 \text{ MPa ms}^{-1}$. É importante ressaltar que a temperatura média dessas duas condições foi muito próxima, isto é, 237°C para a série B, e 250°C para a série A. A taxa de desgaste revelou que o regime de desgaste que predominou no ensaio realizado na Série B com o PV de $10,09 \text{ MPa ms}^{-1}$, foi o moderado.

Para a Série C o roving foi totalmente recoberto pelo tribofilme, além do que, os filamentos de fibras de vidro não ficaram expostos a superfície de contato. Contudo, o oposto foi observado nas séries D1 e D2, isto é, metade do roving foi recoberto pelo tribofilme e a outra metade ficou totalmente exposta.

Apesar de o tribofilme ter sido observado de forma parcial, não significou que ele se desenvolveu em todo o roving e posteriormente foi rompido. As características apresentadas revelam que o desenvolvimento do tribofilme ocorreu somente em parte do roving, devido a baixa geração de debris, como revelaram os resultados da taxa de desgaste.

Com a redução da rugosidade média da superfície do disco, a área real de contato aumentou. Com isso a pressão específica de contato diminuiu, e como efeito a desestabilização do tribofilme também foi reduzida, principalmente nas condições de extrema severidade.

Outro fator positivo em relação a diminuição ou eliminação dos picos das irregularidades na superfície do disco foi a redução da ação destes contra a superfície do material de fricção, o que gerou menor quantidade de partículas de desgaste. Além do que, os vales das ondulações na topografia do disco foram eliminados e como consequência os debrís foram expulsos do meio interfacial pois não tinham onde se alojar.

Acredita-se também que a maior exposição das fibras de vidro favoreceu o aumento do coeficiente de atrito, principalmente na faixa de temperatura atingida para o PV de $10,09 \text{ MPa ms}^{-1}$. Conforme demonstraram *Kchaou et al.* (2013) e *Sellami et al* (2014), quando as fibras de vidro ficaram mais expostas a superfície de contato do material fricção para freios, maiores níveis de atrito foram obtidos.

Analogia semelhante foi realizada quando se caracterizou as superfícies dos fios de cobre. O fio de cobre apareceu mais deformado na Série B. Isto tem certo sentido, uma vez que, removendo os debrís, a superfície do fio ficou mais exposta e o contato prevaleceu por meio dessas superfícies, submetendo o fio a um maior grau de deformação.

Já quando os debrís foram adicionados ao meio interfacial, um tribofilme aparentemente mais espesso se desenvolveu sobre a superfície do fio. Com isso, o fio foi protegido e não deformou tanto quanto ao observado para a Série B.

Nas séries D1 e D2 o tribofilme também se desenvolveu sobre o fio de cobre, e fragmentos de fibras de vidro foram aderidos à sua superfície. O tribofilme desenvolvido na superfície do material de fricção quando os ensaios foram realizados na série D2, tem características bastante semelhantes com as do tribofilme desenvolvido na série B. As similaridades entre os tribofilmes podem justificar as equivalências entre os coeficientes de atrito médios.

A figura 5.8.9 revela que a correlação entre os resultados das diferentes séries foi igualmente concluída.

Figura 5.8.9: Diagrama da evolução da apresentação dos resultados.

No Capítulo 6 serão descritas as conclusões mais importantes que foram extraídas por meio da realização dessa tese de doutorado.

Capítulo 6

CONCLUSÕES FINAIS

De acordo com os resultados retratados, analisados e discutidos, são apresentadas sinteticamente as conclusões mais significativas deste trabalho:

- A aplicação da tribologia ao estudo e desenvolvimento de materiais para embreagens permitiu desenvolver uma nova metodologia para reproduzir em laboratório com ensaios simplificados resultados similares aos que são observados em campo em regimes de maiores severidades. Além do que, possibilitou compreender os fenômenos tribológicos operantes na interface de contato entre um material de fricção orgânico e um contracorpo metálico de ferro fundido cinzento;
- Os ensaios tribométricos tradicionais, com remoção e adição de debris de desgaste ao meio interfacial, revelaram que o tribofilme efetivamente exerce influência no desempenho funcional da embreagem;
- Em relação aos resultados obtidos com os ensaios tradicionais, a remoção dos debris de desgaste proporcionou um aumento no nível do coeficiente de atrito e uma redução na taxa de desgaste do par tribológico, enquanto que a adição de debris reduziu o nível do coeficiente de atrito e elevou a taxa de desgaste;
- Por meio dos ensaios tribométricos tradicionais quando empregado PVs iguais ($4,92 \text{ MPa ms}^{-1}$), porém diferentes parâmetros de ensaio, as temperaturas dos ensaios, os níveis dos coeficientes de atrito e as taxas de desgaste dos pares tribológicos, foram equivalentes. Todavia, com a

remoção dos debris de desgaste, para os mesmos PVs, a resposta tribológica foi diferente; ou seja, diferentes níveis de temperatura, coeficiente de atrito e taxa de desgaste foram obtidos. Essas evidências frisaram a influência do tribofilme no desempenho funcional da embreagem;

- O pré-condicionamento topográfico da superfície do disco potencializou o desempenho funcional do par tribológico, principalmente em regimes de trabalho de alta severidade, onde elevados níveis de energia e temperaturas são atingidos;
- Com o processo de pré-condicionamento topográfico do disco, a rugosidade média da superfície do contracorpo foi reduzida de 3 μm (tradicional) para 1,2 e 0,2 μm . Essa redução exerceu influência na resposta tribológica (atrito e desgaste) do par atritante (material de fricção e contracorpo de ferro fundido cinzento). Isto é, elevou o nível do coeficiente de atrito e reduziu a taxa de desgaste, em condições de extrema severidade;
- O pré-condicionamento topográfico da superfície do disco proporcionou um coeficiente de atrito mais estável no período de *running in*, indicando potencialidade de transmissão de torque de forma mais regular e eficiente, principalmente nos primeiros ciclos de acoplamento, onde os níveis de atrito geralmente são menores, pois a superfície ainda não foi totalmente amaciada;
- O contato por deslizamento entre as superfícies do par tribológico ocorre predominantemente por meio dos rovings das fibras de vidro e do fio de cobre, e como efeito o tribofilme se desenvolve mais intensamente sobre esses elementos;
- O mecanismo de desenvolvimento do tribofilme é dependente da distribuição e da disposição dos elementos estruturais do material de fricção, que desempenham o papel de platôs primários de contato, favorecendo a geração dos platôs secundários (tribofilme);

- A natureza do tribofilme (microestrutura, morfologia e espessura) e propriedades mecânicas dependem do nível da severidade da aplicação;
- O desenvolvimento do tribofilme torna-se mais intenso a medida que o nível da severidade se eleva, porém até determinado nível, pois em condições de extrema severidade, onde elevadas temperaturas são alcançadas, a estrutura do tribofilme tende a se deteriorar e romper;
- Tribofilmes descontínuos e de baixa espessura são gerados quando baixos e altos níveis de energias são empregados, enquanto que em níveis intermediários, o tribofilme tende a ser mais espesso e contínuo;
- Tribofilmes contínuos tendem a reduzir a taxa de desgaste do par tribológico, do contracorpo, e os níveis do coeficiente de atrito, mas deixando esses mais estáveis;
- O tribofilme controla a transição do regime moderado de desgaste para o severo, e a sua continuidade depende do PV. Maiores produtos PV aumentam a temperatura na interface, desestabilizando e deteriorando o tribofilme e fazendo com que se rompam. O rompimento do tribofilme ocasiona a transição no regime desgaste, aumentando da taxa de desgaste em razão da geração de partículas de desgaste de durezas superiores;
- Os ensaios tribométricos na configuração pino-disco mostraram-se capazes de reproduzir de forma simplificada e acelerada, as diferentes condições operacionais ou os diferentes regimes de severidade das aplicações veiculares em campo;
- Ensaios tribométricos reproduziram de maneira equivalente os diferentes mecanismos de desenvolvimento do tribofilme, nos diferentes elementos estruturais do material de fricção (matriz polimérica, roving das fibras de vidro e fio de cobre);

- Ensaios laboratorial empregando o PV de $3,08 \text{ MPa ms}^{-1}$ simula uma condição de trabalho de baixa severidade em campo, enquanto que o PV de $7,88 \text{ MPa ms}^{-1}$ equivale a uma condição de média severidade;
- Ainda que determinadas divergências em relação aos mecanismos identificados em campo no regime de alta severidade com o reproduzido no tribômetro adotando o PV de $10,09 \text{ MPa ms}^{-1}$ tenham sido observadas, concluiu-se que essa condição laboratorial simula o desempenho funcional da embreagem em extrema severidade. Eventualmente, o conjunto embreagem coletado não tenha sido o mais representativo para a severidade simulada na bancada;
- O modelo de ensaio desenvolvido pelo Grupo ZF BU TNB - CV em parceria tecnológica com o LTM-UFU (FERNANDES, 2007) foi validado quanto a reprodução dos mecanismos de desenvolvimento do tribofilme adotando o PV de $3,08 \text{ MPa ms}^{-1}$. Naquela ocasião o modelo foi validado somente para a resposta tribológica do tribossistema (atrito e desgaste), quando empregada a força normal de 200N e a velocidade de deslizamento de $2,05 \text{ ms}^{-1}$, que corresponde ao produto PV de $3,08 \text{ MPa ms}^{-1}$;
- O tribômetro mostrou-se ser uma ferramenta alternativa e útil para o estudo e desenvolvimento de novos materiais para embreagens automotivas, principalmente em níveis de energia mais elevados (condições mais severas), de forma mais simples e com o tempo dos ensaios reduzidos, pois houve paridade na transferência das características do tribossistema do modelo de ensaio para o da condição real;
- A maior contribuição obtida com esse método é que quando empregado com sucesso, possibilitará prever o desempenho funcional da embreagem (atrito e desgaste) em condições mais severas após 3 horas de ensaio, enquanto que no dinamômetro são necessárias 240 horas (10 dias) e no campo 4320 horas (180 dias). Além do que, os custos dos ensaios poderão ser reduzidos, pois haverá menor consumo de energia elétrica e por utilizar protótipos mais simplificados e de fácil confecção.

Capítulo 7

SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Como trabalhos complementares ao realizado nesta tese, sugerem-se:

- Caracterizar um conjunto embreagem que foi ensaiado em campo numa condição extremamente severa, para identificar os mecanismos de desenvolvimento, estabilidade e deterioração do tribofilme nessa condição, para posteriores correlações com os mecanismos reproduzidos em laboratório no PV de $10,09 \text{ MPa ms}^{-1}$, e assim validar essa condição de ensaio laboratorial;
- Realizar um estudo mais aprofundado do coeficiente de atrito e da taxa de desgaste no período de *running in*, com a realização de ensaios laboratoriais interrompidos, mais detalhados e aprofundados a fim de compreender os fenômenos tribológicos inerentes no comportamento instável do atrito;
- Estudar a relação da composição química do material de fricção com a composição química do tribofilme a fim de identificar quais elementos químicos contribuem para o bom desempenho funcional da embreagem, e quais são adversos;
- Caracterizar o tribofilme por outras técnicas analíticas como espectroscopia Raman, difratometria de raios X e FIB (*focus ion beam*) para investigar se a microestrutura é cristalina ou amorfa. Ademais, avaliar se a composição química do tribofilme difere do material de fricção, e se há reações de natureza tribo-químicas e quais reações ocorrem durante o contato por deslizamento;

- Investigar a influência o nível de severidade do ensaio na morfologia das partículas de desgaste geradas e, por consequência com as características do tribofilme desenvolvido;
- Estabelecer uma correlação entre a temperatura do ensaio com a composição química do tribofilme e, por conseguinte com a resposta tribológica do par (atrito e desgaste);
- Caracterizar e correlacionar a topografia de superfície do material de fricção com os diferentes regimes de severidade e verificar se há relação com resultados da literatura, isto é, em regimes moderados baixa rugosidade e nos severos alta rugosidade superficial;
- Avaliar o efeito do desenvolvimento do tribofilme em condição de alta severidade versus a taxa de desgaste em diferentes estágios do regime de *running in*.
- Caracterizar as diferentes amostras que foram ensaiadas nos PVs de 4,92 MPa ms⁻¹ (porém diferentes parâmetros de ensaios) para validar a hipótese de que o tribofilme de fato é o responsável pelo equivalente comportamento tribológico (atrito e desgaste) obtidos com os ensaios tradicionais (Série A) e, os diferentes resultados obtidos quando os debris de desgaste foram removidos do meio interfacial (Série B);
- Caracterizar em seção transversal os tribofilmes que foram desenvolvidos nas amostras ensaiadas nas demais séries de ensaios tribométricos (Séries B, C, D1 e D2) a fim de correlacionar as características do tribofilme com o desempenho funcional do par tribológico;
- Correlacionar os resultados do módulo elástico do tribofilme com a a sua composição química para melhor compreender os resultados obtidos para os módulos de elasticidade do tribofilme desenvolvido nos diferentes regimes de severidade, tanto em campo quanto em laboratório.

Capítulo 8

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDI, 2009. **Estudo prospectivo setorial automotivo**. Relatório Final, Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI), Brasília, D.F, 2009, 142 p.

ANFAP, 2013. Associação Nacional dos Fabricantes de Auto-peças (ANFAP). Disponível em: <<http://www.revistamercadoautomotivo.com.br/Perspectivas-para-o-setor-de-reposicao-de-autopecas-em-2014/646/r/>>. Acesso em: 11 out. 2015.

ANFAVEA, 2014. **Anuário da Indústria Automobilística Brasileira**. Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA), São Paulo – S.P., 2014, 156p.

ANFAVEA, 2015. **Anuário da Indústria Automobilística Brasileira**. Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA), São Paulo – S.P., 2015, 156p.

BAHADUR, S. The development of transfer layers and their role in polymer tribology. **Wear**, v. 245, p. 92-99, 2000.

BETTEN, J. *et al.* Elastic properties of friction materials. **SAE International**, 2003-01-3333.

BIAN, G. e WU, H. Friction performance of carbon/silicon carbide ceramic composite brakes in ambient air and water spray environment. **Tribology International**, v. 92, p. 1-11, 2015.

BIJWE, J., MAJUMDAR, N.N. e SATAPATHY, B.K. Influence of modified phenolic resins on the fade and recovery behaviour of friction materials. **Wear**, v. 259, p. 1068–1078, 2005.

BLAU, P. J. On the nature of running-in. **Tribology International**, v. 38, p. 1007–1012, 2005.

BLAU, P. J. e JOLLY, B. C. Wear of truck brake lining materials using three different test methods. **Wear**, v. 259, p. 1022–1030, 2005.

CENTRO AUTOMOTIVO, 20???. **Garage centor automotivo**. Disponível em: <
http://garagecentroautomotivo.com.br/comercio/product_info.php?products_id=34>. Acesso em: 11 out. 2015.

CG AUTO, 2008. **Centro Gráfico Automotivo**. Disponível em: <
<http://www.cg-auto.com.br/forum/viewtopic.php?f=3&t=372>>. Acesso em: 11 out. 2015.

CHAN, D.; STACHOWIAK, G. W. **Review of automotive brake friction materials**. School of Mechanical Engineering, University of Western Australia, Crawley, Australia, p. 953-966, 2004.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, 7ª edição, 2005, 599 p.

CHO, M. H. *et al.* The role of raw material ingredients of brake linings on the formation of transfer film and friction characteristics. **SAE Technical Paper 2001-01-3130**, 2001.

CHO *et al.*, M.H. Effects of ingredients on tribological characteristics of a brake lining: an experimental case study. **Wear**, v. 258, p. 1682–1687, 2005.

CHO, M. H. *et al.* The role of transfer layers on friction characteristics in the sliding interface between friction materials against gray iron brake disks. **Tribology Letters**, v 20, n° 2, p. 101-108, 2005.

CHO *et al.*, K.H. The size effect of zircon particles on the friction characteristics of brake lining materials. **Wear**, v. 264, p. 291–297, 2008.

CNI, 2012. **Indústria Automobilística e Sustentabilidade**. Confederação Nacional das Indústrias (CNI), Brasília – D.F., 2012, 45p.

CONFESSOR, W. **Tendências do setor automotivo brasileiro: Plataformar globais**. Monografia - Pós-graduação em Engenharia Automotiva. Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano – S.P., 2012, 65 p.

CRISTOL-BULTHÉ *et al.*, A. Mechanical and chemical investigation of the temperature influence on the tribological mechanisms occurring in OMC/cast iron friction contact. **Wear**, v. 264, p. 815–825, 2008.

CZICHOS, H. The principles of system analysis and their application to tribology. **ASLE Transactions**, v. 17, p. 300-305, 1974.

CZICHOS, H. "Polymer wear and its control". In: Lee LH, **ACS Symp Series**, p. 287–293, 1985.

Da SILVA, C. H., e SINATORA, A. Development of severity parameter for wear study of thermoplastics. **Wear**, v. 263, p. 957-964, 2007.

DEDAVID, B. A., GOMES, C. I, e MACHADO, G. Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparações de amostra. EdiPUCRS, 2007, 60p.

DOWSON, D. **History of tribology**, London: Longman, 1979. 677 pp.

DOWSON, D., GODET, M., e TAYLOR, C. M. The wear of non-metallic materials. Proc. 3rd Leeds-Lyon Symposium on Tribology, **Mechanical Engineering Publications**, p. 99-102, 1976.

DREXL, H.J. Clutch judder - Causes and Countermeasures. **Technische Konferenz SITV**, v. 90, p. 7-46, 1990.

DREXL, H. J. **Motor Vehicle Clutches**. 1^o ed., Germany, Ludwig Auer, Donauwörth, 1998.

EL-TAYEB, N.S.M, e LIEW, K.W. Effect of water spray on friction and wear behaviour of non-commercial and commercial brake pad materials. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 208, p. 135–144, 2008.

ERIKSSON, M.; BERGMAN, F.; JACOBSON, S. M. Surface characterization of brake pads after running under silent and squealing conditions. **Wear**, v. 232, p. 163–167, 1999.

ERIKSSON, M. e JACOBSON, S. Tribological surfaces of organic brake pads. **Tribology International**, v. 33, p. 817–827, 2000.

ERIKSSON, M.; LORD, J.; JACOBSON, S. Wear and contact conditions of brake pads: dynamical in situ studies of pad on glass. **Wear**, v. 249, p. 272-278, 2001.

ERIKSSON, M.; BERGMAN, F.; JACOBSON, S. M. On the nature of tribological contact in automotive brakes. **Wear**, v. 252, p. 26–36, 2002.

EVANS, D. C., e LANCASTER, J. K. Treatise on Materials Science and Tecnology. **Wear**, v. 13, p 85-139,1979.

FERNANDES, G. P. **Aplicação da Tribologia na Pesquisa e Desenvolvimento de Materiais de Fricção para Embreagens Automotivas**. 2007. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-M.G, 2007.

FERNANDES, G. P. *et al.* Correlation between laboratory small scale pin-on-disc and full scale bench tests of dry clutches. **SAE Paper 2007-01-2937**, 2007.

FERNANDES, G. P. *et al.* Correlation between laboratory small scale pin on disc and full scale bench tests of dry clutches. **World Tribology Congress**, September, Kyoto, Japan, 2009.

FERNANDES, G. P. *et al.* Efeito da alteração microestrutural do ferro fundido nos mecanismos de desgaste dos conjuntos de embreagens que foram submetidas a uso em campo. **64° Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais**, 13 a 17 de Julho, Expominas - Belo Horizonte, M.G – Brasil, 2010.

FERNANDES, G. P. *et al.* Efeito da evolução da topografia de superfície no comportamento tribológico de materiais de fricção para embreagens. **64° Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais**, 13 a 17 de Julho, Expominas - Belo Horizonte, M.G – Brasil, 2010-a.

FERNANDES, G. P. *et al.* Caracterização topográfica de superfície: estabelecimento de critérios para a seleção da componente efetivamente representativa no comportamento tribológico de materiais de fricção. **64° Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais**, 13 a 17 de Julho, Expominas - Belo Horizonte, M.G – Brasil, 2010-b.

FILIP, P.; WEISS, Z.; RAFAJA, D. On friction layer formation in polymer matrix composite materials for brake application. **Wear**, v. 252, p. 189-198, 2002.

FRIEDRICH, K., KARGER-KOCSIS, J., e LU, Z. Effects of steel counterface on the friction and wear of dry sliding conditions. **Wear**, v. 148, p. 235-247, 1991.

GODET, M. The third body approach: a mechanical view of wear. **Wear**, v. 100, p. 437-452, 1984.

GODET, M. Third-bodies in tribology. **Wear**, v. 136, p. 29-45, 1990.

GORDON, P. The temper colors on steel. **Journal of Heat Treating**, v. 1, p. 93-93, 1979.

GREGORI, I. R. S.; ZANOTTO, P. S.; HAERTEL JUNIOR, W. Definition on the relationship between clutch facing on vehicle and bench testing using reliability and DOE. **SAE Paper 2005-01-1766**, 2005.

GRUPO ZF BU TNB - CV, 2015. Disponível em:

< <http://www.zf-world.com/ml/SA/TNB/index.html> >. Acesso em: 08 mar. 2016.

GUESSER, W. L. e GUEDES, L. C. Desenvolvimentos recentes em ferros fundidos aplicados à indústria automobilística. **Trabalho apresentado no Seminário da Associação de Engenharia Automotiva - AEA**, São Paulo, 1997.

HIGGINS, R. A. **Engineering Metallurgy**. 3rd ed. London: The English Universities Press, 1971, 363p.

HINRICHS *et al.*, R. A TEM snapshot of magnetite formation in brakes: The role of the disc's cast iron graphite lamellae in third body formation. **Wear**, v. 270, p. 365–370, 2011.

HOLMBERG, K., ANDERSSON, P. e ERDEMIR, A. Global energy consumption due to friction in passenger cars. **Tribology International**, v. 47, p. 221–234, 2012.

HOW THE BRAKING SYSTEM WORKS, 2015. How a car works. Disponível em: <<http://www.howacarworks.com/basics/how-the-braking-system-works>>. Acesso em: 11 out. 2015.

HUTCHINGS, I. M. **Tribology: Friction and wear of engineering materials**. CRC Press Inc., Boca Raton, USA, 1992, 273p.

JACKO, M. G., TSANG, P. H. S., e RHEE, S. K. Wear debris compaction and friction film formation of polymer composites. **Wear**, v. 133, p. 23–38, 1989.

JACKO, M. G. e RHEE, S. K. Brake linings and clutch facings. **Encyclopedia of chemical technology**, v. 4, 4ª edição, 1992.

JAIN, V. K., e BAHADUR, S. Development of a wear equation for polymer-metal sliding in terms of the fatigue and topography of the sliding surfaces. **Wear**, v. 60, p. 237-248, 1980.

JOST, P. Lubrication (Tribology). **Education and Research Report**. London: Dept. Education and Science, Her Majesty's Stationary Office, 1966.

JOST, H. P. Tribology – origin and future. **Wear**, v. 136, p.1-17, 1990

JOST, H. P. Tribology Micro & Macro Economics: A Road to Economic Savings. **Tribology & Lubrication Technology**, vol. 61, p. 18, 2005.

KCHAOU *et al*, M. Friction characteristics of a brake friction material under different braking conditions. **Material and Design**, v. 52, p. 533-540, 2013.

KIM, S. J. e JANG, H. Friction and wear of friction materials containing two different phenolic resins reinforced with aramid pulp. **Tribology International**, v. 33, p.477–484, 2000.

KIM et al, S. J. High Temperature Wear Properties of Multiphase Composite: The Role of Transfer Film. **Materials Science Forum**, v. 449-452, p. 81-84, 2004.

KUMAR *et al.*, M. Hybrid composite friction materials reinforced with combination of potassium titanate whiskers and aramid fibre: Assessment of fade and recovery performance. **Tribology International**, v. 44, p. 359–367, 2011.

LIU, T.; RHEE, S. K.; LAWSON, K. L. A study of wear rates and transfer films of friction materials. **Wear**, v. 60, p.1-12, 1980.

LIN, C. **The Japanese Automotive Industry: Recent Developments and Future Competitive Outlook**. The Office for the Study of Automotive Transportation. The University of Michigan Transportation Research Institute, 1994.

MATJEKA *et al.*, V. Effects of silicon carbide particle sizes on friction-wear properties of friction composites designed for car brake lining applications. **Tribology International**, v. 43, p. 144–151, 2010.

MIZUTANI, K. M. **Análise do mercado automotivo brasileiro para ampliação de portfolio de uma fabricante de autopeças**. Trabalho de Conclusão de Curso, Engenharia de Produção, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo – S.P., 2011, 175 p.

MULLER, M.; OSTERMEYER, G. P. A Cellular Automaton model to describe the three-dimensional friction and wear mechanism of brake systems. **Wear**, v. 263, p. 1175–1188, 2007.

MULLER, M.; OSTERMEYER, G. P. New insights into the tribology of brake systems. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers**, Journal of Automobile Engineering, v. 222, Part D, p. 1167-1200, 2008.

Norma ABNT NBR 6050, **Embreagem**, março 1995.

Norma DIN 50320 (1979-12).

OSTERLE, W.; GRIEPENTROG, M.; GROSS, T.; URBAN, I. Chemical and micro structural changes induced by friction and wear of brakes. **Wear**, v. 251, p. 1469-1476, 2001.

OSTERLE, W.; URBAN, I. Friction layers and friction films on PMC brake pads. **Wear**, v. 257, p. 215–226, 2004.

OSTERLE, W.; URBAN, I. Third body formation on brake pads and rotors. **Tribology International**, v. 39, p. 401-408, 2006.

OSTERMEYER, G. P. On the dynamics of the friction coefficient. **Wear**, v. 254, p. 852–858, 2003.

PANTAZOPOULOS, G. *et al*, 2015. Wear and Degradation Modes in Selected Vehicle Tribosystems. **Tribology in Industry**, vol. 37, n° 1, p. 72-80, 2015.

PEUGEOT RCZ – POWERTRAIN, 2010. Disponível em:
<<http://www.seriouswheels.com/2010/nopq/2010-Peugeot-RCZ-Cutaway-Powertrain-1920x1440.htm>> Acesso em: 29 nov. 2015.

RABINOVICZ, E. The least wear. **Wear**, v. 100, p. 533-541, 1984.

RADZIKOWSKA, J. M. Effect of specimen preparation on evaluation of cast iron microstructures. **Materials Characterization**, v. 54, p. 287–304, 2005.

REVISTA AUTOMOTIVE BUSINESS, **Edição Especial Powertrain**, ano 2, n° 6, Novembro 2010.

RHEE, S. K. Wear equation for polymers sliding against metal surfaces. **Wear**, v. 16, p. 431-445, 1970;

RIABI, A.R. e ALPAS, A.T. Wear map for grey cast iron. **Wear**, v. 255, p. 401–409, 2003.

RIELLO NETO, N. J. **A evolução dos polímeros na indústria automobilística**. Curso de Tecnologia em Polímeros, Faculdade de Tecnologia de Sorocaba, Sorocaba – SP, 2012, 53p.

ROUBICEK *et al*, V. Wear and environmental aspects of composite materials for automotive braking industry. **Wear**, v. 265, p. 167–175, 2008.

SAFFAR, A., SHOJAEI, A. Effect of rubber component on the performance of brake friction materials. **Wear**, v. 274– 275, p. 286– 297, 2012.

SELLAMI *et al*, A. Study of the interaction between microstructure, mechanical and tribo-performance of a commercial brake lining material. **Materials and Design**, v. 59, p. 84–93, 2014.

STACHOWIAK, G. W. and BATCHELOR, A. W. **Engineering tribology**. Butterworth – Heinemann, 2ª edition, 2001, 744p.

STRAFFELINI, G., e MAINES, L. The relationship between wear of semimetallic friction materials and pearlitic cast iron in dry sliding. **Wear**, v. 307, p. 75-80, 2013.

SUA PESQUISA.COM, 2014. Disponível em:

< <http://www.suapesquisa.com/economia> >. Acesso em: 18 nov. 2015

SUGISHITA, J., e FUJIYOSHI, S. The effect of cast iron graphite on friction and wear performance iii: the lubricating effect of graphite under rolling sliding contacts. **Wear**, v.77, p. 181-193, 1982.

TALIB, R.J.; MUCHTAR, A.; AZHARI, C. H. Microstructural characteristics on the surface and subsurface of semimetallic automotive friction materials during braking process. **Materials Processing Technology**, v. 140, p. 694–699, 2003.

UNAL, H., SEN, U., e MIMAROGLU, A. Dry sliding wear characteristics of some industrial polymers against steel counterface. *Tribology International*, v. 37, p. 727–732, 2004.

WELSH, N. C. The dry wear of steel I. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, v. A257, p. 31-72, 1964.

WIKIPEDIA, 2015. **List of countries by motor vehicle production**. Disponível em:

<https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_countries_by_motor_vehicle_production>.

Acesso em: 11 out. 2015.

WIKIPEDIA, 2015-a. **Indústria automobilística no Brasil**. Disponível em:

<https://pt.wikipedia.org/wiki/Ind%C3%BAstria_automobil%C3%ADstica_no_Brasil>.

Acesso em: 11 out. 2015.

WIKIPEDIA-b, 20??. **Thin-film interference**. Disponível em

<http://en.wikipedia.org/wiki/Thin-film_interference>. Acesso em: 11 out. 2015.

WIKIPEDIA-c, 20??. **Tempering**. Disponível em:

<[http://en.wikipedia.org/wiki/Tempering_\(metallurgy\)#](http://en.wikipedia.org/wiki/Tempering_(metallurgy)#)>. Acesso em: 11 out. 2015.

WIRTH, A.; EGGLESTON, D.; WHITAKER, R. A fundamental tribochemical study of the third body layer formed during automotive friction braking. **Wear**, v. 179, p.75–81, 1994.

ZHAO, Q., BAHADUR, S. The mechanism of filler action and criterion of filler selection for reducing wear. **Wear**, v. 225-229, p. 660-668, 1999.

ZUM GAHR, K., H. **Microstructure and Wear of Materials**. Netherlands: Elsevier Science Publishers, 1987.

Apêndice 1

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA ESCOVA DE REMOÇÃO DOS DEBRIS DE DESGASTE

A figura A_1.1-a apresenta a evolução da temperatura em função do tempo do ensaio, monitorada com o disco girando em 750 rpm sem nenhuma carga aplicada, e sem e com a escova varrendo a superfície ativa do disco. A figura A_1.1-b apresenta a evolução da temperatura nas mesmas condições, porém com o disco rotacionando em 1200 rpm.

Em ambas as rotações e nos três ensaios, a temperatura não variou com o passar do tempo quando o experimento foi realizado sem a ação da escova de remoção dos debris. Quando a escova foi acionada, nos três ensaios e para as duas rotações, o nível da temperatura subiu, estabilizando após 40 minutos de ensaio. A diferença entre os níveis de temperatura foi em torno de 7°C.

Para o coeficiente de atrito, como revelam as figuras A_1.2 e A_1.3, constatou-se que não houve diferença significativa na sua variação ao longo do tempo quando o monitoramento feito sem e com a ação da escova de remoção dos debris sobre a superfície do disco. Essa conclusão foi obtida para as duas rotações avaliadas.

A variação no coeficiente de atrito ocorreu na segunda casa decimal e os valores máximos monitorados foram de 0,016 e 0,02 para as rotações de 750 e 1200 rpm respectivamente. Pode-se afirmar que as oscilações observadas nas curvas dos coeficientes de atrito, estão relacionadas à dinâmica do equipamento tribômetro, e que não foram geradas devido a atuação da escova de remoção dos debris de desgaste sobre a superfície do disco.

Figura A_1.1: Evolução da temperatura em função do tempo para os ensaios realizados sem aplicação da força normal sobre o disco e com a escova de remoção dos debris varrendo a sua superfície nas rotações de: (a) 750 rpm e (b) 1200 rpm.

Figura A_1.2: Evolução do coeficiente de atrito em função do tempo para os ensaios realizados sem aplicação da força normal sobre o disco e com a escova de remoção dos debris varrendo a sua superfície na rotação de 750 rpm: (a) macro e (b) detalhes.

Figura A_1.3: Evolução do coeficiente de atrito em função do tempo para os ensaios realizados sem aplicação da força normal sobre o disco e com a escova de remoção dos debris varrendo a sua superfície na rotação de 1200 rpm: (a) macro e (b) detalhes.

Apêndice 2

CARACTERIZAÇÃO DOS DEBRIS DE DESGASTE

Na figura A_2.1 é apresentada a morfologia, obtida por MEV no modo *BSE*, dos debrís de desgaste coletados durante os ensaios dinamométrico e tribométrico no procedimento de baixa energia.

Figura A_2.1: Caracterização morfológica e composicional por MEV modo *BSE* dos debrís de desgaste gerados durante os ensaios: (a-c-e) no dinamômetro em baixa energia e (b-d-f) no tribômetro no PV de $3,08 \text{ MPa ms}^{-1}$ (equivalente ao ensaio dinamométrico); espectro qualitativo EDS de raios X dos debrís (g) dinamométrico e (h) tribométrico.

A figura A_2.1 mostrou que as morfologias dos debrís de desgaste foram semelhantes, e os espectros qualitativos EDS de raios X revelaram que a composição química também apresentaram equivalências. Ressalta-se, no entanto que a intensidade de todos os elementos químicos detectados nos debrís de desgaste que foram coletados dos ensaios tribométricos, foi maior.

Com essas análises ficou constatado que os debrís de desgaste coletados dos ensaios dinamométricos poderiam ser adicionados aos ensaios tribométricos em razão das equivalências observadas para a morfologia e composição química.

Apêndice 3

METODOLOGIAS DE PROTEÇÃO DO TRIBOFILME

A figura A_3.1-a apresenta uma amostra de material de fricção que foi ensaiada no tribômetro e, na sequência foi submetida ao processo de deposição de níquel químico (figura A_3.1-b), para proteger o tribofilme durante o processo de preparação metalográfica para possibilitar a caracterização em seção transversal.

Figura A_3.1: Amostra do material de fricção (a) após o ensaio tribométrico e (b) após o processo de deposição do níquel químico; (c - f) MEV modo *BSE* evidenciando as falhas da deposição em função a existência dos rovings das fibras de vidro.

Como revelam as figuras A_3.1-c a A_3.1-f, por meio das caracterizações realizadas por MEV no modo *BSE* em seção transversal, a deposição do níquel na superfície ativa do material de fricção não foi eficiente. A primeira razão é por causa da superfície não metálica do material de fricção, e esse processo é recomendado além de ser mais apropriado para materiais da família dos metálicos. Segundo, a microestrutura do material de fricção é muito heterogênea, principalmente por causa da existência dos rovings das fibras de vidro, que comprometem a deposição.

Na figura A_3.2-a é apresentado dois exemplos dos outros processos que foram adotados na tentativa de proteger o tribofilme. Nesses foram empregados diversos tipos de adesivos industriais. No entanto, essa metodologia também não foi efetiva. Como mostra a figura A_3.2-b, bolhas foram geradas durante a cura do adesivo, comprometendo as características da microestrutura do material de fricção e do tribofilme. Já com outro tipo de adesivo (figura A_3.2-c) as suas cargas de reforço eram muito semelhantes as do material de fricção, como mostra a figura A_3.2-d.

Figura A_3.2: Tentativa de proteção do tribofilme utilizando adesivos industriais.

Apêndice 4

CARACTERIZAÇÃO DA SUPERFÍCIE DE ATRITO DA PLACA DE PRESSÃO ENSAIADA EM CAMPO

Nesta seção serão apresentados os resultados das caracterizações realizadas nas superfícies das placas de pressão que foram ensaiadas em campo nos diferentes regimes de severidade (baixo, média e alta severidade).

Foram realizadas caracterizações da topografia da superfície, dos mecanismos de desgaste por MEV, dos elementos químicos existentes no tribofilme por meio de análises qualitativas por EDS, e da microestrutura.

A_4.1 Regime de Baixa Severidade

A figura A_4.1-a apresenta a topografia da superfície da placa de pressão após o ensaio em campo no regime de baixa severidade. As cristas das ondulações aparentemente desgastadas foram observadas. Já por meio da caracterização por MEV no modo *BSE* foram observadas regiões clara e escura, como mostra de forma macro a figura A_4.1-b. As características desta, reveladas em maior aumento na figura A_4.1-c, evidenciaram a transferência e adesão de material à superfície da placa. Já a região clara representa a superfície que permaneceu exposta após o ensaio. Observa-se que a proporção destas regiões é superior em relação as escuras.

A análise qualitativa por EDS no ponto A (figura A_4.1-d) revelou em elevada intensidade o elemento químico oxigênio, e em intensidades iguais porém inferiores, o ferro e o cobre. Identificou-se em baixa intensidade o alumínio, o silício e o enxofre. Porém a intensidade desse foi um pouco superior em relação a daqueles.

Figura A_4.1: Placa de pressão - superfície de atrito após ensaio em campo no regime de baixa severidade: (a) topografia; caracterização por MEV modo *BSE*: (b) macro e (c) detalhes da transferência e adesão de material; (d) espectro qualitativo EDS de raios X obtido no ponto A.

Na figura A_4.2-a é apresentada, de forma macro, a microestrutura da placa de pressão que foi obtida em seção transversal por M.O. Em regiões próximas a superfície ativa da placa, conforme indica a seta na figura A_4.2-b (microestrutura em maior aumento), observou-se a presença da cementita.

Figura A_4.2: Placa de pressão - microestrutura após o ensaio de campo no regime de baixa severidade, caracterizada em seção transversal por M.O: (a) macro e (b) detalhe da cementita próxima a superfície de atrito; pela superfície de atrito por MEV modo *BSE*: (c) macro e (d) detalhe da cementita.

A morfologia e a distribuição dos veios de grafita na sua microestrutura foram obtidos por MEV no modo BSE e são apresentados na figura A_4.2-c. Como mostra a figura A_4.2-d, em detalhe, a segunda fase cementita presente na microestrutura perlítica foi também identificada por MEV na superfície de atrito da placa de pressão. Ensaio de microdureza Vickers realizados nessa microestrutura revelaram seu alto valor: entre 720 e 824 $HV_{0,1}$.

A formação desses núcleos de cementita podem estar associados a saturação de carbono no ferro, excedendo o limite de solubilidade e favorecendo a sua nucleação em relação a da grafita.

No entanto, a presença dessa fase de elevada dureza numa matriz mais mole, e próxima a superfície de contato, pode favorecer a sua migração e adesão na superfície de atrito do material de fricção, mesmo que o conjunto embreagem trabalhe num regime de baixa severidade.

A transferência de micropartículas metálicas para o material de fricção pode desgastar prematuramente a placa de pressão, como consequência da ação abrasiva da micropartícula metálica na superfície da placa. Caso esse fenômeno ocorra, a funcionalidade da embreagem será afetada e a sua vida útil drasticamente reduzida, conforme demonstraram *Fernandes et al.* (2010).

A_4.2 Regime de Média Severidade

A figura A_4.3-a apresenta a topografia de superfície da placa após o ensaio em campo na condição de média severidade. Nessa topografia, as cristas das ondulações não foram visualizadas, isto é, a superfície está mais lisa, o que indica que o seu desgaste foi mais acentuado em relação a placa ensaiada no regime de baixa severidade. Marcas de desgaste como riscos e sulcos foram também identificados.

O MEV no modo BSE, revelou mais uma vez, a existência de regiões claras e escuras, ilustrando a transferência e adesão de material para a superfície da placa. Entretanto, nessa superfície foram notadas proporções menores de regiões claras em relação as escuras, quando comparada a superfície da placa de pressão ensaiada na condição menos severa.

O espectro qualitativo EDS de raios X obtido no ponto A (figura A_4.3-c) revelou em elevada intensidade o elemento químico oxigênio. Ferro e cobre também foram identificados, porém em intensidades menores em relação ao oxigênio. Além disso, a intensidade do ferro foi menor que a do cobre. Em intensidades inferiores apareceram o enxofre e o silício, e em baixa intensidade o alumínio, cálcio e bário.

Figura A_4.3: Placa de pressão - superfície de atrito após ensaio em campo no regime de média severidade: (a) topografia; caracterização por MEV modo BSE: (b) macro e (c) detalhes da transferência e adesão de material; (d) espectro qualitativo EDS de raios X obtido no ponto A.

A figura A_4.4 apresenta a microestrutura da placa de pressão também observada por M.O em seção transversal, revelando que a microestrutura sofreu alterações em regiões muito próximas a superfície de atrito. A profundidade da região modificada foi de proximadamente 0,28 mm e ensaios de microdureza nessa região revelaram valores entre 642 a 660 HV_{0,1}. Além disso, identificou-se uma fina camada branca que se formou sobre a microestrutura martensítica, praticamente na superfície de atrito, como mostra em maior aumento a figura A_4.4-b. Acredita-se que a dureza dessa camada é superior a da martensita, mas por ser muito fina, não foi possível realizar ensaios de microdureza.

Figura A_4.4: Placa de pressão - microestrutura observada em seção transversal por M.O após o ensaio em campo no regime de média severidade: (a) macro; (b) detalhe revelando a fina camada branca formada sobre a microestrutura martensítica.

Na figura A_4.5-a estão apresentadas as características da microestrutura da placa de pressão que foram obtidas por MEV no modo *BSE*. As regiões claras referem-se a microestrutura característica, a perlita, e que está apresentada em detalhe na figura A_4.5-b. Já as regiões mais escuras revelam os locais onde elevados picos de temperatura foram atingidos, e como consequência ocorreram as transformações microestruturais. Na figura A_4.5-c é apresentada, em maior aumento, a microestrutura identificada nessas regiões; característica da martensita devido a presença dos grãos pontiagudos na forma de agulhas.

Em seção transversal foi também evidenciado, como mostra a figura A_4.5-d, a nucleação e formação de uma micropartícula de aproximadamente 50 µm, em consequência da existência dos veios de grafita na região próxima a superfície de contato.

Figura A_4.5: Placa de pressão – superfície de atrito observada por MEV modo *BSE* após ensaio em campo no regime de média severidade: (a) macro; detalhes da microestrutura (b) martensítica e (c) perlítica; em seção transversal: (d) micromecanismo de nucleação e geração de uma micropartícula metálica a partir dos veios de grafita.

A_4.3 Regime de Alta Severidade

A figura A_4.6-a traz a topografia da placa de pressão que foi ensaiada em campo no regime de alta severidade. Nessa topografia também não foram observadas as cristas das ondulações. Entretanto, além das marcas de desgaste, trincas geradas pelas tensões de origem térmica, foram evidenciadas.

Nas figuras A_4.6-b, A_4.6-d e A_4.6-f são apresentadas, de forma macro, diferentes regiões da superfície da placa que foram observadas por MEV no modo *BSE*, revelando características distintas. Em maior aumento, como mostra a figura A_4.6-c, notou-se que o tribofilme encontra-se desenvolvido de forma parcial, aparentemente nas cristas das ondulações que foram desgastadas, indicando que o contato não foi uniforme ao longo da superfície.

Figura A_4.6: Placa de pressão - superfície após ensaio em campo no regime de alta severidade: (a) topografia; caracterizada por MEV modo *BSE*: (b-d-f) macro; (c) detalhe das trincas térmicas e transferência e adesão de materiais; (e) detalhe do escoamento plástico; (g) detalhe das marcas de desgaste.

Na superfície apresentada em detalhe na figura A_4.6-e é revelado o escoamento plástico do metal como consequência do superaquecimento em razão dos elevados níveis de temperaturas nas interfaces de contato.

Já as marcas de desgaste apresentadas em maior ampliação na figura A_4.6-g indicaram predominância de desgaste abrasivo nessa região da superfície. Os riscos foram gerados pela ação de partículas abrasivas formadas por fragmentos de fibras de vidro, pois a análise qualitativa realizada por EDS no risco revelou em alta intensidade os elementos químicos oxigênio e silício. Em intensidade inferiores foram obtidos o alumínio e o cálcio e em baixa intensidade o magnésio. Todos esses elementos constituem a fibra de vidro do material de fricção. O espectro EDS de raios X dessa análise está disposto na figura A_4.6-g.

No tribofilme parcialmente desenvolvido na superfície da placa de pressão, foram identificados os elementos químicos enxofre e cobre, como traz o mapa composicional que está apresentado na figura A_4.7-a. Já onde o material escoou plasticamente, foi identificado o ferro, e nos entornos foram revelando a existência de enxofre e cobre (figura A_4.7-b).

Figura A_4.7: Mapa composicional qualitativo obtido por EDS dos elementos químicos identificados na região apresentadas nas figuras (a) A_4.6-c e (b) A_4.6-e.

A figura A_4.8-a apresenta a microestrutura da placa de pressão após o regime de alta severidade em campo. Como se pode ver, a espessura da camada de microestrutura martensítica foi maior em relação a obtida no regime moderado. A camada branca formada sobre sua superfície (ver detalhe na figura A_4.8-b) também apresentou maior espessura quando comparada com o regime moderado.

Figura A_4.8: Placa de pressão - microestrutura observada em seção transversal por M.O após o ensaio em campo no regime de alta severidade: (a) macro; (b) detalhe da martensita e da fina camada sobre sua microestrutura na superfície de contato.

A figura A_4.9, por sua vez, traz detalhes da microestrutura perlítica e martensítica observadas na superfície de atrito da placa por MEV no modo *BSE*.

Figura A_4.9: Placa de pressão – superfície de atrito observada por MEV modo *BSE* pela superfície de atrito. Detalhes da microestrutura (a) perlítica e (b) martensítica.

A figura A_4.10 sintetiza as durezas das superfícies das placas de pressão após os ensaios em campo. A dureza da placa utilizada no regime de baixa severidade manteve-se dentro da faixa de especificação, porém apresentando um pequeno aumento em relação a dureza na condição sem uso. As placas ensaiadas nos regimes de média e alta severidade apresentaram durezas mais elevadas. Esses aumentos de dureza foram ocasionados devido as alterações microestruturais, e também por causa do encruamento superficial geradas pelas tensões de contato.

Figura A_4.10: Resultados dos ensaios de dureza Brinell realizados na superfície das placas de pressão ensaiadas em campo nos diferentes regimes de severidade.

Apêndice 5A

CURVAS DA TEMPERATURA E DO COEFICIENTE DE ATRITO OBTIDAS PARA OS ENSAIOS TRADICIONAIS – SÉRIE A

Nesta seção serão apresentadas as curvas obtidas para a temperatura e o coeficiente de atrito, de todos os ensaios realizados em cada condição de PV. Sendo um total de dez níveis de PV e como foram realizados no mínimo cinco ensaios para cada nível, o total de ensaios foi igual a cinquenta. As curvas obtidas foram para os ensaios tribométricos tradicionais (Série A).

No final da seção são disponibilizadas quatro tabelas. A primeira apresenta uma síntese da variação do coeficiente de atrito no regime do *running in*. A segunda, apresenta os valores da energia de atrito, que foi determinada em função do coeficiente de atrito. Já a terceira e quarta tabela, apresentam respectivamente, os valores dos volumes desgastados do material de fricção e do disco.

Figura A_5A.1: Evolução das cinco curvas obtidas para a (a) temperatura e o (b) coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio tradicional (Série A1 – $2,05 \text{ ms}^{-1}$) no PV de $3,08 \text{ MPa}$ ms^{-1} .

Figura A_5A.2: Evolução das cinco curvas obtidas para a (a) temperatura e o (b) coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio tradicional (Série A1 – $2,05 \text{ ms}^{-1}$) no PV de $4,92 \text{ MPa}$ ms^{-1} .

Figura A_5A.3: Evolução das cinco curvas obtidas para a (a) temperatura e o (b) coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio tradicional (Série A1 – $2,05 \text{ ms}^{-1}$) no PV de $6,31 \text{ MPa}$ ms^{-1} .

Figura A_5A.4: Evolução das cinco curvas obtidas para a (a) temperatura e o (b) coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio tradicional (Série A1 – $2,05 \text{ ms}^{-1}$) no PV de $6,92 \text{ MPa}$ ms^{-1} .

Figura A_5A.5: Evolução das cinco curvas obtidas para a (a) temperatura e o (b) coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio tradicional (Série A2 – $3,27 \text{ ms}^{-1}$) no PV de $4,92 \text{ MPa ms}^{-1}$.

Figura A_5A.6: Evolução das cinco curvas obtidas para a (a) temperatura e o (b) coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio tradicional (Série A2 – $3,27 \text{ ms}^{-1}$) no PV de $7,88 \text{ MPa}$ ms^{-1} .

Figura A_5A.7: Evolução das cinco curvas obtidas para a (a) temperatura e o (b) coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio tradicional (Série A2 – $3,27 \text{ ms}^{-1}$) no PV de $8,62 \text{ MPa}$ ms^{-1} .

Figura A_5A.8: Evolução das cinco curvas obtidas para a (a) temperatura e o (b) coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio tradicional (Série A2 – $3,27 \text{ ms}^{-1}$) no PV de $9,35 \text{ MPa ms}^{-1}$.

Figura A_5A.9: Evolução das cinco curvas obtidas para a (a) temperatura e o (b) coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio tradicional (Série A2 – $3,27 \text{ ms}^{-1}$) no PV de $10,09 \text{ MPa}$ ms^{-1} .

Figura A_5A.10: Evolução das cinco curvas obtidas para a (a) temperatura e o (b) coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio tradicional (Série A2 – $3,27 \text{ ms}^{-1}$) no PV de $11,08 \text{ MPa ms}^{-1}$.

A tabela A_5A.1 sintetiza os valores de atrito máximo e mínimo, a diferença entre o atrito máximo e mínimo, entre o mínimo e médio e os respectivos tempos para atingirem tais níveis. Esses cálculos foram realizados a partir das curvas médias dos coeficientes de atrito que foram apresentadas nas figuras 5.3.1 e 5.3.2.

Tabela A_5A.1: Síntese do coeficiente de atrito máximo e mínimo e a variação do tempo (minuto) determinados para os ensaios tribométricos tradicionais (Série A).

	Série A1 (2,05 ms⁻¹)				Série A2 (3,27 ms⁻¹)					
PV	3,08	4,92	6,31	6,92	4,92	7,88	8,62	9,35	10,09	11,08
μ máx.	0,41	0,42	0,43	0,43	0,42	0,47	0,41	0,39	0,35	0,34
t1	10	5	3,6	3	2,5	1	1	1	1	1
μ mín.	0,34	0,36	0,34	0,33	0,33	0,32	0,30	0,29	0,26	0,24
t2	25	32	25	21	17	21,6	14,4	25,2	21,6	23,4
Δμ₁₂	0,07	0,06	0,09	0,10	0,09	0,15	0,11	0,10	0,09	0,10
Δt₁₂	15	28	22,4	18	15	20,6	13,4	24,2	20,6	22,4
Δμ₂₃	0,06	0,05	0	0	0,06	0,03	0,02	0,03	0,02	0,03
Δt₂₃	47	22	0	40	30	10,8	10,8	50,4	46,8	27
Δμ₁₃	0,01	0,01	0,09	0,10	0,03	0,12	0,09	0,07	0,07	0,07
Δt₁₃	62	17	22,4	37	45	31,4	24,2	74,6	67,4	49,9
t3	72	54	25	61	47	32,4	25,2	75,6	68,4	50,4

A tabela A_5A.2 traz a energia de atrito de cada ensaio, que foi determinada como função do coeficiente de atrito.

Tabela A_5A.2: Energia de atrito (MJ) calculada em função do coeficiente de atrito obtido com os ensaios tribométricos tradicionais (Série A).

	Série A1 (2,05 ms⁻¹)				Série A2 (3,27 ms⁻¹)					
PV	3,08	4,92	6,31	6,92	4,92	7,88	8,62	9,35	10,09	11,08
R0	1,79	2,66	3,36	3,43	2,68	3,98	3,94	4,19	3,98	4,13
R1	1,66	2,72	3,20	3,22	2,77	3,57	3,99	4,12	4,21	4,29
R2	1,67	2,88	3,26	3,34	2,67	4,01	3,79	4,36	4,28	4,60
R3	1,76	2,78	3,33	3,21	2,56	3,92	3,55	4,28	4,24	3,97
R4	1,68	2,80	3,07	3,32	2,79	3,91	3,94	4,15	4,33	4,60
Média	1,71	2,77	3,24	3,30	2,69	3,88	3,84	4,22	4,21	4,32
Desvio	0,06	0,08	0,12	0,09	0,09	0,18	0,18	0,10	0,14	0,28

A tabela A_5A.3 apresenta o volume desgastado do material de fricção. Já a tabela A_5A.4 apresenta o volume desgastado do disco. Para cada ensaio realizado foi determinado o volume desgastado. Além disso, calculou-se a média e o desvio padrão dos cinco resultados obtidos para cada PV.

Tabela A_5A.3: Volume desgastado do material de fricção (mm^3) calculado para os ensaios tribométricos tradicionais (Série A).

	Série A1 ($2,05 \text{ ms}^{-1}$)				Série A2 ($3,27 \text{ ms}^{-1}$)					
	3,08	4,92	6,31	6,92	4,92	7,88	8,62	9,35	10,09	11,08
R0	34,89	50,97	64,06	58,95	50,96	72,78	128,09	139,92	235,06	225,53
R1	28,95	62,91	62,89	41,91	58,74	63,30	114,38	144,20	198,75	286,11
R2	30,90	71,96	68,33	64,02	49,84	68,04	104,56	150,91	221,40	238,52
R3	27,47	57,51	74,89	67,09	52,11	63,95	89,86	126,82	220,78	226,87
R4	26,31	54,64	65,98	57,43	59,62	69,96	130,96	141,38	252,92	260,99
Média	29,70	59,60	67,23	57,88	54,46	67,61	113,57	140,65	225,78	247,60
Desvio	3,37	8,17	4,75	9,73	4,48	4,01	17,01	8,81	19,98	25,80

Tabela A_5A.4: Volume desgastado do disco (mm^3) calculado para os ensaios tribométricos tradicionais (Série A).

	Série A1 ($2,05 \text{ ms}^{-1}$)				Série A2 ($3,27 \text{ ms}^{-1}$)					
	3,08	4,92	6,31	6,92	4,92	7,88	8,62	9,35	10,09	11,08
R0	6,53	7,36	6,39	6,26	3,04	4,67	6,85	4,22	5,17	8,44
R1	5,27	5,31	6,49	6,58	4,22	4,49	7,67	4,90	7,62	9,25
R2	5,67	6,67	7,17	6,29	4,35	4,54	6,18	4,18	5,74	10,34
R3	6,94	7,21	7,49	6,38	4,18	5,87	5,99	4,49	6,26	7,48
R4	6,67	8,03	6,35	6,48	4,58	4,17	6,90	3,54	7,07	8,57
Média	6,21	6,91	6,78	6,40	3,87	4,75	6,72	4,26	6,37	8,82
Desvio	0,71	1,02	0,52	0,13	0,65	0,65	0,67	0,50	0,99	1,06

Apêndice 5B

CURVAS DA TEMPERATURA E DO COEFICIENTE DE ATRITO OBTIDAS PARA OS ENSAIOS COM REMOÇÃO DOS DEBRIS DE DESGASTE – SÉRIE B

Esta seção traz as curvas obtidas para a temperatura e o coeficiente de atrito para os ensaios tribométricos que foram realizados removendo os debrs de desgaste do meio interfacial. São disponibilizadas as curvas de todos os ensaios realizados para cada condição de PV, sendo um total de cinquenta ensaios.

No final da seção são disponibilizadas também as quatro tabelas. A primeira apresentando a síntese da variação do coeficiente de atrito no regime do *running in*. A segunda, os valores da energia de atrito, que foi determinada em função do coeficiente de atrito, e a terceira e quarta, apresentam respectivamente, os valores dos volumes desgastados do material de fricção e do disco.

Figura A_5B.1: Evolução das cinco curvas obtidas para a (a) temperatura e o (b) coeficiente de atrito em função do tempo do ensaio com remoção dos debris de desgaste (Série B1 – 2,05 ms⁻¹) no PV de 3,08 MPa ms⁻¹.

Figura A_5B.2: Evolução das cinco curvas obtidas para a (a) temperatura e o (b) coeficiente de atrito em função do tempo do ensaio com remoção dos debris de desgaste (Série B1 – 2,05 ms⁻¹) no PV de 4,92 MPa ms⁻¹.

Figura A_5B.3: Evolução das cinco curvas obtidas para a (a) temperatura e o (b) coeficiente de atrito em função do tempo do ensaio com remoção dos debris de desgaste (Série B1 – 2,05 ms^{-1}) no PV de 6,31 MPa ms^{-1} .

Figura A_5B.4: Evolução das cinco curvas obtidas para a (a) temperatura e o (b) coeficiente de atrito em função do tempo do ensaio com remoção dos debris de desgaste (Série B1 – 2,05 ms⁻¹) no PV de 6,92 MPa ms⁻¹.

Figura A_5B.5: Evolução das cinco curvas obtidas para a (a) temperatura e o (b) coeficiente de atrito em função do tempo do ensaio com remoção dos debris de desgaste (Série B2 – 3,27 ms⁻¹) no PV de 4,92 MPa ms⁻¹.

Figura A_5B.6: Evolução das cinco curvas obtidas para a (a) temperatura e o (b) coeficiente de atrito em função do tempo do ensaio com remoção dos debris de desgaste (Série B2 – 3,27 ms^{-1}) no PV de 7,88 MPa ms^{-1} .

Figura A_5B.7: Evolução das cinco curvas obtidas para a (a) temperatura e o (b) coeficiente de atrito em função do tempo do ensaio com remoção dos debris de desgaste (Série B2 – 3,27 ms^{-1}) no PV de 8,62 MPa ms^{-1} .

Figura A_5B.8: Evolução das cinco curvas obtidas para a (a) temperatura e o (b) coeficiente de atrito em função do tempo do ensaio com remoção dos debris de desgaste (Série B2 – 3,27 ms^{-1}) no PV de 9,35 MPa ms^{-1} .

Figura A_5B.9: Evolução das cinco curvas obtidas para a (a) temperatura e o (b) coeficiente de atrito em função do tempo do ensaio com remoção dos debris de desgaste (Série B2 – $3,27 \text{ ms}^{-1}$) no PV de $10,09 \text{ MPa ms}^{-1}$.

Figura A_5B.10: Evolução das cinco curvas obtidas para a (a) temperatura e o (b) coeficiente de atrito em função do tempo do ensaio com remoção dos debris de desgaste (Série B2 – $3,27 \text{ ms}^{-1}$) no PV de $11,08 \text{ MPa ms}^{-1}$.

A tabela A_5B.1 sintetiza os valores do atrito máximo e mínimo, a diferença entre o atrito máximo e o mínimo, o mínimo e o médio e os respectivos tempos para atingirem tais níveis. Será apresentada somente a média dos cinco resultados individuais para cada condição de ensaio.

Tabela A_5B.1: Síntese do coeficiente de atrito máximo e mínimo e a variação do tempo (minuto) determinados para os ensaios tribométricos com remoção dos debris de desgaste (Série B).

	Série B1 (2,05 ms⁻¹)				Série B2 (3,27 ms⁻¹)					
PV	3,08	4,92	6,31	6,92	4,92	7,88	8,62	9,35	10,09	11,08
μ_{máx}	0,45	0,41	0,42	0,44	0,46	0,43	0,39	0,38	0,35	0,33
t₁	25	12	4	4	5	2	4	1	1	2
μ_{mín.}	0,43	0,037	0,36	0,40	0,41	0,37	0,33	0,35	0,29	0,26
t₂	50	36	18	14	20	13	20	23	13	16
Δμ₁₂	0,02	0,03	0,06	0,04	0,05	0,06	0,06	0,03	0,06	0,07
Δt₁₂	25	24	14	10	15	11	16	22	12	14
Δμ₂₃	0,02	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02	0,04	0,01	0,04	0,04
Δt₂₃	33	25	59	62	27	61	59	67	77	74
Δμ₁₃	0	0,01	0,03	0,01	0,03	0,04	0,02	0,02	0,04	0,03
Δt₁₃	58	49	73	72	42	72	75	89	89	88
t₃	83	61	77	76	47	74	79	90	90	90

Na tabela A_5B.2 estão apresentados os valores da energia de atrito obtidos em função do coeficiente de atrito.

Tabela A_5B.2: Energia de atrito (MJ) calculada em função do coeficiente de atrito obtido com os ensaios tribométricos com remoção dos debris de desgaste (Série B).

	Série B1 (2,05 ms⁻¹)				Série B2 (3,27 ms⁻¹)					
PV	3,08	4,92	6,31	6,92	4,92	7,88	8,62	9,35	10,09	11,08
R0	2,02	2,96	3,46	3,85	3,06	4,21	4,23	4,76	4,91	4,70
R1	1,99	2,91	3,66	4,19	2,93	4,45	4,86	5,09	4,78	4,81
R2	1,89	2,58	3,54	4,06	2,93	4,26	4,88	4,85	4,53	4,00
R3	1,94	2,71	3,63	4,05	3,13	4,55	4,24	4,64	4,72	5,16
R4	1,88	2,7	3,48	4,24	2,9	4,22	4,33	4,75	4,46	4,84
Média	1,94	2,77	3,55	4,08	2,99	4,34	4,51	4,82	4,68	4,70
Desvio	0,06	0,16	0,09	0,15	0,10	0,15	0,33	0,17	0,18	0,43

A tabela A_5B.3 apresenta o volume desgastado de cada revestimento ensaiado na série B, bem como a média e o desvio padrão.

Tabela A_5B.3: Volume desgastado do material de fricção (mm^3) calculado para os ensaios tribométricos com remoção dos debris de desgaste (Série B).

	Série B1 ($2,05 \text{ ms}^{-1}$)				Série B2 ($3,27 \text{ ms}^{-1}$)					
PV	3,08	4,92	6,31	6,92	4,92	7,88	8,62	9,35	10,09	11,08
R0	20,56	52,86	78,62	75,45	34,16	77,27	104,62	114,14	131,27	162,10
R1	24,81	58,55	77,70	77,48	37,21	91,99	105,31	142,59	138,17	171,22
R2	22,95	47,19	73,88	89,77	33,37	77,95	110,84	115,83	128,62	120,28
R3	25,35	56,52	83,64	85,24	32,07	77,88	101,90	107,40	152,00	161,20
R4	21,47	54,12	75,02	81,49	31,78	94,68	100,10	127,62	124,93	161,74
Média	23,03	53,85	77,77	81,88	33,72	83,95	104,55	121,52	135,00	155,31
Desvio	2,07	4,32	3,80	5,79	2,18	8,62	4,09	13,85	10,67	20,02

A tabela A_5B.4, por sua vez, apresenta o volume desgastado calculado para o disco de ferro fundido cinzento.

Tabela A_5B.4: Volume desgastado do disco (mm^3) calculado para os ensaios tribométricos com remoção dos debris de desgaste (Série B).

	Série B1 ($2,05 \text{ ms}^{-1}$)				Série B2 ($3,27 \text{ ms}^{-1}$)					
PV	3,08	4,92	6,31	6,92	4,92	7,88	8,62	9,35	10,09	11,08
R0	1,50	2,31	3,13	4,08	1,50	1,22	1,77	2,45	2,45	3,54
R1	1,36	2,18	3,95	4,76	1,77	0,95	1,90	1,63	2,86	3,40
R2	1,77	2,04	2,86	3,81	1,77	1,90	2,72	1,36	3,13	2,59
R3	1,50	1,90	3,40	4,22	1,36	1,50	2,99	2,59	3,40	3,13
R4	1,77	2,04	3,13	4,49	1,63	1,77	2,04	3,27	3,54	2,72
Média	1,58	2,10	3,29	4,27	1,61	1,47	2,29	2,26	3,07	3,07
Desvio	0,18	0,16	0,41	0,37	0,18	0,39	0,54	0,77	0,44	0,41

Apêndice 5C

CURVAS DA TEMPERATURA E DO COEFICIENTE DE ATRITO OBTIDAS PARA OS ENSAIOS COM ADIÇÃO DE DEBRIS DE DESGASTE – SÉRIE C

Nesta seção são apresentadas as curvas do coeficiente de atrito e da temperatura obtidas com os ensaios tribométricos nos quais foram adicionados debrs de desgaste ao meio interfacial. Nessa série foram empregados somente os PVs de 3,08, 7,88 e 10,09 MPa ms⁻¹. São disponibilizadas as curvas de todos os ensaios realizados com cada um dos PVs. O total de ensaios nessa série foi de 15.

No final da seção também se encontram quatro tabelas, que trazem a síntese da variação do coeficiente de atrito no regime do *running in*, os valores da energia de atrito determinada em função do coeficiente de atrito, e os volumes desgastados do material de fricção e do disco.

Figura A_5C.1: Evolução das cinco curvas obtidas para a (a) temperatura e o (b) coeficiente de atrito em função do tempo do ensaio com adição dos debris de desgaste (Série C) no PV de $3,08 \text{ MPa ms}^{-1}$.

Figura A_5C.2: Evolução das cinco curvas obtidas para a (a) temperatura e o (b) coeficiente de atrito em função do tempo do ensaio com adição dos debris de desgaste (Série C) no PV de $7,88 \text{ MPa ms}^{-1}$.

Figura A_5C.3: Evolução das cinco curvas obtidas para a (a) temperatura e o (b) coeficiente de atrito em função do tempo do ensaio com adição dos debris de desgaste (Série C) no PV de $10,09 \text{ MPa ms}^{-1}$.

A tabela A_5C.1 traz os valores do atrito máximo e mínimo, a amplitude de variação entre eles; apresenta também a diferença entre o mínimo e o médio, e, os respectivos tempos para atingirem tais níveis.

Tabela A_5C.1: Síntese do coeficiente de atrito máximo e mínimo e a variação do tempo (minuto) determinados para os ensaios tribométricos com adição de debrís de desgaste (Série C).

	Série C		
PV	3,08	7,88	10,09
$\mu_{\text{máx}}$	0,27	0,33	0,32
t1	4	2	2
$\mu_{\text{mín.}}$	0,24	0,27	0,25
t2	18	11	13
$\Delta\mu_{12}$	0,03	0,06	0,07
Δt_{12}	14	9	11
$\Delta\mu_{23}$	0,03	0,01	0,04
Δt_{23}	54	27	48
$\Delta\mu_{13}$	0,06	0,07	0,11
Δt_{13}	68	36	59
t3	72	38	61

Já na tabela A_5C.2 estão apresentadas as energias de atrito calculadas como função do coeficiente de atrito.

Tabela A_5C.2: Energia de atrito (MJ) calculada em função do coeficiente de atrito obtido com os ensaios tribométricos com adição de debrís de desgaste (Série C).

	Série C		
PV	3,08	7,88	10,09
R0	1,09	2,04	1,75
R1	1,05	1,88	2,16
R2	0,83	1,92	1,87
R3	0,92	1,97	1,80
R4	0,89	1,59	2,36
Média	0,96	1,88	1,99
Desvio	0,11	0,17	0,26

A tabela A_5C.3 apresenta os volumes desgastados do material de fricção e do disco, calculados após cada ensaio, as respectivas médias e os desvios padrões dos cinco resultados obtidos para cada nível de energia empregado.

Tabela A_5C.3: Volume desgastado do material de fricção e do disco (mm^3) calculados para os ensaios tribométricos com adição dos debrís de desgaste (Série C).

	Material de Fricção			Disco		
PV	3,08	7,88	10,09	3,08	7,88	10,09
R0	74,93	75,74	119,63	3,26	0,82	2,42
R1	57,91	92,91	94,50	2,45	2,29	3,25
R2	49,42	82,82	115,70	1,03	2,39	4,38
R3	60,66	85,43	127,85	2,11	3,55	4,50
R4	48,71	127,24	192,10	3,97	6,99	6,18
Média	58,33	92,83	129,96	2,56	3,21	4,15
Desvio	10,64	20,19	36,86	1,12	2,33	1,42

Apêndice 5D

CURVAS DA TEMPERATURA E DO COEFICIENTE DE ATRITO OBTIDAS PARA OS ENSAIOS COM OS DISCOS PRÉ-CONDICIONADOS – SÉRIE D

Esta seção apresenta as curvas do coeficiente de atrito e da temperatura obtidas quando os ensaios tribométricos foram realizados empregando os discos pré-condicionados por meio da redução da sua rugosidade superficial inicial (Série D). A rugosidade do disco tradicional foi de 3 μm e a dos discos pré-condicionados de 0,2 (Série D1) e 1,2 μm (Série D2). Nessa série foram empregados também somente os PVs de 3,08, 7,88 e 10,09 MPa ms^{-1} , e as curvas de todos os ensaios realizados com cada um dos PVs, são apresentadas. Como foram duas condições de pré-condicionamento, o total de ensaios foi igual a 30.

No final da seção, mais uma vez, são disponibilizadas quatro tabelas, que trazem a síntese da variação do coeficiente de atrito no regime do *running in*, os valores da energia de atrito determinada em função do coeficiente de atrito, e os volumes desgastados do material de fricção e do disco.

Figura A_5D.1: Evolução das cinco curvas obtidas para a (a) temperatura e o (b) coeficiente de atrito em função do tempo do ensaio com o disco pré-condicionado (R_a 0,2 μm - Série D1) no PV de 3,08 MPa ms^{-1} .

Figura A_5D.2: Evolução das cinco curvas obtidas para a (a) temperatura e o (b) coeficiente de atrito em função do tempo do ensaio com o disco pré-condicionado (R_a 0,2 μm - Série D1) no PV de 7,88 MPa ms^{-1} .

Figura A_5D.3: Evolução das cinco curvas obtidas para a (a) temperatura e o (b) coeficiente de atrito em função do tempo do ensaio com o disco pré-condicionado (R_a 0,2 μm - Série D1) no PV de 10,09 MPa ms^{-1} .

Figura A_5D.4: Evolução das cinco curvas obtidas para a (a) temperatura e o (b) coeficiente de atrito em função do tempo do ensaio com o disco pré-condicionado (R_a 1,2 μm - Série D2) no PV de 3,08 MPa ms^{-1} .

Figura A_5D.5: Evolução das cinco curvas obtidas para a (a) temperatura e o (b) coeficiente de atrito em função do tempo do ensaio com o disco pré-condicionado (R_a 1,2 μm - Série D2) no PV de 7,88 MPa ms^{-1} .

Figura A_5D.6: Evolução das cinco curvas obtidas para a (a) temperatura e o (b) coeficiente de atrito em função do tempo do ensaio com o disco pré-condicionado (R_a 1,2 μm - Série D2) no PV de 10,09 MPa ms^{-1} .

A tabela A_5D.1 mostra os níveis do atrito máximo e mínimo, a diferença entre o máximo e o mínimo; mínimo e médio; e os respectivos tempos para atingirem tais níveis. Mais uma vez, será apresentada somente a média dos cinco resultados determinados para cada condição.

Tabela A_5D.1: Síntese do coeficiente de atrito máximo e mínimo e a variação do tempo (minuto) determinados para os ensaios tribométricos com discos pré-condicionados (Série D).

	D1 (Ra 0,2 μm)			D2 (Ra 1,2 μm)		
PV	3,08	7,88	10,09	3,08	7,88	10,09
$\mu_{\text{máx}}$	0,41	0,36	0,34	0,36	0,34	0,33
t1	25	5	3	7	2	2
$\mu_{\text{mín.}}$	-	0,34	0,30	0,35	0,31	0,28
t2	-	14	14	18	11	22
$\Delta\mu_{12}$	-	0,02	0,04	0,01	0,03	0,05
Δt_{12}	-	9	11	11	9	20
$\Delta\mu_{23}$	-	0,02	0,04	0,05	0,02	0,05
Δt_{23}	-	54	76	47	68	68
$\Delta\mu_{13}$	0,01	0	0	0,04	0,01	0
Δt_{13}	33	63	87	58	77	88
t3	58	68	90	65	79	90

Na tabela A_5D.2 estão apresentadas as energias de atrito calculadas com função do coeficiente de atrito. Observa-se nessa tabela que para as diferentes séries, mas mesma condição de ensaio, as energias de atrito foram diferentes.

Tabela A_5D.2: Energia de atrito (MJ) calculada em função do coeficiente de atrito obtido com os ensaios tribométricos com os discos pré-condicionados (Série D).

	D1 (Ra 0,2 μm)			D2 (Ra 1,2 μm)		
PV	3,08	7,88	3,08	7,88	3,08	7,88
R0	1,80	3,76	4,72	1,80	3,79	4,48
R1	1,91	3,75	4,92	1,60	3,57	4,92
R2	1,84	4,49	4,84	1,68	3,72	4,88
R3	1,72	4,11	5,09	1,50	3,23	4,50
R4	1,80	3,90	4,85	1,85	3,86	4,77
Média	1,81	4,00	4,89	1,69	3,64	4,71
Desvio	0,07	0,31	0,12	0,15	0,25	0,21

As tabelas A_5D.3 e A_5D.4 apresentam o volume desgastado do material de fricção e do disco calculado após cada ensaio, e as respectivas médias e desvios padrões dos cinco resultados obtidos em cada condição adotada nas séries D1 e D2.

Tabela A_5D.3: Volume desgastado do material de fricção (mm^3) calculado para os ensaios tribométricos com os discos pré-condicionados (Série D).

	D1 (Ra 0,2 μm)			D2 (Ra 1,2 μm)		
PV	3,08	7,88	3,08	7,88	3,08	7,88
R0	23,10	61,45	167,56	26,15	83,22	168,57
R1	33,45	81,36	173,74	24,95	64,24	197,19
R2	31,59	122,38	158,35	28,94	91,19	176,51
R3	35,79	74,59	162,81	35,44	48,18	180,26
R4	24,42	49,24	173,60	33,85	105,25	200,63
Média	29,67	77,81	167,21	29,86	78,42	184,63
Desvio	5,62	27,81	6,74	4,63	22,48	13,75

Tabela A_5D.4: Volume desgastado do disco (mm^3) calculado para os ensaios tribométricos com os discos pré-condicionados (Série D).

	D1 (Ra 0,2 μm)			D2 (Ra 1,2 μm)		
PV	3,08	7,88	3,08	7,88	3,08	7,88
R0	1,09	0,27	1,63	0,95	0,41	1,14
R1	1,07	0,39	1,90	1,63	0,63	1,68
R2	0,68	0,68	2,45	1,36	0,95	1,50
R3	0,68	0,27	1,22	1,50	0,68	1,22
R4	1,09	0,27	1,36	2,18	0,95	1,81
Média	0,92	0,38	1,71	1,52	0,73	1,47
Desvio	0,22	0,18	0,49	0,45	0,23	0,29

Apêndice 6

CARACTERIZAÇÃO TOPOGRÁFICA DO MATERIAL DE FRICÇÃO

A figura A_6.1 apresenta a topografia da superfície do material de fricção na condição sem uso.

Figura A_6.1: Topografia de superfície do material de fricção na sua condição sem uso.

A figura A_6.2, por sua vez, apresenta as topografias das superfícies dos materiais de fricção que foram ensaiados em campo nos regimes de baixa, média e alta severidade.

Da figura A_6.3 até a figura A_6.7, são apresentadas as topografias das superfícies dos materiais de fricção que foram submetidos as avaliações em laboratório nas diferentes séries de ensaios tribométricos, empregando os PVs de 3,08, 7,88 e 10,09 MPa ms⁻¹.

No final desta seção será apresentada uma síntese da rugosidade média das topografias da superfície.

Figura A_6.2: Topografia de superfície do material de fricção após ensaio em campo no regime de: (a) baixa, (b) média e (c) alta severidade.

Figura A_6.3: Topografia de superfície do material de fricção após ensaio tribométrico tradicional (Série A) no PV de: (a) 3,08, (b) 7,88 e (c) 10,09 MPa ms⁻¹.

Figura A_6.4: Topografia de superfície do material de fricção após ensaio tribométrico com remoção dos debris de desgaste (Série B) no PV de: (a) 3,08, (b) 7,88 e (c) 10,09 MPa ms⁻¹.

Figura A_6.5: Topografia de superfície do material de fricção após ensaio tribométrico com adição de debris de desgaste (Série C) no PV de: (a) 3,08, (b) 7,88 e (c) 10,09 MPa ms⁻¹.

Figura A_6.6: Topografia de superfície do material de fricção após ensaio tribométrico com o disco pré-condicionado (R_a 0,2 μm - Série D1) no PV de: (a) 3,08, (b) 7,88 e (c) 10,09 MPa ms^{-1} .

Figura A_6.7: Topografia de superfície do material de fricção após ensaio tribométrico com o disco pré-condicionado (R_a 1,2 μm - Série D2) no PV de: (a) 3,08, (b) 7,88 e (c) 10,09 MPa ms^{-1} .

A figura A_6.8 apresenta a rugosidade média da superfície do material de fricção após os ensaios em campo nos diferentes regimes de severidade, e os ensaios tribométricos nas diferentes séries e níveis de energia.

Figura A_6.8: Rugosidade média da superfície do material de fricção após o ensaio em campo nos regimes de baixa (B), média (M) e alta (A) severidade, e após os ensaios tribométricos nas diferentes séries [tradicional (A); como remoção (B) e adição (C) dos debris de desgaste; com disco pré-condicionado em 0,2 μm (D1) e 1,2 μm (D2)] empregando os PVs de 3,08, 7,88 e 10,09 MPa ms^{-1} .

De maneira geral, observou-se que a rugosidade média de todas as superfícies reduziram com a realização do ensaio quando comparadas com a rugosidade média da superfície da condição sem uso. Três comportamentos distintos foram identificados a medida que o nível da severidade aumentou. Para os ensaios de campo, na série B (remoção dos debris) e série D2 (superfície do disco pré-condicionada no Ra de 1,2 μm) a rugosidade média reduziu da condição de baixa severidade para a de média, e tornou a aumentar quando passou de média para a de alta severidade. Já as topografias dos materiais de fricção ensaiados de maneira tradicional (série A) e com o disco pré-condicionado em 0,2 μm (série D1), a rugosidade média aumentou a medidade que o nível de energia subiu de baixo para alto. E quando os debris de desgaste foram adicionados ao meio interfacial (série C) a rugosidade média apresentou um comportamento oposto, isto é, quando a

condição do ensaio foi de baixa, passando pela média, até chegar na alta severidade, a rugosidade média da superfície do material de fricção diminuiu.

Esse ultimo resultado é de certa forma bastante coerente, pois na condição mais severa, a pressão específica de contato foi maior, o que contribuiu para a compactação dos debrís de desgaste e o desenvolvimento do tribofilme, deixando a superfície mais alisada, e como consequência, reduzindo a rugosidade média.

Como foram realizadas apenas uma análise em cada superfície atritada do material de fricção, não se sabe se os comportamentos descritos no parágrafo anterior para a rugosidade média é característico e consequência da condição do ensaio, ou se estão associados ao tamanho da amostragem, que nesse caso teve somente um único resultado.

Além do que, a superfície de atrito do material de fricção é bastante heterogênea. Dessa forma, um maior número de análises se faz necessário para se obter topografias mais representativas e resultados mais consistentes.