



**Universidade Federal do Rio Grande do Norte**

**Centro de Tecnologia**

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica-PPGEM**

# **DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITOS TRIBOLOGICAMENTE EFICAZES**

**JULIANA RICARDO DE SOUZA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFRN, como requisito para obtenção do grau de DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA.

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

**Co-Orientador:** Prof. Dr. Efrain Pantaléon Matamoros

Natal  
Junho/2015

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

**DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITOS  
TRIBOLOGICAMENTE EFICAZES**

**JULIANA RICARDO DE SOUZA**

**Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do Título de  
Doutor (a) em ENGENHARIA MECÂNICA**

**Sendo aprovada em sua forma final.**

**João Telésforo Nóbrega de Medeiros – Orientador**

---

**Efrain Pantaléon Matamoros – Co-Orientador**

---

**Moisés Vieira de Melo – UFRN**

---

**Ademir Oliveira da Silva – UFRN**

---

**Danielle Guedes de Lima Cavalcanti – UFPB**

---

**Amélia Severino Ferreira e Santos – UFPB**

---

## *FICHA CATALOGRÁFICA*

UFRN / Biblioteca Central Zila Mamede.  
Catalogação da Publicação na Fonte.

Souza, Juliana Ricardo de.

Desenvolvimento de compósitos tribologicamente eficazes / Juliana Ricardo de Souza. – Natal, RN, 2015.

192 f.: il.

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

Co-orientador: Prof. Dr. Efrain Pantaléon Matamoros

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica.

1. Rejeito de Scheelita - Tese. 2. PTFE - Tese. 3. Compósitos - Tese. 4. Tribologia - Tese. I. Medeiros, João Telésforo Nóbrega de. II. Matamoros, Efrain Pantaléon. III. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. IV. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 549.761.53

## **DEDICATÓRIA**

*Oitava Filha de Maria das Dores Ricardo e José Ricardo Filho, nascida na cidade de Fernando Pedrosa-RN. Aos 7 anos de idade veio com a família para Natal vislumbrando um futuro melhor na cidade grande. Foi logo matriculada na escola com seus irmãos, sendo a única a concluir o ensino médio nesta família.*

*Foi mãe de sua primogênita aos 24 anos, sem trabalho e diante da necessidade, aprendeu a cortar cabelo com uma tesoura de costura. Aos 27 anos casou-se com Paulo Sérgio Barbosa, com quem teve Gabriela Ricardo Barbosa e é casada até hoje. Iniciou um curso profissionalizante no SENAC onde se destacou e logo foi contratada para dar aulas.*

*Lutou diariamente para manter sua família e sempre teve convicção de que a única solução para a evolução de suas filhas seria através da educação, sendo este seu principal objetivo de vida. Investiu tudo que foi conquistando, mas cobrava ao nível melhores resultados, melhores comportamentos, melhores posturas.*

*É a esta mãe guerreira que dedico o fruto dos meus últimos quatro anos de trabalho, um nada diante do que precisou passar e das oportunidades que me concedeu.*

*Obrigada minha mãe, Dejanira Ricardo!*

## ***AGRADECIMENTOS***

Ao iniciar a redação de agradecimentos desta tese curiosamente reli o que escrevi na minha monografia e dissertação de mestrado e para minha surpresa percebi que pessoas importantes naquela época se mantem em minha vida até os dias atuais.

Agradeço a Deus, o maior de todos, pelo dom da vida, pela fé, saúde e força divina que em muitos momentos me carregou nos braços e fez-me permanecer convicta até o fim de que o melhor estava por vir.

A UFRN, instituição que me fornece oportunidades há 10 anos, pelo apoio, confiança e principalmente aos que integram esta universidade;

A CAPES, pela bolsa concedida, o que viabilizou a minha dedicação exclusiva nesta pesquisa;

Ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica por permitir a inserção de todas as Engenharias e áreas afins e apoiar este estudo;

Aos que fazem a mineração Tomaz Salustino e em especial ao senhor Odon Oliveira de Souza por nos receber e ceder o rejeito de scheelita utilizado nesta tese além de nos disponibilizar informações importantes sobre o mineral e a mina;

Ao Prof. Dr. João Telésforo Nóbrega de Medeiros (GET), pela orientação acadêmica e pessoal desde a graduação, incentivos incessantes e exemplos diários de vida, que só me fizeram crescer e evoluir, que pacientemente e sabiamente conduziu-me, limitando meus excessos, instigando-me sempre para o melhor;

A pediatra mais amada, Dra. Rosangela Lula de Medeiros, pela disponibilidade, paciência e amor prestado a todos os GETianos que se consideram filhos;

Ao Prof. Dr. Efrain Pantaléon Matamoros, pela amizade, atenção sempre prestada e estímulo que foram essenciais na conclusão desta tese;

Ao Prof. Dr. Sandro Campos Amico, pela disponibilidade na discussão e direcionamento desta pesquisa;

Ao Prof. Dr. Ademir, pelo apoio desde a graduação e livre acesso em seu laboratório, o que facilitou o desenvolvimento desta tese;

Ao Prof. Dr. Rubens Maribondo, por estar sempre disponível a me orientar em todas as solicitações financeiras para participações em eventos e aquisições necessárias durante esta tese;

Ao Prof. Dr. João Wanderley, pela amizade, consideração, discussões e apoio;

Agradeço de coração a todos os alunos de Graduação do Grupo de Estudos de Tribologia e Integridade Estrutural da UFRN que direta e indiretamente colaboraram na condução e conclusão desta tese, são eles: Magdiel Silva, Silvio Soares, João Flávio Fernandes, Nicolas Araújo, Francisco Marinho, Dayalla Marques, Vinicius Medeiros, Edja Iandeiara, Ana Paula Camargo, Edália, Iane Castro, Raphael Figueiredo, Daniel Mousinho, Rafael Dias.

Em especial agradeço aos que integram a árvore aroeira, meus queridos acompanhantes que durante o desenvolvimento desta tese formaram o subgrupo mais produtivo e bem articulado do GET, são eles: Plínio Melo de Oliveira, Mariana Silva Parma de Azevedo, Antônio Paulino de Araújo Neto, Salete Kerimma Pegado Medeiros, Ruy Dias Neto e Ludimila Silva Parma de Azevedo;

Agradeço também aos pós-graduandos do GET que foram companhias inseparáveis, mais que amigos são verdadeiros irmãos que ganhei neste percurso e que sempre estiveram dispostos a ajudar nesta pesquisa, são eles: Jarbas Santos Medeiros, Eugênio Teixeira, Fabiana Fernandes, João Andrade, Valdicleide Melo, Erinéia Santos, Marinalva Ferreira, Daniel Cabral, Gracilene Aquino, Ana Emília Guedes, Franklin Kaic, Dyego Monteiro, Antônio Augusto, Roberto Klécus e Manoel Fernandes;

Agradeço a Bruno Fernandes, filho do nosso querido Manoel Fernandes que não está mais entre nós, mas que no início desta pesquisa se fez disponível nos repassando informações valiosas sobre o Rejeito de Scheelita com palestras e reuniões sempre solidárias;

Aos amigos adquiridos na graduação que me acompanham até hoje e sempre estão dispostos a colaborar em tudo, são eles: Fernando Nunes, Kaio Max, Laurênia Martins e Laís Vanconcelos, a minha amável parceria na pesquisa e em etapas da Vida.

Aos funcionários da UFRN, Ricardo Lago, Délia Maria, Luís, Dona Ana, Zésinho, Sr. Raimundo, sempre solidários e partícipes;

Aos laboratórios de pesquisa da UFRN, Nupprar, Nuper, LabTam, Oficina Mecânica, LabMetrol, Laboratório de Reologia e Processamento de Polímeros, Laboratório de Caracterização dos Materiais, Menezes Comércio e Serviços LTDA, Laboratório de Materiais Nanoestruturados e Reatores Catalíticos, Laboratório de Mecânica dos Fluídos;

Aos funcionários do Laboratório de Materiais do CTGÁS, Angélica Gilksana Souza de Lima, Melise Carina Duarte de Almeida, Francisco Antônio Vieira, Érika Christiane Correia de Lima, pelo acesso as análises de Microscopia Eletrônica de Varredura desta tese;

Ao IFRN em nome de Bruna Marcela Soares de Araújo pelo acesso as análises de Microscopia Eletrônica de Varredura desta tese;

Por fim agradeço a toda minha família por todo amor, paciência na minha ausência e principalmente pelo orgulho e admiração que me transmitem ao assistir a primeira Doutora se formando;

Ao querido Paulo Henrique dos Santos Silva, esposo e porto seguro, me fazendo enxergar o lado bom de todo sofrimento, e ao nosso filho Pedro Ricardo Santos, cuja chegada foi um combustível a mais para a conclusão desta etapa em nossas vidas, nos fortalecendo e unindo cada dia mais;

A Dejanira Ricardo, Gabriela Ricardo e Paulo Sérgio Barbosa, pelo companheirismo incondicional em todos os momentos e pelo amor;

Ao meu pai Antônio Pereira de Souza, por todo apoio em todas as minhas tomadas de decisão;

Aos meus avós Tilza Dionísio e Paulo Barbosa, por me acompanharem em cada passo dado e por todo amor correspondido;

Aos meus avós José Ricardo Filho e Maria das Dores Ricardo, exemplos de perseverança e fé. Especialmente a minha avó que não está fisicamente entre nós, mas sempre teve certeza de que eu conseguiria concluir esta tese e onde quer que esteja, está comemorando com muito orgulho esta nossa vitória.

A Maria das Neves Ricardo e Dércia Patrícia Ricardo que no decorrer desta caminhada me proporcionaram vivenciar o amor da pequena Maria Cecília e momentos de diversão. Foram responsáveis pelo meu entendimento entre ver, olhar e enxergar a minha vida, o meu passado e o meu futuro, resultando no melhor entendimento de mim mesma através do Arita treinamentos;

Apesar da redação de uma tese de doutorado ser um produto de responsabilidade e natureza individual, sem o apoio contínuo e incondicional da família e a contribuição e dedicação coletiva dos amigos, certamente este trabalho não chegaria a bom termo. A todos eles registro minha mais profunda gratidão.

**SUMÁRIO**

DEDICATÓRIA .....	v
AGRADECIMENTOS .....	vi
RESUMO .....	xiii
ABSTRACT .....	xiv
LISTA DE FIGURAS .....	xv
LISTA DE TABELAS .....	xxi
1. Introdução .....	1
1.1 Objetivo Geral .....	14
1.2 Objetivos Específicos .....	14
1.3 Hipótese .....	15
1.4 Contribuições Científicas .....	16
2. Revisão Bibliográfica .....	17
2.1 Tribologia .....	17
2.1.1 Ensaio Tribológicos .....	18
2.1.1.1 Esclerometria .....	18
2.1.1.2 Pino Disco .....	23
2.2 Polímeros e seu Comportamento Viscoelástico .....	24
2.2.1 Politetrafluoretileno – PTFE .....	26
2.3 Tribologia de Polímeros .....	29
2.4 Compósitos Poliméricos .....	32
2.4.1 Carga Mineral .....	36
2.5 Acabamento Superficial .....	37
2.5.1 Rugosidade .....	37
2.5.2 Molhabilidade .....	39
2.6 Desgaste .....	40
2.6.1 Desgaste Coesivo .....	42
2.6.2 Desgaste Interfacial .....	42
2.6.2.1 Filme Transferido .....	42

2.6.3	Desgaste de Compósitos e Nanocompósitos.....	43
2.7	Pressão de contato de Hertz.....	46
3.	Materiais e Métodos.....	48
3.1	Materiais.....	48
3.1.1	Polímero.....	48
3.1.2	Carga Mineral.....	48
3.2	Caracterizações dos Materiais em forma de pó.....	49
3.2.1	Granulometria.....	49
3.2.2	Difração de Raios-X (DRX).....	50
3.2.3	Fluorescência de Raios-X (FRX).....	50
3.2.4	Microscopia Eletrônica de Varredura e EDS.....	51
3.2.5	Análise Termogravimétrica (TG).....	52
3.2.6	Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC).....	52
3.2.7	Análise de Rugosidade.....	52
3.2.8	Análise de Molhabilidade.....	54
3.2.9	Determinação de Dureza.....	56
3.2.10	Análise de Absorção de Impacto.....	56
3.3	Confecção dos Compósitos.....	58
3.4	Análise de Planicidade.....	60
3.5	Ensaio de Tração.....	61
3.6	Ensaio Tribológicos.....	61
3.6.1	Esclerometria Pendular.....	62
3.6.2	Análise de Pino contra Disco.....	64
4.	Resultados e Discussão.....	65
4.1	Caracterização dos Materiais.....	65
4.1.1	Carga mineral.....	65
4.1.1.1	Análise de Granulometria.....	65
4.1.1.2	Difração de Raios-X (DRX).....	66

4.1.1.3 Fluorescência de Raios-X (FRX).....	67
4.1.1.4 MEV E EDS .....	68
4.1.2 PTFE .....	69
4.1.2.1 TG .....	69
4.1.2.2 DSC.....	70
4.1.2.3 DRX.....	71
4.1.2.4 FRX.....	72
4.1.2.5 MEV e EDS.....	74
4.1.3 Compósitos PTFE + RS.....	74
4.1.3.1 Planicidade .....	74
4.1.3.2 Rugosidade .....	75
4.1.3.2 Molhabilidade.....	78
4.1.3.3 Dureza .....	80
4.1.3.4 Absorção ao Impacto .....	81
4.2 Resultados dos Ensaios Tribológicos .....	84
4.2.1 Esclerometria.....	84
4.2.2 MEV após Esclerometria .....	87
4.2.3 Pino contra Disco .....	94
4.3 Custo dos Compósitos .....	109
5. Conclusão .....	110
Sugestão para Trabalhos Futuros.....	112
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	113
Apêndice A.....	124
Apêndice B .....	150
Apêndice C.....	152
Apêndice D.....	160
Apêndice E .....	161
Apêndice F .....	165
ANEXO A .....	169



## **RESUMO**

A estocagem de rejeitos de scheelita a “céu aberto” resultante da exploração da mina Brejuí da região de Currais Novos, Rio Grande do Norte, Brasil, tem gerado, no período 1960-2015, um forte passivo ambiental. O polímero *politetrafluoretileno (PTFE)* majora em sistemas de deslizamento e reduz significativamente custos de manutenção, devido às suas excelentes propriedades mecânicas, tais como baixo coeficiente de atrito ( $0,01 < \mu < 0,10$ ) e limite de escoamento da ordem de 10 MPa. No entanto, apresenta elevadas taxas de desgaste ( $10^{-13} \text{ m}^2/\text{N}$ ) e por despertar o interesse científico e tecnológico nas indústrias petroquímica e aeroespacial na forma de lubrificantes sólidos, objetivou-se desenvolver compósitos poliméricos com matriz de PTFE utilizando-se o rejeito de scheelita como carga, viabilizando também processos de remediação ambiental. O Rejeito de Scheelita foi caracterizado na condição como adquirido, através de análises de DRX, FRX, MEV, EDS, granulometria por Peneiramento e a Laser, registrando-se traços de tungstênio e metais estratégicos igualmente importantes. O PTFE foi analisado por TG, DSC, MEV, DRX, FRX. Para o desenvolvimento dos compósitos misturou-se mecanicamente os pós de PTFE e Rejeito de Scheelita, devidamente preparados e pesados. Para moldagem por compressão à quente projetou-se um molde cilíndrico de aço acoplado a uma resistência inseridos numa prensa hidráulica. Avaliaram-se o desempenho tribológico dos compósitos obtidos a partir de Rugosidade, Dureza, Molhabilidade, Absorção ao impacto, Esclerometria, Pino Disco e Análise Morfológica. Os resultados indicam que a variação no teor de rejeito de scheelita influencia nos resultados de rugosidade, dureza e absorção ao impacto. Compósitos molhados com água salina e destilada caracterizaram-se como hidrofóbicos, enquanto que os molhados com óleo parafínico e naftênico como oleofílicos. Correlacionando os resultados dos ensaios tribológicos e custos constatou-se que a composição de 20% de Rejeito de Scheelita apresentou a melhor planicidade, baixo consumo de energia de deformação específica ( $< 0,30 \text{ J/mm}^3$ ), a menor perda mássica ( $8 \times 10^{-3} \text{ g}$ ) e afundamento da pista ( $< 0,4 \text{ } \mu\text{m/km}$ ).

**Palavras-Chave:** *Rejeito de Scheelita, PTFE, Compósitos, Tribologia.*

## ***ABSTRACT***

The storage scheelite tailings in the open air as a result of Brejuí mine exploration, located near Currais Novos, Rio Grande do Norte, Brazil, between 1960 and 2015, a strong environmental passive. The polymer *polytetrafluoroethylene (PTFE)* outstands in sliding systems and significantly reduces maintenance costs, due to its excellent mechanical properties, such as low friction coefficient ( $0,01 < \mu < 0,10$ ) and yield limit to the order of 10MPa. However, it has high wear rates ( $10^{-13} \text{ m}^2/\text{N}$ ) and for arousing scientific and technological interests at petrochemical and aerospace industry, in the form of solid lubricants, the target was to develop polymeric composites with a PTFE matrix using tailings of scheelite as charge, enabling also environmental remediation processes. The tailing of Scheelite was characterized in acquired conditions, through XRD, XRF, SEM, EDS, granulometry by screening and by laser, recording traces of tungsten and strategic metals equally important. The PTFE was analyzed by TG, DSC, SEM, XRD, XRF. To the composites development, powders of PTFE and tailings of scheelite were mechanically mixed, previously prepared and weighed. To hot compression molding, a designed cylindrical steel mould was coupled with a resistor and placed in a hydraulic press. The composite's tribological performance was evaluated from roughness, hardness, wettability, impact absorption, sclerometry, pin on disc, and morphological analysis. The results show that the variation in the tailing of scheelite concentration influences the results of roughness, hardness and impact absorption. Wet composites with saline and distilled water were characterized as hydrophobic, and the ones wet with paraffenic and naphtenic oil, they acted oleophilic. Correlating the results of tribological tests and costs, it was found that the composition of 20% mineral filler showed better planeness, low specific deformation energy consumption ( $<0,30\text{J}/\text{mm}^3$ ), the lowest mass loss ( $8 \times 10^{-4} \text{ g}$ ) and trail shipwreck ( $<0,4 \mu\text{m}/\text{km}$ ).

**Keywords:** Tailings of Scheelite, PTFE, Composites, Tribology.

## ***LISTA DE FIGURAS***

<b>Figura 1.</b> (a) Galileu Galilei (1564-1642) (b) Ensaio de resistência à flexão de um material de uma viga mono-engastada concebida por Galileu .....	1
(b) Fonte: <a href="https://www.mpiwg-berlin.mpg.de/en/resources/index.html">https://www.mpiwg-berlin.mpg.de/en/resources/index.html</a> .....	1
<b>Figura 2.</b> (a) Leonardo da Vinci (1481-1542) (b) Ensaio de atrito e desgaste concebido por Leonardo da Vinci (fonte: TRIBLooK, cap. C2, GET-UFRN, 2015).....	2
<b>Figura 3.</b> Resistência e temperatura máxima em serviço de materiais estruturais utilizados em Engenharia mapeados por Ashby, 2005 .....	3
<b>Figura 4.</b> Massa específica, módulo de Young e velocidade de propagação de ondas em sólidos usados como materiais estruturais em Engenharia, Ashby, 2005 .....	5
<b>Figura 5.</b> Materiais tribológicos abrangem várias escalas de comprimento e tempo. Existem atualmente áreas de forte sobreposição entre as capacidades experimentais e em ambas modelagem numérica e teórica dos processos tribológicos. ....	6
<b>Figura 6.</b> Gráficos representativos de um modelo de (a) atrito estático, cinético e viscoso, (b) atrito estático, de Stribeck e viscoso e (c) deslocamento com pré-deslizamento, descontinuidades associadas ao stick e slip de um par tribológico, função da rigidez da aspereza $k_s$ (N/ $\mu\text{m}$ ), segundo a percepção de J.A. de Marchi, 1998 .....	7
<b>Figura 7.</b> Ensaio tribológicos (a) Risco esclerométrico (Scratch) em contato Pendular, pressão de contato variável, único passe; (b) Pino contra disco, carga normal constante, contato circunferencial cíclico .....	8
<b>Figura 8.</b> Dureza e taxa de desgaste de sólidos usados como materiais estruturais em Engenharia deslizando contra aço doce, Ashby, 2005.....	9
<b>Figura 9.</b> Foto (da autora) panorâmica da Mina Brejuí, Currais Novos–RN e sua pilha de rejeito de scheelita a céu aberto, faixa branca acima das imagens das casas e árvores .....	10
<b>Figura 10.</b> Critério de desempenho de alguns materiais poliméricos a partir de curvas P x V para taxas de desgaste especificadas .....	11
<b>Figura 11.</b> Aplicações de materiais a base de PTFE em aeronaves(fonte: <a href="http://www.greenbelting.com/industry-solutions-old/aviation.html">http://www.greenbelting.com/industry-solutions-old/aviation.html</a> ) .....	13
<b>Figura 12.</b> Representação esquemática dos perfis dos sulcos de riscamentos (adaptado de BUTTERY, 1970).....	20

<b>Figura 13.</b> Desenho esquemático dos mecanismos de abrasão promovidos por esclerometria.....	21
<b>Figura 14.</b> Representações esquemáticas das principais respostas do material polimérico ao riscamento .....	22
<b>Figura 15.</b> Diagrama Esquemático do Ensaio Pino-Disco .....	23
<b>Figura 16.</b> Representação esquemática da hélice politetrafluoretileno (FONTE: J. G. Drobny, Technology of Fluoropolymers, 2008).....	26
<b>Figura 17.</b> a) Todas as superfícies são ásperas, e esta rugosidade se estende a todas as escalas de comprimento, da escala atômica a macro escala. b) Os picos (protuberâncias ou asperezas) são os pontos altos das superfícies e estão envolvidos em vários contatos microscópicos que são distribuídos através das superfícies de contato. c) Esses contatos de asperezas estão tipicamente em nano escala e altamente estressados. d) Um conjunto desses contatos em nano escala manifestam coletivamente os parâmetros macroscópicos conhecidos como coeficiente de atrito e taxa de desgaste .....	30
<b>Figura 18.</b> Imagem da simulação da dinâmica molecular usando potenciais de muitos corpos de evolução das cadeias orientadas de PTFE durante o deslizamento .....	31
<b>Figura 19.</b> As classes de materiais compósitos a partir da qual são feitas (FONTE: ASHBY 2005) .....	32
<b>Figura 20.</b> A) Regime de desgaste ultramoderado (nanocompósitos PTFE); B) Regime de desgaste intermediário (compósitos de PTFE reforçados); C) Regime de desgaste severo (PTFE não carregado) .....	35
<b>Figura 21.</b> Desvios de forma do perfil de uma superfície, conforme DIN 4760, adaptado de BET (1999) apud MEDEIROS (2002) .....	38
<b>Figura 22.</b> Contato entre as três fases sólida, líquida e gasosa. a) Representação das tensões superficiais para uma superfície hidrofílica b) Representação das tensões superficiais para uma superfície hidrofóbica.....	39
<b>Figura 23.</b> Desenho esquemático do molhamento da superfície de um sólido em contato com diferentes líquidos .....	40
<b>Figura 24.</b> Duas classes gerais de mecanismos de desgaste de polímeros.....	41
<b>Figura 25.</b> Hipótese mecanicista para o desgaste ultramoderado de nanocompósitos de PTFE. Processos característicos da formação de filmes de transferências estão ilustrados na ordem relativa de A até G. Observações notáveis e interações são descritas entre I-VI .....	44

<b>Figura 26.</b> (a) Contato entre uma esfera indentadora e uma superfície plana polimérica sob ação de uma força compressiva $F$ , (b) geometria, dimensão da área de contato (circular) e deflexão, (c) distribuição da pressão, pressão máxima ( $p_{\text{máx}}$ ) e média ( $p_{\text{média}}$ ). A relação entre as pressões é dada por $p_{\text{máx}} = 3/2 p_{\text{média}}$ .....	47
<b>Figura 27.</b> Amostra de PTFE em forma pó como adquirido .....	48
<b>Figura 28.</b> Amostra do Rejeito de Scheelita em forma de pó como recebido, com granulometria de 200 $\mu\text{m}$ .....	49
<b>Figura 29.</b> Amostra de PTFE antes e após prensado para análise em FRX .....	51
<b>Figura 30.</b> a) Sistema de metalização b) Microscópio Eletrônico de Varredura com micro análise por EDS .....	51
<b>Figura 31.</b> A) Gabarito desenvolvido para medição de rugosidade B) Rugosímetro Taylor Hobson modelo Surtronic 25.....	53
<b>Figura 32.</b> Corpo de prova posicionado no gabarito.....	54
<b>Figura 33.</b> Equipamento para medição do ângulo de contato .....	55
<b>Figura 34.</b> Imagem do software durante a medição do diâmetro do ângulo de contato .....	55
<b>Figura 35.</b> Durômetro Shore D.....	56
<b>Figura 36.</b> Diagrama esquemático do equipamento experimental .....	57
<b>Figura 37.</b> Esfera metálica e esfera metálica revestida de borracha utilizadas nos ensaios de absorção de impacto.....	58
<b>Figura 38.</b> Bancada para moldagem por compressão à quente .....	59
<b>Figura 39.</b> Composições dos compósitos desenvolvidos .....	59
<b>Figura 40.</b> Máquina de medir por coordenadas .....	60
<b>Figura 41.</b> Amostras cortadas a laser para os ensaios de tração.....	61
<b>Figura 42.</b> Desenho esquemático do esclerômetro pendular.....	62
<b>Figura 43.</b> Ângulos de ponta dos indentadores .....	63
<b>Figura 44.</b> A) Equipamento tribômetro com configuração pino contra disco, B) Região da trilha de desgaste após ensaio e C) Região do contato entre o corpo de prova encaixado no disco e o pino (Esfera) .....	64
<b>Figura 45.</b> Gráfico da distribuição granulométrica (em volume) do rejeito de Scheelita .....	66
<b>Figura 46.</b> Difratoograma da carga mineral .....	66
<b>Figura 47.</b> MEV (retro-espalhamento de elétrons) da carga mineral como adquirida .....	68
<b>Figura 48.</b> Microanálise EDS na carga mineral.....	69
<b>Figura 49.</b> Curva da análise termogravimétrica do PTFE.....	69

<b>Figura 50.</b> Curvas resultantes da Análise de DSC para o PTFE .....	71
<b>Figura 51.</b> Difratoograma de Raios –X do polímero PTFE .....	72
<b>Figura 52.</b> Espectro de FRX do PTFE .....	73
<b>Figura 53.</b> MEV (retro-espalhamento de elétrons) do aspecto morfológico do pó de PTFE como adquirido .....	74
<b>Figura 54.</b> Planicidade dos compósitos.....	75
<b>Figura 57.</b> Ra, Rz e Rq para as 4 direções dos compósitos com 10 e 20% de carga mineral.....	76
<b>Figura 58.</b> Ra, Rz e Rq para as 4 direções dos compósitos com 30 e 50% de carga mineral.....	77
<b>Figura 59.</b> Ângulo de contato (águas) em função do percentual de carga mineral .....	78
<b>Figura 60.</b> Ângulo de contato (óleos) em função do percentual de carga mineral .....	79
<b>Figura 61.</b> Dureza Shore D em função do percentual de carga mineral .....	80
<b>Figura 62.</b> Altura de Rebote em função do percentual de carga mineral para as esferas com diâmetro de 25,4 mm e 22,1 mm.....	83
<b>Figura 63.</b> Energia Absorvida em função do percentual de carga mineral para as esferas com diâmetro de 25,4 mm e 22,1 mm.....	83
<b>Figura 64.</b> Resultados de Energia de Deformação para todos os compósitos ensaiados com ângulo de ponta indentadora de 30° e 45° .....	84
<b>Figura 65.</b> Resultados de Energia de Deformação para todos os compósitos ensaiados com ângulo de ponta indentadora de 60° e 75° .....	85
<b>Figura 66.</b> Energia de Deformação para todos os compósitos ensaiados com ângulo de ponta indentadora de 90° e 120° .....	86
<b>Figura 67.</b> MEV do corpo de prova após a passagem do ângulo de ponta de 30° .....	88
<b>Figura 68.</b> Diagrama esquemático do perfil do risco esclerométricos.....	88
<b>Figura 69.</b> MEV da região discretizada dos compósitos com 1 e 2% de carga após riscado pelos indentadores de 45° e 75°.....	89
<b>Figura 70.</b> MEV da região discretizada do compósito com 30% de carga após riscado pelo indentador de 30° .....	90
<b>Figura 71.</b> MEV da região discretizada dos compósitos com 3% e 30% de carga após riscados pelos indentadores de 60° e 120° .....	90
<b>Figura 72.</b> MEV da região discretizada do compósito com 30% de carga após riscado pelos indentador de 30° .....	91

<b>Figura 73.</b> MEV da região do centro do risco dos compósitos com 1% e 5% de carga após riscado pelos indentadores de 60° e 75°.....	92
.....	92
<b>Figura 74.</b> MEV evidenciando <i>crazing</i> na região do centro do risco do compósito com 1% de carga após riscado pelos indentadores de 30°.....	92
<b>Figura 75.</b> MEV da região do centro do risco do compósito com 50% de carga após riscado pelo indentador de 45° .....	93
<b>Figura 76.</b> MEV da região centro do risco do compósito com 5% de carga após riscado pelos indentadores de a) 120°, b) 90° e c) 90° .....	94
<b>Figura 77.</b> COF em função do percentual de carga mineral.....	95
<b>Figura 78.</b> MEV da superfície da pista de desgaste do compósito com 10% de carga mineral, exibindo delaminação e debris.....	95
<b>Figura 79.</b> COF em função da distância de deslizamento para os compósitos com 1 e 50% de carga mineral.....	96
<b>Figura 80.</b> MEV da superfície da pista de desgaste do compósito com 50% de carga mineral, exibindo debris e estrias .....	97
<b>Figura 81.</b> MEV da superfície da pista de desgaste do compósito com 1% de carga mineral, exibindo delaminação (a) magnitude de 16X (b) magnitude de 1000x (c) magnitude de 3000x.....	97
<b>Figura 82.</b> COF em função da distância de deslizamento para os compósitos com 2 e 30% de carga mineral.....	98
<b>Figura 83.</b> COF em função da distância de deslizamento para os compósitos com 3 e 20% de carga mineral.....	99
<b>Figura 84.</b> COF em função da distância de deslizamento para os compósitos com 5 e 10% de carga mineral.....	100
<b>Figura 85.</b> Afundamento da pista em função do percentual de carga mineral .....	101
<b>Figura 86.</b> Taxa de afundamento da pista em função da distância de deslizamento para os compósitos com 1 e 50% de carga mineral.....	102
<b>Figura 87.</b> Taxa de afundamento da pista em função da distância de deslizamento para os compósitos com 2 e 30% de carga mineral.....	103
<b>Figura 88.</b> MEV de uma lâmina delaminada do corpo de prova com 2% de carga mineral. (a) magnitude de 500X (b) magnitude de 1500x (c) magnitude de 3000x.....	104
<b>Figura 89.</b> Taxa de afundamento da pista em função da distância de deslizamento para os compósitos com 3 e 20% de carga mineral.....	104

<b>Figura 90.</b> Taxa de afundamento da pista em função da distância de deslizamento para os compósitos com 5 e 10% de carga mineral.....	105
<b>Figura 91.</b> Afundamento da pista em função do número de ciclos percorridos para os compósitos em estudo .....	106
<b>Figura 92.</b> MEV da superfície de contato da esfera com o corpo de prova após ensaio pino disco .....	107
<b>Figura 93.</b> Resultado de microanálise EDS do Corpo de prova aderido a esfera (Pino) .....	108
<b>Figura 94.</b> Gráfico de custos dos materiais envolvidos na produção dos compósitos. ....	109

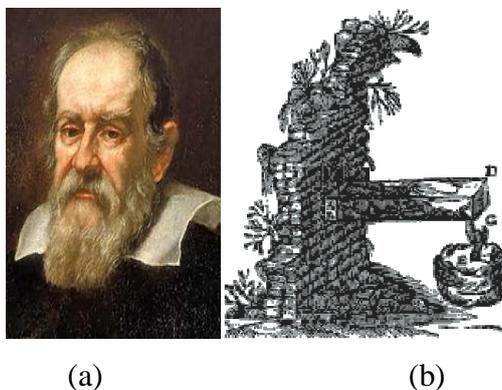
## ***LISTA DE TABELAS***

<b>Tabela 1.</b> Propagação de ondas em sólidos com dimensões infinitas ou finitas, de acordo com Medeiros, 2002 .....	4
<b>Tabela 2.</b> Propriedades dos materiais para rolamentos secos, Tribology Handbook, Capítulo A5, 2002.....	11
<b>Tabela 3.</b> Trabalhos publicados em periódico/congresso no período 2011 – 2014.....	16
<b>Tabela 4.</b> Massa e dimensões das esferas de metal e mouse utilizadas no ensaio .....	58
<b>Tabela 5.</b> Distribuição granulométrica da carga mineral .....	65
<b>Tabela 6.</b> Caracterização química da carga mineral - Fluorescência de Raios-x .....	67
<b>Tabela 7.</b> Principais etapas e eventos da curva termogravimétrica dos polímeros utilizados (valores aproximados).....	70
<b>Tabela 8.</b> Resultados da Temperatura de fusão, Calor de fusão (Entalpia), e Cristalinidade para o PTFE, obtidas a partir dos ensaios de DSC.....	71
<b>Tabela 9.</b> Resultados de FRX para o PTFE.....	73
<b>Tabela 10.</b> Imagens dos corpos de prova após ensaios de absorção de impacto .....	82
<b>Tabela 11 .</b> Perda mássica dos corpos de prova após ensaios de pino contra disco ....	102
<b>Tabela 12.</b> Elementos registrados em microanálise EDS.....	108

## 1. Introdução

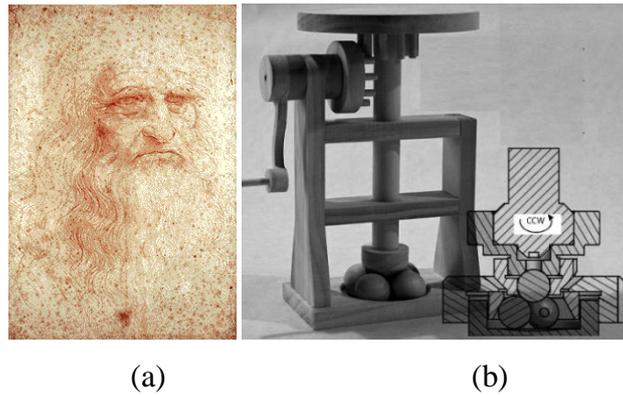
Os sistemas humanos de mobilidade, energia e dos ambientes construídos, a partir do Século XX, demandaram intensificação do uso do método científico no processamento, caracterização e ensaios sistemáticos dos cerca de cem mil materiais estruturais hoje utilizados em projetos de Engenharia. Há cinco Séculos, era diferente.

O colapso de alguns materiais estruturais utilizados em vigas submetidas à flexão e a respectiva medida das cargas e energias de ruptura associadas (“*potentia rumpens*”) foram investigados por Galileu Galilei, Figura 1, publicados na Itália e inseridos em sua obra intitulada “*Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*. Deiden, 1638”. Entretanto, durante o período produtivo de Galileu, conceitos elementares como *o regime de deformação elástica de um material* não haviam sido desenvolvidos. Robert Hooke (1635-1703) em 1660 descreveu, pela primeira vez, a *variação linear entre a tensão e a extensão de uma mola elástica*. Um Século antes, Leonardo da Vinci investigara *qualitativamente* o atrito e o desgaste de elementos de máquinas sob carga e com movimento relativo entre si, Figura 2.



**Figura 1.** (a) Galileu Galilei (1564-1642) (b) Ensaio de resistência à flexão de um material de uma viga mono-engastada concebida por Galileu

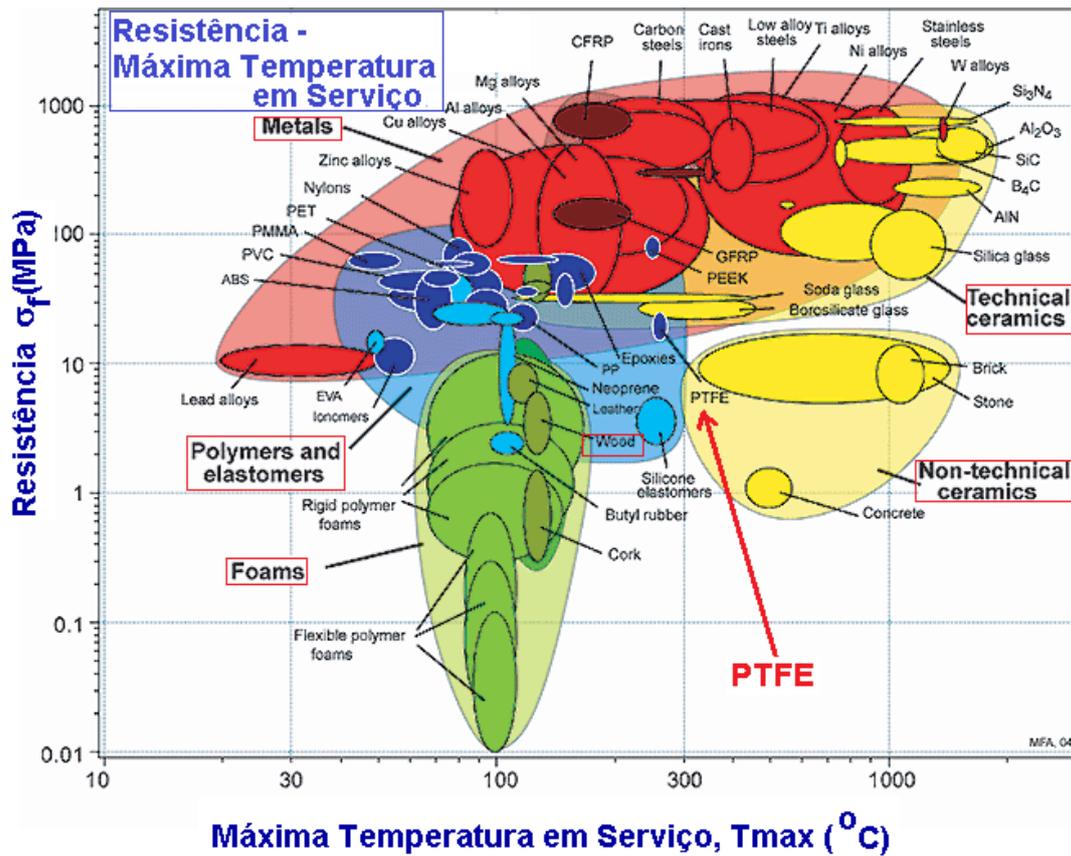
(b) Fonte: <https://www.mpiwg-berlin.mpg.de/en/resources/index.html>



**Figura 2.** (a) Leonardo da Vinci (1481-1542) (b) Ensaio de atrito e desgaste concebido por Leonardo da Vinci (fonte: TRIBLook, cap. C2, GET-UFRN, 2015)

As contribuições desses europeus constituem um marco genético importante à etapa evolutiva dos estudos concernentes ao Projeto de Engenharia, à Mecânica dos Sólidos, à Mecânica do Contato e à Tribologia, com aspectos da inclusão de métodos reproduzíveis, mesmo sem os recursos de análise e a preocupação ambiental dos nossos dias. Graças a Galileu, da Vinci e Hooke, muito se avançou. A concepção do colapso ou ruptura, às vezes catastrófica, continuou a ser amplificada.

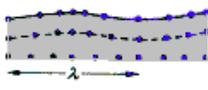
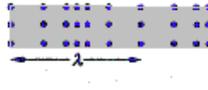
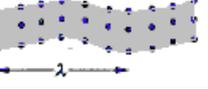
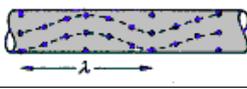
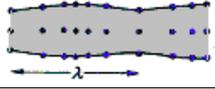
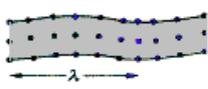
Novas propriedades e novos materiais foram incorporados para assegurar aos projetos de Engenharia soluções funcionais confiáveis ao longo de sua vida em serviço. Muito se fez até que Ashby, um cientista da Universidade de Cambridge, Inglaterra, a duas décadas do encerramento do Século XX, sintetizasse propriedades dos materiais em mapas que condensavam o conhecimento numa visão de conjunto inédita. Surgiram as cartas de Ashby. A Figura 3 mapeia a *resistência*  $\sigma_f$  e a *temperatura máxima em serviço*  $\theta_{max}$  de espumas, polímeros, metais e cerâmicas utilizados em Engenharia. Dentre estes, o PTFE, politetrafluoretileno, polímero de mais baixo coeficiente de atrito de deslizamento, mapeado com  $10\text{MPa} < \sigma_f < 30\text{MPa}$ , bem como  $\theta_{max} < 300^\circ\text{C}$ .



**Figura 3.** Resistência e temperatura máxima em serviço de materiais estruturais utilizados em Engenharia mapeados por Ashby, 2005

As crescentes (1) solicitações dinâmicas dos materiais estruturais nas aplicações de Engenharia e (2) complexidade dos campos tensoriais de tensões e deformações atuantes em estruturas contemporâneas têm demandado aprofundamento nos estudos das propriedades desses materiais. Diferentes classes de ondas que se propagam em materiais estruturais são função de propriedades elásticas e massa específica, Tabela 1.

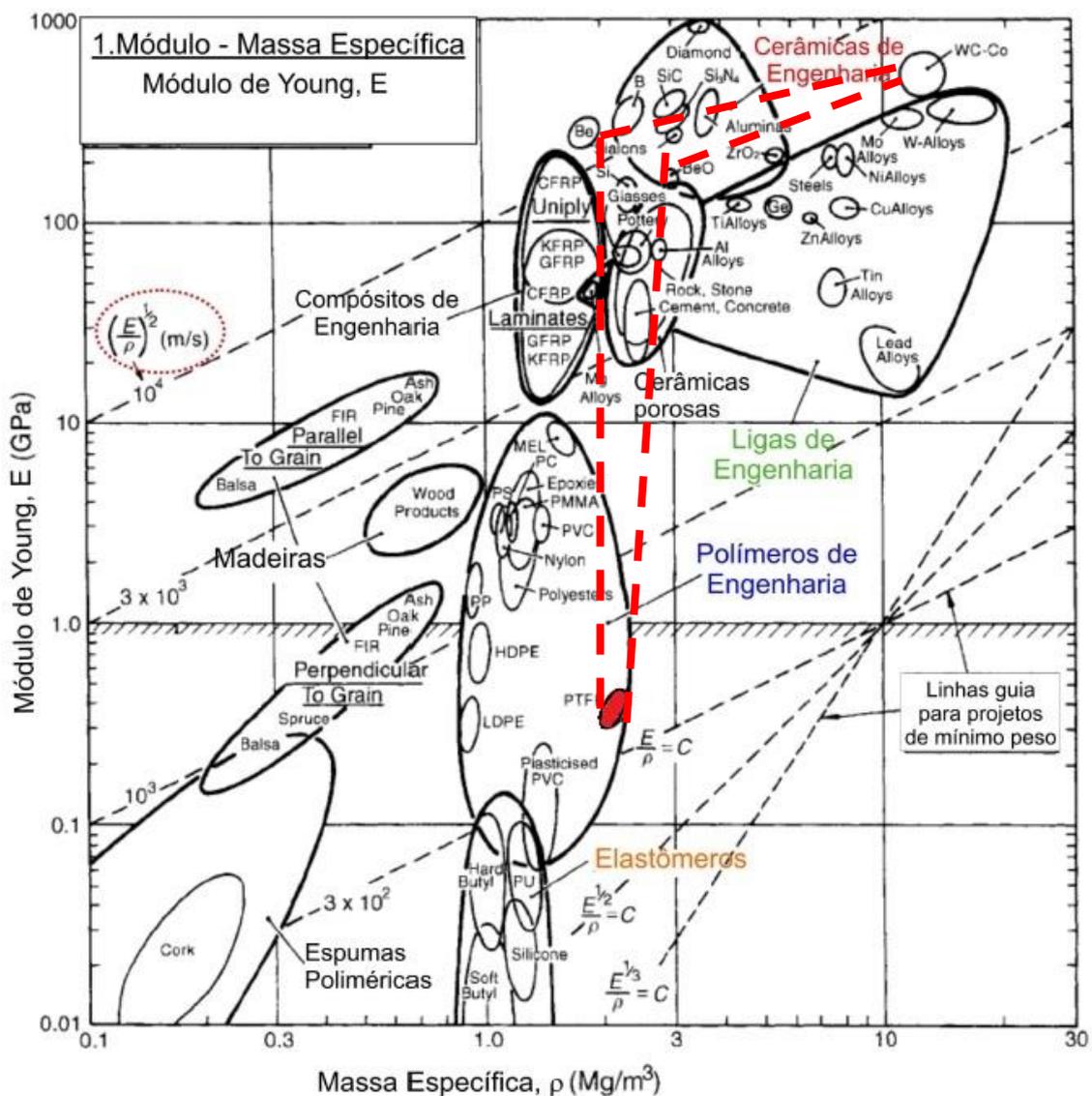
**Tabela 1.** Propagação de ondas em sólidos com dimensões infinitas ou finitas, de acordo com Medeiros, 2002

Sólidos com dimensões <i>infinitas</i>		Velocidade de propagação da onda $c$ [m/s]
Ondas de Rayleigh 		$c = 0,93\sqrt{(G/\rho)}$ $G$ =módulo de elasticidade transversal do meio
Ondas de densidade 		$c = \sqrt{(E_a/\rho)}$ $E_a$ =módulo de compressibilidade= $dp/(dV/V)$ $\rho$ = massa específica
Ondas transversais 		$c = \sqrt{(G/\rho)}$
Sólidos com dimensões <i>finitas</i>		Velocidade de propagação da onda $c$ [m/s]
Ondas de torção 		$c = 0,898\sqrt{(G/\rho)}$
Ondas de dilatação 		$c = \sqrt{(E/\rho)}$ $E$ =módulo de Young do material
Ondas de flexão 		$c = \sqrt{\omega\sqrt{(B/M)}}$ $M$ =massa por unidade de superfície $B$ =rigidez flexional Para placas: $B=E.h^3/[12.(1-\sigma^2)]$ $h$ =espessura da placa; $\sigma$ =índice de contração transversal

Como um exemplo, empiricamente, um *luthier* reconhece as boas madeiras com as quais ele deve fabricar um instrumento musical de excelente qualidade sonora. Estas são identificadas na faixa  $4 \text{ km/s} < (E/\rho)^{0,5} < 6 \text{ km/s}$ . A visualização da importância das propriedades contidas na Tabela 1 levou Ashby a construir a sua primeira carta, que destaca, por exemplo, a direção e natureza das fibras constitutivas de madeiras e suas diferentes propriedades elásticas, Figura 4.

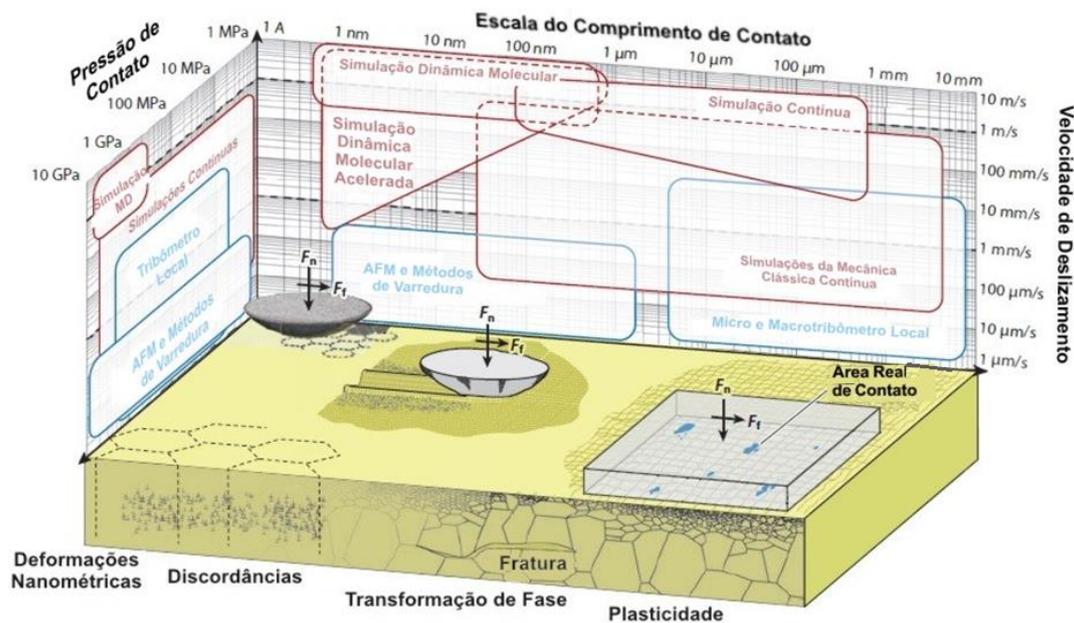
Esse gráfico de Ashby associa o módulo de Young  $E$  (MPa), a massa específica de materiais estruturais  $\rho$  ( $10^3 \text{ kg/m}^3$ ) e  $(E/\rho)^{0,5}$  [m/s], proporcional à velocidade de propagação de uma onda longitudinal em um sólido. A visualização global desses materiais candidatos a soluções é uma contribuição eficaz.

Observa-se que o grupo do PTFE é apresentado com  $300\text{MPa} < E < 500\text{MPa}$ ,  $2,0 \times 10^3 \text{kg/m}^3 < \rho < 2,3 \times 10^3 \text{kg/m}^3$  e  $300 \text{ m/s} < (E/\rho)^{0,5} < 400 \text{ m/s}$ . Um *luthier* não hesitaria em descartá-lo como matéria-prima ao seu conjunto de soluções triviais. Um projetista de guias de deslizamento para um sistema mecatrônico ou um eletrodoméstico, por outro lado, certamente o incluiria entre suas *possíveis* soluções de projeto. Tais soluções são *possíveis* mas não necessariamente *prováveis*. Após considerar a taxa de desgaste do PTFE com e sem carga mineral, Figura 4, esse projetista de guias demandaria estudos adicionais, científicos, para assegurar a confiabilidade da sua solução estrutural.



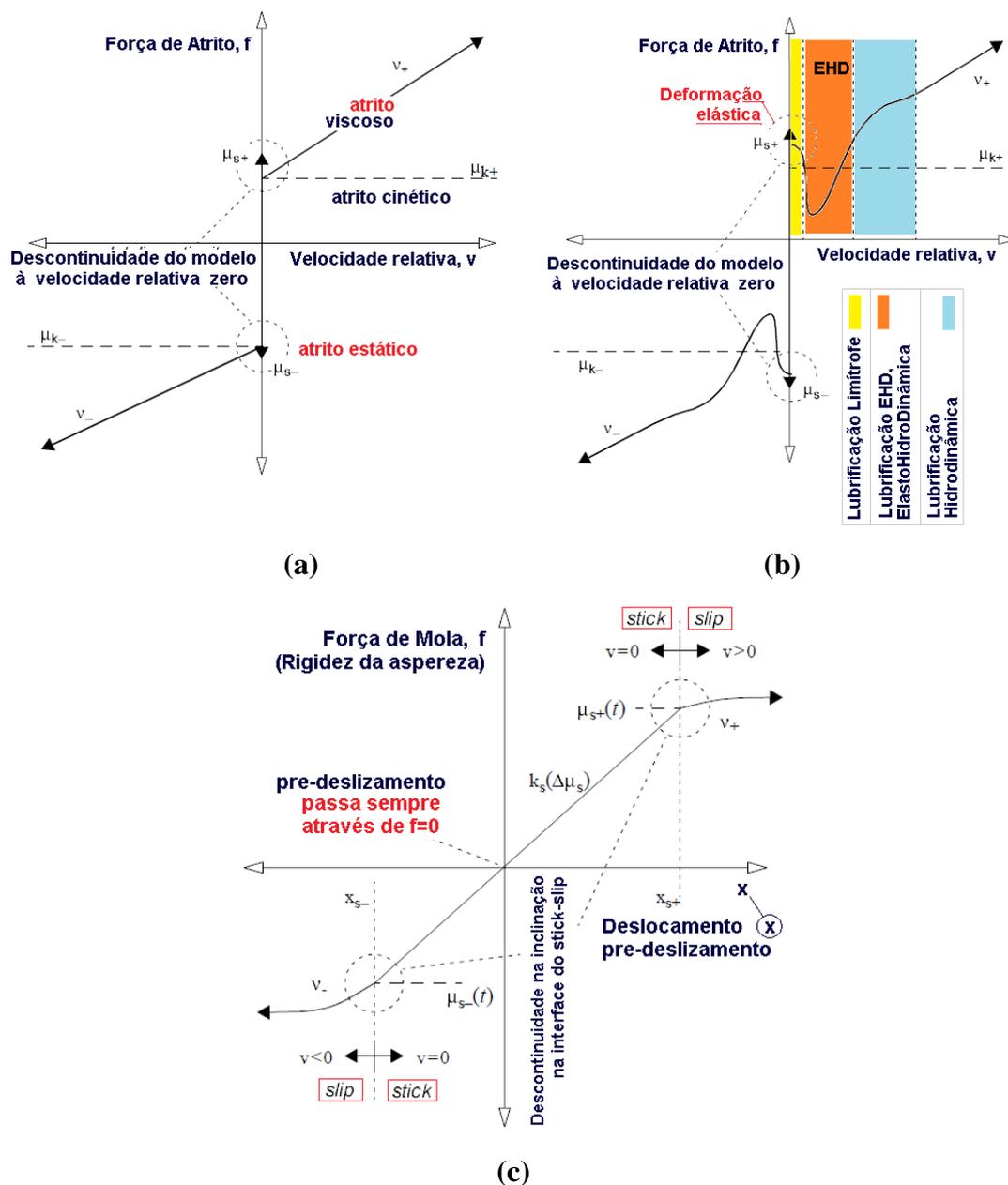
**Figura 4.** Massa específica, módulo de Young e velocidade de propagação de ondas em sólidos usados como materiais estruturais em Engenharia, Ashby, 2005

Esta tese se insere nas áreas de ciência e engenharia de materiais, tribologia, mecânica do contato e mecânica do dano. Estudar os materiais tribológicos é um esforço intrinsecamente multiescalar e multidisciplinar, desta forma GREGORY *et al.* 2014 mapeiam o acesso combinado para simulações moleculares em larga escala detalhadamente, na Figura 5; associando à pressão de contato e a velocidade de deslizamento o que proporcionam uma oportunidade para estudar os mecanismos fundamentais do atrito e do desgaste, e tais estudos são capazes de impactar amplamente a sociedade e tecnologias futuras.



**Figura 5.** Materiais tribológicos abrangem várias escalas de comprimento e tempo. Existem atualmente áreas de forte sobreposição entre as capacidades experimentais e em ambas modelagem numérica e teórica dos processos tribológicos.

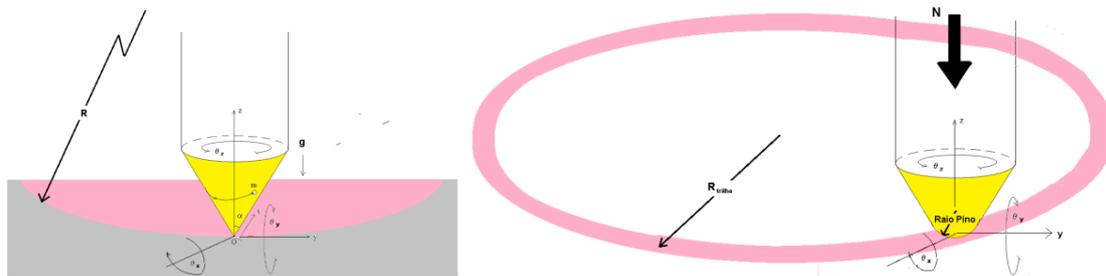
Em sua tese de doutorado em Engenharia Mecânica, Marchi, 1998, investigou o atrito seco, o atrito viscoso, a folga decorrente da fabricação, montagem ou desgaste (“backlash”) e a complacência (“compliance”, o inverso da rigidez) e o acoplamento dessas grandezas para melhorar a precisão e a acurácia de máquinas ferramentas e a qualidade do produto usinado. Elaborou um desenvolvimento teórico considerando tais não-linearidades, como os esboços esquematizados na Figura 6. Não considerou os materiais e suas não-linearidades. A presente tese considera o PTFE e cargas minerais.



**Figura 6.** Gráficos representativos de um modelo de (a) atrito estático, cinético e viscoso, (b) atrito estático, de Stribeck e viscoso e (c) deslocamento com pré-deslizamento, descontinuidades associadas ao stick e slip de um par tribológico, função da rigidez da aspereza  $k_s$  (N/ $\mu\text{m}$ ), segundo a percepção de J.A. de Marchi, 1998

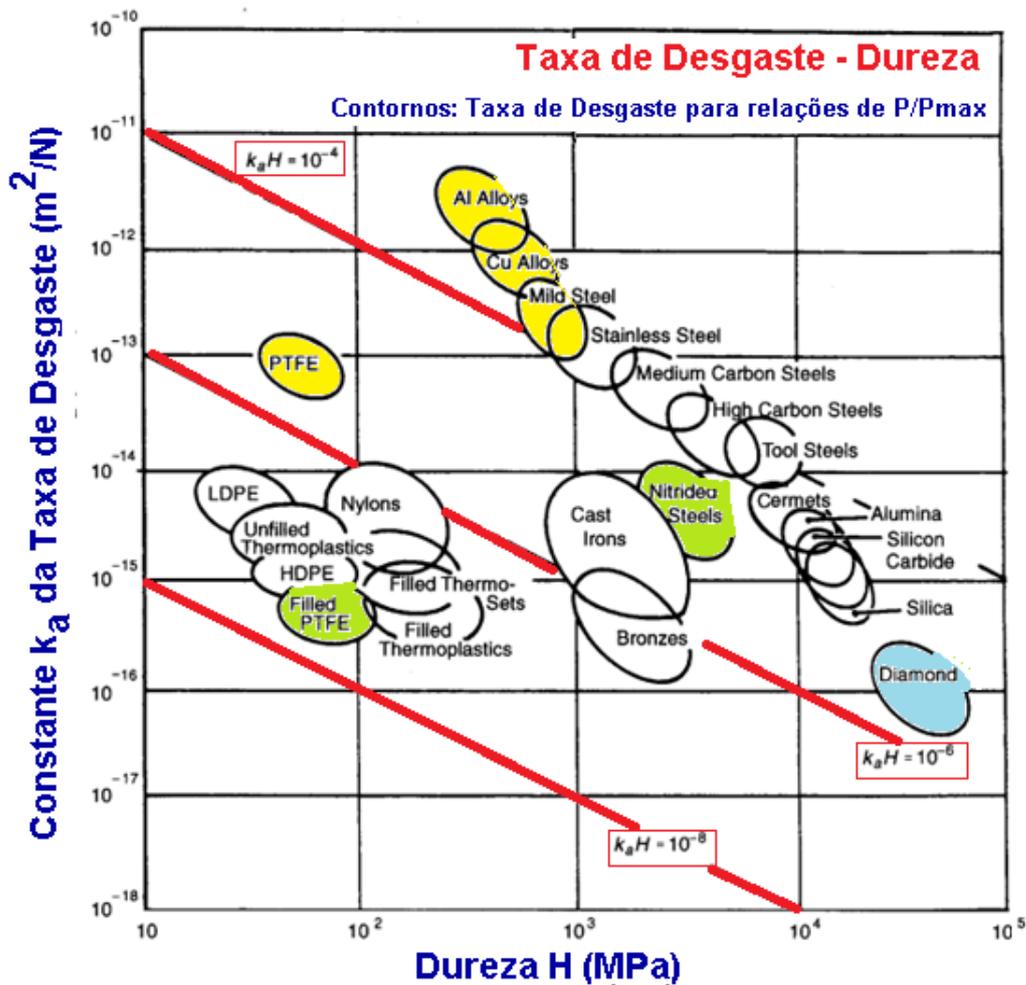
Seja um pêndulo esclerométrico sob a ação de um campo gravitacional constante, com aceleração  $\mathbf{g}$ , submetido a um campo de pressão de contato variável,  $\mathbf{p}_c$ , o qual pode ser visualizado como um sistema físico de um pêndulo com um ponto de apoio oscilante em  $(x, y, z)$  submetido a duas constantes de movimento: a energia e o momentum azimutal, Figura 7(a). Seja, agora, uma trilha cíclica, circular, entre um sólido esférico e uma pista plana submetida a um campo de pressão de contato  $\mathbf{p}_c$ , associado a uma carga normal,  $\mathbf{N}$ , Figura 7(b).

As complexidades desses sistemas podem ser comprovadas pelas variações funcionais, surgimento de famílias de caminhos e ilhas caóticas na trilha impressa pelo pêndulo em decorrência do risco esclerométrico, no caso esboçado na Figura 7(a) ou pelo par esfera-disco, Figura 7(b), cujas flutuações na aderência (*stick*) e escorregamento (*slip*) na direção do movimento pendular ou na trilha de desgaste promovem perturbações fracas ou fortes na circunvizinhança espaço-temporal do risco ou da trilha, respectivamente.



**Figura 7.** Ensaios tribológicos (a) Risco esclerométrico (Scratch) em contato Pendular, pressão de contato variável, único passe; (b) Pino contra disco, carga normal constante, contato circunferencial cíclico

Esta tese foi realizada tendo-se como polímero base PTFE em pó. A Figura 8 apresenta uma carta de Ashby concernente à dureza e à taxa de desgaste dos grupos de materiais estruturais, em que se depreende que há duas ordens de grandeza entre a taxa de desgaste do PTFE com e sem carga mineral. Esta tese se insere neste cenário contemporâneo da Engenharia. Desenvolveu-se sistematicamente um grupo de compósitos à base de pó de PTFE micrométrico, ao qual se adicionaram diferentes percentuais de carga mineral (rejeito de scheelita), de modo a produzir um compósito com propriedades superiores, tais como: maior resistência ao desgaste, quando comparado ao PTFE puro associado às características de baixo coeficiente de atrito, inerente a este material.



**Figura 8.** Dureza e taxa de desgaste de sólidos usados como materiais estruturais em Engenharia deslizando contra aço doce, Ashby, 2005

O rejeito de scheelita proposto como carga para os compósitos integrantes deste trabalho se enquadra no desenvolvimento de materiais estruturais poliméricos ambiental e funcionalmente apropriados para componentes mecânicos com respostas tribológicas sistêmicas eficazes. No Brasil, nas últimas quatro décadas, o Seridó nordestino tem sido o maior produtor de Tungstato de Cálcio, tendo se destacado minerações scheelitíferas, como as minas Brejuí, em Currais Novos e Bodó, no município homônimo, ambas no Rio Grande do Norte, legando a céu aberto pilhas de rejeito, como a da Figura 9.



**Figura 9.** Foto (da autora) panorâmica da Mina Brejuí, Currais Novos–RN e sua pilha de rejeito de scheelita a céu aberto, faixa branca acima das imagens das casas e árvores

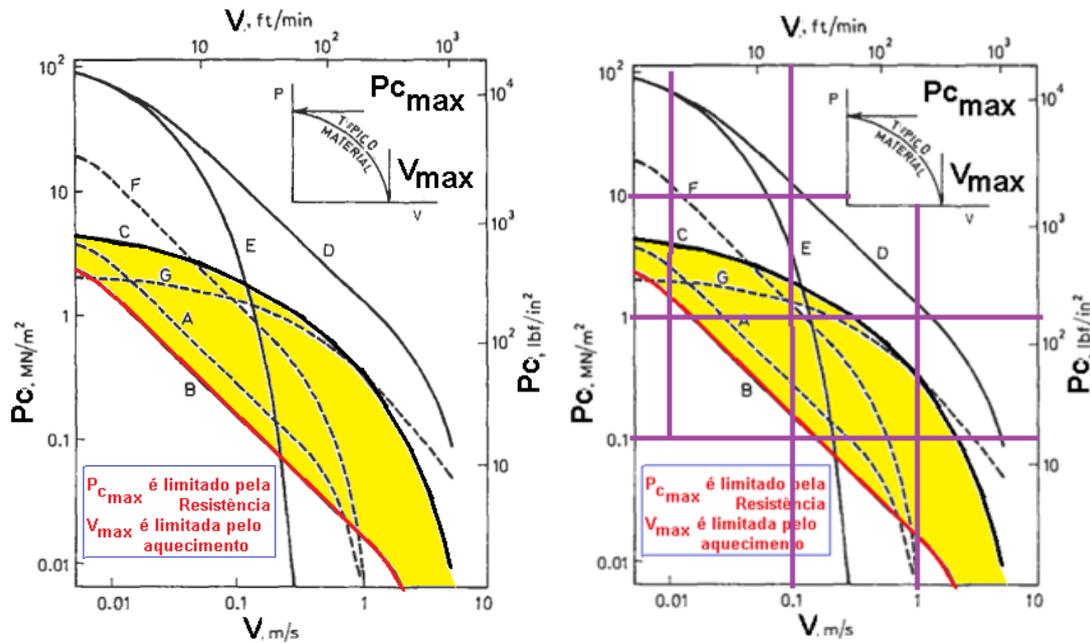
Desde a II Guerra Mundial, o PTFE tem provado comercialmente ser um dos melhores materiais anti-atrito, desde que utilizado sob tensões de contato moderadas, com uma grande versatilidade em diferentes segmentos da indústria e de utensílios domésticos, como as placas revestidas de películas antiaderentes. Entretanto, apresenta baixa resistência ao desgaste por deslizamento, o que tem levado à falha prematura dos componentes desenvolvidos com esse material, demandando novos estudos.

Alguns materiais poliméricos são avaliados de acordo com Oneale (Tribology Handbook), pelas curvas  $P \times V$  para taxas de desgaste esboçadas no Gráfico da Figura 10.

Tais curvas são relacionadas a mancais com taxa de desgaste de  $25 \mu\text{m}$ , a cada 100h de deslizamento, sob carga unidirecional (Pino contra Disco), para um contra corpo com rugosidade média de  $0,2\text{-}0,4 \mu\text{m}$ .

Cada curva da Figura 9 corresponde aos seguintes materiais poliméricos:

- A – Termoplástico
- B – PTFE
- C – PTFE + Carga
- D – Bronze Poroso + PTFE + Pb
- E – PTFE – Fibra de Vidro + Termofixo
- F – Termofixo Reforçado +  $\text{MoS}_2$
- G – Termofixo/Carbono – Graphite + PTFE



**Figura 10.** Critério de desempenho de alguns materiais poliméricos a partir de curvas P x V para taxas de desgaste especificadas

Na Tabela 2, as principais propriedades dos compósitos poliméricos mais utilizados para rolamentos secos, a base de carbono e metais estão descritas.

**Tabela 2.** Propriedades dos materiais para rolamentos secos, Tribology Handbook, Capítulo A5, 2002

Materiais para Buchas (ROLAMENTOS SECOS)								
COMPOSITOS POLIMÉRICOS À BASE DE CARBONO E METAIS MAIS UTILIZADOS!								
PRINCIPAIS PROPRIEDADES DOS MATERIAIS PARA ROLAMENTOS SECOS								
MATERIAL	EXEMPLO	MÁXIMA CARGA ESTÁTICA		MAXTEMP	COEFICIENTE	CONDUTIVIDADE TÉRMICA		CARACTERÍSTICAS
		MN/m <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup> lbf/in <sup>2</sup>	SERVIÇO	DE EXPANSÃO	W/m <sup>2</sup> °C	Btu/ft h °F	
TERMOPLÁSTICOS	Nylon, Acetal, PEAD	10	1,5	100	100	0,24	0,14	Baixo custo
TERMOPLÁSTICOS + Carga	Acima+ MoS <sub>2</sub> , PTFE, vidro, grafite, etc.	15 - 20	2 - 3	150	60 - 100	0,24	0,14	Lubrificantes sólidos e
<b>PTFE + Carga</b>	Vidro, bronze, mica, carbono, metais	<b>2 - 7</b>	<b>0,3 - 1</b>	<b>250</b>	60 - 100	0,25 - 0,5	0,15 - 0,3	<b>Baixíssimo atrito</b>
POLIMERO DE ALTA TEMPERATURA + Carga	Poliamida, Poliamida - imida, PEEK	30 - 80	4,5 - 12	250	20 - 50	0,3 - 0,7	0,2 - 0,4	Custo elevado
TERMOFIXOS + Carga	Fenólicos, epóxis, amianto, têxteis, PTFE	30 - 50	4,5 - 7,5	175	out/80	0,4	0,25	Reforçados com fibra para melhorar a
CARBONO - GRAFITE	Teor de variável de grafite, podendo conter resina	1 - 3	0,15 - 0,45	500	1,5 - 4	10 - 50	6 - 30	Quimicamente inerte
CARBONO - METAL	Com cobre, prata, antimônio, estanho, chumbo	3 - 5	0,45 - 0,75	350	4 - 5	15 - 30	9 - 18	Aumento de resistência
METAL - LUBRIFICANTE SÓLIDO	Bronze - grafite - MoS <sub>2</sub> ; Ag - PTFE	30 - 70	4,5 - 10	250 - 500	10,0 - 20,0	50 - 100	30 - 60	Aplicação para altas
MATERIAS ESPECIAIS NÃO USINÁVEIS	Bronze poroso/PTFE/Pb	350	50	275	20	42	24	Necessitam ser considerados na fase de projeto
	PTFE/fibra de vidro + resina	700	100	250	12	0,24	0,14	
	Termofixo + superfície de PTFE	50	7,5	150	10	0,3	0,4	
	Metal + Carga de PTFE linear	7	1	275	100	0,3	0,4	

A resistência ao desgaste do PTFE pode ser melhorada através da introdução de aditivos ou combinando-se com outros materiais, formando compósitos poliméricos [STANKOVIĆ,2013]. Suas características mecânicas, elétricas, térmicas e de aderência o destaca de outros polímeros. Também é quimicamente inerte, e de difícil adesão à sua superfície, sendo necessário tratamento químico para a realização de colagem [COLLIN e FAKE, 1995].

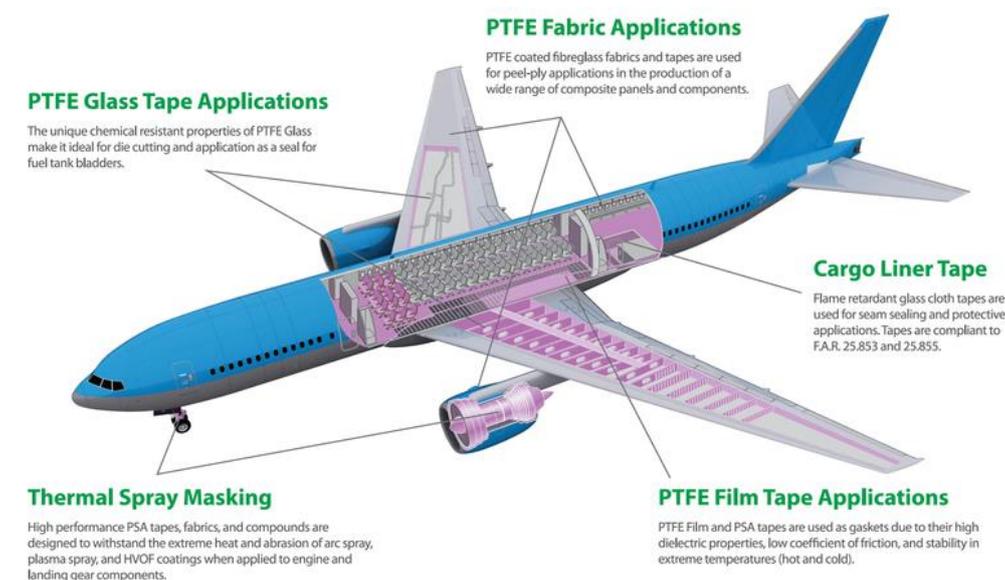
Por estas razões, o PTFE é comumente usado em aplicações triboquímicas, tais como rolamentos, retentores, selos e fitas veda-rosca. É considerado um polímero estrutural de engenharia devido às suas características de alta resistência química, excelente isolamento elétrico e pouco susceptível ao envelhecimento mesmo em contato com o ar e outros produtos. Isto é explicado pela presença do flúor, que assim como outros elementos da coluna dos halogênios possui a propriedade de retardante de chama e por forças intermoleculares elevadas, geradas pela presença de grandes átomos de flúor, que conferem rigidez à macromolécula, dificultando mudanças de conformação. Promovem também alta estabilidade térmica, baixo coeficiente de atrito e inércia química [KHEDKAR *et al.*,2002; LI *et al.*,2002].

O PTFE também é usado para modificar a superfície de materiais a um nível de energia mais baixo da superfície e, assim, melhorar as propriedades tribológicas concernentes ao baixo atrito em aplicações industriais, citadas por WANG (2012) em estudos sobre as propriedades hidrofóbicas e resistência ao desgaste de revestimentos à base de PPS/PTFE, os quais se inspiraram nas folhas de lótus biomimética.

A indústria aeroespacial caracteriza-se por exigir elevados investimentos, integrar atividades multidisciplinares, ser geradora de tecnologias de ponta com rápida evolução, propiciar a transferência de inovações a outras indústrias, ter produtos que, além de complexos, são de alta densidade tecnológica e longo ciclo de desenvolvimento e produção.

Em 1999, o jornal *The New York Times* noticiava sobre a solicitação do setor de manutenção de uma companhia aérea, por uma camada protetora de Teflon® nos tanques de combustível, já que faíscas geradas pelo desgaste nesta região poderiam ter causado a explosão que destruiu o voo 800 da TWA, um Boeing 747, em julho de 1996.

Empresas como a *Green Belting Industries* investem em componentes à base de PTFE visando aplicações de produtos em fabricação e manutenção de aeronaves, a fim de maximizar sua eficiência, reduzir custos e minimizar o tempo no Hangar, além da excepcional qualidade do produto, avançando na pesquisa e no desenvolvimento de compósitos poliméricos à base de PTFE. Na Figura 11, têm-se alguns componentes compósitos desenvolvidos pela *Green Belting* à base de PTFE aplicados em Fitas e Filmes, Tecidos e Revestimentos aplicados através de aspensão térmica em tanques de combustível, revestimentos em motores e engrenagens, painéis, gaxetas, retardantes de chama, dentre outros.



**Figura 11.** Aplicações de materiais a base de PTFE em aeronaves(fonte: <http://www.greenbelting.com/industry-solutions-old/aviation.html>)

Além desta introdução, cinco capítulos e um apêndice compõem esta tese de doutorado. No capítulo 2, é apresentada uma revisão bibliográfica sobre assuntos pertinentes ou inter-relacionados a este trabalho, intrinsecamente complexo, envolvendo tribologia de polímeros, compósitos poliméricos e acabamento superficial.

O capítulo 3 apresenta os materiais e métodos utilizados na pesquisa, englobando a descrição do projeto e construção de uma bancada de moldagem por compressão a quente, do esclerômetro pendular e sua instrumentação, das condições de desenvolvimento dos compósitos e suas caracterizações térmica, físico-química e mecânica, além dos métodos de caracterização superficial, do coeficiente de atrito, taxa de desgaste e resistência ao risco.

No capítulo 4 são apresentados os resultados de desempenho dos compósitos confeccionados com sua caracterização superficial, rugosidade, ângulo de contato e caracterização tribológica com esclerometria pendular e tribômetros de configuração pino contra disco. É feita uma breve discussão destes resultados objetivando descrever os fenômenos identificados.

Uma discussão dos principais resultados é apresentada no capítulo 5, em que se sedimenta a contribuição original desta Tese. No capítulo 6 são inseridas as conclusões desta pesquisa. O apêndice A é composto pelos estudos experimentais executados utilizando-se ensaios exploratórios do PTFE puro e dos compósitos, com mapas de desgaste da esclerometria em imagens de MEV. O Apêndice B apresenta o desempenho tribológico dos compósitos. O Apêndice C as análises químicas (TG e DSC) dos compósitos. O Apêndice D a dureza Rockwell M dos compósitos. O Apêndice E a temperatura do contato entre a esfera (pino) e os corpos de prova durante ensaios pino disco e o Apêndice F o registro da velocidade nos ensaios de esclerometria oficiais. O Anexo A é apresentado uma revisão sobre a scheelita.

## 1.1 Objetivo Geral

Desenvolver compósitos de PTFE e frações volumétricas de rejeito de scheelita que assegurem superfícies com molhabilidade definida, coeficiente de atrito inferior a 0,23 e *backlash* (desgaste) inferior a  $10^3 \mu\text{m}/\text{km}$  sob pressão de contato inicial de até 10MPa no deslizamento circular sob aço polido a velocidades inferiores a  $\pi/10$  m/s (0,314 m/s).

## 1.2 Objetivos Específicos

- Comparar a dureza, molhabilidade, resistência ao risco esclerométrico e ao desgaste cíclico de compósitos de PTFE em suas respectivas frações em massa de Rejeito de Scheelita compreendidas entre 1 e 50%;
- Analisar a superfície desses compósitos antes e após os ensaios programados;
- Identificar fenômenos de *stick-slip*;
- Correlacionar parâmetros e quantificar o atrito, a taxa de afundamento da pista de desgaste e estimar a faixa de *backlash* em função da pressão de contato,

velocidade e distância de deslizamento do compósito contra uma superfície de aço polida.

### **1.3 Hipótese**

Compósitos com matriz de PTFE carregados com resíduos de scheelita apresentam coeficientes de atrito de deslizamento em relação ao aço inferiores a 0,23, desgaste e custos inferiores ao PTFE sem carga sob condições controladas de velocidade, comprimento e pressão de contato.

## 1.4 Contribuições Científicas

Durante o decorrer deste doutorado trabalhos científicos foram desenvolvidos e publicados em periódicos e congressos fundamentais para o direcionamento desta tese. Na Tabela 3 algumas dessas publicações.

**Tabela 3.** Trabalhos publicados em periódico/congresso no período 2011 – 2015

<b>Artigo</b>	<b>Período/Evento</b>	<b>Objetivo</b>
<b>Dureza Barcol x Dureza Rockwell M em Compósitos Poliéster.</b> (SOUZA, J. R. <i>et al.</i> )	CBPol - Congresso Brasileiro de Polímeros, 2011, v. 11, Campos do Jordão.	Conhecer a resistência a indentação e comparar seus resultados.
<b>Avaliação da dureza de um compósito polimérico submetido a diferentes níveis de energia térmica.</b> (SOUZA, J. R. <i>et al.</i> )	CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Joinville, 2012.	Resistência mecânica, através de dureza, em compósitos, solicitado por uma fonte quente externa em diferentes níveis energéticos.
<b>Estudo Termomecânico de Pastilhas de PTFE Comercial.</b> (SOUZA, J. R. <i>et al.</i> )	CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Joinville, 2012.	Avaliar o efeito da temperatura e do tempo de compactação de pastilhas de PTFE
<b>Avaliação Térmica do PTFE em forma de pó.</b> (SOUZA, J. R. <i>et al.</i> )	CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Joinville, 2012.	Identificar a cristalinidade e a estabilidade térmica nos estados “como adquirido” e “após prensado” de PTFE comercializado em pó.
<b>Caracterização do Rejeito de Scheelita das Minas Brejuí e Bodó.</b> (SOUZA, J. R. <i>et al.</i> )	CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Joinville, 2012.	Caracterizações químicas das pilhas de rejeitos de Scheelita da Mina Brejuí e da Mina Bodó
<b>Caracterização Tribológica de Rejeito de Scheelita.</b> (SOUZA, J. R. <i>et al.</i> )	Congresso Brasileiro de Cerâmica & 5th Congresso Iberoamericano de Cerâmica, 2013.	Caracterizar e avaliar o desempenho tribológico de compósitos de PTFE + Rejeito de Scheelita.
<b>Why is there Nonlinearity of Deformation Energy during Mechanism Transitions of PTFE scratching?</b> (SOUZA, J. R. <i>et al.</i> )	World Tribology Congress, Torino, 2013.	Identificar a Energia de Deformação dos compósitos durante as transições de mecanismo do PTFE através de esclerometria
<b>Tribological Performance of PTFE + Tailings of Scheelite Composites.</b> (SOUZA, J. R. <i>et al.</i> 2013)	Tribo Lyon 2013, Lyon. 40th Leeds-Lyon Symposium on Tribology & Tribochemistry Forum.	Desenvolver Compósitos e avaliar seu desempenho tribológico visando alternativas para a reutilização de Rejeitos, através da resistência ao risco.

## **2. *Revisão Bibliográfica***

### **2.1 Tribologia**

O principal objetivo da Engenharia é produzir, para uma determinada especificação, uma máquina ou um sistema que deve realizar uma determinada função. Conforme descrito por DOWSON (1997), esse objetivo predominou no início da história da Engenharia, de maneira que considerações sobre atrito, desgaste, confiabilidade e outros itens relacionados à eficiência eram subservientes.

Apesar dessa descrição acerca da história da Engenharia, sabe-se que as preocupações voltadas aos temas desgaste, atrito e lubrificação tiveram início já bem antes do século passado. Como tema na sociedade tecnológica, a tribologia vem sendo considerada de maneira premente desde meados de 1940 e ainda mais intensamente na década de 1960 [DOWSON, 1997].

O termo “tribologia”, definido como “ciência e tecnologia das superfícies que interagem entre si mediante um movimento relativo”, surgiu em meados da década de 1960, inicialmente no Reino Unido e em seguida propagado por todo o mundo. As interações superficiais ditam e controlam o funcionamento de praticamente todos os dispositivos mecânicos construídos pelo homem, fato com o qual se observa uma importância central da tribologia em termos de desenvolvimento tecnológico [DOWSON, 1997].

Compreender a natureza física do atrito, a definição de desgaste, suas consequências, seus mecanismos e as formas de controlar seus efeitos são fundamentais aos engenheiros modernos. A importância da Tribologia na engenharia de polímeros tem aumentado nos últimos anos, devido à necessidade de se obter materiais resistentes ao desgaste e com dureza elevada.

### *2.1.1 Ensaios Tribológicos*

Atrito e desgaste são originados por interações microscópicas entre superfícies que estão em contato mecânico e deslizam uma contra a outra. As respostas a essas interações são o resultado dos materiais, das características geométricas e topográficas das superfícies e das condições globais sob as quais as superfícies são submetidas durante o deslizamento, ou seja, carregamento, temperatura, atmosfera, tipo de contato etc. Todos os aspectos mecânicos, físicos, químicos e geométricos das superfícies em contato e a atmosfera ao redor afetam as interações superficiais e assim, também as características tribológicas do sistema. Portanto, atrito e desgaste são características únicas dos sistemas tribológicos em que são avaliados e não simplesmente parâmetros dos materiais acessíveis em handbooks [BHUSHAN, 2001].

BHUSHAN (2001) mencionou a dificuldade de se modelar atrito e desgaste já que cada sistema tribológico tem características únicas e são muitos os parâmetros que interferem no contato, como mencionado acima. Além disso, não é simples correlacionar atrito e desgaste, por exemplo, baixo atrito não implica, necessariamente, em baixa taxa de desgaste, não existe uma relação direta.

Desta forma, como as propriedades tribológicas não são parâmetros dos materiais e sim do sistema, tribotestes (ensaios tribológicos) são parte integral de ambos, o processo de desenvolvimento de tribomateriais (materiais aplicados a sistemas tribológicos) e a seleção de materiais para aplicações que envolvam atrito e desgaste.

#### *2.1.1.1 Esclerometria*

A técnica de esclerometria consiste na simulação e análise do processo abrasivo encontrado em situações reais através de ensaios de laboratório. O contato entre o agente abrasivo e a superfície é determinado pelo conjunto de parâmetros físico-químicos e mecânicos atuantes no tribo sistema. Basicamente, a esclerometria pode ser representada como um teste de riscamento simples que simula as interações do processo abrasivo, nos quais são utilizados indentadores duros e de geometria simples como agentes abrasivos.

Para a utilização da técnica de esclerometria deverão ser considerados alguns parâmetros importantes do processo, como a velocidade, dureza e geometria do indentador, a carga aplicada, a taxa de escoamento do material ensaiado, a temperatura alcançada no processo, como também os desgastes e possíveis lascamentos dos indentadores durante os ensaios [BUTTERY, 1970].

Segundo BUTTERY (1970), dentre os métodos esclerométricos pode-se destacar os seguintes: Rotativo ou Circular, Retilíneo e Pendular.

Com a liberação do pêndulo, o indentador irá percutir sobre o material da amostra, gerando um risco em forma de meia lua. Essa técnica é particularmente empregada para a determinação da energia de deformação em condições de abrasão em situações dinâmicas e onde a remoção de material se dá com elevadas taxas de deformação.

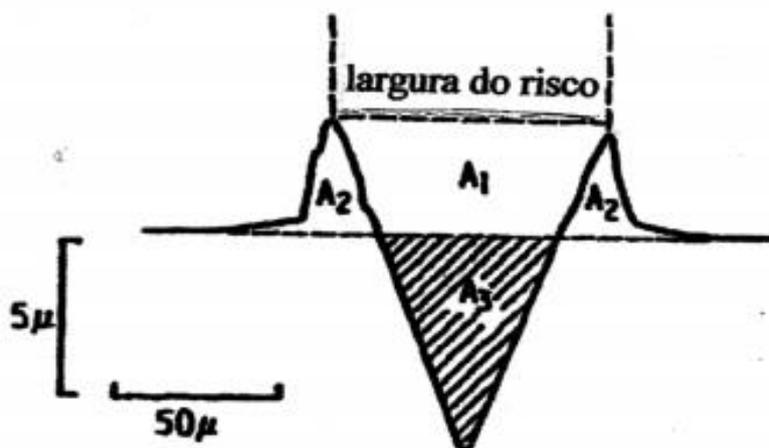
Na esclerometria pendular, a energia dissipada na geração do risco é determinada pela variação da energia potencial do pêndulo, de maneira análoga à utilizada nos ensaios de impacto. A energia específica de riscamento, dada pela relação entre a energia necessária para gerar um risco e a massa removida, é um parâmetro de rápida obtenção, e representativo da resistência à abrasão dos materiais para várias situações práticas. Assim, através da esclerometria pendular é possível classificar diferentes materiais com relação ao desgaste abrasivo, e de forma relativamente barata [MARACINI et al 2002].

Segundo WANG *et al.* (2001), o riscamento pode ser classificado em dois tipos dependendo do movimento da ferramenta:

- Riscamento em deslizamento – uma nova superfície é gerada pelo movimento de translação da ponta da ferramenta em uma linha paralela à superfície plana, de forma que um sulco de profundidade constante é produzido;
- Riscamento em rotação – um sulco é formado pelo movimento rotacional da ferramenta em um plano perpendicular à superfície, de forma a produzir um sulco com variação de profundidade.

Os perfis dos sulcos obtidos em ensaios de esclerometria linear resultam em formas similares aos mostrados na Figura 12. A área A3 indica a quantidade de material deslocado da peça, sendo que parte do material é removida (cavaco) e parte é simplesmente deslocada para a região lateral do sulco (área A2). Assim, o material removido na forma de cavacos pode ser obtido da expressão  $A3 - A2$ . O volume total do sulco é representado por  $(A1 + A3) \times \text{comprimento}$ .

A interpretação dos perfis dos sulcos de riscamento auxilia no entendimento dos comportamentos de materiais sujeitos à abrasão e dos mecanismos envolvidos no processo [BUTTERY, 1970].



**Figura 12.** Representação esquemática dos perfis dos sulcos de riscamentos (adaptado de BUTTERY, 1970)

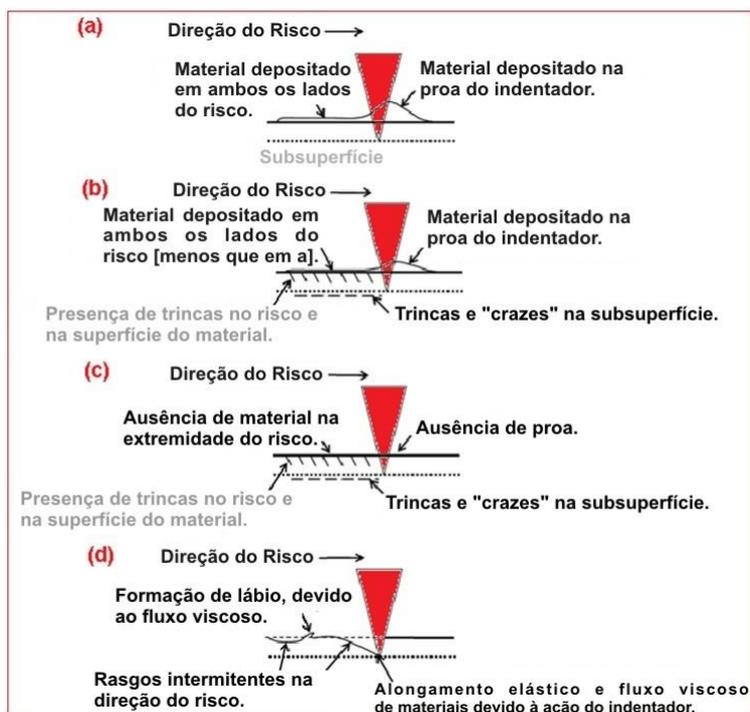
Em termos da utilização de ensaios de riscamento esclerométrico para estudar o desgaste abrasivo, existem muitas publicações. Segundo WANG e colaboradores (2001), a utilização de riscamento com uma única partícula como ferramenta têm-se mostrado uma ferramenta eficaz na investigação do comportamento de materiais em processos de remoção abrasiva. Segundo BLAU (1997), entretanto, um problema importante com alguns dos modelos de desgaste abrasivo baseados em uma única partícula é que não se caracteriza a influência das partículas adjacentes, com os possíveis engastamentos e carregamentos (obstrução das superfícies por partículas de desgaste).

Segundo BRISCOE (1998) os mecanismos de abrasão promovidos por um indentador esclerométrico cônico e ângulos de ponta correspondentes, como os representados na Figura 13, podem ser avaliados a partir de estudos de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

RESPOSTA		Ângulo do cone $\alpha$
Esquemática	Genérica	
	Elástica	180°
	Alisamento	150°
	Formação de proa dúctil	120°
	Usinagem dúctil + Rachadura	90°
		60°
		30°
	Usinagem frágil	0°

**Figura 13.** Desenho esquemático dos mecanismos de abrasão promovidos por esclerometria

De acordo com BRISCOE e SINHA, 2003, as principais respostas do material polimérico ao riscamento são: Resposta dúctil, Resposta dúctil e frágil, Resposta Frágil e Resposta elastomérica. Na Figura 14 abaixo, se têm a representação esquemática dessas respostas.



**Figura 14.** Representações esquemáticas das principais respostas do material polimérico ao riscamento

(A) Resposta dúctil: O material deforma visco-plasticamente e forma acumulações nos ambos os lados do risco. Um "proa" também é formada próxima a parte frontal do indetador.

(B) Resposta dúctil e frágil: O material mostra tanto sulcamento dúctil como fratura frágil. A extensão da deformação plástica dúctil é menor. As fissuras podem aparecer na superfície ou na subsuperfície do material. As direções e formas da trinca irão depender do material e os locais da máxima tensão de tração aplicada.

(C) Resposta Frágil: Este tipo genérico de resposta é exclusivamente mostrado por cerâmicas e vidros. Não há nenhuma evidência de formação de acumulações ou proa, no entanto, é possível a deformação plástica na região de alta tensão de compressão em frente ao indetador.

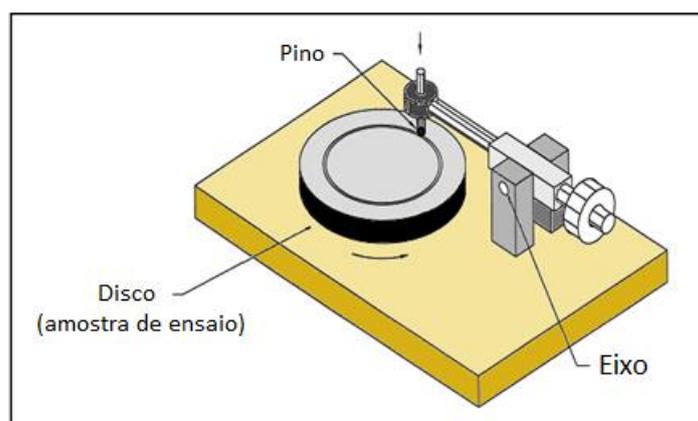
(D) Resposta elastomérica: Para indetadores afiados, o material mostra rasgos intermitentes no sentido da travessia do indetador. O indetador punciona o material, devido a uma isolada concentração de tensões, e retira as moléculas na direção de movimento até à fratura. Uma quantidade considerável de escoamento viscoso do material é possível que apresente a formação de "lábios" ou partículas de detritos mesmo que livremente ligados.

### 2.1.1.2 Pino Disco

O ensaio com configuração Pino sobre Disco mede o atrito e as propriedades de desgaste em deslizamento de superfícies secas ou lubrificadas de uma variedade de materiais e revestimentos. Um tribômetro Pino-Disco opera no seguinte princípio: um plano, pino ou esfera é carregado sobre uma amostra de ensaio com uma massa conhecida com precisão. O braço elástico altamente rígido garante um ponto de contato quase fixo e, portanto, uma posição estável na faixa de atrito. Atrito dinâmico é determinado durante o ensaio medindo a deflexão do braço elástico por medição direta da alteração no torque. A carga normal, velocidade de rotação, e o diâmetro da trilha de desgaste são todos os parâmetros normalmente controlados.

Esta técnica pode ser usada para determinar o atrito não apenas para os materiais poliméricos, mas para o diamante como revestimentos de carbono, filmes finos ou materiais eletrônicos. A maioria dos tribômetros Pino-Disco são controladas por computador e armazenam o atrito medido em função do tempo ou parcelas de distância para referência futura. A Figura 15 mostra um diagrama esquemático de um aparato Pino-Disco.

O ensaio é relativamente rápido e a gama normal dos parâmetros operacionais estão abrangidos dentro de 2 h. Outra vantagem do ensaio é a possibilidade de medir o efeito do atrito local, o que é de interesse quando existem medições relativas às simulações. Além disso, os parâmetros de influência tais como a temperatura, os gases do ambiente (ar, nitrogênio, oxigênio, etc.) podem ser controlados.



**Figura 15.** Diagrama Esquemático do Ensaio Pino-Disco

## 2.2 Polímeros e seu Comportamento Viscoelástico

Os materiais metálicos, historicamente, sempre foram muito utilizados na fabricação de peças e componentes para as mais diversas áreas de atuação. A substituição de algumas peças produzidas em metal por outro material parecia impossível, com o desenvolvimento dos materiais poliméricos, principalmente após a segunda guerra mundial, quando houve um crescimento acelerado na substituição de peças metálicas por poliméricas [RODRIGUES, 2010].

Os plásticos e as borrachas são as formas mais conhecidas dos polímeros. São usados pelas indústrias, principalmente automobilística, eletroeletrônica e construção civil, não só para substituir os metais, como também para substituir vidros, cerâmicas, entre outros, por apresentarem custo reduzido e propriedades vantajosas [KOO, 1972].

Polímeros com características específicas já são usados com sucesso como ossos, articulações, tendões, ligamentos, nervos, dentre outros, mantendo suas características similares, ou seja, atuando da mesma forma que aquela parte do organismo que foi substituída. Para substituir nervos, por exemplo, foram desenvolvidos polímeros condutores de eletricidade [EBNESAJJAD, 2011], de maneira a simular o funcionamento dos órgãos originais.

No caso das cirurgias de reconstrução, há alguns relatos que trazem as desvantagens de se usar implantes metálicos no organismo, já que com o tempo eles podem sofrer corrosão, e os íons metálicos podem se acumular no organismo. Além deste inconveniente, algumas pessoas podem apresentar sensibilidade ao titânio (material consagrado em implante) e o implante pode se mover. Outro inconveniente de pacientes com peças metálicas implantadas é que não podem realizar determinados exames como a Ressonância Magnética Nuclear [EBNESAJJAD, 2011].

Devido a essas desvantagens, os cientistas estão sempre procurando materiais alternativos. Muitos médicos já estão usando polímeros bioabsorvíveis em suas cirurgias para substituir os tecidos, por exemplo. Assim, esse material fica substituindo o osso, até que ele se regenere, e depois é absorvido pelo organismo, não necessitando de uma segunda cirurgia para a retirada do implante [EBNESAJJAD, 2011].

Sabendo-se das inúmeras aplicações e vantagens que os materiais poliméricos e compósitos à base polimérica proporcionam, é de suma importância atentar para o estudo tribológico desta classe de materiais, que tem cada vez mais se destacado mundialmente e que ainda apresentam incógnitas ao serem utilizados nas áreas mecânica, petrolífera, têxtil, materiais e biomédica.

Desta forma, é primordial o entendimento sobre o comportamento mecânico ou dinâmico-mecânico de um polímero que será sempre governado por sua viscoelasticidade, função do tipo de ensaio e de sollicitação aplicados. Dependendo da resposta ao estímulo mecânico, o material pode ser classificado como elástico ou viscoso [WUNDERLICH, 1997, CASSU e FELISBERTI, 2005, WETTON, 1986]. Materiais poliméricos apresentam comportamento mecânico intermediário ao elástico e ao viscoso. A contribuição elástica e viscosa para o comportamento mecânico do polímero depende da temperatura e da escala de tempo do experimento [CASSU e FELISBERTI, 2005].

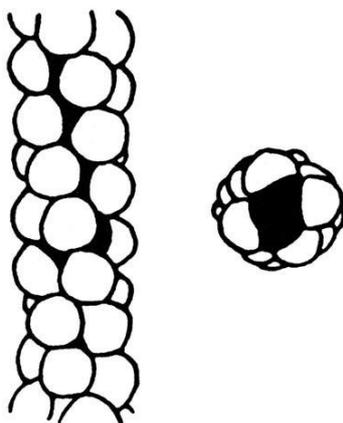
PERSSON (2000) comenta que “polímeros, diferentemente de outros materiais, são duramente plásticos, enquanto metais, cerâmicas e alguns compósitos são duramente elásticos”, ou seja, polímeros podem apresentar amplas faixas de deformação elástica até ser deformado plasticamente, característica contrária a de outros grupos de materiais, que mostram pouca faixa de deformação elástica e são mais facilmente deformados plasticamente.

O fenômeno da relaxação em materiais poliméricos está relacionado com sua característica viscoelástica e normalmente estão associadas às mudanças conformacionais de grupos ou segmentos da cadeia polimérica, resultantes de rotações em torno das ligações químicas. O tempo de relaxação é uma medida da mobilidade das cadeias e depende da estrutura molecular e da temperatura. A temperatura influencia a mobilidade da cadeia polimérica e, conseqüentemente, o tempo relacionado à sua relaxação (CASSU e FELISBERTI, 2005).

### 2.2.1 Politetrafluoretileno – PTFE

A substituição do elemento químico H por F nas ligações C-H, melhoram a resistência das ligações em cerca de 17%, no mercado, a partir dos anos 1930-40, os fluorocarbonos, elevam de 99 kcal/mol das ligações C-H para 116 kcal/mol nas ligações C-F [EBNESAJJAD, 2011].

O PTFE tem uma conformação em forma de hélice girando, compreendendo 13 grupos de  $\text{CF}_2$  a cada curso de  $180^\circ$ . Esta configuração é termodinamicamente favorecida pela estrutura zigue-zague planar (típica para o polietileno), devido à repulsão mútua dos átomos de flúor adjacentes. A hélice forma um cilindro quase perfeito que compreende um revestimento exterior de átomos de flúor que envolvem um núcleo à base de carbono [KOO, 1972]. Esta morfologia é propícia para embalar as moléculas de PTFE como hastes paralelas. No entanto, os cilindros individuais podem deslizar uns sobre os outros. A repulsão mútua de átomos de flúor tende a inibir a quebra da estrutura da cadeia. Por isso, a cadeia de PTFE é muito rígida, Figura 16. O revestimento exterior de átomos de flúor protege a coluna de carbono, proporcionando, assim, a inércia química e estabilidade, além de reduzir a energia de superfície do PTFE, conferindo um baixo coeficiente de atrito, da ordem de  $0,1\mu\text{e}$  propriedades antiaderentes [POZZOLI, 1997].



**Figura 16.** Representação esquemática da hélice politetrafluoretileno (FONTE: J. G. Drobny, Technology of Fluoropolymers, 2008)

A excepcional resistência química, resistência à radiação ultravioleta (UV), e estabilidade térmica podem ser explicadas pelo fato de que as ligações C-F e C-C em fluorocarbonetos estão entre as mais fortes, conhecidas em compostos orgânicos [SHERATT, 1966].

Suas propriedades químicas, elétricas, térmicas, e de auto-lubrificação o destacam dos demais polímeros, pelo seu mais baixo coeficiente de atrito dentre os materiais poliméricos [MAHAJAN, 1998]. Além de possuir a propriedade que permite que nenhum outro material possa aderir a sua superfície, sendo necessário tratamento químico para o processo de colagem. Com uma versatilidade usual em segmentos da indústria é constantemente utilizado em aplicações tribológicas como rolamentos auto-lubrificantes [TALAT, 1998], mancais, selos, superfícies auto-limpantes [PARKIN, 2005] e fitas veda-rosca, assim como nas indústrias aeroespacial, onde a lubrificação é indesejada, petroquímica e biomédica como implantes biomédicos [AMID, 1994].

Como um resultado de seu notável baixo COF, particularmente o PTFE demonstra grande potencial como um lubrificante sólido. Entretanto, o uso de PTFE como lubrificante sólido é limitado devido à sua alta susceptibilidade ao desgaste. TANAKA, BRISCOE, BAHADUR, e LANCASTER são alguns dos pioneiros no estudo do atrito e comportamento de desgaste do PTFE [BISWAS, 1992 e VIJAYAN, 1992; BAHADUR, 1984 e TABOR, 1984; LANCASTER, 1968; TANAKA, 1982 e KAWAKAMI, 1982; BRISCOE, 1977 e STEWARD, 1977]. Grande parte da investigação tem se concentrado na redução da alta taxa de desgaste do PTFE através da incorporação de vários enchimentos e ou cargas. Em 1982, Tanaka publicou um artigo sobre a não eficácia das cargas de nanopartículas na redução do desgaste de PTFE [TANAKA, 1982 e KAWAKAMI, 1982]. No entanto, nos últimos anos, muito progresso tem sido encontrado com o uso de nanopartículas. Em trabalhos mais recentes, tais como agentes de enchimento de carbono [LEE *et al.*, 2007], alumina [Mc ELWAIN *et al.*, 2008], e óxido de zinco [LI *et al.*, 2001] as nanopartículas têm sido utilizadas para melhorar a durabilidade do PTFE.

De acordo com S. K. BISWAS (1992), esse material apresenta resistência ao desgaste na ordem de  $5 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{N}$ , (KHEDKAR, 2002; LI, 2002; ASHBY, 2005), o que limita a utilização desse polímero em alguns setores industriais, levando componentes estruturais a falhas prematuras.

Um dos efeitos da incorporação de agentes de enchimento em polímeros é uma modificação das propriedades mecânicas. Muitos estudos descobriram que utilizando vários agentes de enchimento, o módulo de elasticidade dos polímeros pode ser aumentado, permitindo assim que os polímeros suportem cargas mais elevadas quando submetidos a menor deformação [CHEN *et al.*, 2003 e JOYCE, 2004]. Além de aumentar o módulo de elasticidade, estudos têm mostrado que, como um resultado da utilização de certos agentes de enchimento, a resistência à tração do polímero pode também ser reduzida [CHEN *et al.*, 2003 e LANCASTER, 1968]. Baixa resistência à tração permite que as pequenas asperezas sejam cortadas mais facilmente, reduzindo o atrito e impedindo a remoção de grande escala do material. Chen et al. descobriu que a adição de micropartículas de SiO<sub>2</sub> reduziu a resistência à tração do PTFE. Eles atribuem a redução da resistência à tração a baixa adesão entre o material de enchimento e a matriz de PTFE, reduzindo a coesão no filme.

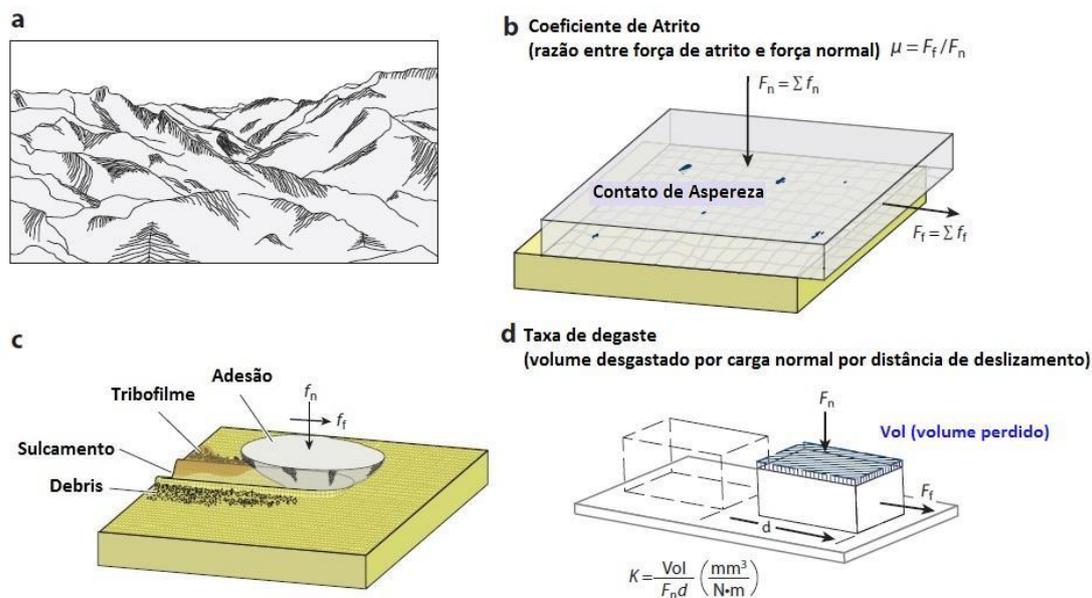
Foi também determinado que certos agentes de enchimento em polímeros vão preferencialmente suportar as cargas aplicadas, conseqüentemente reduzindo a tensão e deformação no polímero. Lancaster estudou a influência do reforço de fibra de carbono no atrito e desgaste de polímeros. Eles encontraram que a redução do desgaste em polímeros reforçados foi causada pelas fibras expostas durante o deslizamento que preferencialmente suportou parte da carga aplicada [LANCASTER, 1968]. Uma vez que as fibras suportam a maior parte da carga, o atrito e o desgaste do compósito polimérico são menos afetados por mudanças na velocidade e temperatura que tipicamente têm um efeito drástico sobre os polímeros.

Pesquisas também têm sido feitas ao longo dos anos sobre o atrito e os mecanismos de desgaste do PTFE com carregamento constante sob condições seca e lubrificada. O efeito da pressão aplicada, velocidade de deslizamento, temperatura ambiente, atmosfera de ensaio, rugosidade superficial do contracorpo, carga de impacto, e as vibrações no atrito e resposta de desgaste do PTFE e seus compósitos têm sido exaustivamente estudadas [MOHAMMED, 2006-2008; MAHAJAN, 1998; SATYANARAYAN, 1998; BLANCHET, 1992; JAYDEEP, 2002; XIAN, 2002; GOYAL, 2012].

### 2.3 Tribologia de Polímeros

Encontros com o atrito e o desgaste ocorrem diariamente e existem muitas situações em que atrito e desgaste limitam severamente o desempenho de movimentos de conjuntos mecânicos ou proíbem completamente o movimento sobre o funcionamento prolongado. As abordagens integradas usando alta instrumentação científica de alta resolução e materiais modelo como amostras, estão fornecendo um meio para desenvolver uma compreensão mais profunda dos mecanismos subjacentes em atrito e desgaste de materiais (Figura 17).

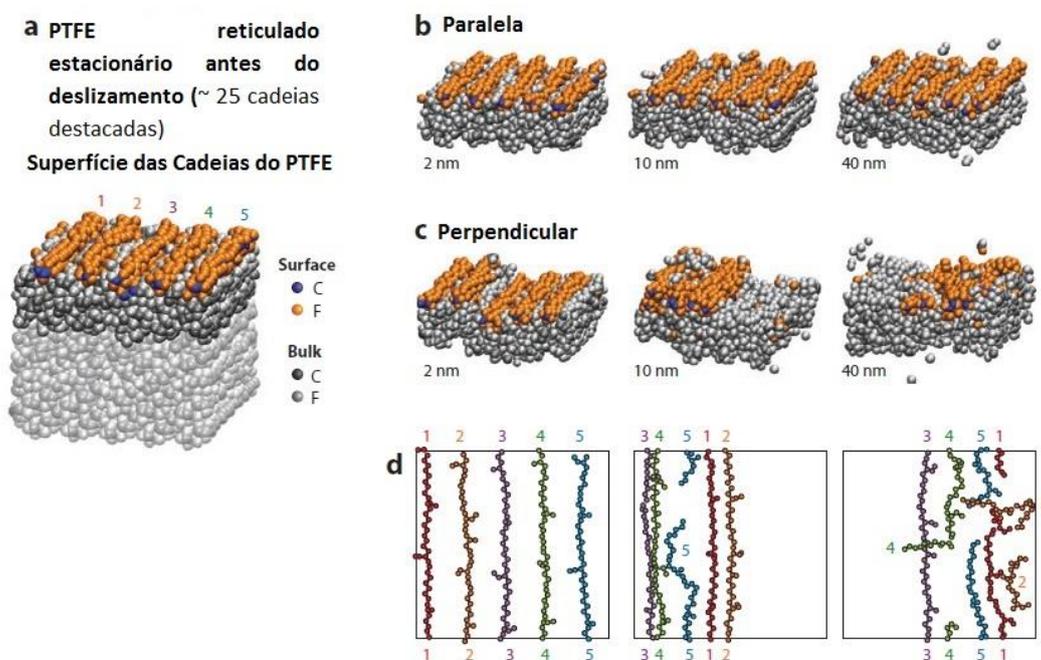
Modelos analíticos, como os de TOMLINSON, 1929 e FRENKEL&KONTOROVA, 1939, tem dado o contexto teórico para o atrito e o desgaste molecular, enquanto que experimentos de única aspereza com métodos de varredura têm apoiado qualitativamente os modelos. MATE *et al.*, por exemplo, foi o primeiro a observar o *stick slip* atômico. Outros investigadores demonstram um acordo qualitativo entre os experimentos e as previsões teóricas da anisotropia do atrito e da superlubricidade [DIENWIEBEL *et al.*, 2005; DIENWIEBEL *et al.*, 2004; HIRANO *et al.*, 2005], os efeitos da temperatura [BRUKMAN *et al.*, 2008; HE MY *et al.*, 2002; SCHIRMEISEN *et al.*, 2006; ZHAO XY *et al.*, 2007], e os efeitos de velocidade [BENNEWITZ R *et al.*, 1999; GNECCO *et al.*, 2000]. Embora o acordo encorajador, ainda observa-se entre teoria e experimento, que grandes lacunas persistem em nossa compreensão dos fenômenos observados experimentalmente.



**Figura 17.** a) Todas as superfícies são ásperas, e esta rugosidade se estende a todas as escalas de comprimento, da escala atômica a macro escala. b) Os picos (protuberâncias ou asperezas) são os pontos altos das superfícies e estão envolvidos em vários contatos microscópicos que são distribuídos através das superfícies de contato. c) Esses contatos de asperezas estão tipicamente em nano escala e altamente estressados. d) Um conjunto desses contatos em nano escala manifestam coletivamente os parâmetros macroscópicos conhecidos como coeficiente de atrito e taxa de desgaste

Avanços no desenvolvimento de métodos computacionais e os correspondentes grandes aumentos nos recursos de computador ao longo das duas últimas décadas permitiram simulações em escala atômica objetivando um profundo impacto sobre uma variedade de disciplinas, incluindo as áreas de atrito e desgaste [SZLUFARSKA *et al.*, 2008; SINNOTT SB *et al.*, 2007; HARRISON JA *et al.*, 1999]. Por exemplo, tem havido vários estudos de simulação em nanoindentação [BELAK JF, 1993; BELAK J *et al.*, 1993; LANDMAN *et al.*, 1990; LANDMAN *et al.*, 1992; LANDMAN *et al.*, 1996; KOMVOPOULOS e YAN, 1997; KELCHNER *et al.*, 1998], corte [ISONO T. e TANAKA T., 1997; ZHANG L. e TANAKA H., 1997; TANG e WENG, 2000; LIN e HUANG, 2004; YE YY. *et al.*, 2003] e riscamento [KOMANDURI R. *et al.*, 2000; BULDUM A. e CIRACI S., 1997; ISONO Y. e TANAKA T., 1999; YAN Y. *et al.*, 2007] de superfícies metálicas, poliméricas e cerâmicas com indentadores em escala nanométrica. Essas simulações têm fornecido informações valiosas sobre as respostas mecânicas das superfícies, incluindo dureza, a geração de deslocamento, e de transição elástico-plástico em nano escala.

No contexto da tribologia de polímero e, em particular, a tribologia dos filmes de PTFE, simulações da dinâmica molecular (MD) são utilizadas para investigar o atrito em escala atômica nas interfaces de construções do PTFE auto-acoplado [JANG *et al.*, 2007]. As simulações mostram de forma inequívoca que a orientação estrutural molecular na interface deslizante, influencia fortemente o atrito e desgaste, como indicado na Figura 18. Deslizamento das cadeias paralelamente orientadas para cadeias em forma de “backbones” resultou em baixas forças de atrito e barreiras ao deslizamento interfacial e reorganização molecular na superfície. Entretanto, o deslizamento de cadeias orientadas perpendicularmente para as cadeias em forma de “backbones” resultaram em elevadas forças de atrito e desgaste na forma de reorientação molecular e cisão da cadeia. Estas previsões foram examinadas e validadas por experimentos complementares sobre filmes de transferência de PTFE orientados [JANG *et al.*, 2007]. Medições Microtribológicas sobre esses filmes alinhados demonstraram uma forte anisotropia em atrito e desgaste, de acordo com as previsões de simulação MD. Especificamente, o deslizamento paralelo de filmes orientados produzindo baixo atrito e desgaste, enquanto o deslizamento perpendicular levou a um maior, consistente com a reorientação molecular.



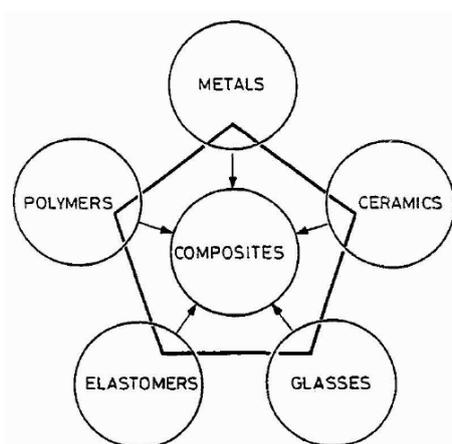
**Figura 18.** Imagem da simulação da dinâmica molecular usando potenciais de muitos corpos de evolução das cadeias orientadas de PTFE durante o deslizamento

Na Figura 18, a estrutura inicial da superfície de fundo é mostrada no painel a. A sequência no painel b ilustra a evolução da superfície de fundo durante o deslizamento quando as cadeias sobre a parte superior (não mostrado) e superfícies de fundo são orientadas paralelamente umas as outras. No entanto, a sequência no painel c ilustra a evolução da superfície de fundo quando as cadeias sobre a parte superior (não mostrado) e superfícies inferiores estão orientadas perpendicularmente umas as outras. Neste último caso, as simulações preveem desgaste em escala molecular da superfície do PTFE. Em particular, as cadeias de deformação sobre a superfície de fundo, quebram, e estão em processo de reorientação para alinhar com a direção do deslizamento, tal como indicado pelos esquemas das cadeias numerados no painel d.

## 2.4 Compósitos Poliméricos

O avanço das tecnologias de vanguarda tem incrementado o uso de materiais compósitos. Associam-se, a essa evolução, crescentes desafios à Engenharia, dadas as solicitações térmicas e mecânicas decorrentes do atrito entre sólidos com movimento relativo [FERREIRA *et al.*, 2012].

Os compósitos representam uma classe dos materiais onde dois ou mais materiais combinados passam a exibir propriedades únicas, que não são possíveis de serem obtidas por componentes individuais, Figura 19 [ASHBY, 2005].



**Figura 19.** As classes de materiais compósitos a partir da qual são feitas (FONTE: ASHBY 2005)

Com a crescente demanda para o desenvolvimento de novos materiais compósitos em uma variedade de aplicações, vem intensificando o estudo do comportamento de cargas em matrizes poliméricas, objetivando aumentar a resistência ao desgaste desses materiais [OLIVEIRA *et al.*, 2014 ].

Existem diversas aplicações técnicas em que o atrito e o desgaste destacam-se como questões de alta relevância. Compósitos poliméricos contendo diferentes cargas e/ou reforços são frequentemente utilizados para esses fins. Pesquisas em andamento exploraram outros campos de aplicação destes materiais e adaptam as suas propriedades sob cargas extremas e condições de temperatura elevada [KLAUS FRIEDRICH *et al.*, 2005].

Em casos onde os compósitos poliméricos serão operados a ambientes de temperatura relativamente alta, por exemplo, 120 °C, a exigência de alta resistência ao desgaste torna-se cada vez mais importante. Para entender essas propriedades em condições severas de operação deve-se levar em consideração a segurança e a vida útil dos componentes técnicos [KLAUS FRIEDRICH *et al.*, 2005].

Partículas inorgânicas são bem conhecidas por melhorar as propriedades mecânicas dos polímeros. Verificou-se que o tamanho das partículas tem um papel importante para melhorar simultaneamente a rigidez e a resistência, promovendo uma maior interface. A redução do tamanho de partícula para um nível de escala nanométrica é assumido para alcançar uma eficiência significativa [KLAUS FRIEDRICH *et al.*, 2005].

No entanto, isto só acontece quando há uma alta eficiência de dispersão das nano partículas dentro da matriz do polímero: de fato, as nano partículas geralmente tendem a aglomerar devido à sua elevada área superficial específica e as interações adesivas derivadas da energia de superfície do material [KLAUS FRIEDRICH *et al.*, 2005]. A propósito, estes materiais devem ser projetados exatamente de acordo com o perfil de exigência da aplicação específica. Isso significa que as características tribológicas, isto é, o coeficiente de atrito e a resistência ao desgaste, não tem propriedades definitivas, mas dependem do sistema em que estes materiais operam [KLAUS FRIEDRICH *et al.*, 2005].

De modo a serem adequados para aplicações tribológicas, compósitos poliméricos, que podem normalmente apresentar uma resistência mecânica, leveza, facilidade de processamento, versatilidade e baixo custo, em conjunto com resistências térmicas e ambientais aceitáveis, devem apresentar uma boa resistência a abrasão e ao desgaste. Este objetivo não é facilmente alcançável, uma vez que a viscoelasticidade dos materiais poliméricos faz com que a análise das características tribológicas e os processos envolvidos em tais fenômenos sejam complexos [GIULIO MALUCELLI e FRANCESCO MARINO, 2012].

Um conceito típico é o de reduzir a sua aderência ao material equivalente e para melhorar a sua dureza, rigidez e resistência à compressão. Isto pode ser conseguido com bastante sucesso, usando cargas especiais. Para reduzir a aderência, lubrificantes internos, tais como o politetrafluoroetileno (PTFE) e flocos de grafite são frequentemente incorporados. Um dos mecanismos de redução correspondente do coeficiente de atrito é a formação de uma película de transferência de PTFE sobre a superfície do contracorpo [HÄGER e DAVIES, 1993].

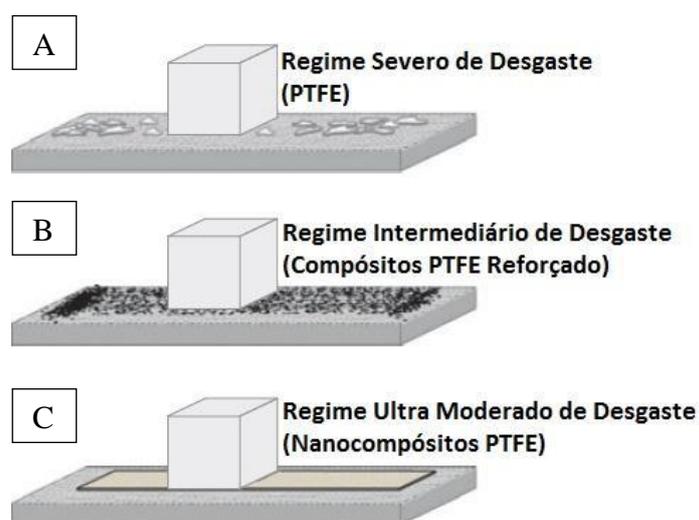
Fibras de Aramida (FA), de vidro (GF) ou de carbono (CF) também são utilizadas para aumentar a resistência à deformação e a resistência à compressão do sistema de matriz polimérica [HÄGER e DAVIES, 1993; LANCASTER, 1986; BRISCOE, 1993; FRIEDRICH, 1997; STACHOWIAK e BATCHELOR, 2001]. Normalmente, a matriz deve possuir uma elevada resistência à temperatura e uma elevada resistência à coesão. No entanto, por vezes é também vantajoso ter uma matriz à base de PTFE juntamente com cargas de enchimento a fim de proporcionar condições para situações de utilização a temperaturas criogénicas, por exemplo [HUBNER *et al.*, 1998].

Enchimentos adicionais que melhoram a condutibilidade térmica são muitas vezes de grande vantagem, especialmente se os efeitos de melhoria da temperatura na área de contato devem ser evitados, de modo a evitar um aumento na taxa de desgaste específica. Deve também ser notado, que nem todos os agentes de enchimento são de benefício para o desempenho de desgaste em materiais compósitos. A resistência ao desgaste é maior quando os enchimentos decompõem e geram produtos de reação que aumentam a ligação entre a película de transferência e o contracorpo [BRISCOE, 1993], ao passo que outros agentes de enchimento diminuem a resistência ao desgaste, porque geram mais descontinuidades no material.

Embora as mais altas taxas de desgaste relatadas entre polímeros pertencem ao PTFE não carregado, as menores taxas de desgaste registradas pertencem a um compósito à base de PTFE [PERSSON, 2000]. TANAKA *et al.* foi um dos primeiros a atribuir a excepcionalmente alta taxa de desgaste do PTFE para a facilidade de destruição de sua única estrutura de ligação. BAHADUR & TABOR descobriram que cargas eficazes reduziram o tamanho dos debrís de desgaste, que mais aderiu à superfície para formar um filme de transferência protetor que ajuda a impedir o desgaste subsequente. BLANCHET e KENNEDY mostraram que a taxa de desgaste de PTFE foi excepcionalmente alta apenas acima de uma determinada velocidade crítica e que a transição ocorreu quando as tensões de cisalhamento excederam a resistência de atrito interfacial de trincas superficiais. Eles propuseram que as cargas reduziram taxas de desgaste de PTFE ao interromper a propagação de trincas subsuperficiais.

CONTE e IGARTUA, 2012, realizaram uma análise comparativa de sete compósitos a base de PTFE a fim de melhorar as propriedades do PTFE mesmo perdendo a característica mais atraente do PTFE de baixo coeficiente de atrito, devido à presença de partículas duras na matriz. Com o uso de ambas as fases moles e duras numa matriz aumenta a auto-lubrificação e as propriedades de transporte de carga da matriz para melhorar as propriedades tribológicas do PTFE.

Na Figura 20 tem-se um diagrama esquemático dos regimes de desgaste promovidos durante o deslizamento de duas superfícies sólidas em contato, para materiais poliméricos a base de PTFE.



**Figura 20.** A) Regime de desgaste ultramoderado (nanocompósitos PTFE); B) Regime de desgaste intermediário (compósitos de PTFE reforçados); C) Regime de desgaste severo (PTFE não carregado)

### 2.4.1 Carga Mineral

Carga mineral corresponde a minerais, ou rochas, que são encontrados na natureza, tais como o calcário (calcita, dolomita), o filito, a mica (muscovita, flogopita, biotita), sílica (quartzo, zeólita), talco, pirofilita (agalmatolito), gesso, barita, wolastonita, esmectita (bentonita, montmorilonita, hectorita, saponita) e ilita [LEWIN *et al.*, 2005].

Em compósitos poliméricos, as cargas minerais são usadas devido a várias razões: redução de custo, melhorar o processamento, controle de densidade, efeitos óticos, controle da expansão térmica, retardamento de chama, modificações no que se refere às propriedades de condutividade térmica, resistência elétrica e susceptibilidade magnética, além de melhora de propriedades mecânicas, tais como a dureza e a resistência ao risco. Por exemplo, a metacaulinita é usada como carga de plásticos de revestimento de cabos elétricos para fornecer refratariedade elétrica; outros, como a muscovita, são usados em compósitos como retardadores de chama [CIMINELLI, 1988].

O entendimento das propriedades intrínsecas das cargas minerais e dos polímeros, da influência da tensão superficial na interação carga mineral/polímero, o desenvolvimento de novos equipamentos de medida da tensão superficial, o desenvolvimento de agentes de tratamento superficial visando melhorar a compatibilidade carga/polímero, tudo isso tem contribuído para uma melhor compreensão e previsão das propriedades de compósitos e nanocompósitos [LIMA, 2007].

As cargas minerais são substâncias inorgânicas compostas por grãos muito pouco flexíveis que são incorporados à massa de polímero [ROTHON, 1995] ou a fibras de celulose (papel); os polímeros, por sua vez, são substâncias orgânicas elaboradas a partir da polimerização de compostos orgânicos; sendo constituídos por cadeias carbônicas flexíveis e moldáveis [CANEVAROLO, 2002].

Os polímeros, quando puros, apresentam propriedades que muitas vezes não atendem às especificações técnicas que as peças finais fabricadas a partir deles devem possuir. Propriedades dos polímeros tais como resistência à tração, resistências químicas a ataques ácidos e básicos, resistências à deformação ao calor, etc, são aprimoradas através da adição de cargas minerais, tratadas superficialmente, em quantidades adequadas [LIMA, 2007].

As interações entre as cargas minerais e os polímeros são dificultadas pelo fato de que as cargas minerais apresentam superfícies polares aliadas a elevados valores de áreas de superfície específica, ao passo que os polímeros geralmente apresentam superfícies apolares. Essa incompatibilidade faz com que a carga mineral tenha dificuldades em ser “molhada” pelo polímero, comprometendo, assim, a sua adequada dispersão.

Para compatibilizar essas diferenças polares, são utilizados produtos químicos em tratamentos de superfícies da carga mineral objetivando minimizar as suas naturezas polares. Vários estudos realizados comprovam a melhora da compatibilidade entre a carga mineral e o polímero quando esta carga mineral é tratada superficialmente por aqueles compostos, melhorando a “molhabilidade” e dispersão da carga no polímero [DIAZ, 1999; AWAD *et al.*, 2004, ARAÚJO *et al.*, 2004].

## **2.5 Estudo das Propriedades de Superfície**

### *2.5.1 Rugosidade*

Projetos de engenharia são altamente influenciados pela rugosidade, pois é importante analisar o desgaste, atrito e lubrificação em diversos casos, isso se deve ao fato da rugosidade ser um conjunto de irregularidades, ou seja, pequenas saliências e reentrâncias que caracterizam uma superfície, desempenhando um papel importante no comportamento dos componentes mecânicos. Essas irregularidades podem ser avaliadas com aparelhos eletrônicos, a exemplo do rugosímetro.

As superfícies apresentam anomalias que abrangem dois grupos de erros: erros macrogeométricos, de primeira e segunda ordem e erros microgeométricos, de terceira e quarta ordem. Os erros microgeométricos são conhecidos como rugosidade e os macrogeométricos são os erros de forma.

Os desvios de forma são definidos como os desvios da superfície real em relação à superfície geometricamente ideal e podem ser classificados em: retilinearidade, circularidade, cilindridade, planicidade, etc.

A norma DIN 4760, 1982, apresenta seis tipos de diferentes desvios de forma, relativamente ao perfil ideal da superfície de um componente mecânico. Normalmente, quando sua topografia é muito acidentada, a superfície é dita mais rugosa; e quando é menos irregular, é dita como menos rugosa [BET, 1999].

De acordo com BET (1999) apud MEDEIROS (2002) “A textura de uma superfície, na óptica da Metrologia Mecânica convencional, diz respeito aos desvios de forma de segunda à quinta ordem. Engloba, assim, a medição da rugosidade e da ondulação”.

A Figura 21 ilustra os desvios de forma de uma superfície (adaptado de BET (1999) apud MEDEIROS (2002)).

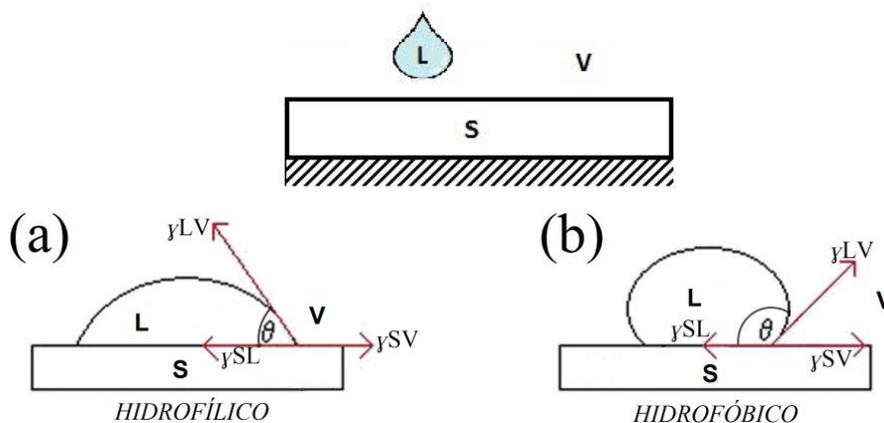
DESVIOS DE FORMA (representados por uma seção do perfil)		EXEMPLOS DE TIPOS DE DESVIOS	EXEMPLOS DE CAUSAS GERADORAS DOS DESVIOS DE FORMA
1ª Ordem 	FORMA	Planicidade Cilindricidade Retilidade	Defeitos nas guias da máquina ferramenta, deformação por flexão da máquina ou da peça, fixação errada da peça, deformações devido ao tratamento térmico, desgaste nas guias da peça
2ª Ordem 	ONDULAÇÃO	Ondas	Fixação excentrica ou defeito de forma de uma fresa, fixação excentrica da peça, vibrações da máquina ferramenta, da ferramenta ou da peça, deflexão da peça ou da máquina durante a usinagem, tratamento térmico, tensões residuais de fundição ou forjamento
3ª Ordem 	RUGOSIDADE	Ranhuras ou raios	Forma da ferramenta (gumes e raio de quina), avanço ou profundidade de corte
4ª Ordem 		Estrias Escamas Protuberâncias	Processo de formação do cavaco (cavaco arrancado, cavaco de cisalhamento, gume postiço), deformação do material com jato de areia, formação de crateras e de protuberâncias após tratamento galvânico
5ª Ordem Não mais representável nesta forma gráfica		Microestrutura do material	Processo de cristalização, modificação da superfície por ataque químico (ex. decapagem), corrosão
6ª Ordem Não mais representável nesta forma gráfica		Reticulado cristalino do material	Processos físicos e químicos da estrutura da matéria, tensões de cisalhamento na estrutura reticular do material
		Superposição dos desvios de primeira à quarta ordem	

**Figura 21.** Desvios de forma do perfil de uma superfície, conforme DIN 4760, adaptado de BET (1999) apud MEDEIROS (2002)

Como mostrado na Figura 21a rugosidade da superfície, de forma geral, pode ser caracterizada como uma união de desvios de forma de diferentes ordens, desde a forma propriamente dita, ondulação e a rugosidade, esta última, representada por ranhuras e/ou protuberâncias.

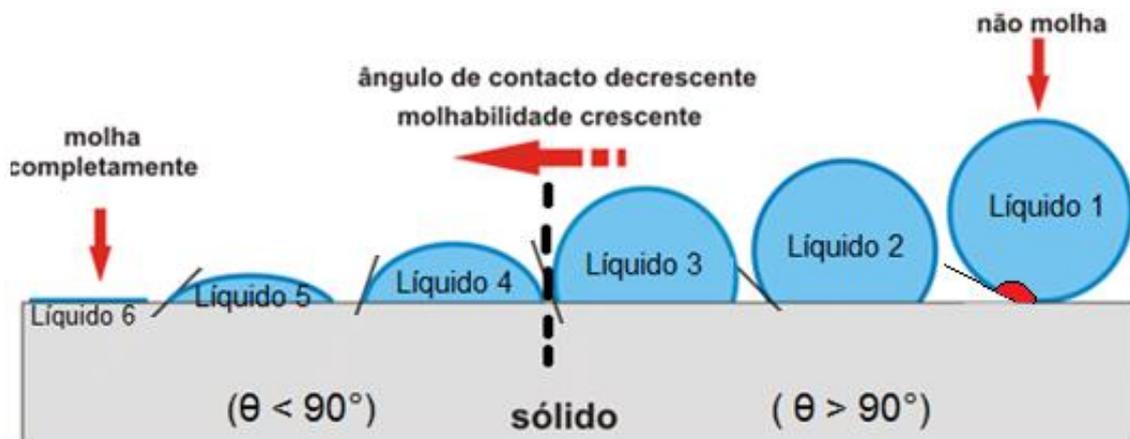
### 2.5.2 Molhabilidade

Define-se como a tendência de um fluido aderir à superfície em presença de outros fluidos imiscíveis, como por exemplo, o ar atmosférico. A molhabilidade da superfície pode ser quantificada pelo ângulo de contato de um líquido com substrato sólido. O Ângulo de contato entre uma gota de um líquido e uma superfície sólida depende da relação entre as forças adesivas e as forças coesivas do líquido, Figura 22. Três fatores importantes, tais como a tensão superficial, a hidrofobicidade de superfície após a deposição das partículas sobre uma superfície sólida e a pressão de dissociação influenciam o ângulo de contato final dos fluidos sobre uma superfície sólida [CHAUDHURI & GHOSH, 2014]. Se a gota repousa sobre uma superfície homogênea perfeitamente nivelada, forma-se um ângulo de contato de equilíbrio entre o líquido e a superfície sólida em qualquer ponto da linha de três fases, onde se encontram o sólido, o líquido e a fase de vapor. Segundo SHAW D. J., o líquido molhará completamente a superfície quando  $\theta = 0^\circ$ , caracterizando a superfície como hidrofílica. A ausência completa de molhamento ocorre quando  $\theta = 180^\circ$ , sendo a superfície hidrofóbica. O molhamento parcial existe no intervalo de ângulos de contato compreendidos entre  $0^\circ < \theta < 90^\circ$  (Figura 23).



**Figura 22.** Contato entre as três fases sólida, líquida e gasosa. a) Representação das tensões superficiais para uma superfície hidrofílica b) Representação das tensões superficiais para uma superfície hidrofóbica

De acordo com CHU-HUA LU *et al.* (2008), a energia livre de superfície de uma película sólida é obtida a partir do ângulo de contato de líquidos seletivos, como água, diiodometano, etileno glicol, dentre outros; superfícies hidrofóbicas e oleofóbicas são caracterizadas por um ângulo de contato superior a  $100^\circ$  no caso da água e superior a  $60^\circ$  no caso do diiodometano, respectivamente.



**Figura 23.** Desenho esquemático do molhamento da superfície de um sólido em contato com diferentes líquidos

A importância dos petróleos pesados vem crescendo significativamente nos últimos anos em face de sua abundância no país e do cenário político internacional. A principal característica desse tipo de óleo é sua alta viscosidade e a consequente dificuldade de transporte. Altas potências de bombeamento são necessárias para manter o escoamento de um óleo pesado em um oleoduto.

Sabe-se que muitos desses petróleos pesados têm características reológicas viscoplásticas. Materiais com tal tipo de comportamento mecânico, sob certas condições de escoamento ainda não muito bem conhecidas, apresentam deslizamento aparente na parede ao escoar internamente. Esse deslizamento tem o potencial de diminuir substancialmente a perda de carga em um escoamento.

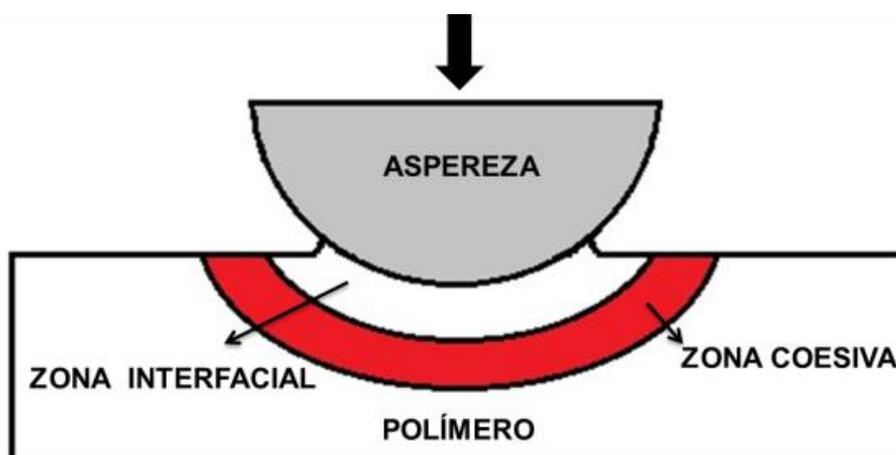
Existem evidências experimentais que levam a crer que o grau de deslizamento depende de duas propriedades da superfície interna do duto, a saber, a rugosidade e a molhabilidade (ou ângulo de contato). Portanto, em princípio, diferentes tipos de revestimento interno devem implicar diferentes características de deslizamento [SILVA e PORSCHE, 2011].

## 2.6 Desgaste

O desgaste de componentes de máquinas e outros elementos funcionais têm um custo elevado ao redor do mundo, sendo a principal causa de desperdício e perda de desempenho mecânico [CUNHA, 2013]. Por este motivo um dos principais focos de estudo da tribologia é o desgaste [RADI *et al.*, 2007].

Em geral, processos de atrito e desgaste envolvem interações complexas entre os materiais em contato que dependem não apenas das propriedades dos materiais, mas também das condições de deslizamento (ou rolamento).

De acordo com BODEN e TABOR apud ZUM GARH (1987) desgaste coesivo e interfacial são as classes gerais de processos de desgaste de polímeros. O desgaste coesivo abrange os mecanismos de abrasão e fadiga, enquanto o desgaste interfacial resulta da dissipação de energia através de uma zona adjacente a zona de contato dos materiais (Figura 24).



**Figura 24.** Duas classes gerais de mecanismos de desgaste de polímeros

Se o contracorpo é “liso” o desgaste resulta da adesão entre as superfícies, e envolve deformação apenas na camada superficial do polímero. Por outro lado, se o contracorpo é rugoso então suas asperezas causarão deformação no polímero em certa profundidade e o desgaste resulta da abrasão associada com a deformação plástica do polímero ou do crescimento de trincas por fadiga na região de deformação [HUTCHINGS, 1992].

### *2.6.1 Desgaste Coesivo*

O desgaste coesivo resulta da deformação superficial e subsuperficial do material, originada pela passagem de protuberâncias do contracorpo sobre a superfície do polímero. A deformação resultante pode ser plástica ou elástica. No primeiro caso o mecanismo de desgaste é chamado de abrasão, enquanto no segundo é associado à fadiga. HUTCHINGS (1992) apresenta um esquema de como as proporções relativas de abrasão e fadiga dependem da rugosidade e da natureza do polímero. Em elastômeros, por exemplo, com baixo módulo de elasticidade, a deformação no contato será quase totalmente elástica e, portanto, o mecanismo de fadiga predominará. Polímeros com alto módulo tais como termofixos, mostram apreciável deformação plástica devido ao contato de asperezas e sofrem desgaste por abrasão.

### *2.6.2 Desgaste Interfacial*

No desgaste interfacial, material é removido através de processos ocorrendo próximo ou na superfície do polímero. O mais importante de tais processos é o desgaste adesivo. Este ocorre apenas quando o contracorpo é “liso” e envolve a transferência de material para o contracorpo mais duro e subsequente remoção como partícula de desgaste [HUTCHINGS, 1992].

#### ***2.6.2.1 Filme Transferido***

A formação de filme transferido é um fator característico de desgaste adesivo onde material é transferido de uma superfície para outra antes de ser liberado como partícula de desgaste. Isto distingue o desgaste adesivo de muitos outros mecanismos de desgaste [STACHOWIAK e BATCHELOR, 1996].

Uma característica da tribologia polímero-metal é a criação de filme transferido do polímero sobre o contracorpo metálico duro. Em muitos polímeros a resistência da junção adesiva formada entre o polímero e o metal é comparável com a resistência interna do próprio polímero. Desta forma, o cisalhamento é acompanhado pelo destacamento de fragmentos de polímeros que se fixam sobre o contracorpo metálico.

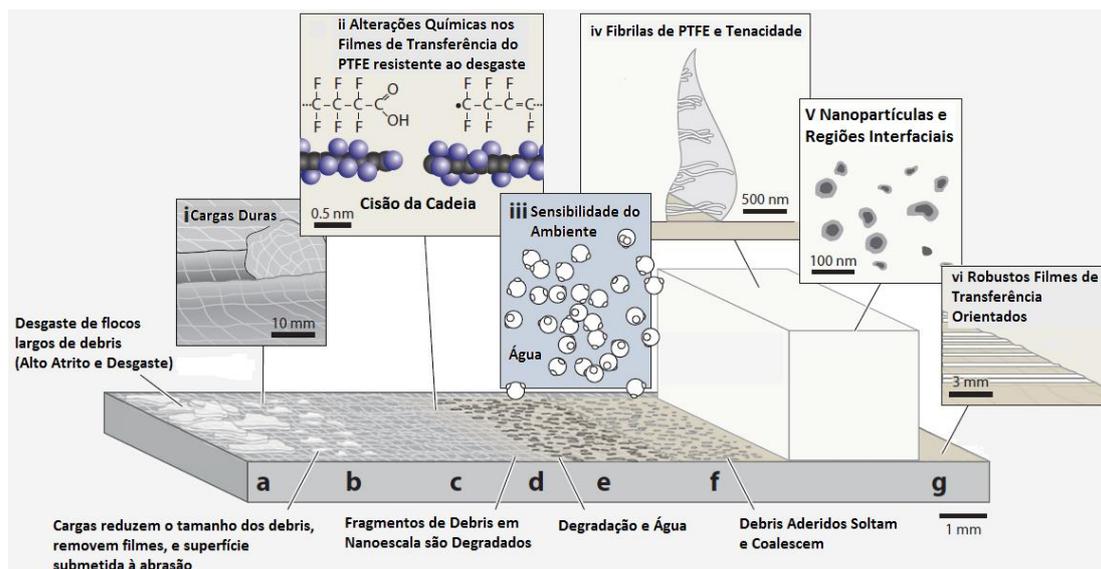
QUAGLINI *et al.* (2009) mencionam que a criação e crescimento destes filmes transferidos é geralmente seguida de uma diminuição no atrito.

O polímero que apresenta um exemplo clássico de formação de filme transferido é o PTFE. Esta característica foi observada por diversos pesquisadores que estudaram o atrito e o desgaste deste material contra aço dentre eles LIMA DA SILVA *et al.* (2006), SAWYER *et al.* (2003) e KHEDKAR *et al.* (2002). Segundo STACKOWIAK e BATCHELOR (1996) a causa da adesão de filmes é devido, possivelmente, a uma reação química entre o flúor e o carbono do PTFE e a superfície metálica oposta.

O desgaste de polímeros ocorre por formação de filmes transferidos finos que asseguram baixos coeficientes de atrito. Lubrificantes sólidos também funcionam pela formação de finos filmes transferidos sobre as superfícies de contato. Estas camadas podem ser transferidas de uma superfície para outra, o que é útil quando contatos de difícil acesso precisam ser lubrificados [STACHOWIAK e BATCHELOR, 1996].

### *2.6.3 Desgaste de Compósitos e Nanocompósitos*

No caso do desgaste de compósitos e nanocompósitos existem publicações onde se verifica que determinadas quantidades de nanopartículas podem reduzir o desgaste do PTFE de 4 a 5 ordens de grandeza, uma melhoria que não pode ser explicada através do mecanismo de reforço tradicional. Tem-se trabalhado para elucidar os mecanismos responsáveis por quase uma década e tem-se encontrado um número de fatores potenciais de contribuições, embora ainda não tenha sido localizado o mecanismo exato que parece ser de natureza nanométrica. A Figura 25 ilustra uma hipótese atual para o desempenho do desgaste por deslizamento a seco sem precedentes de materiais poliméricos.



**Figura 25.** Hipótese mecanicista para o desgaste ultramoderado de nanocompósitos de PTFE.

Processos característicos da formação de filmes de transferências estão ilustrados na ordem relativa de A até G. Observações notáveis e interações são descritas entre I-VI

O baixo carregamento de cargas em nanoescala bem dispersadas maximizam a área de interação entre a carga e a matriz e minimizam a escala de comprimento característico do polímero não reforçados. Essas interações, quando suficientemente fortes, podem ter efeitos de longo alcance no polímero e em sua resposta mecânica em nano, micro e macro escalas. Curiosamente, taxa de desgaste, morfologia de debris e propriedades do filme de transferência são relativamente pouco afetadas pelas partículas durante as fases iniciais de deslizamento, sugerindo que o efeito de reforço é principalmente indireto. Os debris são inicialmente idênticos em termos de composição para o “bulk” e não aderem ao contracorpo (Figura 25a). A taxa de desgaste e o tamanho dos debris de todos os nanocompósitos PTFE diminuem com a continuação do deslizamento (Figura 25b, c), mas apenas a exposição do PTFE com desgaste ultramoderado marcou a degradação na interface (Figura 25d). Estas modificações químicas levam a maior dureza, maior fragilidade (possivelmente através de ligações cruzadas e conjugação) e superfícies poliméricas mais resistentes ao desgaste. O desgaste ultramoderado pode ser perturbado por remoção do vapor de água ambiente necessário para formar os produtos da reação de queilação, apoiando a importância da triboquímica. As nanopartículas podem reduzir as barreiras para desfluoração do PTFE e cisão da cadeia para promover essa triboquímica.

Considerando que o tamanho dos debris e as taxas de desgaste atingem valores de estado estacionário moderados, as taxas de desgaste de materiais com desgaste ultramoderado continuam a diminuir até que os debris se tornem ópticamente indetectáveis (Figura 25d). Nesse ponto, fragmentos nanométricos de PTFE quimicamente degradados se transferem e aderem fortemente ao contracorpo; fenômenos em nanoescala provavelmente estão envolvidos na aceleração das reações e no aumento da força adesiva. Durante a fase de transição, a entrada de atrito continua a degradar quimicamente e mecanicamente as superfícies até que o primeiro evento significativo de desgaste posterior à transição ocorra (Figura 25e). Ao contrário dos debris da fase de *run-in*, debris a partir da fase de estado estacionário degradam, aderem fortemente ao contracorpo e se aglutinam (Figura 25f) para formar um contínuo e estável filme de transferência (Figura 25g) que, eventualmente, é usado e reabastecido em proporções iguais.

Embora nanopartículas e micropartículas tipicamente melhorem as propriedades mecânicas apenas moderadamente, tem-se demonstrado que vestígios de nanopartículas podem aumentar a resistência ao desgaste de um polímero em até 10.000 vezes; para nosso conhecimento, esse é o exemplo mais extremo de reforço de nanocargas na literatura de nanocompósitos poliméricos. O modelo descrito continua a ser uma hipótese, mas é consistente com quase uma década de trabalho publicados para elucidar os mecanismos responsáveis. Embora a propriedade de superfície de nanopartículas específicas responsáveis pela ativação do mecanismo de desgaste ultramoderado em PTFE não ter sido isolada, a observação de que a resistência ao desgaste pode ser ligada e desligada com apenas mudanças sutis de cargas, tem implicações interessantes para o futuro do design de tribomateriais e para outras áreas da ciência dos polímeros e engenharia.

## 2.7 Pressão de contato de Hertz

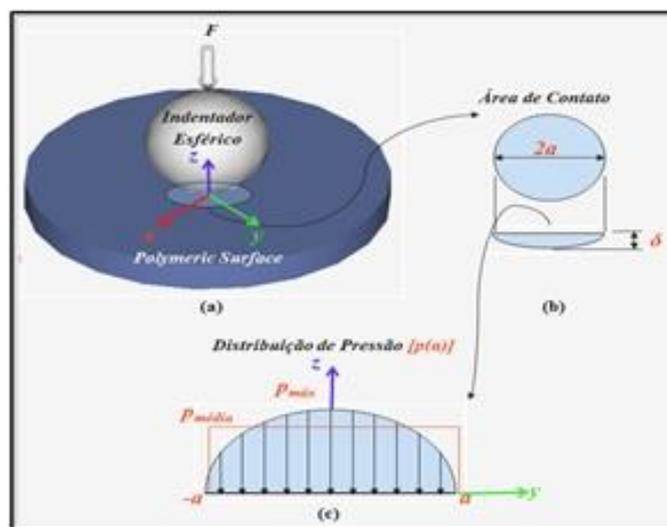
Quando dois corpos elásticos são impostos ao contato eles se tocarão em um ponto ou ao longo de uma linha. Se forem submetidos a um carregamento mecânico definido, este será distribuído através da área de contato. Esta situação foi inicialmente introduzida por Heinrich Hertz em 1881, baseando-se nas seguintes suposições: (i) as superfícies são contínuas, polidas e não sofrem atrito; (ii) o tamanho da área de contato é pequeno comparado ao tamanho dos corpos; (iii) Cada sólido tem um meio-espaço sólido na vizinhança da zona de contato [BHUSHAN, 2001].

A teoria de Hertz pode ser aplicada a contatos esféricos, cilíndricos e elipsoidais. A análise Hertziana para uma esfera sobre um plano é apresentada em vários trabalhos Publicados na área da Mecânica do Contato [XU *et al.* 2007; WU e YOU, 2007; GRIERSON *et al.* 2005; BHUSHAN, 2001] e todos citam o livro de Johnson de 1985 como referência.

HERTZ (1882) evidenciou em sua modelagem, que a pressão de contato  $p$  assume a forma de um *potencial de campo elástico* com fronteira bem definida. *Dentro desse campo*, as tensões associam-se às deformações elásticas. *Além da fronteira do campo*, as deformações elásticas em ambos os sólidos, decorrentes do contato, são zero [MEDEIROS, 2002].

Segundo MEDEIROS (2002), a contribuição efetiva de Hertz foi demonstrar matematicamente que, em contato de sólidos estáticos não-conformes comprimidos entre si e sem atrito, parâmetros *geométricos e elásticos do material* são necessários e suficientes para definir a *área de contato* e os *estados de tensão e deformação* atuantes. Quando dois corpos com uma superfície plana, côncava ou convexa entram em contato sob determinada carga, essas duas superfícies de contato se deformam dando forma a uma pequena área de contato. A deformação pode ser plástica ou elástica dependendo do valor da carga aplicada, das dimensões, das propriedades elásticas e de superfície do material. Em muitas aplicações de engenharia, as áreas de contato resultantes são muito pequenas e as pressões resultantes muito elevadas [STACHOWIAK E BATCHELOR, 2005].

Estas tensões podem ser determinadas das fórmulas analíticas, baseadas na teoria da elasticidade, desenvolvida por Hertz e são simplificadas quando a área de contato é circular como para esferas ou esfera-plano em contato. A Figura 26 mostra o contato entre uma esfera e um plano, sua respectiva geometria de área de contato e a distribuição da pressão com base na teoria de Hertz.



**Figura 26.** (a) Contato entre uma esfera indutora e uma superfície plana polimérica sob ação de uma força compressiva  $F$ , (b) geometria, dimensão da área de contato (circular) e deflexão, (c) distribuição da pressão, pressão máxima ( $p_{m\acute{a}x}$ ) e média ( $p_{m\acute{e}dia}$ ). A relação entre as pressões é dada por  $p_{m\acute{a}x} = 3/2 p_{m\acute{e}dia}$

NASCIMENTO *et al.* (2009), efetuando ensaio com contato na configuração esfera – plano, metal – polímero em um processo de indentação quase-estático, tem mostrado que o uso do modelo de Hertz no cálculo dos parâmetros de contato envolvendo polímeros e, principalmente, elastômeros, têm se distanciado do valor verdadeiro (experimental) obtido em ensaio de laboratório e uma tendência a maiores diferenças com o aumento da carga normal, valores esses, que estão relacionados com a viscoelasticidade desses materiais.

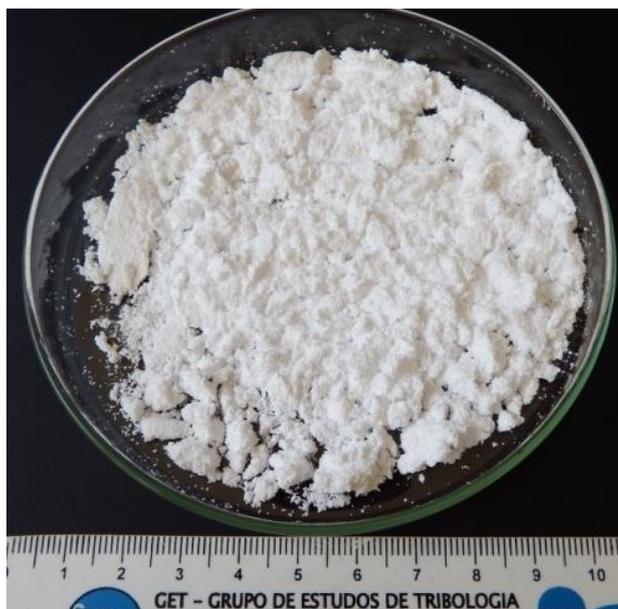
### 3. *Materiais e Métodos*

#### 3.1 **Materiais**

O polímero PTFE é avaliado nesta Tese, quando misturado ao rejeito de Scheelita.

##### 3.1.1 *Polímero*

Utilizou-se um PTFE comercialmente adquirido em forma de pó, de cor branca, fabricado pela empresa alemã FLUORSELL e com tamanho de partícula de aproximadamente 10  $\mu\text{m}$ . Na Figura 27 têm-se a imagem de uma amostra de pó do PTFE como adquirido.



**Figura 27.** Amostra de PTFE em forma pó, como adquirido

##### 3.1.2 *Carga Mineral*

A carga mineral utilizada foi o rejeito de scheelita, coletada em visitas técnicas realizadas na Mina Brejuí sob a autorização e orientação dos responsáveis pela mina (Figura 28).

As amostras foram coletadas em pontos que representam diferentes momentos de descarte do material, com o objetivo de averiguar eventuais variações na composição química do material processado e da atividade mineira.



**Figura 28.** Amostra do Rejeito de Scheelita em forma de pó como recebido, com granulometria de 200  $\mu\text{m}$

### **3.2 Caracterizações dos Materiais em forma de pó**

As amostras de rejeito de Scheelita foram caracterizadas antes de misturadas ao PTFE em forma de pó através de Granulometria a Laser e por Peneiramento, análises de Difração de Raios-x - DRX; Fluorescência de Raios-x - FRX, Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV e Espectroscopia por Dispersão de Energia - EDS.

As amostras de PTFE foram caracterizadas também em forma de pó através de Análise Termogravimétrica - TG e Calorimetria Exploratória Diferencial - DSC, além de DRX, FRX, MEV e EDS.

#### *3.2.1 Granulometria*

As amostras de rejeito de Scheelita coletadas foram homogeneizadas e quarteadas até que a massa se reduzisse a aproximadamente 300g. O método de homogeneização utilizado foi à pilha na forma de tronco de cone e o método de quarteamento foi realizado em divisor tipo Jones.

Desta massa foram feitas novas homogeneizações/divisões até se obter 2 amostras representativas com 50 g cada. Em seguida pesada aproximadamente 100 g do material, sendo posteriormente pulverizada e peneirada e sua granulometria reduzida a um tamanho de partícula inferior a 400 mesh.

A análise granulométrica a laser foi realizada utilizando um difratômetro da marca Microtrac, modelo S3500 SDC, em meio líquido (H<sub>2</sub>O) para a dispersão das partículas e contagem. A massa utilizada foi correspondente a 100g. A análise granulométrica por peneiramento foi realizada utilizando peneiras sobrepostas de malhas: #48, #100, #200, #325, #400 e #635 mesh.

Ao final do ensaio foram removidas todas as frações retidas nas peneiras e, em recipientes apropriados, foi realizada a pesagem de cada fração, para o cálculo da distribuição granulométrica.

### 3.2.2 Difração de Raios-X (DRX)

As amostras de PTFE e Rejeito de Scheelita foram caracterizadas em um equipamento da marca Shimadzu, modelo XRD 6000, utilizando uma fonte de radiação de Cu-K $\alpha$  com voltagem de 40 kV, corrente de 30 mA e filtro de Ni. Os dados foram coletados na faixa 2 $\theta$  de 10 a 100 ° e com uma velocidade de 1° e 2°/min.

Na identificação e quantificação das fases minerais, foram aplicados métodos computacionais de simulação de difratogramas. O difratograma obtido foi analisado pelos programas Search Match v.3.01 e Basic Process da Shimadzu com banco de dados do JCPDS (*Joint Committee on Powder Diffraction Standards*).

Para o rejeito de Scheelita, partículas inferiores a #200 mesh foram utilizadas e separadas amostras representativas do material quarteado.

### 3.2.3 Fluorescência de Raios-X (FRX)

Essa análise foi realizada num equipamento da marca Shimadzu modelo XRF-1800 Sequencial, empregando a metodologia de dispersão por comprimento de onda (WD-XRF), sendo sua faixa de detecção do sódio (Na - Z=11) ao urânio (U - Z=92) e radiação RhK $\alpha$  ( $\lambda = 0,615\text{Å}$ ), no modo semi-quantitativo e com amostras na forma de pastilha prensada.

Foram tomadas amostras representativas de 5 g cada conforme exigido para a realização da análise química. Para o rejeito de Scheelita, utilizaram-se partículas inferiores a #200 mesh, assim como no DRX.

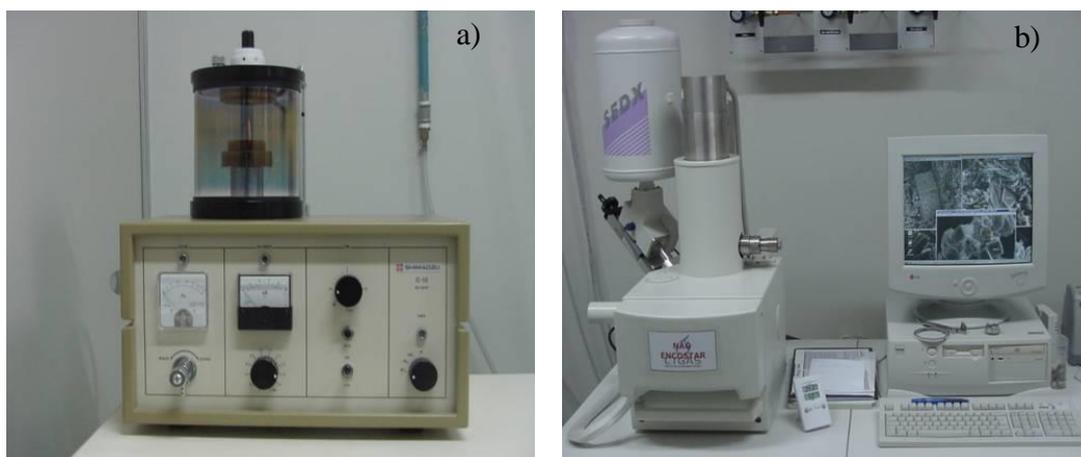
Para a preparação das amostras (Figura 29), utilizou-se como aglutinante o ácido bórico ( $H_3BO_3$ ) numa proporção de 5:1 (ácido bórico/amostra) para homogeneizar e prensar com uma carga de 15000 lb/min, dentro de uma matriz de aço inox com diâmetro de 30 mm. Este procedimento segue um padrão interno de preparação de amostras devido à calibração do equipamento.



**Figura 29.** Amostra de PTFE antes e após prensado para análise em FRX

### 3.2.4 Microscopia Eletrônica de Varredura e EDS

A morfologia das amostras de PTFE e do rejeito de Scheelita, antes de misturados e em forma de pó, foi analisada através de microscopia eletrônica de varredura (MEV) em equipamento da marca Shimadzu com espectroscopia EDS acoplada ao microscópio para microanálises químicas destas amostras. A integridade superficial dos compósitos poliméricos também foi analisada buscando-se identificar a morfologia do desgaste originado após os ensaios tribológicos. Antes das análises os corpos de prova dos compósitos foram metalizados com ouro (Figura 30).



**Figura 30.** a) Sistema de metalização b) Microscópio Eletrônico de Varredura com microanálise por EDS

### 3.2.5 Análise Termogravimétrica (TG)

A análise termogravimétrica foi realizada no PTFE e nos compósitos em equipamento da Shimadzu, modelo TG-50H. Utilizou-se uma cela de platina, com atmosfera dinâmica de ar, vazão de 50 ml/min e razão de aquecimento de 10 °C/min.

### 3.2.6 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

Para a Calorimetria Exploratória Diferencial o equipamento empregado foi o Shimadzu DSC – 50. A análise foi realizada sob atmosfera de Nitrogênio com vazão de 50 ml/min, a uma taxa de aquecimento de 10 °C/min e em uma faixa de temperatura de 30 a 500 °C. Utilizou-se um cadinho de alumínio e massa de aproximadamente 2,0 mg.

A equação abaixo foi utilizada para calcular a o grau de cristalinidade do PTFE (01) [RODRIGUES, 2007]:

$$\% \text{ Cristalinidade} = 100 \frac{[\Delta H_f]}{[\Delta H_f^{\circ}]} \quad (01)$$

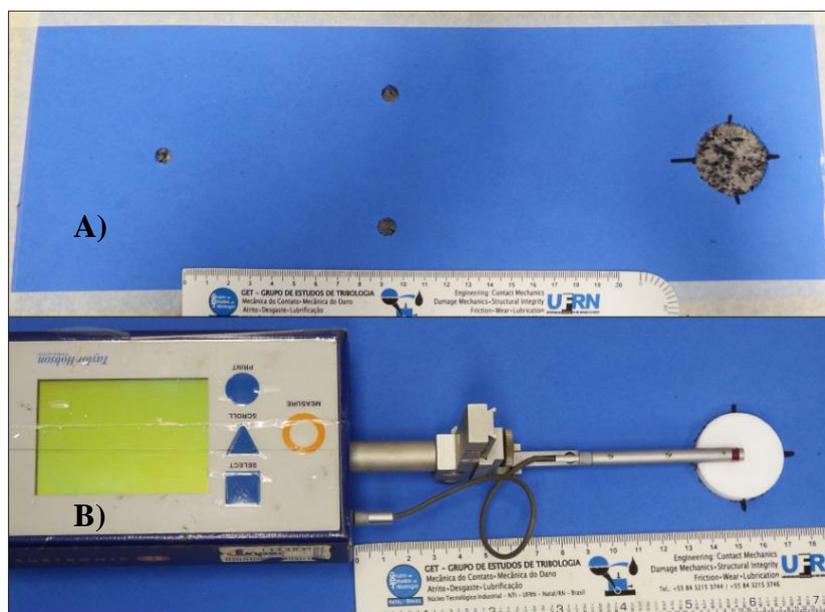
Onde  $\Delta H_f$  é o calor de fusão da amostra e  $\Delta H_f^{\circ}$  o calor de fusão do polímero 100% cristalino.

### 3.2.7 Análise de Rugosidade

Com o intuito de avaliar a uniformidade na produção dos compósitos de matriz polimérica, faz-se necessário o ensaio de rugosidade para verificar o acabamento superficial dos mesmos.

Desta forma, a rugosidade foi avaliada com Rugosímetro da marca Taylor Hobson, modelo Surtronic 25. O rugosímetro foi conectado ao computador via conexão RS232/USB. Os dados foram coletados através do software Taly profile Silver Edition, da Taylor Hobson. Com o auxílio desse software, foi possível traçar o perfil de rugosidade (topografia) do trecho medido, bem como obter os parâmetros Rugosidade Média (Ra), Rugosidade de Profundidade Média (Rz) e Rugosidade Quadrática Média (Rq).

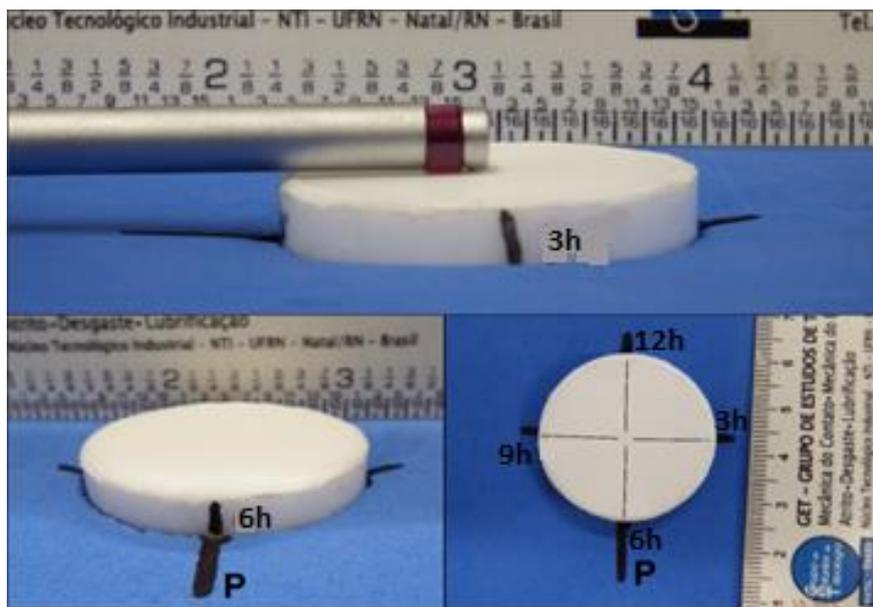
Visando eficiência nos resultados de rugosidade projetou-se um gabarito para a realização das medições, garantindo que as amostras fossem sempre medidas nas mesmas regiões e que o equipamento não se deslocasse, assim como a planicidade das mesmas. Na Figura 31 têm-se o gabarito desenvolvido e o Rugosímetro utilizado nas medições.



**Figura 31.** A) Gabarito desenvolvido para medição de rugosidade B) Rugosímetro Taylor Hobson modelo Surtronic 25

O gabarito foi confeccionado utilizando-se uma borracha EVA (espuma vinílica acetinada) fixada em uma mesa de mármore plana. Na borracha foram marcados e cortados os pontos onde o rugosímetro e os CPs ficaram posicionados, de modo que eles pudessem encaixar no EVA, garantindo sua fixação (Figura 32).

Os corpos de prova com aproximadamente 35 mm de diâmetro foram divididos em quatro direções (12h, 3h, 6h e 9h) e foram realizadas medidas em cada direção.



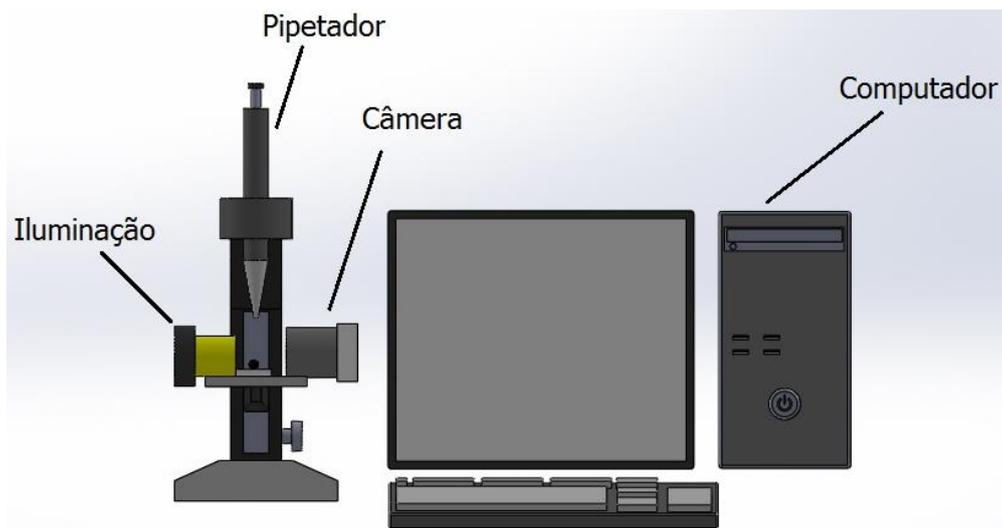
**Figura 32.** Corpo de prova posicionado no gabarito

Para a realização dos ensaios, os corpos de prova foram posicionados no gabarito e marcados com o auxílio da direção principal (P) na direção 6h, como pode ser visualizado na Figura 32; Após realizar a medição nesta região, gira-se o corpo de prova de forma que a marcação P agora coincida com a marcação 3h e assim sucessivamente para cada direção (Figura 32).

Os pontos foram marcados com auxílio de um paquímetro, de forma que o apalpador do rugosímetro percorresse um comprimento de varredura de 12,5 mm dentro do raio dos corpos de prova, correspondente a cada geratriz e cut-off de 2,5 mm.

### 3.2.8 Análise de Molhabilidade

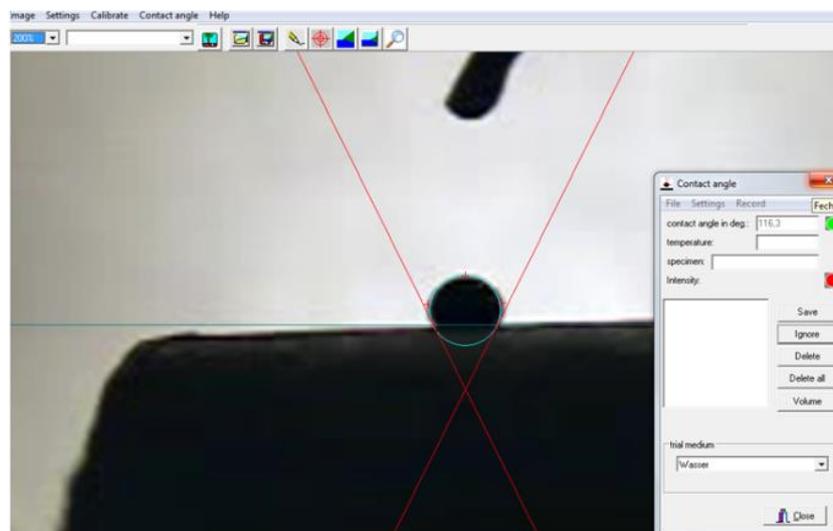
Para medir o ângulo de contato utilizou-se fluidos com propriedades físicas diferentes, sendo eles: óleo parafínico, óleo naftênico, água destilada e água salina. Realizou-se sete medidas (gotas) em cada corpo de prova. O equipamento utilizado foi adaptado pelos integrantes do Grupo de Estudo de tribologia e integridade estrutural e é composto por uma pipeta de volume regulável, luz fixa e um aparato para a amostra como apresentado na Figura 33.



**Figura 33.** Equipamento para medição do ângulo de contato

A gota utilizada de aproximadamente  $3\mu\text{L}$ , pesos médios de  $0,017\text{g}$  para a água destilada,  $0,024\text{g}$  para a água salina,  $0,017\text{g}$  para o óleo parafínico e  $0,012\text{g}$  para o óleo naftênico, era depositada na superfície dos corpos de prova, aguardava-se um tempo de  $5\text{ s}$  para sua estabilização na superfície, então a imagem era registrada com a câmera fotográfica Sony Hx300 Full Hd Zoom 50x 20.4 MP.

As imagens foram analisadas no software SurfTens versão 4.5 e medidos os ângulos de contato. Para cada gota, mediu-se o ângulo de contato sete vezes e considerou-se a média como representativa. Na Figura 34 tem-se a imagem do software durante a medição do ângulo de contato, através de medidas de diâmetro da base da gota e da altura da mesma.



**Figura 34.** Imagem do software durante a medição do diâmetro do ângulo de contato

### 3.2.9 Determinação de Dureza

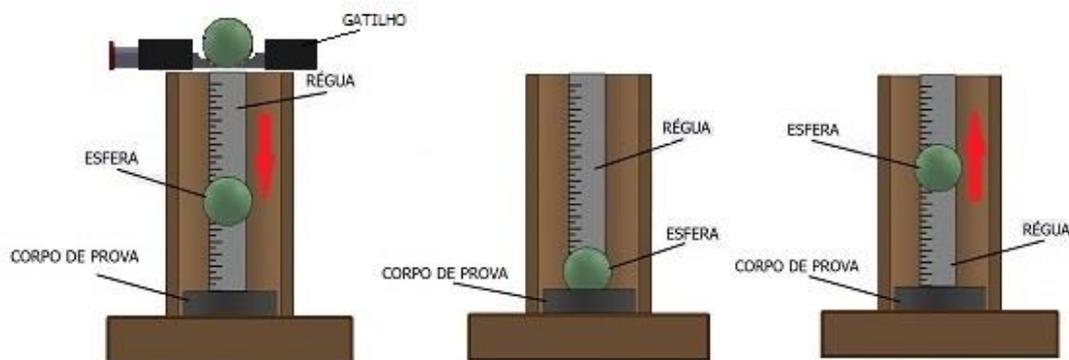
Para a medida da dureza dos compósitos, utilizou-se a escala de dureza Shore D para a caracterização. O método Shore D consiste em medir a profundidade da impressão deixada no material com a aplicação da carga e é dependente de outros fatores além da dureza, como das propriedades viscoelásticas e da duração do ensaio. O equipamento da marca Kori Seiki MFG.CO.LTD é amplamente utilizado na medição da dureza de polímeros, elastômeros, borrachas e compósitos (Figura 35). Foram realizadas sete medidas em cada composição objetivando obter resultados estatisticamente confiáveis.



**Figura 35.** Durômetro Shore D

### 3.2.10 Análise de Absorção de Impacto

Desenvolveu-se um equipamento experimental, como pode ser visto no diagrama esquemático da Figura 36, com a finalidade de quantificar a energia de absorção dos compósitos através da energia potencial gravitacional. O equipamento é formado por um tubo PVC e uma parte em tubo de plástico transparente com escala graduada em milímetros.



**Figura 36.** Diagrama esquemático do equipamento experimental

O procedimento consiste em liberar esferas a partir de uma altura fixa ( $H_i$ ) sobre o corpo de prova e medir a altura de rebote ( $H_r$ ) após o contato entre a esfera e o corpo de prova polimérico, sendo registrada por uma câmera a altura ( $H_r$ ) que as esferas atingem na volta, após colidirem com a amostra.

Nascimento *et al.* (2008) mostram que a energia absorvida pelo material pode ser calculada através da Equação 02:

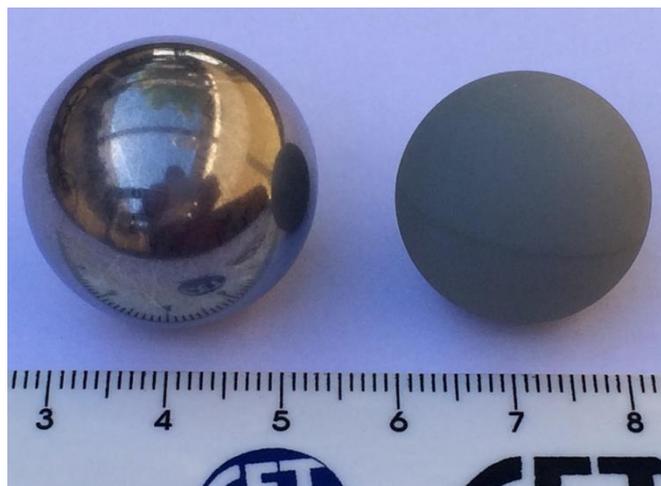
$$E_{Pi} = E_{ABS} + E_{PF} \quad (02)$$

Onde:  $E_{Pi} = mgH_i$  é a energia potencial inicial obtida pela esfera quando liberada;  $m$  é a massa da esfera,  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  e  $H_i$  é a altura inicial da esfera = 1,90 m.  $E_{ABS}$  é a energia absorvida pelo material e  $E_{PF} = mgH_r$  é a energia potencial medida após o contato da esfera com a amostra, onde  $H_r$  é a altura máxima que a esfera alcança após o contato. De (1) obtem-se:

$$E_{ABS} = mg\Delta H \quad (03)$$

A Equação 03 foi utilizada para a obtenção da energia absorvida por cada um dos corpos de prova com base na diferença das alturas ( $\Delta H$ ).

Realizaram-se sete rebotes em cada corpo de prova, sendo um corpo de prova de cada composição, com uma esfera de metálica e outra de metálica revestida de borracha e calculou-se a média e o desvio padrão. As dimensões das esferas podem ser visualizadas na Figura 37 e as massas e diâmetros das esferas na Tabela 4.



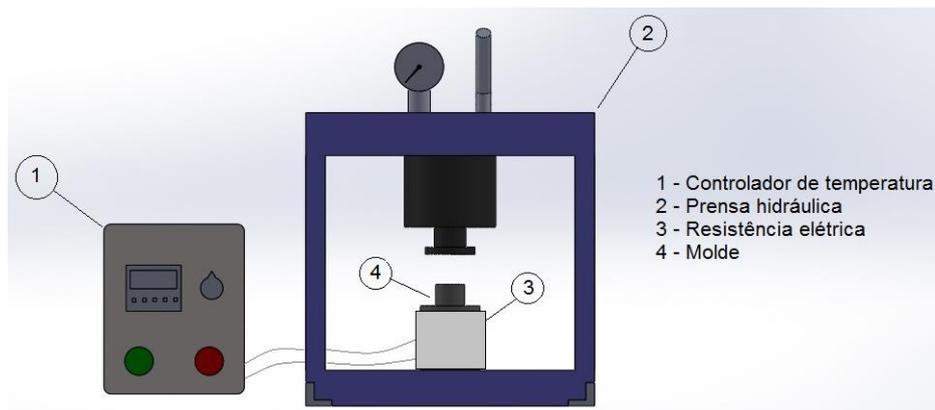
**Figura 37.** Esfera metálica e esfera metálica revestida de borracha utilizadas nos ensaios de absorção de impacto

**Tabela 4.** Massa e dimensões das esferas metálica e metálica revestida de borracha utilizadas no ensaio

<b>Esfera</b>	<b>Massa (g)</b>	<b>Diâmetro (mm)</b>	<b>Energia Incidente (J)</b>
<b>Esfera Metálica</b>	66,9708	25,40	1,25
<b>Esfera Metálica Revestida de Borracha</b>	31,7647	22,10	0,59

### 3.3 Confecção dos Compósitos

Foram desenvolvidos compósitos de PTFE + rejeito de Scheelita (RS). O rejeito de Scheelita com tamanho de partícula de #600 mesh, foi misturado mecanicamente ao PTFE comercial, ambos na forma de pó, utilizando-se de um processador com rotação de 160 RPM. Em seguida, os pós em um molde cilíndrico (Aço H13) foram moldados pela moldagem por compressão à quente numa prensa hidráulica (Marca Marcon), com carga normal de 15000 lbf (67 kN, Pressão de compactação 70MPa), definida após uma série de *screening tests* (ensaios piloto), durante 3 minutos, sob temperatura controlada de aproximadamente  $220\pm 10^{\circ}\text{C}$  e posteriormente descompressão de 1 min (Figura 38).



**Figura 38.** Bancada para moldagem por compressão à quente

Os corpos de prova foram confeccionados com as seguintes composições: PTFE/RS (99:1), PTFE/RS (98:2), PTFE/RS (97:3), PTFE/RS (95:5), PTFE/RS (90:10), PTFE/RS (80:20), PTFE/RS (70:30) e PTFE/RS (50:50) porcentagem em peso.

A Figura 39 mostra os corpos de prova dos compósitos preparados com volume de 5,770 cm<sup>3</sup> e diâmetro de 35,0 mm cada.



**Figura 39.** Composições dos compósitos desenvolvidos

Durante o desenvolvimento desta tese foram confeccionados aproximadamente 400 corpos de provas através do processo de moldagem, para ensaios piloto e oficiais, assim como avaliações de caracterização importantes para esta pesquisa.

### 3.4 Análise de Planicidade

O ensaio de planicidade foi realizado nos corpos de prova de compósitos, com o intuito de obter informações qualitativas e quantitativas a respeito das superfícies a serem estudadas.

Este ensaio foi realizado em uma máquina de medir por coordenadas (MMC), da marca MITUTOYO®, com a ponta do indentador de rubi. Para a medição, a ponta do indentador é posta em contato com a superfície dos corpos de prova promovendo, assim, a medida da planicidade (Figura 40).

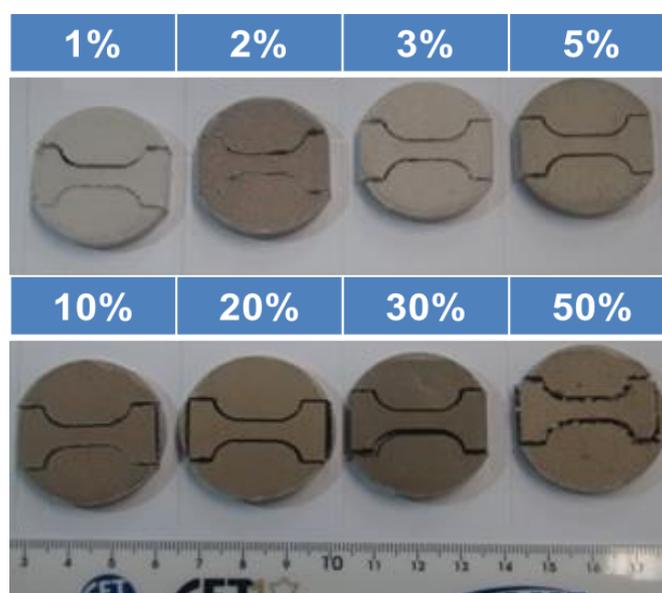


**Figura 40.** Máquina de medir por coordenadas

Três medidas de planicidade foram realizadas em oito corpos de prova, um de cada composição, com a ponta encostando e varrendo toda a sua superfície. Para a área superficial deste corpo de prova foi observado que treze toques superficiais eram suficiente para obter uma medida adequada para esta análise.

### 3.5 Ensaios de Tração

O ensaio de tração tem por objetivo determinar as propriedades mecânicas associadas a esse tipo de sollicitação mecânica, como por exemplo o módulo de Young. Para o ensaio, foi utilizada uma máquina de ensaios mecânicos, marca Mesdan, modelo DL30000N, acoplada a um sistema de coleta de dados TensoLab, mediante as seguintes condições: velocidade de ensaio 10 mm/min, com uma célula de carga de 50 kgf em temperatura ambiente. Os ensaios foram realizados em todas as composições, mas validados apenas para aquele com adição de 1% e 50% de carga mineral, para avaliar o módulo de Young no limite superior e inferior dos compósitos, Figura 41.



**Figura 41.** Amostras cortadas a laser para os ensaios de tração

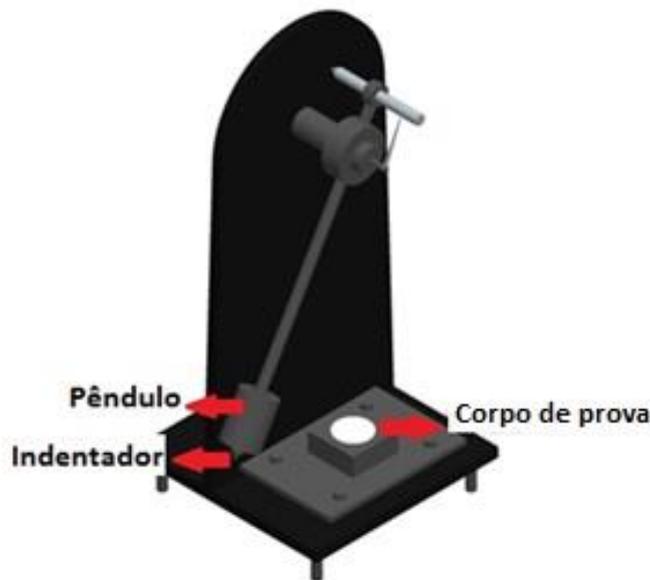
### 3.6 Ensaios Tribológicos

A força de contato e os níveis de desgaste que ocorrem nos ensaios de riscamento e pino contra disco podem ser induzidos para analisar o comportamento tribológico dos compósitos e a relação entre o comportamento do risco.

Para avaliar a resistência à abrasão dos compósitos desenvolvidos utilizaram-se ensaios tribológicos com configurações distintas, sendo elas a Esclerometria pendular e o Pino Contra Disco, descrito a seguir.

### 3.6.1 Esclerometria Pendular

A esclerometria pêndular é uma técnica tribológica que consiste em imprimir um movimento pendular em uma ponta cônica indentadora a partir de uma altura  $H$  através do ponteiro de um transferidor posicionado centralmente em relação ao eixo do pêndulo, atingindo o corpo de prova com um único risco abrasivo. Um desenho esquemático do esclerômetro pêndular é apresentado na Figura 42.



**Figura 42.** Desenho esquemático do esclerômetro pendular

O indentador é enroscado ao pêndulo, onde o tamanho do filete é exatamente o da rosca, não sendo possível alterar a altura do conjunto de indentadores. Os corpos de prova foram nivelados com auxílio de um nível tipo bolha e em seguida  $\frac{1}{4}$  de volta nas 4 porcas da base era dado para garantir a mesma profundidade de risco durante os ensaios. Além da medição na altura das porcas, verificava-se se a ponta do indentador estava na iminência de riscar o corpo de prova, então o sistema era considerado “zerado” e pronto para ensaio.

Após riscar a amostra, o pêndulo atinge uma altura final do movimento seguido pela energia remanescente que não foi dissipada. A energia de deformação ( $E$ ) é calculada usando a Equação (4).

$$E = \frac{m \cdot g \cdot h \cdot \sin(\varphi_2) - \sin(\varphi_1)}{Vd} \quad (04)$$

Onde  $m$  equivale ao somatório das massas do pêndulo e indentador,  $g$  aceleração da gravidade,  $h$  a diferença entre altura final e inicial,  $\phi_1$  e  $\phi_2$  são os ângulos inicial e final, respectivamente e  $V_d$  o volume desgastado.

Os sete indentadores utilizados apresentam ângulos de ponta variáveis ( $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$ ,  $90^\circ$  e  $120^\circ$ ), são de aço carbono AISI 1045, temperado e revenido, com dureza de  $39 \pm 13$  HRC e podem ser vistos na Figura 43. A variação da pressão de contato é associada com a energia de deformação necessária para promover o risco.



**Figura 43.** Ângulos de ponta dos indentadores

A energia potencial é quantificada durante os ensaios por um sistema eletrônico da marca National Instruments com a ajuda do software LabVIEW. Após riscar o corpo de prova, a energia remanescente no pêndulo o conduz a uma amplitude final de movimento relacionada à parcela da energia que não foi dissipada durante o riscamento. A pressão de contato foi associada à energia de deformação necessária para promover o risco esclerométrico e aos mecanismos de desgaste identificados nos compósitos após o riscamento.

### 3.6.2 Análise de Pino contra Disco

O tribômetro com configuração pino contra disco da empresa Magnum Engineer foi utilizado para a caracterização do coeficiente de atrito dinâmico e da taxa do desgaste dos compósitos avaliados nesta tese (Figura 44). Uma esfera de aço AISI 52100, com diâmetro de 10 mm foi usada como pino. A velocidade de rotação do disco utilizada foi de 300rpm e o raio da trilha de desgaste foi de 10 mm. O pino foi carregado contra a amostra com carga de 16 N. Os ensaios tiveram duração de 33,5 min e foram realizados para 10.000 revoluções à temperatura ambiente, apresentando a distância de deslizamento de 632 m respectivamente.



**Figura 44.** A) Equipamento tribômetro com configuração pino contra disco, B) Região da trilha de desgaste após ensaio e C) Região do contato entre o corpo de prova encaixado no disco e o pino (Esfera)

O coeficiente de atrito dinâmico e o afundamento da pista de desgaste foram monitorados através de sensores eletrônicos, e esses dados são recebidos, expostos e armazenados no computador utilizando o software nativo do tribômetro.

Um braço elástico altamente rígido garante um ponto de contato quase fixo e, portanto, uma posição estável na pista de atrito. O atrito dinâmico era obtido durante o ensaio acompanhando a deflexão do braço elástico por medição direta da mudança de torque (DUTTA, 2009). A taxa de desgaste foi determinada através da trilha de desgaste devido ao atrito do pino contra o disco.

## 4. Resultados e Discussão

### 4.1 Caracterização dos Materiais

#### 4.1.1 Carga mineral

##### 4.1.1.1 Análise de Granulometria

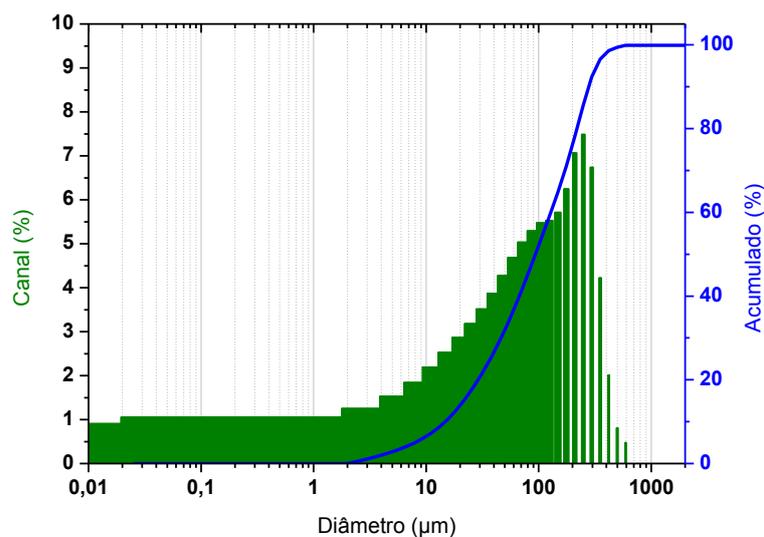
Após pesadas as massas retidas em cada fração, foram obtidos os dados de distribuição granulométrica da carga mineral, apresentados na Tabela 5, onde mais de 41% da amostra é inferior a 150  $\mu\text{m}$ , o que a caracteriza este particulado como um particulado fino.

**Tabela 5.** Distribuição granulométrica da carga mineral

<b>Abertura Tyler</b>	<b>Abertura da Peneira (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>% Massa Retida</b>
<b>48</b>	300	31,7
<b>100</b>	150	26,9
<b>200</b>	75	15,7
<b>325</b>	45	13,6
<b>400</b>	38	3,1
<b>625</b>	20	1,4
<b>Fundo</b>		7,6

A distribuição granulométrica (em volume) de tamanhos de partículas da carga mineral, obtida por difração a laser, é apresentada na Figura 46.

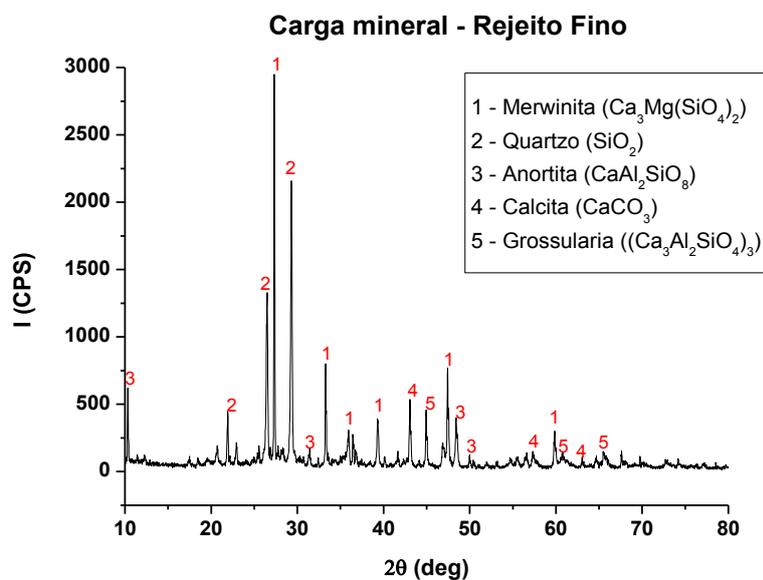
A amostra apresenta uma larga distribuição de tamanhos na faixa de aproximadamente 2,0 até 600  $\mu\text{m}$ , tendo em sua maior quantidade partículas com tamanho médio de 150  $\mu\text{m}$ . Pode-se observar que não houve aglomeração de partículas durante a realização do ensaio apesar de se tratar de partículas com uma alta energia de superfície. Essa ampla faixa no tamanho de partículas deve-se à presença de elementos e fases distintos, confirmado posteriormente com os resultados das análises de DRX e FRX.



**Figura 45.** Gráfico da distribuição granulométrica (em volume) do rejeito de Scheelita

#### 4.1.1.2 Difração de Raios-X (DRX)

A Figura 47 apresenta os resultados do difratograma (DRX) obtido para a amostra de rejeito fino de Scheelita. Cada composto cristalino corresponde um padrão de difração diferente e característico, como se observa para a calcita e o quartzo.



**Figura 46.** Difratograma da carga mineral

Este resultado mostra a predominância da anortita, do quartzo e da merwinita, maiores picos respectivamente, e minoritariamente calcita e grossularia.

FERNANDES (2011) realizou análise mineralógica com a mesma carga mineral fino da Mina Brejuí e obteve resultado semelhante, com exceção do mineral merwinita, obtido no presente trabalho.

#### 4.1.1.3 Fluorescência de Raios-X (FRX)

A representatividade em termos percentuais dos elementos presentes na amostra do Rejeito de Scheelita é mostrada na Tabela 6. A caracterização química mostra que os principais óxidos presentes são CaO (em média 44,6336%) e SiO<sub>2</sub> (em média 33,2700%), o que corresponde a mais de 77 % do total dos compostos apresentados.

**Tabela 6.** Caracterização química da carga mineral - Fluorescência de Raios-x

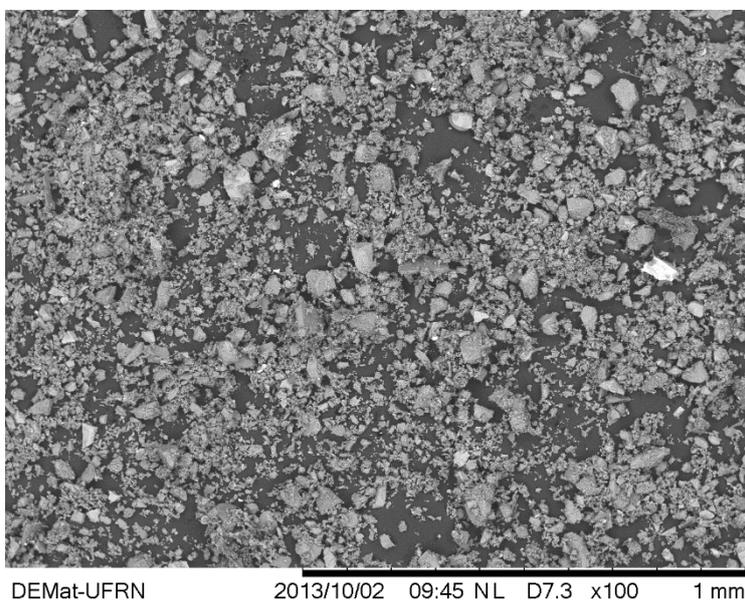
<b>Óxidos</b>	<b>Média Final</b>
<b>CaO</b>	44.6336 %
<b>SiO<sub>2</sub></b>	33.2700 %
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	9.3114 %
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	5.7030 %
<b>MgO</b>	4.6439 %
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0.7223 %
<b>MnO</b>	0.4992 %
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0.3677 %
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0.3172 %
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0.2847 %
<b>SO<sub>3</sub></b>	0.1718 %
<b>WO<sub>3</sub></b>	0.0563 %
<b>SrO</b>	0.0188 %

Os resultados da Tabela 6 indicam que os minerais mais importantes em quantidade devem ser a calcita e o quartzo. Isso advém do fato que as mineralizações encontram-se associadas aos calcários cristalinos (mármore), razão pela qual os rejeitos são ricos em carbonatos.

O composto de grande importância, trióxido de Tungstênio –  $\text{WO}_3$  apresentou uma porcentagem muito reduzida, da ordem de 0,0563%. Este resultado era esperado, visto que o material é oriundo de rejeito do processo de beneficiamento da scheelita. Assim, o beneficiamento mineiro não é 100% eficaz, deixando ainda em seu resíduo traços do mineral Tungstênio.

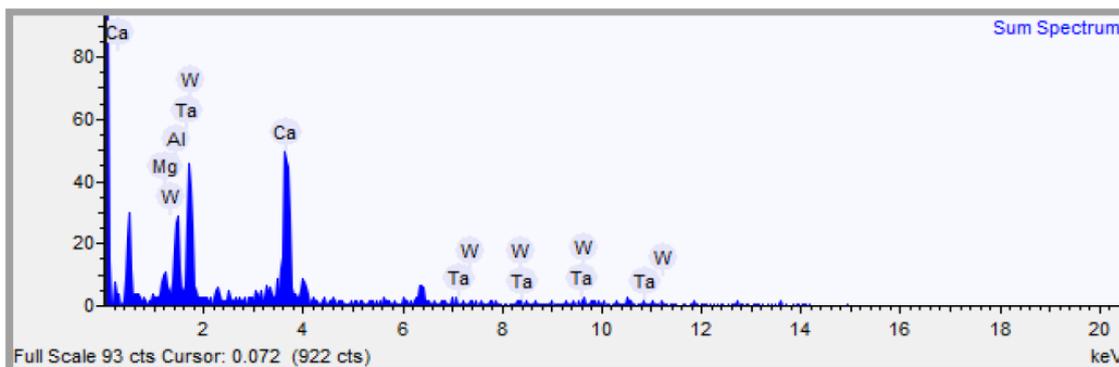
#### **4.1.1.4 MEV E EDS**

O aspecto morfológico do rejeito de Scheelita após as caracterizações de granulometria pode ser visualizado através da microscopia eletrônica de varredura na Figura 47. Comprova-se que a granulometria e a morfologia não são uniformes, com tamanhos e formatos distintos.



**Figura 47.** MEV (retro-espalhamento de elétrons) da carga mineral como adquirida

Com a microanálise EDS, detectou-se a presença de elementos como: tungstênio, tântalo, alumínio, cálcio e magnésio como pode ser visto na Figura 48.

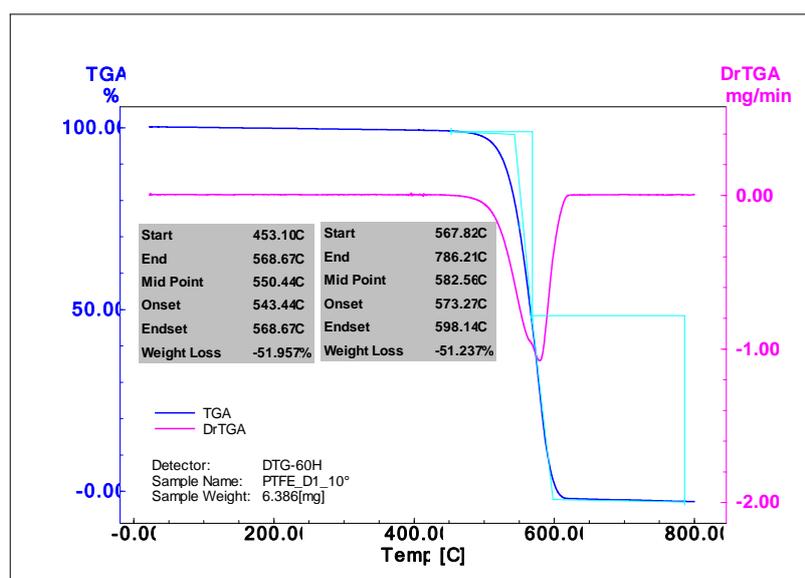


**Figura 48.** Microanálise EDS na carga mineral

#### 4.1.2 PTFE

##### 4.1.2.1 TG

As curvas da análise termogravimétrica do PTFE estão expostas na Figura 49. A faixa de temperatura associada à estabilidade térmica do PTFE investigado é evidenciada até aproximadamente 400 °C, ocorrendo até esta temperatura a perda de elementos voláteis e umidade. A partir desta temperatura, para as condições ensaiadas de taxa de aquecimento e sob ar atmosférico, há evidência de degradação severa do polímero em duas etapas principais e consecutivas.



**Figura 49.** Curva da análise termogravimétrica do PTFE

A alta estabilidade térmica do PTFE é decorrente do fato deste material ser constituído apenas de ligações C - C e C - F, ambas extremamente estáveis [LIMA DA SILVA, 2010; BRYDSON, 1999]. Estes resultados estão de acordo com estudos publicados na literatura [FERREIRA *et al.*, 2012; LIMA DA SILVA, 2010]. As principais etapas e eventos observados nas curvas de TG são apresentados na Tabela 7.

**Tabela 7.** Principais etapas e eventos da curva termogravimétrica dos polímeros utilizados  
(valores aproximados)

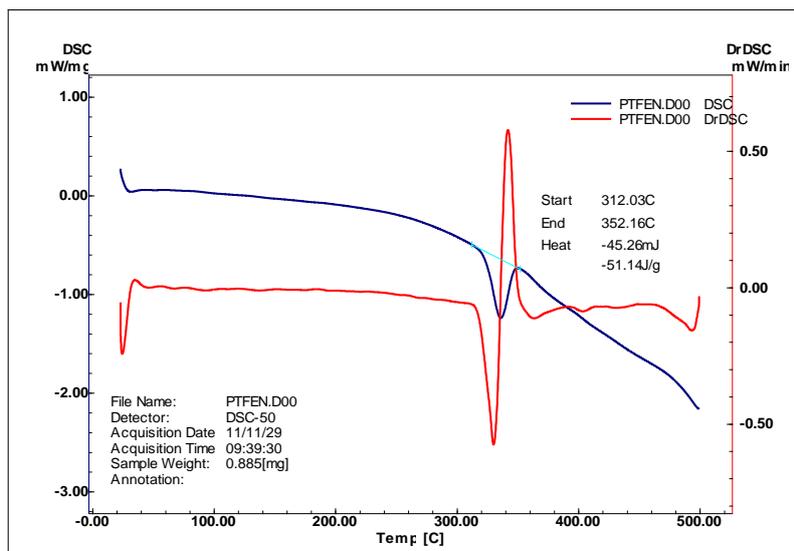
<b>Análise</b>	<b>TGA PTFE</b>
Estabilidade Térmica	400 °C
<b>Etapas de Degradação</b>	
Etapa 1	420 a 550 °C
Perda de massa (%)	58%
Etapa 2	550 a 650 °C
Perda de massa (%)	42%

#### 4.1.2.2 DSC

Na Figura 50, as curvas da análise por DSC e DrDSC (derivada do DSC) para o PTFE são apresentadas, evidenciando-se um pico endotérmico uma temperatura de 310°C, que indica o início da fusão deste material. Se compararmos as curvas de TG e DSC, identificamos a temperatura máxima de trabalho do PTFE.

A variação entálpica  $\Delta H_f^o$  encontrada na literatura para o PTFE é 82 J/g (BRYDSON, 1999). O resultado de DSC indica um calor de fusão de 51 J/g para o PTFE utilizado neste trabalho, cuja cristalinidade era da ordem de 60%. O valor de  $T_f$  está corroborando com o apresentado na literatura [LIMA DA SILVA, 2010].

Os resultados obtidos para as variáveis Temperatura de fusão,  $T_f$ , Calor de fusão (Entalpia),  $\Delta H_f$ , e Cristalinidade, obtidos através das análises de DSC estão esquematizados na Tabela 8.



**Figura 50.** Curvas resultantes da Análise de DSC para o PTFE

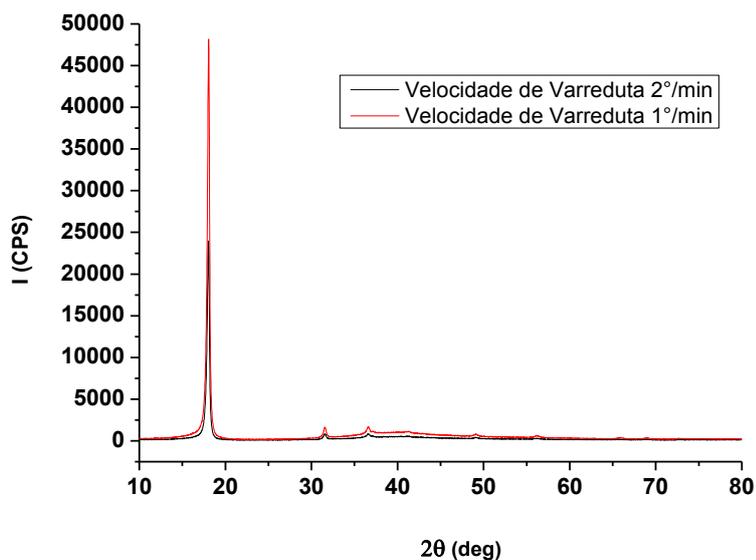
**Tabela 8.** Resultados da Temperatura de fusão, Calor de fusão (Entalpia) e Cristalinidade para o PTFE, obtidas a partir dos ensaios de DSC

Polímero	T <sub>f</sub> (°C)	ΔH <sub>f</sub> (J/g)	Cristalinidade (%)
PTFE	322	51,14	62

#### 4.1.2.3 DRX

Na Figura 51, são apresentados os difratogramas de Raios-X (DRX) do PTFE investigado, com velocidades de varredura de 1 e 2 graus/min. Nota-se a presença de estruturas semicristalinas, com o PTFE apresentando picos mais estreitos e menor região amorfa, caracterizando uma estrutura cristalina mais regular. Esta evidência foi constatada no gráfico de DSC deste material (Figura 50), onde se observou que o pico referente à fusão da região cristalina do PTFE também é mais estreito.

Em um gráfico desta natureza quanto mais estreito o pico, maior é a cristalinidade do material.



**Figura 51.** Difratograma de Raios –X do polímero PTFE

#### 4.1.2.4 FRX

O PTFE é um polímero linear, composto de átomos de carbono e flúor. Comparando com a molécula de polietileno que tem a forma de zig zag planar na zona cristalina, a molécula de PTFE assume uma forma de zig zag torcida com os átomos de flúor empacotados como um espiral ao redor do esqueleto carbono-carbono, isto ocorre devido à diferença de tamanhos entre o flúor (do PTFE) e o hidrogênio (do polietileno) [LIMA DA SILVA, 2010].

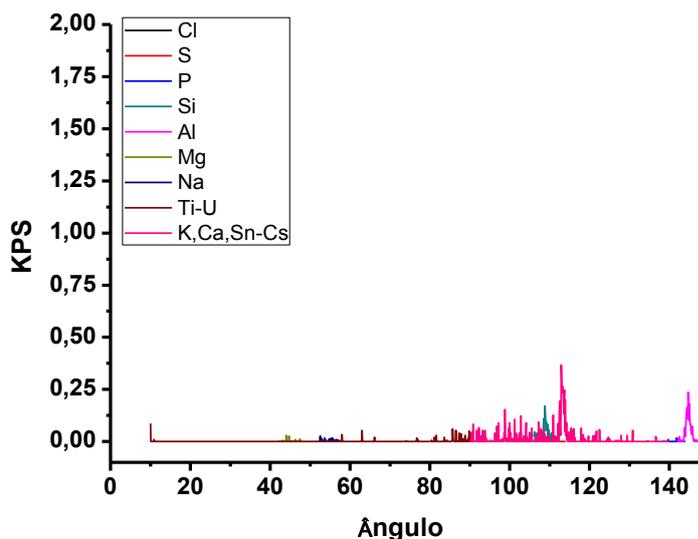
O empacotamento interligado dos átomos de flúor garante grande rigidez, alto ponto de fusão cristalino e estabilidade térmica do polímero.

O equipamento em questão está configurado para analisar elementos químicos iguais ou superiores ao sódio (11) e, assim, o carbono (6) e o flúor (9) estando abaixo da faixa de detecção do FRX, não foram contabilizados neste ensaio.

Verificou-se, através da análise do PTFE por FRX, na Tabela 9, que existe a presença de compostos à base de Alumínio (Al), Cálcio (Ca) e Silício (Si), observando-se, com base no espectro, que estes componentes se encontram em baixas concentrações em virtude da baixa intensidade dos picos, como constatado pela Figura 52.

**Tabela 9.** Resultados de FRX para o PTFE

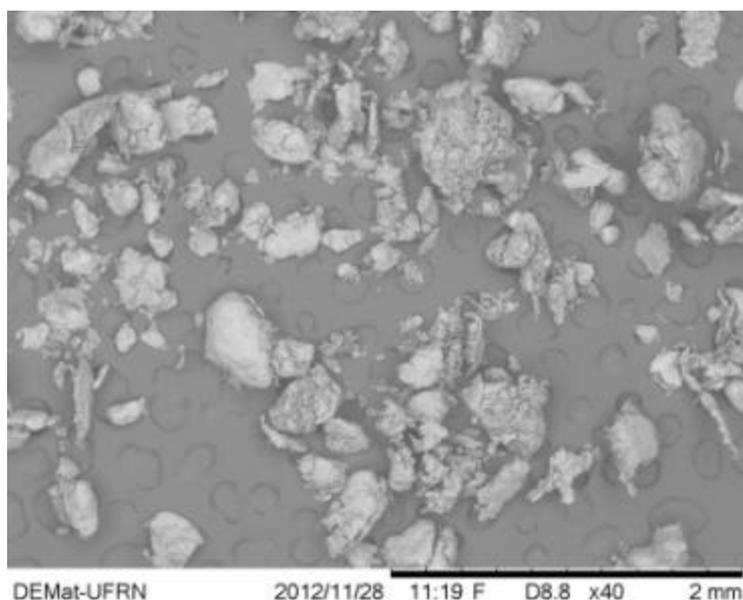
PARÂMETRO	UNIDADE	RESULTADO	Kps
Alumínio	%	26,6	0,149
Cálcio	%	39,8	0,311
Silício	%	33,6	0,143

**Figura 52.** Espectro de FRX do PTFE

Analisando-se os resultados das análises efetuadas e as evidências experimentais detectadas através de ensaios exploratórios iniciais nas pastilhas de PTFE desenvolvidas, confirma-se a sua resistência térmica destacada, quando considerada em relação aos polímeros de engenharia e, além disto, a semi-cristalinidade do PTFE investigado, assim como identificado por pesquisadores de Los Alamos, em uma revisão sobre o efeito de cristalinidade na tenacidade e nos mecanismos de fratura do PTFE, com base em medições de tração, DMA, e experimentos de fratura JIC [BROWN *et al.*, 2006].

#### **4.1.2.5 MEV e EDS**

O aspecto morfológico do PTFE como adquirido pode ser visualizado através da microscopia eletrônica de varredura na Figura 53. Comprovando-se a aglomeração das partículas em algumas regiões, além de uma morfologia não uniforme, com tamanhos e formatos distintos.

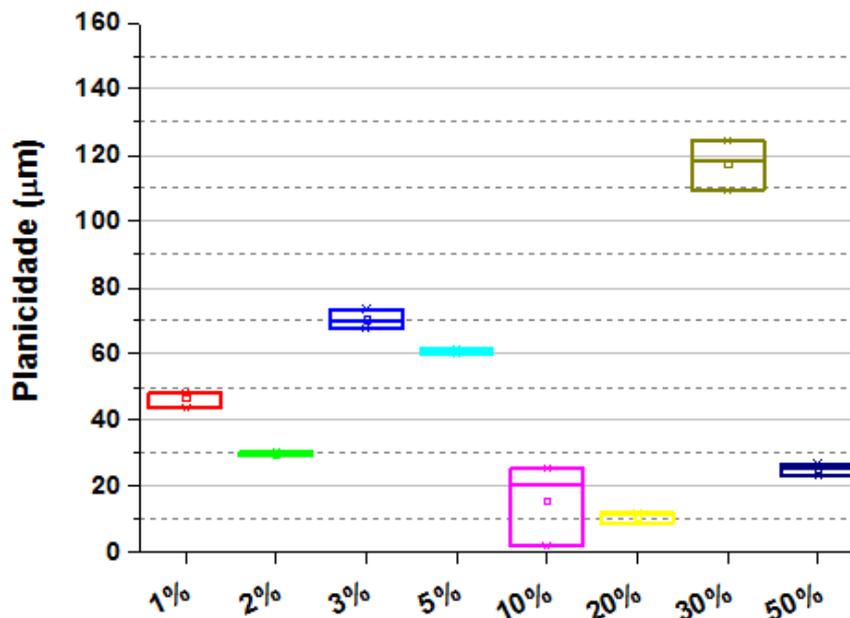


**Figura 53.** MEV (retro-espalhamento de elétrons) do aspecto morfológico do pó de PTFE como adquirido

### **4.1.3 Compósitos PTFE + Rejeito de Scheelita**

#### **4.1.3.1 Planicidade**

Para o ensaio de planicidade, apenas uma amostragem do total de corpos de prova confeccionados foi empregada para essa medição o que impossibilita concluir os efeitos destes desvios de superfície exatamente nos corpos de prova utilizados nos ensaios, conforme dados apresentados na Figura 54.



**Figura 54.** Planicidade dos compósitos

A partir desses resultados é nítido que não é possível identificar uma tendência ou correlação com o teor de carga mineral em cada composição. A composição das amostras com 20% de carga mineral se destaca como sendo a que apresenta o menor desvio de planicidade, sendo esta a melhor amostra quando comparada as demais. Seguindo a mesma linha de raciocínio observa-se que a composição com 30% apresentou o maior desvio de planicidade o que certamente influencia negativamente nos ensaios realizados nesta pesquisa. As composições de 10 e 50% de carga mineral estiveram no mesmo patamar com um desvio de 20 – 29  $\mu\text{m}$ . Não foi possível estabelecer correlação entre quantidade de reforço/planicidade que ocorre provavelmente pela dificuldade de homogeneização da carga na matriz de PTFE e/ou falha no processamento de conformação a quente.

#### **4.1.3.2 Rugosidade**

Os ensaios de rugosidade foram os primeiros realizados na superfície dos compósitos e seus resultados estão ilustrados nas Figuras 55, 56, 57 e 58.

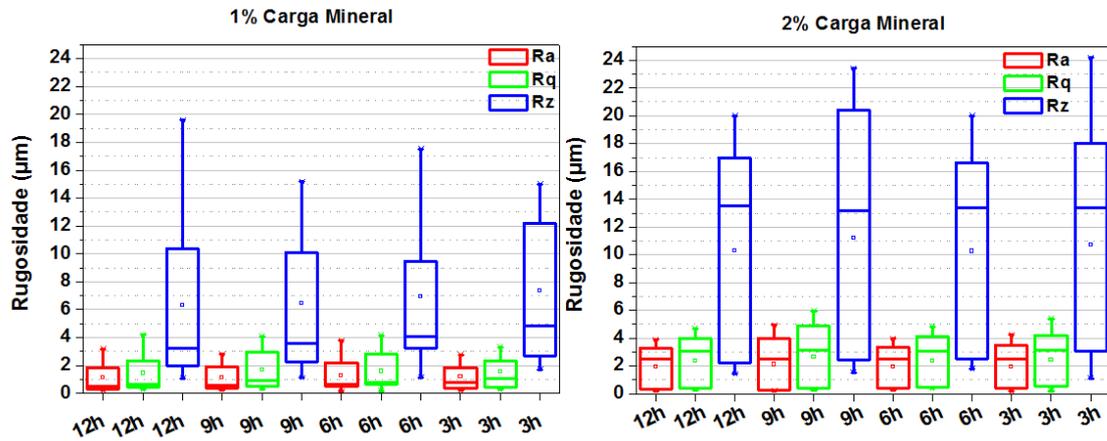


Figura 55. Ra, Rz e Rq para as 4 direções dos compósitos com 1 e 2% de carga mineral

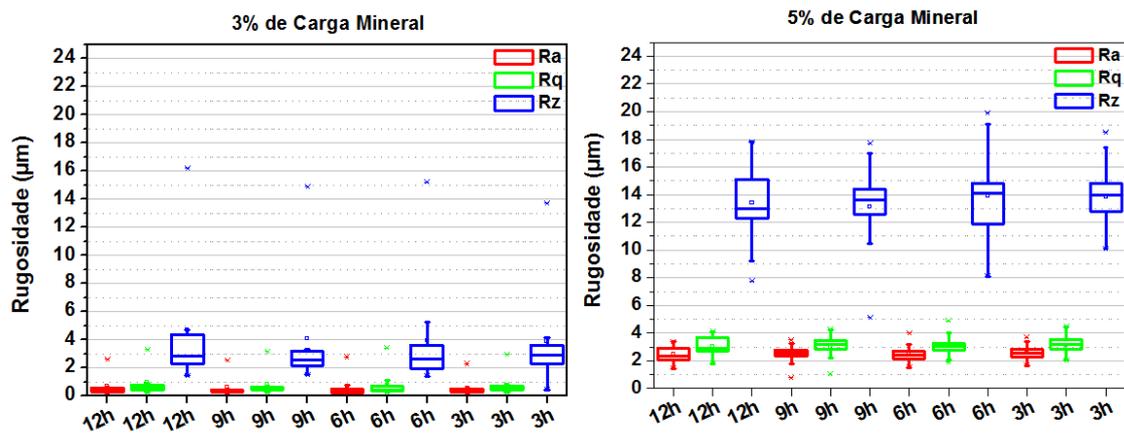


Figura 56. Ra, Rz e Rq para as 4 direções dos compósitos com 3 e 5% de carga mineral

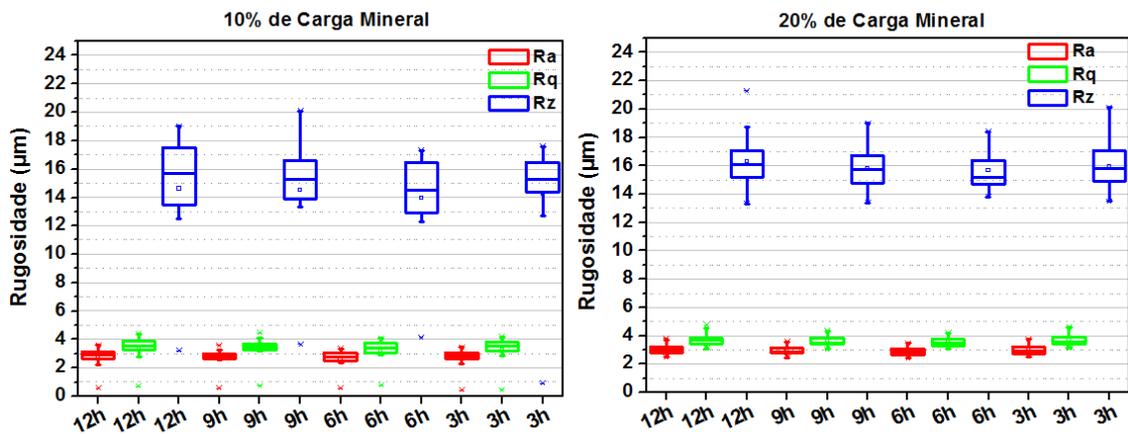
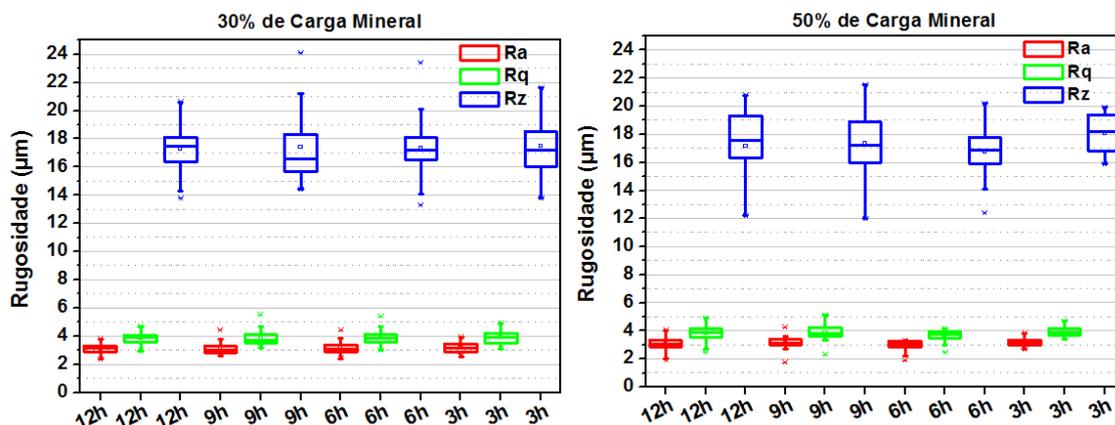


Figura 57. Ra, Rz e Rq para as 4 direções dos compósitos com 10 e 20% de carga mineral



**Figura 58.** Ra, Rz e Rq para as 4 direções dos compósitos com 30 e 50% de carga mineral

De acordo com os resultados de rugosidade obtidos observou-se que o aumento na quantidade (percentagem) de carga mineral, inserido nos compósitos, promoveu naturalmente, o aumento nos valores de Ra, Rz e Rq em todas as direções avaliadas dos compósitos. Isto pode ser justificado, considerando que os compósitos foram desenvolvidos a partir da mistura mecânica do PTFE em pó com a carga mineral, assim partículas da carga estão presentes sobre a superfície, aumentando de forma significativa a rugosidade.

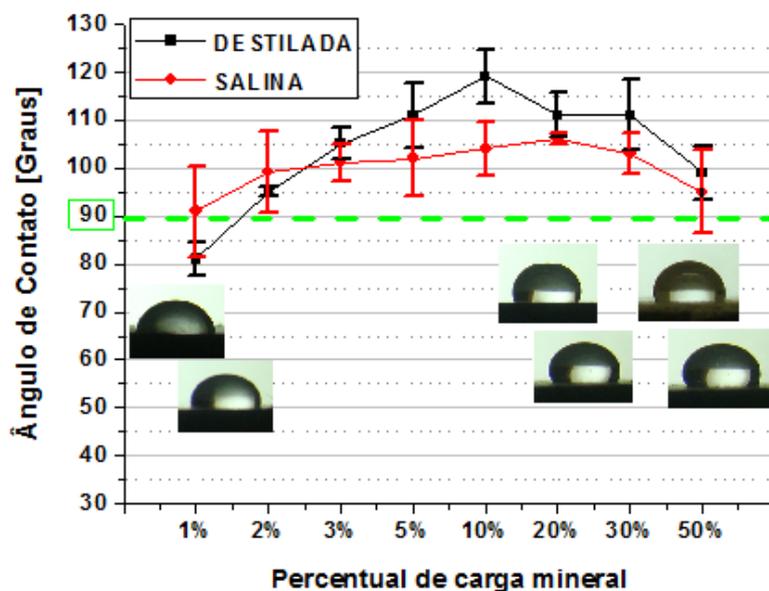
Sabendo-se que as partículas de carga mineral apresentam dureza superior ao PTFE, é de se esperar que a carga dispersa na superfície dos compósitos altere o seu acabamento superficial.

Observa-se que entre as composições com 1, 2 e 3% de carga mineral, respectivamente, a rugosidade Ra, Rq e Rz estiveram entre os valores inferior comparados aos compósitos que apresentam a partir de 5% de carga mineral em sua composição.

S. M. Yeo e A. A. Polycarpou, 2012, avaliaram tribologicamente diversos revestimentos poliméricos a base de PTFE, PEEK, resina e fluorocarbonados sobre o ferro fundido cinzento utilizando uma tribômetro especializado sob condições específicas de compressores, que incluíram movimento oscilatório e unidirecional, identificando uma rugosidade Rq de 3.3, 2.6, 3.1 e 2.4, respectivamente para os revestimentos PTFE/Pyrrolidone-1, PEEK/PTFE, PEEK/Cerâmica e Flúor carbono.

#### 4.1.3.2 Molhabilidade

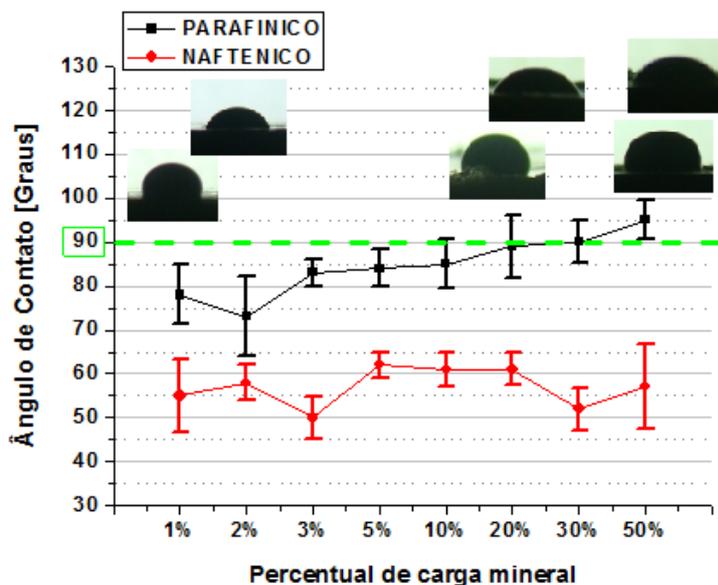
A molhabilidade dos compósitos foi analisada a partir dos resultados de ângulo de contato e podem ser verificados nas Figuras 59 para as águas destilada e salina e Figura 60 para os óleos parafínico e naftênico.



**Figura 59.** Ângulo de contato (águas) em função do percentual de carga mineral

O polímero PTFE, matriz dos compósitos em estudo, é conhecido por sua hidrofobicidade dentre outras propriedades interessantes, apresentando ângulo de contato superior a  $90^\circ$ , ou seja, uma gota de água não se espalha facilmente em sua superfície.

Ao incorporar a carga mineral no desenvolvimento desses compósitos para as condições utilizadas, observa-se que esta característica se mantém, apresentando uma superfície hidrofóbica, no caso do uso das águas destilada e salina. Observa-se também que existe uma tendência crescente no ângulo de contato com o aumento no teor de carga mineral, sendo para a composição de 10% o maior ângulo obtido com água destilada e 20% com água salina.



**Figura 60.** Ângulo de contato (óleos) em função do percentual de carga mineral

No entanto, com o uso dos óleos verifica-se que as superfícies se caracterizaram em sua maioria como superfícies oleofílicas. Ao analisar os gráficos identifica-se que os menores ângulos foram obtidos para o óleo naftênico, todos abaixo de  $70^\circ$  e os maiores para o óleo parafínico. Existindo também no caso do uso do óleo parafínico, uma tendência crescente no ângulo de contato com o aumento no teor de carga mineral, registrando-se para as composições de 20, 30 e 50% uma característica oleofóbicas.

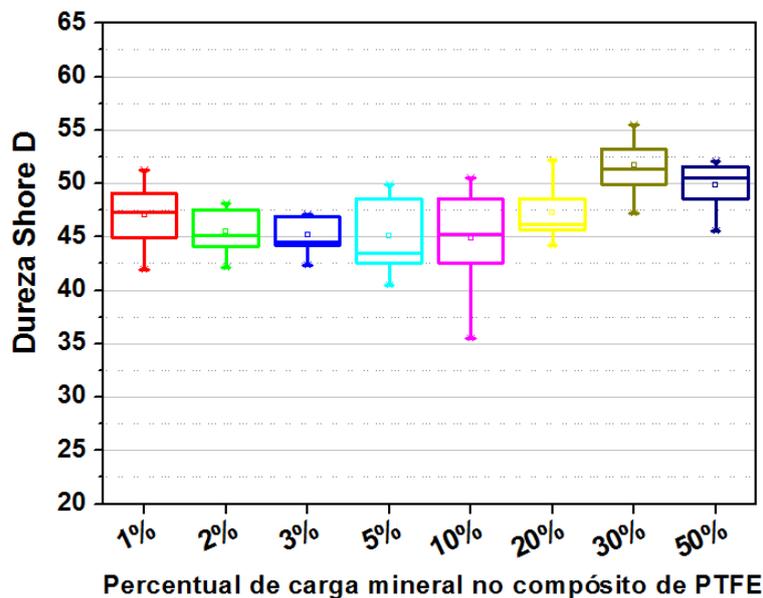
H. Wang *et al.*, 2013, estudaram as propriedades hidrofóbicas, de resistência ao desgaste e ao calor de revestimentos à base de PPS/PTFE e  $\text{SiO}_2$ -nano com e sem PDMS, modificando os grupos de baixa energia superficial ( $\text{CF}_2$ ), inspirados pelas folhas de lótus e identificaram que o ângulo de contato aumenta progressivamente com o aumento no teor de PTFE, sendo para o revestimento com 8% de PTFE um ângulo de  $115^\circ$  medido com água.

NELSON MARTINEZ (2009) afirma que quanto mais rugosa é a superfície de um material, mais hidrofóbica ela é. Além disso, é sabido que diferentes superfícies químicas podem afetar o ângulo de contato entre uma superfície e um líquido.

Segundo SILVA e PORSCHE, 2011, quanto mais rugosa é a superfície maior é seu ângulo de contato, desta forma os resultados de rugosidade, mostrados anteriormente nas Figuras 58 e 59, corroboram com os de ângulos de contato já que os compósitos com maior quantidade de carga mineral foram os que apresentaram a maior rugosidade superficial e ângulo de contato, nas condições deste estudo quando comparados entre si.

#### 4.1.3.3 Dureza

Ensaio de dureza foram realizados na escala Shore D. Na Figura 61 abaixo, têm-se os resultados de dureza Shore D.



**Figura 61.** Dureza Shore D em função do percentual de carga mineral

Analisando o gráfico de dureza Shore D percebe-se a ocorrência de dois comportamentos distintos, um comportamento para as composições com baixo teor de carga mineral e outro comportamento para as composições com alto teor de carga mineral.

Percebe-se que até a composição de 5% de carga mineral houve uma diminuição linear na dureza dos compósitos com o aumento da carga, enquanto que a partir de 10% de carga mineral, a composição que apresentou a maior dispersão nos resultados, o inverso ocorre, a dureza aumenta linearmente com o aumento do teor de carga, com exceção para a composição de 50% que se mantém numa zona de dureza semelhante a composição de 30%.

De acordo com CONTE e IGARTUA, 2012, o PTFE puro antes de ensaiado em tribômetro com configuração cilindro-plano, apresenta dureza shore D de 54 e após ensaiado 52. Quando comparado aos compósitos carregados com Carbono, bronze, grafite, fibra de vidro com e sem grafite e MoS<sub>2</sub> analisados nesta pesquisa, o PTFE puro apresenta a menor dureza, conferindo um aumento na dureza com a adição da carga.

#### ***4.1.3.4 Análise de Absorção de Impacto***

Nas Figuras 62 e 63 têm-se os resultados de altura de rebote (Hr) obtidos pelos compósitos em ensaios com as esferas metálica e metálica revestida de borracha.

Utilizando a esfera metálica (Energia =1,25 J) realizaram-se apenas um ensaio para as composições com 1, 2, 5, e 30% de carga mineral, pois no primeiro impacto as amostras já apresentaram fraturas visíveis impossibilitando ensaios seguintes. Para as composições com 3, 10, 20 e 50% de carga o mesmo não ocorreu, sendo possível a realização de no mínimo 2 ensaios em cada.

Utilizando a esfera metálica tem-se aproximadamente o dobro de energia incidente na superfície do corpo de prova de uma esfera metálica emborrachada, outro fator determinante é o local onde a esfera toca na superfície, já que ao tocar numa região com concentrado de minerais gera-se um comportamento frágil, surgindo trincas mais espessas e em maior quantidade, desta forma verifica-se que para essas composições os corpos de prova são quebradiços a esta energia incidente. O mesmo não ocorre para a esfera metálica revestida de borracha, já que apresenta uma energia incidente de 0,59 J, onde se visualiza um comportamento dúctil nos corpos de prova após 6 ensaios, pois este revestimento amortece o impacto na superfície.

A pressão de contato de Hertz também é um fator determinante influenciando nos resultados de absorção, sendo para a esfera metálica uma maior pressão de contato exercida durante o impacto confirmando o fato das amostras se comportarem fragilmente nestes ensaios, o que não acontece com a esfera metálica revestida de borracha.

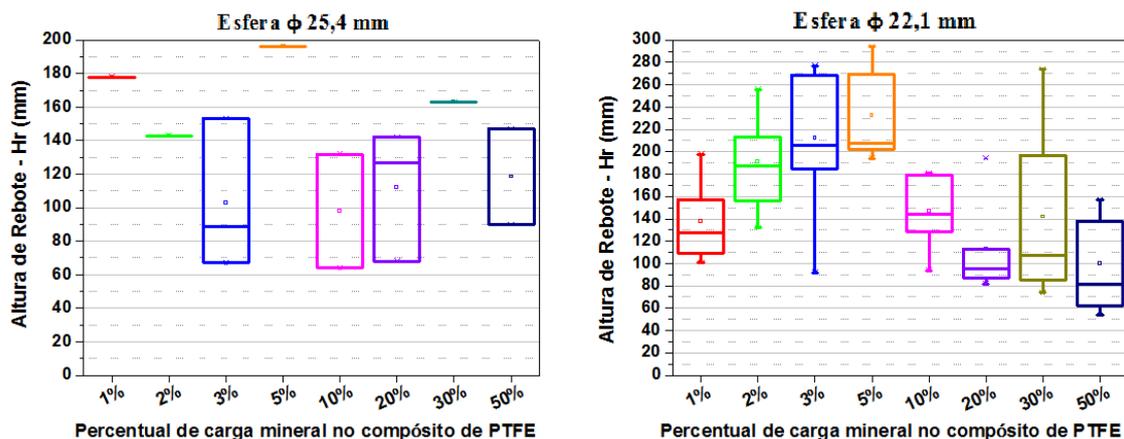
Para cada esfera encontrou-se uma faixa de pressão de contato de Hertz, partindo do contato entre a esfera e uma partícula de  $Al_2O_3$  (presente no rejeito de scheelita) até o contato entre a esfera e o plano do corpo de prova com 1% de carga mineral, sendo de  $10 \text{ MPa} < P_{\text{Máx. Hertz}} < 3 \text{ GPa}$  os limites encontrados para a esfera metálica e de  $0,1 \text{ MPa} < P_{\text{Máx. Hertz}} < 20 \text{ MPa}$  para a esfera metálica revestida de borracha.

Na Tabela 10 a seguir, têm-se imagens da superfície dos compósitos após os ensaios, podendo-se visualizar a fratura dos mesmos para ambas as esferas.

**Tabela 10.** Imagens dos corpos de prova após ensaios de absorção de impacto

	<b>Esfera Metálica <math>\phi</math> 25,4 mm</b> <b>Energia Incidente: 1,25 J</b> <b><math>10 \text{ MPa} &lt; P_{\text{Máx. Hertz}} &lt; 3 \text{ GPa}</math></b>	<b>Esfera Revestida <math>\phi</math> 22,1 mm</b> <b>Energia Incidente: 0,59 J</b> <b><math>0,1 \text{ MPa} &lt; P_{\text{Máx. Hertz}} &lt; 20 \text{ MPa}</math></b>
<b>1%</b>	 <b>Após 1 ensaio</b>	 <b>Após 6 ensaio</b>
<b>2%</b>	 <b>Após 1 ensaio</b>	 <b>Após 6 ensaio</b>
<b>10%</b>	 <b>Após 2 ensaios</b>	 <b>Após 6 ensaio</b>
<b>20%</b>	 <b>Após 3 ensaios</b>	 <b>Após 6 ensaio</b>
<b>30%</b>	 <b>Após 1 ensaio</b>	 <b>Após 6 ensaio</b>

Os resultados de altura de rebote obtidos pelos ensaios de absorção de impacto em função do percentual de carga mineral podem ser vistos na Figura 62.

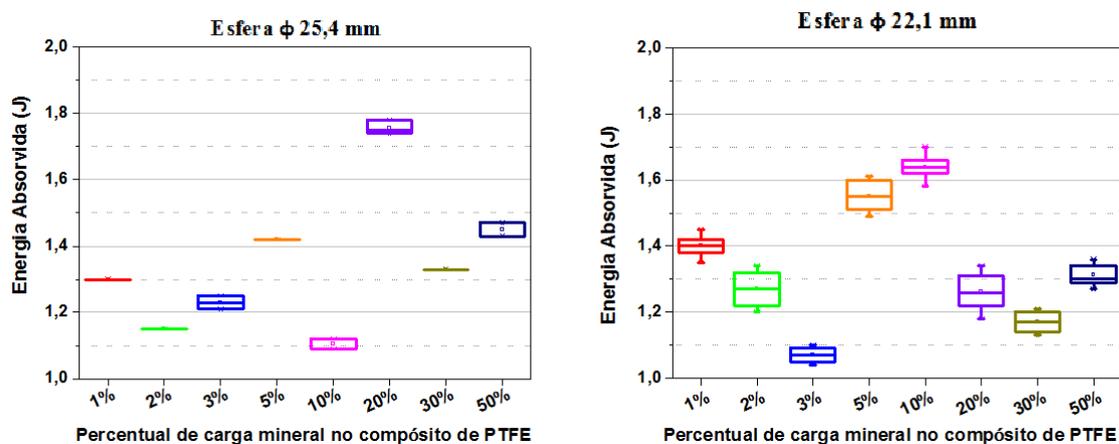


**Figura 62.** Altura de Rebote em função do percentual de carga mineral para as esferas com diâmetro de 25,4 mm e 22,1 mm

A partir dos resultados de Hr identifica-se a influência que o percentual de carga mineral exerce nos compósitos de PTFE. A composição com 5% de carga mineral foi a que apresentou o maior valor médio de altura de rebote para ambos os diâmetros de esfera, indicando ser esta composição a mais elástica dentre todas as analisadas.

Naturalmente por apresentar massa inferior a esfera com diâmetro de 22,1 mm, possibilitou realizar um mínimo de 7 ensaios em cada composição. Desta forma, verifica-se uma tendência crescente até a composição com 5% de carga e a partir da composição com 10% a tendência passa a ser decrescente, sendo a média de Hr mínima obtida para a composição com 50% de carga mineral.

Os resultados de absorção de impacto podem ser visualizados na Figura 63, a seguir.



**Figura 63.** Energia Absorvida em função do percentual de carga mineral para as esferas com diâmetro de 25,4 mm e 22,1 mm

Esperava-se que os resultados de energia absorvida (J) seriam um reflexo dos resultados das alturas de rebote, onde as composições que registraram as maiores alturas de rebote fossem aquelas com a menor energia absorvida, já que existe uma relação entre esses parâmetros, no entanto isso não ocorreu.

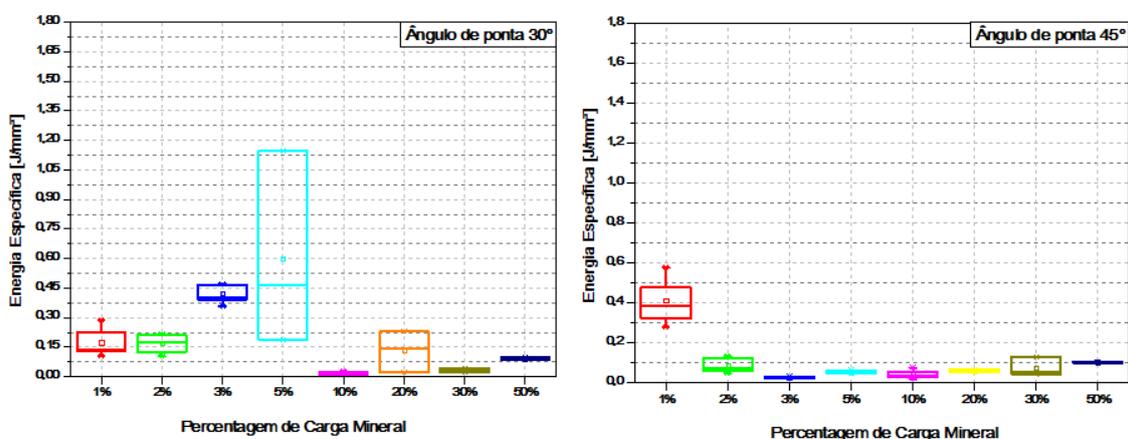
Nos ensaios com a esfera de diâmetro 25,4 mm a composição de 20% de carga mineral absorveu mais energia, enquanto que para a esfera de 22,1 mm a composição de 10% de carga absorveu mais energia, com valores médios próximos, de respectivamente 1,73 e 1,63 J. Estes resultados comprovam a influência da incorporação do Rejeito de Scheelita nos compósitos alterando a capacidade dos corpos de prova em absorver e dissipar energia durante o impacto da esfera em sua superfície.

De acordo com a carta nº 8 de Ashby (1999), esse comportamento de capacidade em absorver energia dos termoplásticos, como o PTFE, está relacionado com o coeficiente de perda que esses materiais apresentam, dissipando energia devido ao deslizamento das cadeias umas em relação às outras. Estes movimentos geram os chamados “atritos internos” ou amortecimento intrínseco que pode ser definido através do coeficiente de perda dos materiais.

## 4.2 Resultados dos ensaios tribológicos

### 4.2.1 Esclerometria

Os resultados da Energia de deformação específica podem ser analisados nas Figuras 64, 65 e 66. De acordo com os resultados observou-se que em geral não há linearidade para os compósitos ensaiados com cada ângulo de ponta indentadora.



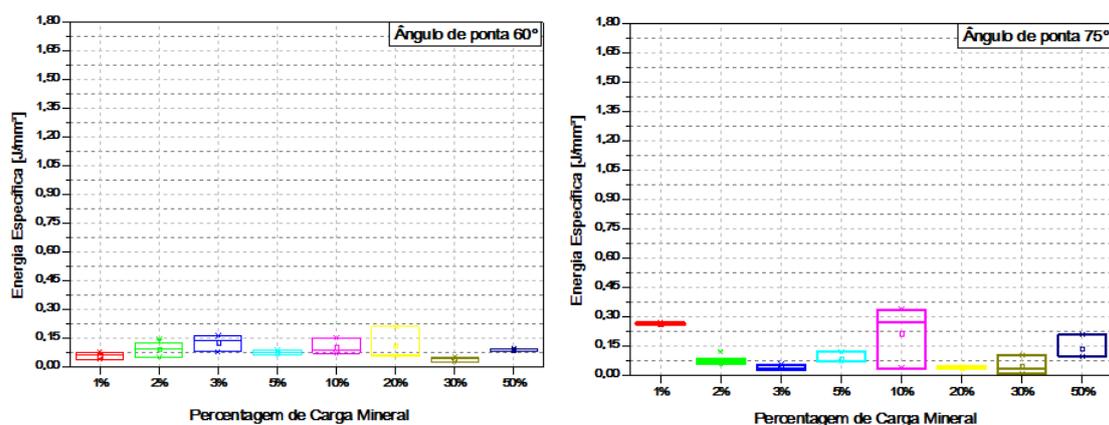
**Figura 64.** Resultados de Energia de Deformação para todos os compósitos ensaiados com ângulo de ponta indentadora de 30° e 45°

É possível identificar na Figura 64 duas áreas para o ângulo de ponta de 30°, uma com menor concentração de carga mineral e a outra com uma ordem de grandeza maior de carga. Analisando as composições com maior concentração de carga, é possível perceber que há uma diminuição da energia dissipada durante o risco, isto pode estar associado ao coeficiente de perda do PTFE que é maior, comparado ao da Alumina (presente em maior teor na carga mineral).

Para o ângulo de ponta de 45°, não ocorre o mesmo comportamento explicado anteriormente para 30°, todavia, a composição de 1%, que apresenta maior concentração de PTFE, absorveu maior energia durante o risco, devido ao seu coeficiente de perda ser maior do que para as demais composições. Para a composição de 2% de carga mineral, verifica-se uma redução de energia de deformação específica até a composição de 3%, mantendo-se uma tendência crescente a partir de 10% de carga até a composição de 50% que comparada ao ângulo anterior de 30° apresentam a mesma faixa de energia.

Para ambos os ângulos de ponta verificou-se que as composições com maior teor de carga mineral (a partir de 10%), considerando a média, mantiveram-se no mesmo nível de energia de deformação específica, não ultrapassando 0,15 J/mm<sup>3</sup>.

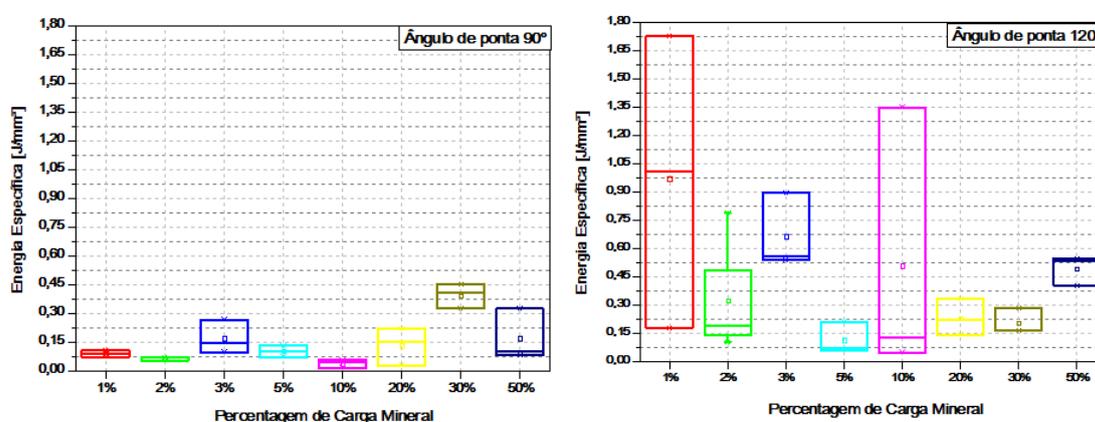
Para os ângulos de 60 e 75° o volume removido é maior por apresentar uma maior área de contato com a superfície do corpo de prova, Figura 65. Desta forma, há uma possibilidade muito maior do contato entre o indentador e a carga mineral, do que para os ângulos de ponta mais finos, o que pode explicar a não linearidade dos resultados.



**Figura 65.** Resultados de Energia de Deformação para todos os compósitos ensaiados com ângulo de ponta indentadora de 60° e 75°

No caso do ângulo de  $60^\circ$  a composição de 30% se destaca como o menor valor de energia. Assim como visto para o ângulo de  $45^\circ$  o compósito com 1% de carga mineral se destaca com os maiores valores de energia registrados no riscamento com o ângulo de  $75^\circ$ . Outra observação é que no uso dos ângulos de ponta de  $60^\circ$  e  $75^\circ$  a energia de deformação específica foi semelhante aos demais indutores.

Os maiores níveis de energia apresentados no gráfico para o ângulo de ponta de  $120^\circ$ , Figura 66, podem estar diretamente ligados a máxima área de contato entre o indutor e a superfície do corpo de prova, que dificulta o riscamento, gerando a deformação plástica por deslizamento, não havendo remoção significativa de volume.



**Figura 66.** Energia de Deformação para todos os compósitos ensaiados com ângulo de ponta indutora de  $90^\circ$  e  $120^\circ$

Excepcionalmente no ângulo de  $90^\circ$  a composição de 30% de carga mineral mais uma vez tem destaque, mas neste caso com os maiores valores de energia, quando comparada as demais composições. Para o ângulo de  $120^\circ$  o compósito com 1% de carga mineral apresenta resultado semelhante ao observado nos ângulo de  $45^\circ$  e  $75^\circ$  absorvendo maior energia durante o risco, justificado pelo seu coeficiente de perda.

De acordo com a teoria da mecânica do contato, ângulos de ponta menores são mais afiados tem uma menor área de contato entre a ponta e a superfície do corpo de prova e, portanto, apresentam maior pressão de contato durante o risco [BRISCOE & SINHA, 2003].

Para os resultados de esclerometria a não linearidade e a variação de energia de deformação específica podem ser justificados por vários fatores, como por exemplo:

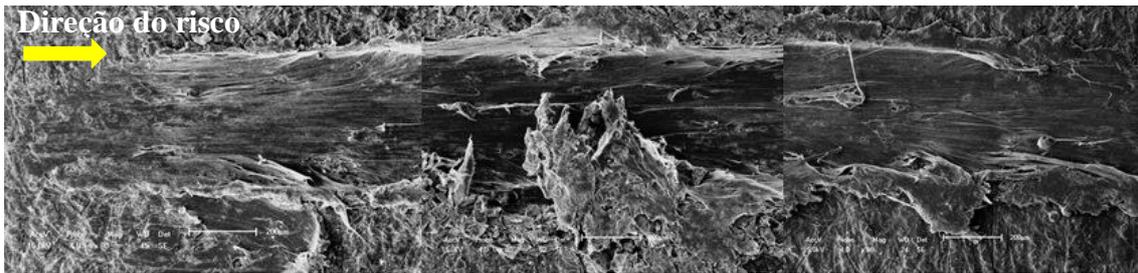
1. A forma com que as cadeias poliméricas do PTFE estão organizadas nestes compósitos, podendo facilitar ou dificultar o riscamento, caso o indentador cislhe na direção paralela ou transversal as cadeias [GREGORY *et al.*, 2014];
2. Sabendo-se que este polímero é semicristalino a cristalinidade local (fases amorfa e/ou cristalina (micro));
3. A variação da pressão de contato com o ângulo de ponta do indentador e com o percurso pendular;
4. A ocorrência de adesão local do corpo de prova na ponta indentador;
5. O atrito gerado no contato;
6. A variação do teor de carga mineral e distribuição das partículas na matriz dos compósitos.

Outros fatores que podem explicar a não linearidade estão associados ao processo de fabricação dos corpos de prova (conformação à quente e planicidade), onde a dispersão das partículas não é controlável e a vibração do pêndulo esclorométrico. Conseqüentemente, o risco gerado em cada corpo de prova não é exatamente repetitivo ao variar a composição e o ângulo de ponta do indentador.

Durante os ensaios a velocidade alcançada pelos indentadores durante o riscamento dos corpos de prova de compósitos foram medidas, suas curvas de distância percorrida e velocidade em função do tempo de riscamento são mostradas no Apêndice E.

#### 4.2.2 MEV após Esclerometria

Após os ensaios, as amostras foram analisadas por Microscopia Eletrônica de Varredura (SEM) para visualização da morfologia da superfície riscada. Na Figura 67, é possível visualizar a pista de desgaste realizada num corpo de prova riscado com ângulo de ponta de 30°, onde é possível evidenciar que durante o percurso do indentador no início e fim do risco se localiza a menor profundidade, enquanto que no meio a maior profundidade do risco, indicando a variação da pressão de contato, durante o processo de riscamento pendular.



**Figura 67.** MEV SE do corpo de prova após a passagem do ângulo de ponta de 30°, magnitude de 80x, WD 24, escala 24  $\mu\text{m}$

Determinada a metodologia de análise dos corpos de prova após a esclerometria desenvolveram-se mapas de desgaste a partir da seleção de imagens de MEV realizadas nos corpos de prova utilizados nos ensaios, com a Energia de Deformação mínima e máxima registrada durante os ensaios esclerométricos que podem ser visualizados no Apêndice A. Os mapas foram classificados de acordo com as regiões determinadas para visualizar a morfologia dos danos, são elas:

- a) Região Discretizada: Imagens com vistas frontais nas zonas de início, meio e fim do percurso do risco (ver Figura 71);
- b) Região Centro: Imagens da região interna dos riscos nas zonas de início, meio e fim do percurso do risco;
- c) Região Borda: Imagens da região localizada na borda dos riscos, material depositado após a passagem do indentador.

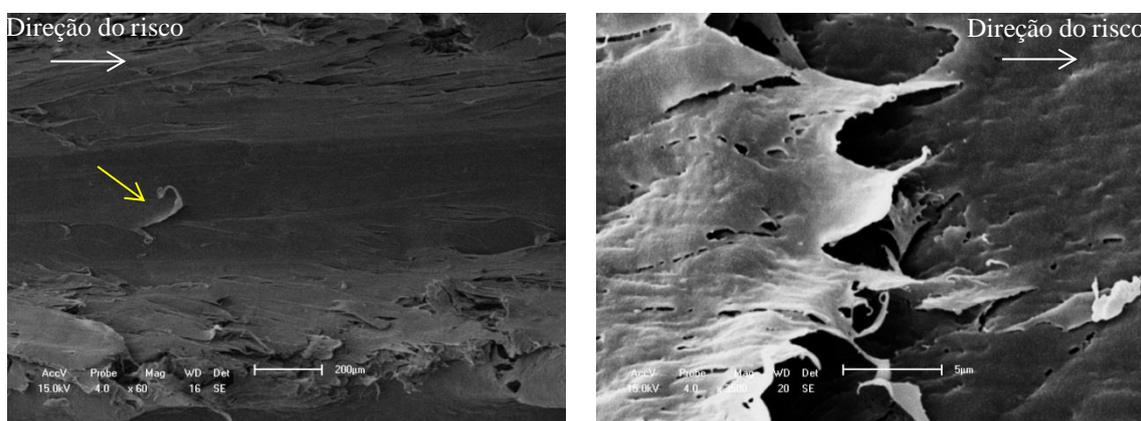


**Figura 68.** Diagrama esquemático do perfil do risco esclerométricos

Na vista da região Discretizada é possível identificar quais ângulos de ponta para cada composição consegue riscar o corpo de prova removendo e/ou depositando material na borda. Em alguns casos, como por exemplo, para o ângulo de 120°, por apresentar a ponta menos afiada, o indentador apenas amacia ao tocar na superfície gerando uma deformação mínima e sem remoção aparente de material.

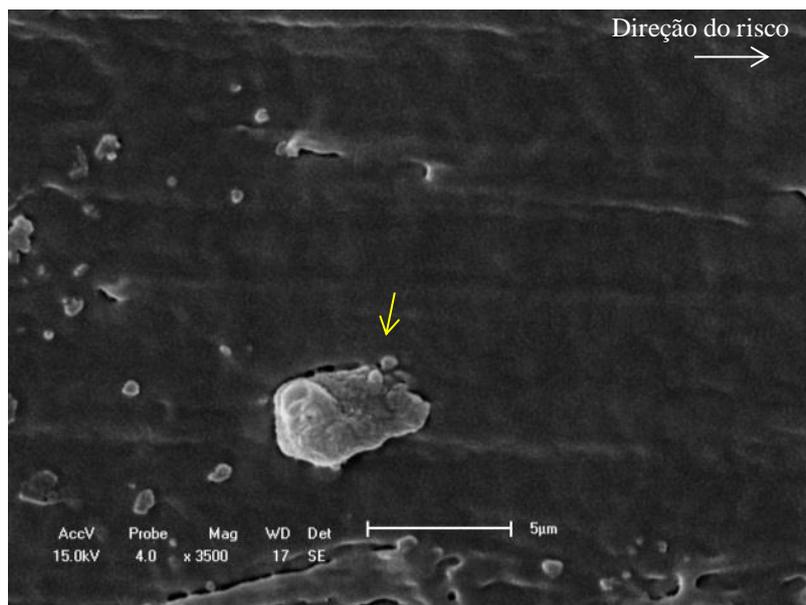
A partir destes mapas de desgaste identificaram-se quais mecanismos de desgaste foram predominantes, a influência da variação do ângulo de ponta do indentador ao riscar e a influência da carga mineral na matriz de PTFE ao ser riscado. Os principais mecanismos de desgaste evidenciados nas imagens são: delaminação, formação de debris, abrasão a dois e/ou três corpos, microsulcamento, microfissuramento, porosidade, rasgamento e *crazing* (esgarçamento).

A delaminação ocorreu para todos os ângulos de ponta e em todas as composições ensaiadas, este processo de delaminação é característico do PTFE e ocorre devido a sua estrutura molecular semicristalina com regiões cristalinas intercaladas por regiões amorfas de baixa resistência ao cisalhamento como mencionado no capítulo 2, assim como devido a abrasão a 2 corpos, já que na Figura 69, têm-se as composições com menor teor de carga mineral.



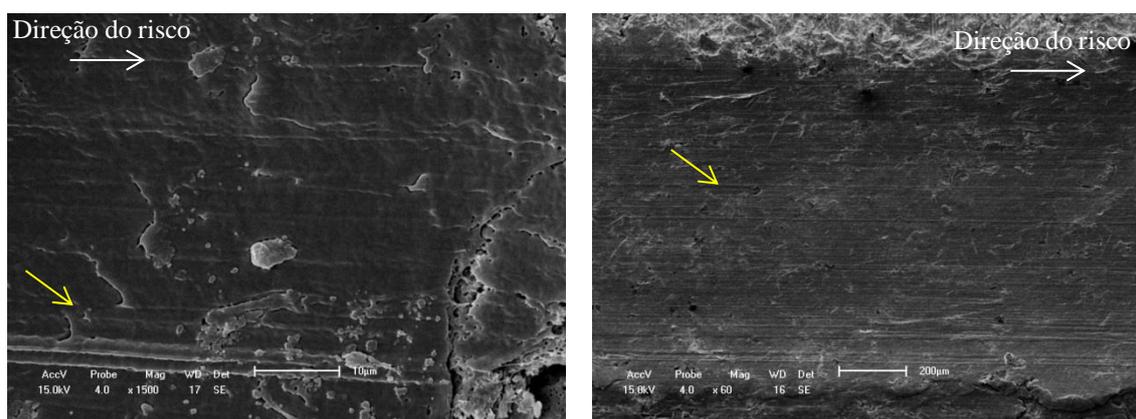
**Figura 69.** MEV da região discretizada dos compósitos com 1 e 2% de carga após riscado pelos indentadores de 45° e 75°

Debris originários do destacamento da carga mineral também foram visualizados nas imagens de MEV após os ensaios de esclerometria, principalmente para as composições com maior teor de carga mineral, como na Figura 70, para o compósito com 30% de carga, riscado pelo indentador de 30°.



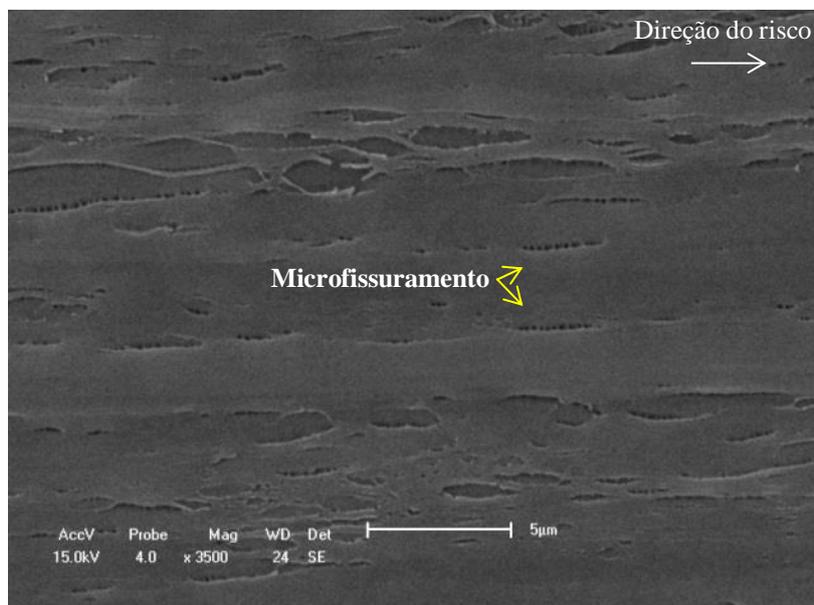
**Figura 70.** MEV da região discretizada do compósito com 30% de carga após riscado pelo indentador de 30°

Riscos abrasivos na direção do deslizamento são também evidenciados, provocados pelas asperezas do contracampo e do arraste da carga mineral como podem ser observados para os compósitos com 3% e 30% de carga após riscado pelo indentador de 45°. O PTFE é relativamente mole e foi possível evidenciar que a matriz permite-se ser riscada facilmente pelas partículas da carga mineral com a passagem do indentador, Figura 71. Tais riscos caracterizam o microsulcamento devido ao terceiro corpos.



**Figura 71.** MEV da região discretizada dos compósitos com 3% e 30% de carga após riscados pelos indentadores de 60° e 120°

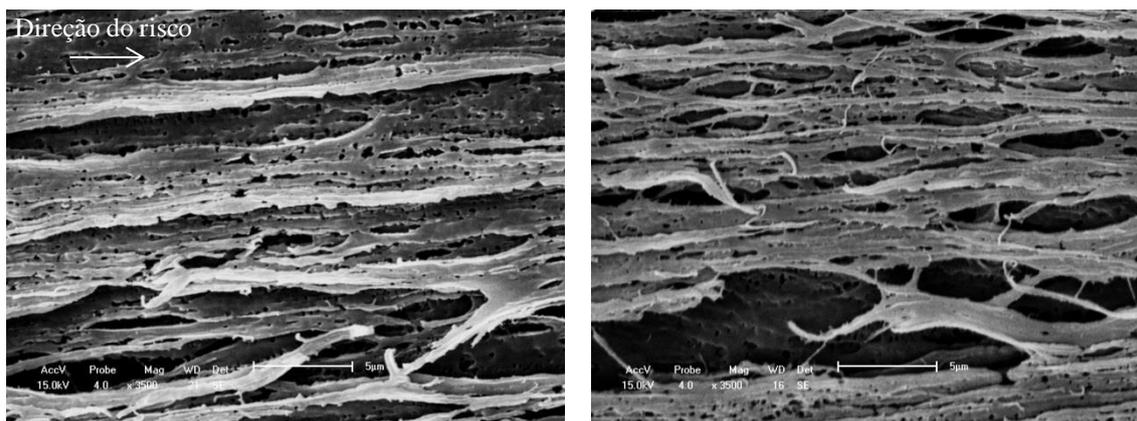
Nas Figuras 72 destaca-se a propagação de microfissuras, decorrentes provavelmente do esforço de tração promovido pela passagem do indentador, o que deve gerar os *crazes* que são as nanotrincas ou nanofendas que se formam perpendicularmente à tensão aplicada.



**Figura 72.** MEV da região discretizada do compósito com 30% de carga após riscado pelos indentador de 30°

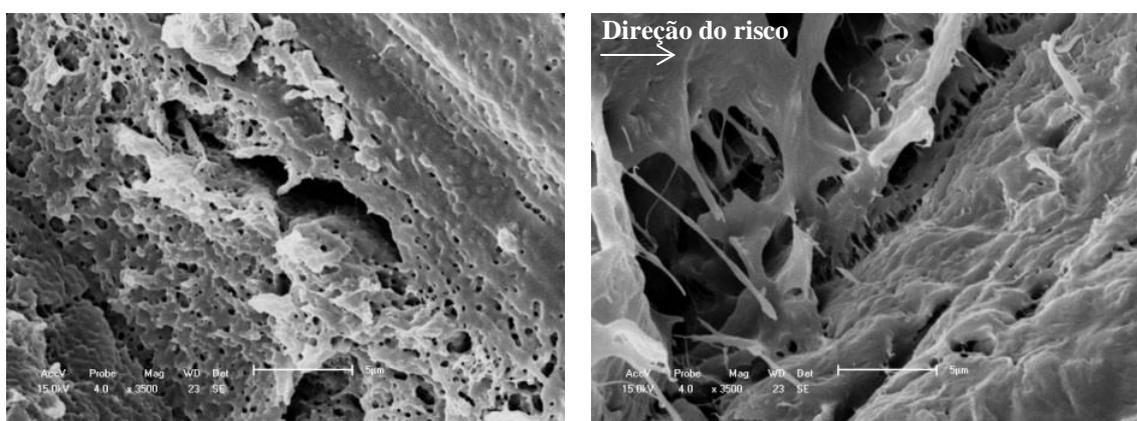
LIMA DA SILVA *et al.* (2011) sugerem que seja *crazing* o mecanismo de dano evidenciado por uma trinca de cerca de 150  $\mu\text{m}$  de comprimento por 1  $\mu\text{m}$  de abertura, com pontes fibrilares unindo as duas bordas da trinca em corpo-de-prova de PTFE solicitado por um estado de tensões de tração.

Em determinadas regiões e principalmente para os compósitos com menor teor de carga mineral as microfissuras se esgarçam até o rompimento de suas ligações como pode ser visualizado nas Figuras 73 a) e b) a seguir, para o compósito com 1% de carga riscado com indentador de 60° e para o compósito com 5% de carga riscado com indentador de 75°.



**Figura 73.** MEV da região do centro do risco dos compósitos com 1% e 5% de carga após riscado pelos indentadores de 60° e 75°

Identificou-se para o compósito com 1% de carga mineral riscado com indentador de 30° a ocorrência do fenômeno de *crazing*, provavelmente decorrente de um processo de dilatação que, de um lado, retardado por um estado de tração hidrostática e, por outro, retardado por um estado de compressão hidrostática, Figura 74.



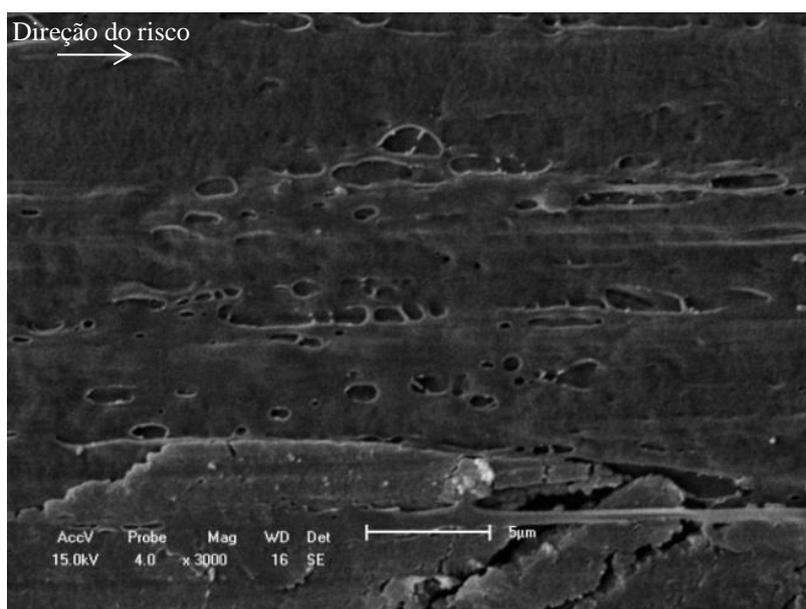
**Figura 74.** MEV evidenciando *crazing* na região do centro do risco do compósito com 1% de carga após riscado pelos indentadores de 30°

De acordo com LIMA, M. S. C. F. (2015), as deformações diferenciais entre as fases amorfas e decorrentes dos cristalitos na fase semi-cristalina podem promover expansões ou contrações que podem produzir mecanismos de dano microscópicos, como *crazing*, ou macroscópicos, como corrugações em superfícies originalmente planas.

Segundo COMBETTE e ERNOULT (2006) os *crazings* aparecem principalmente nos polímeros termoplásticos amorfos e, às vezes, nos termoplásticos semicristalinos, geralmente quando são solicitados à tração. Quando observados ao MEV, revelam uma rede de vazios e fibrilas estiradas ligando as duas faces do *crazing*.

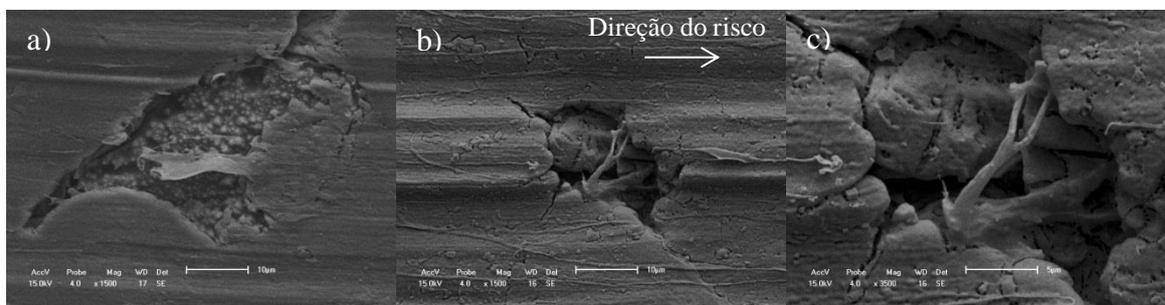
Segundo Callister Jr. (2007) e Canevarolo Jr. (2006) apud Lima da Silva *et al.* (2011), regiões de alto fluxo local favorecem a formação de microvazios interconectados por pontes fibrilares. Tensões de tração levam a elongação e ruptura destas pontes e coalescência de microvazios iniciando a formação da trinca.

A porosidade também foi evidente nas análises de MEV principalmente nas composições com maior quantidade de carga mineral, que é o caso do compósito com 50% de carga após riscado pelo indentador de 45° na região do centro do risco, como pode ser visto na Figura 75. Nestes casos com a passagem do indentador as bolhas de ar comprimidas no interior do compósito, decorrentes provavelmente da conformação a quente, explodem e deixam suas marcas pela trilha de desgaste.



**Figura 75.** MEV da região do centro do risco do compósito com 50% de carga após riscado pelo indentador de 45°

Foi possível identificar o arrancamento de uma camada da superfície do compósito com a passagem do indentador, como visualizado para a composição com 5% de carga mineral riscada pelos indentadores de 120° e 90°, Figura 76a) e b), respectivamente.

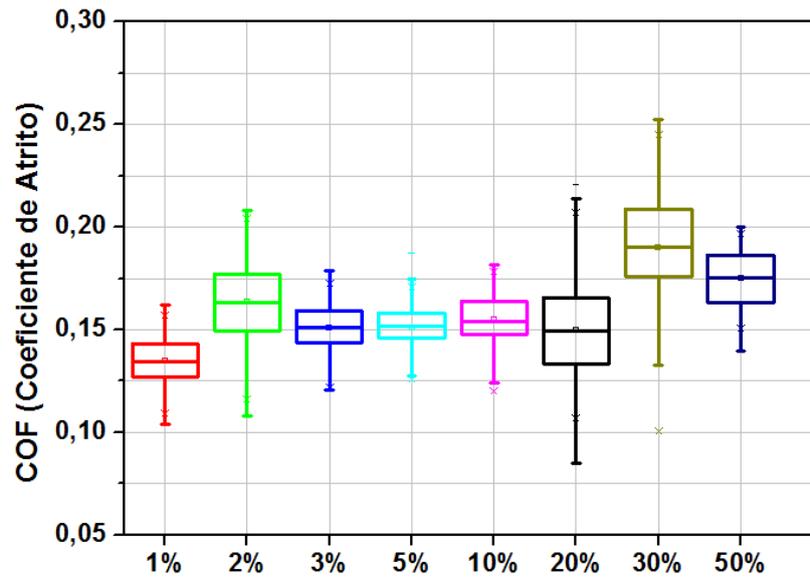


**Figura 76.** MEV da região centro do risco do compósito com 5% de carga após riscado pelos indentadores de a) 120°, b) 90° e c) 90°.

De acordo com GREGORY *et al.* 2014, especificamente, o deslizamento paralelo de filmes orientados produzem baixo atrito e desgaste, enquanto o deslizamento perpendicular leva a um maior, consistente com a reorientação molecular.

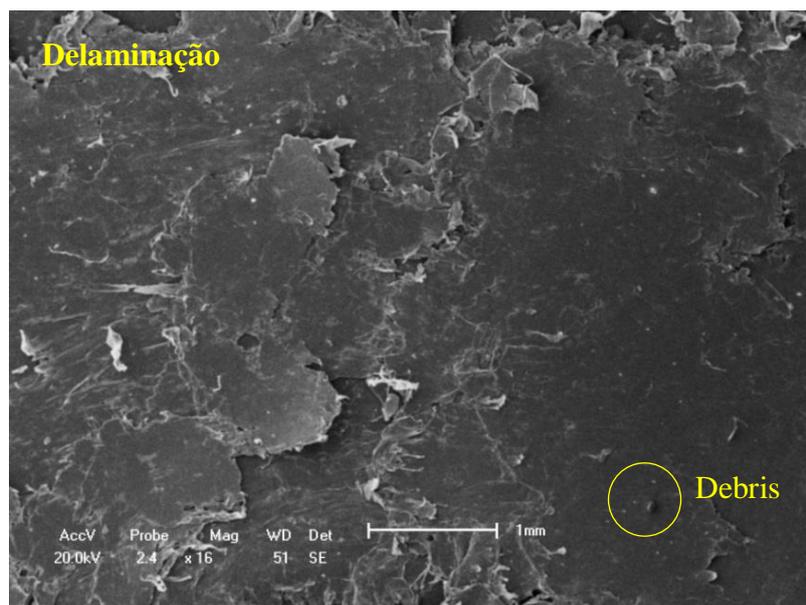
#### 4.2.3 Pino contra Disco

De acordo com os resultados mostrados na Figura 77, que representam a variação dos valores obtidos de coeficiente de atrito durante os ensaios de pino contra disco para os compósitos avaliados, é possível perceber, que, como esperado, a composição com 1% de carga mineral apresentou o menor coeficiente de atrito, por apresentar maior porcentagem de PTFE, com uma média inferior a 0,15. Com o acréscimo de carga mineral, pode ser percebido o aumento do COF já a partir de 2%, sendo os maiores valores para as composições com 30% e 50% de carga. Observa-se também que os resultados para os compósitos de 3%, 5% e 10% mantiveram-se na mesma faixa de coeficiente de atrito, demarcando uma possível transição no comportamento desses compósitos.



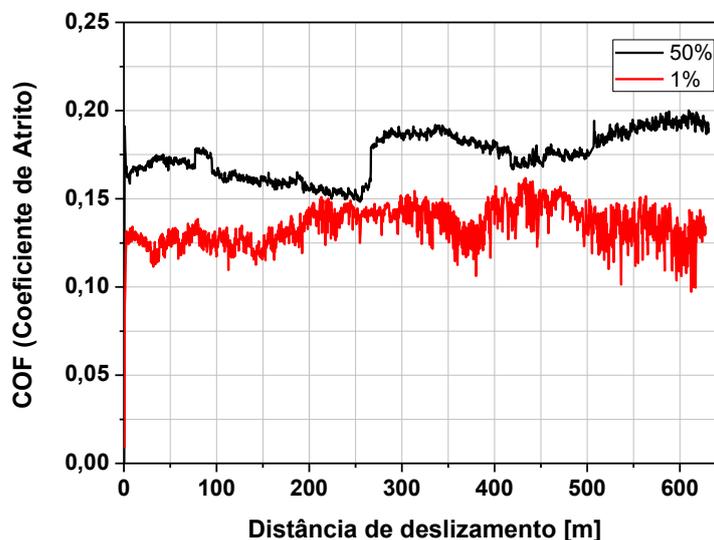
**Figura 77.** COF em função do percentual de carga mineral

O gráfico da Figura 77 permitem observar a variação nos resultados de COF no primeiro e quarto quartil de cada composição, sendo respectivamente  $0,08 < \text{COF} < 0,18$  e  $0,13 < \text{COF} < 0,25$ . Com os valores inferiores identificados no primeiro quartil de cada composição registra-se o efeito do PTFE com o desgaste por delaminação, comprovados pelas evidências da imagem de MEV na Figura 78 a seguir, do compósito com 10% de carga, enquanto que no quarto quartil registra-se a influência da carga mineral com desgaste por abrasão a 2 e/ou 3 corpos.



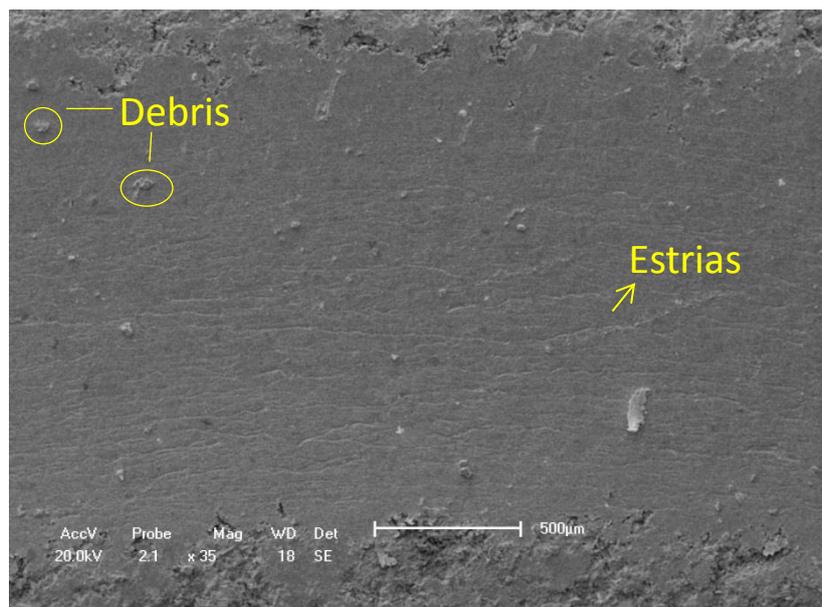
**Figura 78.** MEV da superfície da pista de desgaste do compósito com 10% de carga mineral, exibindo delaminação e debris

Para uma melhor visualização do efeito da carga mineral nos compósitos em função da distância de deslizamento, os gráficos das Figuras 79, 82, 83 e 84, a seguir, foram desenvolvidos.



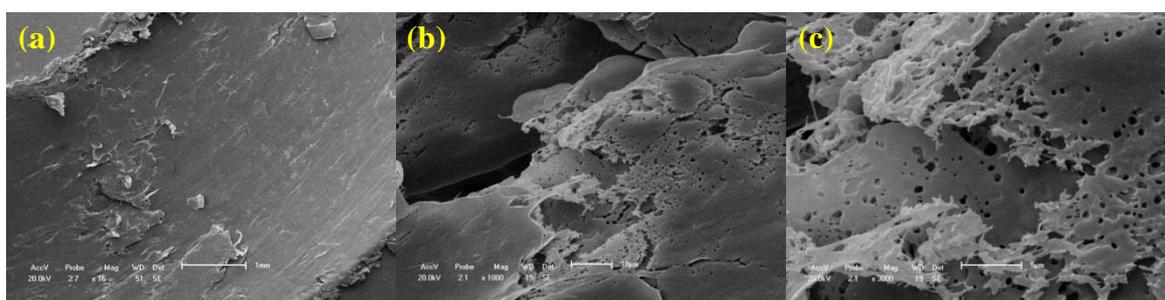
**Figura 79.** COF em função da distância de deslizamento para os compósitos com 1 e 50% de carga mineral

Como mostrado na Figura 79, durante o percurso dos ensaios é possível visualizar que as curvas são sigmóidais decorrentes do fenômeno de *stick slip*, sendo na ascendente da curva o *stick* e na descendente o *slip*. Analisando as curvas em janelas verifica-se que no início dos ensaios, têm-se uma pressão de contato máxima e uma temperatura de contato mínima que tendem a variar até o término dos ensaios, com a pressão de contato tendendo a diminuir e a temperatura a aumentar, confirmado pelo registro de temperatura no Apêndice E, para a composição de 1% de carga mineral. O compósito com 50% de carga apresenta um comportamento crescente após 400m de deslizamento, provavelmente devido à influência do terceiro corpo (debris) promovendo estrias na pista de desgaste, como pode ser visto na Figura 80, diferentemente do compósito com 1%, que para a mesma distância de deslizamento tende a diminuir pela ocorrência do desgaste por delaminação (mecanismo de lubrificação atuante), evidenciado na Figura 81, seguir.



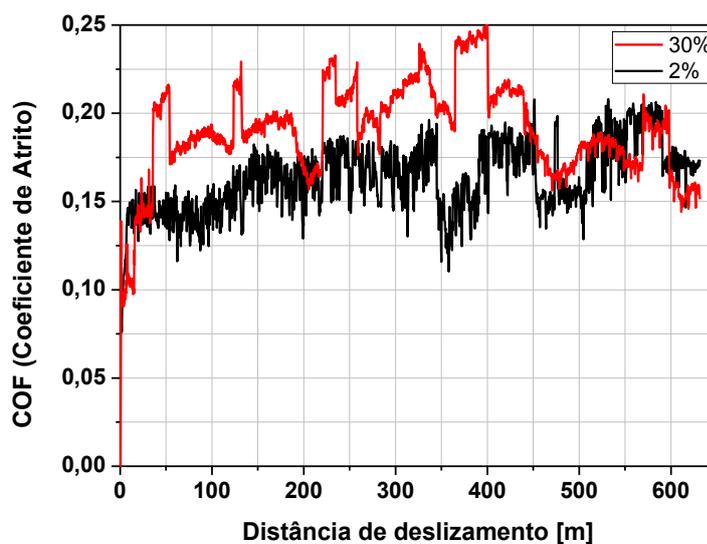
**Figura 80.** MEV da superfície da pista de desgaste do compósito com 50% de carga mineral, exibindo debris e estrias

CONTE e IGARTUA, 2012, afirmam que uma desvantagem no uso de fases duras em matriz macia é a possibilidade de remoção do filme de transferência e abrasão agressiva pela ação das partículas duras quando liberadas na interface como um terceiro corpo, devido ao afrouxamento da ligação entre o material de enchimento e a matriz: verificando-se que as partículas utilizadas como agentes de enchimento foram esfregando durante o ensaio, destacando a fraqueza entre o filme de transferência e a superfície do contracorpo.



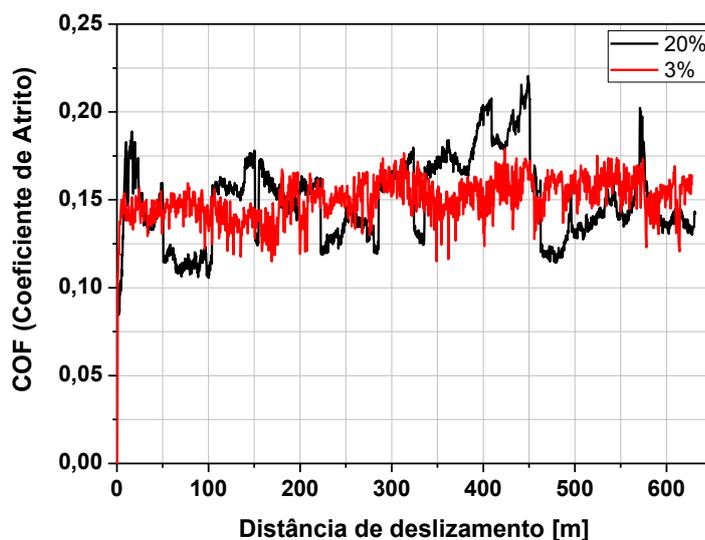
**Figura 81.** MEV da superfície da pista de desgaste do compósito com 1% de carga mineral, exibindo delaminação (a) magnitude de 16X (b) magnitude de 1000x (c) magnitude de 3000x

BECKFORD *et al.* (2014) também observaram na trilha de desgaste de 81 µm de largura uma grande quantidade de material incorporado dentro e nas extremidades da pista, mostrando a presença de ondulações indicativas de delaminação.



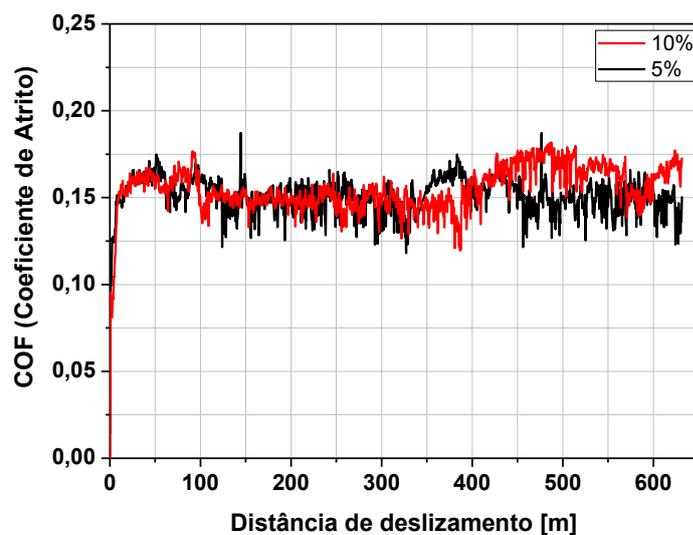
**Figura 82.** COF em função da distância de deslizamento para os compósitos com 2 e 30% de carga mineral

A Figura 82, também exibe um elevado COF para o compósito com 30% de carga mineral em comparação com o compósito de 2%, sendo o máximo valor encontrado para este conjunto de compósitos, o que não satisfaz as condições de baixo coeficiente de atrito. Durante o percurso de deslizamento para composição de 30%, verifica-se no gráfico uma acentuada variação na curva com períodos semelhantes, o que também pode ser indício do fenômeno de *stick-slip*. Esse aumento e diminuição alternado na curva para a composição de 30% ainda pode ser explicado pelo mecanismo de lubrificação atuante (delaminação), assim como a presença do terceiro corpo no contato (carga mineral). A curva de temperatura visualizada no Apêndice E também registrou janelas de aquecimento e resfriamento alternadas, exatamente nas distâncias de deslizamento visualizadas na Figura 82, como por exemplo, de 440 a 470 m onde verifica-se uma diminuição de coeficiente de atrito e temperatura.



**Figura 83.** COF em função da distância de deslizamento para os compósitos com 3 e 20% de carga mineral

A composição com 20% de carga mineral, mostrada na Figura 83, segue uma média de COF aceitável no início do ensaio, até que entre 350 e 450 m de deslizamento surgem na curva dois picos elevados que superam um COF de 0,2, sugerindo ser atuação de um terceiro corpo no contato (particulado/debri da carga mineral), confirmado pela pico máximo de temperatura nesta região, verificada no Apêndice D. Logo após 450m de deslizamento a tendência volta a seu estado inicial assim como na temperatura, surgindo novamente um pico após 550 m que não se repete até o termino do ensaio. Isto explica a dispersão visualizada no *box and plot* da Figura 77, já discutida, mas não descaracteriza o objetivo, tendo em vista que na maior parte do ensaio, ele se mantém na mesma faixa do compósito de 3% ( $\text{COF} \leq 0,15$ ).



**Figura 84.** COF em função da distância de deslizamento para os compósitos com 5 e 10% de carga mineral

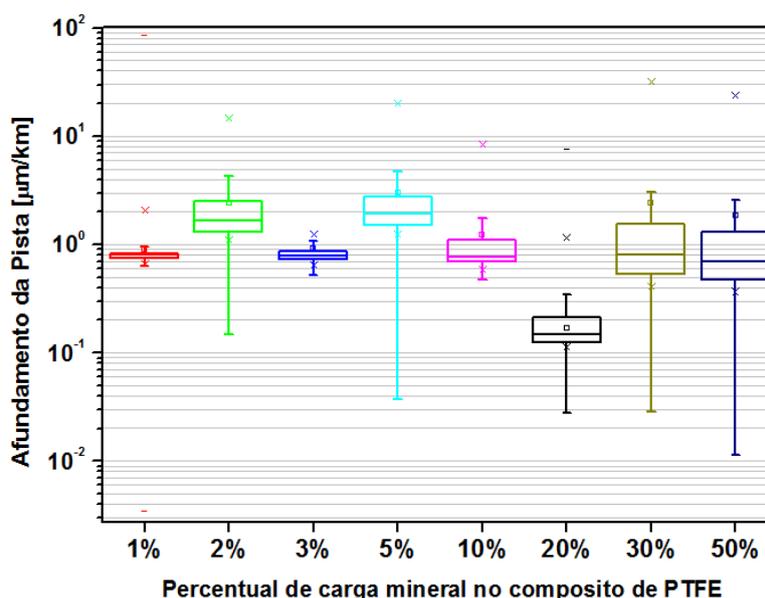
Como já observado na Figura 80 (*box-and-plot*), as composições de 5 e 10% mantiveram-se na mesma faixa de COF, o que é comprovado pelas curvas da Figura 87. Existe a possibilidade de esta ser uma região de transição na resposta destes compósitos, pois se mostram com o mesmo comportamento durante todo o ensaio, não havendo alteração significativa na influência da quantidade de carga mineral.

Estes resultados são consistentes com a literatura atual sobre PTFE, Compósitos e Nanocompósitos a base de PTFE. PATIL e AHUJA (2014) avaliaram o comportamento tribológico do PTFE submetido a carga constante (0,8 kg/0,1 Mpa) e variável (1,60-5,60kg) e deslizamento unidirecional a seco com velocidade de 0,5 m/s e também identificaram que o COF não ultrapassou o valor 0,25 para o carregamento constante.

BECKFORD *et al.* (2014), explorando o uso de filmes de PTFE e PTFE carregados com nanopartículas de Au para revestimentos de superfície com baixo atrito e desgaste, identificaram que em ensaios *reciprocating*, carga de 20g e diâmetro da esfera de 7 mm apresentaram para o filme de PTFE um COF inicial de 0,01, após 532 ciclos atinge-se um COF de 0,2 que a partir deste ponto aumenta acentuadamente até um máximo de 0,7, indicando a perda do filme de PTFE, expondo o substrato de aço inox. Enquanto que o revestimento de PTFE + Au alcançou um valor máximo de 0,11 até o término do ensaio (1000 ciclos).

Ao comparar o PTFE puro aos compósitos carregados com 25% de carbono, 60% de bronze, 15% de grafite, 25% de fibra de vidro, 20% de fibra de vidro + 5% de grafite e 15% de fibra de vidro + 3% de MoS<sub>2</sub>, ensaiados em um tribômetro com configuração cilindro-plano, carga de 50N nos primeiros 30s e 100N até o término, com duração de 30 min., CONTE e IGARTUA (2012) encontraram respectivamente os seguintes coeficientes de atrito 0.22, 0.24, 0.33, 0.33, 0.23, 0.24, 0.19.

Os resultados de afundamento da pista após os ensaios pino contra disco para todos os compósitos avaliados são mostrados no gráfico da Figura 85 a seguir.



**Figura 85.** Afundamento da pista em função do percentual de carga mineral

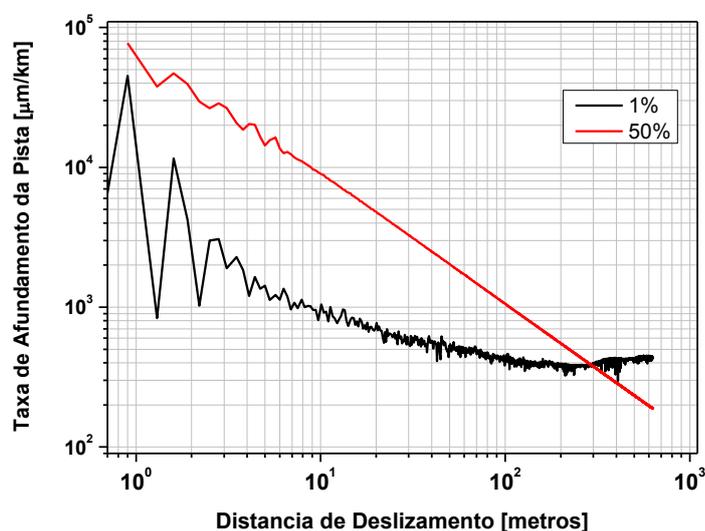
Observa-se inicialmente na Figura 85 que de todas as composições estudadas a de 20% de carga mineral é aquela com o menor afundamento de pista obtido, sendo a de 5% o maior afundamento encontrado. Pode-se também observar que a dispersão nos resultados se concentra em todos os casos no primeiro quartil do *box and plot*, decorrente possivelmente do *settling time* do sensor LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*), o que registra um regime transiente no decorrer dos ensaios.

A Tabela 11 de perda mássica confirma os resultados de afundamento da pista, tendo em vista que o corpo de prova com 20% de carga mineral é aquele que menos perdeu massa após os ensaios, enquanto que 5% apresentou a maior perda mássica.

**Tabela 11** . Perda mássica dos corpos de prova após ensaios de pino contra disco

Percentual de carga mineral	Início	Fim	Perda mássica
1%	13,8326	13,7409	0,0917
2%	14,6306	14,5397	0,0909
3%	14,0824	14,0189	0,0635
5%	14,2068	14,1075	0,0993
10%	14,86	14,8206	0,0394
20%	14,9319	14,9311	0,0008
30%	14,98	14,9789	0,0011
50%	14,779	14,7687	0,0103

As curvas características das taxas de afundamento da pista estão demonstradas nos gráficos das Figuras 86, 87, 89 e 90, a seguir.

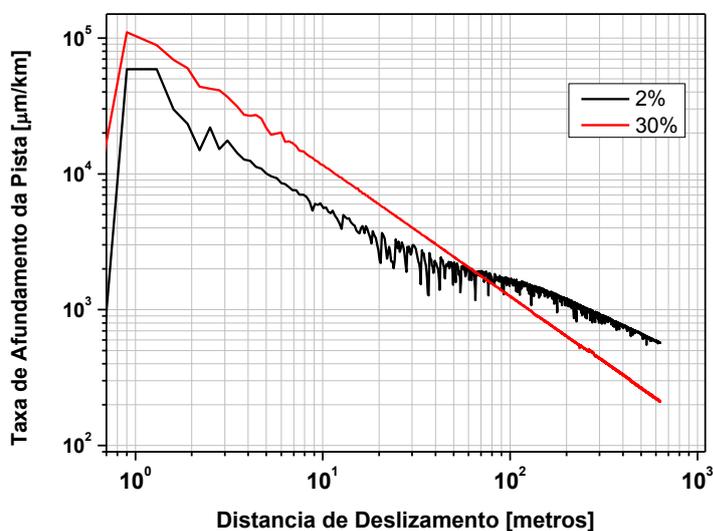


**Figura 86.** Taxa de afundamento da pista em função da distância de deslizamento para os compósitos com 1 e 50% de carga mineral

Na Figura 86, têm-se as curvas de taxa de afundamento para os compósitos com 1 e 50% de carga mineral. No início do ensaio percebe-se que a maior taxa de afundamento aconteceu para a composição com 50% de carga, devido à elevada pressão de contato decorrente da quantidade de carga mineral desta composição. Enquanto que para a composição de 1%, onde acontece a delaminação do material, a taxa de afundamento é menor. No entanto, após 300 m de deslizamento a influência do terceiro corpo deixa de atuar no contato diminuindo o afundamento para o compósito de 50% e aumentando para 1%, o que era esperado devido aos teores de carga mineral.

Tendo em vista que os compósitos com carga de 1 e 50% apresentaram mediante ensaio de tração, um módulo de elasticidade de respectivamente 0,405 GPa e 1,38 GPa, confirma-se a partir destes resultados, com o auxílio do dispositivo online Tribology ABC, disponível gratuitamente na internet, que a pressão de contato exercida para a composição de 50% (~70 Mpa) é superior a exercida pela composição de 1% (~30 Mpa).

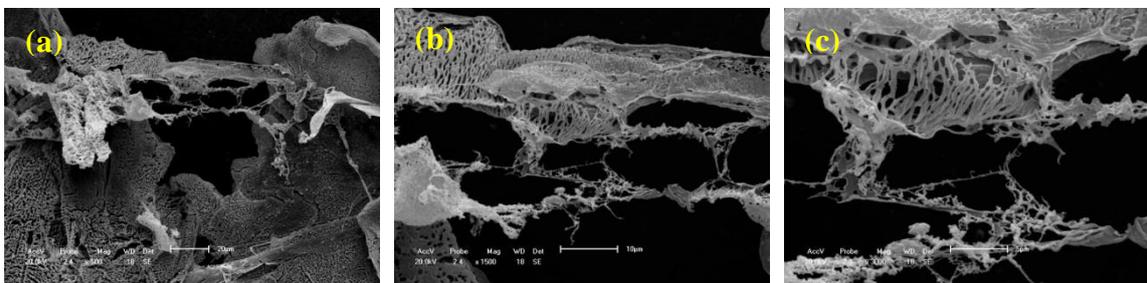
Para os compósitos com 2 e 30% de carga mineral, observa-se na Figura 87 as curvas de taxa de afundamento.



**Figura 87.** Taxa de afundamento da pista em função da distância de deslizamento para os compósitos com 2 e 30% de carga mineral

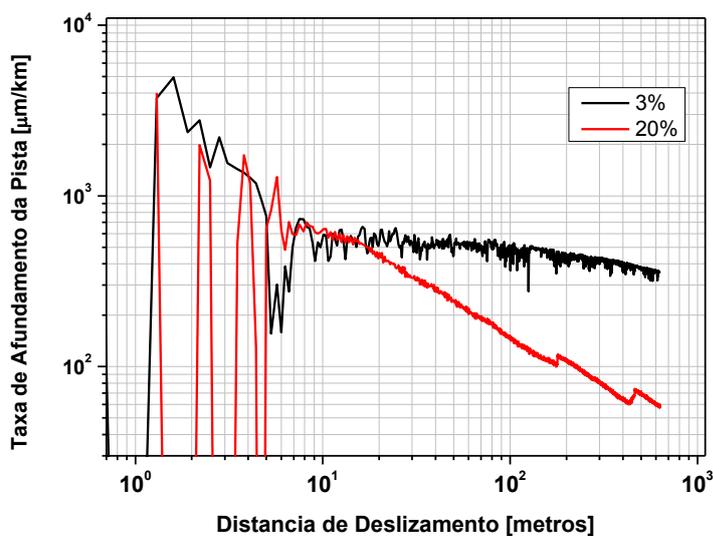
Neste caso, após 60 m de deslizamento identifica-se um ponto de interseção (*break-even point*), acontecendo à inversão de comportamento na taxa de afundamento, assim como visualizado na Figura 86 para as composições de 1 e 50%.

A delaminação também pode ser observada para a composição de 2% de carga e na Figura 88 pode-se visualizar uma lâmina delaminada deste corpo de prova, após ensaio de pino contra disco, em 3 magnitudes diferentes.



**Figura 88.** MEV de uma lâmina delaminada do corpo de prova com 2% de carga mineral. (a) magnitude de 500X (b) magnitude de 1500x (c) magnitude de 3000x

Na Figura 89 tem-se as curvas de taxa de afundamento para os compósitos com 3 e 20% de carga mineral.

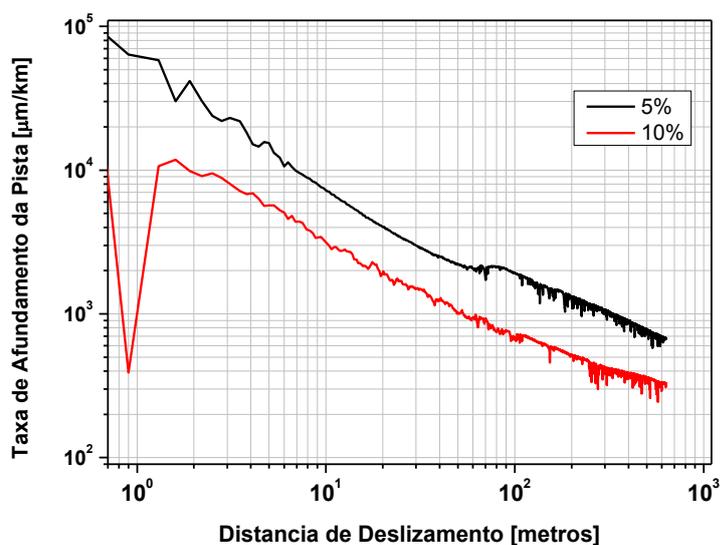


**Figura 89.** Taxa de afundamento da pista em função da distância de deslizamento para os compósitos com 3 e 20% de carga mineral

Nas curvas de taxa de afundamento dos compósitos com 3 e 20% de carga mineral, apresentados na Figura 89, também observa-se à inversão de comportamento na taxa de afundamento com a interseção entre as curvas, no entanto para estas composições aconteceu imediatamente após o *settling time* (7 - 13 m).

De acordo com Li *et al.* (2014), ao estudar o comportamento tribológico de compósitos fabricados com PTFE/Kevlar híbrido com carga nano-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> e micro-WS<sub>2</sub> afirmam que os debrís são um produto do experimento de atrito e analisá-los ajuda no entendimento de mecanismos tribológicos, pois os mesmos podem agir, por exemplo, como rolamentos, reduzindo a taxa de desgaste e/ou serem em forma de fita ou lâmina, indicando delaminação.

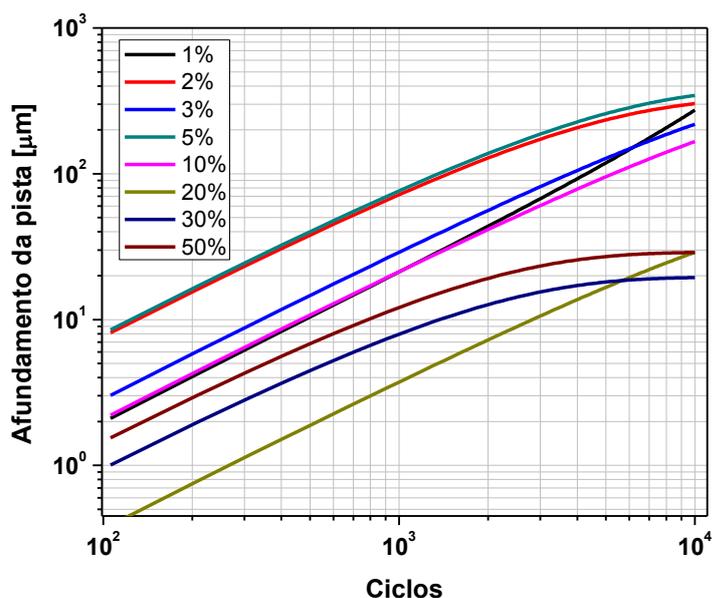
Para os compósitos com 5 e 10% de carga mineral na Figura 90 tem-se as curvas de taxa de afundamento.



**Figura 90.** Taxa de afundamento da pista em função da distância de deslizamento para os compósitos com 5 e 10% de carga mineral

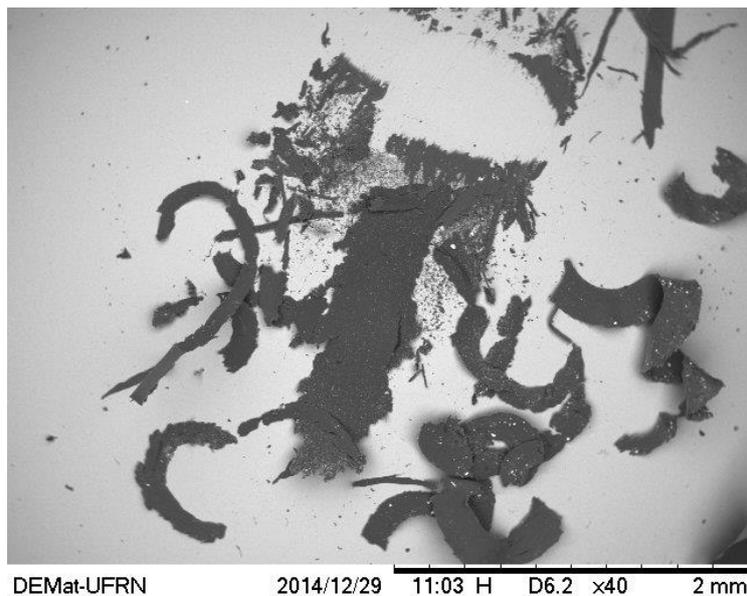
Na Figura 90, as curvas de taxa de afundamento da pista para as composições de 5 e 10% de carga mineral não apresentam o mesmo ponto de interseção evidenciado nas Figuras 86, 87 e 89 discutidas anteriormente. Isto se deve a semelhança nos resultados destas duas composições, seguindo paralelamente do início ao término dos ensaios, o que pode comprovar a caracterização de uma transição no comportamento dos compósitos submetidos a estas condições de ensaio, também evidenciada nos resultados de COF.

No gráfico da Figura 91 a seguir, têm-se a linearização dos resultados de afundamento da pista após os ensaios de pino contra disco. No entanto, estes resultados não representam as condições reais de ensaios em detalhes observados nos gráficos discutidos anteriormente.



**Figura 91.** Afundamento da pista em função do número de ciclos percorridos para os compósitos em estudo

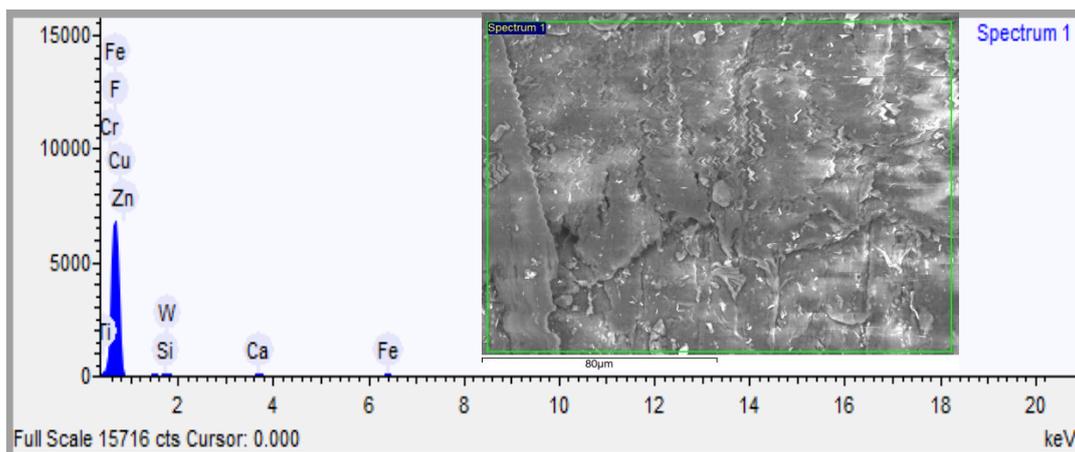
Durante os ensaios a ocorrência de aderência do corpo de prova na esfera (Pino) foi evidenciada e através de imagens de MEV pôde-se comprovar. Na Figura 92, têm-se a imagem de MEV da esfera com debris aderidos ao corpo de prova. O filme transferido do polímero sobre o contracorpo metálico é uma característica comum na tribologia polímero-metal, como citado no Capítulo 2. LIMA DA SILVA *et al.* (2006), SAWYER *et al.* (2003) e KHEDKAR *et al.* (2002) mencionaram em suas pesquisas sobre o atrito e o desgaste do PTFE contra aço, que este polímero é um exemplo clássico de formação de filme transferido.



**Figura 92.** MEV da superfície de contato da esfera com o corpo de prova após ensaio pino disco

BECKFORD *et al.* (2014), além de identificar delaminação, também afirmam que o rasgamento que ocorre nas bordas da pista de desgaste é uma indicação de desgaste adesivo (mecanismo dominante). Debris aparecem na pista de desgaste decorrentes da aderência no contracorpo, assim como sulcos profundos no interior da pista indicam que a película tenha sido removida para permitir a formação de proa e borda lateral na pista.

A microanálise em EDS realizada na principal região de aderência de filmes e debris do corpo de prova na esfera (Pino) com magnitude de 1000x pode ser vista na Figura 93, assim como a Tabela 13 dos elementos presentes nesta região, para comprovar a presença da carga mineral.



**Figura 93.** Resultado de microanálise EDS do Corpo de prova aderido a esfera (Pino)

A seguir na Tabela 12 os possíveis elementos registrados pela microanálise em EDS na região de aderência de debris do corpo de prova na esfera.

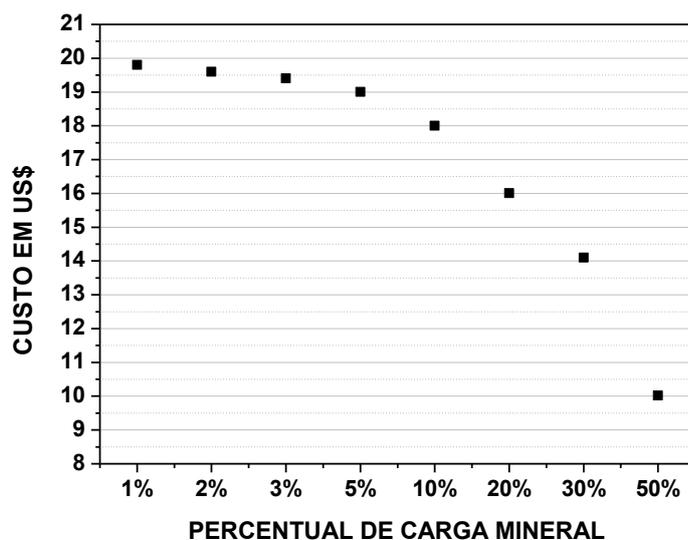
**Tabela 12.** Elementos registrados em microanálise EDS

Elementos	Peso %	Peso % $\sigma$	Atômico%
Flúor	92.373	0.838	97.163
Magnésio	0.035	0.089	0.029
Silício	0.344	0.096	0.245
Fósforo	0.113	0.077	0.073
Cálcio	0.822	0.085	0.410
Titânio	0.041	0.088	0.017
Cromo	0.040	0.107	0.015
Ferro	4.818	0.234	1.724
Cobre	0.692	0.710	0.218
Zinco	0.129	0.292	0.039
Molibdênio	0.033	0.156	0.007
Tungstênio	0.561	0.279	0.061

### 4.3 Custo dos Compósitos

Ao analisarmos a questão dos custos dos materiais utilizados nesta pesquisa para desenvolver os compósitos, verificou-se que 1 kg do PTFE puro em forma de pó custa aproximadamente US\$ 20. O rejeito de scheelita até os dias atuais não é comercializado e para verificar quanto custaria o seu kg tomou-se como base o preço de 1 tonelada do concentrado de  $WO_3$ , sendo este valor US\$ 320.000, conforme o site king island scheelite. Desta forma, chegou-se ao valor aproximado de US\$ 0,0325, considerando que existe no rejeito de scheelita uma quantidade mínima de  $WO_3$  (ppm ~ 0,1%).

Diante desses valores desenvolveu-se um gráfico, Figura 94, com o custo de cada porcentagem dos compósitos confeccionados, sugerindo o valor de cada composição para uma possível comercialização, desconsiderando os valores envolvidos no processamento, como por exemplo, a seleção da granulometria ideal, a mistura dos pós, conformação a quente, dentre outros.



**Figura 94.** Gráfico de custos dos materiais envolvidos na produção dos compósitos

## 5. Conclusão

Compósitos de PTFE com frações volumétricas de Rejeito de Scheelita submetidos a ensaios tribológicos de deslizamento circular sob aço polido a velocidades inferiores a  $\pi/10$  m/s (0,314 m/s), carga de 16 N e esclerometria pendular variando-se a pressão de contato permitiu evidenciar que a utilização do Rejeito de Scheelita na forma de carga em matriz de PTFE é uma boa alternativa, explicada pelas seguintes conclusões:

- 1) Concluiu-se que a composição de melhor desempenho tribológico é a de 20% de carga mineral devido aos resultados de coeficiente de atrito médio de  $\mu \leq 0,15$ , taxa de afundamento ( $k$  [ $\mu\text{m}/\text{km}$ ]) de  $0,1 < k < 0,2$  e perda mássica de  $8 \times 10^{-4}$  g. A energia de deformação específica média desta composição foi  $0,15 \leq E \leq 0,22 \text{ J}/\text{mm}^3$  com uma mínima variação para todos os ângulos de ponta utilizados, mantendo-se na mesma faixa. Além disso, esta composição apresenta um teor de rejeito de scheelita considerável fazendo com que o custo do compósito seja reduzido.
- 2) O teor de carga mineral influencia na rugosidade dos compósitos, promovendo o aumento nos valores de  $R_a$ ,  $R_z$  e  $R_q$  em todas as geratrizes medidas.
- 3) Os compósitos em todas as composições molhados com água destilada e salina comportaram-se como superfícies hidrofóbicas enquanto que quando molhados com os óleos parafínico e naftênico como oleofílicas.
- 4) A dureza shore D também foi influenciada pela carga mineral, apresentando uma tendência crescente com o aumento no teor de rejeito de scheelita.
- 5) Em decorrência da energia incidente e da pressão de contato fornecida pela esfera metálica ( $1,25 \text{ J} - 10 \text{ MPa} < P_{\text{Máx. Hertz}} < 3 \text{ GPa}$ ) e esfera revestida de borracha ( $0,59 \text{ J} - 0,1 \text{ MPa} < P_{\text{Máx. Hertz}} < 20 \text{ MPa}$ ) exercida no impacto durante os ensaios de absorção observou-se fratura e deformação plástica dos corpos de prova. Apesar da composição de 5% de carga mineral ter apresentado nos resultados de altura de rebote o comportamento mais elástico, a composição de 20% foi a que absorveu mais energia de impacto com a esfera metálica, média de 1,75J.

- 6) Os principais mecanismos de desgaste evidenciados na morfologia do dano a partir das imagens de MEV foram: delaminação, formação de debris, abrasão a dois e/ou três corpos, microfissuramento, porosidade, rasgamento e *crazing* (esgarçamento).

## *Sugestão para Trabalhos Futuros*

- Avaliar o par Pressão x Velocidade nos ensaios tribológicos e associá-los aos mecanismos de desgaste gerados, baseado na pressão de contato de Hertz, pois a pressão de contato gera diferentes solicitações mecânicas no corpo-de-prova, a região central do contato é comprimida gerando na borda solicitação de tração;
- Monitorar a vibração e o nível de pressão sonora do sistema nos ensaios pino contra disco;
- Realizar ensaios utilizando outros tipos de contra corpos, de acordo com as necessidades do mercado e em outras condições de ensaios;
- Avaliar as propriedades mecânicas dos compósitos;
- Avaliar a interação entre carga e matriz dos compósitos;
- Tratar quimicamente o rejeito de scheelita de acordo com a aplicação;
- Realizar ensaios de absorção de impacto e energia com as mesmas energias incidentes verificando as direções de contato na hora do impacto;
- Realizar ensaios de absorção de impacto e energia variando a porcentagem de carga mineral, a energia incidente e o material da esfera;

## ***REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS***

- AMID, P.K., SHULMAN, A.G., LICHTENSTEIN, I.L., HAKAKHA, M.: Biomaterials for abdominal wall hernia surgery and principles of their applications. Langenbeck. Arch. Chir. 379, 168–171, 1994.
- ARAÚJO, S. S.; PAIVA, G. P.; CARVALHO, L. H.; SILVA, S. M. L. Influência do tipo de argila organofílica na estabilidade térmica dos nanocompósitos a base de PP. In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 16. 2004, Porto Alegre. CBECIMAT. Porto Alegre: UFRGS-PUCRS, 2004.
- ASHBY, M. F., “Materials Selection in Mechanical Engineering”. Oxford, Elsevier, 3rd Ed. 2005, 605 p.
- ASHBY, M. F. Materials Selection in Mechanical Design. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000. 502p.
- AWAD, W. H; GILMAN, J. W; NYDEN, M.; HARRIS, R.H.; SUTTO, T. E.; CALLAHAN, J.; TRULOVE, P. C.; De Long, H. C. e Fox, D. M. Thermal degradation studies of alkil-imidazolium salts and their application in nanocomposites. Thermochemica Acta, Amsterdam, v. 409, n. 1, p. 3-11, Jan. 2004.
- BAHADUR S. & TABOR D. 1984. The wear of filled polytetrafluoroethylene. Wear 98(1–3):1–13.
- BECKFORD S., CAI J, CHEN J., ZOU M. Use of Au Nanoparticle-Filled PTFE Films to Produce Low-Friction and Low-Wear Surface Coatings. Tribol Lett (2014) 56:223–230 DOI 10.1007/s11249-014-0402-4.
- BELAK, J.; BOERCKER, D.B.; STOWERS I.F. 1993. Simulation of nanometer-scale deformation of metallic and ceramic surfaces. MRS Bull. 18(5):55–60.
- BENNEWITZ, R.; GYALOG, T.; GUGGISBERG, M.; BAMMERLIN, M.; MEYER, E.; GUNTHERODT HJ. 1999. Atomic-scale stick-slip processes on Cu (111). Phys. Rev. B 60 (16):R11301.
- BET, L. – Estudo da Medição da Textura de Superfícies com Sondas Mecânicas e com Sondas ópticas Tipo Seguidor. 1999. 243p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina.
- BHUSHAN, B., 2001. *Modern Engineering Handbook*. Volumes I & II. Florida: CRC Press. Date, S.W., Malkin, S., 1976. Effects of grit size on abrasion with coated abrasives, *Wear*, 40, p.p.223–235.

- BISWAS, S. K. & KALYANI, V., 1992, "Friction and wear of PTFE - a review", *Wear*, 158, 193-211, India.
- BLANCHET, T. & KENNEDY, F. 1992. Sliding wear mechanism of polytetrafluoroethylene (PTFE) and PTFE composites. *Wear* 153(1):229–43.
- BLAU, P. J., *Friction Science and Technology*, Marcell Dekker Inc (1996) p.251
- BRISCOE, B. J. and SINHA, S. K.. *Mat.-wiss. u. Werkstofftech.* 2003, 34, No. 10/11 DOI: 10.1002/mawe.200300687.
- BRISCOE, B. J. The tribology of composite materials: a preface. In: Friedrich K, editor. *Advances in composite tribology*. Pipes RB, editors. Composite materials series, vol. 8. Amsterdam, The Netherla: Elsevier; 1993. p. 3–15.
- BRISCOE, B.J., EVANS, P.D., POLILLO, E., AND SINHA, S.K., "Scratching Maps for Polymers," *Wear*, Vol. 200, 1998.
- BRISCOE, B.J., STEWARD, M.D.: Effect of carbon aspect ratio on the friction and wear of PTFE. *Wear* 42, 99–107 (1977).
- BROWN E. C; RAR P. J; ORLER E. B; GRAY III G. T; DATTELBAUM D. M. The effect of crystallinity on the fracture of polytetrafluoroethylene (PTFE). *Materials Science and Engineering*, 2006, p. 1338 – 1343.
- BRUKMAN, M. J., GAO, G. T., NEMANICH, R. J., HARRISON, J. A. 2008. Temperature dependence of single-asperity diamond-diamond friction elucidated using AFM and MD simulations. *J. Phys. Chem. C* 112(25):9358–69.
- BULDUM, A., CIRACI, S. 1997. Atomic-scale study of dry sliding friction. *Phys. Rev. B* 55(4):2606–11.
- BUTTERY, T. C.; ARCHARD, J. F. Grinding and Abrasive Wear, *Proc. Inst. Eng.*, V. 185, p. 537 – 51, 1970/71.
- BRYDSON, J. A.. *Plastics Materials*. 7. ed Oxford: Butterworth-Heinemann, 1999. 920p.
- CALLISTER JR., W. D..*Materials Science and Engineering: An Introduction*. 7th ed.. USA: John Wiley & Sons, 2007. 975 p.. *Materials Science and Engineering: An Introduction*. 5th ed.. New York: John Wiley & Sons, 2000.
- CANEVAROLO JR, S. V. *Ciência dos Polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros*. 1. ed. São Paulo. ArtLiber Editora, 2002.
- CANEVAROLO JR, S. V..*Ciência dos polímeros*. 2. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2006. 275p. *Técnicas de Caracterização de Polímeros*. Editora Artliber-ABPol, 2004. 448 p..

- CASSU, S. N., FELISBERTI, M. I. – Dynamic mechanical behavior and relaxations in polymers and polymeric blends, *Química Nova* Print version ISSN 0100-4042, vol.28 no.2 São Paulo Mar./Apr. 2005.
- CHAUDHURI, RAJIB GHOSH and PARIJA SANTANU. “The Wettability of PTFE and Glass Surfaces by Nanofluids.” *J. Colloid and Interface Sci*, 434, 141-151, 2014.
- CHEN, Y., LIN, H., LEE, Y.: The effects of filler content and size on the properties of PTFE/SiO<sub>2</sub> composites. *J. Polym. Res.* 10, 247–258 (2003).
- CIMINELLI, R. R. Critério para a formulação de cargas e reforços minerais em termoplásticos. In: Congresso Brasileiro do Plástico Reforçado, 5, 1988, São Paulo. Anais. São Paulo: Associação Brasileira de Plástico Reforçado, 1988. p. 71-73.
- COLLIN, A.B. AND FAKE, D.E., “In Situ Studies of Wear Process”, *ASME J. Tribology*, 120, 3, pp. 513-519, 1995.
- CONTE, M., IGARTUA, A.. Study of PTFE composites tribological behavior, *Wear* 296 (2012) 568–574.
- COMBETTE, P.; ERNOULT, I. Phénomène de craquelure (crazing). In :*Physique des Polymères. II. Propriétés.* Paris; Hermann Éditeurs, 2006. p. 352-3.
- CUNHA, L. R. P. Comparação interlaboratorial dos resultados de ensaios de desgaste abrasivo em polímeros, segundo a norma iso 4649. Dissertação apresentada à Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil 2013.
- DIAZ, F. R. V. Obtenção de argilas organofílicas partindo-se de argilas esmectíticas e do sal quaternário de amônio. ARQUAD 2HT “ In: Anais do 43º Congresso Brasileiro de Cerâmica, p. 43201, Florianópolis – SC (1999).
- DIENWIEBEL, M., VERHOEVEN, G. S., PRADEEP, N., FRENKEN, J. W. M., HEIMBERG, J. A., ZANDBERGEN, H. W.. 2004. Superlubricity of graphite. *Phys. Rev. Lett.* 92(12):126101.
- DIENWIEBEL, M., PRADEEP, N., VERHOEVEN, G.S., ZANDBERGEN, H.W., FRENKEN JWM. 2005. Model experiments of superlubricity of graphite. *Surf. Sci.* 576(1–3):197–211.
- DOWSON, D. *History of Tribology*, Professional Engineering Publishing, 759 p., 1997.
- DUTTA MADHURI – Modified epoxy coatings on mild steel: A study of tribology and surface energy. Master of Science, University of North Texas. August 2009.
- EBNESAJJAD, S. *Introduction to Fluoropolymers.* Applied Plastics Engineering Handbook. Oxford, Elsevier, 2011. p. 49-60.

- FANG, T. H., WENG, C. I. 2000. Three-dimensional molecular dynamics analysis of processing using a pin tool on the atomic scale. *Nanotechnology* 11:148–53
- FERNANDES, B. R. B. Aproveitamento dos finos de scheelita utilizando Concentração Centrífuga e lixiviação ácida. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Mineral - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, 2011.
- FERREIRA, M. S. C.; SOUZA, J. R.; REINALDO, J. S.; LIMA, W. B.; MEDEIROS, J. T. N. Avaliação da dureza de um compósito polimérico submetido a diferentes níveis de energia térmica. In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2012, Joinville. 20° CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2012.
- FRENKEL, J., KONTOROVA, T.. On the theory of plastic deformation and twinning. *J. Phys. USSR* 1:137– 49, 1939.
- FRIEDRICH, K. Wear performance of high temperature polymers and their composites. In: Luise RR, editor. *Application of high temperature polymers*. Boca Raton, USA: CRC Press; 1997. p. 221–46.
- FRIEDRICH, K., ZHANG, Z., ALOIS K. SCHLARB. Effects of various fillers on the sliding wear of polymer composites, *Composites Science and Technology* 65 (2005) 2329–2343.
- FRENKEN J.W.M.. Model experiments of superlubricity of graphite. *Surf. Sci.* 576(1–3):197–211, 2005.
- GNECCO, E., BENNEWITZ, R., GYALOG, T., LOPPACHER, C., BAMMERLIN, M., et al. 2000. Velocity dependence of atomic friction. *Phys. Rev. Lett.* 84(6):1172–75 13.
- GOYAL R.K., YADAV M., “Study on wear and friction behaviour of graphite flake-filled PTFE composites”, *Journal of Applied Polymer Science*, Early View, May 2012.
- GREEN BELTING INDUSTRIES. A PTFE Group Company. Disponível em: <http://greenbelting.com/industry-solutions-old/aviation.html>. Acesso em 07 de setembro de 2013.
- GREGORY, S. W.; NICOLAS, ARGIBAY N.; BURRIS, L. D; Krick, B. A. Mechanistic Studies in Friction and Wear of Bulk Materials: *Annu. Rev. Mater. Res.* 2014. 44:395–427.
- GRIERSON, D. S.; FLATER, E. E.; CARPIK, R. W. Accounting for the JKR-DMT transition in adhesion and friction measurements with atomic force microscopy. *J. Adhesion Sci. Technol*, v. 19, n. 3-5, p. 291-311, 2005.

- HAÛGER AM, DAVIES M. Short-fibre reinforced, high temperature resistant polymers for a wide field of tribological applications. In: Friedrich K, editor. Advances in composite tribology. Pipes RB, editors. Composite materials series, vol. 8 Amsterdam, The Netherlands: Elsevier; 1993. p. 107–57.
- HARRISON JA, STUART SJ, BRENNER DW. 1999. Atomic-scale simulations of tribological and related phenomena. In Handbook of Micro/Nanotribology, ed. B Bhushan, pp. 525–94. Boca Raton, FL: CRC.
- HE MY, BLUM AS, OVERNEY G, OVERNEY RM. 2002. Effect of interfacial liquid structuring on the coherence length in nanolubrication. Phys. Rev. Lett. 88(15):154302.
- HIRANO, M., SHINJO, K., KANEKO, R., MURATA, Y. 1997. Observation of superlubricity by scanning tunneling microscopy. Phys. Rev. Lett. 78(8):1448–51.  
<http://www.kingislandscheelite.com.au/dolphin-project>. Acesso em 08 de maio de 2015.
- HUÛBNER, W., GRADT, T., SCHNEIDER, T., BORNER, H. Tribological behaviour of materials at cryogenic temperatures. Wear 1998; 216:150–9.
- HUTCHINGS, I. M. **Tribology** - Friction and Wear of Engineering Materials. 1. ed. Cambridge: Edward Arnold, 1992.
- ISONO Y, TANAKA T. 1997. Three-dimensional molecular dynamics simulation of atomic scale precision processing using a pin tool. JSME Int. J. A 40(3):211–18
- ISONO, Y., TANAKA, T. 1999. Molecular dynamics simulations of atomic scale indentation and cutting process with atomic force microscopy. JSME Int. J. A 42(2):158–66
- JANG, I., BURRIS, D. L., DICKRELL, P. L., BARRY P. R., SANTOS C., *et al.* 2007. Sliding orientation effects on the tribological properties of polytetrafluoroethylene. J. Appl. Phys. 102:123509
- JOYCE, J.A., JOYCE, P.J.: The fracture toughness of polytetrafluoroethylene. ECF15 Stockolm (2004).
- KELCHNER, C. L., PLIMPTON, S. J., HAMILTON, J. C. 1998. Dislocation nucleation and defect structure during surface indentation. Phys. Rev. B 58(17):11085–88
- KHEDKAR, J.; NEGULESCU, I.; MELETIS, E. I. “Sliding wear behavior of PTFE composites”, Wear, Vol. 252, pp. 361–369, 2002.
- KOMANDURI, R., CHANDRASEKARAN N., RAFF L. M.. 2000. MD simulation of indentation and scratching of single crystal aluminum. Wear 240(1–2):113–43

- KOMVOPOULOS K, YAN W. 1997. Molecular dynamics simulation of single and repeated indentation. *J. Appl. Phys.* 82(10):4823–30
- KOO, G. P., in fluoropolymers (Wall. L. A., Ed.), Wiley-Interscience, New York, p. 508 (1972).
- LANCASTER, J. K. Composites for aerospace dry bearing application. In: Friedrich K, editor. Friction and wear of polymer composites. Pipes RB, editor. Composite materials series; vol. 1. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier; 1986. p. 363–96.
- LANCASTER, J.K.: The effect of carbon fiber reinforcement on the friction and wear of polymers. *Brit. J. Appl. Phys.* 1, 549 (1968)
- LANDMAN, U., LUEDTKE, W. D., BURNHAM, N. A., COLTON, R. J. 1990. Atomistic mechanisms and dynamics of adhesion, nanoindentation, and fracture. *Science* 248(4954):454–61
- LANDMAN, U., LUEDTKE, W. D., GAO, J. P. 1996. Atomic-scale issues in tribology: interfacial junctions and nano-elastohydrodynamics. *Langmuir* 12(19):4514–28
- LANDMAN, U., LUEDTKE, W. D., RINGER, E. M. 1992. Atomistic mechanisms of adhesive contact formation and interfacial processes. *Wear* 153(1):3–30
- LEE, J. Y., LIM, D. P., LIM, D. S.: Tribological behavior of PTFE nanocomposite films reinforced with carbon nanoparticles. *Compos. Part B* 38, 810–816 (2007)
- LEWIN, M.; MEY-MAROM, A.; FRANK, R. Surface free energies of polymeric materials, additives and minerals. *Polymers for Advanced Technologies*, New York, v. 16, n. 6, p. 429-441, 2005.
- LI, H., YIN, Z. W., JIANG, D., HUO, Y., CUI, Y.. Tribological behaviour of hybrid PTFE/Kevlar fabric composites with nano- Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> and submicron- WS<sub>2</sub> fillers. *Tribology International*, 80 (2014) 172 – 178.
- LI, F.; HU, K.; LI, J. “Zhao The friction and wear characteristics of nanometer ZnO filled Polytetrafluoroethylene”, *Wear*, Vol. 249, pp. 877–882, 2002.
- LIMA DA SILVA, R. C., FERREIRA, M. S. C., MEDEIROS, J. T. N.. Response of Peek to External Stimuli. In: 21st Brazilian Congress of Mechanical Engineering, 2011, Natal. *Anais Proceedings of COBEM 2011 (CD-Rom)*. Natal/RN, Brazil, October 24-28, 2011.
- LIMA DA SILVA, R.C. Desgaste de polímeros estruturados de engenharia em contato de deslizamento com cilindro metálico. Tese de doutorado apresentada à Universidade Federal do Rio Grande do Norte, RN, Brasil, 2010.

- LIMA DA SILVA, R.C. Mecanismos de desgaste de poliuretano em ensaios de microabrasão. Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica apresentada à Universidade Federal do Rio Grande do Norte, RN, Brasil, 2006.
- LIMA, ANTONIO BASTOS TORRES. Aplicações de Cargas Minerais em Polímeros. Dissertação (Mestrado) apresentada a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Minas e de Petróleo, 2007.
- LIMA, M. S. C. F., *Crazing e Esqueletização em Compósitos Poliméricos*. TRIBLook, Cap. B5, GET-UFRN, Edu UFRN, ISBN: 978-85-425-0404-0, 2015, Natal, RN.
- LIN, Z. C., HUANG, J.C.. 2004. A nano-orthogonal cutting model based on a modified molecular dynamics technique. *Nanotechnology* 15:510–19
- LU, C.H., SU, Y.C., WANG, C.F., HUANG, C.F., SHEEN, Y.C., CHANG, F.C.. Thermal Properties and surface energy characteristics of interpenetrating polyacrylate and polybenzoxazine networks. *Polymer* 2008; 49: 4852–4860.
- MALUCELLI, G. & MARINO, F.. Abrasion Resistance of Polymer Nanocomposites - A Review, *Abrasion Resistance of Materials*, Dr Marcin Adamiak (Ed.), ISBN: 978-953-51-0300-4, InTech, Available from:<http://www.intechopen.com/books/abrasion-resistance-of-materials/abrasion-resistance-of-polymer-nanocomposites>, (2012).
- MAHAJAN, S. K., CHIKATE, P. P. AND BASU, S. K., “Tribo-characteristics and parametric optimization for Copper filled teflon”, *Proceedings of the 8th International Conference on Tribology, Nordtrib’98*, 1998, 201–208.
- MARACINI, R. F.; MACHADO, A. R.; FRANCO, S. D. Efeito da Temperatura sobre Energia Específica de Riscamento do Alumínio Comercialmente Puro. II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2002.
- MARCHI, J. A. Modeling of Dynamic Friction, Impact Backlash and Elastic Compliance Nonlinearities in Machine Tools, with Applications to Asymmetric Viscous and Kinetic Friction Identification. Tese de doutorado submetida à Faculdade de Graduação do Instituto Politécnico de Rensselaer, Troy, New York, Dezembro 1998.
- MATE, C. M., MCCLELLAND, G. M., ERLANDSSON, R., CHIANG, S.. 1987. Atomic-scale friction of a tungsten tip on a graphite surface. *Phys. Rev. Lett.* 59(17):1942–45.
- MC ELWAIN, S.E., BLANCHET, T.A., SCHADLER, L.S., SAWYER, W.G.: Effect of particle size on the wear resistance of alumina-filled PTFE micro- and nanocomposites. *Tribol. Trans.* 51, 247–253 (2008).

MEDEIROS, J. T. N. Fadiga de contato de discos metálicos não-conformes submetidos a ensaios a seco de rolamento cíclico. Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, SP, Brasil 2002.

MEDEIROS, J. T. N. Fundamentos da Tribologia: Uma visão Apolíneo-Dionisíaca. TRIBLooK, cap. C2, GET-UFRN, Edu UFRN, ISBN: 978-85-425-0405-7, 2015.

MOHAMMAD ASADUZZAMAN CHOWDHURY AND MD. MASKUD HELALI, “The Effect of Frequency of Vibration and Humidity on the Coefficient of Friction”, *Tribology International*, 2006, Volume 39, 958-962;

MOHAMMAD ASADUZZAMAN CHOWDHURY AND MD. MASKUD HELALI, “The Effect of Amplitude of Vibration on the Coefficient of Friction for Different Materials”, *Tribology International*, 2008, Volume 41, 307-314

MEDEIROS, J. T. N. análise comparativa da absorção de impacto. em materiais poliméricos. In: 18º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2008, Porto de Galinhas-PE. 18º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2008.

NASCIMENTO, ISAAC VINÍCIUS do et al. sphere-plan contact of metal-polymer: hertz model x experiment. in: international congress of mechanical engineering, 20., 2009, Gramado. COBEM. Gramado: Cobem, 2009. p. 51 - 60.

NEALE, M. J. *The Tribology Handbook*. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002.

NELSON MARTINEZ, B. S. – Wettability of Silicon, Silicon Dioxide, and Organosilicate Glass, Master of Science, University of North Texas, 2009.

OLIVEIRA, R. F.; ARAUJO NETO, A. P.; SOUZA, J. R.; MEDEIROS, J. T. N.. Avaliação da Absorção de Energia em Compósitos Poliméricos com Matriz de PTFE. In: CONEM 2014, Uberlândia - MG. VIII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2014.

PARKIN, I. P., PALGRAVE, R. G.: Self-cleaning coatings. *J. Mater. Chem.* 15, 1689–1695 (2005)

PATIL, S. M. and AHUJA, B. B.. Tribological Behaviour of PTFE Under Variable Loading Dry Sliding Condition. *J. Inst. Eng. India Ser. C (April–June 2014)* 95(2):179–185 DOI 10.1007/s40032-014-0106-4

PERSSON, B.N.J. – Area of Real Contact: Elastic and Plastic Deformations. In: Persson, B.N.J. *Sliding Friction: Physical Principles and Applications*. 2. ed. New York: Springer, 2000. Cap. 5, p. 45-91.

- POZZOLI, M., VITA, G., AND ARCELLA, V., in *Modern Fluoropolymers* (Scheirs, J., Ed.), John Wiley & Sons, New York, p. 374 (1997).
- QUAGLINI, V.; DUBINI, P.; FERRONI, D.; POGGI, C. Influence of counterface roughness on friction properties of engineering plastics for bearing applications. *Materials and Design*, v. 30, p. 1650–1658, 2009.
- RADI, A. P.; SANTOS V. L.; BONETTI, F. L.; TRAVA-AIROLDI, J. V. *Tribologia, conceitos e aplicações: 13º Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA – XIII ENCITA*. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, Brasil, Outubro, 2007.
- RODRIGUES, A. A. *Investigação das características tribológicas e ambientais de termoplásticos de engenharia especiais para uso em materiais de atrito*. (Tese Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais). Brasil: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo; 2007.
- RODRIGUES, C. A.. *A substituição de peças metálicas por termoplásticas moldadas através do processo de injeção*. Faculdade de Tecnologia da Zona Leste, São Paulo, 2010.
- ROTHON, R.. *Particulate Filled Polymer Composites*. Londres. Longman Scientific and Technical, 1995.
- SATYANARAYAN, K. R., BASU, S. K., Tribological behaviour of some metals and filled or unfilled plastic using solid lubricants. *Industrial Lubrication and Tribology* 50(4), 157–160 (1998)
- SAWYER, W. G. *et al.* A study on the friction and wear behavior of PTFE filled with alumina nanoparticles. *Wear*, v. 254, p. 573–580, 2003.
- SCHIRMEISEN, A., JANSEN, L., HOLSCHER, H., FUCHS, H.. 2006. Temperature dependence of point contact friction on silicon. *Appl. Phys. Lett.* 88(12):123108.
- SHAW, D. J., 1975, “Introdução à Química de Colóides e Superfícies”, Editora Edgard Blucher/Edusp, 1ª Ed., São Paulo, Brasil.
- SHERATT, S., in *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, Vol.9, John Wiley & Sons, New York, p. 826 (1966).
- SILVA, M. M., PORSCHE, A. H., 2011, “Efeito de Revestimento na Perda de Carga Durante o Escoamento Interno de Óleos Pesados”, Relatório Departamento de Engenharia Mecânica, USP, São Paulo, Brasil.

- SINNOTT, S. B., HEO, S. J., BRENNER, D. W., HARRISON, J. A. 2007. Computer simulations of nanometer-scale indentation and friction. In Springer Handbook on Nanotechnology, ed. B Bhushan, pp. 1051–106. Heidelberg, Ger.: Springer-Verlag.
- STACHOWIAK, G. W., BATCHELOR, A. W.. Engineering Tribology. 2nd ed. Jordan Hill, Oxford: Butterworth-Heinemann; 2001.
- STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR, A. W. **Engineering Tribology**, 1996.
- STANKOVIĆ, M., VENCL, A., MARINKOVIĆ, A.. A Review of the Tribological Properties of PTFE Composites Filled with Glass, Graphite, Carbon or Bronze Reinforcement. In: 13 th International Conference on Tribology - SERBIATRIB'13, Kragujevac, Serbia, 15 – 17 May 2013. ([http://www.academia.edu/3635434/A\\_review\\_of\\_the\\_tribological\\_properties\\_of\\_PTFE\\_composites\\_filled\\_with\\_glass\\_graphite\\_carbon\\_or\\_bronze\\_reinforcement#](http://www.academia.edu/3635434/A_review_of_the_tribological_properties_of_PTFE_composites_filled_with_glass_graphite_carbon_or_bronze_reinforcement#))
- SZLUFARSKA, I., CHANDROSS, M., CARPICK, R. W.. 2008. Recent advances in single-asperity nanotribology. J. Phys. D 41:123001.
- TALAT, T.: Tribological behaviours of carbon filled polytetrafluoroethylene (PTFE) dry journal bearings. Wear 221, 61–68 (1998)
- TANAKA, K., UCHIYAMA, Y., TOYOOKA, S.. 1973. Mechanism of wear of polytetrafluoroethylene. Wear 23(2):153–72
- TANAKA, K., KAWAKAMI, S.: Effect of various fillers on the friction and wear of polytetrafluoroethylene-based composites. Wear 79, 221–234 (1982).
- The New York Times. Disponível em: <http://www.nytimes.com/1999/05/25/us/national-news-briefs-emergency-inspection-ordered-for-boeing-727-s.html?ref=teflon>. Acesso em 06 de março de 2014.
- TOMLINSON, G. A. 1929. A molecular theory of friction. Philos. Mag. 7(46):905-39.
- WANG, H., ZHAO, J., ZHU, Y., MENG, Y., ZHU, Y.. The fabrication, nano/micro-structure, heat- and wear-resistance of the superhydrophobic PPS/PTFE composite coatings. Journal of Colloid and Interface Science 402 (2013) 253–258.
- WANG, J.; YAN, F.; XUE, Q. Friction and Wear Behavior of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene Sliding Against GCr15 Steel and Electroless Ni–P Alloy Coating Under the Lubrication of Seawater. Tribology Letter, v. 35, p. 85–95, 2009.
- WETTON, R.E. – Developments in Polymer Characterization; Dawkins, J.V., ed.; Elsevier Applied Sci. Publishers: London, 1986, p. 179.

- WU, K. C., YOU, H. I.. Determination of solid material elastic modulus and surface energy based on JKR contact model. *Applied Surface Science*, v. 253, p. 8530–8537, 2007.
- WUNDERLICH, B. – *Thermal Characterization of Polymer Materials*; Turi, E. A., ed.; 2nd.ed., Academic Press Inc.: New York, 1997, vol. 1, p. 305.
- XIAN-HUA CHENG, YU-JUN XUE, CHAO-YING XIE, Friction and wear of rare-earth modified glass fiber filled PTFE composites in dry reciprocating sliding motion with impact loads. *Wear* 253, 869–877 (2002)
- XU, D.; LIECHTI, K. M.; RAVI-CHANDAR, K. On the modified Tabor parameter for the JKR–DMT transition in the presence of a liquid meniscus. *Journal of Colloid and Interface Science*, v. 315, p. 772–785, 2007.
- YAN, Y., SUN, T., DONG, S., LIANG, Y.. 2007. Study on effects of the feed on AFM-based nano-scratching process using MD simulation. *Comput. Mater. Sci.* 40:1–5
- YE, Y. Y., BISWAS, R., MORRIS, J. R., BASTAWROS, A., CHANDRA, A.. 2003. Molecular dynamics simulation of nanoscale machining of copper. *Nanotechnology* 14:390–96.
- YEO, S. M., POLYCARPOU, A. A.. Tribological performance of PTFE - and PEEK – based coatings under oil - less compressor conditions. *Wear* 296 (2012) 638–647.
- ZHANG, L., TANAKA, H.. 1997. Towards a deeper understanding of wear and friction on the atomic scale—a molecular dynamics analysis. *Wear* 211:44–53.
- ZHAO, X. Y, HAMILTONM, SAWYERWG, PERRY, S.S.. 2007. Thermally activated friction. *Tribol. Lett.* 27(1):113– 17.
- ZUM GAHR, Karl-H, *Microstruture and wear of materials*. New York: Elsevier Science Publischer, 1987. 560p.

## Apêndice A

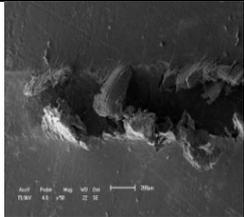
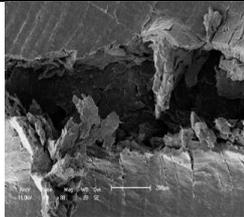
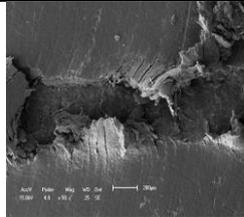
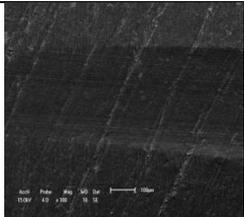
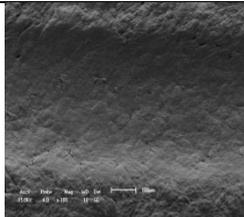
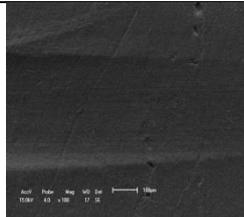
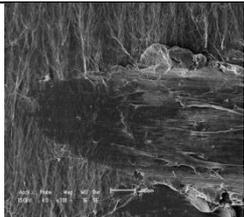
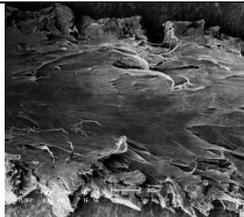
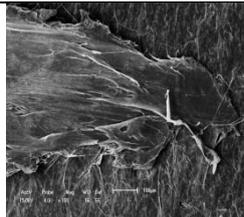
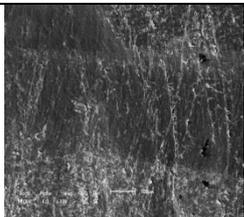
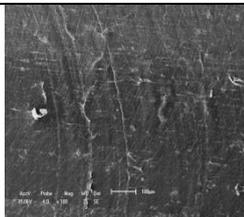
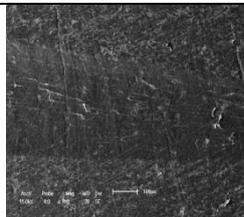
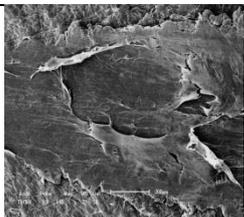
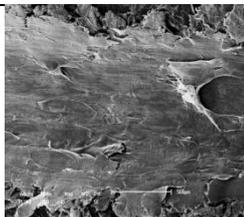
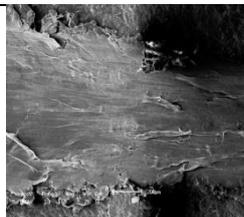
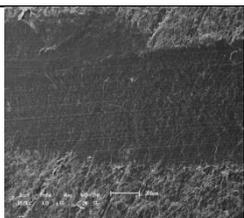
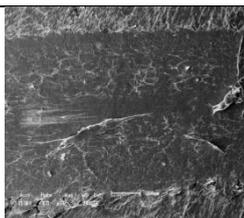
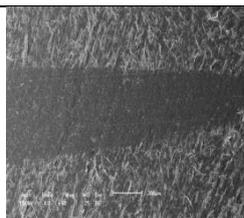
### Mapa de desgaste da esclerometria do PTFE puro

	Z1	Z2	Z3	Z4	
<b>0,550J</b> <b>0,150J</b>					<b>30° Scratch</b> <b>Local Center</b>
<b>0,475J</b> <b>0,050J</b>					<b>45° Scratch</b> <b>Local Center</b>
<b>0,950J</b> <b>0,700J</b>					<b>60° Scratch</b> <b>Local Center</b>
<b>1,050J</b> <b>0,650J</b>					<b>75° Scratch</b> <b>Local Center</b>
<b>1,120J</b> <b>0,500J</b>					<b>90° Scratch</b> <b>Local Center</b>
<b>1,120J</b> <b>0,670J</b>					<b>120° Scratch</b> <b>Local Center</b>
	Z1	Z2	Z3	Z4	
<b>0,550J</b> <b>0,150J</b>					<b>30° Scratch</b> <b>Local</b> <b>Discretization</b>
<b>0,475J</b> <b>0,005J</b>					<b>45° Scratch</b> <b>Local</b> <b>Discretization</b>
<b>0,950J</b> <b>0,700J</b>					<b>60° Scratch</b> <b>Local</b> <b>Discretization</b>
<b>1,050J</b> <b>0,650J</b>					<b>75° Scratch</b> <b>Local</b> <b>Discretization</b>

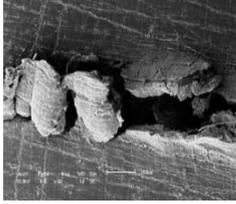
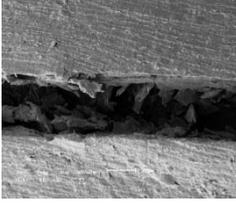
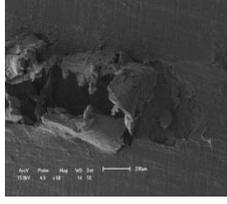
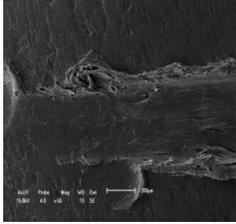
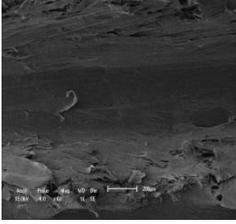
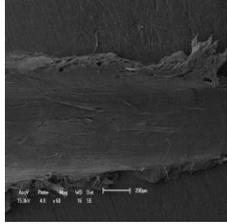
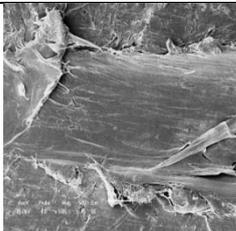
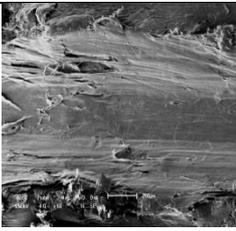
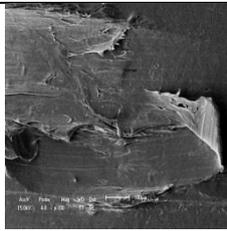
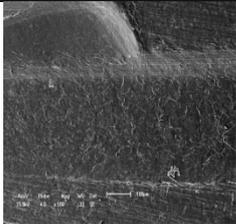
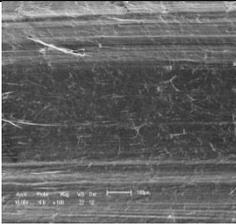
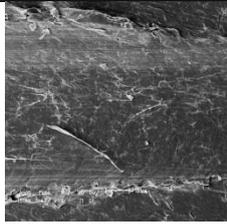
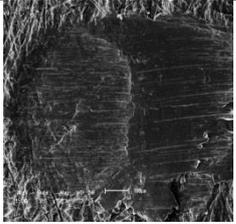
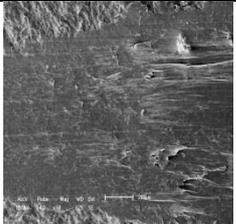
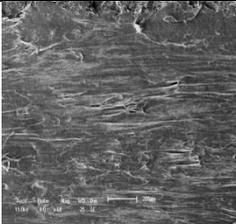
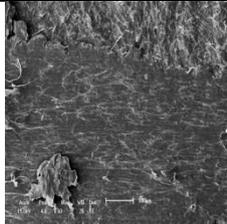
<b>0,500J</b> <b>1,120J</b>					<b>90° Scratch</b> <b>Local</b> <b>Discretization</b>
<b>1,120J</b> <b>0,670J</b>					<b>120° Scratch</b> <b>Local</b> <b>Discretization</b>
	<b>Z1</b>	<b>Z2</b>	<b>Z3</b>	<b>Z4</b>	
<b>0,550J</b> <b>0,150J</b>					<b>30° Scratch</b> <b>Local Right</b> <b>Edge</b>
<b>0,475J</b> <b>0,050J</b>					<b>45° Scratch</b> <b>Local Right</b> <b>Edge</b>
<b>0,950J</b> <b>0,700J</b>					<b>60° Scratch</b> <b>Local Right</b> <b>Edge</b>
<b>1,050</b> <b>0,650J</b>					<b>75° Scratch</b> <b>Local Right</b> <b>Edge</b>
<b>1,120J</b> <b>0,500J</b>					<b>90° Scratch</b> <b>Local Right</b> <b>Edge</b>
<b>1,120J</b> <b>0,670J</b>					<b>120° Scratch</b> <b>Local Right</b> <b>Edge</b>

**Figura A1:** Mapa de desgaste para amostras de PTFE puro a partir da Energia de Deformação consumida durante a passagem dos indentadores em três regiões distintas (Centro, Discretizada e Borda)

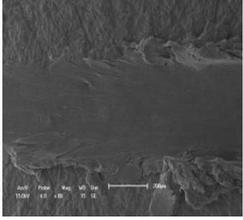
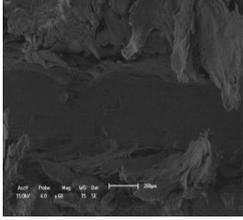
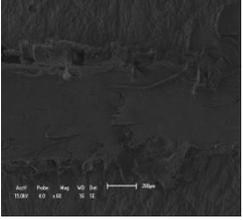
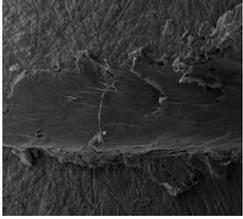
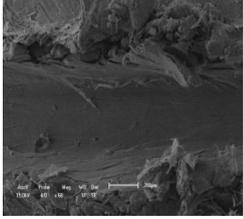
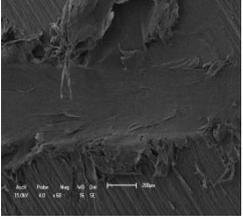
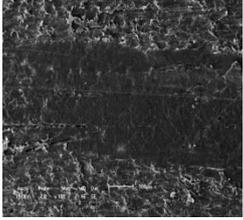
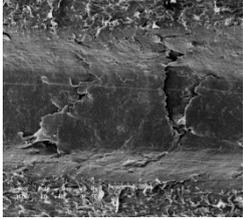
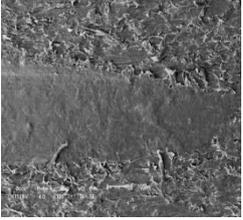
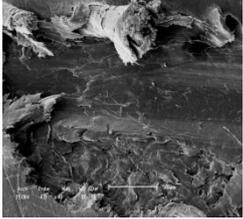
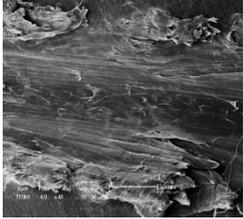
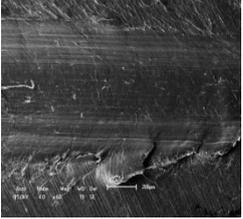
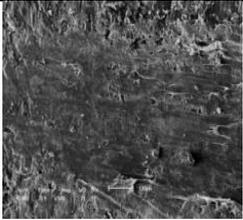
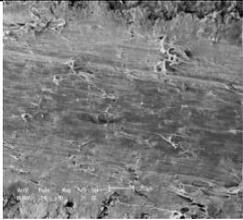
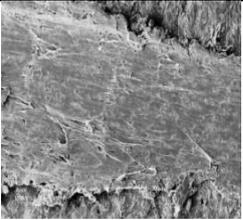
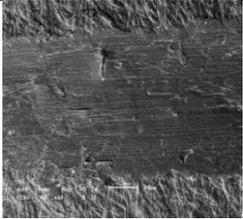
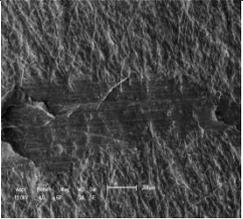
**Mapa de desgaste da esclerometria de compósitos PTFE + Rejeito de Scheelita**

<b>Composição 1% de carga mineral</b>				
<b>Energia(J)</b>	<b>Z1</b>	<b>Z2</b>	<b>Z3</b>	
<b>Mín. 650 Máx. 846</b>				<b>30°</b>
<b>Mín. 468 Máx. 605</b>				<b>45°</b>
<b>Mín. 651 Máx. 825</b>				<b>60°</b>
<b>Mín. 352 Máx. 695</b>				<b>75°</b>
<b>Mín. 466 Máx. 604</b>				<b>90°</b>
<b>Mín. 445 Máx. 514</b>				<b>120°</b>

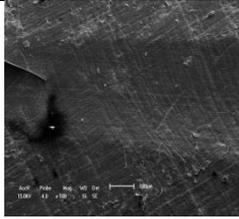
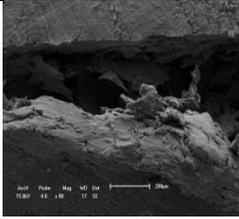
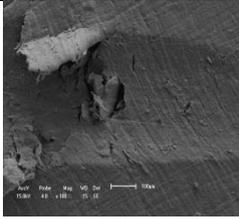
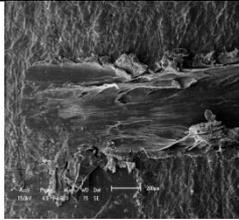
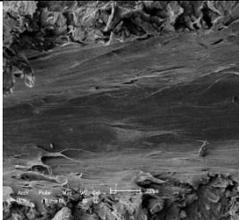
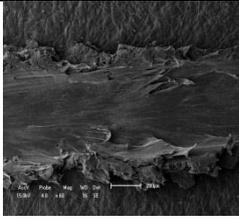
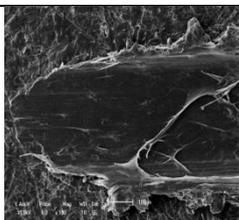
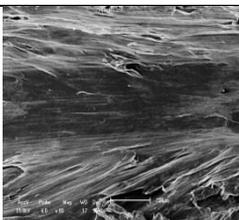
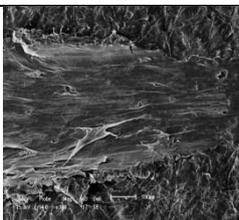
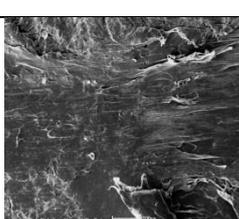
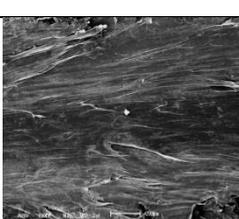
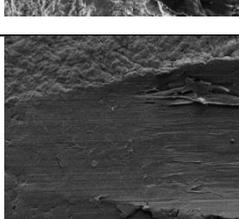
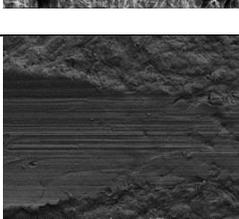
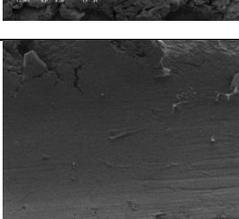
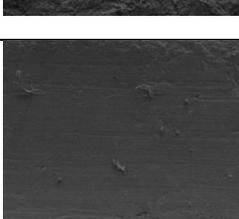
**Figura A2:** Mapa de desgaste da Região Discretizada dos compósitos com composição (99:1) para cada ângulo de ponta ensaiado

<b>Composição N 2% de carga mineral</b>				
<b>Energia(J)</b>	<b>Z1</b>	<b>Z2</b>	<b>Z3</b>	
<b>Mín. 716 Máx. 1173</b>				<b>30°</b>
<b>Mín. 398 Máx. 804</b>				<b>45°</b>
<b>Mín. 375 Máx. 820</b>				<b>60°</b>
<b>Mín. 398 Máx. 649</b>				<b>75°</b>
<b>Mín. 421 Máx. 736</b>				<b>90°</b>
<b>Mín. 491 Máx. 651</b>				<b>120°</b>

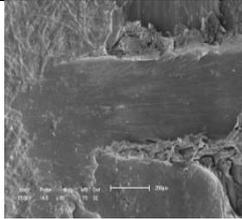
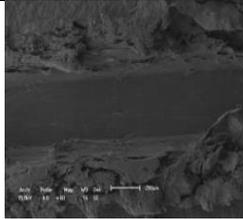
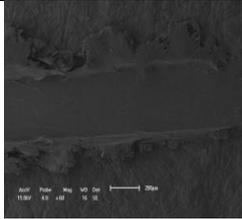
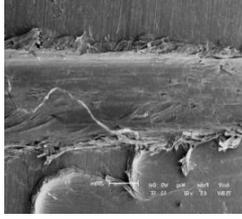
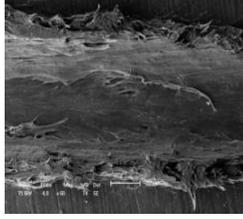
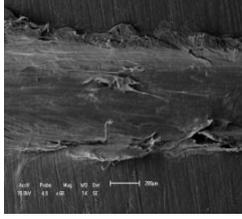
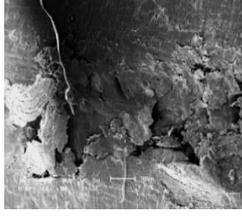
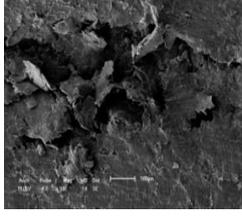
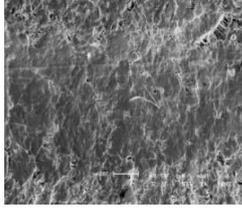
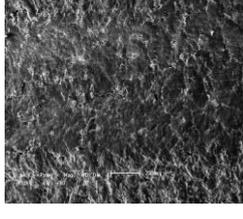
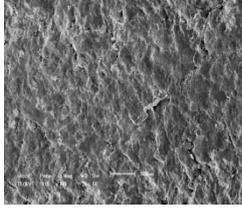
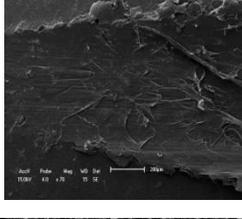
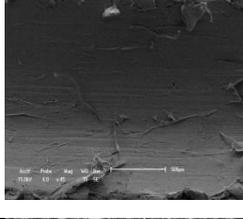
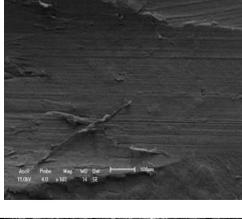
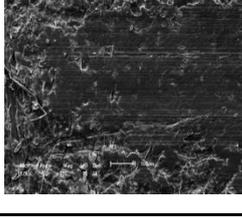
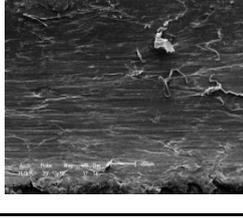
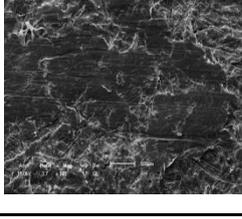
**Figura A3:** Mapa de desgaste da Região Discretizada dos compósitos com composição (98:2) para cada ângulo de ponta ensaiado

<b>Composição 3% de carga mineral</b>				
<b>Energia (J)</b>	<b>Z1</b>	<b>Z2</b>	<b>Z3</b>	
<b>Mín. 490 Máx. 759</b>				<b>30°</b>
<b>Mín. 445 Máx. 734</b>				<b>45°</b>
<b>Mín. 514 Máx. 716</b>				<b>60°</b>
<b>Mín. 468 Máx. 941</b>				<b>75°</b>
<b>Mín. 375 Máx. 514</b>				<b>90°</b>
<b>Mín. 421 Máx. 560</b>				<b>120°</b>

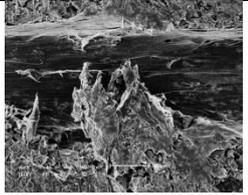
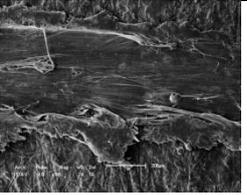
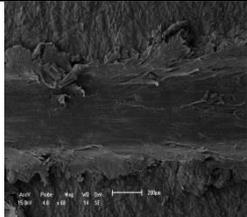
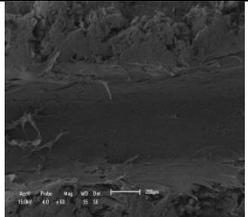
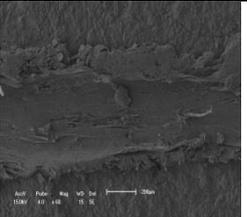
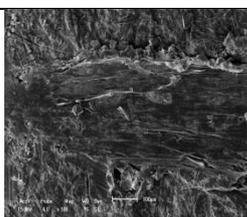
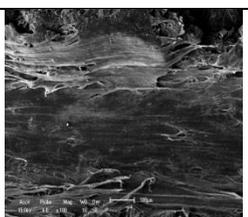
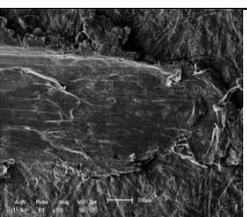
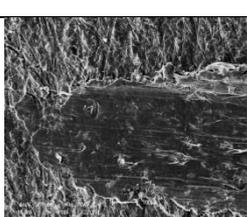
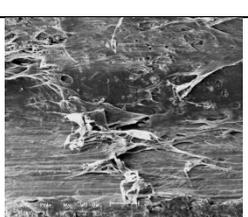
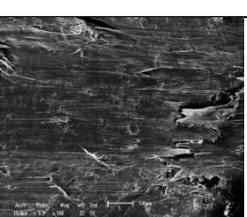
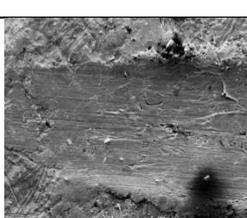
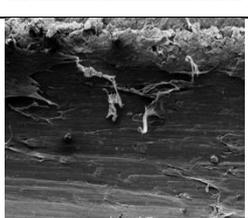
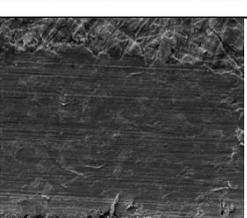
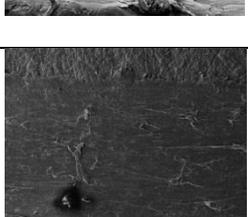
**Figura A4:** Mapa de desgaste da Região Discretizada dos compósitos com composição (97:3) para cada ângulo de ponta ensaiado

<b>Composição 5% de carga mineral</b>				
<b>Energia(J)</b>	<b>Z1</b>	<b>Z2</b>	<b>Z3</b>	
<b>Mín. 797 Máx. 1072</b>				<b>30°</b>
<b>Mín. 514 Máx. 1003</b>				<b>45°</b>
<b>Mín. 627 Máx. 867</b>				<b>60°</b>
<b>Mín. 664 Máx. 862</b>				<b>75°</b>
<b>Mín. 398 Máx. 905</b>				<b>90°</b>
<b>Mín. 393 Máx. 871</b>				<b>120°</b>

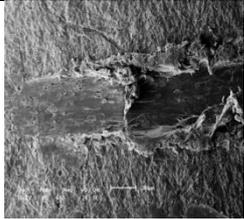
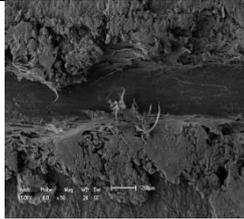
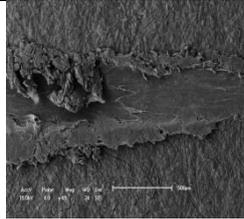
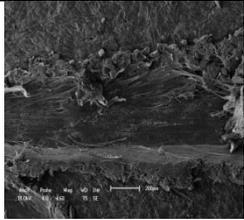
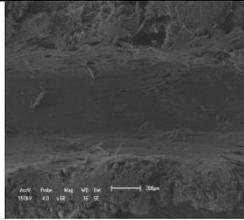
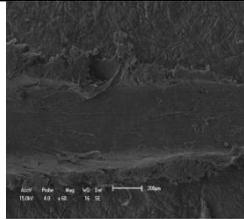
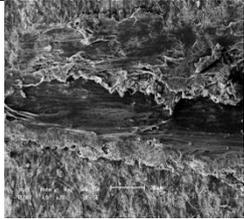
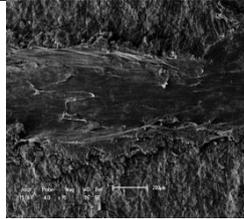
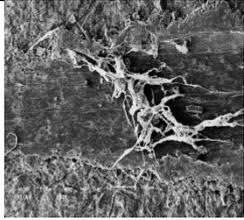
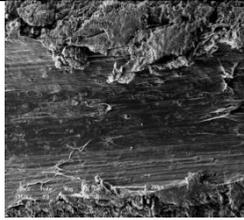
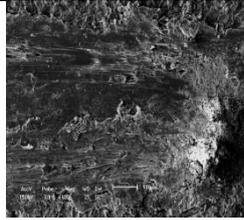
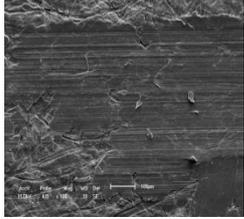
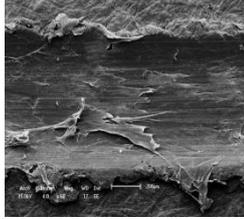
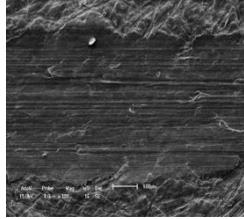
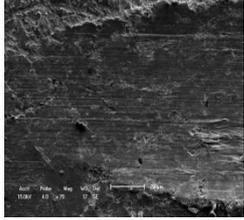
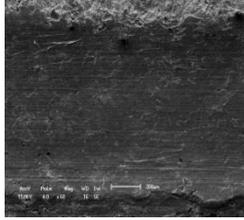
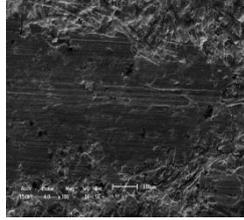
**Figura A5:** Mapa de desgaste da Região Discretizada dos compósitos com composição (95:5) para cada ângulo de ponta ensaiado

<b>Composição 10% de carga mineral</b>				
<b>Energia(J)</b>	<b>Z1</b>	<b>Z2</b>	<b>Z3</b>	
<b>Mín. 47 Máx. 390</b>				<b>30°</b>
<b>Mín. 280 Máx. 437</b>				<b>45°</b>
<b>Mín. 164 Máx. 446</b>				<b>60°</b>
<b>Mín. 164 Máx. 480</b>				<b>75°</b>
<b>Mín. 368 Máx. 772</b>				<b>90°</b>
<b>Mín. 326 Máx. 505</b>				<b>120°</b>

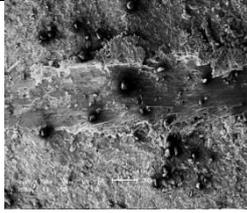
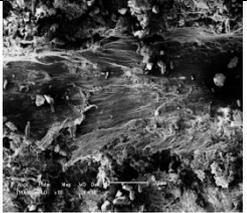
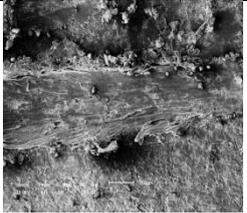
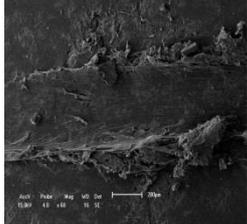
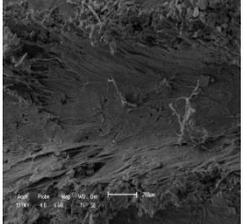
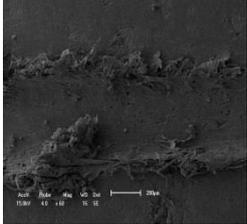
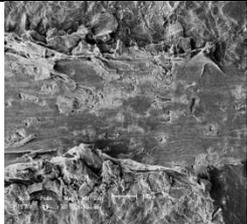
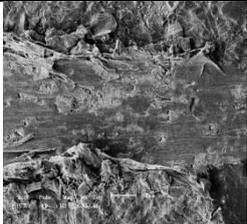
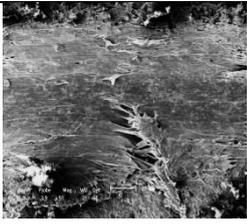
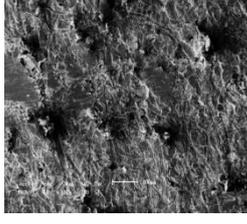
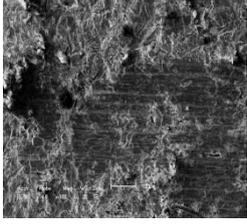
**Figura A6:** Mapa de desgaste da Região Discretizada dos compósitos com composição (90:10) para cada ângulo de ponta ensaiado

<b>Composição 20% de carga mineral</b>				
<b>Energia(J)</b>	<b>Z1</b>	<b>Z2</b>	<b>Z3</b>	
<b>Mín. 233</b> <b>Máx. 783</b>				<b>30°</b>
<b>Mín. 164</b> <b>Máx. 374</b>				<b>45°</b>
<b>Mín. 94</b> <b>Máx. 461</b>				<b>60°</b>
<b>Mín. 454</b> <b>Máx. 812</b>				<b>75°</b>
<b>Mín. 210</b> <b>Máx. 761</b>				<b>90°</b>
<b>Mín. 278</b> <b>Máx. 414</b>				<b>120°</b>

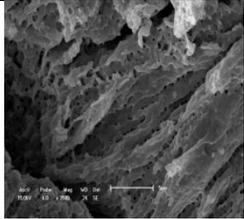
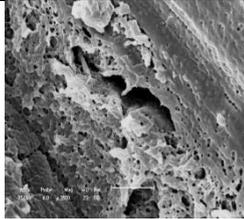
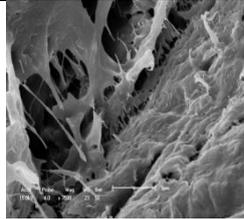
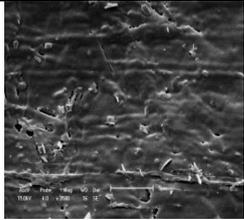
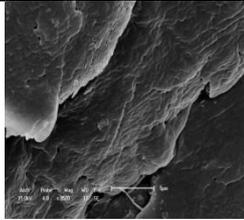
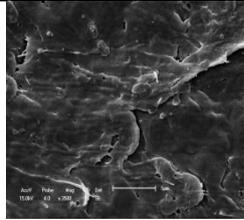
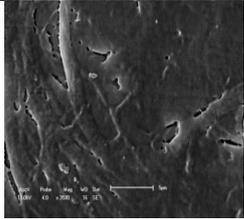
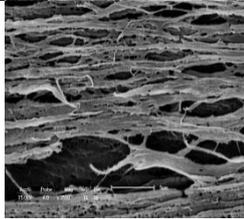
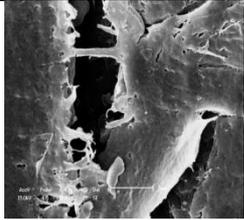
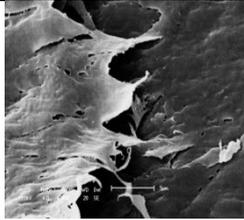
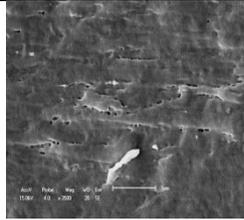
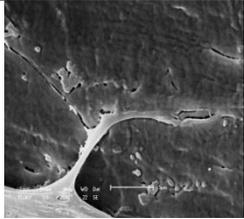
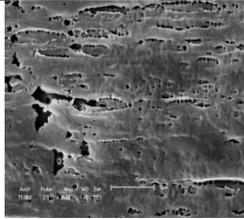
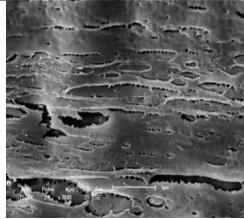
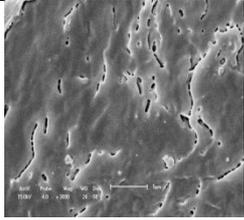
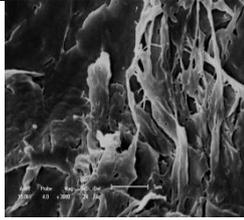
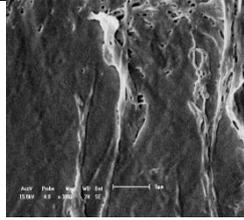
**Figura A7:** Mapa de desgaste da Região Discretizada dos compósitos com composição (80:20) para cada ângulo de ponta ensaiado

<b>Composição 30% de carga mineral</b>				
<b>Energia(J)</b>	<b>Z1</b>	<b>Z2</b>	<b>Z3</b>	
<b>Mín. 47</b> <b>Máx. 390</b>				<b>30°</b>
<b>Mín. 280</b> <b>Máx. 437</b>				<b>45°</b>
<b>Mín. 164</b> <b>Máx. 446</b>				<b>60°</b>
<b>Mín. 164</b> <b>Máx. 480</b>				<b>75°</b>
<b>Mín. 368</b> <b>Máx. 772</b>				<b>90°</b>
<b>Mín. 326</b> <b>Máx. 505</b>				<b>120°</b>

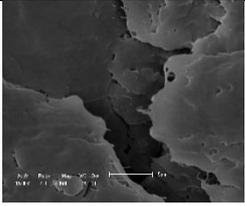
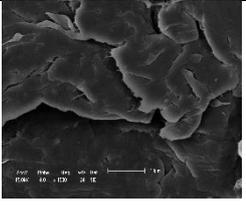
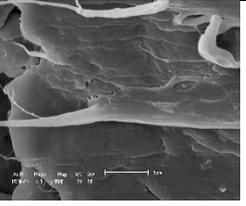
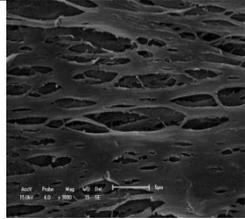
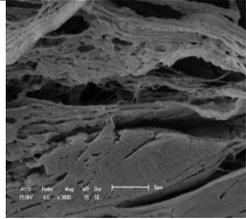
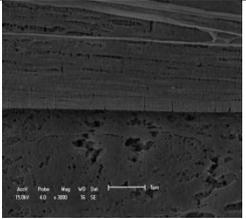
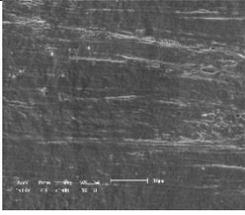
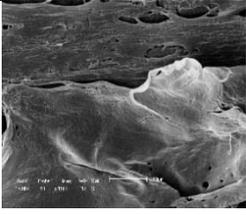
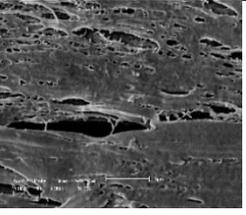
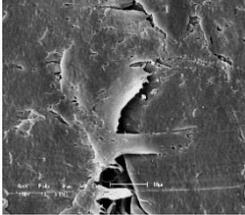
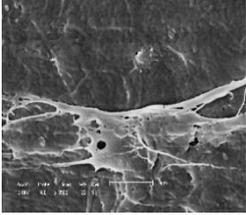
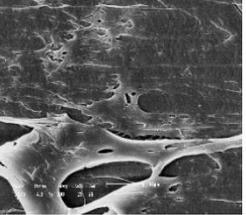
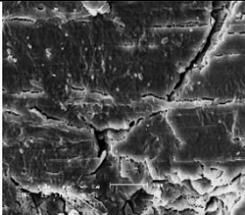
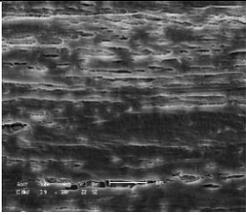
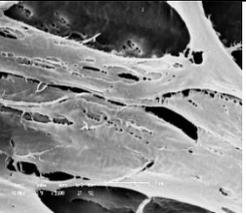
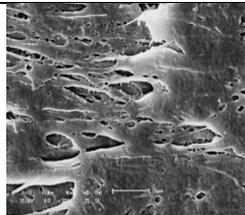
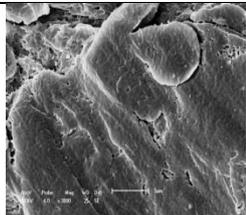
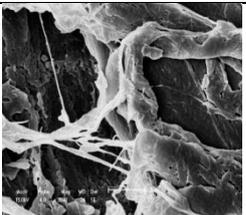
**Figura A8:** Mapa de desgaste da Região Discretizada dos compósitos com composição (70:30) para cada ângulo de ponta ensaiado

<b>Composição 50% de carga mineral</b>				
<b>Energia(J)</b>	<b>Z1</b>	<b>Z2</b>	<b>Z3</b>	
<b>Mín. 582 Máx. 818</b>				<b>30°</b>
<b>Mín. 736 Máx. 867</b>				<b>45°</b>
<b>Mín. 671 Máx. 1072</b>				<b>60°</b>
<b>Mín. 514 Máx. 820</b>				<b>75°</b>
<b>Mín. 398 Máx. 759</b>				<b>90°</b>
<b>Mín. 491 Máx. 695</b>				<b>120°</b>

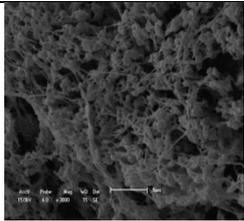
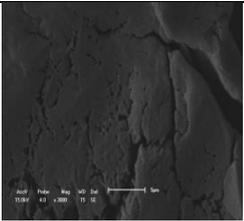
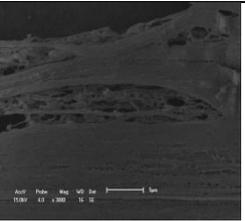
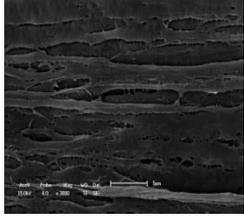
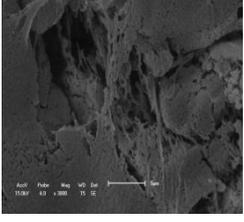
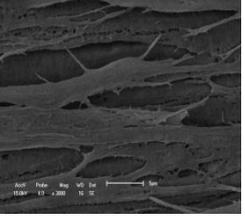
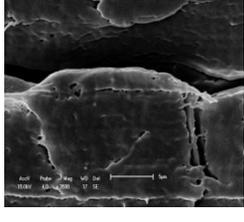
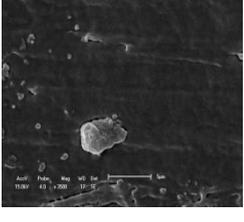
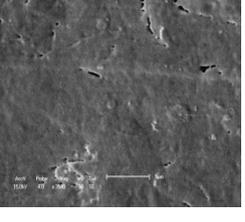
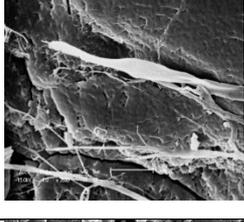
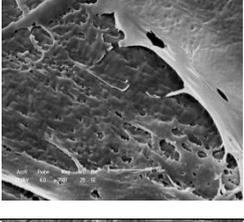
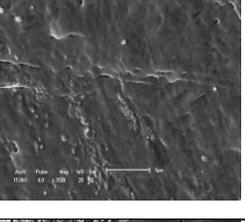
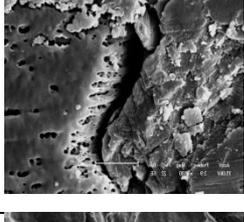
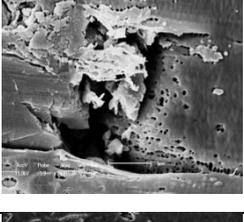
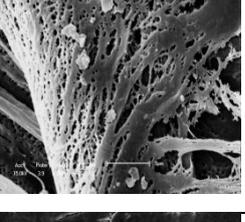
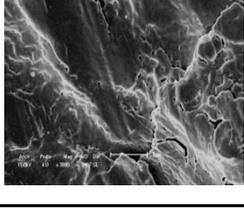
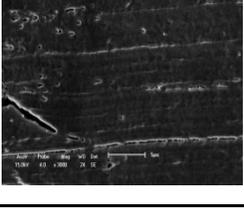
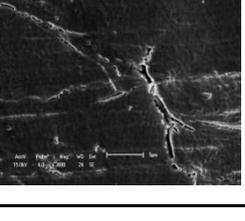
**Figura A9:** Mapa de desgaste da Região Discretizada dos compósitos com composição (50:50) para cada ângulo de ponta ensaiado

<b>Composição 1% de carga mineral</b>				
<b>Energia(J)</b>	<b>Z1</b>	<b>Z2</b>	<b>Z3</b>	
<b>Mín. 650 Máx. 846</b>				<b>30°</b>
<b>Mín. 468 Máx. 605</b>				<b>45°</b>
<b>Mín. 651 Máx. 825</b>				<b>60°</b>
<b>Mín. 352 Máx. 695</b>				<b>75°</b>
<b>Mín. 466 Máx. 604</b>				<b>90°</b>
<b>Mín. 445 Máx. 514</b>				<b>120°</b>

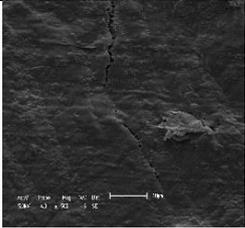
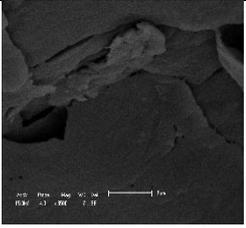
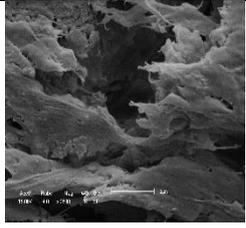
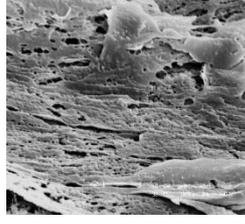
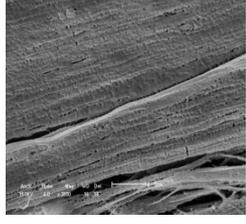
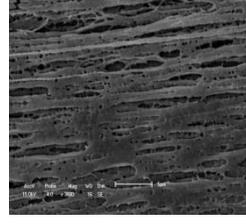
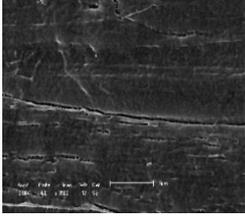
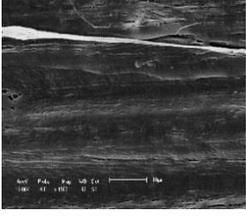
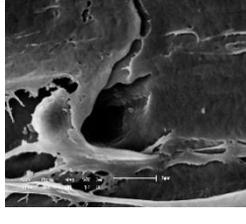
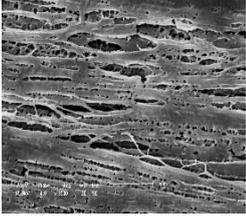
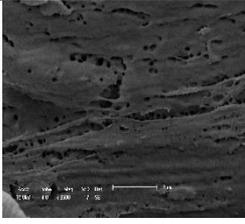
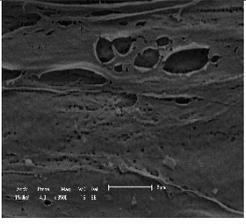
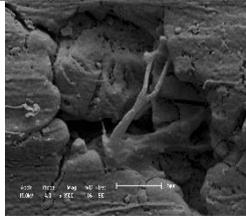
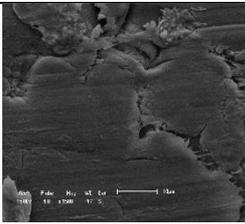
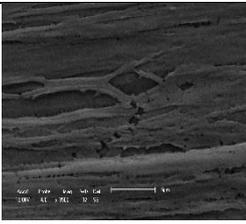
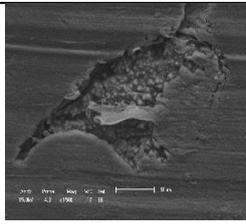
**Figura A10:** Mapa de desgaste da Região Centro dos compósitos com composição (99:1) para cada ângulo de ponta ensaiado

<b>Composição 2% de carga mineral</b>				
<b>Energia(J)</b>	<b>Z1</b>	<b>Z2</b>	<b>Z3</b>	
Mín. 716 Máx. 1173				<b>30°</b>
Mín. 398 Máx. 804				<b>45°</b>
Mín. 375 Máx. 820				<b>60°</b>
Mín. 398 Máx. 649				<b>75°</b>
Mín. 421 Máx. 736				<b>90°</b>
Mín. 491 Máx. 651				<b>120°</b>

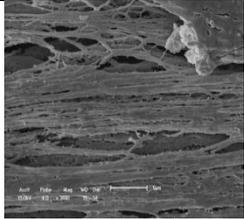
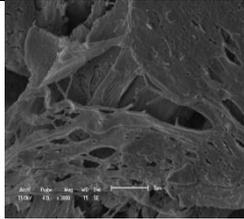
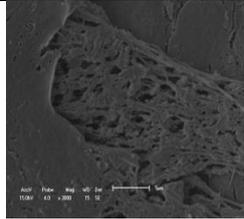
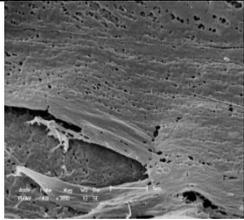
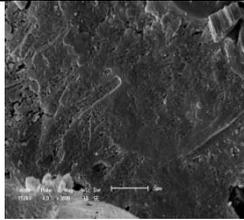
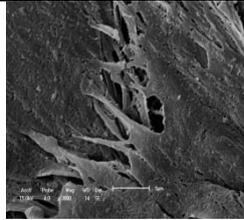
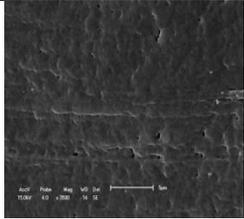
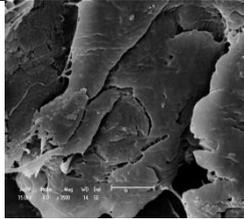
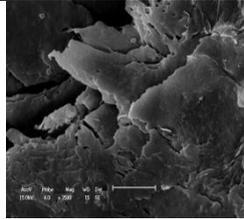
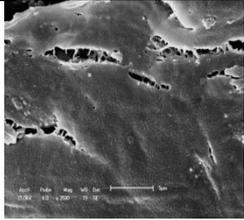
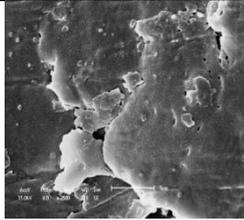
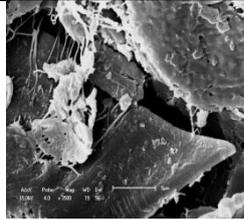
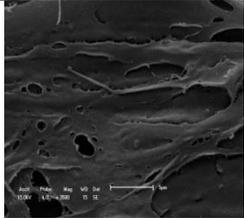
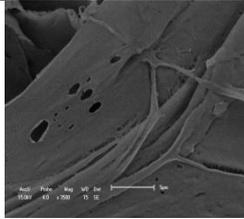
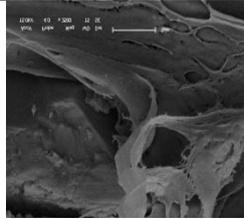
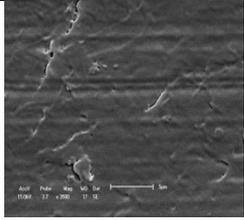
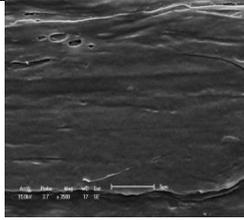
**Figura A11:** Mapa de desgaste da Região Centro dos compósitos com composição (98:2) para cada ângulo de ponta ensaiado

<b>Composição 3% de carga mineral</b>				
<b>Energia(J)</b>	<b>Z1</b>	<b>Z2</b>	<b>Z3</b>	
<b>Mín. 490 Máx. 759</b>				<b>30°</b>
<b>Mín. 445 Máx. 734</b>				<b>45°</b>
<b>Mín. 514 Máx. 716</b>				<b>60°</b>
<b>Mín. 468 Máx. 941</b>				<b>75°</b>
<b>Mín. 375 Máx. 514</b>				<b>90°</b>
<b>Mín. 421 Máx. 560</b>				<b>120°</b>

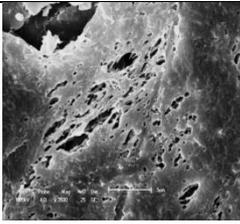
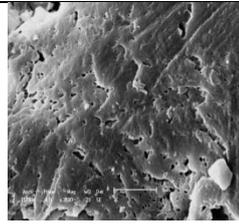
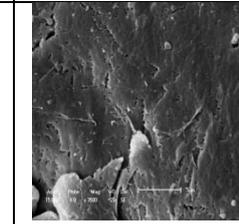
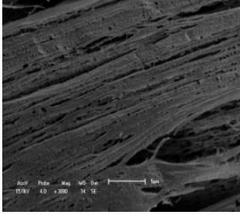
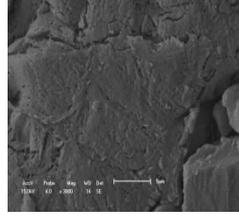
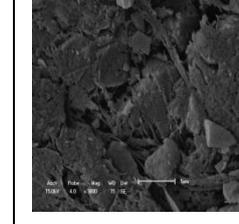
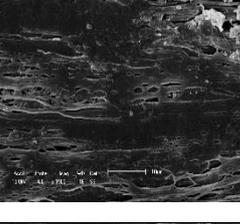
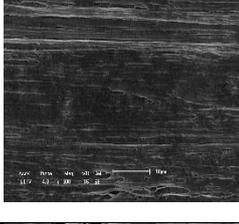
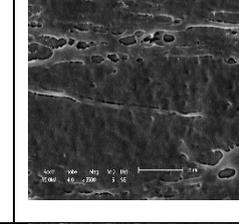
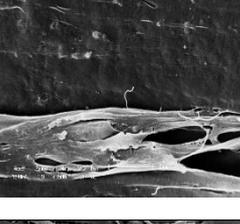
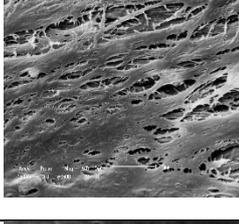
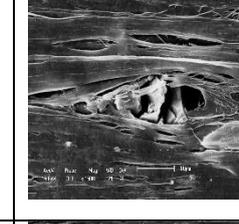
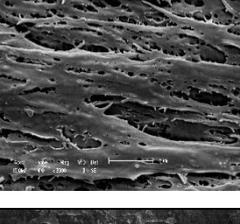
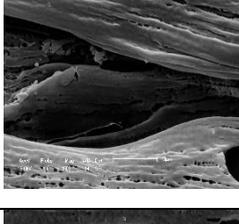
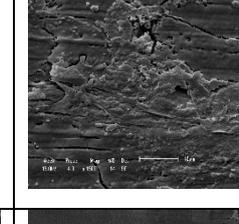
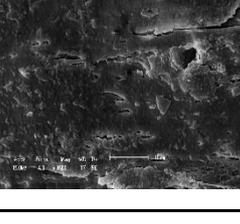
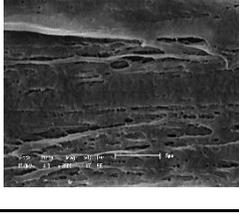
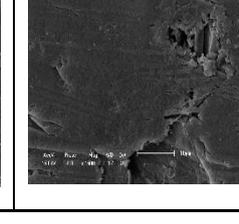
**Figura A12:** Mapa de desgaste da Região Centro dos compósitos com composição (97:3) para cada ângulo de ponta ensaiado

<b>Composição 5% de carga mineral</b>				
<b>Energia(J)</b>	<b>Z1</b>	<b>Z2</b>	<b>Z3</b>	
<b>Mín. 797 Máx. 1072</b>				<b>30°</b>
<b>Mín. 514 Máx. 1003</b>				<b>45°</b>
<b>Mín. 627 Máx. 867</b>				<b>60°</b>
<b>Mín. 664 Máx. 862</b>				<b>75°</b>
<b>Mín. 398 Máx. 905</b>				<b>90°</b>
<b>Mín. 393 Máx. 871</b>				<b>120°</b>

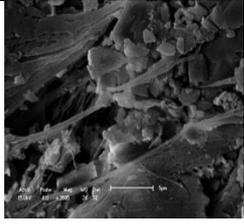
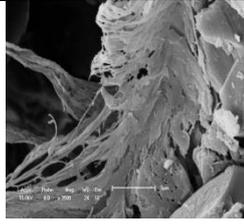
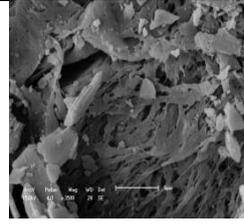
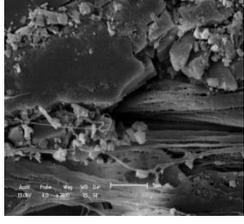
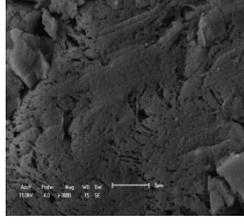
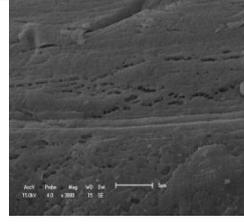
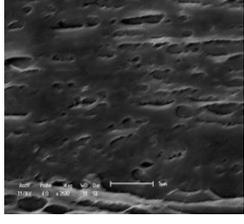
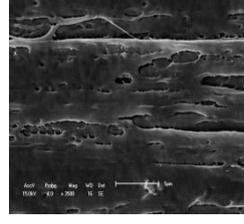
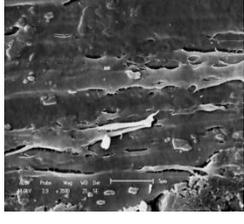
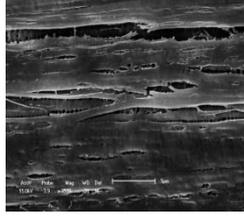
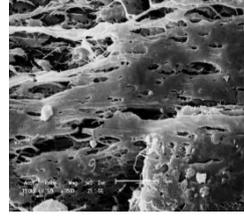
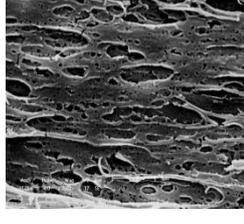
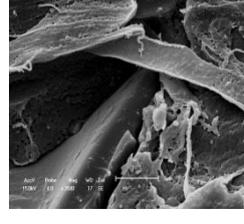
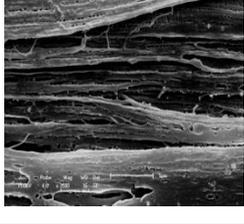
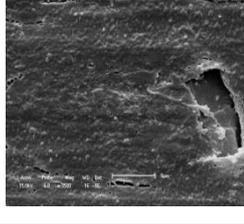
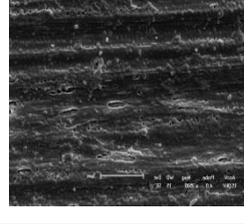
**Figura A13:** Mapa de desgaste da Região Centro dos compósitos com composição (95:5) para cada ângulo de ponta ensaiado

<b>Composição 10% de carga mineral</b>				
<b>Energia(J)</b>	<b>Z1</b>	<b>Z2</b>	<b>Z3</b>	
<b>Mín. 47 Máx. 390</b>				<b>30°</b>
<b>Mín. 280 Máx. 437</b>				<b>45°</b>
<b>Mín. 164 Máx. 446</b>				<b>60°</b>
<b>Mín. 164 Máx. 480</b>				<b>75°</b>
<b>Mín. 368 Máx. 772</b>				<b>90°</b>
<b>Mín. 326 Máx. 505</b>				<b>120°</b>

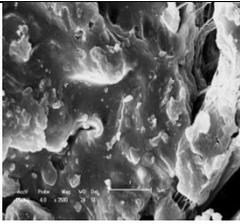
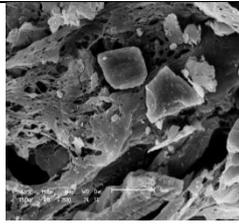
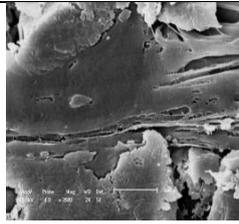
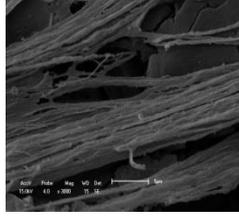
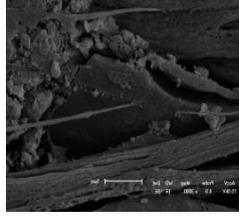
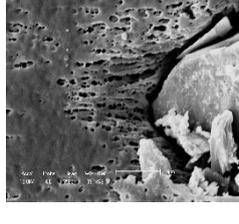
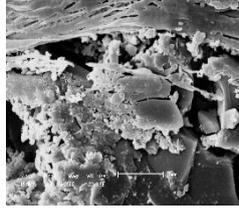
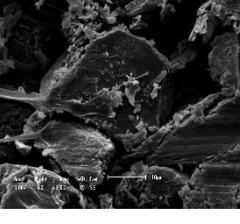
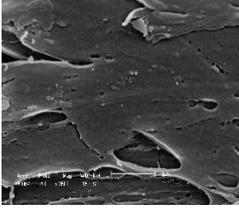
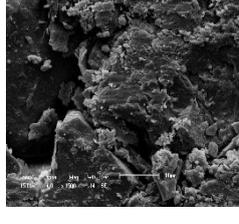
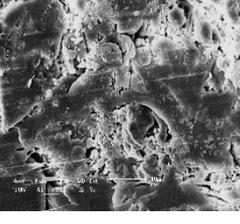
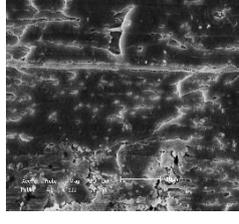
**Figura A14:** Mapa de desgaste da Região Centro dos compósitos com composição (90:10) para cada ângulo de ponta ensaiado

<b>Composição 20% de carga mineral</b>				
<b>Energia(J)</b>	<b>Z1</b>	<b>Z2</b>	<b>Z3</b>	
<b>Mín. 233 Máx. 783</b>				<b>30°</b>
<b>Mín. 164 Máx. 374</b>				<b>45°</b>
<b>Mín. 94 Máx. 461</b>				<b>60°</b>
<b>Mín. 454 Máx. 812</b>				<b>75°</b>
<b>Mín. 210 Máx. 761</b>				<b>90°</b>
<b>Mín. 278 Máx. 414</b>				<b>120°</b>

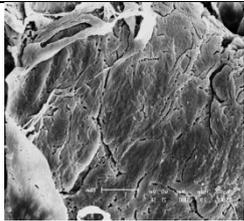
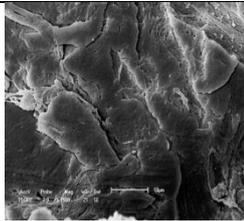
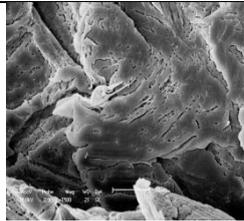
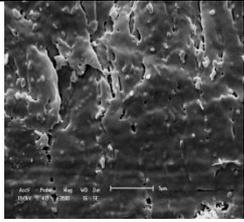
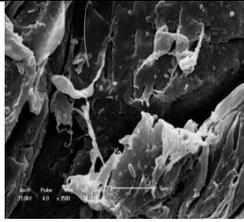
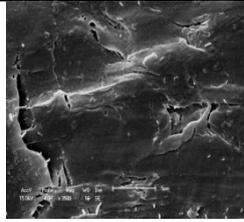
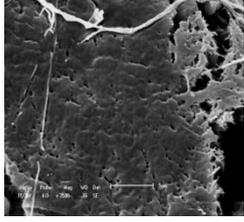
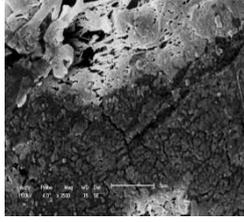
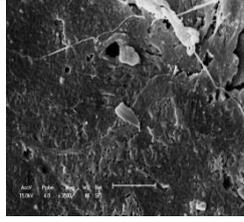
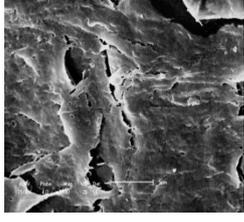
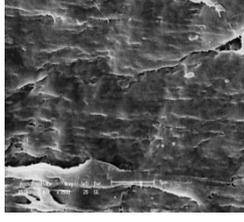
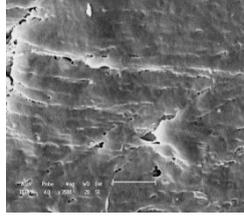
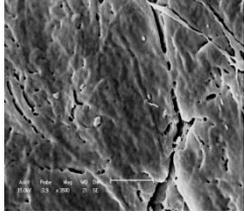
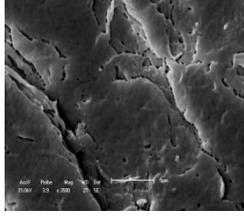
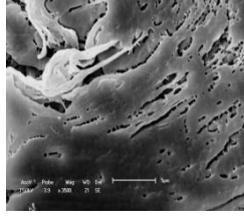
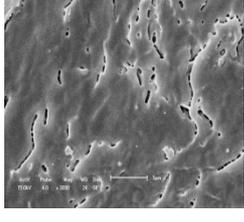
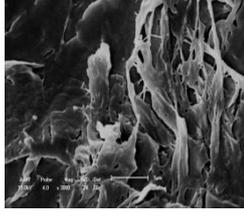
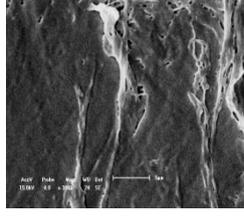
**Figura A15:** Mapa de desgaste da Região Centro dos compósitos com composição (80:20) para cada ângulo de ponta ensaiado

<b>Composição 30% de carga mineral</b>				
<b>Energia(J)</b>	<b>Z1</b>	<b>Z2</b>	<b>Z3</b>	
<b>Mín. 47 Máx. 390</b>				<b>30°</b>
<b>Mín. 280 Máx. 437</b>				<b>45°</b>
<b>Mín. 164 Máx. 446</b>				<b>60°</b>
<b>Mín. 164 Máx. 480</b>				<b>75°</b>
<b>Mín. 368 Máx. 772</b>				<b>90°</b>
<b>Mín. 326 Máx. 505</b>				<b>120°</b>

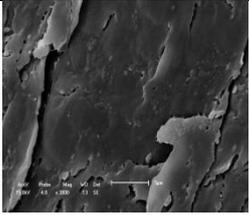
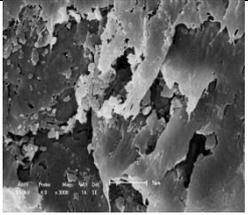
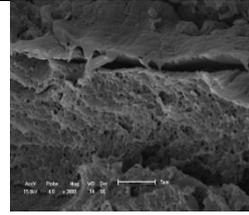
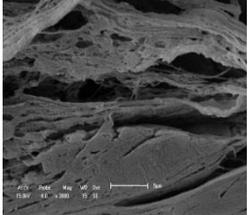
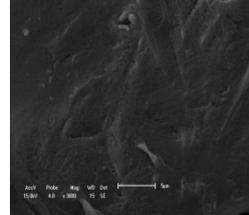
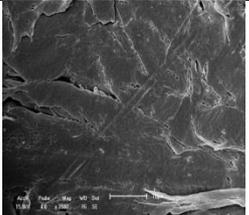
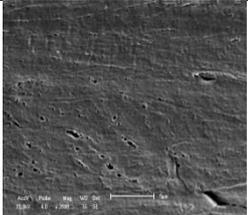
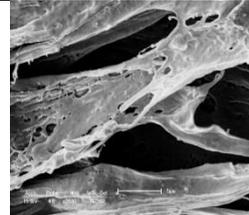
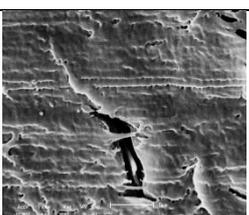
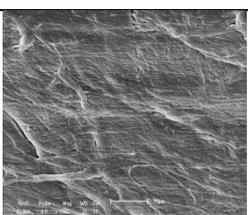
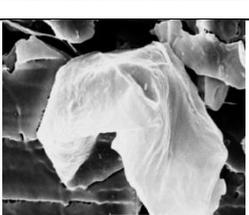
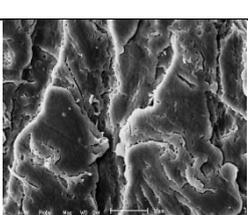
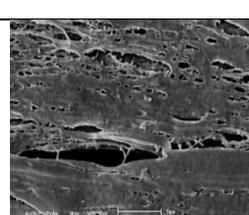
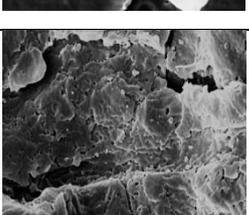
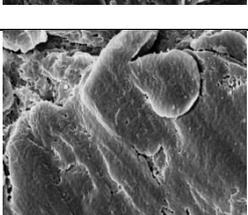
**Figura A16:** Mapa de desgaste da Região Centro dos compósitos com composição (70:30) para cada ângulo de ponta ensaiado

<b>Composição 50% de carga mineral</b>				
<b>Energia(J)</b>	<b>Z1</b>	<b>Z2</b>	<b>Z3</b>	
<b>Mín. 582 Máx. 818</b>				<b>30°</b>
<b>Mín. 736 Máx. 867</b>				<b>45°</b>
<b>Mín. 671 Máx. 1072</b>				<b>60°</b>
<b>Mín. 514 Máx. 820</b>				<b>75°</b>
<b>Mín. 398 Máx. 759</b>				<b>90°</b>
<b>Mín. 491 Máx. 695</b>				<b>120°</b>

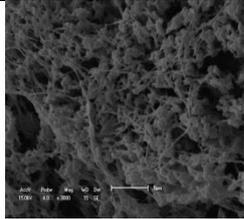
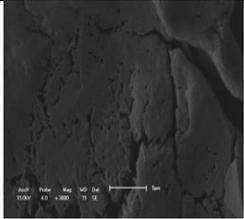
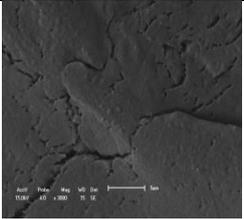
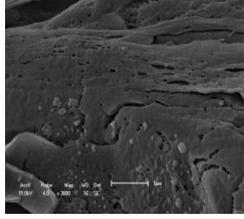
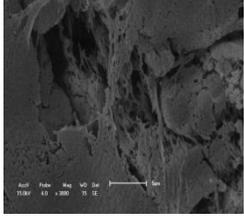
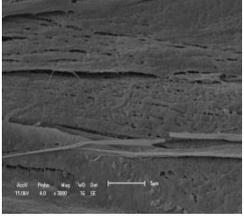
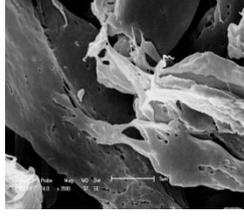
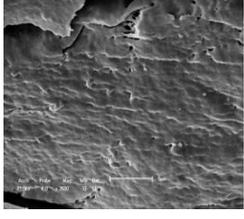
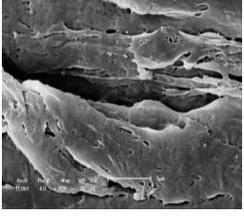
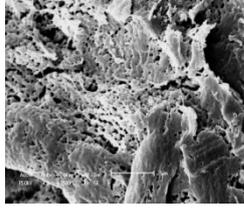
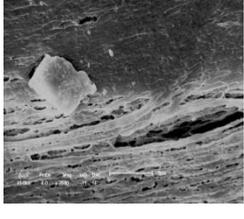
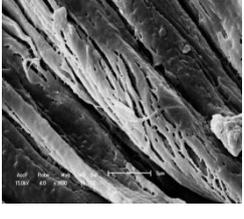
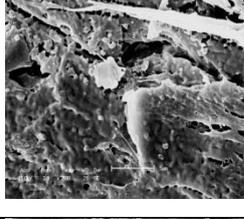
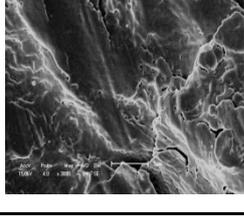
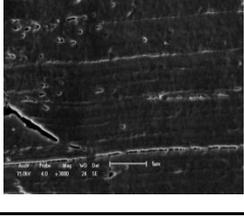
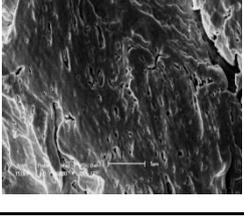
**Figura A17:** Mapa de desgaste da Região Centro dos compósitos com composição (50:50) para cada ângulo de ponta ensaiado

<b>Composição 1% de carga mineral</b>				
<b>Energia(J)</b>	<b>Z1</b>	<b>Z2</b>	<b>Z3</b>	
<b>Mín. 650 Máx. 846</b>				<b>30°</b>
<b>Mín. 468 Máx. 605</b>				<b>45°</b>
<b>Mín. 651 Máx. 825</b>				<b>60°</b>
<b>Mín. 352 Máx. 695</b>				<b>75°</b>
<b>Mín. 466 Máx. 604</b>				<b>90°</b>
<b>Mín. 445 Máx. 514</b>				<b>120°</b>

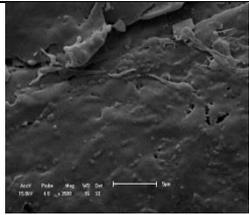
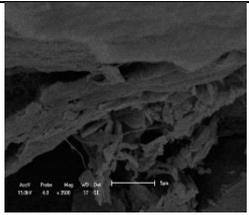
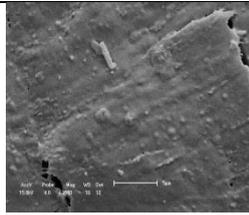
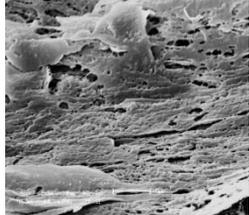
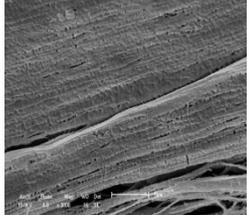
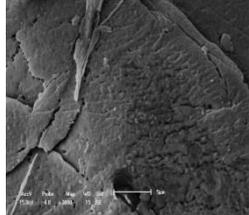
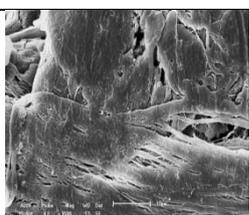
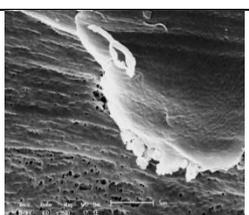
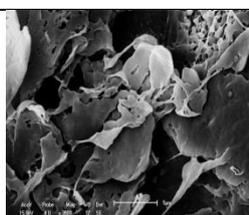
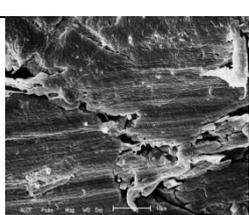
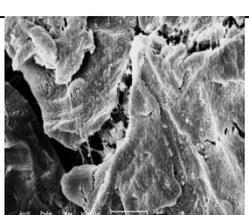
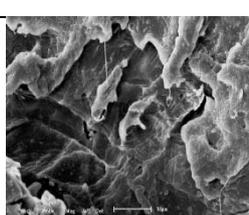
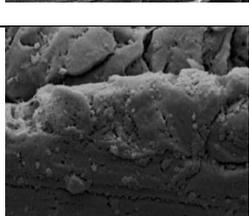
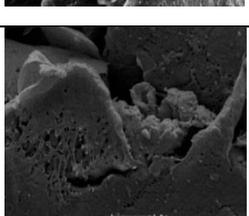
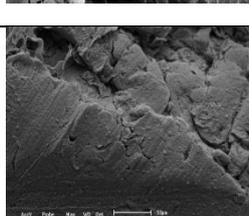
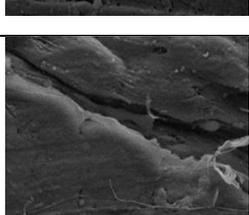
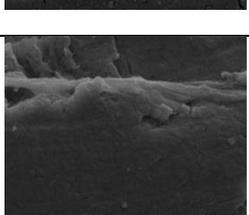
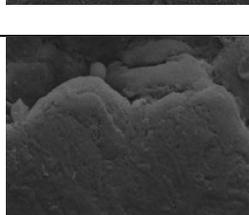
**Figura A18:** Mapa de desgaste da Região Borda dos compósitos com composição (99:1) para cada ângulo de ponta ensaiado

<b>Composição 2% de carga mineral</b>				
<b>Energia(J)</b>	<b>Z1</b>	<b>Z2</b>	<b>Z3</b>	
<b>Mín. 716 Máx. 1173</b>				<b>30°</b>
<b>Mín. 398 Máx. 804</b>				<b>45°</b>
<b>Mín. 375 Máx. 820</b>				<b>60°</b>
<b>Mín. 398 Máx. 649</b>				<b>75°</b>
<b>Mín. 421 Máx. 736</b>				<b>90°</b>
<b>Mín. 491 Máx. 651</b>				<b>120°</b>

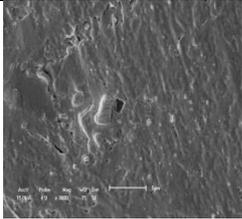
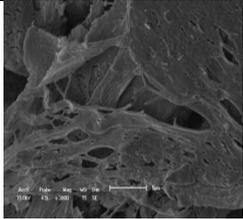
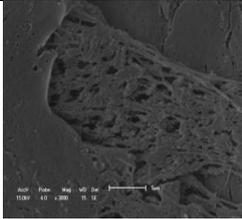
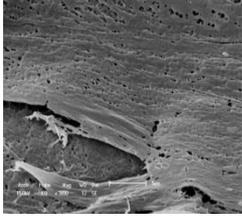
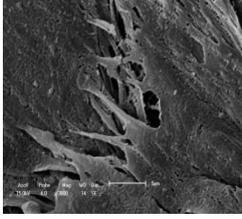
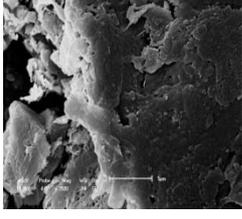
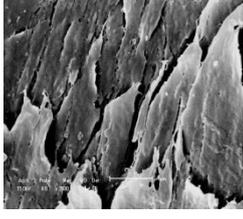
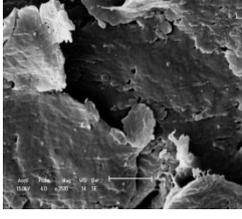
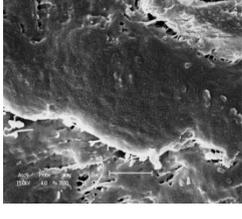
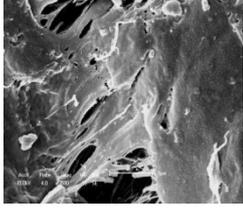
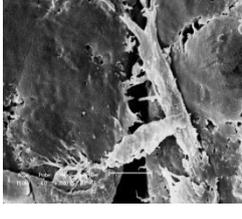
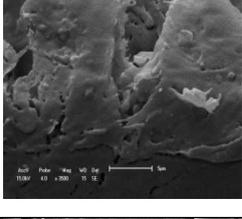
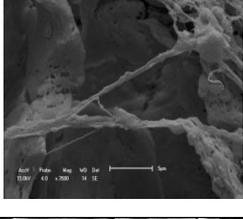
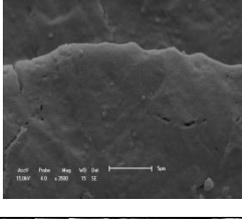
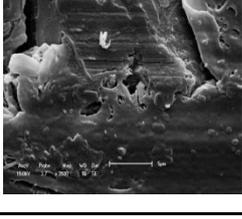
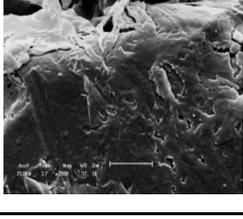
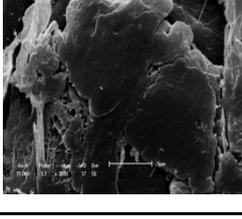
**Figura A19:** Mapa de desgaste da Região Borda dos compósitos com composição (98:2) para cada ângulo de ponta ensaiado

<b>Composição 3% de carga mineral</b>				
<b>Energia</b>	<b>Z1</b>	<b>Z2</b>	<b>Z3</b>	
<b>Mín. 490 Máx. 759</b>				<b>30°</b>
<b>Mín. 445 Máx. 734</b>				<b>45°</b>
<b>Mín. 514 Máx. 716</b>				<b>60°</b>
<b>Mín. 468 Máx. 941</b>				<b>75°</b>
<b>Mín. 375 Máx. 514</b>				<b>90°</b>
<b>Mín. 421 Máx. 560</b>				<b>120°</b>

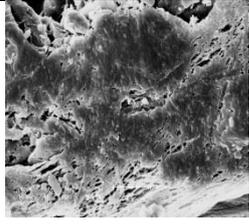
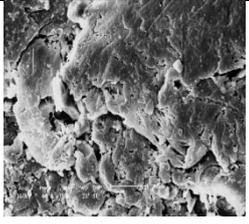
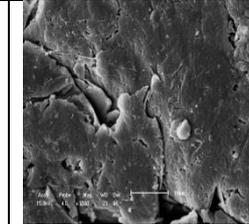
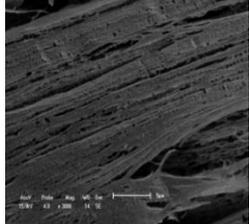
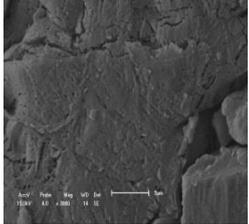
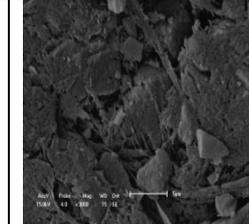
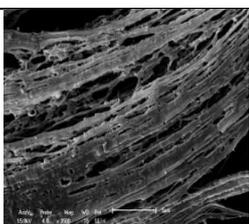
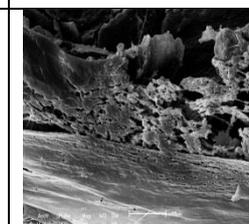
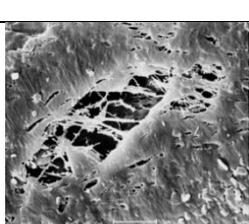
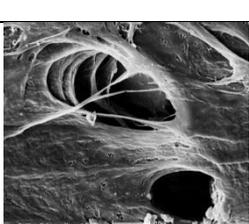
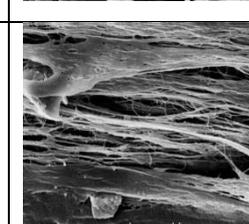
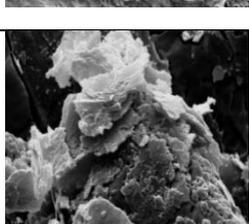
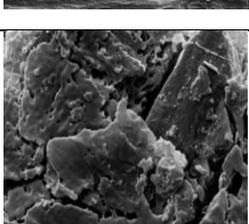
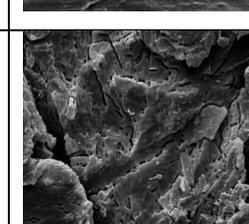
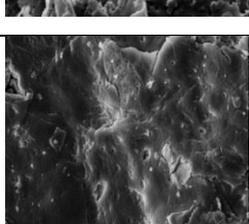
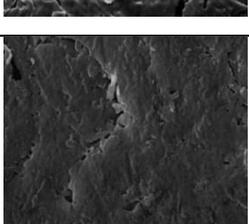
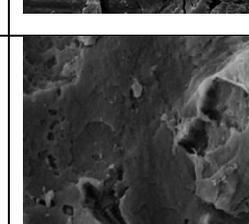
**Figura A20:** Mapa de desgaste da Região Borda dos compósitos com composição (97:3) para cada ângulo de ponta ensaiado

<b>Composição 5% de carga mineral</b>				
<b>Energia</b>	<b>Z1</b>	<b>Z2</b>	<b>Z3</b>	
<b>Mín. 797 Máx. 1072</b>				<b>30°</b>
<b>Mín. 514 Máx. 1003</b>				<b>45°</b>
<b>Mín. 627 Máx. 867</b>				<b>60°</b>
<b>Mín. 664 Máx. 862</b>				<b>75°</b>
<b>Mín. 398 Máx. 905</b>				<b>90°</b>
<b>Mín. 393 Máx. 871</b>				<b>120°</b>

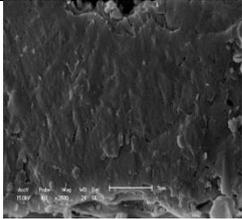
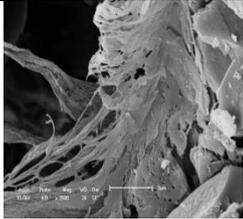
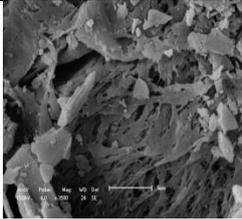
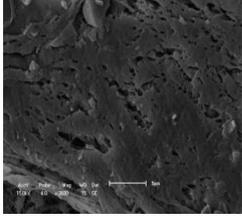
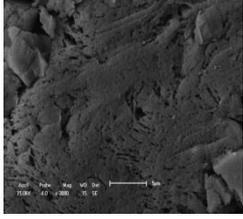
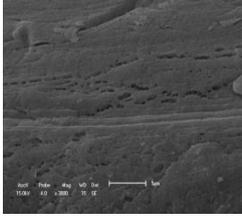
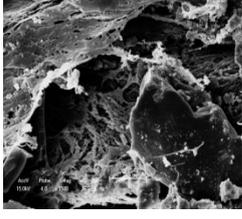
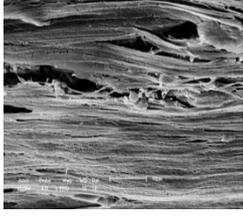
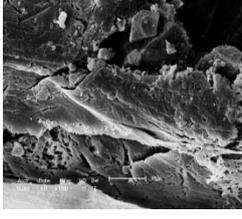
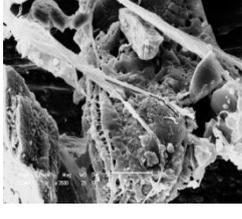
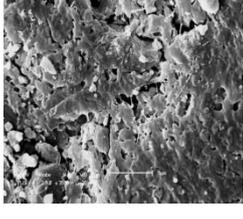
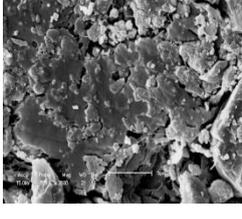
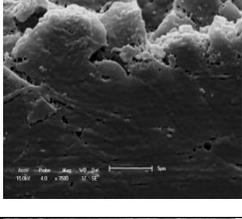
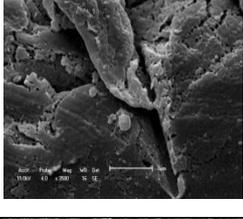
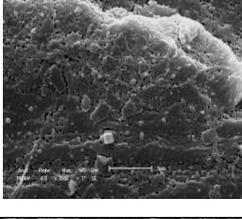
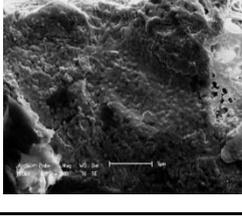
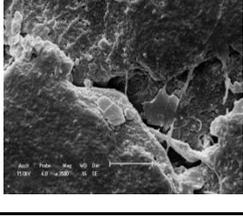
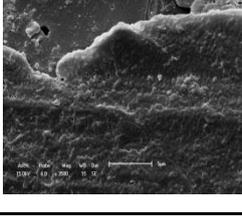
**Figura A21:** Mapa de desgaste da Região Borda dos compósitos com composição (95:5) para cada ângulo de ponta ensaiado

<b>Composição 10% de carga mineral</b>				
<b>Energia</b>	<b>Z1</b>	<b>Z2</b>	<b>Z3</b>	
<b>Mín. 47 Máx. 390</b>				<b>30°</b>
<b>Mín. 280 Máx. 437</b>				<b>45°</b>
<b>Mín. 164 Máx. 446</b>				<b>60°</b>
<b>Mín. 164 Máx. 480</b>				<b>75°</b>
<b>Mín. 368 Máx. 772</b>				<b>90°</b>
<b>Mín. 326 Máx. 505</b>				<b>120°</b>

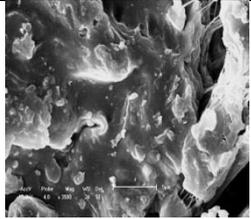
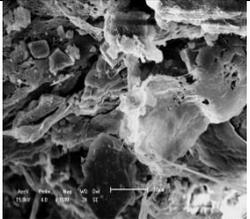
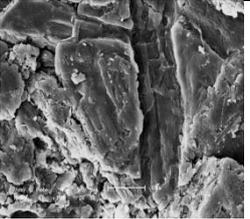
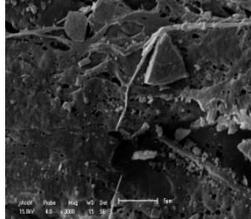
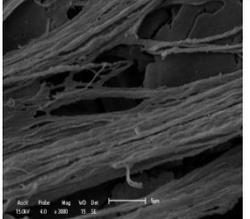
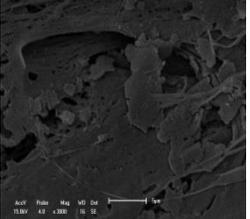
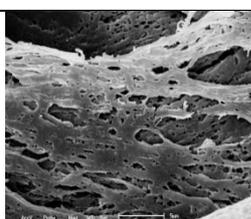
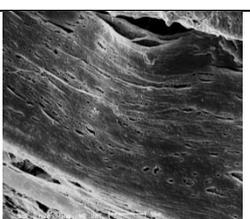
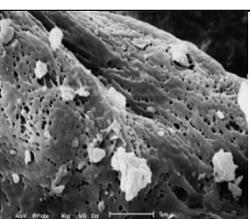
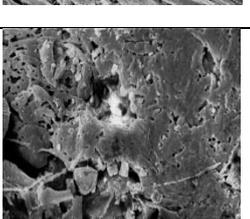
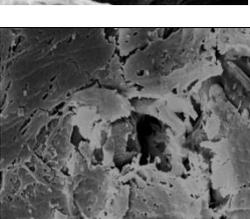
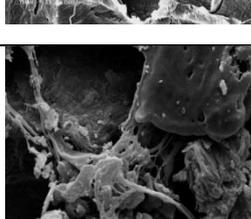
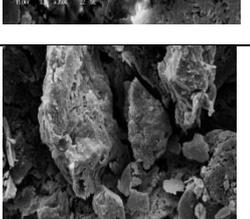
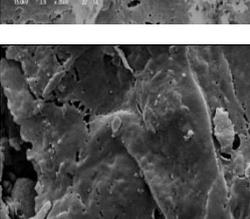
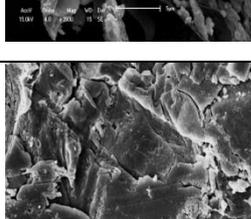
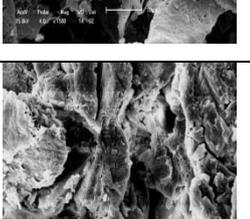
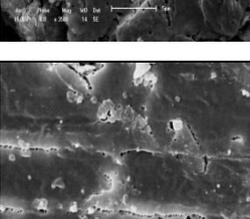
**Figura A22:** Mapa de desgaste da Região Borda dos compósitos com composição (90:10) para cada ângulo de ponta ensaiado

<b>Composição 20% de carga mineral</b>				
<b>Energia</b>	<b>Z1</b>	<b>Z2</b>	<b>Z3</b>	
Mín. 233 Máx. 783				<b>30°</b>
Mín. 164 Máx. 374				<b>45°</b>
Mín. 94 Máx. 461				<b>60°</b>
Mín. 454 Máx. 812				<b>75°</b>
Mín. 210 Máx. 761				<b>90°</b>
Mín. 278 Máx. 414				<b>120°</b>

**Figura A23:** Mapa de desgaste da Região Borda dos compósitos com composição (80:20) para cada ângulo de ponta ensaiado

<b>Composição 30% de carga mineral</b>				
<b>Energia</b>	<b>Z1</b>	<b>Z2</b>	<b>Z3</b>	
<b>Mín. 47 Máx. 390</b>				<b>30°</b>
<b>Mín. 280 Máx. 437</b>				<b>45°</b>
<b>Mín. 164 Máx. 446</b>				<b>60°</b>
<b>Mín. 164 Máx. 480</b>				<b>75°</b>
<b>Mín. 368 Máx. 772</b>				<b>90°</b>
<b>Mín. 326 Máx. 505</b>				<b>120°</b>

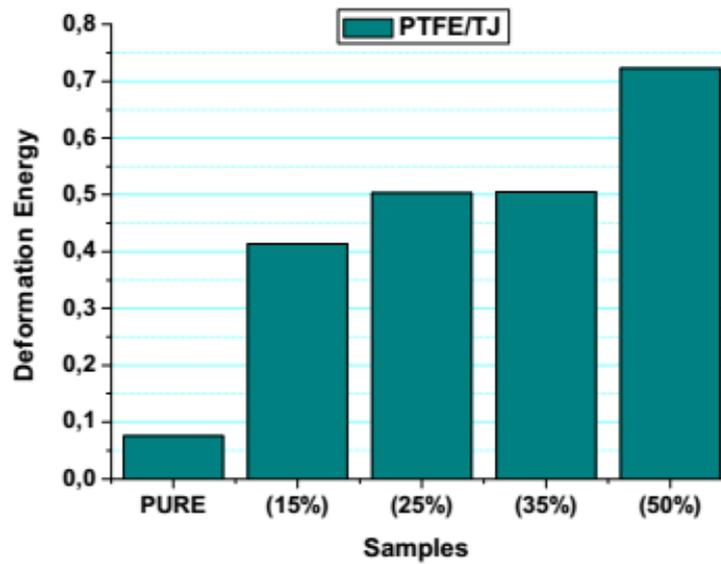
**Figura A24:** Mapa de desgaste da Região Borda dos compósitos com composição (70:30) para cada ângulo de ponta ensaiado

<b>Composição 50% de carga mineral</b>				
<b>Energia</b>	<b>Z1</b>	<b>Z2</b>	<b>Z3</b>	
Mín. 582 Máx. 818				<b>30°</b>
Mín. 736 Máx. 867				<b>45°</b>
Mín. 671 Máx. 1072				<b>60°</b>
Mín. 514 Máx. 820				<b>75°</b>
Mín. 398 Máx. 759				<b>90°</b>
Mín. 491 Máx. 695				<b>120°</b>

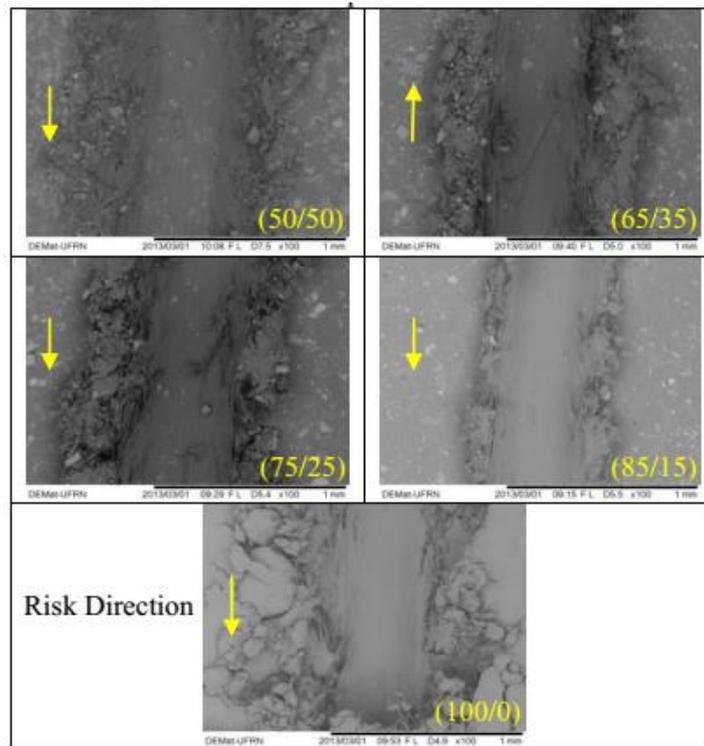
**Figura A25:** Mapa de desgaste da Região Borda dos compósitos com composição (50:50) para cada ângulo de ponta ensaiado

## Apêndice B

### Desempenho tribológico do compósito PTFE + Rejeito de Scheelita



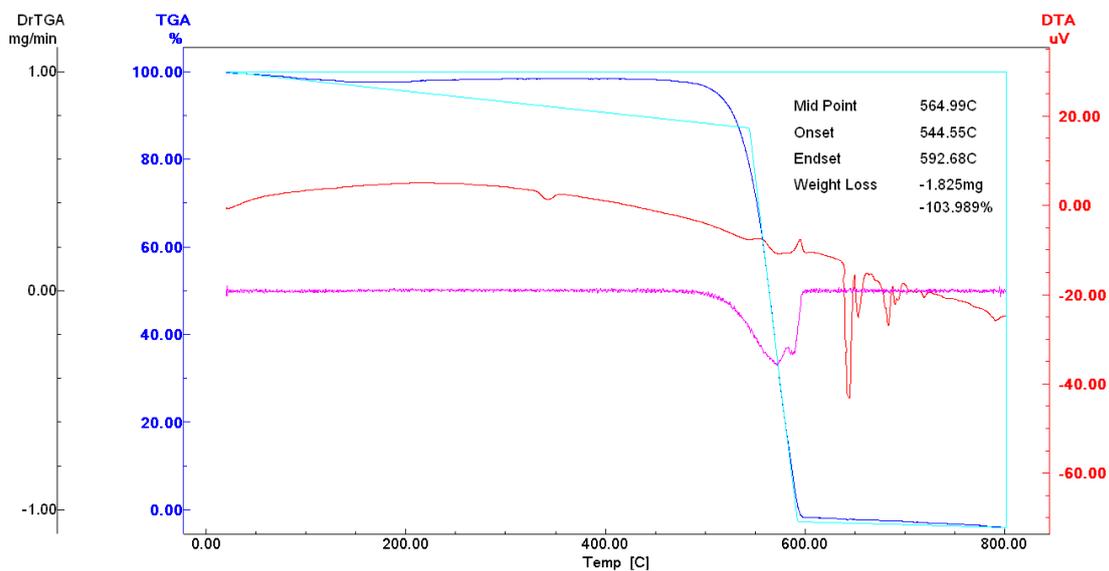
**Figura B1:** Energia de deformação de compósitos PTFE + Rejeito de Scheelita, nas composições (PTFE 85% : Rejeito 15%, PTFE 75% : Rejeito 25%, PTFE 65% : Rejeito 35% e PTFE 50% : Rejeito 50%)



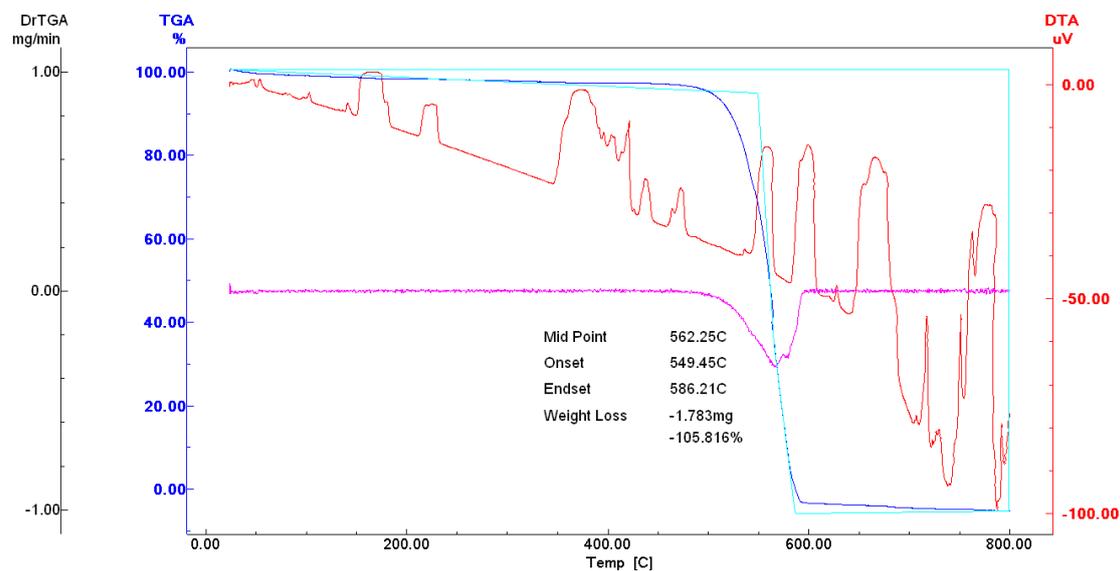
**Figura B2:** Imagens de MEV dos riscos gerados pelo ângulo de ponta de 30° para os compósitos PTFE + Rejeito de Scheelita, nas composições (PTFE 85% : Rejeito 15%, PTFE 75% : Rejeito 25%, PTFE 65% : Rejeito 35% e PTFE 50% : Rejeito 50%)

## Apêndice C

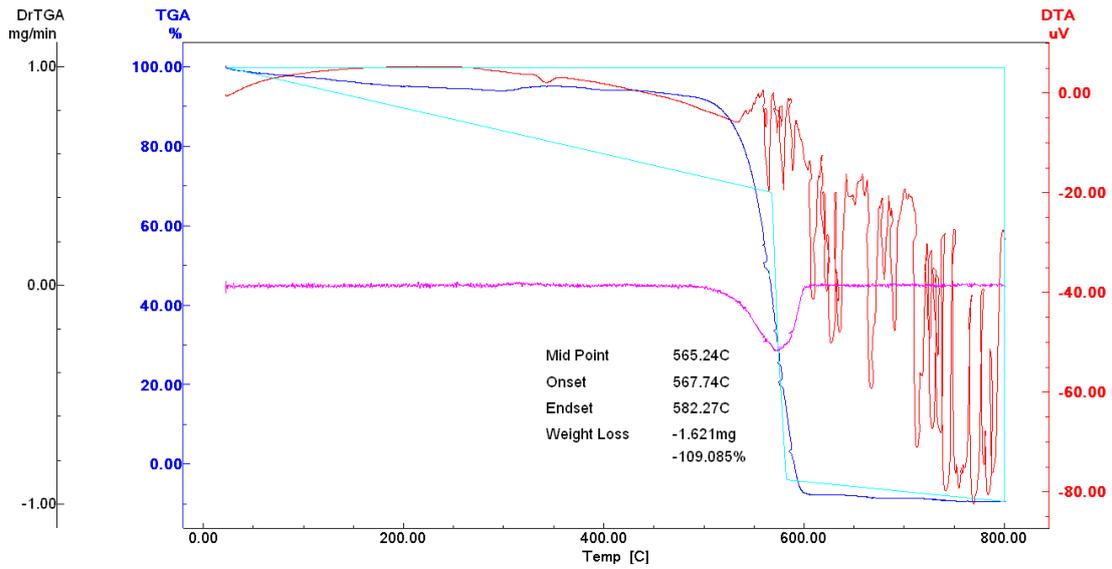
### Análises químicas (TGA e DSC) dos compósitos PTFE + Rejeito de Scheelita



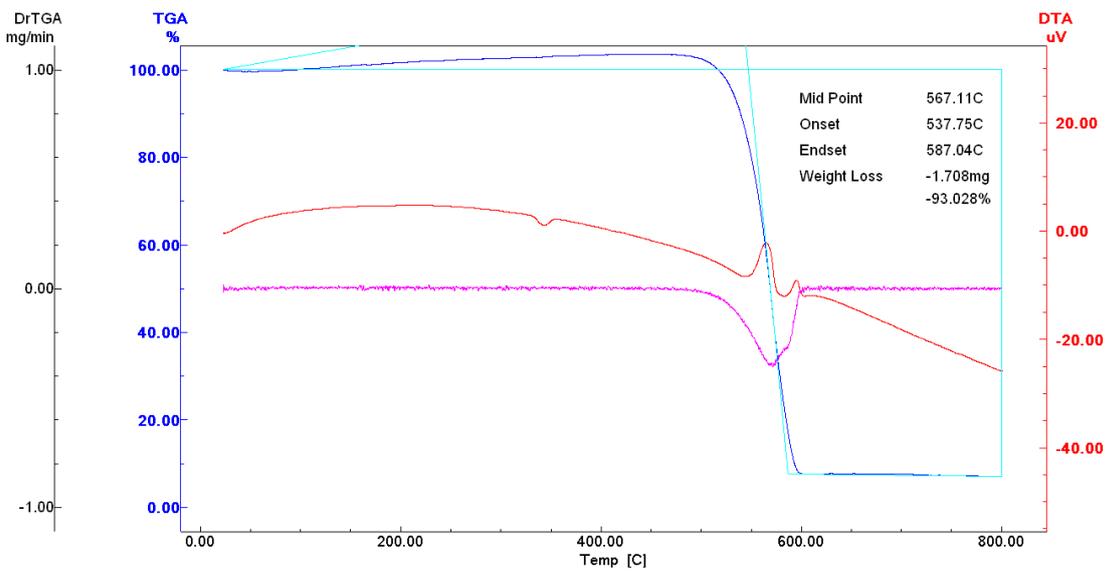
**Figura C1:** Curva da análise termogravimétrica do compósito PTFE + Rejeito de Scheelita (99:1)



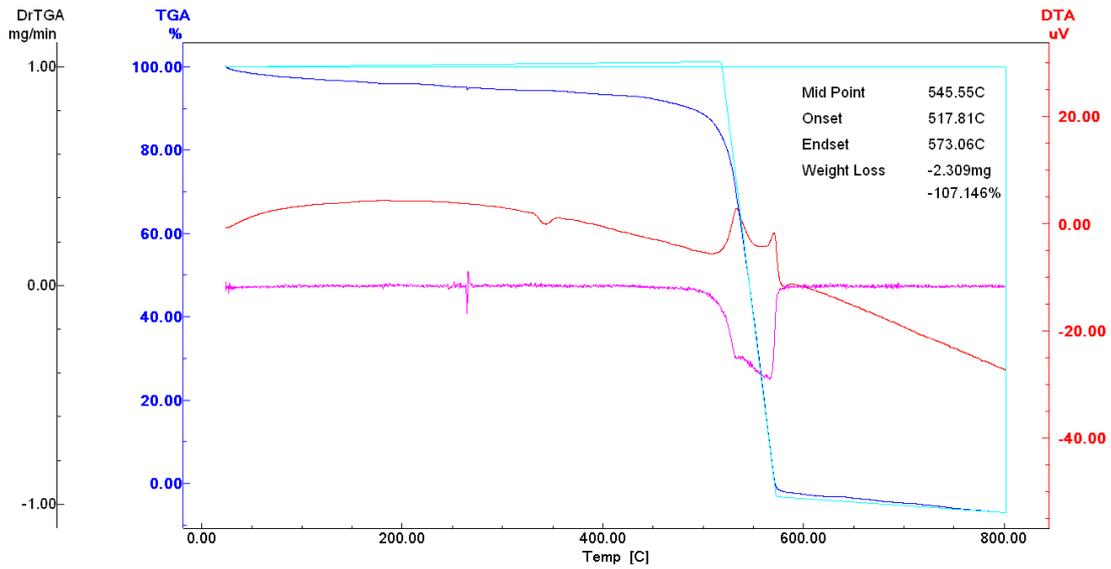
**Figura C2:** Curva da análise termogravimétrica do compósito PTFE + Rejeito de Scheelita (99:2)



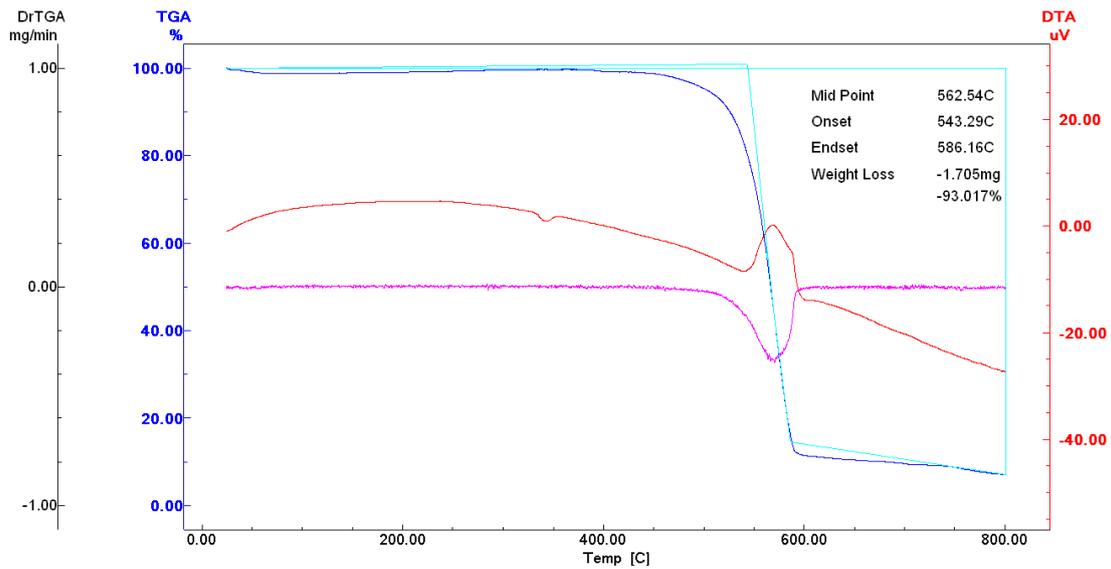
**Figura C3:** Curva da análise termogravimétrica do compósito PTFE + Rejeito de Scheelita (97:3)



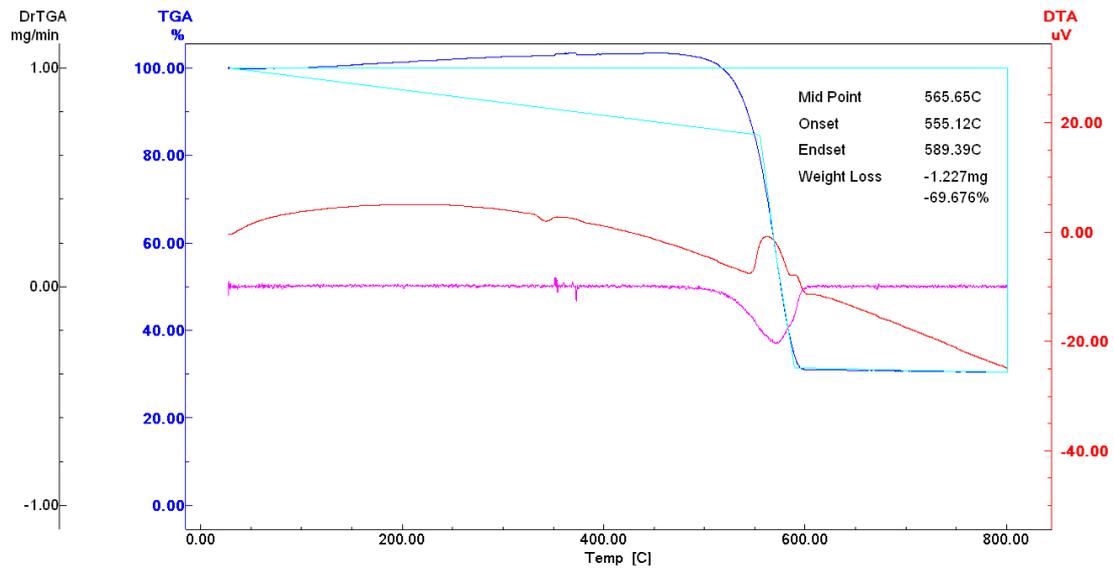
**Figura C4:** Curva da análise termogravimétrica do compósito PTFE + Rejeito de Scheelita (95:5)



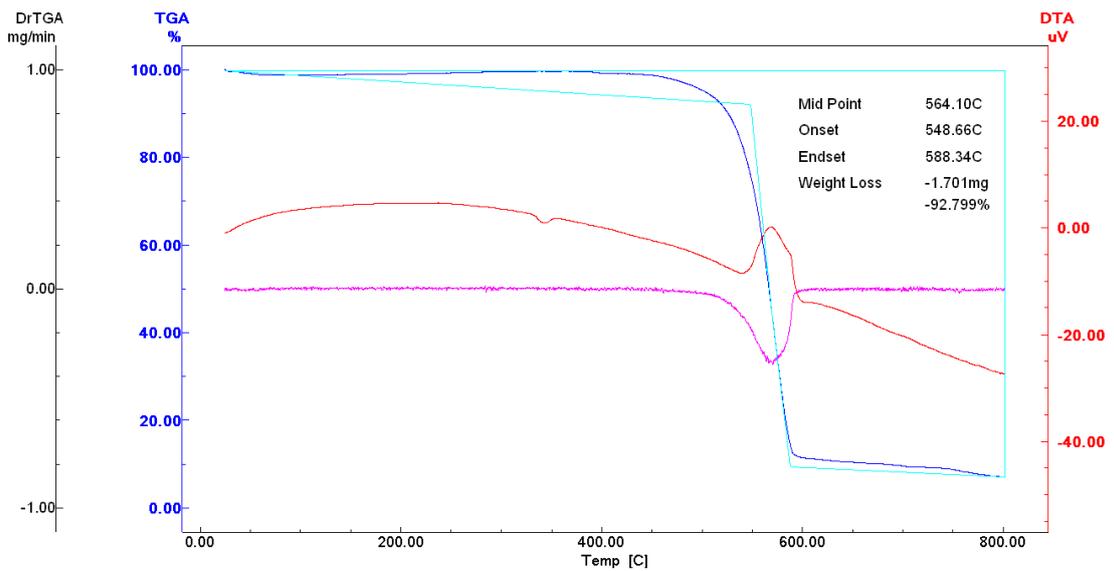
**Figura C5:** Curva da análise termogravimétrica do compósito PTFE + Rejeito de Scheelita (90:10)



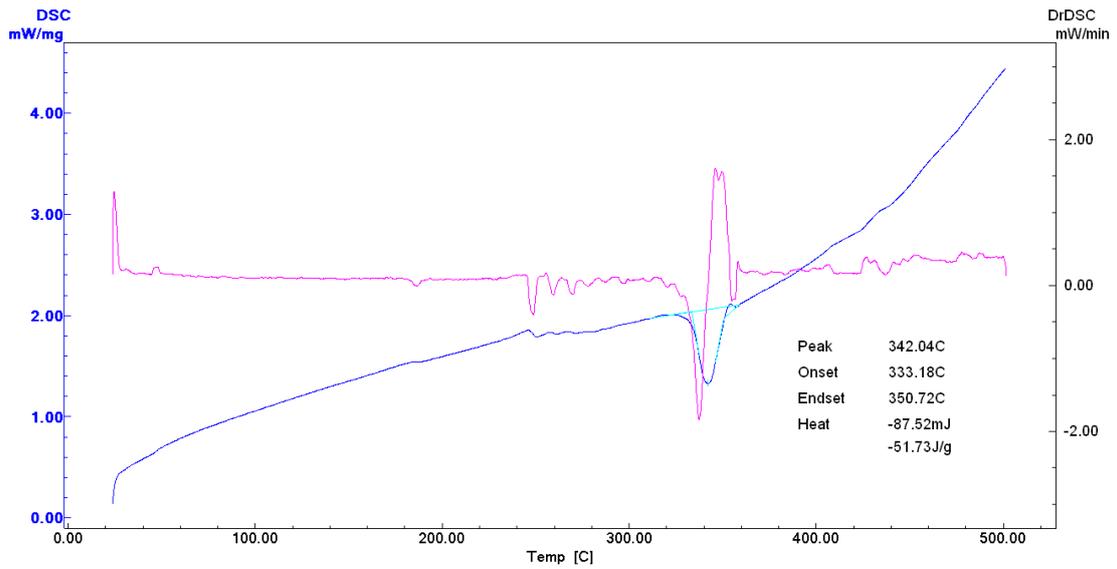
**Figura C6:** Curva da análise termogravimétrica do compósito PTFE + Rejeito de Scheelita (80:20)



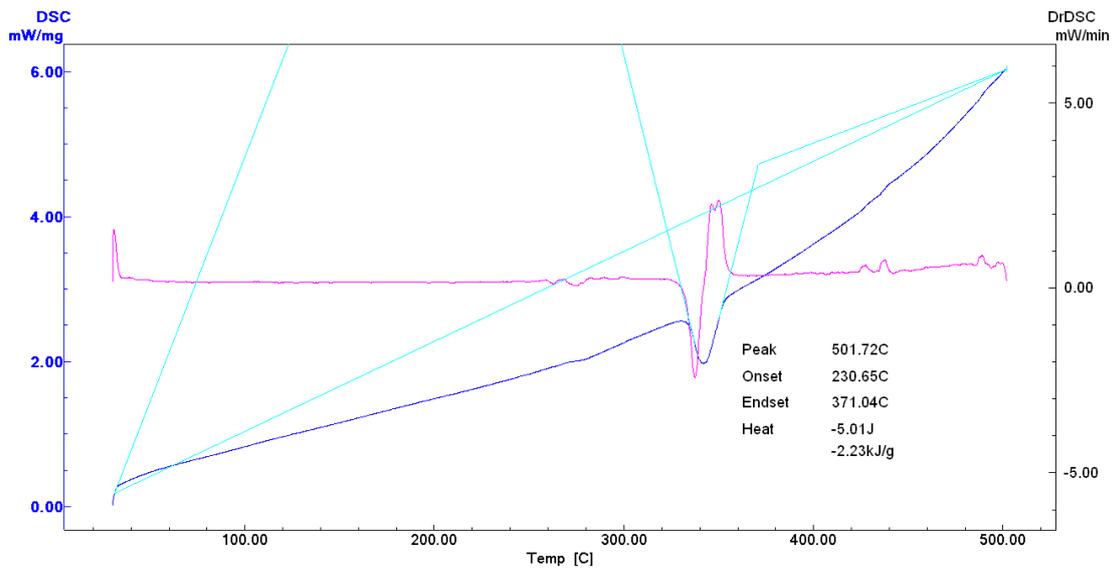
**Figura C7:** Curva da análise termogravimétrica do compósito PTFE + Rejeito de Scheelita (70:30)



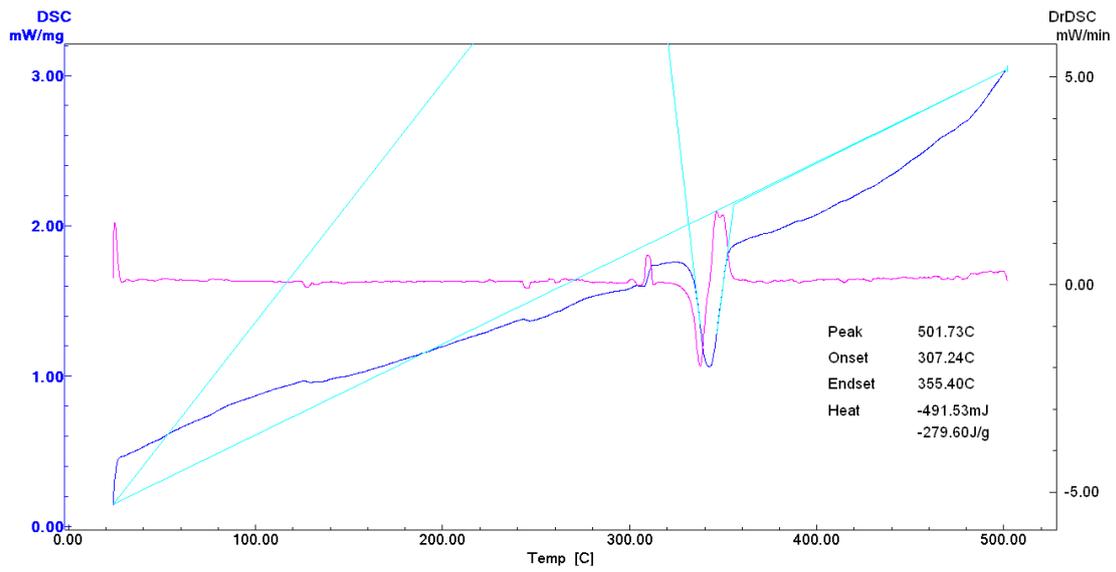
**Figura C8:** Curva da análise termogravimétrica do compósito PTFE + Rejeito de Scheelita (50:50)



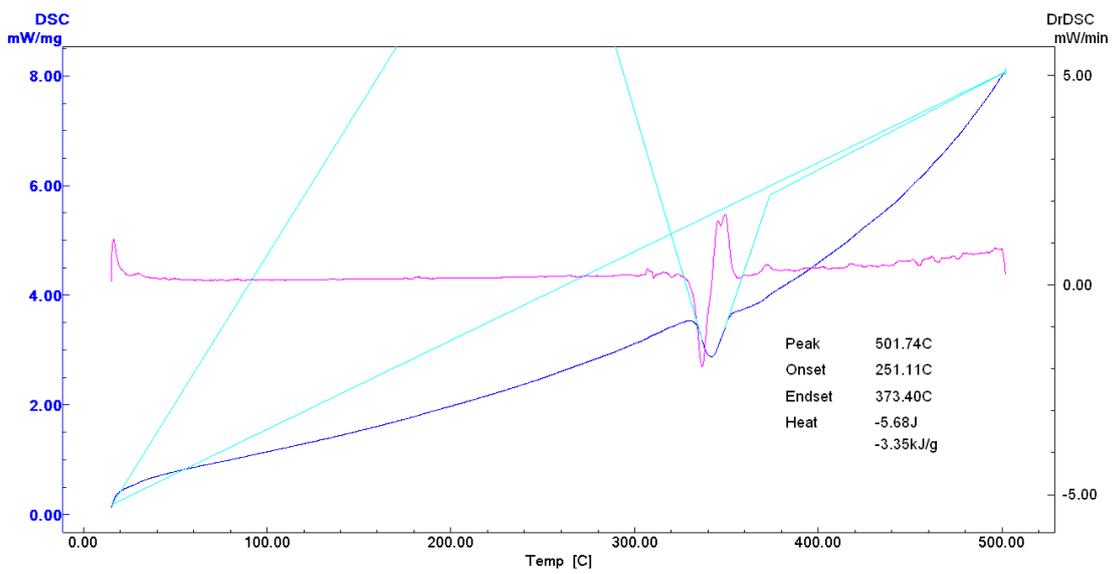
**Figura C9:** Curvas resultantes da Análise de DSC do compósito PTFE + Rejeito de Scheelita (99:1)



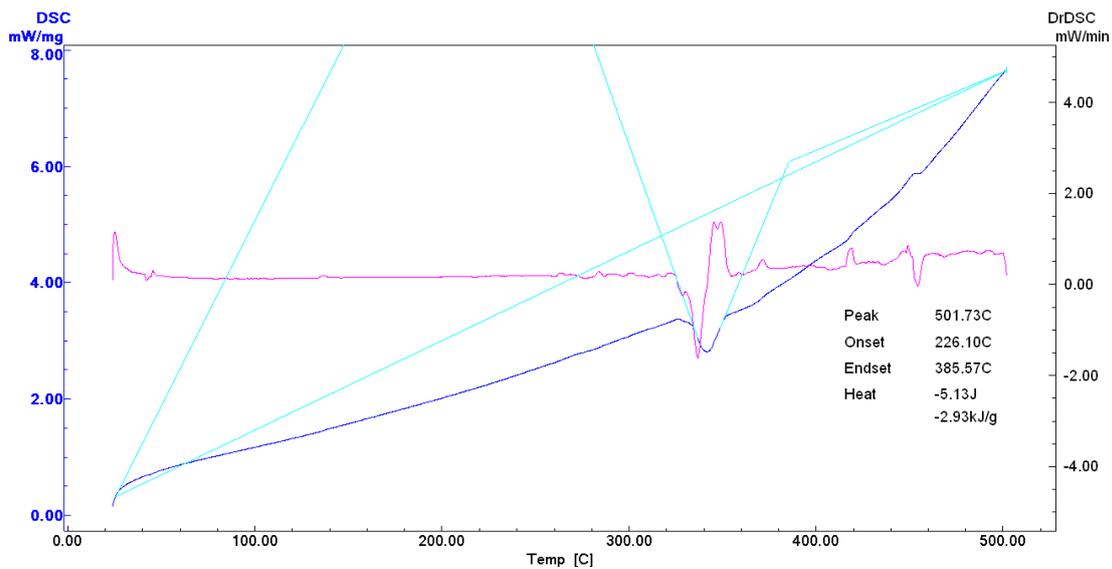
**Figura C10:** Curvas resultantes da Análise de DSC do compósito PTFE + Rejeito de Scheelita (98:2)



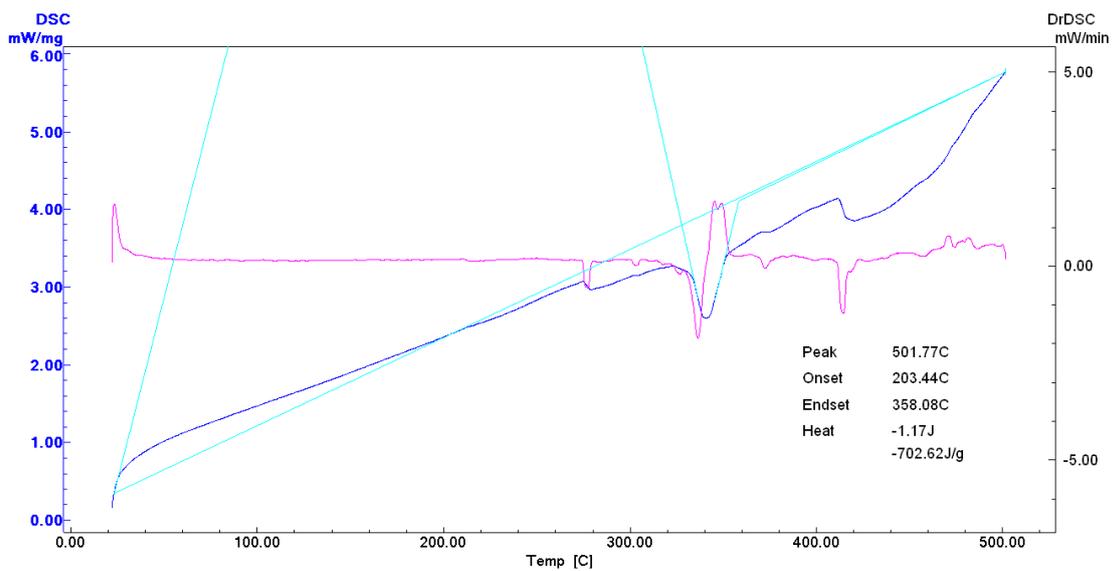
**Figura C11:** Curvas resultantes da Análise de DSC do compósito PTFE + Rejeito de Scheelita (97:3)



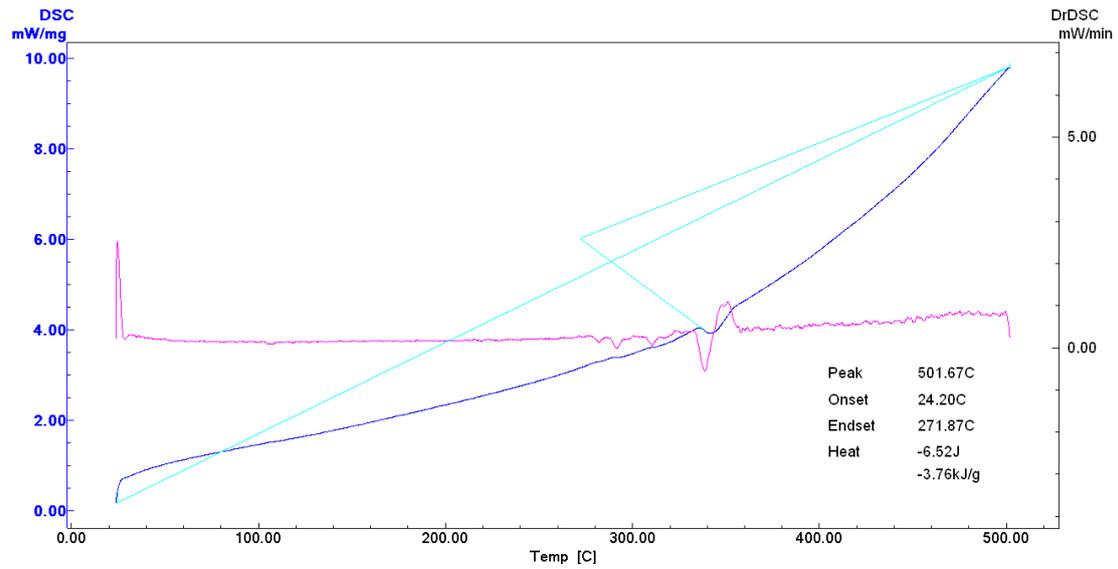
**Figura C12:** Curvas resultantes da Análise de DSC do compósito PTFE + Rejeito de Scheelita (95:5)



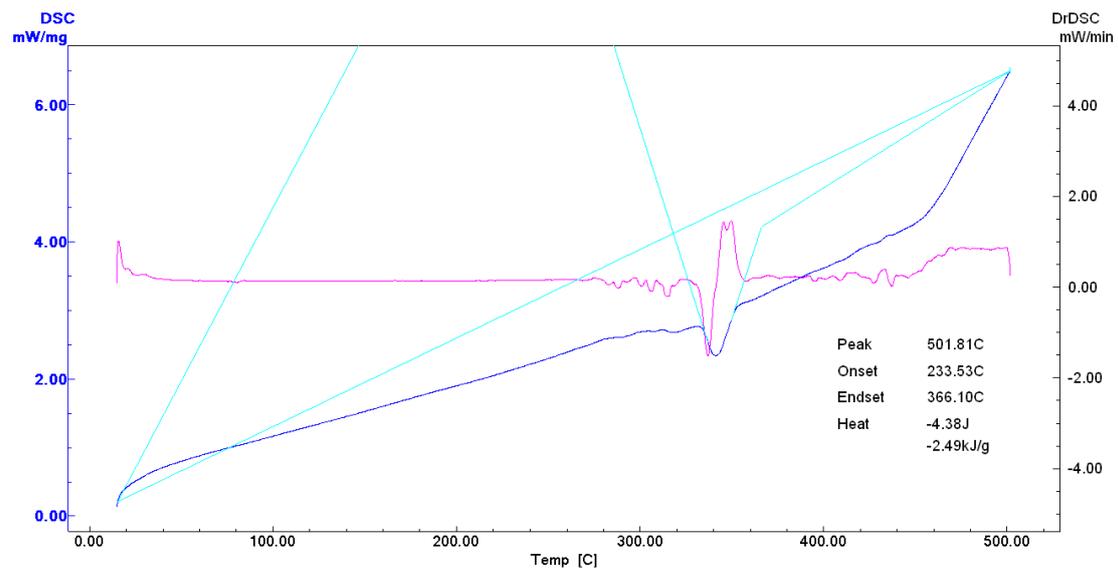
**Figura C13:** Curvas resultantes da Análise de DSC do compósito PTFE + Rejeito de Scheelita (90:10)



**Figura C14:** Curvas resultantes da Análise de DSC do compósito PTFE + Rejeito de Scheelita (80:20)



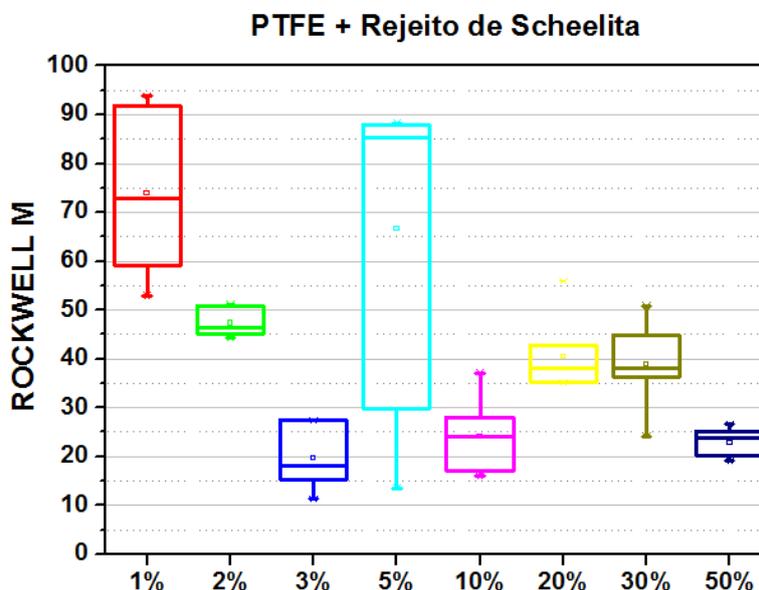
**Figura C15:** Curvas resultantes da Análise de DSC do compósito PTFE + Rejeito de Scheelita (70:30)



**Figura C16:** Curvas resultantes da Análise de DSC do compósito PTFE + Rejeito de Scheelita (50:50)

## Apêndice D

### Dureza Rockwell M dos compósitos PTFE + Rejeito de Scheelita



**Figura D1:** Dureza Rockwell M dos compósitos PTFE + Rejeito de Scheelita

Para a dureza Rockwell M verificou-se uma demasiada dispersão nos resultados das composições com 2 e 5%, variando de 15 a 88 HRM no caso da composição com 5%.

Percebe-se também a existência de uma tendência semelhante a apresentada pela dureza Shore D, onde os compósitos com baixo teor de Rejeito de Scheelita seguem uma tendência decrescente linear com o aumento do Rejeito, enquanto que as composições com alto teor de Rejeito de Scheelita seguem uma tendência crescente linear.

No entanto, diferentemente dos resultados da dureza Shore D os valores obtidos para as composições de 1% e 2% de carga mineral foram superiores aqueles obtidos para as composições de 30% e 50%.

## Apêndice E

### Temperatura do contato entre a esfera (pino) e os corpos de prova durante ensaios pino disco

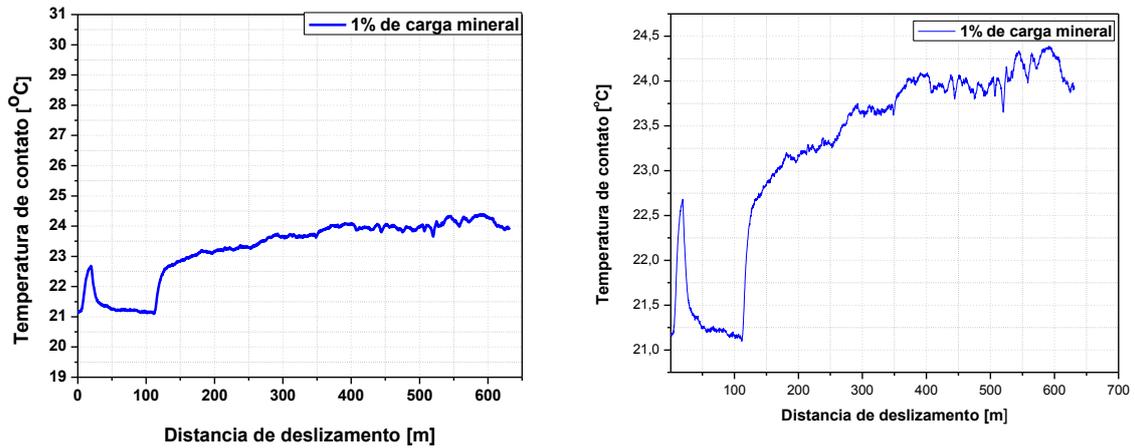


Figura E1: Temperatura de contato durante a distância percorrida do compósito com 1% de carga mineral em ensaios pino disco

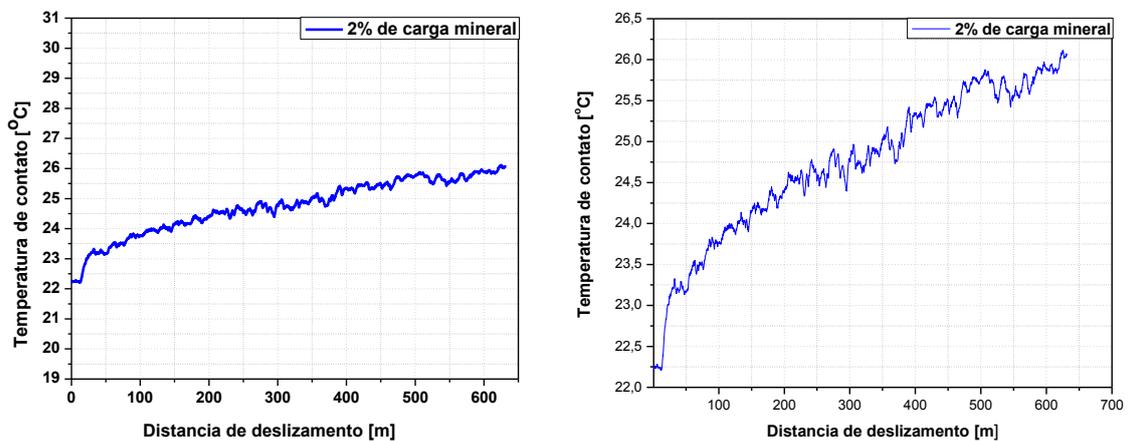
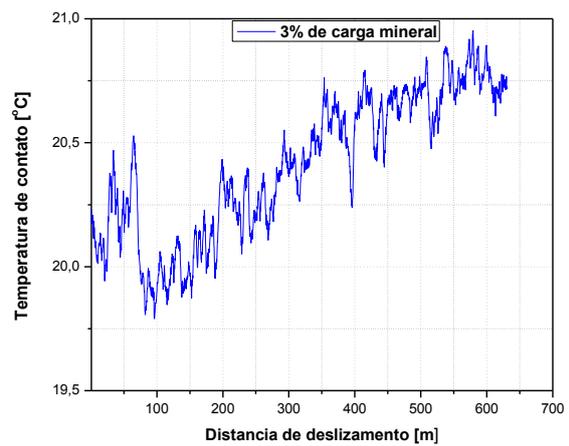
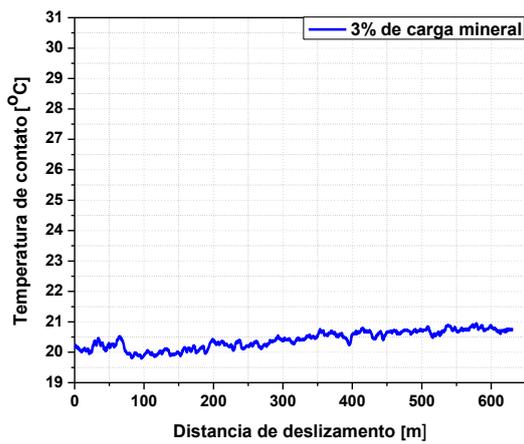
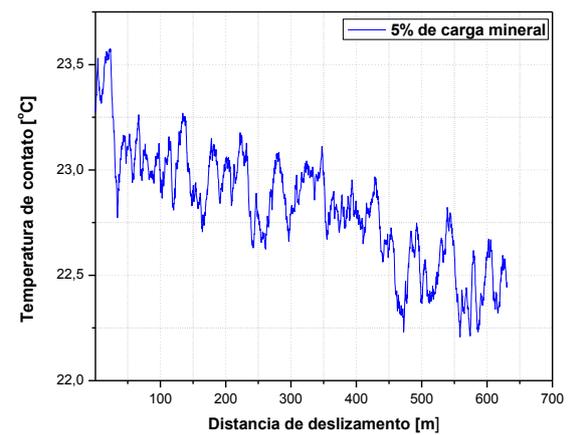
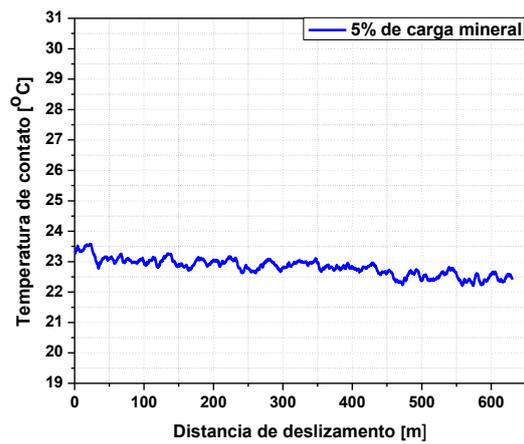


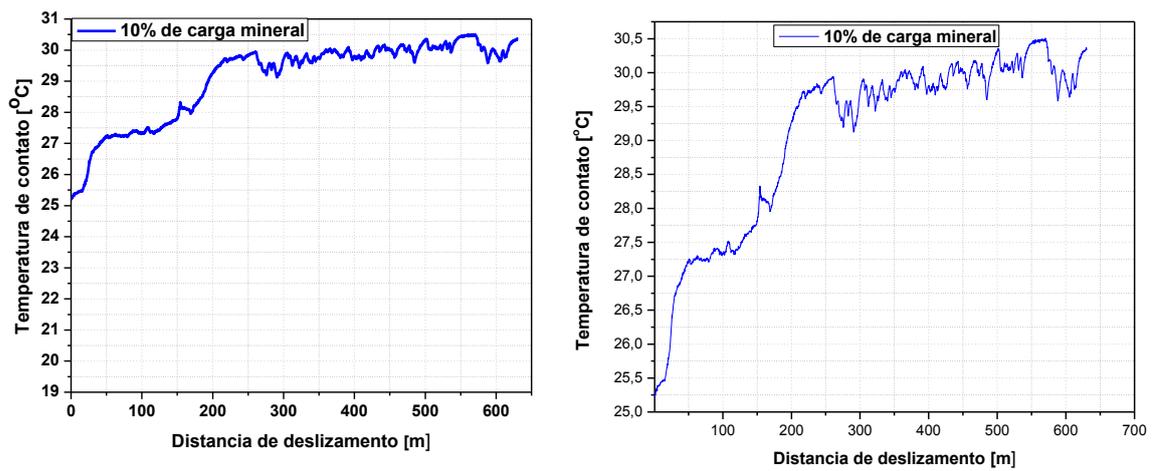
Figura E2: Temperatura de contato durante a distância percorrida do compósito com 2% de carga mineral em ensaios pino disco



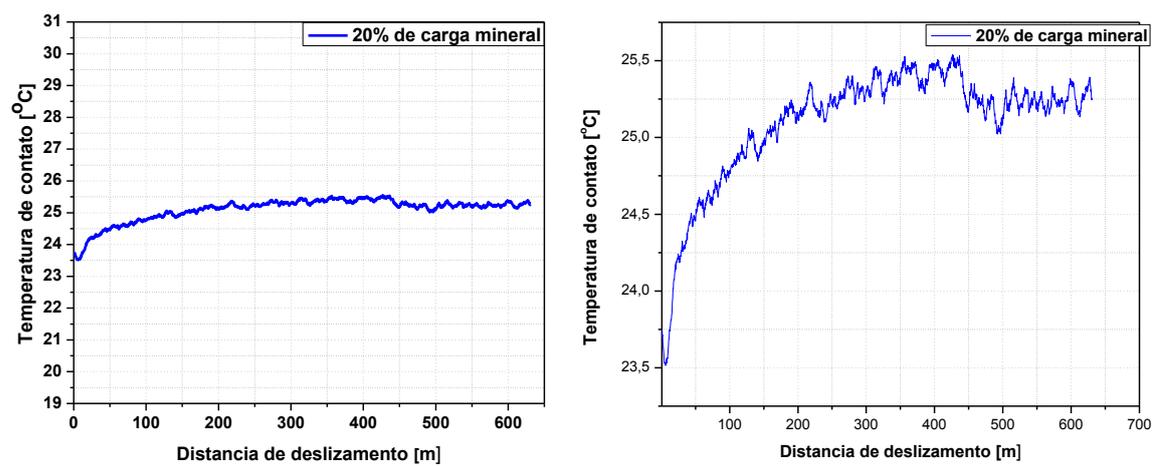
**Figura E3:** Temperatura de contato durante a distância percorrida do compósito com 3% de carga mineral em ensaios pino disco



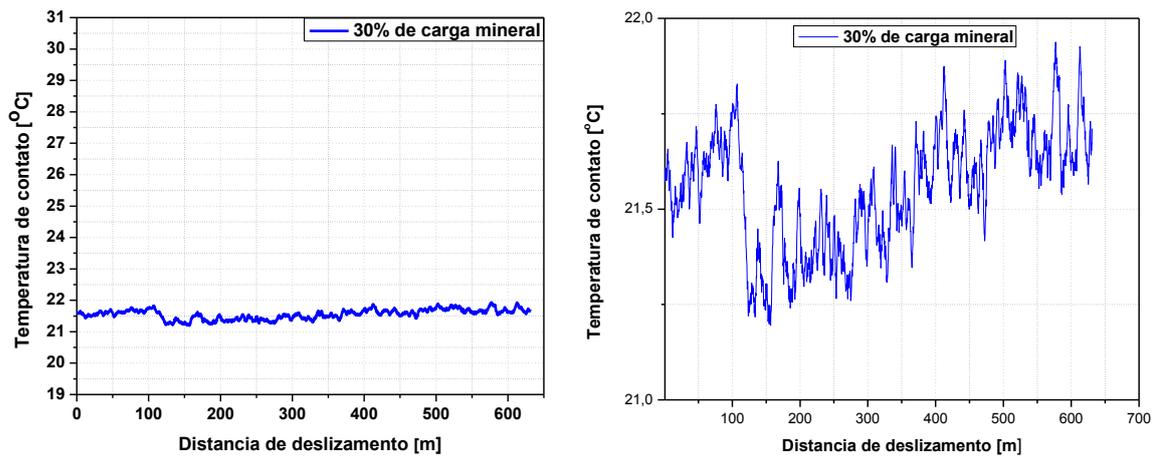
**Figura E4:** Temperatura de contato durante a distância percorrida do compósito com 5% de carga mineral em ensaios pino disco



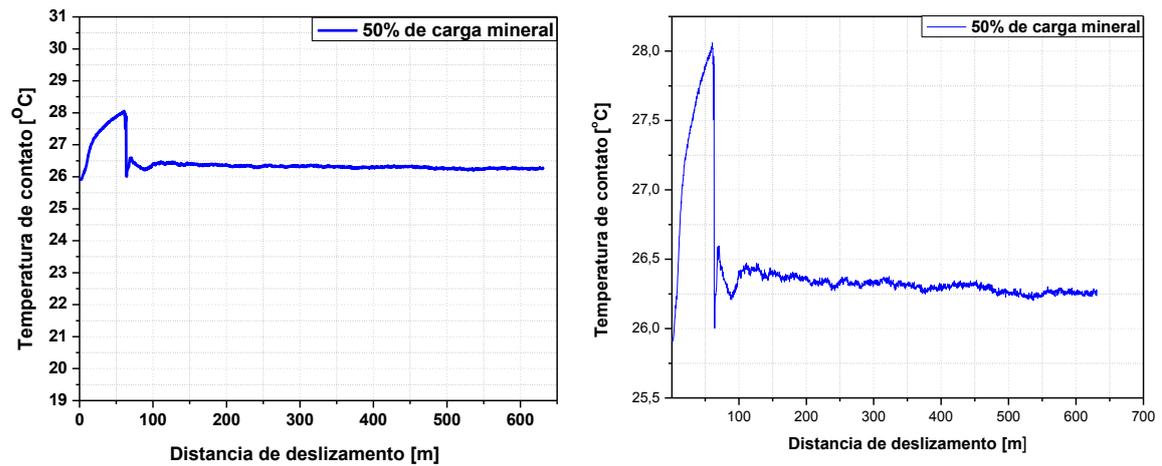
**Figura E5:** Temperatura de contato durante a distância percorrida do compósito com 10% de carga mineral em ensaios pino disco



**Figura E6:** Temperatura de contato durante a distância percorrida do compósito com 20% de carga mineral em ensaios pino disco



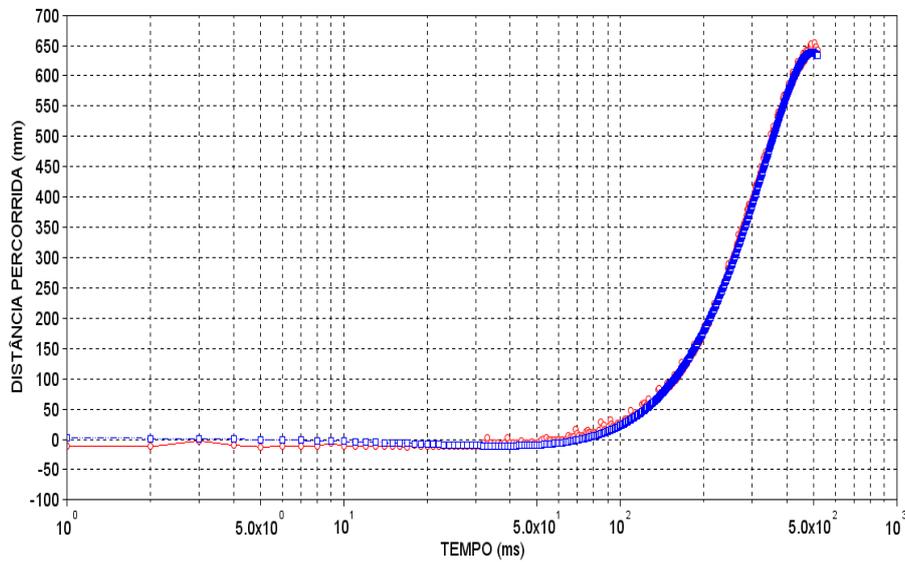
**Figura E7:** Temperatura de contato durante a distância percorrida do compósito com 30% de carga mineral em ensaios pino disco



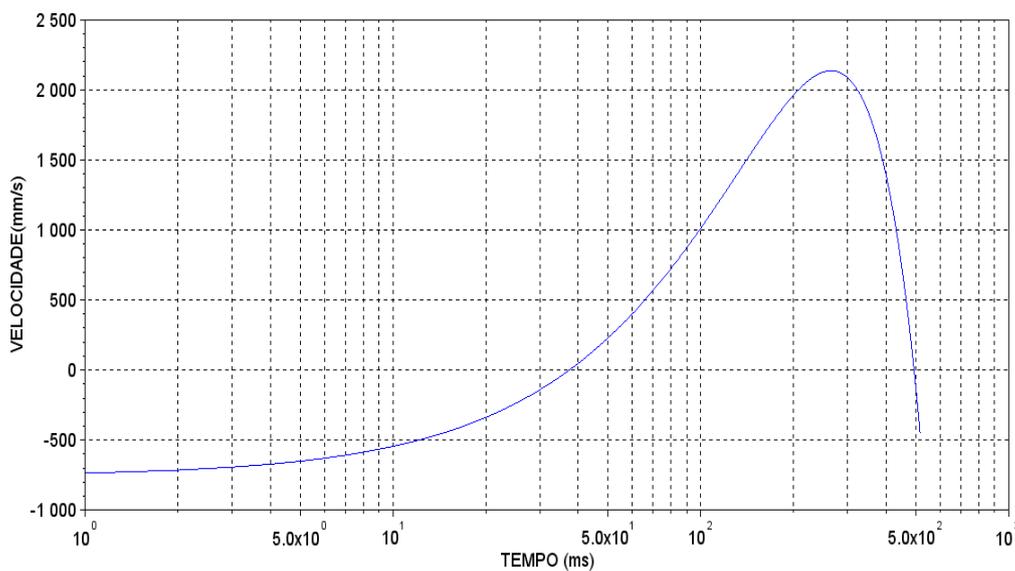
**Figura E8:** Temperatura de contato durante a distância percorrida do compósito com 50% de carga mineral em ensaios pino disco

## Apêndice F

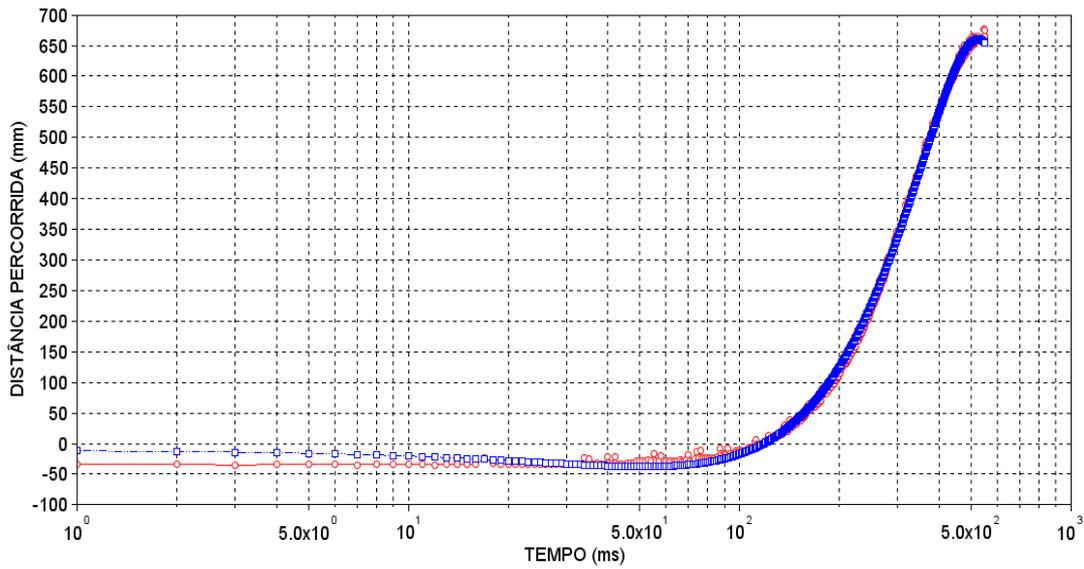
### Registro da Velocidade nos ensaios de esclerometria oficiais



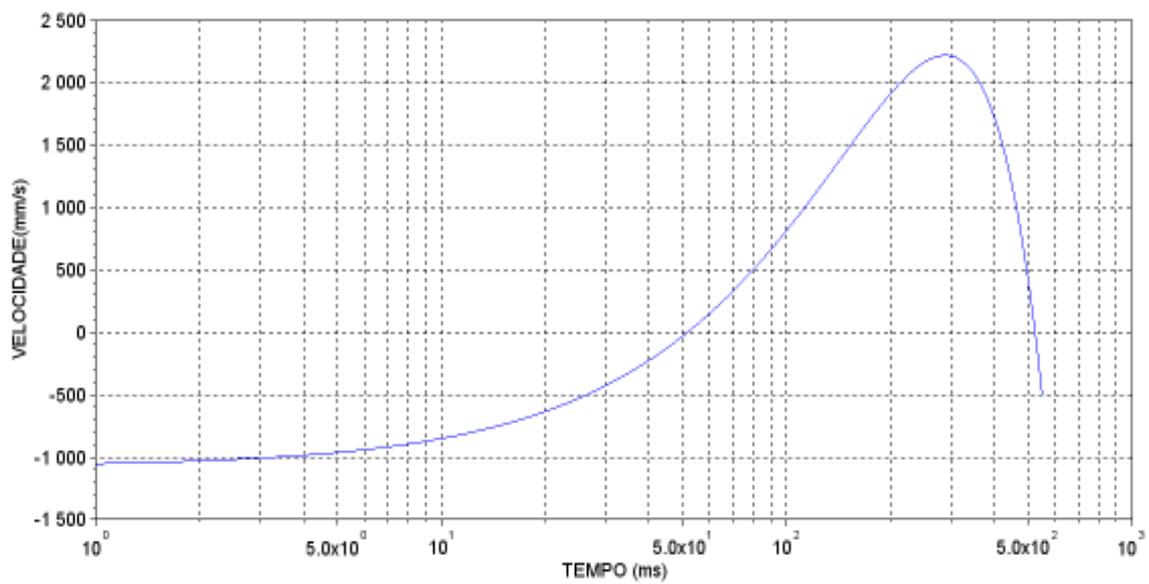
**Figura F1:** Distância percorrida em função do tempo de ensaio para o compósito com 1% de carga mineral



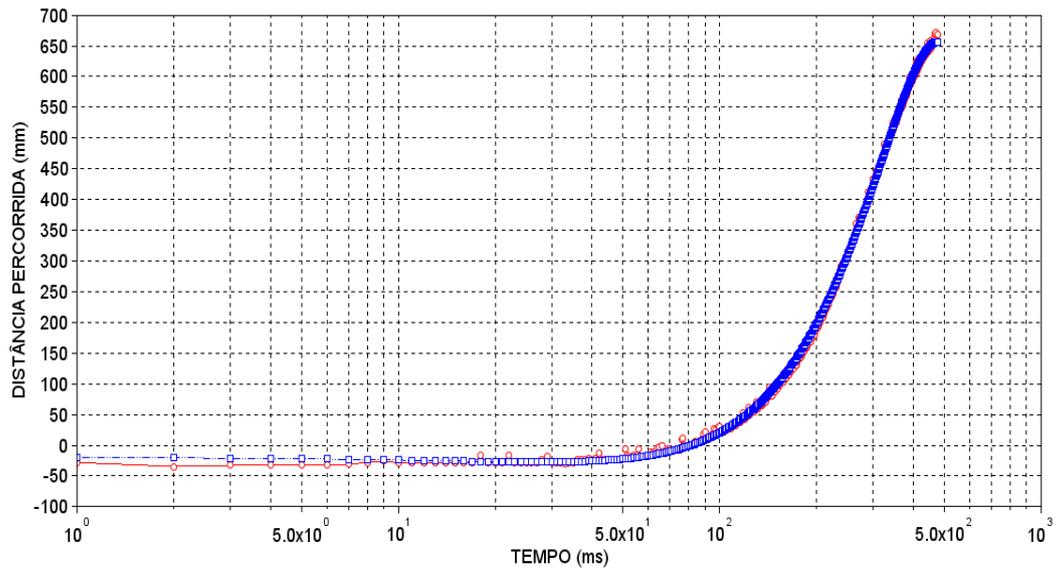
**Figura F2:** Velocidade em função do tempo de ensaio para o compósito com 1% de carga mineral



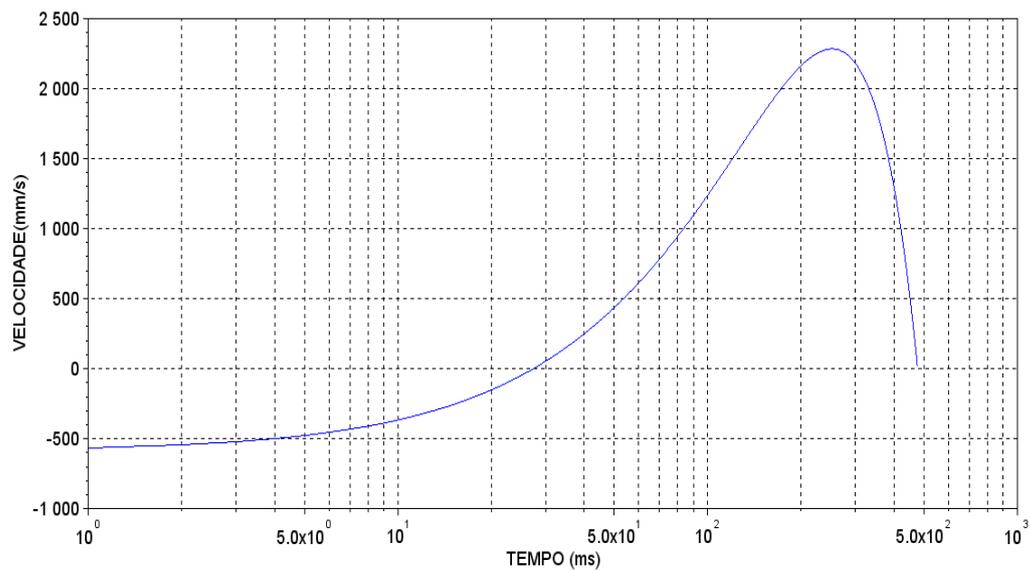
**Figura F3:** Distância percorrida em função do tempo de ensaio para o compósito com 3% de carga mineral



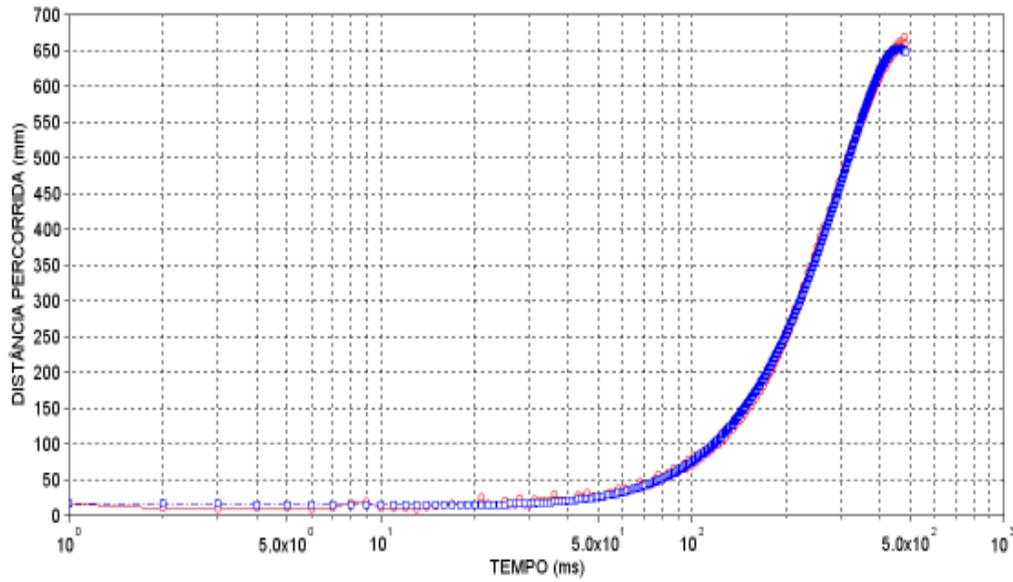
**Figura F4:** Velocidade em função do tempo de ensaio para o compósito com 3% de carga mineral



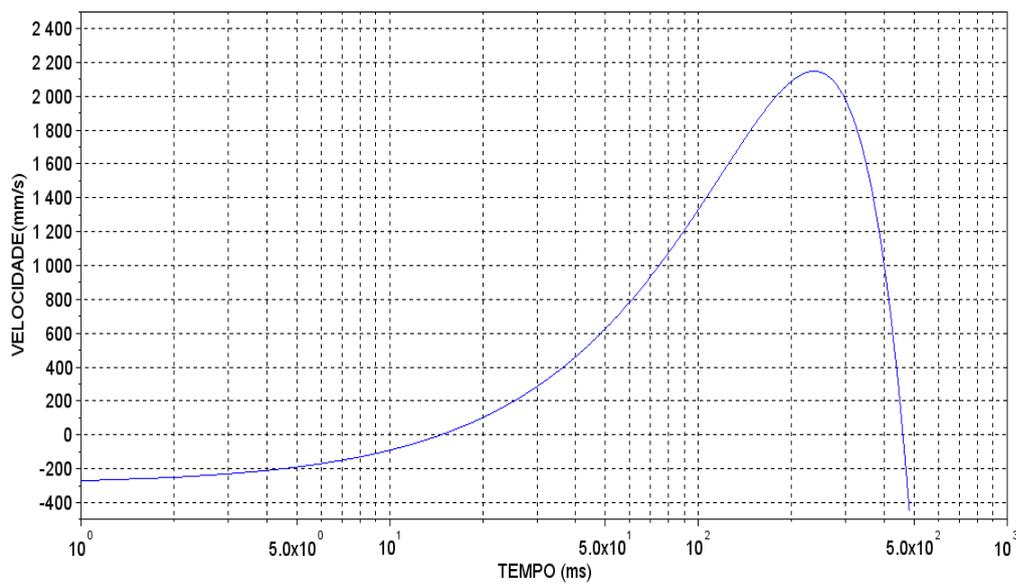
**Figura F5:** Distância percorrida em função do tempo de ensaio para o compósito com 10% de carga mineral



**Figura F6:** Velocidade em função do tempo de ensaio para o compósito com 10% de carga mineral



**Figura F7:** Distância percorrida em função do tempo de ensaio para o compósito com 30% de carga mineral



**Figura F8:** Velocidade em função do tempo de ensaio para o compósito com 30% de carga mineral

## ANEXO A

### **Scheelita**

O mineral Scheelita pertence à classe dos tungstatos e especificamente é um tungstato de cálcio com composição:  $\text{CaWO}_4$  (CaO 19,4% e  $\text{WO}_3$  80,6%), onde usualmente o molibdênio está presente substituindo parcialmente o tungstênio (Figura 15). O nome scheelita foi dado em homenagem ao descobridor do tungstênio, Honors Karl Wilhelm Scheele. Reconhece-se a scheelita por sua elevada densidade relativa e sua forma cristalina (Dana, 1974).



**Figura 1:** Scheelita Bruta (Fonte: <<http://perlbal.hi-pi.com/blog-images/410295/gd/1276798513/Minerio-Extraido-na-Regiao-Scheelita-e-outros-diversos.jpg>>)

A Scheelita apresenta clivagem; brilho vítreo; cor: branco, amarelo, verde, castanho; translúcida, alguns espécimes são transparentes. Encontrada nos pegmatitos graníticos, nos depósitos metamórficos de contato e nos filões de minérios de alta temperatura que estão associados com rochas graníticas, podendo ainda ser associada com a cassiterita, fluorita, topázio, apatita, molibdenita e wolframita (Dana, 1974).

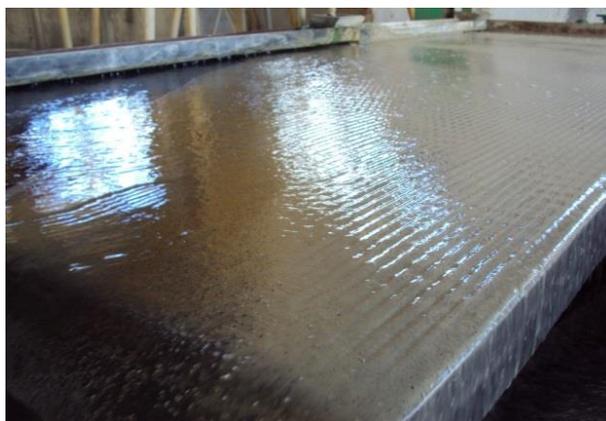
Os minérios de Scheelita são facilmente identificados com a utilização de emissores de radiação ultravioleta uma vez que, a Scheelita apresenta alta sensibilidade de resposta a essa radiação.

O sertão nordestino do Brasil foi representado mundialmente por décadas pela maior exportadora de scheelita do hemisfério sul, a mineração Tomaz Salustino (Mina Brejuí), maior mina subterrânea de Scheelita da América do Sul, localizada no município de Currais Novos no estado do Rio Grande do Norte.

A mineração em Currais Novos teve o seu apogeu em plena Segunda Guerra Mundial, fornecendo toneladas de minérios às indústrias do aço. Durante esse período, o progresso da sociedade se fez notar através da construção do Tungstênio Hotel, cinema, posto de puericultura, emissora de rádio, estádio de futebol, campo de pouso, colégios, hospital e casa do idoso.

O surgimento da mina Brejuí aconteceu na década de 40 e, devido ao seu sucesso, no mesmo período diversas minerações de scheelita foram criadas no município. A partir da década de 80 ocorreu o declínio dessas minerações, provocado pela oscilação dos preços do concentrado de scheelita no Mercado internacional. A reação do Mercado interacional de scheelita veio a partir do ano de 2004 com a retomada das atividades de algumas minerações de scheelita no Brasil.

Na exploração de scheelita no Rio Grande do Norte foram geradas elevadas quantidades de rejeito do processo. No caso da mina Brejuí desde o início das atividades até a paralisação, o rejeito corresponde aproximadamente a 3.110.400 toneladas (Carvalho *et al.*, 2002). Os equipamentos utilizados (jigue e mesa vibratória) (Figura 16) na etapa de concentração gravítica do minério, não são eficientes no beneficiamento dos finos de scheelita, ou seja, no rejeito existe uma quantidade significativa de scheelita não aproveitada.



**Figura 2:** Mesa Vibratória do processo de beneficiamento da mina Brejuí

Além da volta das atividades minerais, a Mina Brejuí tornou-se nos últimos anos o maior parque temático do Rio Grande do Norte, sendo visitada diariamente por turistas e estudantes vindos de toda parte do Brasil e do Exterior.

Grande volume de rejeito é gerado ao final do processo de beneficiamento ocasionando depósitos em locais inadequados, associam-se preocupantes formas de degradação ambiental presente na atividade mineira, algo facilmente percebido nas regiões exploradoras, pelas enormes pilhas de rejeitos expostas ao ar livre no longo de seu período de exploração (DANA,1974).

Materiais estéreis ou inertes, não aproveitáveis provenientes do capeamento superficial, assim como, os resíduos ou rejeitos, são as principais fontes de degradação de uma mineração, na qual pode se afirmar que para região exploradora traz-se preocupantes fatores a serem abordados, tais como: a deposição inadequada que pode acarretar uma possível contaminação do lençol freático, rios e açudes, devido a falta de tratamento e reuso da água de perda do processo, algo que merece um cuidado especial, para se evitar um problema sério para as pessoas que ali convivem (CARVALHO, 2002).

Apesar de desenvolver cidades, as notícias e denúncias sobre os problemas ambientais gerados pelas mineradoras em todo o Brasil, não só no Rio Grande do Norte, são veiculados frequentemente nas redes sociais/mídias e jornais, por diversos motivos.

De acordo com Camila Nobrega para o Canal Ibase em 2013, empresas fazem pressão por novo Código Mineral. O motivo: a concessão de novas licenças a mineradoras estão suspensas, desde agosto de 2012, até que seja aprovado o novo marco regulatório. Sob pressão das empresas, o governo federal corre contra o tempo para fazer ajustes ao texto. As negociações sobre o tema, de importância decisiva para os rumos da economia brasileira (o setor responde por 4,1% do Produto Interno Bruto nacional), ocorrem, no entanto, há quase um ano, a portas fechadas.

Wanessa Conceição Jesus Moraes e Celia Cristina Muraro publicaram em 2013 no sítio ambito-juridico que por ser considerado um metal muito tóxico, a mineração do Tálcio tem preocupado a sociedade local, uma vez que a mineração e a separação do Tálcio e do Cobalto, do Manganês, tem o potencial de afetar o meio ambiente e, por conseguinte, contaminação do lençol freático do aquífero Urucuia e das águas do rio de Ondas, usado como fonte de abastecimento de água em Barreiras.

Também em 2013 através de sua assessoria de comunicação Social, o Ministério Público Federal (MPF) divulga que em Mato Grosso do Sul instaurou procedimento para apurar os impactos da extração de minério de ferro na Comunidade Antônio Maria Coelho, em Corumbá/MS. Moradores reclamam da degradação dos recursos hídricos após a instalação de indústrias de mineração e siderurgia na região.