

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

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DE COMPÓSITOS  
POLIÉSTER/FIBRA DE VIDRO UTILIZANDO RESÍDUOS DE POLIÉSTER/FIBRA  
DE VIDRO E CARBONATO DE CÁLCIO COMO CARGA**

**Dissertação submetida à**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
como parte dos requisitos para a obtenção do grau de**

**MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**JULIANA RICARDO DE SOUZA**

**JOÃO TELÉSFORO NÓBREGA DE MEDEIROS**

**NATAL/RN, 20 DE JANEIRO DE 2011**

Catálogo da Publicação na Fonte. UFRN / Biblioteca Setorial de  
Engenharia Mecânica

Souza, Juliana Ricardo de.

Avaliação do comportamento tribológico de compósitos poliéster/fibra de vidro utilizando resíduos de poliéster/fibra de vidro e carbonato de cálcio como carga/ Juliana Ricardo de Souza. – Natal, RN, 2011.

102 f.: il.

Orientador: João Telésforo Nóbrega de Medeiros.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de pós-graduação em Engenharia de Mecânica.

1. Tribologia – Dissertação. 2. Desgaste – Dissertação. 3. Compósitos – Dissertação. 4. Reciclagem – Dissertação. I. Medeiros, João Telésforo Nóbrega de. II. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. III. Título.

RN/UF/BSEEM

CDU 620.193.95

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

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DE COMPÓSITOS  
POLIÉSTER/FIBRA DE VIDRO UTILIZANDO RESÍDUOS DE POLIÉSTER/FIBRA DE  
VIDRO E CARBONATO DE CÁLCIO COMO CARGA**

**JULIANA RICARDO DE SOUZA**

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

**MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA  
sendo aprovada em sua forma final.**

---

**Prof. Dr. João Telésforo Nóbrega de Medeiros - UFRN**

**Banca Examinadora**

---

**Prof. externo Dra. Ruthilene Catarina Lima da Silva - UNP**

---

**Prof. Dr. Ademir Oliveira da Silva - UFRN**

---

**Prof. Dr. Efrain Pantaleón Matamoros – UFRN**

# DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha querida avó, *Maria das Dores Ricardo*, de quem tenho imenso orgulho de ser neta. Obrigada vovó por todos os ensinamentos deixados, pelo amor e dedicação, sei que a recíproca do meu amor por ti é verdadeira.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a **Deus** pela sua constante presença em minha vida, confortando-me nos momentos necessários e fazendo-me acreditar sempre através da fé na minha capacidade.

A minha querida e incomparável mãe, **Dejanira Ricardo da Silva Barbosa** por acreditar, confiar e se orgulhar de mim desde a minha existência.

Ao meu companheiro inseparável **Paulo Henrique dos Santos Silva**, pelo amor incondicional, por tudo que já construímos juntos e pelo que ainda iremos construir.

Aos pais que Deus me concedeu através da UFRN, o professor **Dr. João Telésforo Nóbrega de Medeiros** e a **Dra Rosangela Lula de Medeiros**, pelo estímulo incessante, incentivo à pesquisa, cobrança, orientação acadêmica e mais do que isso, pela orientação de vida. Por terem feito a diferença não só na minha vida, mas na vida de todos os meus familiares ao me adotarem como uma filha. Jamais conseguirei expressar todo o meu apreço e consideração por vocês.

Aos meus pais **Antônio Pereira de Souza** e **Paulo Sérgio Barbosa** por todo apoio em todas as minhas tomadas de decisão.

Aos meus irmãos, tios, primos, avôs, todos os familiares e também aqueles que eu considero como se fossem, pelo respeito e estima.

Em especial a minha avó **Maria das Dores Ricardo**, com quem tive o prazer de conviver, ser amada e aprender lições de vida. Sei que muito de ti tenho em mim e que apesar de não estar mais conosco, onde quer que esteja estará torcendo por mim.

Aos professores do Departamento de Engenharia de Materiais **Neyde Tomazin**, **Carlos Alberto Paskocimas** e **José Daniel** pelos conhecimentos repassados aos estudantes de engenharia de materiais da UFRN. Em especial ao professor **Rubens M. do Nascimento**, pelos ensinamentos e cobranças durante a graduação, por todo seu apoio para que eu conseguisse realizar meu estágio supervisionado no Texas-EUA e pelos ensaios de Microscopia eletrônica de varredura no CT-Gás, fundamental para a conclusão desta dissertação.

Aos colegas de trabalho **Isaac**, **Jarbas**, **Aline**, **Fernando**, **Mayara**, **Clarissa**, **Janaina**, **Jaciana**, **Severino Stelo**, **Ricardo**, **Cristiano** e aos demais integrantes do GET - Grupo de Estudos de Tribologia e Integridade Estrutural pelo apoio nas pesquisas em laboratório.

A Dona **Délia Maria**, secretária do Laboratório de tribologia, pelos cuidados diários para com todos os integrantes do GET.

A **Laís Vasconcelos da Silva** pela amizade desde os tempos da graduação em Engenharia de Materiais e pela parceria acadêmica bem sucedida, aquela que pra mim é uma pedra rara, difícil de encontrar e encontrada nos momentos mais inesperados, pelas pessoas que mais necessitam dela.

Aos amigos que ganhei na UFRN desde a época de graduação **José Kaio, Laurênia Martins, Rosanne de Lima, Juciklécia Reinaldo**, companheiros das horas de almoço, com eles sempre pude contar nos momentos difíceis em que precisei.

A **Dra Ruthilene Catarina Lima da Silva** pela amizade e orientação, com quem eu aprendi e continuo aprendendo muito, principalmente através de seu exemplo.

Ao Professor **Dr. Witold Brostow**, pelo convite a realização do estágio supervisionado durante seis meses no Lapom – Laboratório de Polímeros Avançados e Materiais Otimizados da UNT - Universidade do Norte do Texas. Onde eu pude aperfeiçoar a língua inglesa, desenvolver os ensaios tribológicos desta dissertação, conviver com pessoas de vários lugares do mundo, crescer e evoluir como ser humano pela lição de vida que este período me proporcionou.

Agradeço também as adoráveis amigas que conquistei nos EUA, **Tea Datashvili, Sumitra, Mohammad H. Maneshian, Mariana Castro Martinez, Madhuri Dutta, Sridhar Mahendrakar, Ana Paula Vichi, Christian Vichi** e em especial a **Mariana Pannico** e **Nelson Martinez** do Laboratório de Processamento e Síntese de Materiais da Universidade do Norte do Texas, pelo apoio emocional nos momentos de desespero, paciência na comunicação e orientação no uso dos equipamentos.

À CAPES, Pró-Reitoria de Pós-Graduação e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica pelo apoio financeiro.

Ao professor **Dr. Sandro Campos Amico** por ter concedido todo o material estudado nesta dissertação, desenvolvido no LAPOL – Laboratório de Materiais Poliméricos do Departamento de Materiais da Escola de Engenharia da UFRGS e por esta sempre a nossa disposição.

Aos técnicos da Oficina Mecânica do NTI-UFRN: **Zézinho, Elmar, Frazão, Chicão** e **Vavá**.

A **Érika, Augusto** e **Angélica** integrantes do CT-Gás pela cooperação nas análises de Microscopia Eletrônica de Varredura

A **Antônio M. Medeiros** do Laboratório de Caracterização térmica de Materiais e ao Professor **Dr. Ademir Oliveira da Silva** pelo apoio técnico durante a realização dos ensaios de análises térmicas.

Ao professor **Dr. Eduardo Lins** e aos alunos **Manoel Fernandes** e **Israel de Medeiros**, do Laboratório de Tecnologia de Tensoativos e de Processos de Separação do NIT/UFRN, pelo apoio na realização de ensaios de molhabilidade e de tensão superficial.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho, pois sozinha jamais seria capaz.

Muito Obrigada.

*“A mente que se abre a uma nova idéia, jamais retornará ao seu tamanho original.”*

Albert Einstein

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>i</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>vi</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS .....</b>	<b>vii</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>viii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>ix</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. OBJETIVO GERAL.....	6
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	6
1.3. HIPÓTESE.....	6
1.4. CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA.....	7
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>8</b>
2.1. RESINA POLIÉSTER .....	8
2.1.1. <i>Estrutura Química</i> .....	9
2.2. COMPÓSITOS.....	10
2.3. RECICLAGEM .....	11
2.4. TRIBOLOGIA .....	13
2.4.1. <i>Tribologia de Polímeros</i> .....	14
2.5. RUGOSIDADE SUPERFICIAL.....	16
2.5.1. <i>Compatibilidade com fluidos e Energia de superfície</i> .....	20
2.6. MECÂNICA DO CONTATO E DO DANO .....	22
2.6.1. <i>Contato entre superfícies</i> .....	22
2.6.2. <i>Atrito do Par Metal-Polímero</i> .....	24
2.7. DESGASTE .....	28
2.7.1. <i>Ensaio de Desgaste</i> .....	29
2.7.2. <i>Mecanismos de Desgaste</i> .....	29
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>33</b>
3.1. PREPARAÇÃO DOS COMPÓSITOS .....	33
3.1.1. <i>Resíduos</i> .....	33
3.1.2. <i>Compósitos</i> .....	34
3.2. CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS .....	36
3.2.1. <i>Análises Térmicas</i> .....	36
3.2.1.1. <i>Análise Termogravimétrica (TGA)</i> .....	37
3.2.1.2. <i>Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)</i> .....	37
3.2.1.3. <i>Análise Dinâmico-Mecânica (DMA)</i> .....	37
3.2.2. <i>Propriedades das Superfícies</i> .....	38
3.2.2.1. <i>Rugosidade</i> .....	38

3.2.2.2. Ângulo de Contato .....	39
3.2.2.3 Energia de Superfície.....	39
3.2.3. Dureza.....	40
3.3. ENSAIOS TRIBOLÓGICOS.....	41
3.3.1. Coeficiente de Atrito .....	41
3.3.2. Taxa de Desgaste .....	42
3.3.3 Morfologia da Superfície de Desgaste.....	43
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>44</b>
4.1. ANÁLISES TÉRMICAS .....	44
4.1.1. Análise Termogravimétrica (TG).....	44
4.1.2. Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC).....	50
4.1.3. Análise Dinâmico-Mecânica (DMA).....	56
4.2. PROPRIEDADES DAS SUPERFÍCIES .....	61
4.2.1. Rugosidade.....	61
4.2.2 Ângulo de Contato .....	62
4.2.3 Energia de Superfície.....	64
4.3. DUREZA.....	65
4.4. ENSAIOS TRIBOLÓGICOS.....	67
4.4.1. Coeficiente de Atrito .....	67
4.4.1.1. Grupo A.....	68
4.4.1.2. Grupo B (CaCO <sub>3</sub> ) .....	69
4.4.1.3. Grupo B (Resíduos).....	71
4.4.2. Média do Coeficiente de Atrito .....	72
4.4.2.1 Grupo A.....	73
4.4.2.2. Grupo B (CaCO <sub>3</sub> ) .....	74
4.4.2.3. Grupo B (Resíduos).....	75
4.4.3. Taxa de Desgaste .....	76
4.4.3.1. Grupo A.....	76
4.4.3.2. Grupo B (CaCO <sub>3</sub> ) .....	77
4.4.3.3. Grupo B (Resíduos).....	78
4.5. SUPERFÍCIES DE DESGASTE DOS COMPÓSITOS.....	79
4.5.1 Grupo A.....	79
4.5.2 Grupo B (CaCO <sub>3</sub> ).....	86
4.5.3 Grupo B (Resíduos).....	90
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>95</b>
<b>6. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>96</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>97</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Lixo tecnológico seletivo de compósitos recicláveis PRF (polímeros reforçados com fibras). Fonte: <a href="http://www.upresins.org/upload/documents/webpage/safety-guidelines/english/guide-12.pdf">http://www.upresins.org/upload/documents/webpage/safety-guidelines/english/guide-12.pdf</a> , consulta em 11/01/2011 .....	<b>2</b>
<b>Figura 2.</b> Comparação entre propriedades de metais e compósitos, de acordo com STRONG, 2008.....	<b>5</b>
<b>Figura 3.</b> Esquema da estrutura química da resina poliéster ortoftálica.....	<b>9</b>
<b>Figura 4.</b> Esquema ilustrativo de um compósito com lâminas em matriz polimérica.....	<b>10</b>
<b>Figura 5.</b> Representação dinâmica de materiais viscoelásticos simples, (a) modelo de Voigt-Kelvin, e (b) modelo de Maxwell (Johnson, 1989).....	<b>15</b>
<b>Figura 6.</b> Área de contato real de superfícies rugosas em contato. $A_r$ é a área de contato real, que é igual ao somatório de pequenas áreas de contato $A_i$ devido às asperezas. (STACHOWIAK e BATCHELOR, 1996).....	<b>18</b>
<b>Figura 7.</b> Desvios de forma do perfil de uma superfície, conforme DIN 4760, adaptado de BET (1999) apud MEDEIROS (2002).....	<b>19</b>
<b>Figura 8.</b> Esquema das formas dos ângulos de contato por uma gota de água.....	<b>20</b>
<b>Figura 9.</b> Esquema da Energia de superfície por uma gota de água.....	<b>21</b>
<b>Figura 10.</b> Esquema ilustrativo das áreas nominal e real de contato.....	<b>23</b>
<b>Figura 11.</b> Osculação do contato, na definição de Da VINCI apud MEDEIROS (a) Contato Conforme, (b) Limiar entre Conforme e Não - Conforme e (c) Contato Não - Conforme.....	<b>23</b>
<b>Figura 12.</b> Ilustração esquemática do diagrama de forças para um bloco no chão (adaptado de HUTCHINGS, 1992a).....	<b>24</b>
<b>Figura 13.</b> Gráfico ilustrativo do atrito estático e dinâmico.....	<b>26</b>
<b>Figura 14.</b> As origens do atrito associado com o deslizamento de uma aspereza dura sobre uma superfície polimérica lisa (HUTCHINGS, 1992a).....	<b>27</b>
<b>Figura 15.</b> Ensaio tribológicos. a) pino-disco na face plana; b) esfera-disco; c) chapa disco; d) pino-disco na borda; e) cilindro-disco; f) bloco-roda, conhecido como roda de borracha.....	<b>29</b>
<b>Figura 16.</b> Associação de fatores que afetam os mecanismos de deformação e adesão do atrito, conforme MYSHKIN, PETROKOVETS e CHIZHIK (1998).....	<b>32</b>

<b>Figura 17.</b> Amostras cortadas das placas moldadas por RTM para trituração nos moinhos.....	<b>33</b>
<b>Figura 18.</b> (a) Moinho de facas e (b) moinho de bolas.....	<b>34</b>
<b>Figura 19.</b> Desenho esquemático da seção transversal dos compósitos poliéster/fibra de vidro/resíduos.....	<b>35</b>
<b>Figura 20.</b> (a) Prensa hidráulica da Marcone e (b) o Molde.....	<b>35</b>
<b>Figura 21.</b> Fluxograma das composições utilizadas.....	<b>36</b>
<b>Figura 22.</b> Goniômetro Ramé – Hart Instrument co.....	<b>39</b>
<b>Figura 23.</b> Imagem do tribômetro Nanovea com configuração pino contra disco .....	<b>41</b>
<b>Figura 24.</b> a) Sistema de metalização b) Microscópio Eletrônico de Varredura com micro Análise por EDS .....	<b>43</b>
<b>Figura 25.</b> Curvas de TGA e DTGA para os compósitos: A) Poliéster/CaCO <sub>3</sub> , B) Poliéster/Resíduos e C) Poliéster/Fibra de vidro do grupo A.....	<b>45</b>
<b>Figura 26.</b> Curvas de TG e DTG para os compósitos do grupo B com CaCO <sub>3</sub> .....	<b>47</b>
<b>Figura 27.</b> Curvas de TG e DTG para os compósitos do grupo B com Resíduos.....	<b>49</b>
<b>Figura 28.</b> Análise de DSC para os compósitos do grupo A.....	<b>51</b>
<b>Figura 29.</b> Análise de DSC para os compósitos do grupo B com CaCO <sub>3</sub> .....	<b>53</b>
<b>Figura 30.</b> Análise de DSC para os compósitos do grupo B com Resíduos.....	<b>55</b>
<b>Figura 31.</b> Curvas de DMA para os compósitos do Grupo A .....	<b>57</b>
<b>Figura 32.</b> Curvas de DMA para os compósitos do grupo B com CaCO <sub>3</sub> .....	<b>58</b>
<b>Figura 33.</b> Curvas de DMA para os compósitos do grupo B com Resíduos.....	<b>60</b>
<b>Figura 34.</b> Rugosidade Média (Ra) de todos os compósitos estudados .....	<b>61</b>
<b>Figura 35.</b> Ângulo de contato de todos os compósitos estudados .....	<b>62</b>
<b>Figura 36.</b> Energia de superfície de todos os compósitos estudados.....	<b>64</b>
<b>Figura 37.</b> Dureza Barcol de todos os compósitos estudados .....	<b>65</b>
<b>Figura 38.</b> Dureza Rockwell M de todos os compósitos estudados .....	<b>66</b>
<b>Figura 39.</b> Gráficos de coeficiente de atrito x distância de deslizamento, carga de 1 N, (a) velocidade de 100 rpm e (b) velocidade de 200 rpm.....	<b>68</b>
<b>Figura 40.</b> Gráficos de coeficiente de atrito x distância de deslizamento, carga de 5 N, (a) velocidade de 100 rpm e (b) velocidade de 200 rpm.....	<b>69</b>
<b>Figura 41.</b> Gráficos de coeficiente de atrito x distância de deslizamento, carga de 10 N, (a) velocidade de 100 rpm e (b) velocidade de 200 rpm.....	<b>69</b>
<b>Figura 42.</b> Gráficos de coeficiente de atrito x distância de deslizamento, carga de 1 N, (a) velocidade de 100 rpm e (b) velocidade de 200 rpm.....	<b>70</b>

<b>Figura 43.</b> Gráficos de coeficiente de atrito x distância de deslizamento, carga de 5 N, (a) velocidade de 100 rpm e (b) velocidade de 200 rpm.....	<b>70</b>
<b>Figura 44.</b> Gráficos de coeficiente de atrito x distância de deslizamento, carga de 10 N, (a) velocidade de 100 rpm e (b) velocidade de 200 rpm.....	<b>71</b>
<b>Figura 45.</b> Gráficos de coeficiente de atrito x distância de deslizamento, carga de 1 N, (a) velocidade de 100 rpm e (b) velocidade de 200 rpm.....	<b>71</b>
<b>Figura 46.</b> Gráficos de coeficiente de atrito x distância de deslizamento, carga de 5 N, (a) velocidade de 100 rpm e (b) velocidade de 200 rpm.....	<b>72</b>
<b>Figura 47.</b> Gráficos de coeficiente de atrito x distância de deslizamento, carga de 10 N, (a) velocidade de 100 rpm e (b) velocidade de 200 rpm.....	<b>72</b>
<b>Figura 48.</b> Média do coeficiente de atrito em função das composições do grupo A em suas respectivas cargas, (a) velocidade de 100 rpm e (b) velocidade de 200 rpm .....	<b>74</b>
<b>Figura 49.</b> Média do coeficiente de atrito em função das composições em suas respectivas cargas, (a) velocidade de 100 rpm e (b) velocidade de 200 rpm.....	<b>75</b>
<b>Figura 50.</b> Média do coeficiente de atrito em função das composições em suas respectivas cargas, (a) velocidade de 100 rpm e (b) velocidade de 200 rpm.....	<b>76</b>
<b>Figura 51.</b> Taxa de Desgaste em função das cargas e suas respectivas velocidades de ensaio para o grupo A .....	<b>77</b>
<b>Figura 52.</b> Taxa de Desgaste em função das cargas e suas respectivas velocidades de ensaio para o grupo B com $\text{CaCO}_3$ .....	<b>78</b>
<b>Figura 53.</b> Taxa de Desgaste em função das cargas e suas respectivas velocidades de ensaio para o grupo B com resíduos .....	<b>79</b>
<b>Figura 54.</b> Imagens de MEV da pista de desgaste do compósito poliéster/ $\text{CaCO}_3$ do grupo A na condição de 100 rpm e 5 N (a seta indica a direção do deslizamento) .....	<b>80</b>
<b>Figura 55.</b> Imagens de MEV da pista de desgaste do compósito Poliéster/ $\text{CaCO}_3$ do grupo A na condição de 100 rpm e 10 N e microanálise (a seta indica a direção do deslizamento) .....	<b>81</b>
<b>Figura 56.</b> Imagens de MEV da pista de desgaste do compósito poliéster/ $\text{CaCO}_3$ do grupo A na condição de 200 rpm e 10 N e microanálise (a seta indica a direção do deslizamento) .....	<b>82</b>

<b>Figura 57.</b> Imagens de MEV da pista de desgaste do compósito Poliéster/Resíduos do grupo A na condição de 100 rpm e 5 N (a seta indica a direção do deslizamento) .....	<b>83</b>
<b>Figura 58.</b> Imagens de MEV da pista de desgaste do compósito Poliéster/Resíduos do grupo A na condição de 100 rpm e 10 N (a seta indica a direção do deslizamento) .....	<b>83</b>
<b>Figura 59.</b> Imagens de MEV da pista de desgaste do compósito Poliéster/Resíduos do grupo A na condição de 200 rpm e 10 N e microanálise (a seta indica a direção do deslizamento) .....	<b>84</b>
<b>Figura 60.</b> Imagens de MEV da pista de desgaste do compósito Poliéster/Fibra de vidro do grupo A na condição de 100 rpm e 10 N (a seta indica a direção do deslizamento) .....	<b>85</b>
<b>Figura 61.</b> Imagem de MEV da pista de desgaste do compósito Poliéster/Fibra de vidro do grupo A na condição de 200 rpm e 1 N (a seta indica a direção do deslizamento) .....	<b>85</b>
<b>Figura 62.</b> Imagens de MEV da pista de desgaste do compósito poliéster/fibra de vidro do grupo A na condição de 200 rpm e 10 N e microanálise (a seta indica a direção do deslizamento) .....	<b>86</b>
<b>Figura 63.</b> Imagens de MEV da pista de desgaste do compósito Poliéster/FV/CaCO <sub>3</sub> do grupo B na condição de 100 rpm e 5 N (a seta indica a direção do deslizamento) .....	<b>87</b>
<b>Figura 64.</b> Imagens de MEV da pista de desgaste do compósito Poliéster/FV/CaCO <sub>3</sub> do grupo B na condição de 200 rpm e 10 N (a seta indica a direção do deslizamento) .....	<b>87</b>
<b>Figura 65.</b> Imagens de MEV da pista de desgaste do compósito Poliéster/FV/CaCO <sub>3</sub> do grupo B na condição de 100 rpm e 5 N e microanálise (a seta indica a direção do deslizamento) .....	<b>88</b>
<b>Figura 66.</b> Imagens de MEV da pista de desgaste do compósito Poliéster/FV/CaCO <sub>3</sub> do grupo B na condição de 100 rpm e 10 N (a seta indica a direção do deslizamento) .....	<b>88</b>
<b>Figura 67.</b> Imagens de MEV da pista de desgaste do compósito Poliéster/FV/CaCO <sub>3</sub> do grupo B na condição de 200 rpm e 10 N (a seta indica a direção do deslizamento) .....	<b>89</b>

<b>Figura 68.</b> Imagens de MEV da pista de desgaste do compósito Poliéster/FV/CaCO <sub>3</sub> do grupo B na condição de 200 rpm e 5 N (a seta indica a direção do deslizamento) .....	<b>90</b>
<b>Figura 69.</b> Imagens de MEV da pista de desgaste do compósito Poliéster/FV/CaCO <sub>3</sub> do grupo B na condição de 200 rpm e 10 N (a seta indica a direção do deslizamento) .....	<b>90</b>
<b>Figura 70.</b> Imagens de MEV da pista de desgaste do compósito Poliéster/FV/Resíduos do grupo B na condição de 100 rpm e 5 N (a seta indica a direção do deslizamento) .....	<b>91</b>
<b>Figura 71.</b> Imagens de MEV da pista de desgaste do compósito Poliéster/FV/Resíduos do grupo B na condição de 100 rpm e 10 N (a seta indica a direção do deslizamento) .....	<b>91</b>
<b>Figura 72.</b> Imagens de MEV da pista de desgaste do compósito Poliéster/FV/Resíduos do grupo B na condição de 100 rpm e 10 N (a seta indica a direção do deslizamento) .....	<b>92</b>
<b>Figura 73.</b> Imagens de MEV da pista de desgaste do compósito Poliéster/FV/Resíduos do grupo B na condição de 200 rpm e 10 N e microanálise (a seta indica a direção do deslizamento) .....	<b>92</b>
<b>Figura 74.</b> Imagens de MEV da pista de desgaste do compósito Poliéster/FV/Resíduos do grupo B na condição de 100 rpm e 10 N (a seta indica a direção do deslizamento) .....	<b>93</b>
<b>Figura 75.</b> Imagens de MEV da pista de desgaste do compósito Poliéster/FV/Resíduos do grupo B na condição de 200 rpm e 1 N (a seta indica a direção do deslizamento) .....	<b>93</b>
<b>Figura 76.</b> Imagens de MEV da pista de desgaste do compósito Poliéster/FV/Resíduos do grupo B na condição de 200 rpm e 10 N (a seta indica a direção do deslizamento) .....	<b>94</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> – Classificação de mecanismos de desgaste, adaptado da norma DIN 50320.....	<b>30</b>
<b>Tabela 2</b> – TGA dos compósitos do grupo A (valores aproximados) .....	<b>46</b>
<b>Tabela 3</b> - TG dos compósitos do grupo B com CaCO <sub>3</sub> (valores aproximados) .....	<b>48</b>
<b>Tabela 4</b> - TG dos compósitos do grupo B com Resíduos (valores aproximados).....	<b>50</b>
<b>Tabela 5</b> – Resultados de DSC para os compósitos do grupo A .....	<b>52</b>
<b>Tabela 6</b> – Resultados de DSC para os compósitos do grupo B com CaCO <sub>3</sub> .....	<b>54</b>
<b>Tabela 7</b> – Resultados de DSC para os compósitos do grupo B com Resíduos .....	<b>56</b>
<b>Tabela 8</b> - Valores de módulo de armazenamento, E' e temperatura de transição vítrea, Tg, (valores aproximados) .....	<b>58</b>
<b>Tabela 9</b> - Valores de módulo de armazenamento, E' e temperatura de transição vítrea, Tg, (valores aproximados) .....	<b>59</b>
<b>Tabela 10</b> - Valores de módulo de armazenamento, E', e temperatura de transição vítrea, Tg, (valores aproximados) .....	<b>60</b>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\psi$	- Índice de plasticidade
$E$	- Módulo de Elasticidade
$\nu$	- Coeficiente de Poisson
$H$	- Dureza
$\sigma^*$	- Desvio padrão da distribuição de altura das asperezas
$r$	- Raio das asperezas
$W$	- Força Peso
$N$	- Força Normal
$F$	- Força aplicada qualquer
$F_f$	- Força de Atrito
$\mu$	- Coeficiente de Atrito
$\mu_d$	- Coeficiente de Atrito Dinâmico
$V_s$	- Velocidade

## RESUMO

A utilização de materiais compósitos e alternativos vem sendo incrementada a cada dia, na medida em que se torna mais generalizada a conscientização de que o uso de recursos renováveis e não agressivos ao meio ambiente faz parte de um novo modelo ecologicamente correto. Uma vez que seus resíduos (principalmente Fibra de vidro) não podem ser facilmente reciclados pela dificuldade ainda existente neste processo, já que apresentam duas fases misturadas, sendo uma a matriz polimérica termofixa de difícil reciclagem por ser infusível e a fase de reforços de fibras. Compósitos do tipo matriz termofixa de Poliéster + Fibra de vidro representam uma ameaça devido ao excesso de descarte. Visando minimizar este problema, objetivou-se reutilizar o compósito Poliéster + Fibra de vidro, através de resíduos obtidos pela moagem de facas e bolas. Estes resíduos foram incorporados a novos compósitos de Poliéster/Fibra de vidro pela moldagem por compressão a quente e comparados tribologicamente a compósitos com  $\text{CaCO}_3$ , utilizada geralmente como carga de enchimento, visando uma substituição total ou parcial do  $\text{CaCO}_3$  por esses resíduos. Os compósitos foram caracterizados por meio térmico (TGA, DSC e DMA), da integridade superficial (determinação da rugosidade, ângulo de contato e energia de superfície), de propriedades mecânicas (dureza) e de ensaios tribológicos (coeficiente de atrito dinâmico e desgaste), a fim de avaliar o efeito das cargas e caracterizar tais materiais para as aplicações a que podem assumir, do ponto de vista tribológico, já que resíduos de Poliéster + Fibra de vidro tem grande potencial de substituição ao  $\text{CaCO}_3$ .

**Palavras-chave:** *Tribologia, Desgaste, Compósitos, Reciclagem.*

## ABSTRACT

The use of composite materials and alternative is being increased every day, as it becomes more widespread awareness that the use of renewable and not harmful to the environment is part of a new environmentally friendly model. Since its waste (primarily fiberglass) can not be easily recycled by the difficulty that still exists in this process, since they have two phases mixed, a polymeric matrix thermoset difficult to recycle because it is infusible and phase of fiber reinforcements. Thermoset matrix composites like Polyester + fiberglass pose a threat due to excessive discharge. Aiming to minimize this problem, aimed to reuse the composite Polyester + fiber glass, through the wastes obtained by the grinding of knives and balls. These residues were incorporated into the new composite Polyester/Fiberglass for hot compression mold and compared tribological to composites with filler  $\text{CaCO}_3$ , generally used as filler, targeting a partial replacement of  $\text{CaCO}_3$  by such waste. The composites were characterized by thermal analysis (TGA, DSC and DMA), by the surface integrity (roughness determination, contact angle and surface energy), mechanical properties (hardness) and tribological tests (wear and coefficient of dynamic friction) in order to evaluate the effect of loads and characterize these materials for applications that can take, in the tribological point of view since waste Polyester + fiberglass has great potential for replacement of  $\text{CaCO}_3$ .

**Key-words:** *Tribology, Wear, Composites, Recycling.*

# 1. INTRODUÇÃO

HUTCHINGS, 1992, define *Tribologia* como *o estudo do atrito, desgaste e lubrificação, um assunto interdisciplinar que envolve aptidões e conhecimentos na Física, Química, Engenharia Mecânica, Ciência e Engenharia dos Materiais.*

Compreender a natureza física do atrito, a definição de desgaste, suas conseqüências, seus mecanismos e as formas de controlar seus efeitos é fundamental aos Engenheiros. Em função da sua complexidade e natureza multidisciplinar, a importância da tribologia tem sido considerada em países desenvolvidos como sendo de relevância nacional e incluída entre as tecnologias de importância estratégica. (JOST, 1966, 1990, WILLIAMS, 2005, BHUSHAN, 2002, RABINOWICZ, 1995, RADI, 2008).

O aspecto ambiental também é muito importante na análise global das perdas por desgaste. Perdas consideráveis em um motor veicular, por exemplo, são devidas ao resfriamento e à exaustão. Cerca de 12% da potência de um motor é transmitida às rodas, o que é menor do que as perdas por atrito, da ordem de 15% - quando novo ou em bom estado de conservação. Considerando melhorias de 20%, a economia seria de 300 milhões de reais por ano e uma redução de 37.500 toneladas de CO<sub>2</sub> emitido para a atmosfera, apenas na cidade de São Paulo, (ANDERSON, 1991).

Tribologia de polímeros é crucial para muitas aplicações. Materiais poliméricos vitais em rolamento e deslizamento têm uso intensivo em automóveis, máquinas, aviões, computadores, equipamentos da indústria do petróleo e energias renováveis, dentre outros (CHAN E SHARMA, 2008, LEE, KIM & LEE, 2006). Mecanismos de desgaste e atrito em polímeros submetidos ao contato com outros materiais vêm sendo investigados rotineiramente no GET-UFRN-Brasil, por LIMA DA SILVA e colaboradores (2007, 2008, 2009, 2010) e no LAPOM-University of North Texas, por DUTTA e colaboradores (2009, 2010).

Há demanda por um esforço crescente na geração do conhecimento nessa área, uma vez que, mesmo nos metais – cujo nível de conhecimento atual é considerado muito bom – a influência de suas características e propriedades sobre o atrito e desgaste ainda é pouco ou parcialmente entendida. Neste escopo se insere o uso de técnicas da Engenharia de Superfície para a produção e seleção de materiais resistentes ao desgaste com o intuito de minimizar a sua relação custo/benefício (RADI *et al.* 2008).

Para o desenvolvimento da área de Tribologia de Polímeros, Compósitos e Materiais Avançados, necessita-se da compreensão dos fundamentos da Tribologia, Triboquímica e Mecânica do Contato, de um lado e, de outro, das propriedades dos materiais e filmes interfaciais que se acham envolvidos nos pares tribológicos de uso corrente neste planeta ou nas aplicações de vanguarda da indústria espacial, ambas sob atmosferas as mais diversas.

Lubrificantes sólidos, reforços de fibras e partículas inorgânicas têm sido normalmente utilizados para melhorar as propriedades dos polímeros (SHARMA, 2008, LEE, KIM & LEE, 2006).

Este trabalho objetiva investigar a tribologia de materiais compósitos poliméricos, sejam reciclados, ou não.

Num sentido estrito, STRONG, 2008, define que materiais compósitos são:

- (1) *Segundo ele, aqueles materiais sólidos compostos de um ligante ou matriz – geralmente polimérica, mas também podendo ser metálica e cerâmica – que contorna os reforços – geralmente fibras – e os estabelece em seus lugares.*

**Segundo outros autores, misturas de dois ou mais materiais sólidos que são mecanicamente separáveis, pelo menos teoricamente, e possuem propriedades complementares.**

A reciclagem dos materiais plásticos e de compósitos tem se mostrado como uma necessidade ambiental. Geralmente tem sido feita a partir da sua seleção, Figura 1 e, na União Européia, diversas diretrizes têm sido publicadas sobre a classificação e codificação, Quadro 1 e sua transformação em pós ou materiais granulados.



**Figura 1.** Lixo tecnológico seletivo de compósitos recicláveis PRF (polímeros reforçados com fibras). Fonte: <http://www.upresins.org/upload/documents/webpage/safety-guidelines/english/guide-12.pdf>, consulta em 11/01/2011

De acordo com KERS e MAHAK, 2008, com a instituição legal nos países desenvolvidos de que os fabricantes são responsáveis pela proteção ambiental durante o tempo de vida de seus produtos, há duas formas de satisfazer a tais diretrizes: 1) *compatibilizar o tempo de vida* do produto ao binômio *materiais duráveis* com um *projeto durável*; 2) reduzir o efeito dos impactos ambientais sobre o produto. Ambas as formas pressupõem uma avaliação tribológica desses materiais para a satisfação dessa legislação.

**Quadro 1.** Classificação e manuseio de lixo reciclável de PRF (polímeros reforçados com fibras) dentro da atual legislação da comunidade Européia. Fontes:



The European UP/VE Resin Association  
(a Cefic Sector Group)  
Avenue E. van Nieuwenhuysse 4,  
1160 Brussels, Belgium  
T +32 2 676 72 62  
F +32 2 676 74 47  
www.upresins.org



European Composites Industry Association (EuCIA)  
c/o European Plastics Converters,  
Avenue de Cortenbergh 66,  
1000 Brussels, Belgium  
T. +32 2 739 63 89  
F. +32 2 732 42 18  
www.euCIA.org

Os resíduos são classificados com um código de 6 dígitos, os dois primeiros sendo a origem deles. Em várias subcategorias, os resíduos e a sua origem são definidos com maior precisão. Uma vez codificados, outras diretrizes podem ser usadas para determinar a forma de transporte ou descarte, incluindo normas sobre transferência de aterros e incineração de resíduos. Além disso, as diretrizes específicas da indústria podem aplicar-se a reciclagem, por exemplo, fim da vida do veículo ou dos resíduos de equipamentos eletro-eletrônicos.

Qualquer categoria de resíduos da lista de resíduos da UE marcados com um asterisco (\*) é considerado um resíduo perigoso de acordo com a Directiva 91/689/CEE, de resíduos perigosos (Art. 1). A lista leva em conta, os valores-limite de concentração.

**SUB-CATEGORIAS:**

**07 02:** Resíduos do fabrico, formulação, Abastecimento e Uso (FFDU) de plásticos, borracha sintética e fibras sintéticas ou artificiais

**07 02 13:** Resíduos plásticos

**CATEGORIAS:**

**12 01 05:** Resíduos da moldagem e do tratamento físico e mecânico de superfície de metais e plásticos - aparas de plástico e desvios, eventualmente aplicáveis aos resíduos de usinagem de componentes termofixos

**16 01 19:** Resíduos não especificados - veículos em fim de vida - plásticos.

**17 02 03:** Resíduos da Construção e demolição - plástico.

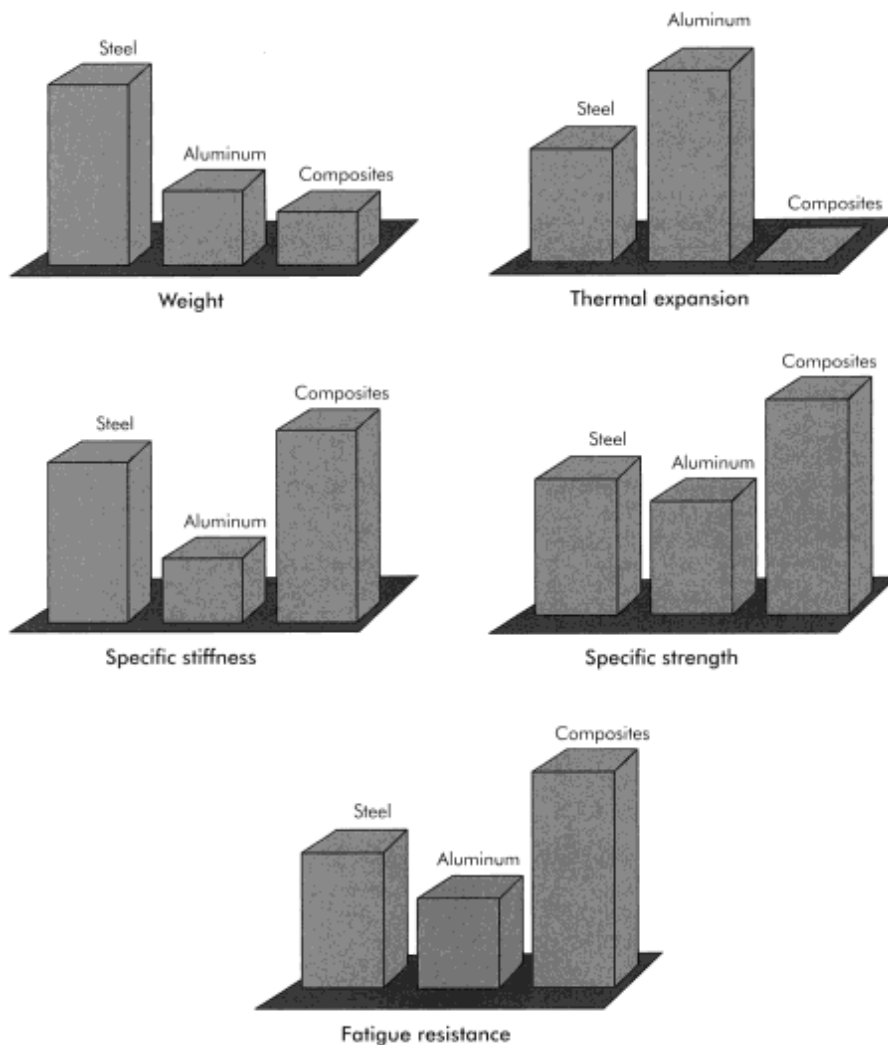
**17 02 04\*(M):** Resíduos de construção e demolição - madeira, vidro e plástico

**Esta categoria poderia ser aplicada a equipamentos de processo químico de plantas contaminadas com produtos químicos perigosos.**

**19 12 04:** Provenientes de instalações de gestão de resíduos - tratamento mecânico de resíduos - plásticos e borracha.

**20 01 39:** Resíduos sólidos urbanos - frações recolhidas em separado - plásticos.

De acordo com ROSS e EVANS, 2003 e BROEKEL e SCHARR, 2005, uma solução para o lixo tecnológico de polímeros reforçados com fibras é reciclar os produtos desgastados ao final de sua vida em serviço, produzindo benefícios ambientais significativos. As propriedades mecânicas de produtos fabricados com cargas de polímeros termofixos são levemente inferiores às das dos produtos virgens, de acordo com STRONG (2008). A Figura 2 compara massa específica, expansão térmica, rigidez e resistência específicas e resistência à fadiga entre aços, alumínio e compósitos, com base em STRONG, 2008.



**Figura 2.** Comparação entre propriedades de metais e compósitos, de acordo com STRONG,

2008

Este trabalho é estruturado em: INTRODUÇÃO, com os objetivos gerais e específicos do presente estudo; REVISÃO BIBLIOGRÁFICA, com os fundamentos e estudos na área proposta; MATERIAIS E MÉTODOS mostrando os materiais estudados, método de ensaio tribológico, a instrumentação e as tecnologias utilizadas; RESULTADOS E DISCUSSÃO, contendo a caracterização dos materiais, ensaios tribológicos nas condições realizadas e morfologia dos danos detectados; CONCLUSÕES E SUGESTÕES a trabalhos futuros.

### **1.1. Objetivo Geral**

Investigar alguns tipos de materiais compósitos poliméricos reciclados, ou não, com a incorporação de resíduos para o seu reuso.

### **1.2. Objetivos Específicos**

- Caracterizar do ponto de vista termogravimétrico e calorimétrico compósitos Poliéster/Fibra de vidro/Resíduos e Poliéster/Fibra de vidro/ $\text{CaCO}_3$  ;
- Avaliar as propriedades de dureza e caracterização viscoelástica dos compósitos Poliéster/Fibra de vidro/Resíduos e Poliéster/Fibra de vidro/ $\text{CaCO}_3$  ;
- Comparar o comportamento tribológico concernente ao atrito e desgaste desses compósitos sob a forma de placa em deslizamento contra pino esférico de aço inoxidável AISI 302;
- Elaborar recomendações para o reuso seletivo de compósitos Poliéster/Fibra de vidro através de Resíduos em novos compósitos aplicáveis a elementos estruturais submetidos ao contato de deslizamento com o aço AISI 302.

### **1.3. Hipótese**

Compósitos Poliéster/Fibra de vidro carregados com Resíduos de compósitos Poliéster/Fibra de vidro apresentam taxa de desgaste similar ou inferior a compósitos Poliéster/Fibra de vidro sem cargas e/ou carregados com  $\text{CaCO}_3$ .

#### 1.4. Contribuição Científica

Durante a realização deste mestrado desenvolveram-se trabalhos que foram publicados em congressos nacionais e jornais internacionais, os quais serviram como meio de discussão e evolução desta dissertação. Os trabalhos intitulados “Nanocomposites of poly(methyl methacrylate) (PMMA) and montmorillonite (MMT) Brazilian clay: A tribological study”, “The Use of Polyester/Glass Fiber Residues as Fillers for Composites”, “Polyester + Glass Fiber Residues as Fillers for Composites”, “Desempenho Tribológico de Compósitos Poliéster/Fibra de vidro Utilizando Carbonato de Cálcio e Resíduos de Poliéster/Fibra de vidro como carga”, “Integridade superficial de compósitos Poliéster/Fibra de vidro com cargas de resíduos (Poliéster/Fibra de vidro) e  $\text{CaCO}_3$ ” e “Caracterização de Compósitos Poliéster/Fibra de Vidro Utilizando como Carga, Carbonato de Cálcio e Resíduos de Poliéster+Fibra de Vidro” foram desenvolvidos e publicados no eXPRESS Polymer Letters <sup>JCR</sup>, 2010, no Journal of Applied Polymer Science, 2010, no 11th International Conference on Advanced Materials, 2009, nos anais do Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2010 e do Congresso Brasileiro de Ciência e Engenharia de Materiais - CBECiMat, 2010, respectivamente. Tais trabalhos foram importantes na consolidação das etapas parciais de desenvolvimento desta dissertação, através das discussões, reflexões e sugestões geradas.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Resina Poliéster

Resinas são compostos orgânicos derivados do petróleo, que passam de seu estado líquido para o estado sólido, através de um processo químico chamado “polimerização”. Atualmente existem vários tipos de resinas poliéster insaturadas comercialmente utilizadas, como Ortoftálica, Tereftálica e Isoftálica, obtidas pela reação de álcoois dihidricos ou polihídricos e ácidos dibásicos ou polibásicos. A mais comum e de uso generalizado é a Poliéster Insaturada Ortoftálica.

Materiais termofixos baseados em resinas epóxi, poliéster, entre outras, são o suporte principal de muitas aplicações técnicas devido a sua alta resistência à água, produtos químicos, térmica e a raios ultravioletas (quando aditivada com absorvedores UV), cura rápida, longo ciclo de vida, rigidez, estabilidade dimensional, dureza superficial, leveza, liberdade de design, facilidade na limpeza e manutenção, baixo custo, baixa viscosidade, propriedades mecânicas moderadas. Em muitos casos, a combinação de propriedades oferecida pelos termofixos não pode ser obtida pelos termoplásticos de engenharia (CRAWFORD, 1998 e RAM, 1997).

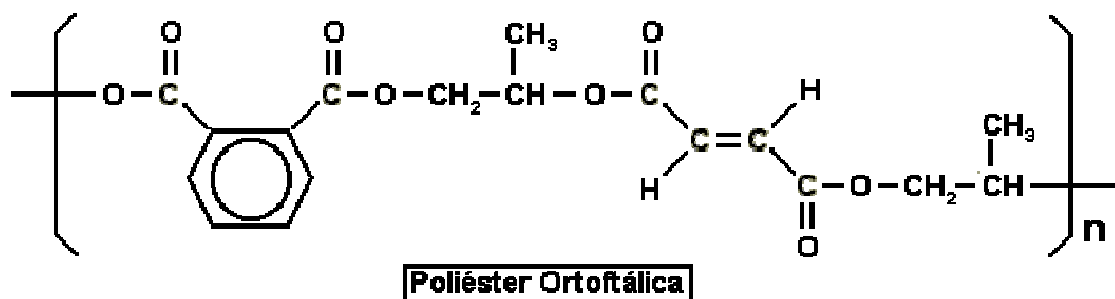
Podem ser largamente aplicadas como, por exemplo, na fabricação de tubos para transporte de água, esgotos, com ou sem pressão, em dutos de petróleo, na produção de peças técnicas para meios de transporte, revestimentos, na indústria náutica e encapsulamentos de componentes, assim como nos setores de laminação, telhas, cascos de embarcações, carenagens de automóveis, artigos para esporte e lazer e afins (CRAY VALLEY, 2007). Além disso, apresentam bom desempenho em processos de fabricação como pultrusão, filament winding (Processo de enrolamento) e hand lay-up (Laminação manual) (SILVA e AMICO, 2009).

As propriedades mecânicas da resina poliéster insaturada ortoftálica são inferiores as demais devido à dificuldade de se obter polímeros de alto peso molecular e por este motivo apresenta custo menor. Entretanto, podem ou não utilizar reforços, como a fibra de vidro e se reforçadas podem funcionar como plástico de engenharia, com boa resistência mecânica a ponto de substituir aço, ferro e concreto.

### 2.1.1. Estrutura Química

As Resinas Poliéster têm peso molecular alto, como indicado pela etimologia das palavras do termo. Poli significa muitos, e Ester é uma reação química obtida da reação de um ácido mais álcool com liberação de uma molécula de água. Poliéster significa, portanto, muitos ésteres. O termo Poliéster Insaturado indica que qualquer um dos reagentes de sua composição contém insaturação, geralmente essa insaturação vem pelo ácido ou anidrido. Os poliésteres insaturados conferem a capacidade da resina de ser líquida e, após determinado estímulo, sofrer o processo de cura e tornar-se termooestável (CRAWFORD, 1998 e RAM, 1997).

A denominação insaturada está relacionada também com a presença das duplas ligações em sua cadeia molecular. Essas duplas ligações, que serão quebradas pela ação de determinado catalisador, como calor, radiação ou peróxido orgânico, irão reagir novamente entre si para originar o polímero termooestável e irreversível, ou seja, a cadeia molecular composta por simples e duplas ligações entre os átomos de carbono resultam em um produto termofixo. A estrutura química desta resina é apresentada na Figura 3 (CRAWFORD, 1998 e RAM, 1997).



**Figura 3.** Esquema da estrutura química da resina poliéster ortoftálica

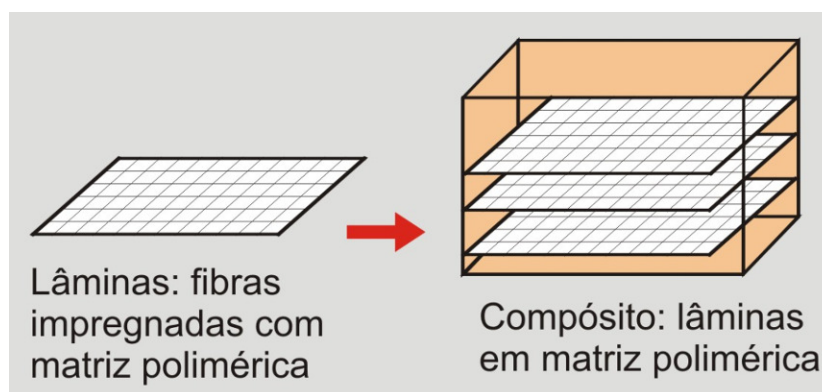
Sua composição é feita por um ácido insaturado, um ácido saturado e um bi álcool. As Resinas Poliéster Insaturadas Ortoftálicas possuem em sua composição o ácido ftálico, também conhecido como ácido ortoftálico, ou seu anidrido, que se dissolve em álcool e alguns outros solvente. O anidrido ftálico tende a se regenerar a partir dos meios ésteres. O ácido ftálico é comumente utilizado para produzir corantes, perfumes, sacarina, ftalatos e muitos outros.

## 2.2. Compósitos

Materiais compósitos podem ser definidos como materiais formados de dois ou mais constituintes com distintas composições, estruturas e propriedades e que estão separados por uma interface. O objetivo principal em se produzir compósitos é de combinar diferentes materiais para produzir um único dispositivo com propriedades superiores às dos componentes unitários. Dessa forma, compósitos com finalidades ópticas, estruturais, elétricas, optoeletrônicas, químicas e outras são facilmente encontrados em modernos dispositivos e sistemas (DEMET-UFMG, 2010).

São materiais de moldagem estrutural, formados por uma fase contínua polimérica (matriz) e reforçada por uma fase descontínua (fibras). Na moldagem destas duas fases ocorre a formação de ligações cruzadas através de um processo de cura, que acopla as duas fases, proporcionando ao material final, propriedades especiais que definem sua moderna e ampla aplicabilidade. Leveza, facilidade de transporte, resistência mecânica, química e às intempéries, flexibilidade arquitetônica, durabilidade, resistência, adaptabilidade, fácil manutenção são algumas das propriedades que garantem aos compósitos o título de produto do futuro. Engenheiros, técnicos, procuram cada vez mais os compósitos como solução para seus projetos de engenharia. Estado Unidos, Japão, Canadá, Europa e Brasil, têm no compósito um mercado em franca expansão, como dizem os parisienses: "Les composites ont les vents en poupe" (Os compósitos estão com as vendas em poupa) (ABMACO, 2010).

Vários tipos de classificação são disponíveis para compósitos. Um desses tipos de classificação define compósitos em termos da morfologia de seus agentes de reforço: compósitos particulados, com fibras e laminados, como pode ser visto na Figura 4 (ABMACO, 2010).



**Figura 4.** Esquema ilustrativo de um compósito com lâminas em matriz polimérica

As fibras de vidro são usadas para reforçar vários tipos de plásticos. Porém, na grande maioria dos casos, os plásticos usados como matriz para compósitos de Fibra de vidro são feitos com resinas poliéster insaturadas.

### **2.3. Reciclagem**

A reciclagem mecânica consiste na conversão dos descartes plásticos pós-industriais ou pós-consumo em grânulos que podem ser reutilizados na produção de outros produtos, como sacos de lixo, solados, pisos, conduítes, mangueiras, componentes de automóveis, fibras, embalagens não-alimentícias e outros. Se esses produtos possuem desempenho e características equivalentes ao do produto original (tem sua origem na própria indústria), a reciclagem é classificada como primária. Quando o produto possui característica, desempenho e propriedades mecânicas inferiores as comparadas ao produto obtido com o material virgem, a reciclagem é definida como secundária, e se aplica normalmente a resíduos pós-consumo (AMBIENTES BRASIL, 2010).

Já a reciclagem química também denominada como terciária re-processa plásticos, transformando-os em petroquímicos básicos que servem como matéria-prima em refinarias ou centrais petroquímicas. Seu objetivo é a recuperação dos componentes químicos individuais para reutilizá-los como produtos químicos ou para a produção de novos plásticos. Os novos processos desenvolvidos de reciclagem química permitem a reciclagem de misturas de plásticos diferentes, com aceitação de determinado grau de contaminantes como, por exemplo, tintas, papéis, entre outros materiais (AMBIENTES BRASIL, 2010).

E a reciclagem energética é a recuperação da energia contida nos plásticos através de processos térmicos. Usinas de reciclagem energética geram energia térmica e elétrica, a partir da queima de resíduos sólidos recicláveis, como plástico, papelão, aço, alumínio e vidro. Além de não agredir o meio ambiente, o processo industrial evita o acúmulo em lixões e aterros e suas emissões de gases. O processo já é realizado em vários países, como Japão, China, Coreia do Sul, EUA e nações europeias. No Brasil, ainda não foi construída nenhuma usina, mas a tecnologia é usada desde 2005 no projeto Usina Verde, que fica na UFRJ da Ilha do Fundão, no Rio de Janeiro (AMBIENTES BRASIL, 2010).

Durante as últimas décadas, o estudo de propriedades mecânicas de compósitos com matriz termofixa tem recebido atenção especial em razão de dois aspectos principais: a combinação das diferentes propriedades de materiais distintos criando novos produtos com propriedades melhoradas e no caso da reciclagem, a valorização do material reciclado quando incorporado através de combinação com outros materiais (ABMACO, 2010).

EDCLEIDE *et al* (2006) estudando as propriedades mecânicas e absorção de água de compósitos de Poliéster/Resíduos de fibra de vidro, com o objetivo de avaliar a possibilidade de reutilizar os resíduos recebidos do processamento de spray-up das Indústrias do Estado da Paraíba como reforço em compósitos de matriz poliéster, encontraram que a incorporação dos resíduos nos compósitos aumentou consideravelmente as propriedades mecânicas como módulo de elasticidade e resistência ao impacto, evidenciando através desses resultados que os resíduos são uma alternativa eficiente para a reciclagem e que podem ser usados como reforço para compósitos de matriz poliéster.

TONELA *et al* (2007) avaliando as propriedades mecânicas de compósitos fabricados com resina de poliéster, carbonato de cálcio e fibra de vidro dos resíduos da indústria automotiva, identificaram em seus resultados que o aumento do teor de resina provocou uma diminuição da resistência ao impacto e resistência à tração, mas essa propriedade aumenta quando o teor de resíduos aumenta. A adição de  $\text{CaCO}_3$  resultou em um material com bom acabamento superficial e diminuiu a incidência de bolhas nos compósitos. Por outro, o excesso de  $\text{CaCO}_3$  fragiliza o material, sendo inviável o seu uso comercial.

ZHANG *et al* (2004) relataram a diminuição na resistência ao desgaste e coeficiente de atrito quando nanosílica e nanoalumina foram incorporadas a matriz epóxi. Xu e Mellor (2001) estudaram os efeitos de cargas sobre a resistência ao desgaste de revestimentos poliméricos termoplásticos e descobriram que revestimentos poliméricos carregados de sílica e dolomita apresentaram maior taxa de desgaste do que o polímero não preenchido. LARSEN *et al* (2007) relataram que a adição de  $\text{CuO}$  aumenta o desgaste em relação ao epóxi puro. Assim, cargas dispersas parece ser uma ponta dupla na modificação das propriedades tribológicas.

CAMPOS *et al* (2007) na caracterização e preparação de filmes de compósitos poli (fluoreto de vinilideno) (PVDF) / $\text{CaCO}_3$ , a fim de analisar a incorporação de  $\text{CaCO}_3$  em PVDF para futura aplicação na restauração óssea e preenchimento ósseo, enfatiza a contribuição dos novos materiais, envolvendo compósitos e blendas, atingindo os mais variados campos da ciência, tanto científico como do ponto de vista tecnológico. Isto é devido às necessidades do homem em aplicações, especialmente nas áreas da medicina.

## 2.4. Tribologia

A palavra tribologia é derivada das palavras gregas tribos que significa atrito e logos que significa estudo, ou seja, estudo do atrito. Tribologia é a ciência e tecnologia de superfícies que interagem, abrangendo o estudo do atrito, do desgaste, da lubrificação e das irreversibilidades (HUTCHINGS, 1992).

Atrito e desgaste de corpos sólidos são processos multi-funcionais bastante complexos que envolvem a interação de suas camadas superficiais e que são acompanhados por uma mudança na estrutura e propriedades dos materiais sob a influência da carga, temperatura e dos ingredientes ativos em torno. O objetivo da pesquisa em tribologia é compreender os seus mecanismos e eliminar os prejuízos resultantes do atrito e desgaste. A pesquisa em tribologia leva a uma maior eficiência, melhor desempenho, menos avarias e economias significativas em materiais e despesas. Apesar de o atrito ser geralmente considerado um incômodo, há circunstâncias em que no lado do crédito são dispositivos importantes, tais como embreagens, freios, dispositivos de tração e fricção (DUTTA, 2009).

A compreensão dos mecanismos de contato entre superfícies com movimento relativo entre si requer considerações aos níveis macro, micro e nano. Os desenvolvimentos tecnológicos do final do Século XX (energia, materiais, processos, instrumentação, revestimentos com filmes finos e modelagem entre os corpos) têm possibilitado ampliar a visão e os recursos para a consolidação da ciência tribológica (MEDEIROS, 2002).

Os desafios multiplicam-se, dada a complexa e crescente gama de demanda por produtos melhores, mais eficientes, mais confortáveis, mais baratos e de possível utilização em ambientes diversificados (MEDEIROS, 2002).

O estudo do sistema tribológico (atrito, desgaste e lubrificação) é fundamental para a sistemática de aprendizado, compreensão e futura recomendação para prevenção do dano sobre os mecanismos envolvidos.

A tribologia está definitivamente ligada ao nosso cotidiano, desde uma simples movimentação de articulações, como a do quadril humano, que demanda de baixa força de atrito, em sistemas mecânicos, como freios e embreagens, onde o atrito é essencial, entre o pneu de um veículo e a superfície do pavimento e até mesmo entre o calçado e o piso durante a marcha. O mundo em que vivemos seria completamente diferente se não houvesse o atrito entre os corpos ou se este fosse menos intensa.

Os avanços na tribologia contribuem para a evolução da sociedade tecnológica através do desenvolvimento de trens de alta velocidade, aeronaves, estações espaciais, disco rígido de computadores, implantes artificiais e muitos outros sistemas de engenharia e bioengenharia (STACHOWIAK e BATCHELOR, 1996).

#### ***2.4.1. Tribologia de Polímeros***

Atualmente, existem milhares de tipos de polímeros em todo mundo, com características diferentes para as mais diversas aplicações. Um dos motivos pelo qual o uso desses materiais tem aumentado significativamente na sociedade e na indústria, além das suas propriedades que o diferem de outros materiais e ao seu baixo custo, está no aumento da exigência de novas normas quanto à proteção do meio ambiente. Este assunto tem sido de grande importância e bastante abordado neste século devido às ocorrências e acontecimentos decorrentes da resposta da natureza a exploração e atuação humana (NASCIMENTO, 2009)

Apesar de o termo polímero ser utilizado para descrever uma grande faixa de materiais. Porém, apenas poucos polímeros apresentam propriedades tribológicas notáveis, portanto, muitas pesquisas são voltadas para esse número relativamente limitado de polímeros. As características tribológicas desses polímeros favorecem sua aplicação em vários ramos das indústrias. (LIMA DA SILVA, 2010).

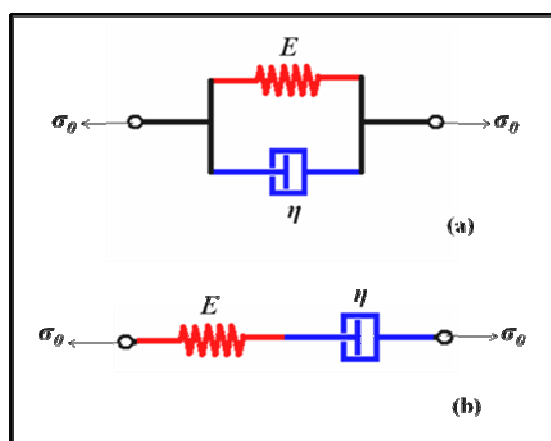
O comportamento mecânico ou dinâmico-mecânico de um material será governado por sua viscoelasticidade, que será função do tipo de ensaio e de solicitação aplicados. Dependendo da resposta ao estímulo mecânico, o material pode ser classificado como elástico ou viscoso. Para um sólido perfeitamente elástico ou Hookiano a deformação é proporcional à tensão aplicada e vice-versa, segundo a lei de Hooke. Um material viscoso ideal obedece à lei de Newton, que estabelece que a tensão e a taxa de cisalhamento estão relacionadas através de uma característica intrínseca que é a viscosidade (WUNDERLICH, 1997, CASSU e FELISBERTI, 2005, WETTON, 1986). Materiais poliméricos que são viscoelásticos 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 a 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).

Ao longo dos anos houve muitas tentativas de simular o comportamento de materiais viscoelásticos. Os melhores modelos matemáticos, foram baseados em elementos de mola e amortecedor para representar, respectivamente, a resposta elástica e viscosa de materiais plásticos, embora não haja nenhuma estrutura molecular discreta que se comporte como esses elementos individuais (CRAWFORD, 1998).

Dois desses modelos, ainda hoje comentados, são os de Maxwell e de Voigt-Kelvin que consistem em uma mola e um amortecedor em série e em paralelo, respectivamente, ver Figura 5 (NASCIMENTO, 2009).



**Figura 5.** Representação dinâmica de materiais viscoelásticos simples, (a) modelo de Voigt-Kelvin, e (b) modelo de Maxwell (Johnson, 1989)

Cabe ressaltar que, individualmente, nenhum desses dois modelos tem a capacidade de representar o comportamento real de um material viscoelástico. Entretanto, sua utilização em conjunto, no âmbito da modelagem, pode aproximar-se do comportamento mecânico de um material com essas características.

Devido ao crescente uso e produção destes materiais, principalmente como compósitos de matriz polimérica, um estudo do comportamento dos polímeros quando em contato com outros tipos de materiais e da compreensão da mecânica do contato torna-se necessário. (NASCIMENTO, 2009).

Tais propriedades mecânicas podem ser avaliadas através da Análise Dinâmico-Mecânica (DMA), a partir de uma solicitação, na aplicação de uma tensão ou na forma de uma deformação mecânica oscilatória, normalmente senoidal de baixa amplitude a um sólido ou líquido viscoso, com o monitoramento da resposta do material, expressa como tensão ou deformação, respectivamente, sob variação de frequência ou de temperatura. Ensaio mecânicos são classificados como estáticos, uma vez que se aplica ao material uma tensão ou deformação constante, ou a taxas constantes. Estes experimentos são destrutivos, já que uma de suas finalidades é a determinação de propriedades limite do material (CASSU e FELISBERTI, 2005, WETTON, 1986).

## **2.5. Rugosidade Superficial**

Na realidade, não existem superfícies perfeitamente planas, há sempre um grau de rugosidade por asperezas inerentes a todas as superfícies; atrito é devido à interação entre estas asperezas que resulta em dissipação de energia. O contato entre as asperezas dos materiais é responsável pelo atrito do sistema. A área de contato real é a soma da área de contato das asperezas e esta é muito menor que a área de contato aparente. (DUTTA, 2009).

Sabe-se que, as superfícies de engenharia apresentam um perfil de rugosidade, isto é: picos e vales sejam estes na escala macroscópica, facilmente perceptível ao olho humano ou, ainda, em escala microscópica, cuja visualização é feita através de equipamentos ópticos, elétricos e/ou de força atômica no caso de grandes ampliações.

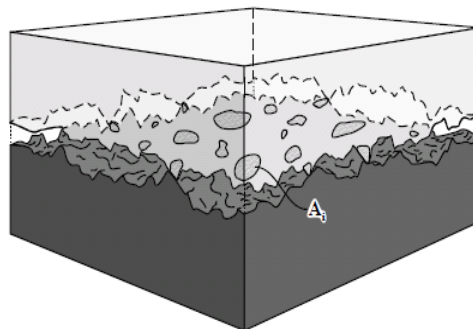
De acordo com STACHOWIAK e BATCHELOR (1996), “Superfícies de sólidos representam uma forma muito complexa da matéria, muito mais complicado do que um plano simples. Existe uma variedade de defeitos e distorções presentes sobre qualquer superfície real. Estas características da superfície variam desde distorções maiores da superfície até irregularidades microscópicas locais, e exercem uma forte influência sobre o atrito e desgaste”.

Para superfícies perfeitamente lisas em contato, como assumido na teoria de Hertz, o perfil é contínuo dentro e fora da área de contato. Porém, tais superfícies são raramente encontradas nas mais diversas aplicações e apresentam rugosidade superficial, geralmente aleatória.

Um dos materiais citados pela literatura, cuja superfície obtida pode ser atômica lisa é a mica, a qual é utilizada em experimentos como contra corpo no contato com outro material, na finalidade de estudar as características decorrentes do contato com uma superfície perfeitamente lisa, fazendo relações no estudo do atrito, mecanismos de desgaste e outros parâmetros.

O contato entre superfícies rugosas nos leva a definir duas áreas de contato distintas: a área de contato aparente e a área de contato real. Na realidade, diferentemente da hipótese que se assume na teoria de Hertz, quanto às superfícies lisas, a rugosidade causa uma descontinuidade da área de contato tal que a área de contato real é apenas uma parte da área de contato aparente. A relação entre estas duas depende, principalmente, dos materiais em contato, da rugosidade superficial e da carga normal aplicada (NASCIMENTO, 2009).

O contato entre corpos sólidos em cargas normais de funcionamento é limitado a pequenas áreas do contato real entre os picos de qualquer superfície. A natureza aleatória da rugosidade impede qualquer entrelaçamento ou articulação de superfícies. A área de contato real é, portanto, distribuída entre um número de micro-áreas de contato, Figura 6 (STACHOWIAK e BATCHELOR, 1996).



**Figura 6.** Área de contato real de superfícies rugosas em contato.  $A_r$  é a área de contato real, que é igual ao somatório de pequenas áreas de contato  $A_i$  devido às asperezas.




(STACHOWIAK e BATCHELOR, 1996)

Mesmo uma superfície altamente polida tem rugosidade superficial em diferentes escalas de comprimento. Quando dois corpos com superfícies nominalmente planas são postos em contato, a área de contato real é normalmente apenas uma pequena fração da área de contato nominal. Podemos visualizar as regiões de contato como pequenas áreas onde asperezas de um sólido são espremidas contra asperezas do outro sólido. A área de contato real depende não só da pressão pela qual os sólidos são espremidos, mas também sobre a interação com adesão entre as superfícies (ZILBERMAN e PERSSON, 2002).

A área de contato real é o resultado da deformação dos pontos altos das superfícies de contato, que são geralmente denominados de asperezas. Tensões de contato entre asperezas são grandes, [...], e, em alguns casos localizados, pode resultar em deformação plástica. [...]. A relação entre a área de contato real e a carga é extremamente importante, pois afeta a lei de atrito e o desgaste (STACHOWIAK e BATCHELOR, 1996, p. 461).

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

<b>DESVIOS DE FORMA</b> (representados por uma seção do perfil)	<b>EXEMPLOS DE TIPOS DE DESVIOS</b>	<b>EXEMPLOS DE CAUSAS GERADORAS DOS DESVIOS DE FORMA</b>
 1ª Ordem	<b>FORMA</b>	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		<b>ONDULAÇÃO</b>
 3ª Ordem	<b>RUGOSIDADE</b>	Ranhuras ou raios
 4ª Ordem		Estrias Escamas Protuberâncias
5ª Ordem Não mais representável nesta forma gráfica		Microestrutura do material
6ª Ordem Não mais representável nesta forma gráfica	Reticulado cristalino do material	
 Superposição dos desvios de primeira à quarta ordem		

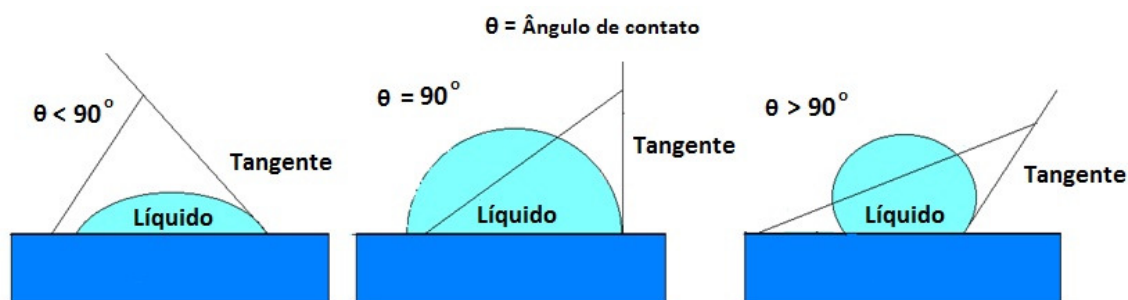
**Figura 7.** Desvios de forma do perfil de uma superfície, conforme DIN 4760, adaptado de BET (1999) apud MEDEIROS (2002)

Como mostrado na figura 7, a 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.

A introdução dos métodos estatísticos para a análise das topografias superficiais foi provavelmente feita por Abbott-Firestone em 1933 quando se propôs a curva de área. Essa curva representa a área real de contato, também conhecida como Curva de Abbott, e é obtida de um perfil superficial. É compilada considerando a fração do perfil da superfície cruzada infinitamente com um plano fino posicionado acima de um plano de referência.

### 2.5.1. Compatibilidade com fluidos e Energia de superfície

Para verificar a compatibilidade com fluidos líquidos, ou seja, a característica hidrofílica ou hidrofóbica de uma superfície, líquidos teste são utilizados na superfície das amostras e o ângulo de contato da gota sobre a superfície da amostra é registrado. O ângulo de contato determina se o líquido molha o sólido ou não. Se o líquido é fortemente atraído pela superfície do sólido (no caso de água), o sólido é fortemente hidrofílico, a gota irá se espalhar completamente sobre a superfície sólida e o ângulo de contato será próximo de  $0^\circ$ . Sólidos menos hidrofílicos terão um ângulo de contato de até  $90^\circ$ . Se a superfície é altamente hidrofílica, o ângulo de contacto será entre  $0^\circ$  e  $30^\circ$ . Se a superfície sólida é hidrofóbica e o líquido de ensaio é a água, o ângulo de contato será superior a  $90^\circ$  (Figura 8). Em superfícies altamente hidrofóbicas, os ângulos de contato (no caso de água) são tão elevados como  $150^\circ$  ou até mesmo cerca de  $180^\circ$ . Nessas superfícies, as gotas de água simplesmente descansam na superfície, sem realmente molhar de forma significativa (exemplos desse tipo são superfícies fluoradas como Teflon) (DUTTA, 2009).



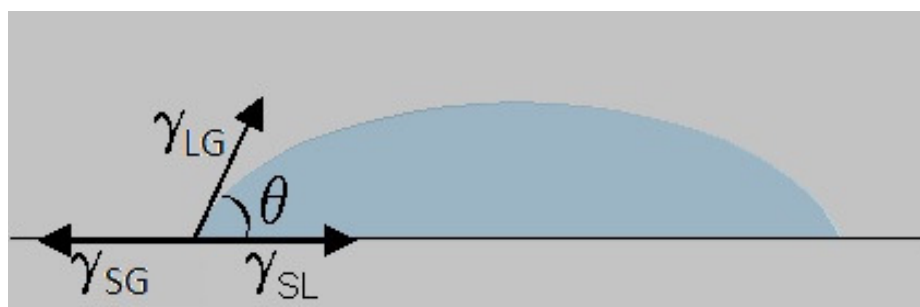
**Figura 8.** Esquema das formas dos ângulos de contato por uma gota de água

Em geral, duas abordagens diferentes são usadas para medir ângulos de contato em sólidos não – porosos: goniometria e tensiometria. A goniometria envolve a observação de uma gota séssil de um líquido teste sobre um substrato sólido. Tensiometria envolve a medição das forças de interação quando um sólido esta em contato com um líquido teste. A técnica utilizada neste trabalho é a técnica da gota séssil goniométrica. As aplicações práticas da determinação do ângulo de contato incluem: a determinação da limpeza da superfície, molhabilidade, adesão, tratamento de superfície e avaliação de revestimentos (DUTTA, 2009).

LIU, CHEN e XIN (2006) desenvolveram superfícies super hidrofóbicas usando sílica/fluoropolímero inspirado no comportamento das folhas de lótus, que apresentam um efeito de auto-limpeza.

A capacidade de molhamento de um líquido é função das energias de superfície da interface sólido - gás, líquido - gás e interface sólido - líquido. A energia de superfície através de uma interface ou a tensão superficial na interface é uma medida da energia necessária para formar uma unidade de área de uma nova superfície na interface. As ligações intermoleculares ou forças de coesão entre as moléculas do líquido causam uma tensão de superfície. Quando o líquido encontra outra substância, geralmente há uma atração entre os dois materiais. Líquidos com fracas ligações de coesão e uma forte atração para outro material (ou o desejo de criar ligações adesivas) tenderão a se espalhar sobre o material. Líquidos com ligações coesivas fortes e forças adesivas fracas tenderão a formar uma gota quando em contato com outro material (DUTTA, 2009).

Energia de superfície pode estar relacionada com o ângulo de contato pela equação de Young, ver Figura 9:



**Figura 9.** Esquema da Energia de superfície por uma gota de água

$$\gamma_{SG} = \gamma_{SL} + \gamma_{LG} \cos \theta \quad (1)$$

Onde,  $\gamma_{SG}$  = energia interfacial sólido - gás,

$\gamma_{LS}$  = energia interfacial Sólido - líquido,

$\gamma_{LG}$  = energia interfacial Líquido - gás e

$\theta$  = ângulo de contato entre o sólido e o líquido

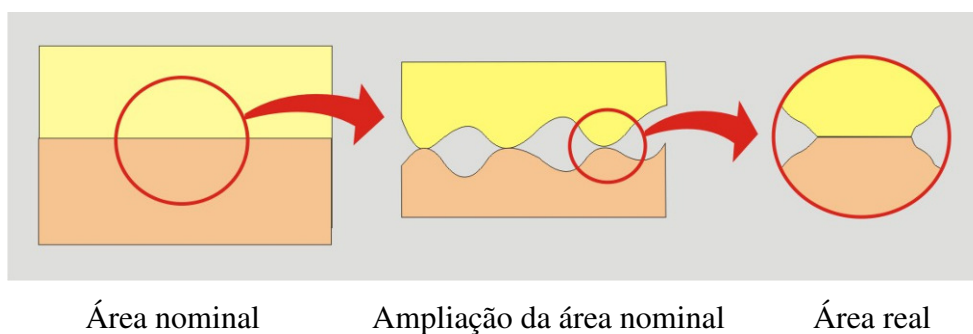
## 2.6. Mecânica do Contato e do Dano

Segundo JOHNSON (1989), no prefácio do seu livro “Contact Mechanics”, o tema ‘mecânica do contato’ teve início a partir da publicação do artigo “On the contact of elastic solids” por Heinrich Hertz em 1882. A questão surgiu quando se questionou se a deformação elástica de lentes vítreas sob a ação da força que as mantinha em contato poderia ter uma influência significativa sobre o padrão das franjas de interferência.

Ao longo do tempo, outros pesquisadores começaram a desenvolver novas teorias e modelos que eliminassem parcialmente ou completamente algumas das hipóteses impostas pelo modelo pioneiro de Hertz na mecânica do contato. O modelo desenvolvido por Hertz acabou por se tornar uma base para o desenvolvimento de modelos mais complexos. Estes últimos, adicionaram ao cálculo desses parâmetros, características das superfícies, tal como o perfil de rugosidade de um dos corpos em contato (modelo de Greenwood e Williamson), e a adesão entre os corpos em contato (modelo de Johnson, Kendall e Roberts).

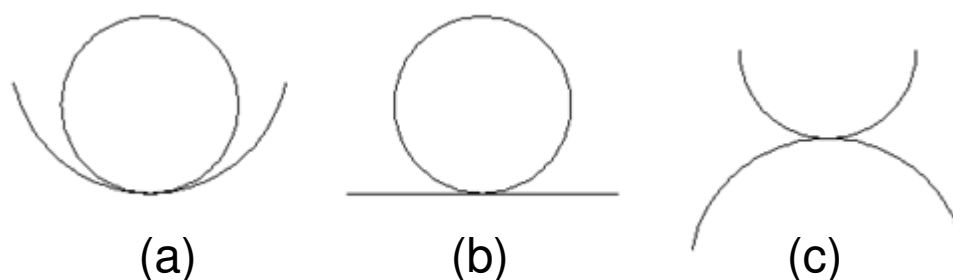
### 2.6.1. Contato entre superfícies

Quando duas superfícies estão em contato, o contato real deve ser relacionado ao contato microscópico, pois por melhor que seja o acabamento, dificilmente a superfície será perfeitamente lisa, assim, é de se esperar, que a área real de contato seja muito menor que a área nominal, Figura 10, aumentando proporcionalmente com a aplicação de uma força externa no sentido normal à superfície, devido à deformação dos picos das heterogeneidades superficiais ou asperezas (SERBINO, 2005).



**Figura 10.** Esquema ilustrativo das áreas nominal e real de contato

Alguns instrumentos são utilizados para o estudo do atrito, desgaste e lubrificação, e esses ensaios estão relacionados principalmente ao tipo de contato existente no tribosistema, podendo ser do tipo conforme, limiar entre conforme e não-conforme e não-conforme. Da VINCI apud MEDEIROS (2002) apresentou a concepção de contato mecânico, exposta na Figura 11, para a osculação de contato entre dois corpos sólidos interceptados.



**Figura 11.** Osculação do contato, na definição de Da VINCI apud MEDEIROS (a) Contato Conforme, (b) Limiar entre Conforme e Não - Conforme e (c) Contato Não - Conforme

Entende-se por contato conforme aquele no qual a área nominal entre as superfícies representa o tamanho do contato, ao passo que em superfícies com geometria não-conforme o contato ocorre através de um ponto ou uma linha (XU e MELLOR, 2001).

A teoria de Greenwood e Williamson citada por HUCTCHINGS (1992<sup>a</sup>) deduzida apenas para contatos elásticos pode ser utilizada para descrever também a fluidez plástica entre asperezas. É afirmado que a proporção de contatos entre asperezas para as quais fluidez plástica ocorre depende do valor do índice de plasticidade  $\psi$ , que é dado por:

$$\psi = E/H (\sigma^*/r)^{1/2} \quad (2)$$

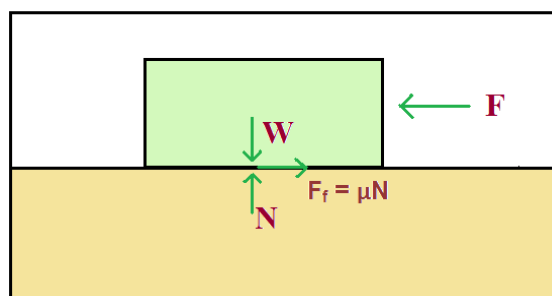
Onde E, é o módulo de elasticidade, H é a dureza do material,  $\sigma^*$  é o desvio padrão da distribuição de altura das asperezas e r é o raio das asperezas (assumindo ser o mesmo para todas as asperezas) (HUTCHINGS 1992a; ZUM GAHR, 1987).

Se  $\psi < 0,6$  prevalece o contato elástico, entretanto, se  $\psi > 1$ , a deformação plástica se sobrepõe. Superfícies metálicas produzidas por métodos de engenharia convencionais, assumem valores de  $\psi$  entre 0,1 e 100. Para cerâmicas e polímeros, entretanto, o fator E/H é geralmente um décimo do apresentado pelos metais, levando-os a uma redução no valor de  $\psi$ . Dessa forma, para esses materiais, o contato clássico é mais acentuado que o plástico. (HUTCHINGS, 1992a; ZUM GAHR, 1987).

### 2.6.2. Atrito do Par Metal-Polímero

A força conhecida como **atrito** pode ser definida como a resistência encontrada por um corpo em movimento sobre outro. Esta ampla definição abrange duas importantes classes do movimento relativo: **deslizamento** e **rolamento**. A distinção entre atrito de rolamento e deslizamento é útil, mas as duas não são mutuamente exclusivas e, mesmo aparentemente ‘pura’, o rolamento quase sempre envolve algum deslizamento (HUTCHINGS, 1992a).

Esta força de resistência é à força de atrito. A Figura 12 mostra o diagrama de forças para um bloco no chão. As setas são vetores indicando direções e magnitudes das forças. W é a força peso, N é a força normal, F é uma força aplicada qualquer e  $F_f$  é a força de atrito que é igual ao coeficiente de atrito do material ( $\mu$ ) vezes a força normal. (DUTTA, 2009).



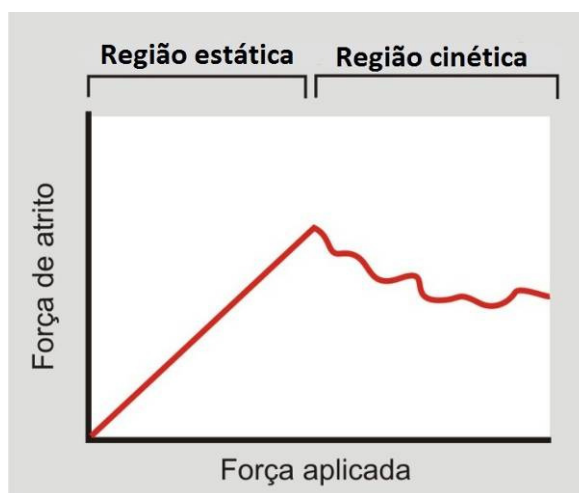
**Figura 12.** Ilustração esquemática do diagrama de forças para um bloco no chão (adaptado de HUTCHINGS, 1992a)

Os metais obedecem a primeira e segunda Lei do Atrito, o que geralmente não ocorre com os materiais poliméricos. A terceira Lei, por sua vez, geralmente é válida para velocidades de deslizamento de até uma ordem de grandeza, em m/s (HUTCHINGS, 1992a, p.23-24).

**Quadro 2** – Leis do atrito de deslizamento (HUTCHINGS, 1992a apud MEDEIROS, 2002).

<p><b>Primeira Lei: <math>F = \mu N</math></b></p> <p><b>“A força de atrito <math>F</math> é proporcional à carga normal <math>N</math>”</b></p> <p>Não obedecem à Primeira Lei: geralmente os Materiais Poliméricos</p>
<p><b>Segunda Lei:</b></p> <p><b>“A força de atrito é independente da área aparente de contato”</b></p> <p>Não obedecem à Segunda Lei: geralmente os Materiais Poliméricos</p>
<p><b>Terceira Lei:</b></p> <p><b>“A força de atrito é independente da velocidade de deslizamento”</b></p> <p>Não obedecem à Terceira Lei: Em sistemas de deslizamento animados com velocidades de dezenas ou centenas de metros por segundo, o coeficiente de atrito dinâmico <math>\mu_d</math> diminui quando a velocidade <math>V_s</math> aumenta</p>

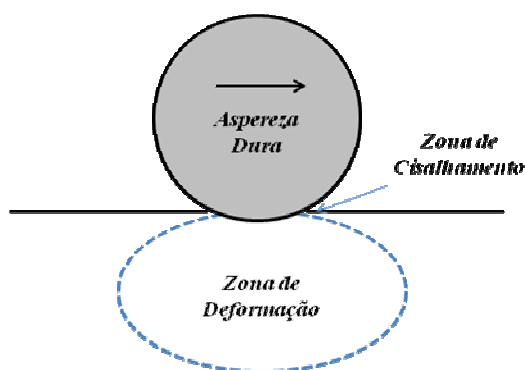
Existem dois tipos de atrito: o atrito estático e o atrito dinâmico, como mostrado na Figura 13. Quando dois objetos deslizam um sobre o outro, uma pequena quantidade de força irá resultar em nenhum movimento. O atrito estático é a força necessária para iniciar o movimento. Se um pouco mais de força é aplicada, o objeto "liberta" e desliza, embora a força ainda deva ser aplicada ao objeto para que o deslizamento se mantenha. Este é o atrito cinético ou dinâmico. O atrito estático é maior ou igual à força de atrito cinético (DUTTA, 2009).



**Figura 13.** Gráfico ilustrativo do atrito estático e dinâmico

O contato entre polímeros ou entre um polímero e um metal é em frequência, predominantemente elástico. Neste importante aspecto, o atrito de polímeros difere fundamentalmente dos metais. Nos polímeros, a taxa  $E/H$ , onde  $E$  é o módulo de elasticidade e  $H$  é a dureza do material, determina a extensão da plasticidade na região de contato; a topografia superficial é também importante. Para os metais, o valor de  $E/H$  é tipicamente **100** ou maior, enquanto para muitos dos polímeros mais suaves (baixo módulo de elasticidade),  $E/H$  é apenas aproximadamente **10**. O contato é, entretanto, quase completamente elástico, exceto contra superfícies muito rugosas (HUTCHINGS, 1992a, p.23-24).

De acordo com HUTCHINGS (1992a), “o atrito entre polímeros e metais pode ser atribuído a dois mecanismos: o termo *deformação* envolvendo a dissipação de energia completamente em torno da área de contato local e o mecanismo de *aderência*, originalmente da interface entre o corpo deslizante e a contra-face, que é originada da quebra de ligações poliméricas e conseqüente ligação entre as superfícies em contato” (Ver Figura 14).



**Figura 14.** As origens do atrito associado com o deslizamento de uma aspereza dura sobre uma superfície polimérica lisa (HUTCHINGS, 1992a)

Coeficientes de atrito ( $\mu$ ) em ensaios de deslizamento envolvendo pares metal-polímero geralmente se apresentam entre 0,1 e 0,5 e variam muito com a carga normal, velocidade de deslizamento e temperatura.

Portanto, o atrito não é uma propriedade do material, é uma propriedade do sistema (incluindo o meio ambiente). O Atrito depende principalmente da temperatura de operação, da rugosidade dos materiais em contato, da atmosfera (ar, nitrogênio, vácuo), da presença de um lubrificante ou não, e da velocidade de movimento. O mesmo material pode apresentar variação de atrito com diferentes parâmetros do sistema. Desta forma, os resultados de atrito para os pares de materiais que tenham sido ensaiados em condições diferentes, não podem ser comparados. No entanto, comparando pares de diferentes materiais nas mesmas condições, pode-se ter uma idéia de como um par se comporta em relação a outros tais pares. (DUTTA, 2009).

COULOMB apud PERSSON (2000) investigou a influência de cinco principais fatores sobre o atrito: a natureza dos materiais em contato e sua camada superficial, a extensão da área superficial, a força normal, o intervalo de tempo que as superfícies permaneceram em contato estacionário e as condições ambientais, tais como temperatura, umidade e vácuo.

LIMA DA SILVA (2006) no estudo dos pares tribológicos aço AISI 1045-Poliuretano submetidos a ensaios de microabrasão, a seco e a dois corpos identificou oito diferentes mecanismos de desgaste no corpo-de-prova plano estacionário do poliuretano, segundo a variação do ângulo da geratriz,  $\alpha$ . Identificou também que a magnitude da variação entre a temperatura de contato menos a temperatura ambiente, monitorada continuamente, associou-se a morfologia do desgaste, como constatado por Medeiros (2002), comprovando que a medida dessas temperaturas deve ser mais explorada em estudos tribológicos. Ela constatou, também

que a pressão de contato, velocidade e distância de deslizamento influenciaram no comportamento da variação de temperatura durante os ensaios.

DUTTA (2009) investigou a variação nas propriedades tribológicas (atrito dinâmico e desgaste) e energia de superfície de uma resina epóxi comercial modificada pela adição de pós metálicos variados (Ni, Al, Zn, Ag), revestida em aço carbono, utilizando dois agentes de cura com temperaturas distintas e observou que quando curado a 30°C, o atrito e o desgaste diminuíram significativamente devido a reação de separação de fases ter sido favorecida, mas aumentaram quando curados a 70°C e 80°C, devido a reação de ligação cruzada ter sido favorecida neste caso, assim como a diminuição significativa nas energias de superfície com a adição de modificadores.

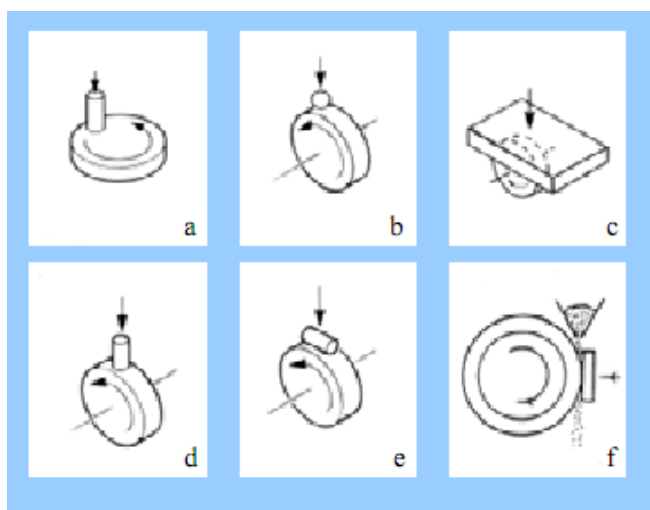
## 2.7. Desgaste

Desgaste é o dano progressivo, envolvendo a perda de material, que ocorre na superfície de um componente, como resultado de seu movimento relativo em relação a outro componente, este é um companheiro quase inevitável do atrito. As conseqüências econômicas do desgaste são generalizadas e abrangentes, pois envolvem não apenas os custos de peças de reposição, mas também as despesas envolvidas no tempo de máquina parada e perda de produção. Outro fator importante pode ser a diminuição da eficiência das instalações e equipamentos usados que podem conduzir a um desempenho inferior e maior consumo de energia. A taxa de desgaste de um contato deslizante é convencionalmente definida como o volume perdido a partir da superfície usando por unidade a distância de deslizamento. A taxa de desgaste depende de vários parâmetros: temperatura de funcionamento, a carga normal, velocidade de deslizamento relativa, quantidade de lubrificação e propriedades térmicas, mecânicas e químicas dos materiais em contato. Se a interface é contaminada por terceiros corpos sólidos (como a sujeira) a situação pode ser mais complexa (LARSEN *et al.*, 2007).

Semelhante ao atrito, desgaste não é uma propriedade do material, mas depende dos parâmetros acima referidos. Normalmente, os materiais que exibem alto atrito também apresentam altas taxas de desgaste. No entanto, isso nem sempre é verdade. Os materiais como polímeros ou interfaces com lubrificantes sólidos apresentam baixo atrito, mas taxas de desgaste relativamente alta (LARSEN *et al.* 2007).

### 2.7.1. Ensaio de Desgaste

Diferentes técnicas são aplicadas a ensaios de desgaste, algumas sem especificação padrão, porém muitas destas têm sido aceitas por laboratórios de todo o mundo (ZUM GAHR, 1987). Alguns tipos de configurações podem ser vistos na Figura 15.



**Figura 15.** Ensaio tribológicos. a) pino-disco na face plana; b) esfera-disco; c) chapa disco; d) pino-disco na borda; e) cilindro-disco; f) bloco-roda, conhecido como roda de borracha

### 2.7.2. Mecanismos de Desgaste

De acordo com HUTCHINGS (1992a) “Polímeros são muito mais moles que metais ou materiais cerâmicos, com valores de módulo elástico tipicamente um décimo ou até menos que estes materiais. Portanto, quase toda a deformação devido ao contato ou ao deslizamento ocorre dentro do polímero, e o acabamento superficial do contra-corpo duro tem uma forte influência sobre o mecanismo do desgaste resultante”.

A norma DIN 50320 apud ZUM GAHR (1987) classifica e define os mecanismos de desgaste, conforme Tabela 1. ZUM GAHR (1987) também cita a classificação de mecanismos de desgaste utilizada por Jahanmir em 1980: Adesivo, delaminação, fretting, abrasão, erosão, desgaste por impacto, fadiga superficial, desgaste corrosivo, desgaste difusivo e desgaste por contato elétrico.

**Tabela 1**– Classificação de mecanismos de desgaste, adaptado da norma DIN 50320

MECANISMO DE DESGASTE	DEFINIÇÃO
<i>Adesivo</i>	Formação e subsequente quebra de ligação adesiva interfacial
<i>Abrasivo</i>	Remoção de material devido a esclerometria (“scratching”)
<i>Fadiga</i>	Fadiga e formação de trincas na região superficial e subsuperficial devido à tensão cíclica tribológica que resulta na separação de material.
<i>Corrosivo</i>	Formação de produto de reação química como um resultado de interação química entre os elementos de um tribosistema iniciado pela ação tribológica

Os diferentes tipos de desgaste também podem ser definidos da seguinte forma:

- Desgaste por fusão: Em alguns casos, fusão localizada na camada superior do sólido em desgaste pode ocorrer.
- Desgaste Oxidativo: É o resultado devido à oxidação do material em desgaste. Os óxidos são formados sob condições de deslizamento à seco ou lubrificado por qualquer metal ensaiado contra metal ou metal contra cerâmica. Esses óxidos reduzem o atrito no contato entre metais, evitando um desgaste severo. Atmosferas e lubrificantes desempenham um papel muito importante no mecanismo de desgaste oxidativo (BELY *et al*, 1982).
- Desgaste Adesivo: ocorre devido à ruptura dos pontos de contato ou asperezas que se submetem a adesão ou soldagem a frio (cold welding). Para o desgaste adesivo ocorrer é necessário que as superfícies estejam em contato íntimo uma com a outra. As superfícies que são mantidas separadas por filmes de lubrificação, filmes de óxido e etc. reduzem a tendência para a adesão ocorrer.
- Desgaste abrasivo: desgaste abrasivo é o dano à superfície de um componente que surge devido ao movimento relativo à superfície de quaisquer asperezas mais duras ou talvez partículas duras presas na interface. Isso também pode ocorrer se a contra face for tão áspera e intrinsecamente mais dura do que o componente em desgaste.
- Desgaste por fadiga: fadiga é conhecida por ser uma mudança no estado do material devido a tensões repetidas (cíclicas), nas quais resultam em fratura progressiva. Desgaste Microscópico causado por fadiga pode ser acompanhado por "pitting" – desmoronamento macroscópico por fadiga nas seções de superfície individual de materiais à base de polímeros (HONG, 2002).

HUTCHINGS (1992a) utiliza o tipo de movimento relativo para classificar o tipo de mecanismo de desgaste geral, como por exemplo, o desgaste por deslizamento. Dentro desses mecanismos estão associados diferentes tipos de desgaste. Ele sugere que no desgaste por deslizamento podem surgir fragmentos de desgaste, os quais geram o tipo de desgaste abrasivo e, portanto, a abrasão.

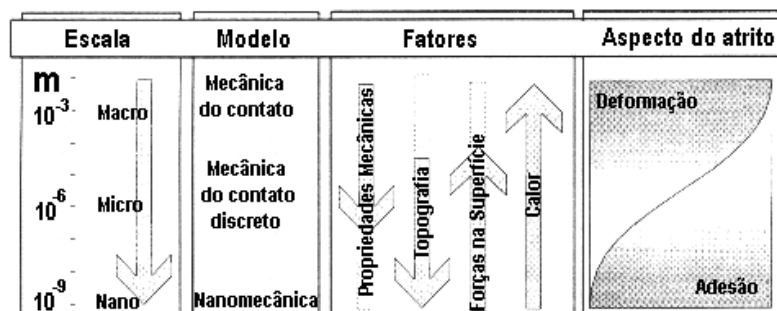
As palavras “scuffing”, “scoring” e “galling” estão frequentemente associadas a desgaste por deslizamento severo e o uso delas varia com a localização geográfica. “Scuffing”, usado no Reino Unido, refere-se a dano superficial localizado, associado com soldagem local entre as superfícies postas em deslizamento, o termo é normalmente utilizado para descrever a quebra de lubrificação, geralmente a altas velocidades de deslizamento. Nos Estados Unidos, o termo “scoring” é algumas vezes usado como sinônimo de “scuffing” como descrito acima, e ambos os termos podem resultar em riscos (“scratch”) por partículas abrasivas. “Galling” representa uma forma mais severa de “scuffing”, devido a soldagem local, e está associado a dano superficial grosseiro. A palavra geralmente refere-se a dano oriundo de deslizamento sem lubrificação, a baixa velocidade, caracterizado por superfície altamente rugosa e transferência ou destacamento de grandes fragmentos de material HUTCHINGS (1992a).

Se a superfície oposta é lisa, então o desgaste pode resultar de aderência entre as superfícies, e envolvem apenas deformação na camada superficial do polímero. Por outro lado, se esta for rugosa, sua aspereza irá causar deformações no polímero a uma profundidade significativa e o desgaste resultará então o de abrasão associado com a deformação plástica do polímero, ou de crescimento de trincas de fadiga na região deformada. Estas duas classes de mecanismo do desgaste, envolvendo a superfície e a subsuperfície, respectivamente, foram denominadas processos de desgaste interfacial e coesivo (HUTCHINGS, 1992a).

Em geral, polímeros submetidos ao deslizamento contra superfícies duras e altamente polidas irão apresentar desgaste adesivo, enquanto que em superfícies rugosas promovem o mecanismo coesivo.

LIM (1998) apud MEDEIROS (2002) propõe a construção de mapas de desgaste que possam utilizar parâmetros facilmente controláveis e mensuráveis na prática. Dessa forma, ainda que possuam natureza empírica, esse autor considera os mapas capazes de proporcionar uma melhor compreensão do comportamento do desgaste. Dentre tais parâmetros, inclui:

- a) Pressão de contato;
- b) Velocidade;
- c) Variáveis relacionadas ao material, se necessárias.



**Figura 16.** Associação de fatores que afetam os mecanismos de deformação e adesão do atrito, conforme MYSHKIN, PETROKOVETS e CHIZHIK (1998)

MYSHKIN, PETROKOVETS e CHIZHIK (1998) apud Medeiros (2002) apresentam, na Figura 16, um esboço esquemático dos fatores que, em sua opinião, influenciam os mecanismos de deformação e adesão do atrito relativamente à escala considerada e revelam sua expectativa na aplicação de Microsonda de Varredura (SPM, Scanning Probe Microscopy) à avaliação de propriedades mecânicas de camadas das superfícies em contato, correlacionando-as com medidas de nanoindentação.

A maioria dos polímeros adere a outros materiais por forças de Van der Waals. Na maioria das situações de desgaste, essa forma de adesão não é forte o suficiente para que blocos de material sejam arrancados na ruptura do contato. Forças de Van der Waals (Forças intermoleculares), embora não causem diretamente o desgaste adesivo, fornecem uma componente significativa da resistência ao atrito de elastômeros, tal como a borracha, já que se diferenciam das ligações de hidrogênio e das interações dipolo-dipolo por serem mais fracas em comparação a estas. (STACHOWIAK e BATCHELOR, 1996).

O desgaste pode ser determinado utilizando diversas técnicas. A técnica utilizada neste trabalho foi à determinação da perda de volume, medindo a faixa de desgaste resultante devido ao ensaio pino contra disco, tal como sugerido pela norma G99 - 05 standard. O desgaste é calculado através da medição das dimensões do sulco produzido após o ensaio pino contra disco. Isso pode ser feito usando um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) ou um perfilômetro. No entanto, também pode ser calculado através da medição de perda mássica, como descrito pela norma G99 - 05. Os resultados são relatados como a perda de volume ou taxa de desgaste da amostra em milímetros cúbicos, durante o deslizamento. O desgaste por deslizamento também pode ser calculado por meio de ensaios de riscamento (BROSTOW *et al* 2006, 2008).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado em três etapas. Inicialmente as placas dos compósitos de Poliéster/Fibra de vidro, utilizando Resíduos de compósitos Poliéster/Fibra de vidro e  $\text{CaCO}_3$  como cargas, foram desenvolvidas. Em seguida, estes compósitos foram caracterizados através de ensaios térmicos, de integridade superficial e de propriedades mecânicas, a fim de estudar a incorporação desses resíduos no Poliéster/Fibra de vidro e compará-los com o Poliéster/Fibra de vidro/ $\text{CaCO}_3$ . E por fim, realizaram-se ensaios tribológicos objetivando avaliar o efeito das cargas do ponto de vista do atrito e do desgaste.

#### 3.1. Preparação dos Compósitos

##### 3.1.1. Resíduos

Os resíduos de Poliéster/Fibra de Vidro foram obtidos a partir de placas de compósitos de resina poliéster (densidade:  $1,09 \text{ g/cm}^3$ ), com 12% de fibra de vidro em massa, moldados através do processo de moldagem por transferência de resina (RTM), chamado de RTM Light, processo de moldagem líquida de compósitos que requer a impregnação de uma pré-forma fibrosa por uma resina polimérica, sendo composta normalmente de fibras de vidro ou carbono (Figura 17).



**Figura 17.** Amostras cortadas das placas moldadas por RTM para trituração nos moinhos

As placas dos compósitos Poliéster/Fibra de Vidro foram cortadas e moídas em moinho de facas com uma tela de  $8 \times 8$  milímetros, em seguida, em um moinho de bolas por 1 minuto, atingindo um tamanho de partícula de 9-16 mesh (Figura 18).



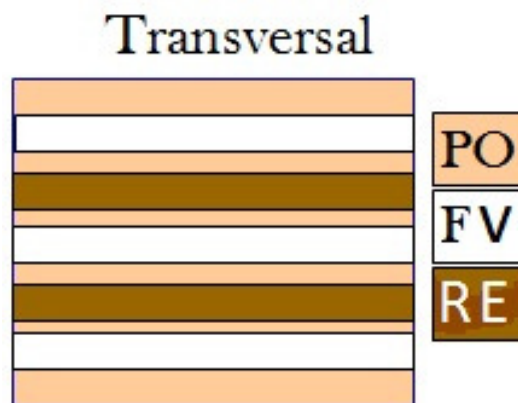
**Figura 18.** (a) Moinho de facas e (b) moinho de bolas

### 3.1.2. Compósitos

Para moldar os novos compósitos, os materiais utilizados foram:

- (i) Resina Poliéster: viscosidade média de 90 a 120 cP (UCEFLEX UC 5518 da Elekeiroz);
- (ii) Mantas de fibra de vidro: densidade de  $300 \text{ g/m}^2$ ;
- (iii) Carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ): densidade média de  $2,82 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$ ;
- (iv) Iniciador: BUTANOX M-50 (Peróxido de Metil-etil-cetona (MEKP), 33% em dimetil-ftalato), em uma proporção de 1,5% em volume de resina.

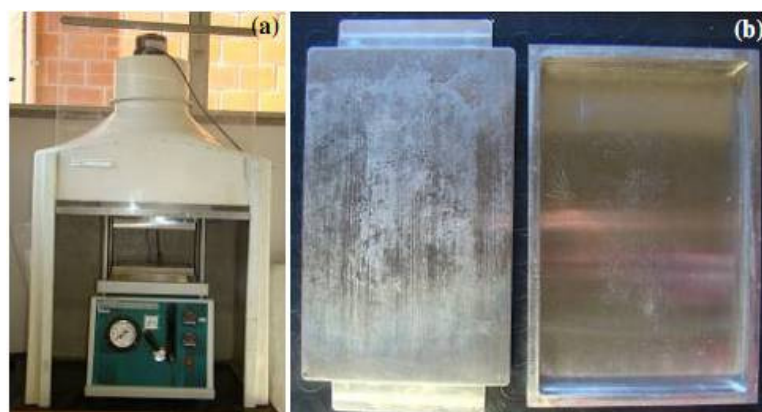
Os resíduos foram incorporados ao Poliéster/Fibra de vidro virgem, distribuindo-se na região centro (na esteira entre as camadas de vidro), como pode ser observado pelo desenho esquemático na Figura 19. As partículas dos resíduos foram dispostas de forma não orientada.



**Figura 19.** Desenho esquemático da seção transversal dos compósitos poliéster/fibra de vidro/resíduos

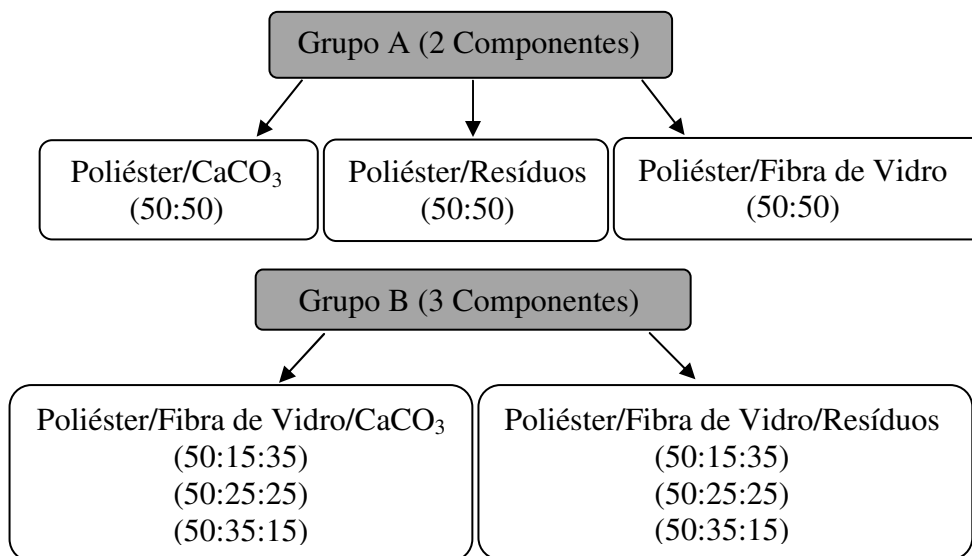
A produção dos compósitos com  $\text{CaCO}_3$  foi realizada da mesma forma que os compósitos moldados somente com resíduos, a diferença é que nos compósitos com  $\text{CaCO}_3$  como carga a resina era primeiramente misturada ao  $\text{CaCO}_3$ , após a mistura manual, foram misturados por um agitador mecânico de Marca Fisatom modelo 713D, com uma velocidade de 340-360 RPM por 10 minutos, para adquirir uma boa homogeneidade, imediatamente depois era colocado o iniciador na mistura e logo após realizava-se a moldagem.

Em seguida os compósitos foram moldados por compressão a quente, com seis toneladas distribuídas em um molde metálico de  $270 \times 170$  milímetros a uma temperatura de  $90^\circ\text{C}$  (Figura 20).



**Figura 20.** (a) Prensa hidráulica da Marcone e (b) o Molde

As formulações utilizadas foram divididas em dois grupos, Figura 21, o primeiro nomeado de grupo A apresentava em sua composição apenas dois componentes, já o segundo, nomeado de grupo B, tinha três componentes na composição de cada compósito.



**Figura 21.** Fluxograma das composições utilizadas

Todo o processo de produção dos compósitos foi realizado na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pela Engenheira de Materiais Laís Vasconcelos da Silva, aluna de mestrado e integrante do Laboratório de Polímeros desta mesma universidade, sob orientação do Professor Dr. Sandro Campos Amico, co-orientador desta dissertação (SILVA e AMICO, 2009).

## 3.2. Caracterização dos Compósitos

### 3.2.1. Análises Térmicas

A análise térmica é definida como “grupo de técnicas por meio das quais uma propriedade física de uma substância e/ou de seus produtos de reação é medida em função da temperatura e/ou tempo, enquanto essa substância é submetida a um programa controlado de temperatura (IONASHIRO, GIOLITO, 1980; WENDLANDT, 1986; BROWN, 1988) e sob uma atmosfera específica”(IONASHIRO, 1980; HAINES, 1995; MATOS, MACHADO, 2004).

### **3.2.1.1. Análise Termogravimétrica (TGA)**

É uma técnica da análise térmica na qual a variação de massa da amostra (perda ou ganho) é determinada em função da temperatura e/ou tempo, enquanto a amostra é submetida a uma programação controlada de temperaturas.

A estabilidade térmica dos compósitos foi determinada utilizando um analisador termogravimétrico de modelo TGA 50H, da Shimadzu. As condições de ensaio foram: taxa de aquecimento de 10°C por minuto, com intervalo de tempo partindo da temperatura ambiente até 900°C, em ar atmosférico e vazão de gás de arraste de 50mL por minuto.

### **3.2.1.2. Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)**

É uma técnica derivada da DTA, na qual a diferença de temperatura entre a substância e o material de referência (termicamente inerte) é medida em função da temperatura, enquanto ambos são submetidos a uma programação controlada de temperatura (IONASHIRO, 1980 e GIOLITO,1988).

O equipamento empregado foi da Shimadzu DSC – 50H, com cela de alumínio. A análise foi realizada sob atmosfera dinâmica de Nitrogênio com vazão de 50 ml/min, a uma taxa de aquecimento de 10 °C/min e variando-se da temperatura ambiente até 500 °C. Utilizou-se um cadinho de alumínio e massa de 2,0 mg.

### **3.2.1.3. Análise Dinâmico-Mecânica (DMA)**

A análise dinâmico-mecânica (DMA) ou análise termodinâmico-mecânica (DMTA) tem como um dos principais objetivos relacionar as propriedades macroscópicas, tais como as propriedades mecânicas, às relaxações moleculares associadas a mudanças conformacionais e a deformações microscópicas geradas a partir de rearranjos moleculares (WUNDERLICH, 1997). Comportamento de endurecimento e amolecimento de polímeros, transições vítreas, transições de segunda ordem em geral e caracterização de ligações cruzadas em cadeias poliméricas podem ser caracterizadas por este método termo-analítico.

Os ensaios foram realizados utilizando um TA Instruments, modelo DMA Q800, configuração single cantilever, amplitude de 10 µm, modo frequency strain para frequência de 1 Hz, faixa de aquecimento de 25 a 200 °C e taxa de aquecimento de 5 °C/min, corpos-de-prova com geometria retangular.

### **3.2.2 Propriedades das Superfícies**

A superfície de um corpo ou de uma fase são regiões de fronteira e possuem propriedades que as distinguem do interior do corpo ou do interior das fases. As interfaces estão repletas de ligações interrompidas e, devido a este fato, existe um excesso de energia de superfície  $\gamma$ , que é medida em energia por unidade de área da superfície.

Na interface entre duas fases ou dois corpos, o estado de agregação dos átomos e a composição química variam de um modo abrupto. Os átomos da superfície não se encontram em equilíbrio, pois não estão nem em um corpo nem em outro, nem em uma fase nem em outra. Existe uma abundância de ligações não satisfeitas, de nuvens eletrônicas distorcidas porque os átomos da superfície perderam alguns dos primeiros vizinhos. A energia em excesso tem relação com o número de átomos que compõe a superfície e é, portanto, proporcional à área superficial (CIÊNCIA DOS MATERIAIS MULTIMÍDIA, 2010).

#### **3.2.2.1. Rugosidade**

Rugosidade superficial tem um papel importante em muitas aplicações, tais como lubrificação, adesão, desgaste, biocompatibilidade e atrito entre superfícies. Processos de fabricação permitem uma variação na rugosidade superficial, não sendo possível de se obter uma superfície perfeitamente lisa. Portanto, para analisar o ângulo de contato e molhabilidade torna-se necessário conhecer alguns parâmetros básicos da rugosidade superficial de compósitos (CIÊNCIA DOS MATERIAIS MULTIMÍDIA, 2010).

Com o objetivo de se obter informações das superfícies, perfilômetros e instrumentos usados para caracterização, apresentam alguns parâmetros importantes para a análise da rugosidade superficial. Alguns deles são:  $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_v$ ,  $R_{sm}$ ,  $R_{tm}$ ,  $R_z$ ,  $R_{ku}$  e etc. Cada parâmetro descreve uma característica importante para uma função específica da superfície, no presente trabalho, a fim de se correlacionar os resultados de rugosidade com os de molhabilidade usou-se o parâmetro  $R_a$ , “mean roughness”, que é a média aritmética dos afastamentos absolutos do perfil de rugosidade a partir da linha média. É o parâmetro de rugosidade mais universalmente utilizado (NASCIMENTO, 2009). Os ensaios foram realizados utilizando um rugosímetro de marca Taylor Robson Precision, modelo Surtronic 25. As superfícies foram analisadas exatamente na forma em que foram obtidas através do processo de moldagem citado anteriormente, sem passar por nenhum tipo de acabamento superficial.

### 3.2.2.2. Ângulo de Contato

A técnica de gota séssil foi realizada para a obtenção do ângulo de contato das superfícies, a fim de caracterizar a molhabilidade das amostras ensaiadas, através de um goniômetro Ramé – Hart Instrument co. Um líquido polar (água) e um líquido apolar (diodometano) foram usados como os líquidos de ensaio (BROSTOW *et al*, 2003, 2004). A tensão superficial da água e diodometano à 20°C é 72.80 mN/m e 50.80 mN/m, respectivamente (DATAPHYSICS, 2009). Quantidades iguais de líquido foram usadas nos ensaios. Devido à natureza dos líquidos, os tamanhos das gotas de água e diodometano não puderam ser mantidos os mesmos; Entretanto, quantidades foram mantidas constantes para todos os ensaios em cada categoria de ensaios, sendo quatro divisões na seringa para o ensaio com água e apenas uma divisão para os ensaios com diodometano. A média de cinco ângulos de contato para cada amostra foi calculada (Figura 22).



**Figura 22.** Goniômetro Ramé – Hart Instrument co.

### 3.2.2.3 Energia de Superfície

O goniômetro Ramé – Hart utilizado para calcular o ângulo de contato foi também utilizado para a determinação da energia de superfície das amostras. Os valores de energia de superfície são calculados diretamente pelo software usando os ângulos de contato obtidos.

As equações de Wu (método harmônico) utilizadas pelo software para o cálculo da energia de superfície são (WU, 1982):

$$(1 + \cos \theta_1) \gamma_1 = 4 \left( \frac{\gamma_1^d \gamma_s^d}{\gamma_1^d + \gamma_s^d} + \frac{\gamma_1^p \gamma_s^p}{\gamma_1^p + \gamma_s^p} \right) \quad (3)$$

$$(1 + \cos \theta_2) \gamma_2 = 4 \left( \frac{\gamma_2^d \gamma_s^d}{\gamma_2^d + \gamma_s^d} + \frac{\gamma_2^p \gamma_s^p}{\gamma_2^p + \gamma_s^p} \right) \quad (4)$$

Onde,  $\theta_1$  e  $\theta_2$  são os ângulos de contato feitos pelo líquido 1 e líquido 2 no sólido, respectivamente;  $\gamma_1$  e  $\gamma_2$  são as tensões de superfície do líquido 1 e do líquido 2, respectivamente;  $\gamma_1^d$  e  $\gamma_2^d$  são as componentes de dispersão da tensão de superfície do líquido 1 e do líquido 2, respectivamente;  $\gamma_{sd}$  é a componente de dispersão da energia de superfície do sólido;  $\gamma_1^p$  e  $\gamma_2^p$  são os componentes polar da tensão de superfície do líquido 1 e do líquido 2, respectivamente; e  $\gamma_{sp}$  a componente polar da energia de superfície do sólido.

Todas as variáveis nas equações 3 e 4 acima são conhecidas, exceto para a dispersão e componentes polares da energia de superfície do sólido. O software resolve as duas equações mencionadas acima e dá os valores de energia de superfície do sólido.

Essas equações estão de acordo com o método - harmônico. No entanto, o método - geométrico também pode ser usado, embora o método - harmônico seja considerado mais eficiente para materiais de baixa energia, como polímeros (WU, 1982).

### 3.2.3. Dureza

Medidas de dureza Barcol foram realizadas nos compósitos através de um durômetro seguindo a norma ASTM D2583-07.

O método Barcol é uma forma de avaliar a dureza de um material através da medida da resistência a penetração de uma ponta de aço forçada por uma mola. No instrumento de medição, há uma escala entre 0 e 100. Este método de medição é usado para obter a dureza de ligas de alumínio, metais de baixa dureza, como chumbo e latão, polímeros, borrachas e couro. Além disso, é usado para medir o nível de cura de resinas e por este motivo é o método mais utilizado na literatura para avaliar a dureza de compósitos termofixos.

Medidas de dureza Rockwell M também foram realizadas, utilizando-se para isto de uma esfera de aço com 1/4 de polegada, pré-carga de 10 kgf e carga de 100 kgf. em um Durômetro de Marca PANTEC.

A escala Rockwell consiste em aplicar uma carga sobre a amostra em medição, intermediado por um penetrador padronizado (pode ser um penetrador esferocônico de Diamante ou uma esfera de aço ou Metal Duro), e mede-se o quanto esse penetrador aprofundou-se no mensurado.

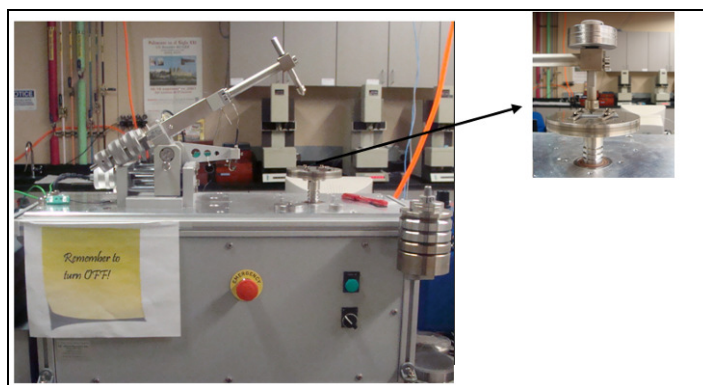
Foram feitas sete medidas em cada material, objetivando obter resultados estatisticamente confiáveis.

### 3.3. Ensaio Tribológicos

O Tribômetro Nanovea com configuração pino contra disco da empresa Micro Photonics, foi utilizado para a caracterização do atrito dinâmico e do desgaste (Figura 23). Uma esfera de aço inoxidável da classe SS 302, com diâmetro de 3,2 mm foi usada como pino. As velocidades de rotação do disco utilizadas foram de 100 e 200 rpm e o raio da trilha de desgaste foi de 2 mm. O pino foi carregado em direção a amostra com pesos conhecidos de 1, 5 e 10 N. Os ensaios foram realizados para 5000 revoluções em condições de temperatura ambiente. Os resultados apresentados são médias a partir de 3 ensaios

#### 3.3.1. Coeficiente de Atrito

O coeficiente de atrito foi determinado pelo próprio tribômetro, onde 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, medindo a deflexão do braço elástico por medição direta da mudança de torque (DUTTA, 2009).



**Figure 23.** Imagem do tribômetro Nanovea com configuração pino contra disco

### 3.3.2. Taxa de Desgaste

A taxa de desgaste foi determinada através da trilha de desgaste resultante devido ao atrito do pino contra o disco após 5000 revoluções. As áreas da seção transversal da pista de desgaste após cada ensaio tribológico foram determinadas utilizando um perfilômetro de marca Veeco Dektak 150. O perfilômetro amplifica e registra os movimentos verticais de uma agulha deslocadas a uma velocidade constante pela superfície a ser medida. Como a agulha se move, os passeios da mesma ao longo da superfície da amostra detectam desvios de superfície (DATAPHYSICS, 2009). Uma agulha com ponta de raio 12,5  $\mu\text{m}$  foi utilizada. A força aplicada à amostra foi de 1 mg e a taxa de varredura foi de 26,7  $\mu\text{m/s}$ . O comprimento de varredura foi de 800  $\mu\text{m}$  e do intervalo de medição foi de 65,5  $\mu\text{m}$ .

Sete valores da largura da faixa de desgaste foram medidos em diferentes locais, em cada amostra e calculada a média para efeito de exatidão. Todas as amostras foram limpas pelo ar de alta pressão para remover todos os detritos, antes de cada teste.

O volume de material perdido devido ao desgaste ( $V_m$ ) foi então calculado usando a seguinte equação, como sugerido pela norma ASTM G99-05:

$$V_m = 2\pi RA^2 \quad (5)$$

Onde,  $V_m$  é o volume de material perdido em  $\text{mm}^3$ ,  $R$  é o raio da trilha de desgaste em mm (2 mm, neste caso),  $A$  é a largura da área de desgaste em  $\text{mm}^2$ .

A taxa de desgaste ( $K$ ) foi então calculada usando:

$$K = \frac{V_m}{WX} \quad (6)$$

Onde,  $K$  é a taxa de desgaste em  $\text{mm}^3/\text{Nm}$ ,  $V_m$  = Perda de volume devido ao desgaste em  $\text{mm}^3$ ,  $W$  = Carga em N,  $X$  = distância percorrida em m.

### 3.3.3 Morfologia da Superfície de Desgaste

A morfologia das superfícies desgastadas foi analisada através de Microscopia Eletrônica Varredura (MEV), buscando-se identificar os principais mecanismos de desgaste originados nos ensaios tribológicos. Utilizou-se o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) da marca Shimadzu para análise superficial e o equipamento de espectroscopia EDS acoplado ao Microscópio Eletrônico para micro análises químicas destas superfícies. Antes das análises as amostras eram metalizadas com ouro (Figura 24).



**Figura 24.** a) Sistema de metalização b) Microscópio Eletrônico de Varredura com micro Análise por EDS

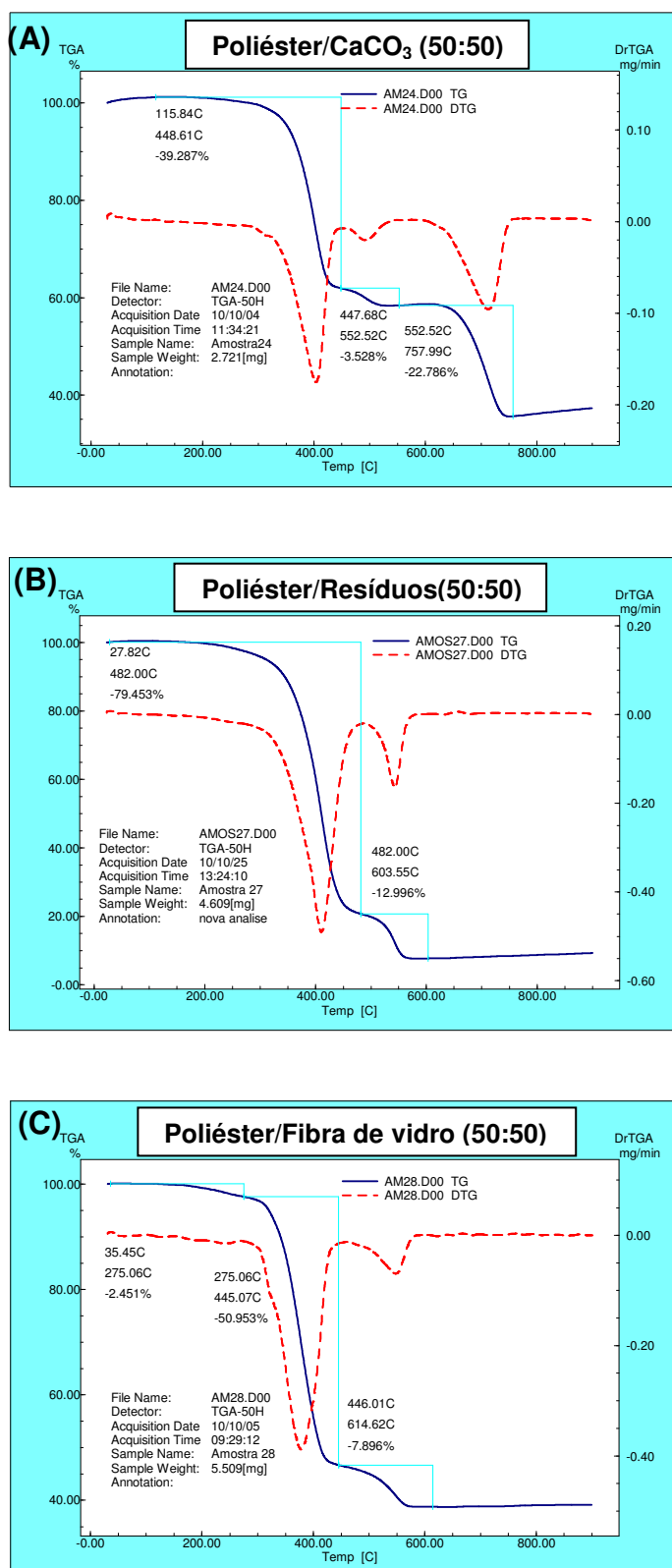
## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1. Análises Térmicas**

#### ***4.1.1. Análise Termogravimétrica (TG)***

As perdas de massa e estabilidade térmica são apresentadas na Figura 25 (A), (B) e (C), através das curvas de TG e DTG para os compósitos do Grupo A.

Analisando as curvas de DTG observam-se três perdas mássicas para o compósito com  $\text{CaCO}_3$  e apenas duas para o compósito com Resíduos e Fibra de vidro.



**Figura 25.** Curvas de TGA e DTGA para os compósitos: A) Poliéster/ $\text{CaCO}_3$ , B) Poliéster/Resíduos e C) Poliéster/Fibra de vidro do grupo A

Isto indica que para este compósito o Poliéster apresentou dois estágios de decomposição que ocorrem ambos antes de 600°C, sendo o terceiro estágio referente a decomposição do CaCO<sub>3</sub> que ocorre após a temperatura de 600°C. Para os compósitos com Resíduos e Fibra de vidro a primeira etapa é devido à perda de resina e a segunda provavelmente devido à perda dos materiais de tratamento superficial das fibras quando fabricadas.

Na Tabela 2, têm-se as temperaturas de estabilidade térmica, perdas de massa e massa residual, resultantes das análises termogravimétricas dos compósitos do grupo A.

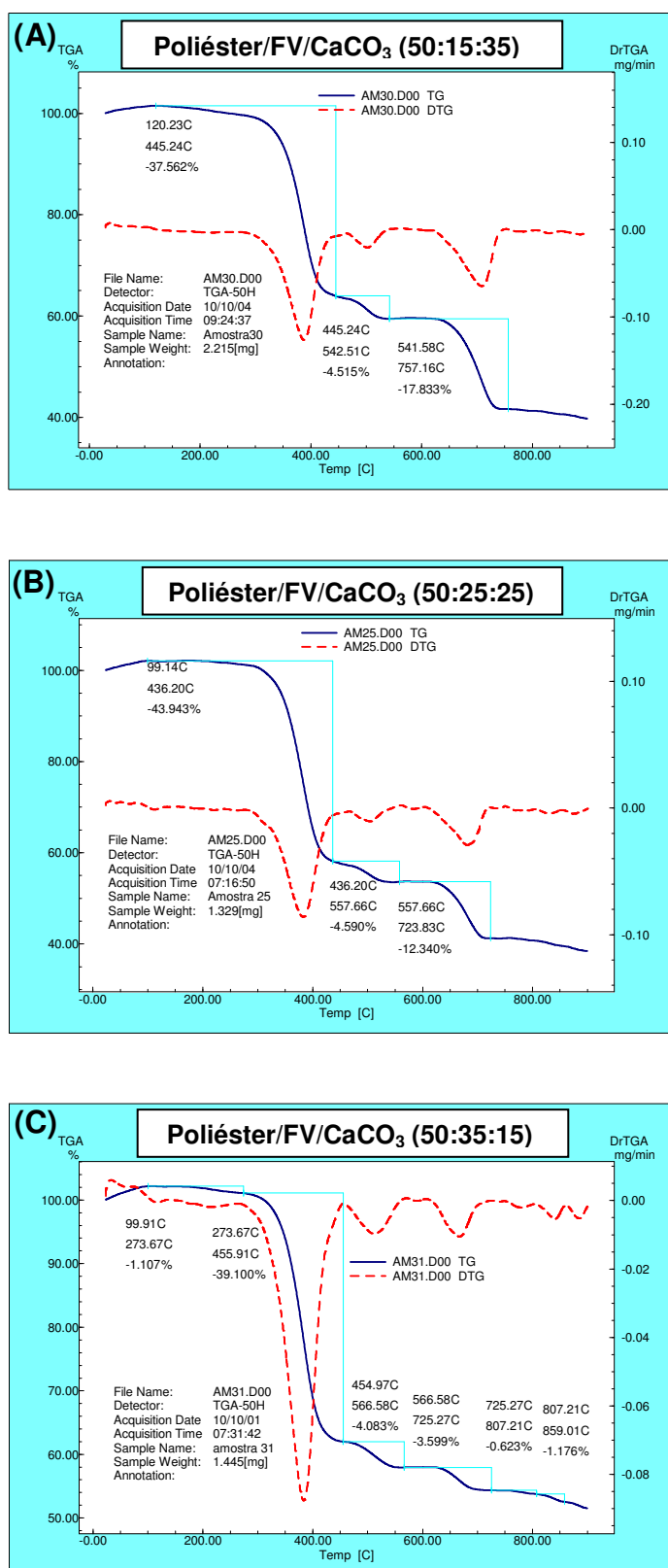
**Tabela 2** – TGA dos compósitos do grupo A (valores aproximados)

Compósitos	Estabilidade Térmica	Perda de Massa	Massa Residual
Poliéster/CaCO <sub>3</sub>	200°C	65,6 %	34,4 %
Poliéster/Resíduos	190°C	92,45 %	7,55 %
Poliéster/Fibra de vidro	175°C	61,3 %	38,7 %

Nota-se que o compósito com CaCO<sub>3</sub> apresentou estabilidade térmica superior, seguido pelo compósito com Resíduos e Fibra de vidro. O compósito com menor estabilidade térmica é aquele que apresenta 38,7% de massa residual no término do ensaio, a maior quantidade entre eles, que certamente é de fibra de vidro.

O resultado do compósito Poliéster/Fibra de vidro esta de acordo com o encontrado por BARCELLOS *et al.* (2009) estudando a incorporação de lodo industrial (L) e fibra de crisotila (FC) na preparação de compósitos com resina poliéster (P), visando uma possível alternativa para minimizar o acúmulo de resíduos sólidos. Eles identificaram que com 70% de Poliéster e 30% de Fibra de vidro a estabilidade térmica foi de aproximadamente 175°C, com duas etapas de decomposição significativas e ainda afirmam que os comportamentos térmicos, representados pelos formatos das curvas TG, são idênticos ao da resina pura.

As curvas de TG e DTG dos compósitos do grupo B com  $\text{CaCO}_3$  são mostradas na Figura 26 (A), (B) e (C) abaixo.



**Figura 26.** Curvas de TG e DTG para os compósitos do grupo B com  $\text{CaCO}_3$

De acordo com a curva de DTG observa-se que a quantidade de etapas de decomposição aumenta com o aumento da Fibra de vidro e diminuição de  $\text{CaCO}_3$ , sendo o compósito com 35% de Fibra de vidro aquele que apresenta mais etapas de decomposição. Percebe-se que após  $600^\circ\text{C}$ , todos os constituintes presentes nos compósitos se decompõem, restando somente à Fibra de vidro.

Na Tabela 3, têm-se as temperaturas de estabilidade térmica, perdas de massa e massa residual, resultantes das análises termogravimétricas dos compósitos do grupo B com  $\text{CaCO}_3$ .

Identifica-se que a estabilidade térmica varia em função do teor de Fibra de vidro e  $\text{CaCO}_3$ , onde percebe-se que com a diminuição de  $\text{CaCO}_3$  e aumento de Fibra de vidro, a estabilidade térmica tende a aumentar, conseqüentemente gerando maior quantidade de resíduos. Para as composições 50:25:25 e 50:35:15 a temperatura foi semelhante a obtida para o Poliéster/ $\text{CaCO}_3$  do grupo A, como evidenciado anteriormente na Figura 25 (A).

**Tabela 3** - TG dos compósitos do grupo B com  $\text{CaCO}_3$  (valores aproximados)

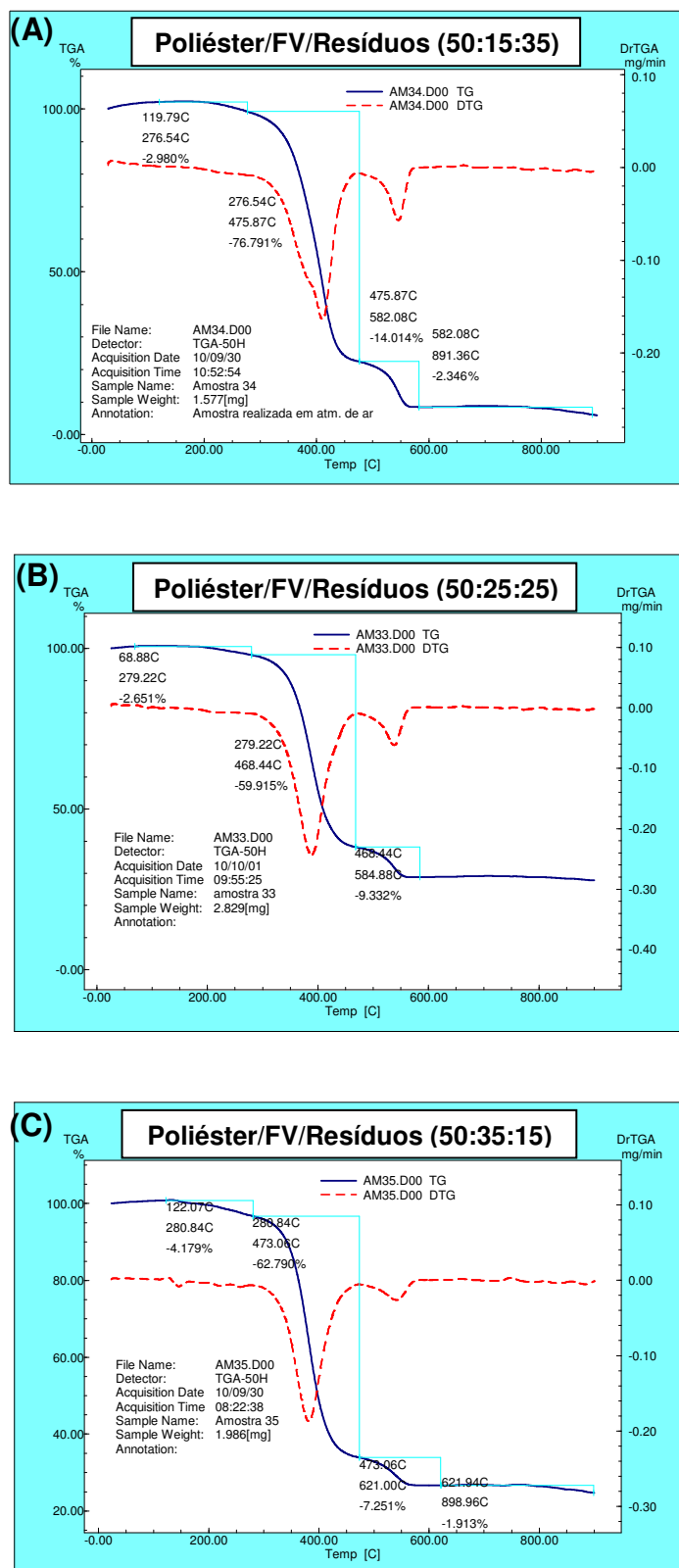
Compósitos	Estabilidade Térmica	Perda de Massa	Massa Residual
Poliéster/FV/ $\text{CaCO}_3$ (50:15:35)	$175^\circ\text{C}$	59,91%	40,09%
Poliéster/FV/ $\text{CaCO}_3$ (50:25:25)	$200^\circ\text{C}$	60,87%	39,13%
Poliéster/FV/ $\text{CaCO}_3$ (50:35:15)	$200^\circ\text{C}$	49,68%	50,31%

XIAO-LIN XIE *et al.* (2004) avaliando as propriedades mecânicas e reológicas de nanocompósitos PVC/ $\text{CaCO}_3$  preparados por polimerização in situ, também identificaram a influência do  $\text{CaCO}_3$  na TG, pois com o aumento de  $\text{CaCO}_3$  na composição (2,5, 5,0 e 7,5%) ocorreu um ligeiro aumento na estabilidade térmica, em torno de  $200^\circ\text{C}$ .

CAMPOS *et al.* (2007) observaram dois fatos no que diz respeito à incorporação de  $\text{CaCO}_3$  nos filmes de poli (fluoreto de vinilideno) (PVDF): (i) os compósitos apresentam maior estabilidade térmica quando comparados com o PVDF puro, independentemente da quantidade de  $\text{CaCO}_3$  adicionada nos compósitos e (ii) leve perda de massa a temperaturas de  $300\text{-}450^\circ\text{C}$ , esse comportamento está associado a hidrofiliabilidade do  $\text{CaCO}_3$ .

As curvas de TG e DTG dos compósitos do grupo B com Resíduos podem ser visualizadas na Figura 27 (A), (B) e (C). Nota-se que duas etapas de decomposição ocorreram igualmente para todas as composições com Resíduos, semelhante ao ocorrido com o compósito do grupo A Poliéster/Resíduos (Figura 25 (B)).

Na Tabela 4, têm-se as temperaturas de estabilidade térmica, perdas de massa e massa restante, resultantes das análises termogravimétricas dos compósitos do grupo B com Resíduos.



**Figura 27.** Curvas de TG e DTG para os compósitos do grupo B com Resíduos

Neste grupo também é possível identificar a influência da Fibra de vidro nos compósitos. Entretanto, neste caso com a incorporação dos Resíduos a estabilidade térmica diminui linearmente com a diminuição da quantidade de Resíduos, sendo o inverso ao que ocorreu com a carga de  $\text{CaCO}_3$ , justificando o seu uso. Percebe-se também que a temperatura alcançada para a composição 50:25:25, aquela com o maior teor de Resíduos é semelhante a obtida para o compósito Poliéster/Resíduos do grupo A, como visto na Figura 25 (B).

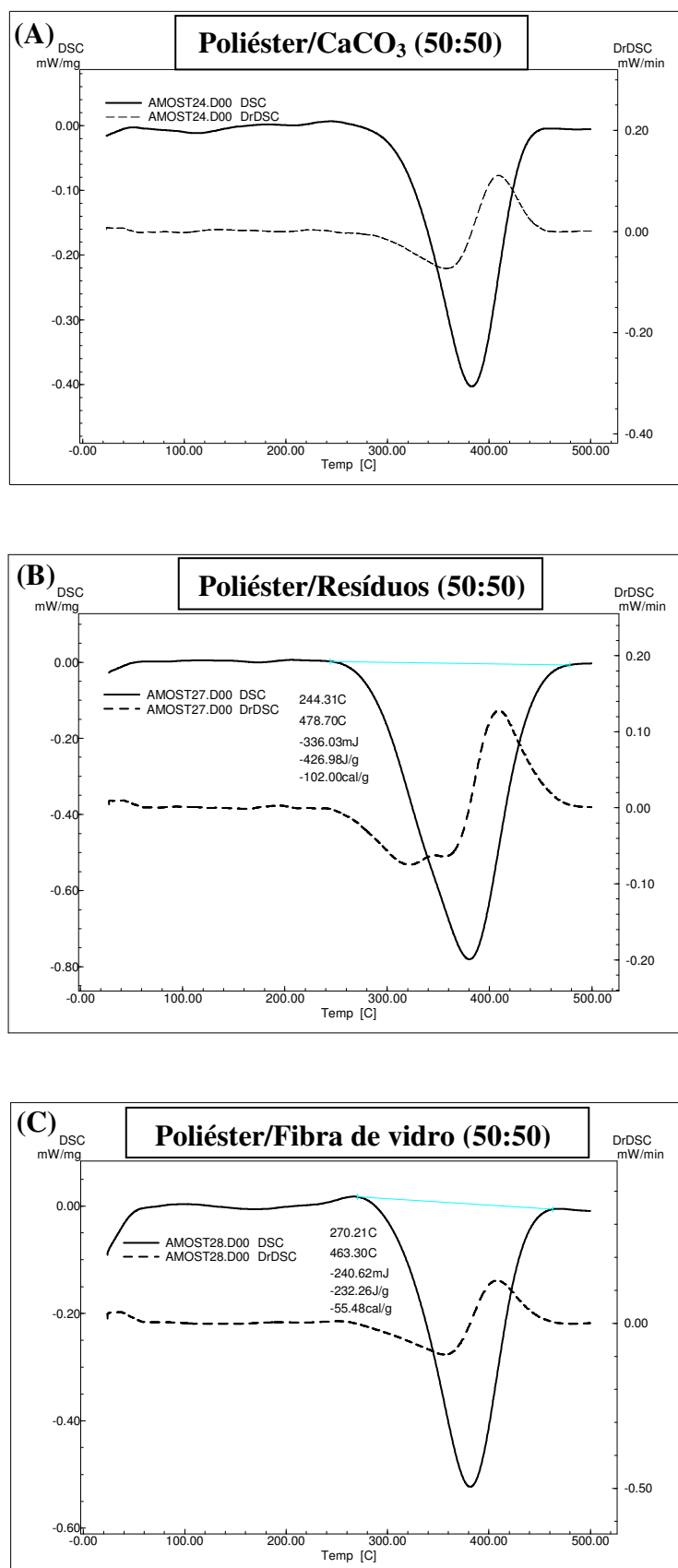
**Tabela 4** - TG dos compósitos do grupo B com Resíduos (valores aproximados)

Compósitos	Estabilidade Térmica	Perda de Massa	Massa Residual
Poliéster/FV/Resíduos (50:15:35)	200 °C	96, 13 %	3, 87 %
Poliéster/FV/Resíduos (50:25:25)	190 °C	71, 89 %	28, 10 %
Poliéster/FV/Resíduos (50:35:15)	170 °C	76, 13 %	23, 87 %

#### 4.1.2. Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

Na Figura 28 (A), (B) e (C) são apresentados os gráficos de resposta do DSC e sua derivada para os compósitos do grupo A em função do aumento de temperatura.

Em todos os compósitos do grupo A verifica-se um pico endotérmico no DSC e DrDSC, sendo para o compósito Poliéster/ $\text{CaCO}_3$  entre 250 e 454 °C, para o compósito Poliéster/Resíduos entre 244 e 478 °C e para o Poliéster/Fibra de vidro entre 270 e 463 °C, referente a temperatura de decomposição desses compósitos.



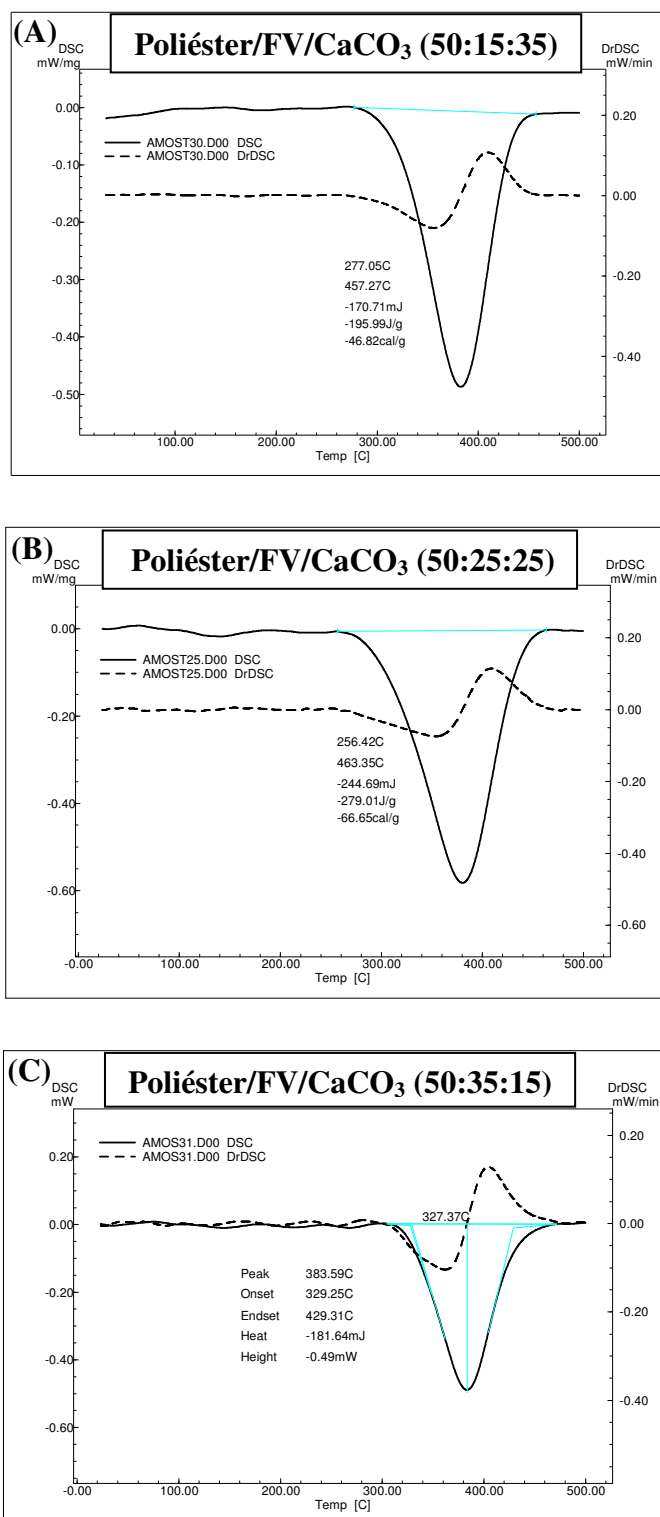
**Figura 28.** Análise de DSC para os compósitos do grupo A

Na Tabela 5 têm-se as temperaturas de decomposição dos compósitos do grupo A obtidas através dos ensaios de DSC.

**Tabela 5** – Resultados de DSC para os compósitos do grupo A

<b>Grupo A</b>	<b>T<sub>Decomposição</sub> (°C)</b>
Poliéster/CaCO <sub>3</sub>	358
Poliéster/Resíduos	379
Poliéster/Fibra de vidro	381

Para os compósitos do grupo B com  $\text{CaCO}_3$  têm-se os gráficos de DSC e DrDSC na Figura 29 (A), (B) e (C).



**Figura 29.** Análise de DSC para os compósitos do grupo B com  $\text{CaCO}_3$

Verifica-se através desses resultados que a adição de Fibra de vidro nessas proporções promoveu certa influência na temperatura de decomposição, já que para o compósito Poliéster/CaCO<sub>3</sub> o pico esteve em torno de 358 °C, como visualizado na Figura 28 (A) e neste caso, observa-se o pico se formar a partir de 380 °C. Entretanto, não houve uma variação considerável na faixa de temperatura de decomposição com a variação do teor de Fibra de vidro e CaCO<sub>3</sub> na composição dos compósitos do grupo B com CaCO<sub>3</sub>.

CAMPOS *et al.* (2007) também verificaram em seus ensaios de DSC que o PVDF - poli(fluoreto de vinilideno) e os compósitos de PVDF/CaCO<sub>3</sub> apresentaram um pico endotérmico de fusão em cerca de 170 °C, esse comportamento é característico da fase  $\alpha$  do PVDF. Além disso, identificaram que a incorporação de CaCO<sub>3</sub> não influencia nas propriedades térmicas do PVDF.

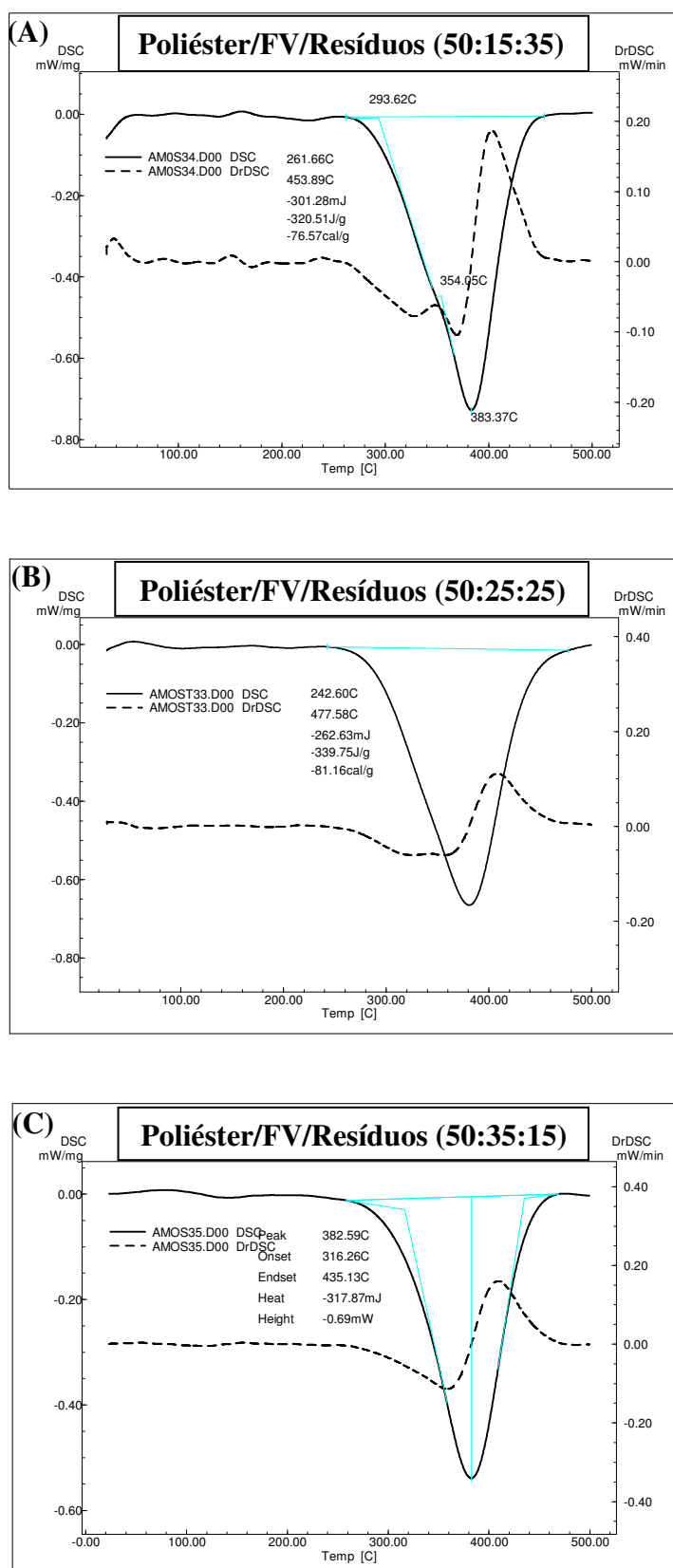
HARTIKAINEN *et al.* (2005) analisando o efeito do carbonato de cálcio na cristalinidade do Polipropileno através de DSC, identificaram um único pico exotérmico, onde a temperatura de cristalização é praticamente inalterada com a adição de CaCO<sub>3</sub> ao PP (125 °C para o PP puro e 123 °C para o PP carregado). Concluindo que o enchimento utilizado é inativo no sentido de efeito de nucleação, provavelmente devido aos fatos de que: (1) o tamanho médio de partícula da carga utilizada foi relativamente alto (2  $\mu$ m) e (2), as partículas de CaCO<sub>3</sub> foram tratadas superficialmente para diminuir a energia de superfície o que possivelmente reduziu a “atividade” do carbonato de cálcio.

Na Tabela 6 têm-se as temperaturas de decomposição dos compósitos do grupo B com CaCO<sub>3</sub> obtidas através dos ensaios de DSC.

**Tabela 6** – Resultados de DSC para os compósitos do grupo B com CaCO<sub>3</sub>

<b>Grupo B</b>	<b>T<sub>Decomposição</sub> (°C)</b>
Poliéster/FV/CaCO <sub>3</sub> (50:15:35)	381,5
Poliéster/FV/CaCO <sub>3</sub> (50:25:25)	380
Poliéster/FV/CaCO <sub>3</sub> (50:35:15)	383,6

Os gráficos de DSC e DDSC dos compósitos do grupo B com resíduos são apresentados na Figura 30 (A), (B) e (C).



**Figura 30.** Análise de DSC para os compósitos do grupo B com Resíduos

Neste caso, é possível evidenciar que a Fibra de vidro e os Resíduos não influenciaram nos resultados de DSC, já que não houve grande alteração na faixa de temperatura de decomposição com a mudança na composição dos compósitos.

Em geral, percebe-se que a máxima temperatura de estabilidade térmica encontrada para todos os compósitos estudados, de acordo com os resultados de TG (Figura 25, 26 e 27) foi de 200 °C e que em todos os resultados de DSC (Figura 28, 29 e 30) a formação do pico endotérmico inicia-se sempre acima de 200 °C, isto é explicado pela característica apresentada pelos termofixos que ao serem aquecidos entram em decomposição antes de sua fusão, tornando sua reciclagem complicada. Polímeros 100% amorfos não possuem temperatura de fusão cristalina, apresentando apenas a temperatura de transição vítrea (Tg).

Na Tabela 7 têm-se as temperaturas de decomposição dos compósitos do grupo B com Resíduos obtidas através dos ensaios de DSC.

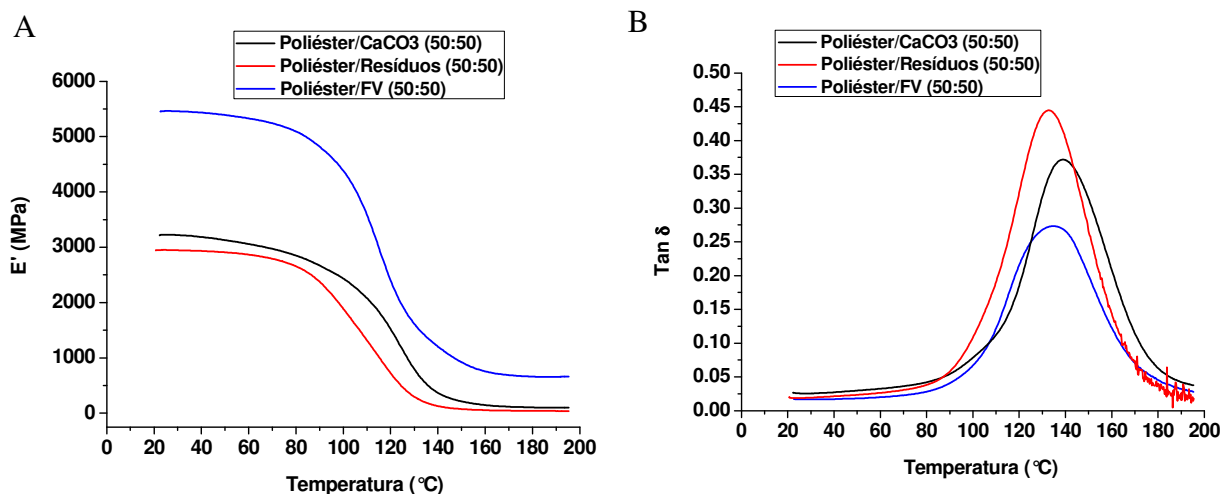
**Tabela 7** – Resultados de DSC para os compósitos do grupo B com Resíduos

<b>Grupo B (Resíduos)</b>	<b>T<sub>Decomposição</sub> (°C)</b>
Poliéster/FV/Resíduos (50:15:35)	383,4
Poliéster/FV/Resíduos (50:25:25)	382
Poliéster/FV/Resíduos (50:35:15)	382,59

#### **4.1.3. Análise Dinâmico-Mecânica (DMA)**

Esta técnica permite avaliar o comportamento viscoelástico bem como determinar a região de transição vítrea de compósitos poliméricos. Os parâmetros avaliados são: módulo de armazenamento,  $E'$  e a tangente delta,  $\tan \delta$ . Estes parâmetros servem como indicadores para o nível de interação dinâmica entre a matriz polimérica e a fibra incorporada como reforço, como citado anteriormente por WETTON, 1986, CASSU e FELISBERTI, 2005 e CÊNCIA DOS MATERIAIS MULTIMÍDIA, 2010.

Na Figura 31 (A) e (B) têm-se as curvas de DMA para os compósitos do grupo A, matriz Poliéster adicionados a Fibra de vidro, Carbonato de cálcio e Resíduos.



**Figura 31.** Curvas de DMA para os compósitos do Grupo A

Observa-se, que o compósito com Fibra de vidro apresentou maior módulo de armazenamento,  $E'$ , à temperatura ambiente (5,5 GPa) seguido dos compósitos com CaCO<sub>3</sub> (3,2 GPa) e Resíduos (2,9 GPa). Comprova-se que a presença de Fibra de vidro conferiu ao compósito maior rigidez e conseqüentemente menor capacidade de amortecimento, atingindo o menor pico ( $\tan \delta=0,27$ ) dentre os outros compósitos do grupo.

O compósito com CaCO<sub>3</sub> apresentou alteração na temperatura de transição vítrea,  $T_g$ , em relação aos demais, observado através do seu maior pico de  $\tan \delta$  cair por volta de 140°C enquanto os outros caíram em torno de 130°C, ou seja, esta carga (CaCO<sub>3</sub>) dificultou a mobilidade das cadeias poliméricas, supondo que a matriz e a carga apresentaram uma boa interface. Este mesmo compósito foi o que apresentou a maior temperatura de estabilidade térmica obtida para o grupo A (200°C), como visualizado anteriormente na Figura 25 (A).

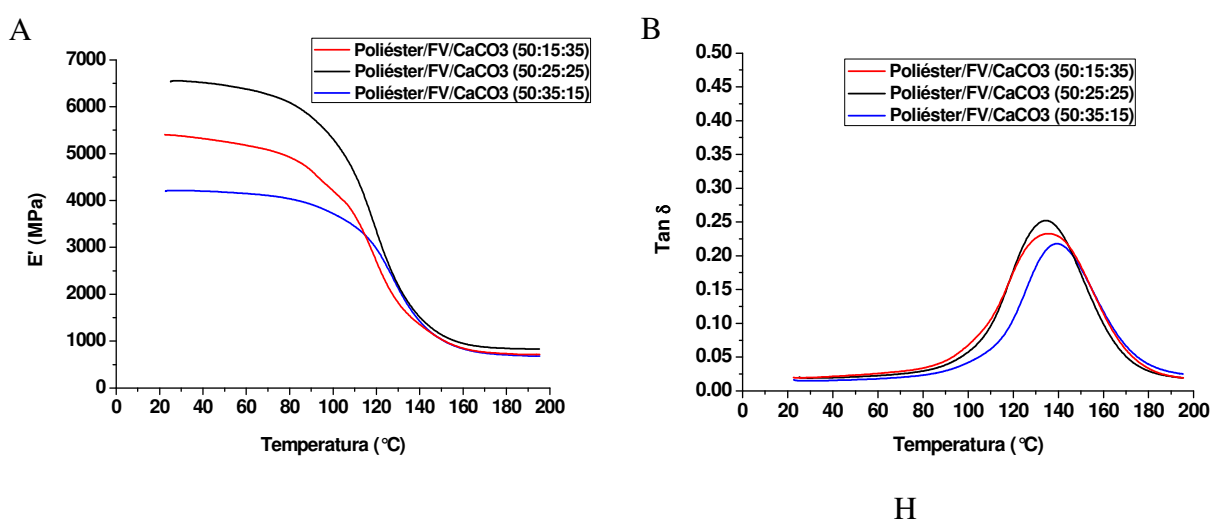
Na tabela 8 têm-se os resultados de DMA para os compósitos do grupo A.

**Tabela 8** - Valores de módulo de armazenamento,  $E'$  e temperatura de transição vítrea,  $T_g$ , (valores aproximados)

Grupo A	$E'$ ( $T_{amb}$ )	$T_g$
Poliéster/ $CaCO_3$	3,1 GPa	140 °C
Poliéster/Resíduos	2,9 GPa	130 °C
Poliéster/Fibra de vidro	5,5 GPa	130 °C

De acordo com RAY *et al.* (2001) na análise dinâmico mecânica e térmica de compósitos com matriz de resina viniléster reforçada com fibras de juta tratada com álcali, o deslocamento da  $T_g$  para temperaturas mais elevadas é resultado de uma melhor interação entre a fibra e/ou carga a matriz.

Na Figura 32, é apresentado o comportamento viscoelástico dos compósitos do grupo B com  $CaCO_3$ .



**Figura 32.** Curvas de DMA para os compósitos do grupo B com  $CaCO_3$

Observa-se na Figura 32 (A) que a composição de 50:25:25 se destacou apresentando o maior módulo de armazenamento (6,5 GPa), seguido da proporção de 50:15:35 (5,4 GPa). Sugere-se que a presença de  $CaCO_3$  tenha contribuído para uma maior adesão interfacial entre a matriz e a Fibra de vidro o que resultou em maior  $E'$ . Já na condição onde se tinha a menor quantidade de  $CaCO_3$  (50:35:15) o módulo de armazenamento do compósito foi menor, apesar da maior quantidade de FV, esta certamente não estava bem aderida à matriz implicando em propriedades inferiores.

Percebe-se que o aumento do  $\text{CaCO}_3$  quando na presença da Fibra de vidro infere em menor temperatura de transição vítrea,  $T_g$ , o que se opõe ao seu comportamento quando sozinho na matriz de poliéster, ou seja, a presença de FV alterou a influência do  $\text{CaCO}_3$  no compósito.

A variação na capacidade de amortecimento dos três compósitos foi discreta, permanecendo, o valor de  $\tan \delta$ , na faixa ente 0,25 e 0,20. Isto indica que prevaleceu a influência da FV sobre esta propriedade, já que este resultado corresponde ao valor de  $\tan \delta$  apresentado na Figura 31 (B) para o compósito Poliéster/FV (50:50).

XIAO-LIN XIE *et al.* (2004) em ensaios de DMA a fim de avaliar as propriedades mecânicas e reológicas de nanocompósitos PVC/ $\text{CaCO}_3$  preparados por polimerização in situ identificaram que com o aumento de  $\text{CaCO}_3$  o módulo de armazenamento tende a aumentar, confirmando a boa dispersão deste na matriz, entretanto com 7,5% de  $\text{CaCO}_3$  na matriz verifica-se que a rigidez é afetada devido a aglomeração de  $\text{CaCO}_3$ . Da mesma forma, ocorre na temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ), onde o pico tende a se deslocar com o aumento do carregamento, comprovando a restrição no movimento das cadeias, e como ocorre com o módulo para a maior quantidade de  $\text{CaCO}_3$  a interação é enfraquecida diminuindo a  $T_g$ .

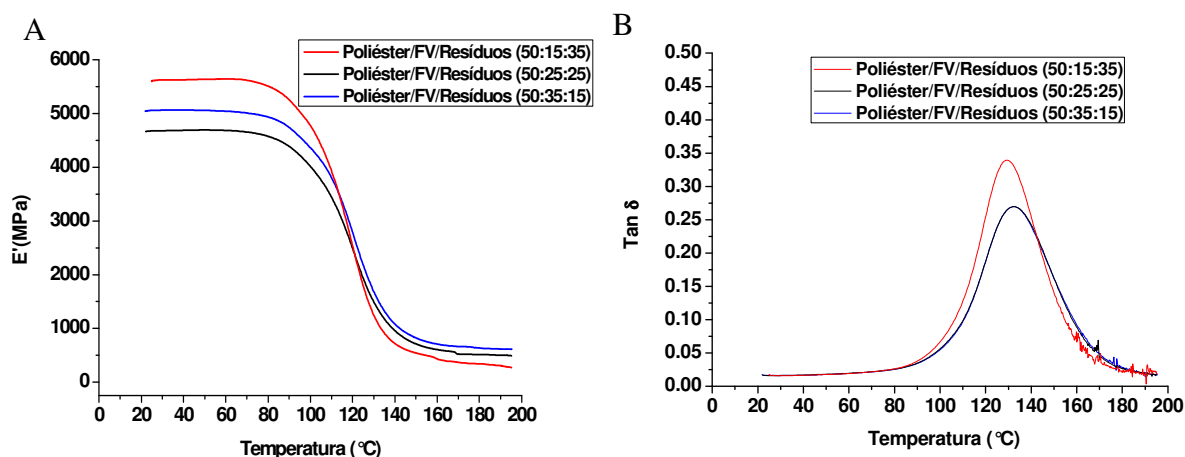
Na tabela 9 os resultados de DMA para os compósitos do grupo B com  $\text{CaCO}_3$  são mostrados.

**Tabela 9** - Valores de módulo de armazenamento,  $E'$  e temperatura de transição vítrea,

$T_g$ , (valores aproximados)

<b>Grupo B</b>	<b><math>E'</math> (<math>T_{amb}</math>)</b>	<b><math>T_g</math></b>
Poliéster/FV/ $\text{CaCO}_3$ (50:15:35)	5,4 GPa	130 °C
Poliéster/FV/ $\text{CaCO}_3$ (50:25:25)	6,5 GPa	130 °C
Poliéster/FV/ $\text{CaCO}_3$ (50:35:15)	4,2 GPa	140 °C

Na Figura 33 o comportamento viscoelástico dos compósitos do grupo B com Resíduos é apresentado.



**Figura 33.** Curvas de DMA para os compósitos do grupo B com Resíduos

Observa-se na Figura 33 (A) que a proporção de 50:15:35, apresentou o maior módulo de armazenamento (5,7 GPa) seguido do compósito com proporção de 50:35:15 (5,1 GPa). Esta mesma composição também apresentou a maior estabilidade térmica (200 $^{\circ}\text{C}$ ) dentre os compósitos do grupo B com resíduos (Figura 27 (A)). Não houve variação na constante de amortecimento ( $\text{tan } \delta$ ) do compósito de Poliéster/Fibra de Vidro/Resíduos nas proporções de 50:25:25 e 50:35:15, mas a composição 50:15:35 apresentou um valor de  $\text{tan } \delta$  semelhante ao compósito Poliéster/Resíduos do grupo A (0,35), prevalecendo a influencia da carga neste caso. A presença de resíduos, em diferentes proporções, não influenciou consideravelmente na temperatura de transição vítrea, ficando esta em torno de 130  $^{\circ}\text{C}$ .

Na tabela 10 os resultados de DMA para os compósitos do grupo B com Resíduos são mostrados.

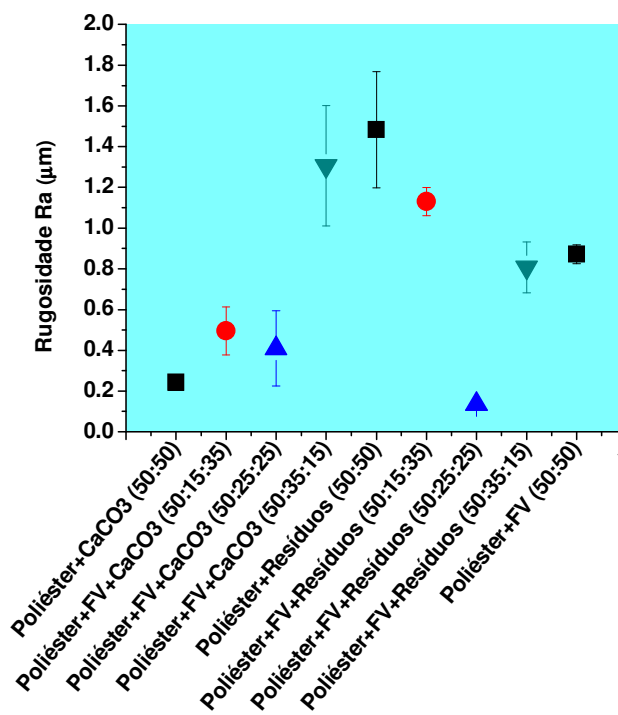
**Tabela 10** - Valores de módulo de armazenamento,  $E'$ , e temperatura de transição vítrea,  $T_g$ , (valores aproximados)

Grupo B	$E'$ ( $T_{\text{amb}}$ )	$T_g$
Poliéster/FV/Resíduos (50:15:35)	5,7 GPa	129 $^{\circ}\text{C}$
Poliéster/FV/Resíduos (50:25:25)	4,7 GPa	132 $^{\circ}\text{C}$
Poliéster/FV/Resíduos (50:35:15)	5,1 GPa	132 $^{\circ}\text{C}$

## 4.2. Propriedades das Superfícies

### 4.2.1. Rugosidade

Ensaio de rugosidade foram realizados na superfície dos compósitos e seus resultados estão ilustrados na Figura 34.



**Figura 34.** Rugosidade Média (Ra) de todos os compósitos estudados

Observa-se que entre os compósitos do grupo A o Poliéster + Resíduos apresentou rugosidade superior aos demais (Ra 1,5 μm), seguido pelo Poliéster + FV e Poliéster + CaCO<sub>3</sub> enquanto que para o grupo B a composição Poliéster + FV + Resíduos (50:25:25) apresentou uma superfície (Ra 0,11 μm) melhor acabada.

Dentre as composições do grupo B com CaCO<sub>3</sub> a de 50:35:15, ou seja, com a maior quantidade de FV, foi aquela que apresentou maior valor de rugosidade. Para as composições do grupo B com Resíduos, 50:15:35 foi a composição com maior rugosidade. Podendo-se comprovar que a carga de resíduos promoveu uma maior rugosidade superficial nos compósitos quando comparadas as cargas de CaCO<sub>3</sub>.

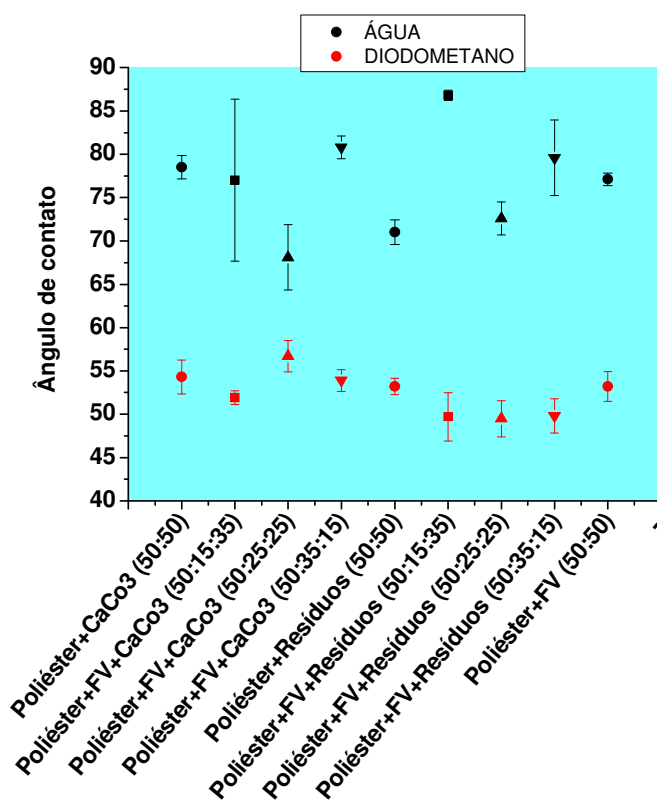
Estes resultados corroboraram com os obtidos por TONELA *et al.*, 2007, que encontraram um material com bom acabamento superficial e diminuição de incidência de bolhas com a adição de  $\text{CaCO}_3$ .

B.F. YOUSIF e N.S.M. EL-TAYEB (2008) investigaram as características de desgaste e atrito de compósitos poliéster reforçado com fibra de vidro sob condição de contato molhado contra um contra-corpo de aço inoxidável polido, utilizando duas técnicas de ensaio diferentes e encontraram um perfil de rugosidade para o compósito poliéster/fibra de vidro lixado e polido de  $0.445 \mu\text{m}$ , antes de ser ensaiado.

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.

#### 4.2.2 Ângulo de Contato

Os resultados de ângulo de contato obtidos através dos ensaios realizados no goniômetro podem ser verificados na Figura 35 para todos os compósitos estudados.



**Figura 35.** Ângulo de contato de todos os compósitos estudados

Observa-se que em todos os ensaios realizados com o líquido polar (água), o ângulo de contato superou os realizados com o líquido apolar (Diodometano), com uma molhabilidade entre 67 e 87 graus e dispersão menor que 20 graus. Possibilitando a constatação de que o ângulo de contato realmente sofre influência do líquido, já que a água é afetada por forças polares e o diodometano interage através de forças de dispersão com a superfície como evidenciado por BROSTOW et al., 2003.

Contrariando o ocorrido nos resultados de rugosidade (Figura 34) o compósito Poliéster/Resíduos não foi o compósito que apresentou maior ângulo de contato com nenhum dos líquidos ensaiados.

Esperava-se que o compósito com  $\text{CaCO}_3$  do grupo A e B apresentasse um comportamento diferente, já que segundo CAMPOS *et al.* (2007) esta carga apresenta característica hidrofílica. No entanto a sua hidrofílicidade só foi observada nas composições de 50:15:35 e 50:25:25 utilizando a água como líquido de ensaio.

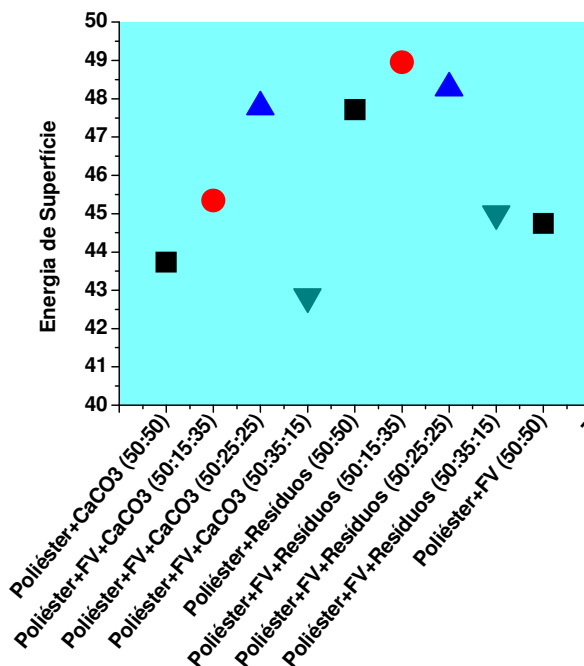
No contato com fluido apolar (diodometano), o uso de resíduos de Poliéster/FV como carga, comparado à carga de  $\text{CaCO}_3$ , apresentou dispersão inferior a 6 graus no ângulo de contato, com uma molhabilidade entre 49 e 56 graus. Analisando os compósitos do grupo B a melhor molhabilidade foi para os compósitos com Resíduos em todas as composições ensaiadas.

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 e etileno glicol; superfícies hidrofóbicas e oleofóbicas são caracterizadas por um ângulo de contato superior a  $100^\circ$  para água e superior a  $60^\circ$  para o diodometano, respectivamente.

No caso do uso de água, Figura 35, nenhum dos compósitos apresentou ângulo de contato superior a  $90^\circ$ , caracterizando então estas superfícies como hidrofílicas, assim como para os ensaios utilizando diodometano que em nenhum dos compósitos ultrapassaram o ângulo de  $60^\circ$ , não caracterizando estas superfícies como oleofóbicas.

### 4.2.3 Energia de Superfície

Os resultados de energia de superfície são apresentados na Figura 36, a partir dos resultados de ângulo de contato mostrados na Figura 35, calculados pelo goniômetro Ramé – Hart.



**Figura 36.** Energia de superfície de todos os compósitos estudados

Assim como evidenciado nos resultados de rugosidade, Figura 34, o compósito Poliéster + Resíduos do grupo A, apresentou energia de superfície superior aos demais compósitos do mesmo grupo (Figura 36).

Para o grupo B, aqueles com carga de resíduos também se destacam por apresentar em todas as composições energia de superfície superior àqueles com carga de CaCO<sub>3</sub>. A composição Poliéster+FV+Resíduos (50:25:25), com uma superfície melhor acabada (Ra 0,11  $\mu\text{m}$ ) e energia de superfície de aproximadamente 48,5, foi um dos resultados mais satisfatórios, comparando-se aos compósitos do grupo B com carga de CaCO<sub>3</sub> (Ra 0,22  $\mu\text{m}$ ), com pior molhabilidade aos fluidos entre as suas composições.

Sendo a melhor molhabilidade e maior energia de superfície constatada para a composição Poliéster+FV+Resíduos (50:15:35), aquela com a maior quantidade de resíduos.

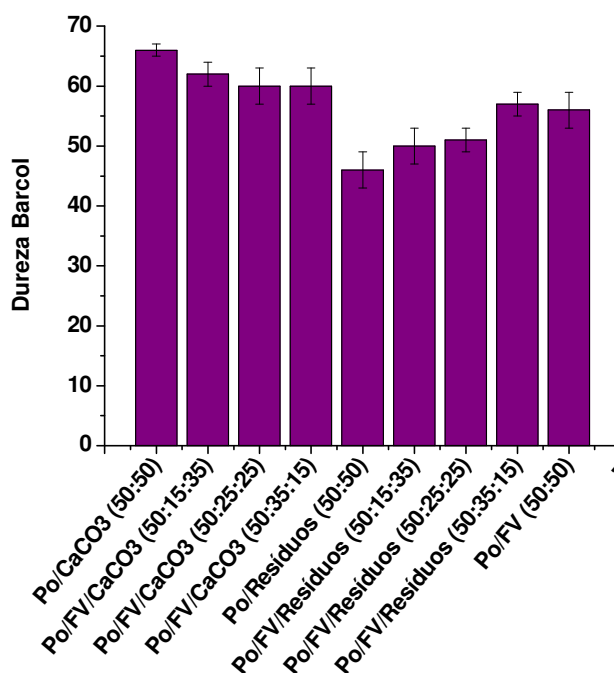
Existem controvérsias quando se relaciona rugosidade com molhabilidade, como pode ser visto freqüentemente na literatura, alguns autores como KUBIAK *et al.* (2009)

afirmam existir sim relação entre estas propriedades, enquanto que outros, o bom desempenho da molhabilidade de uma superfície não pode ser atribuída somente à rugosidade superficial.

SILVA, 2003, estudou o efeito do acabamento superficial em ensaios de desgaste utilizando tribômetro do tipo pino-contra-disco, com pinos de POM e UHMWPE e discos de alumina e aço inoxidável e propôs um parâmetro relacionado à severidade das condições de contato, para a análise do desgaste em termos mais globais, no qual três parcelas são consideradas. A primeira parcela é referente às condições dinâmicas de cada ensaio, representada pela condição PV; a segunda é representada pela agressividade do acabamento superficial do contra-corpo e a terceira parcela é referente à capacidade de dissipação de calor da região de contato, representada pela difusividade térmica dos materiais em contato.

### 4.3. Dureza

Ensaio de dureza foram realizados nas escalas Barcol e Rockwell M. Na Figura 37 abaixo, têm-se os resultados de dureza barcol.



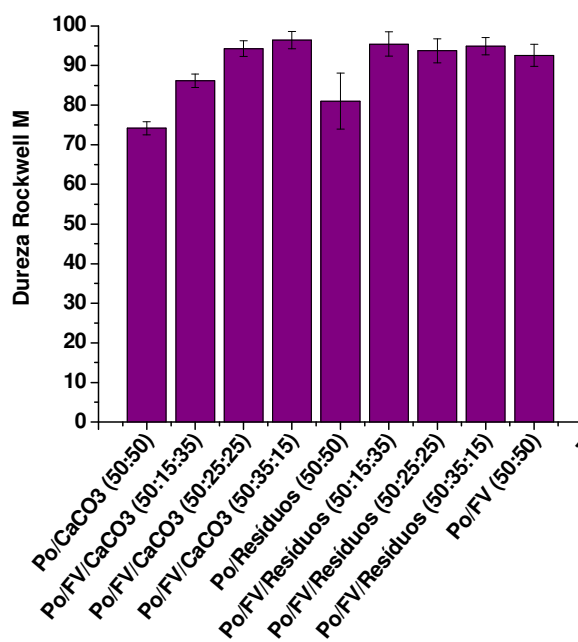
**Figura 37.** Dureza Barcol de todos os compósitos estudados

Analisando apenas o grupo A, percebe-se que o compósito com  $\text{CaCO}_3$  apresenta dureza superior aos demais, seguido pelo Poliéster/FV e Poliéster/Resíduos. Enquanto ao grupo B, é possível verificar a influência das cargas, onde para os compósitos com  $\text{CaCO}_3$ , há uma tendência decrescente com a diminuição da carga e aumento de Fibra de vidro na composição, já para os compósitos com Resíduos o inverso ocorre, a tendência é crescente com a diminuição de resíduos e aumento de Fibra de vidro. Estes últimos foram todos inferiores aos resultados obtidos pelos compósitos com  $\text{CaCO}_3$ , confirmando os resultados de DMA mostrados anteriormente (Figura 32), onde os compósitos do grupo B com  $\text{CaCO}_3$  apresentam maior módulo de armazenamento e conseqüentemente maior rigidez, devido a ocorrência de uma interfase entre a matriz e o  $\text{CaCO}_3$ .

RISSON *et al.* (1998) estudando o aproveitamento de resíduos de laminados de poliéster insaturado com fibra de vidro, encontrou em seus ensaios de dureza Barcol, que a ausência da fibra de vidro nas amostras e o aumento da concentração de resíduos provocou uma diminuição de mais de 12% na dureza.

RAIF SAKIN *et al.* (2008) ao investigar o comportamento à fadiga de flexão de materiais compósitos poliéster reforçados com fibra de vidro citam que a dureza Barcol da resina poliéster insaturada é no mínimo 45.

Os resultados de dureza Rockwell M são apresentados na Figura 38 para todos os compósitos ensaiados.



**Figura 38.** Dureza Rockwell M de todos os compósitos estudados

Os resultados dos ensaios de dureza Barcol não corroboram com os obtidos pelo método Rockwell M. Os compósitos que não continham Fibra de vidro apresentaram dureza inferior (abaixo de 80 HRM) comparados àqueles que continham.

Para o grupo A, o compósito Poliéster/FV foi o que apresentou a maior dureza, seguido pelo Poliéster/Resíduos e Poliéster/CaCO<sub>3</sub>, assim como nos resultados de DMA (Figura 31), em que o Poliéster/FV apresentou o maior módulo de armazenamento. O grupo B com CaCO<sub>3</sub>, segue uma tendência crescente com a diminuição da carga e aumento de Fibra de vidro, enquanto que para o grupo B com carga de Resíduos a tendência é sutilmente decrescente.

#### **4.4. Ensaio Tribológicos**

São apresentados a seguir os resultados de coeficiente de atrito, taxa de desgaste e morfologia da superfície de desgaste obtidos nos ensaios tribológicos, sob as cargas de 1, 5 e 10 N, velocidades de rotação do disco de 100 e 200 rpm, raio da trilha de desgaste de 2 mm, 5000 revoluções e em condições de temperatura ambiente.

##### **4.4.1. Coeficiente de Atrito**

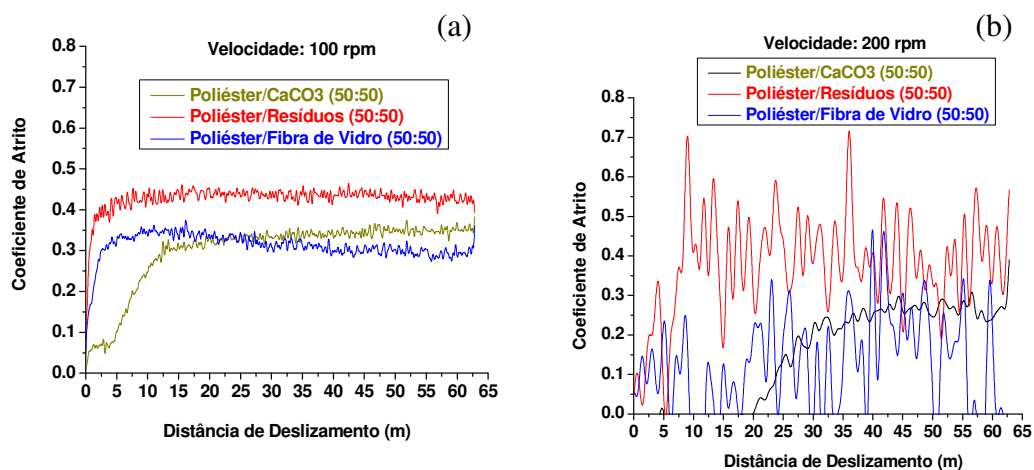
Em todos os ensaios em que se utilizou a velocidade de 200 rpm, percebe-se que as amplitudes de vibração foram superiores a 10 micrometros, consideradas elevadas em relação às de 100 rpm. Em adição, pode-se também verificar a presença do período de running-in em todos os gráficos de coeficiente de atrito seguido pelo período permanente (Steady State) que se mantém até o término dos ensaios. O período de running-in é dependente do contato entre o polímero e o contracorpo e de como cuidadosamente eles estão alinhados no início do ensaio (BRISCOE e STOLARSKI, 1985).

A variação nos resultados obtidos foi relativamente alta, podendo ser confirmada através das Figuras 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46 e 47 abaixo.

#### 4.4.1.1. Grupo A

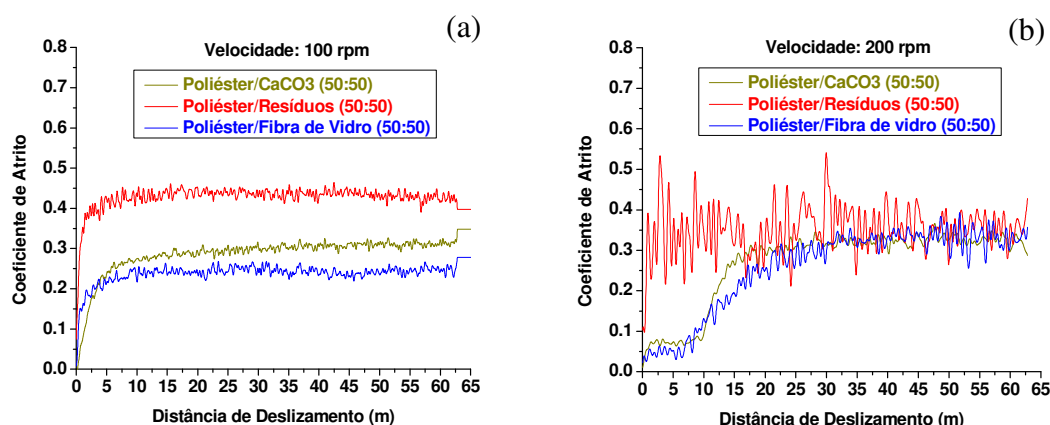
Os resultados de coeficiente de atrito dinâmico para os compósitos do grupo A, ensaiados com velocidades de 100 e 200 rpm e cargas de 1, 5 e 10 N são apresentados nas Figuras 39, 40 e 41. Nelas encontra-se que para a velocidade de 100 rpm o comportamento dos compósitos do grupo A foi similar em todas as cargas utilizadas, sendo o compósito Poliéster/Resíduos aquele que se destaca e apresenta os valores mais elevados de coeficiente de atrito durante os ensaios. Enquanto que para a velocidade de 200 rpm este comportamento não se repete apenas para a carga de 10 N, ou seja, na condição de alta velocidade e carga o Poliéster/Resíduos apresenta menor coeficiente de atrito.

- 1 N



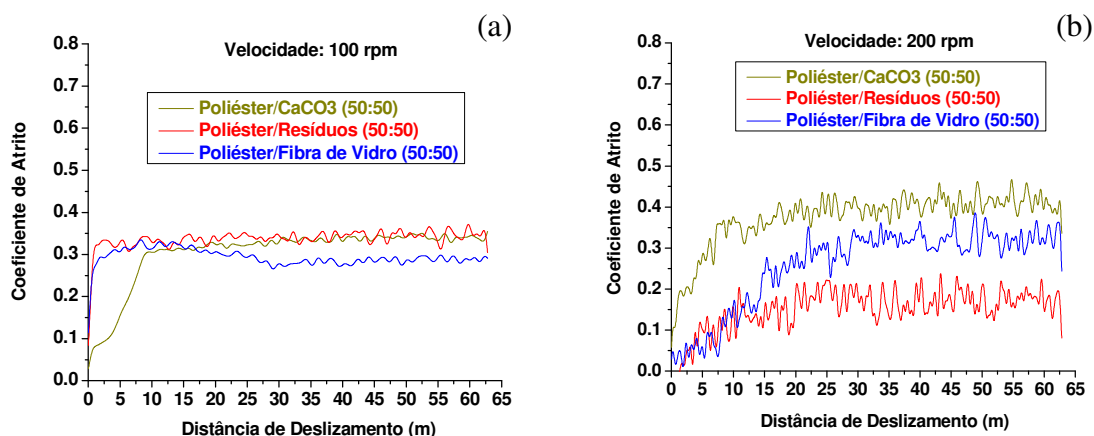
**Figura 39.** Gráficos de coeficiente de atrito x distância de deslizamento, carga de 1 N, (a) velocidade de 100 rpm e (b) velocidade de 200 rpm

- 5 N



**Figura 40.** Gráficos de coeficiente de atrito x distância de deslizamento, carga de 5 N, (a) velocidade de 100 rpm e (b) velocidade de 200 rpm

- 10 N

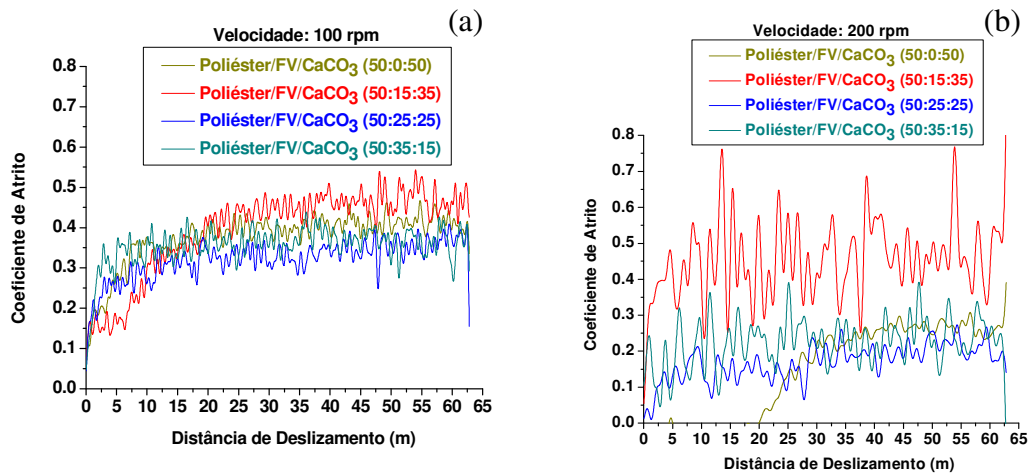


**Figura 41.** Gráficos de coeficiente de atrito x distância de deslizamento, carga de 10 N, (a) velocidade de 100 rpm e (b) velocidade de 200 rpm

#### 4.4.1.2. Grupo B ( $\text{CaCO}_3$ )

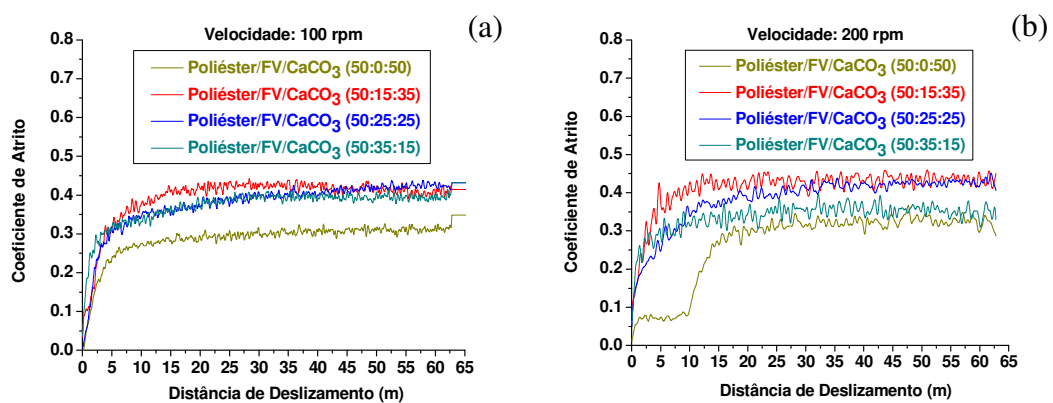
De acordo com os resultados obtidos para os compósitos do grupo B com  $\text{CaCO}_3$ , ensaiados nas velocidades de 100 e 200 rpm e cargas de 1, 5 e 10 N, nas Figuras 39, 40 e 41, verifica-se que em ambas as velocidades e cargas ensaiadas o compósito com composição (50:15:35) apresentou valores de coeficiente de atrito superiores a todas as demais composições. Sendo esta a composição com maior quantidade de  $\text{CaCO}_3$ .

- 1 N



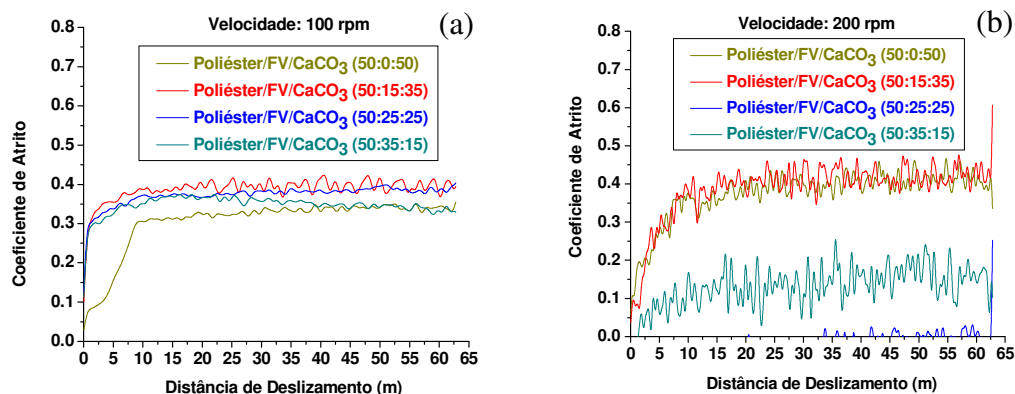
**Figura 42.** Gráficos de coeficiente de atrito x distância de deslizamento, carga de 1 N, (a) velocidade de 100 rpm e (b) velocidade de 200 rpm

- 5 N



**Figura 43.** Gráficos de coeficiente de atrito x distância de deslizamento, carga de 5 N, (a) velocidade de 100 rpm e (b) velocidade de 200 rpm

- 10 N

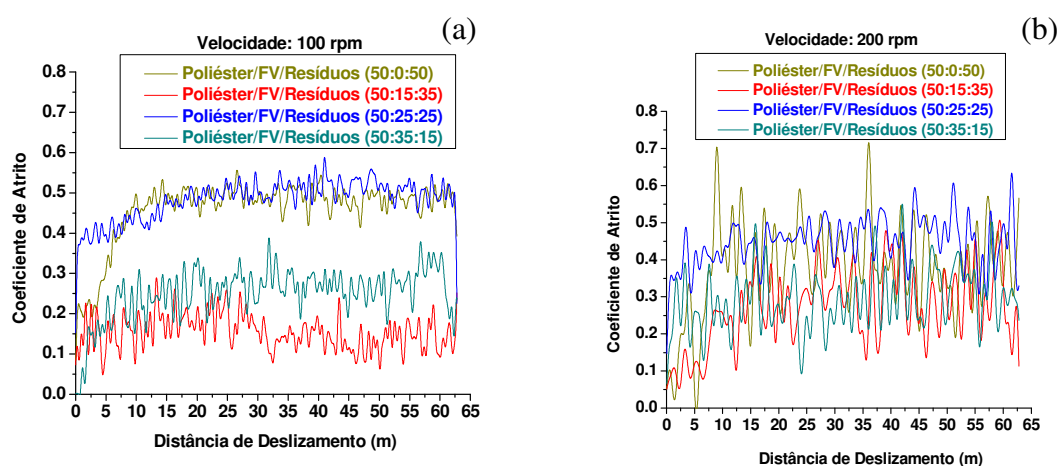


**Figura 44.** Gráficos de coeficiente de atrito x distância de deslizamento, carga de 10 N, (a) velocidade de 100 rpm e (b) velocidade de 200 rpm

#### 4.4.1.3. Grupo B (Resíduos)

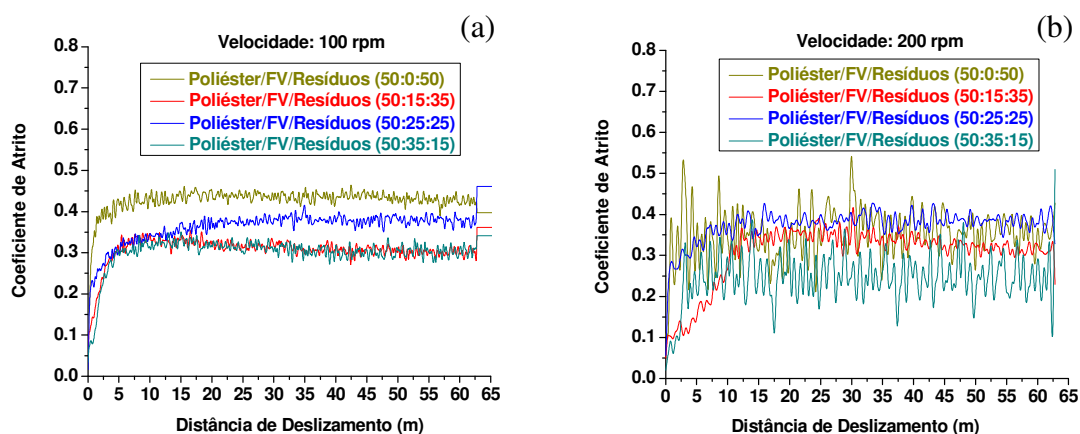
Nas Figuras 45, 46 e 47 têm-se os resultados de coeficiente de atrito para os compósitos do grupo B com resíduos. Neste caso, o compósito com composição (50:25:25) se destaca por apresentar em todas as velocidades e cargas ensaiadas os maiores valores de coeficiente de atrito.

- 1 N



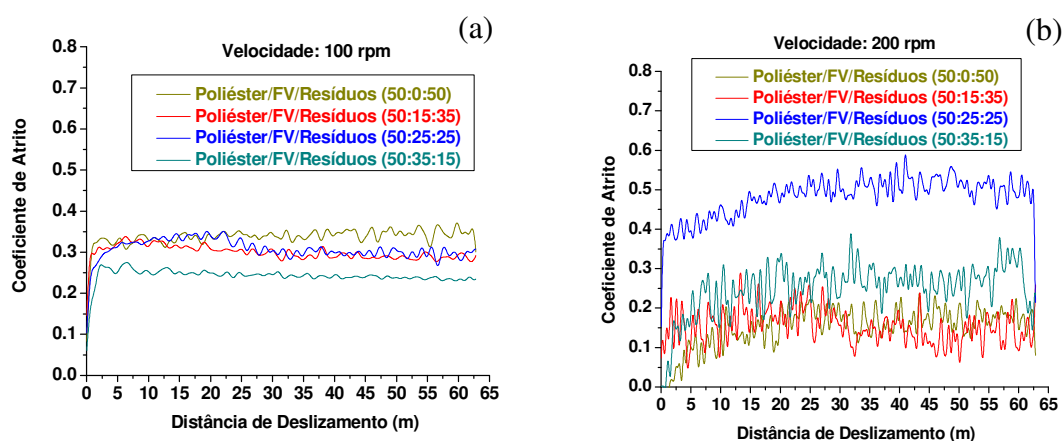
**Figura 45.** Gráficos de coeficiente de atrito x distância de deslizamento, carga de 1 N, (a) velocidade de 100 rpm e (b) velocidade de 200 rpm

- 5 N



**Figura 46.** Gráficos de coeficiente de atrito x distância de deslizamento, carga de 5 N, (a) velocidade de 100 rpm e (b) velocidade de 200 rpm

- 10 N



**Figura 47.** Gráficos de coeficiente de atrito x distância de deslizamento, carga de 10 N, (a) velocidade de 100 rpm e (b) velocidade de 200 rpm

#### 4.4.2. Média do Coeficiente de Atrito

A média dos valores de coeficiente de atrito a partir de 3 ensaios de cada composto foi realizada e podem ser analisadas nas Figuras 48, 49 e 50. Como esperado, a média de coeficiente de atrito tende a aumentar com o aumento da carga de ensaio.

#### 4.4.2.1 Grupo A

Como visualizado anteriormente nos gráficos de coeficiente de atrito, para este grupo o compósito Poliéster/Resíduos apresentou os maiores valores de coeficiente de atrito em ambas as velocidades e cargas utilizadas, entre 0,30 e 0,35, podendo-se confirmar o fato nos gráficos das médias na Figura 48, este mesmo compósito foi o que apresentou a maior rugosidade ( $R_a = 1,5 \mu\text{m}$ ) (Figura 34). Através das médias foi possível identificar que na velocidade de 100 rpm o compósito Poliéster/Fibra de vidro foi o que apresentou menor média de coeficiente de atrito, em torno de 0,25, já para a velocidade de 200 rpm foi o Poliéster/ $\text{CaCO}_3$ , entre 0,23 e 0,30, corroborando com os resultados de rugosidade, com a menor rugosidade do grupo A ( $R_a = 0,11 \mu\text{m}$ ).

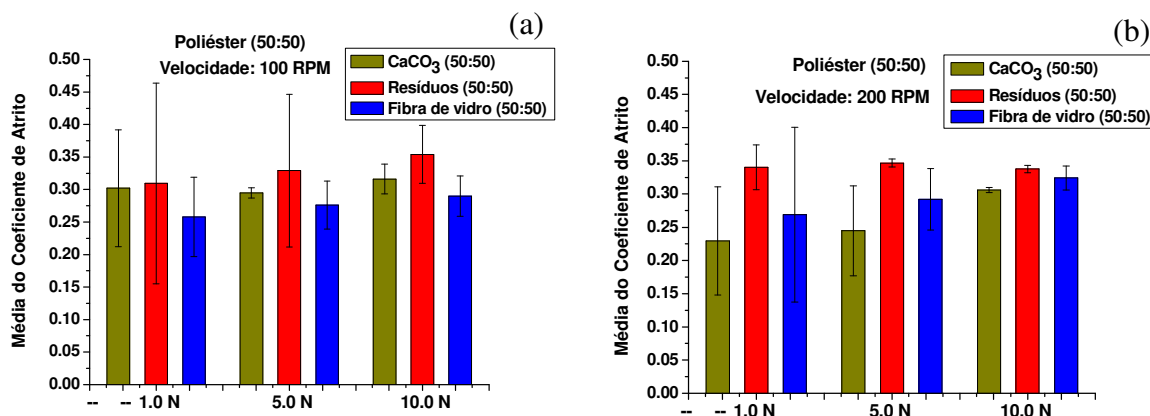
B.F. YOUSIF e N.S.M. EL-TAYEB (2008) encontraram um Coeficiente de atrito em torno de 0,25, quando estudando atrito de compósito Poliéster/Fibra de vidro contra aço inox, sob condição de contato molhado, utilizando duas técnicas de ensaio diferentes.

O atrito entre polímeros, assim como para metais, é atribuído a dois mecanismos principais, o de deformação e o de adesão. O mecanismo de deformação envolve dissipação de energia em volta da área de contato, provocando sulcamento. Este mecanismo possui forte dependência com a rugosidade do contra-corpo.

Outro detalhe importante e que pode ser visualizado através das médias é que a dispersão dos resultados tende a diminuir com o aumento da carga de ensaio para ambas as velocidades, evidenciando a influência que as mesmas exercem nos ensaios.

SANTNER e CZICHOS (1989) apud SILVA (2003) discutem a influência da rugosidade sobre o Coeficiente de atrito e a taxa de desgaste para pares aço-polímero. Eles destacaram a ocorrência de uma faixa de rugosidade ( $0,1 < \mu < 0,4$ ) onde o Coeficiente de atrito é mínimo. Acima desses valores prevalece sobre o Coeficiente de atrito a componente de deformação e abaixo a componente adesiva predomina, se tratando da rugosidade do contra-corpo sendo de aço.

No presente trabalho, provavelmente, a maior rugosidade do compósito resultou em quebra das asperezas, de forma frágil por se tratar de um termofixo, pela passagem do contra-corpo rígido e isso acarretou em maior Coeficiente de atrito.

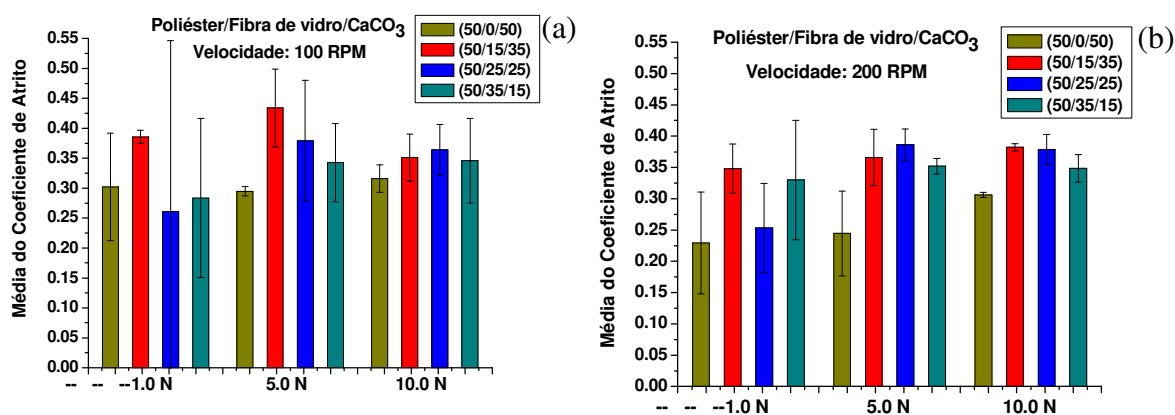


**Figura 48.** Média do coeficiente de atrito em função das composições do grupo A em suas respectivas cargas, (a) velocidade de 100 rpm e (b) velocidade de 200 rpm

#### 4.4.2.2. Grupo B (CaCO<sub>3</sub>)

Para este grupo, devido à adição da Fibra de vidro, percebe-se um aumento nos valores das médias, resultando em um comportamento com maior rigidez, como observado pelos resultados de DMA (Fig. 31 e 32), acarretando em elevação no Coeficiente de atrito. Este comportamento é comentado por PIHTILI (2009), onde ele destaca que em compósitos de matriz polimérica de alta rigidez e baixa condutividade térmica resultam em alta temperatura durante o contato de deslizamento em função do alto Coeficiente de atrito.

O compósito com composição (50:15:35) apresentou média de coeficiente de atrito superior (Figura 49), em torno de 0,43, nas seguintes condições de ensaio: Velocidade de 100 rpm para as cargas 1 e 5 N e velocidade de 200 rpm para as cargas 1 e 10 N, sendo a menor média para a composição (50:35:15), aproximadamente 0,35, nas seguintes condições de ensaios: velocidade de 100 rpm para as cargas 5 e 10 N e velocidade de 200 rpm para as mesmas cargas.



**Figura 49.** Média do coeficiente de atrito em função das composições em suas respectivas cargas, (a) velocidade de 100 rpm e (b) velocidade de 200 rpm

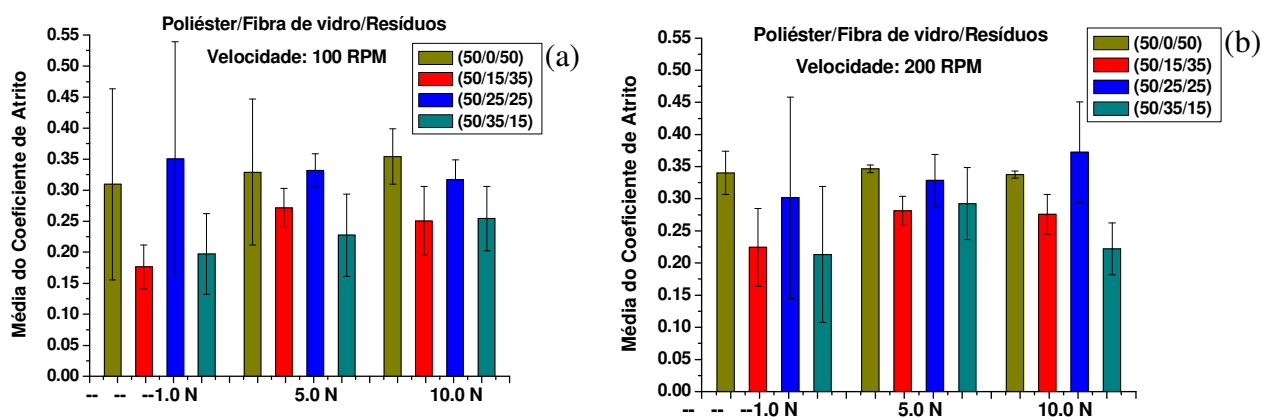
A rugosidade e a energia de superfície influenciam no Coeficiente de atrito. (STACHOWIAK e BATCHELOR, 1996; SILVA 2003). Para superfícies com baixos valores de rugosidade e altos valores de energia de superfície têm-se como tendência uma maior adesão e, portanto, maior coeficiente de atrito.

Neste caso, observa-se para o grupo B com  $\text{CaCO}_3$  que os compósitos que apresentaram baixa rugosidade e alta energia de superfície, composições (50:15:35) (Fig. 34) e (50:25:25) (Fig. 36), resultou-se em maior Coeficiente de atrito. O mesmo não notou-se para a composição (50:35:15), que tinha alta rugosidade e baixa energia de superfície. A composição 50:50 não possuía a rigidez conferida pela fibra, logo seu Coeficiente de atrito era menor que as demais.

#### 4.4.2.3. Grupo B (Resíduos)

Pode-se observar na Figura 50, que em ambos os ensaios, o compósito Poliéster/Fibra de vidro/Resíduos na composição (50:25:25) apresentou valores de coeficiente de atrito superiores aos demais compósitos, entre 0,30 e 0,37, confirmando o que já foi visualizado anteriormente nas Figuras 45, 46 e 47, sendo esta mesma composição aquela que apresenta alta energia de superfície (Fig. 36) e baixa rugosidade  $R_a$ , (Fig. 34), o que justifica seu maior valor de Coeficiente de Atrito. O aumento das médias para este grupo, devido à adição da Fibra de vidro também foi evidenciado, entretanto a máxima média de coeficiente de atrito deste grupo não superou a encontrada para os compósitos com  $\text{CaCO}_3$  (0,43),

podendo-se confirmar que do ponto de vista do coeficiente de atrito o resíduo é uma boa alternativa ao  $\text{CaCO}_3$ .



**Figura 50.** Média do coeficiente de atrito em função das composições em suas respectivas cargas, (a) velocidade de 100 rpm e (b) velocidade de 200 rpm

Segundo HUCTHINGS, 1992, geralmente, os valores medidos encontram-se na faixa de 0,1 a 0,5, o que é comum para polímeros ensaiados contra polímeros ou contra metais e cerâmicas.

#### 4.4.3. Taxa de Desgaste

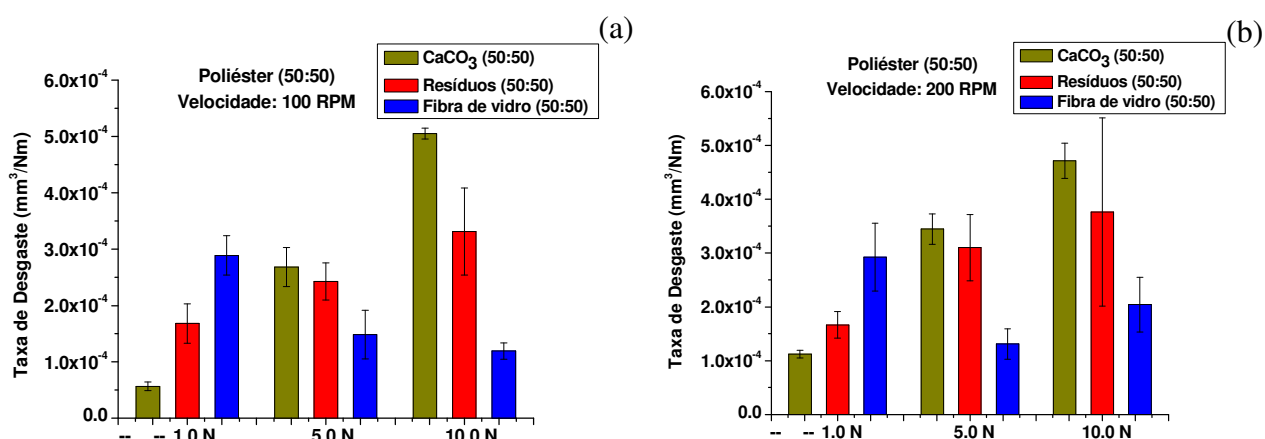
Os resultados de taxa de desgaste de todos os grupos ensaiados podem ser observados nos gráficos das Figuras 51, 52 e 53. Encontrou-se que com o aumento na velocidade e carga de ensaio a taxa de desgaste tende a aumentar.

##### 4.4.3.1. Grupo A

Percebe-se que nos resultados do grupo A, tanto para a velocidade de 100 como de 200 rpm, a carga de 1 N não apresentou a mesma tendência decrescente que as cargas de 5 e 10 N, nesta condição o pino apenas alisou a superfície do compósito, e por isso, o Poliéster/ $\text{CaCO}_3$ , que tem a maior dureza Barcol, como visualizado na Fig. 37, se mostrou mais resistente ao desgaste. Sendo assim, com a carga de 1 N o compósito Poliéster/ $\text{CaCO}_3$  tem a menor taxa de desgaste obtida, em ambas as velocidades, seguido pelo Poliéster/Resíduos e Poliéster/Fibra de vidro. Supõem-se que o Poliéster/Resíduos ficou

intermediário devido, provavelmente, a baixa interação Poliéster-carga e o Poliéster/Fibra de vidro apresentou maior taxa de desgaste pois, para esta condição de ensaio (1N) o pino alisava apenas a matriz polimérica, de forma que a presença da Fibra de vidro não exercia efeito.

Já para as cargas de 5 N e 10 N o compósito Poliéster/ $\text{CaCO}_3$  apresenta a maior taxa de desgaste em ambas as velocidades, a máxima em torno de  $5,0 \times 10^{-4}$ . É possível correlacionar os resultados de taxa de desgaste, nestas condições de ensaios, com os resultados de dureza Rockwell M, observando que quanto maior a dureza (Fig. 38) menor a taxa de desgaste.



**Figura 51.** Taxa de Desgaste em função das cargas e suas respectivas velocidades de ensaio para o grupo A

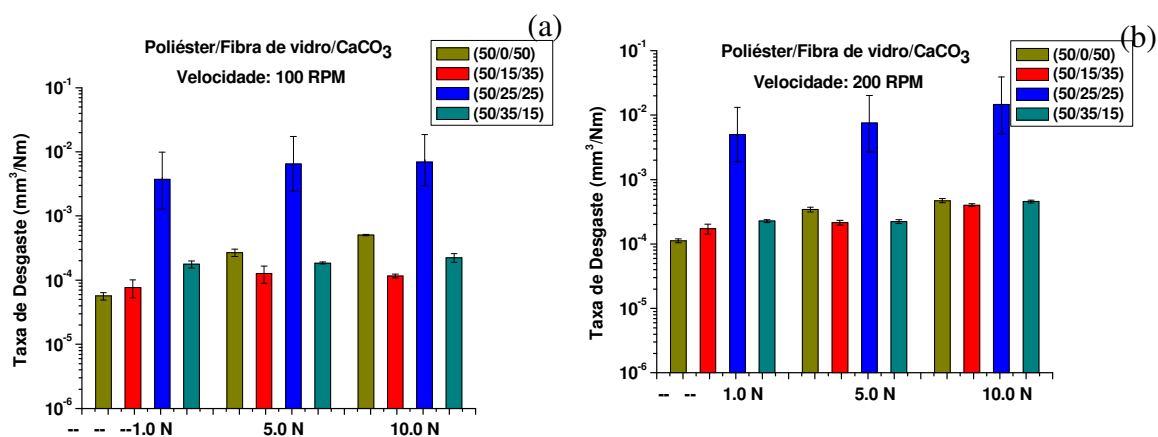
O compósito Poliéster/Resíduos em todas as condições de ensaio, quando comparado com os demais do grupo A, apresentou sempre taxa de desgaste média entre eles, no entanto este mesmo foi o que apresentou o maior coeficiente de atrito, como mostrado anteriormente na Figura 48. É importante destacar que a taxa de desgaste não tem uma relação direta com o coeficiente de atrito, um material pode apresentar alto coeficiente de atrito e baixa taxa de desgaste ou vice versa.

#### 4.4.3.2. Grupo B ( $\text{CaCO}_3$ )

De acordo com os gráficos da Figura 52, para o grupo B com  $\text{CaCO}_3$  identifica-se que a tendência ocorrida foi a mesma para todas as cargas e velocidades utilizadas, entretanto para a velocidade de 200 rpm observa-se um leve acréscimo nos resultados quando comparados com os da velocidade de 100 rpm. O compósito Poliéster/Fibra de vidro/ $\text{CaCO}_3$  com composição (50/15/35), aquele com a maior quantidade de  $\text{CaCO}_3$  foi o que apresentou a

menor taxa de desgaste e maior coeficiente de atrito de acordo com os resultados mostrados na Figura 49.

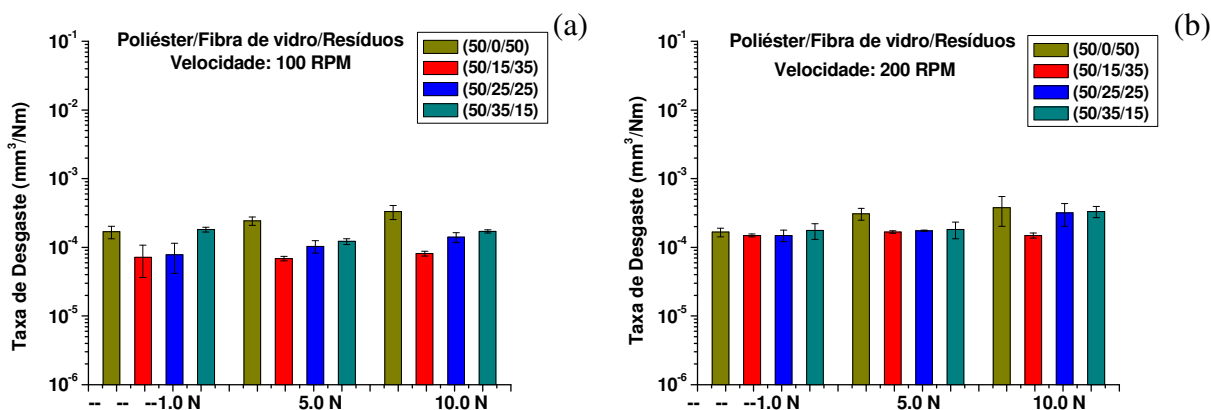
Sendo a maior taxa de desgaste e dispersão dos resultados para a composição (50/25/25), a mesma composição que apresentou o maior módulo de armazenamento (4,4GPa) dentre todos os compósitos analisados nos resultados de DMA (Figura 32).



**Figura 52.** Taxa de Desgaste em função das cargas e suas respectivas velocidades de ensaio para o grupo B com CaCO<sub>3</sub>

#### 4.4.3.3. Grupo B (Resíduos)

O mesmo acréscimo visualizado anteriormente para a taxa de desgaste do grupo B com CaCO<sub>3</sub> na velocidade de 200 rpm, também pode ser observado para o grupo B com resíduos, naturalmente ocasionado pelo aumento na velocidade de ensaio (Figura 53). Além disso, a composição (50/15/35) também foi aquela que apresentou os menores resultados de taxa de desgaste e a composição (50/35/15) os maiores resultados. No entanto, os compósitos utilizando Resíduos como carga ainda assim, apresentaram taxa de desgaste inferior aqueles com CaCO<sub>3</sub> comprovando-se que o resíduo é uma boa alternativa ao CaCO<sub>3</sub>.



**Figura 53.** Taxa de Desgaste em função das cargas e suas respectivas velocidades de ensaio para o grupo B com resíduos

EL-TAYEB *et al* (2006) no estudo tribológico de poliéster reforçado com fibra de vidro CSM 450-R deslizando contra um contra-corpo de aço inoxidável polido, afirma que a taxa de desgaste do compósito depende fortemente dos parâmetros de ensaio experimental (carga aplicada, velocidade de deslizamento e distância de deslizamento) e orientação da fibra. Além disso, a carga normal aplicada, velocidade de deslizamento, e a orientação da fibra têm um efeito mais pronunciado sobre a taxa de desgaste do que a distância de deslizamento.

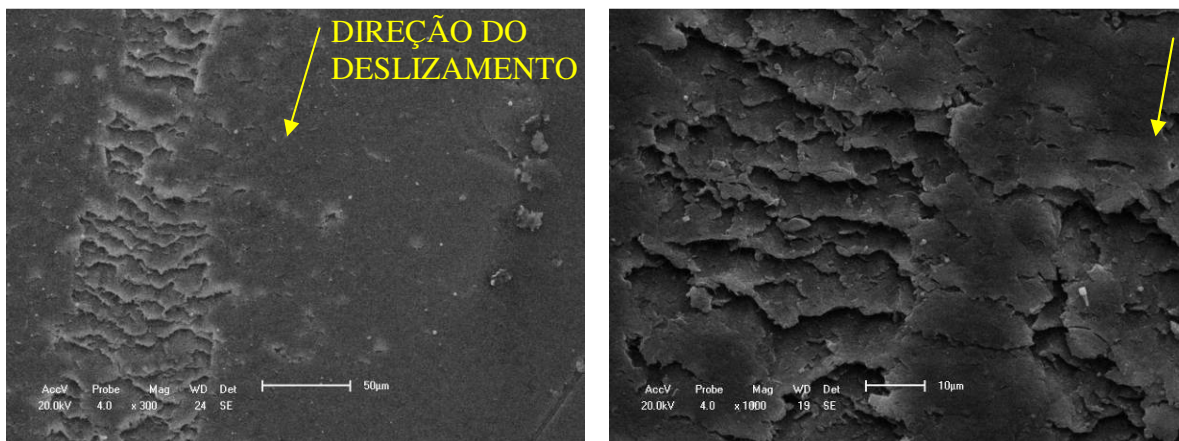
#### 4.5. Superfícies de Desgaste dos compósitos

Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi realizada nas superfícies de desgaste dos compósitos após os ensaios tribológicos. As características das superfícies desgastadas e os principais mecanismos de desgaste evidenciados são apresentados, discriminando-se as condições de ensaio os quais esses mecanismos foram originados.

##### 4.5.1 Grupo A

Na Figura 54, 55 e 56 têm-se as morfologias das superfícies desgastadas em imagens de MEV para o compósito Poliéster/CaCO<sub>3</sub> do grupo A, após os ensaios.

Na Figura 54 pode-se observar a ocorrência de desgaste por fadiga com delaminação na pista de desgaste do compósito Poliéster/ $\text{CaCO}_3$  ensaiado com velocidade de 100 rpm e carga de 5 N.



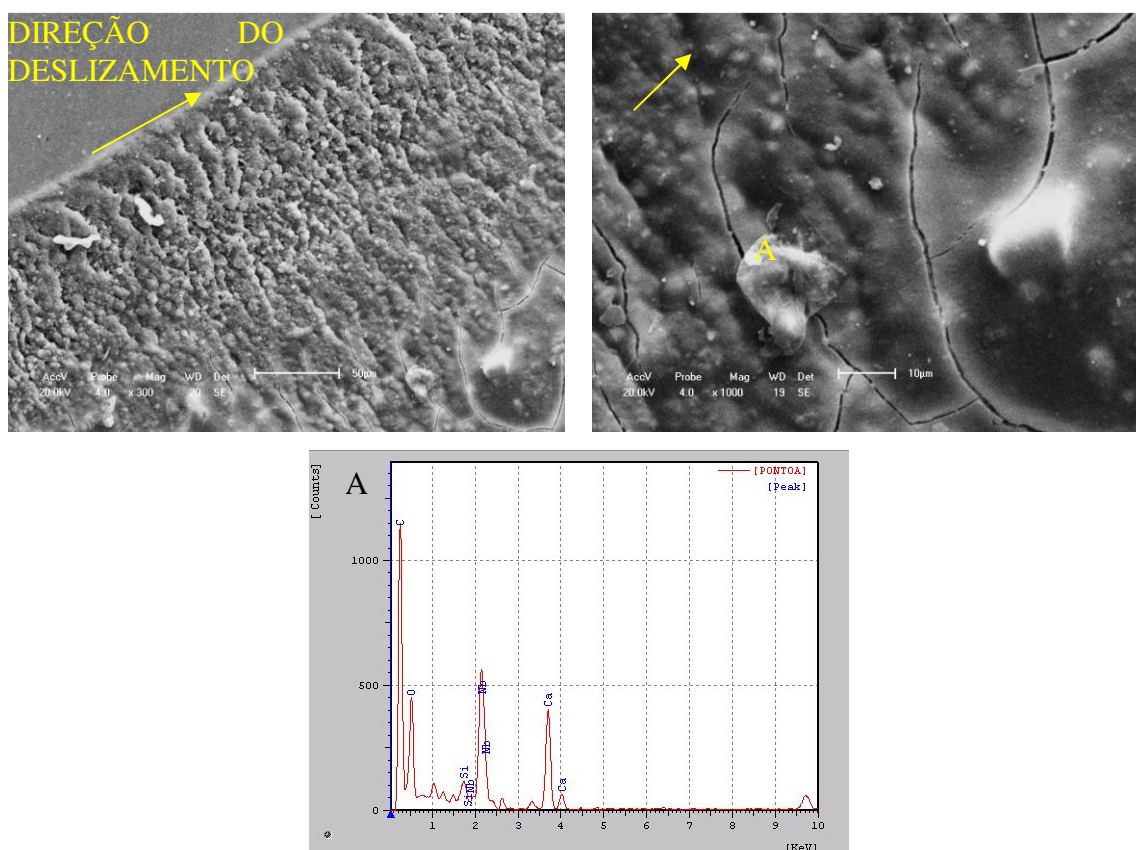
**MEV (SE) Poliéster/ $\text{CaCO}_3$  (50:50) / 100 rpm – 5 N**

**DELAMINAÇÃO:** Deformação Plástica da superfície, movimentação das discordâncias, partículas de desgaste laminares. Este processo ocorre continuamente, formando camadas (delaminação) sobrepostas.

**Figura 54.** Imagens de MEV da pista de desgaste do compósito poliéster/ $\text{CaCO}_3$  do grupo A na condição de 100 rpm e 5 N (a seta indica a direção do deslizamento)

Na Figura 55 observa-se o mecanismo de desgaste por fadiga com a formação de trincas na região central da pista de desgaste do compósito Poliéster/ $\text{CaCO}_3$  ensaiado com velocidade de 100 rpm e carga de 10 N e microanálise EDS da superfície de desgaste nos pontos A e B. A ocorrência desse mecanismo estaria relacionada à atuação cíclica das asperezas do contra-corpo, que provocaria uma deformação intensa na superfície do compósito, conduzindo à nucleação e propagação de trincas e, conseqüentemente, produzindo na superfície a morfologia de ondas. (LIMA DA SILVA, 2010).

Através da microanálise EDS no ponto A é possível verificar a presença de Si, componente de um aço inoxidável austenítico.



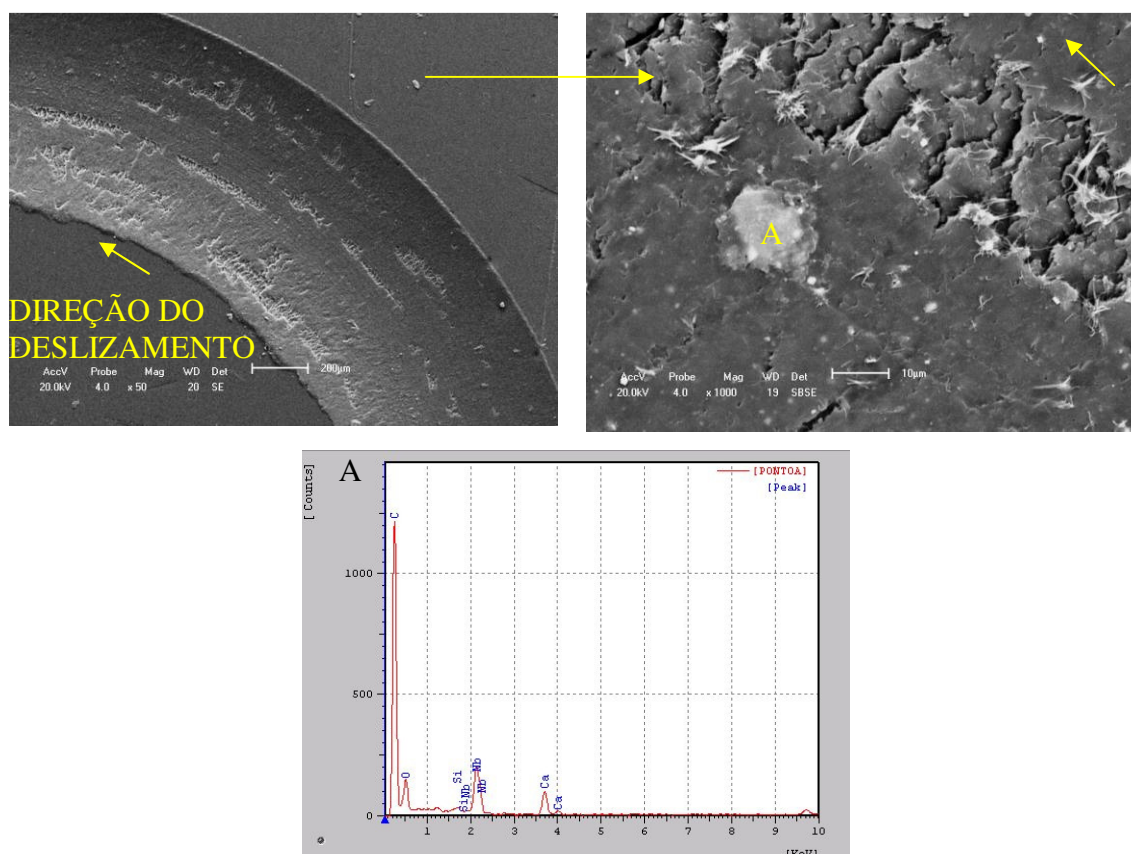
MEV (SE) Poliéster/ $\text{CaCO}_3$  (50:50) / 100 rpm – 10 N

**DESGASTE POR FADIGA:** Ocorre em polímeros provavelmente como resultado da formação de trincas associadas com deformações predominantemente elásticas sob um grande número de ciclos de tensão, resultando em microlascamento, “spalling” (propagação de trincas subsuperficiais) e delaminação (DONG E BELL, 1999).

**Figura 55.** Imagens de MEV da pista de desgaste do compósito Poliéster/ $\text{CaCO}_3$  do grupo A na condição de 100 rpm e 10 N e microanálise (a seta indica a direção do deslizamento)

Na Figura 56 observam-se riscos abrasivos na direção do deslizamento da pista de desgaste do compósito Poliéster/ $\text{CaCO}_3$ , ensaiado com velocidade de 200 rpm e 10 N, provocados pelas asperezas do contra-corpo e início de delaminação no interior desses riscos, gerada pelo mecanismo de fadiga. Tais riscos caracterizam a abrasão a dois corpos.

Nesta condição de ensaio também foi possível identificar a presença de Si na pista de desgaste através da microanálise EDS no ponto A, decorrente da deposição de material do pino durante o ensaio.



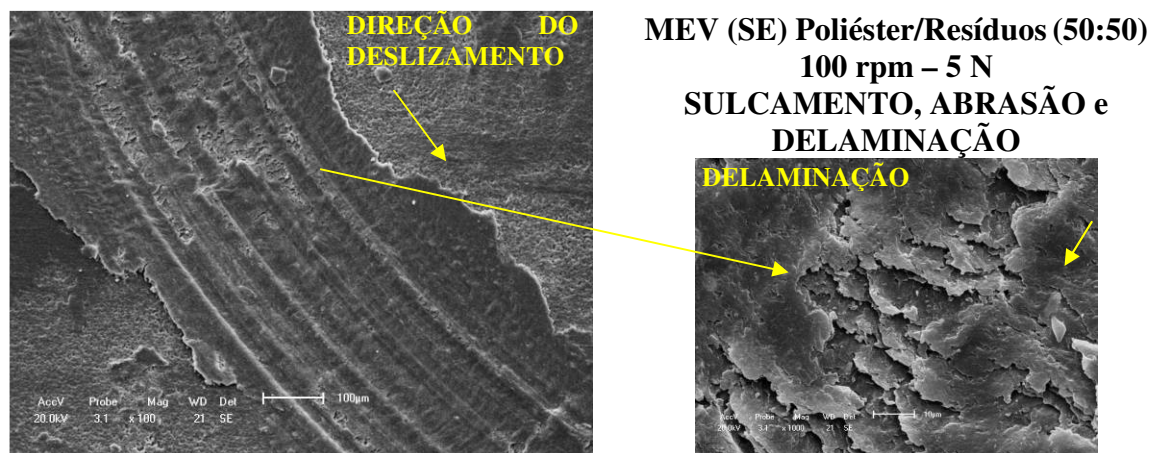
MEV(SE/BSE) Poliéster/ $\text{CaCO}_3$  (50:50) / 200 rpm – 10 N

**SULCAMENTO, ABRASÃO E DELAMINAÇÃO:** O sulco de abrasão é causado pelas asperezas duras do contra-corpo (a dois corpos) ou por partículas duras (geralmente referida como terceiro corpo, por isso chamado de a três corpos) entre as superfícies. Estas asperezas ou partículas penetram no polímero (mais mole) e removem material por microcorte, microsulcamento, ou processos cisalhantes (DONG E BELL, 1999).

**Figura 56.** Imagens de MEV da pista de desgaste do compósito poliéster/ $\text{CaCO}_3$  do grupo A na condição de 200 rpm e 10 N e microanálise (a seta indica a direção do deslizamento)

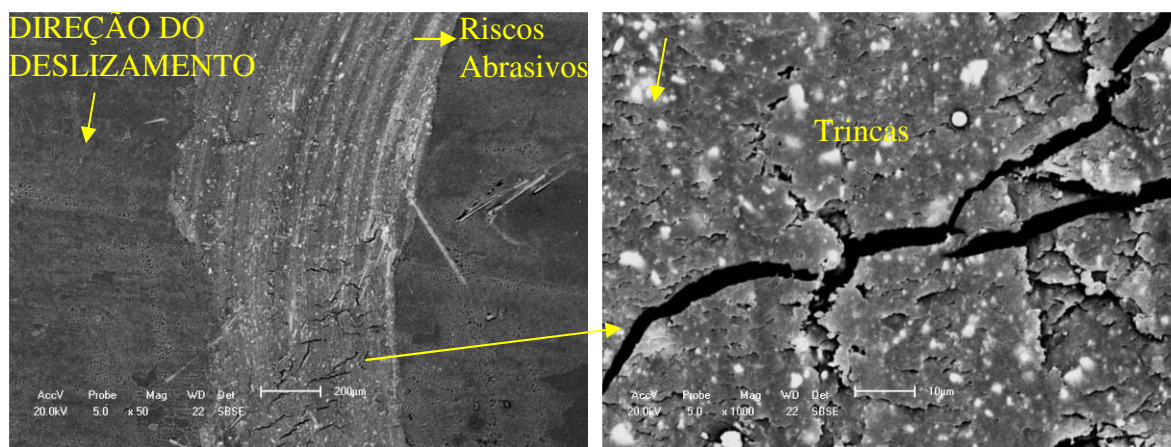
Nas Figuras 57, 58 e 59 têm-se as morfologias das superfícies desgastadas em imagens de MEV para o compósito Poliéster/Resíduos do grupo A, após os ensaios.

Observa-se também a formação de um sulco com riscos abrasivos na direção do deslizamento na pista de desgaste para o compósito Poliéster/Resíduos ensaiado com velocidade de 100 rpm e 5 N (Figura 57) e com um aumento de 1000x na região do risco verifica-se o mecanismo de delaminação, já evidenciado pelo compósito Poliéster/ $\text{CaCO}_3$  quando ensaiado na velocidade de 200 rpm e carga de 10 N (Figura 56).



**Figura 57.** Imagens de MEV da pista de desgaste do compósito Poliéster/Resíduos do grupo A na condição de 100 rpm e 5 N (a seta indica a direção do deslizamento)

Na Figura 58 evidencia-se a formação de trincas na pista de desgaste do compósito Poliéster/Resíduos quando ensaiados na velocidade de 100 rpm e carga de 10 N, além disso também é possível observar riscos abrasivos.



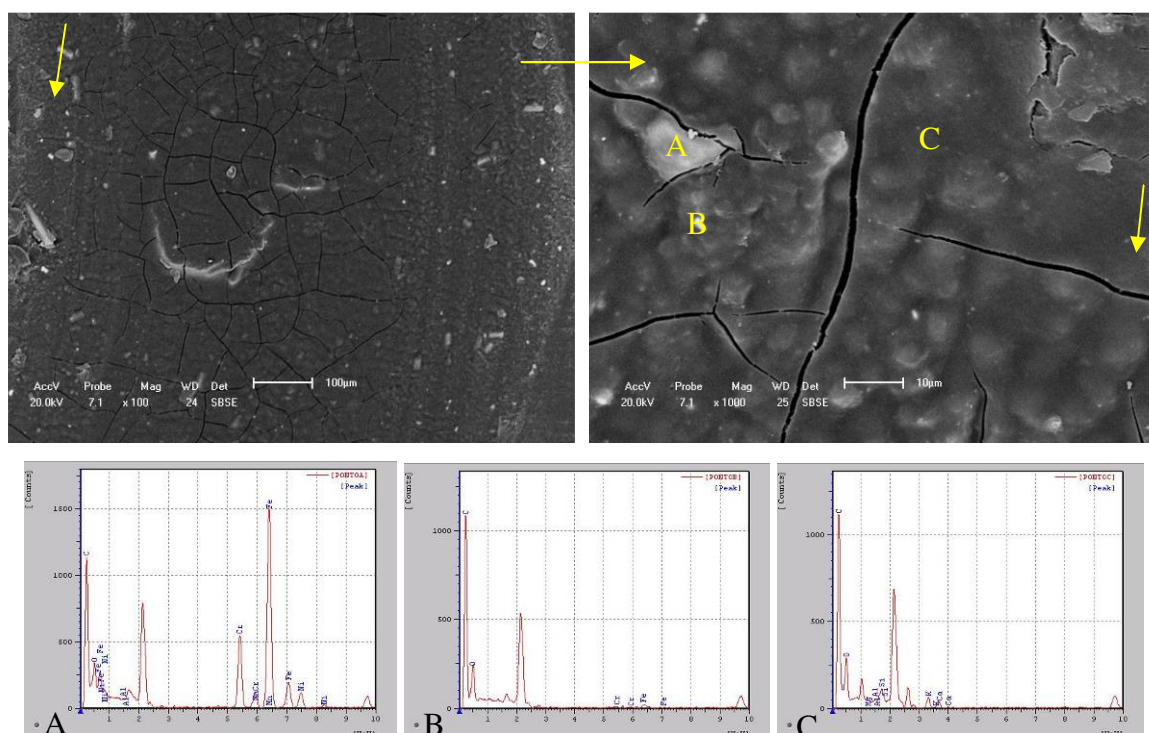
**MEV(BSE) Poliéster/Resíduos (50:50) / 100 rpm - 10 N: TRINCAS**

**Figura 58.** Imagens de MEV da pista de desgaste do compósito Poliéster/Resíduos do grupo A na condição de 100 rpm e 10 N (a seta indica a direção do deslizamento)

Na Figura 59 também se identifica a formação de trincas na pista de desgaste do compósito Poliéster/Resíduos ensaiado com velocidade de 200 rpm e carga de 10 N e neste caso sem riscos abrasivos.

De acordo com a microanálise EDS nos pontos A, B e C, verifica-se a presença de Fe, Ni, Cr e Mn, devido a deposição de material do pino na pista de desgaste e a presença de

Al e Mg, devido as partículas de Fibra de vidro existentes nos resíduos, já que os resíduos são de Poliéster/Fibra de vidro.

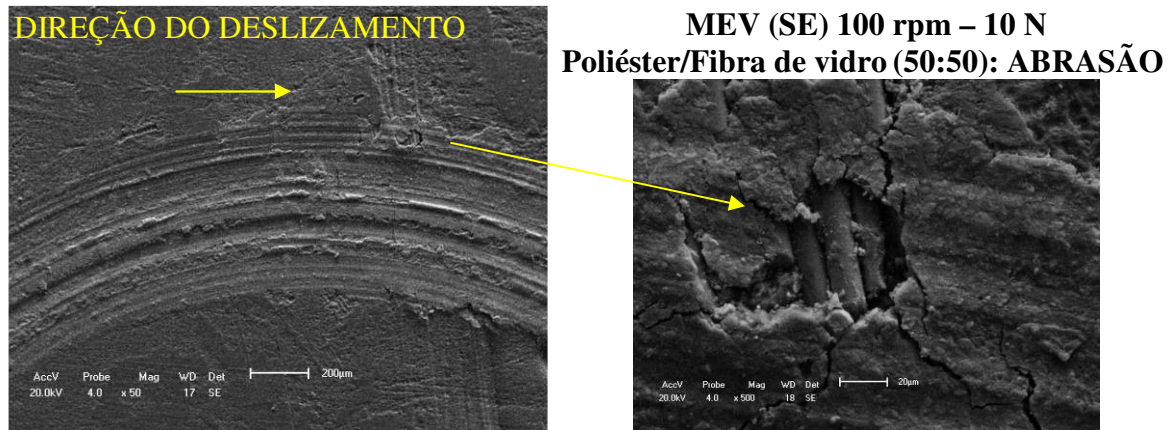


**MEV(BSE) Poliéster/Resíduos (50:50) / 200 rpm – 10 N: TRINCAS**

**Figura 59.** Imagens de MEV da pista de desgaste do compósito Poliéster/Resíduos do grupo A na condição de 200 rpm e 10 N e microanálise (a seta indica a direção do deslizamento)

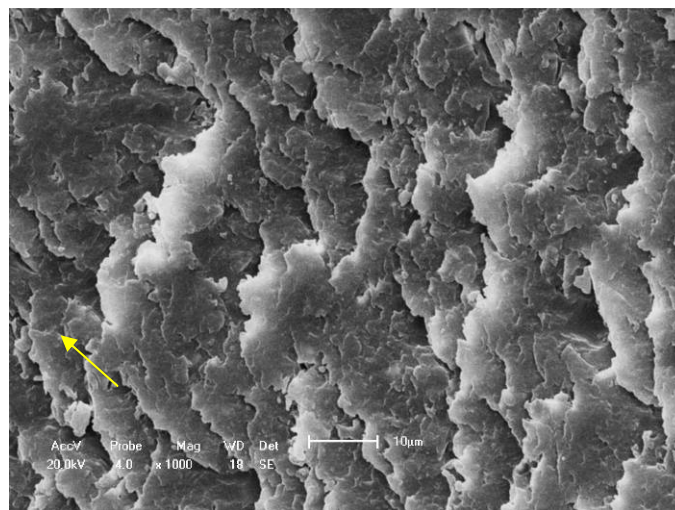
Nas Figuras 60, 61 e 62 têm-se as morfologias das superfícies desgastadas em imagens de MEV para o compósito Poliéster/Fibra de vidro do grupo A, após os ensaios.

Na Figura 60 é possível visualizar riscos de abrasão na pista de desgaste do compósito Poliéster/Fibra de vidro na velocidade de 100 rpm e carga de 10 N e ocorrência do desprendimento da camada de resina da Fibra de vidro.



**Figura 60.** Imagens de MEV da pista de desgaste do compósito Poliéster/Fibra de vidro do grupo A na condição de 100 rpm e 10 N (a seta indica a direção do deslizamento)

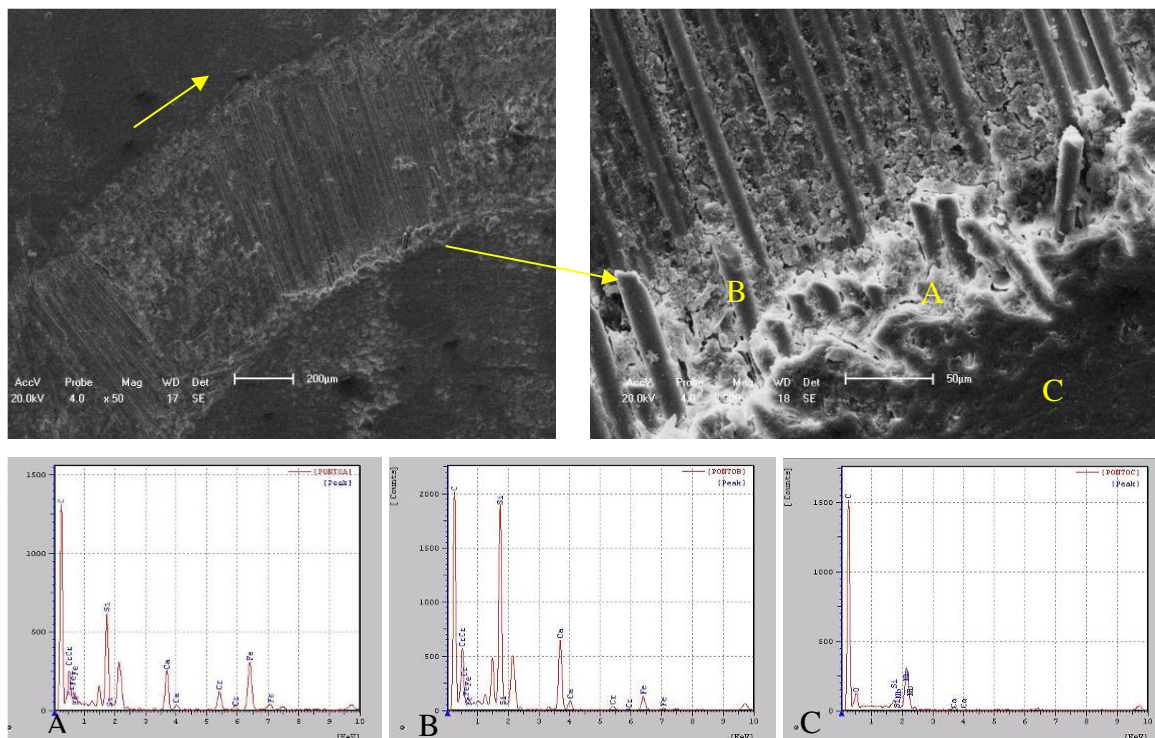
Na Figura 61 verifica-se a ocorrência de delaminação na pista de desgaste do compósito Poliéster/Fibra de vidro ensaiado com a velocidade de 200 rpm e carga de 1 N.



**Figura 61.** Imagem de MEV da pista de desgaste do compósito Poliéster/Fibra de vidro do grupo A na condição de 200 rpm e 1 N (a seta indica a direção do deslizamento)

Na Figura 62 observa-se a remoção da camada de resina e quebra de parte da camada de fibra de vidro, com a passagem do pino pela pista de desgaste do compósito Poliéster/Fibra de vidro do grupo A, com velocidade de 200 rpm e carga de 10 N, condição de desgaste severo.

Do resultado da microanálise verifica-se mais uma vez a deposição de material do pino, sendo comprovado pela presença de Fe, Cr e Si, característicos de um aço inoxidável austenítico.



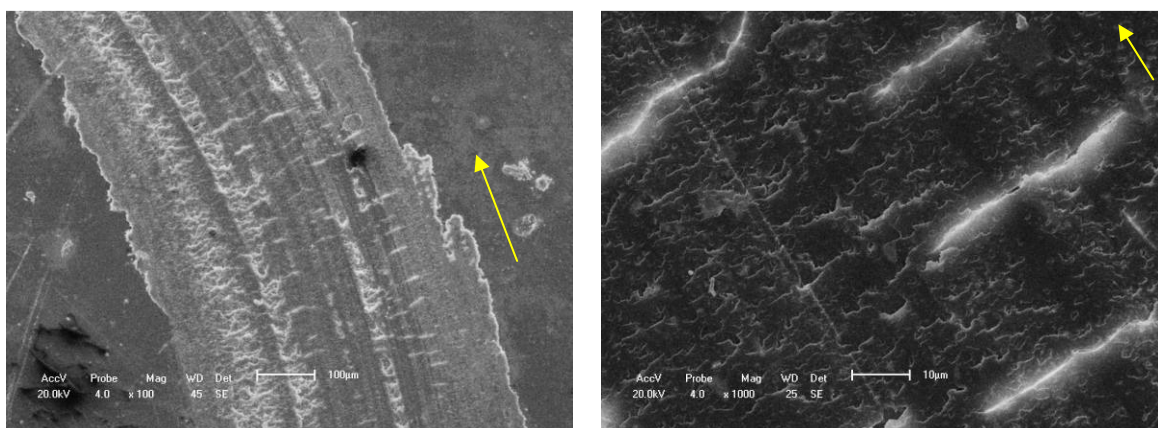
#### MEV (SE) Poliéster/Fibra de vidro (50:50) / 200 rpm – 10 N: Remoção das Fibras

**Figura 62.** Imagens de MEV da pista de desgaste do compósito poliéster/fibra de vidro do grupo A na condição de 200 rpm e 10 N e microanálise (a seta indica a direção do deslizamento)

#### 4.5.2 Grupo B ( $\text{CaCO}_3$ )

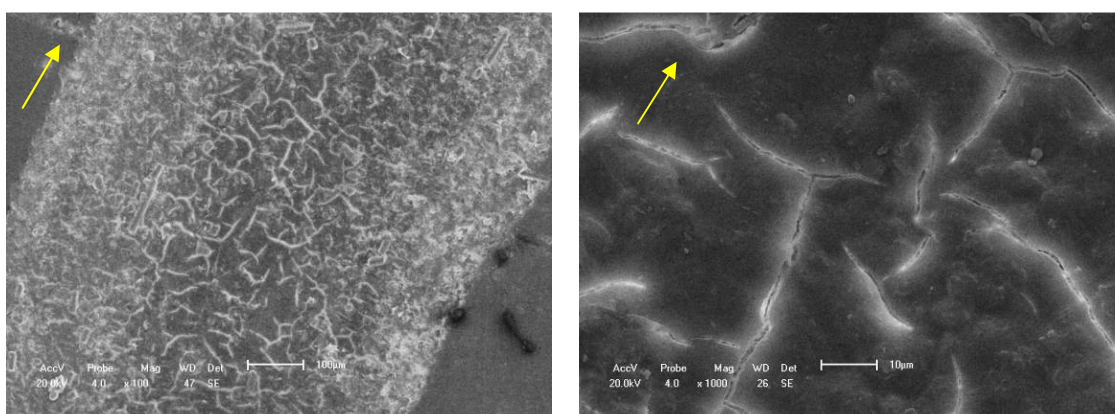
Nas Figuras 63, 64, 65, 66, 67, 68 e 69 têm-se a morfologia das superfícies desgastadas em imagens de MEV para os compósitos do grupo B com  $\text{CaCO}_3$ .

Para a composição 50:15:35 onde têm-se a maior quantidade de  $\text{CaCO}_3$ , ensaiada com velocidade de 100 rpm e carga de 5 N, observa-se o mecanismo de desgaste por abrasão com delaminação e formação de trincas devido ao mecanismo de fadiga (Figura 63) e para a velocidade de 200 rpm e carga de 10 N apenas trincas (Figura 64).



**MEV (SE) Poliéster/FV/CaCO<sub>3</sub> (50:15:35) / 100 rpm – 5 N: ABRASÃO COM DELAMINAÇÃO E FORMAÇÃO DE TRINCAS**

**Figura 63.** Imagens de MEV da pista de desgaste do compósito Poliéster/FV/CaCO<sub>3</sub> do grupo B na condição de 100 rpm e 5 N (a seta indica a direção do deslizamento)

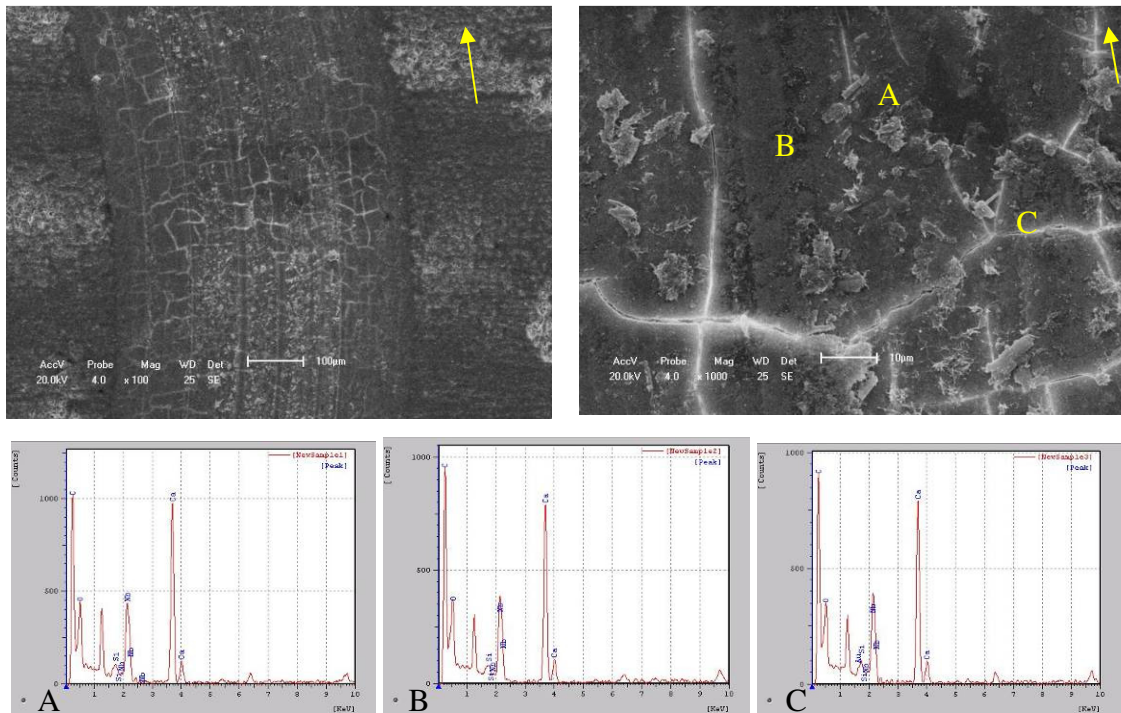


**MEV (SE) Poliéster/FV/CaCO<sub>3</sub> (50:15:35) / 200 rpm – 10 N: TRINCAS**

**Figura 64.** Imagens de MEV da pista de desgaste do compósito Poliéster/FV/CaCO<sub>3</sub> do grupo B na condição de 200 rpm e 10 N (a seta indica a direção do deslizamento)

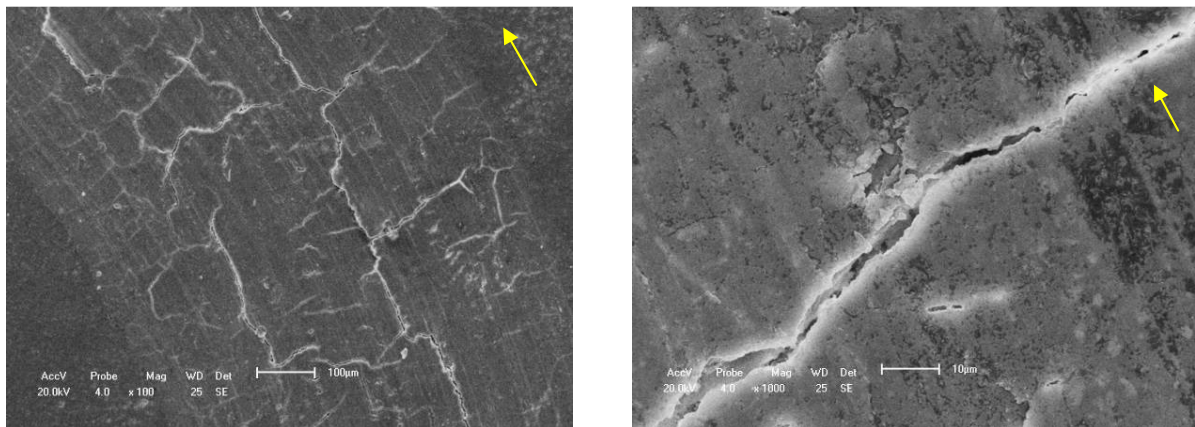
Para a composição 50:25:25 ensaiada com a velocidade de 100 rpm e carga de 5 N verifica-se também a ocorrência de trincas (Figura 65) e de acordo com a microanálise dos pontos A, B e C desta mesma imagem encontra-se a presença de Si.

Para a velocidade de 100 rpm e carga de 10 N desta mesma composição pode-se observar a evolução das trincas com o aumento da velocidade e da carga (Figura 66).



**MEV (SE) Poliéster/FV/CaCO<sub>3</sub> (50:25:25) / 100 rpm – 5 N: TRINCAS**

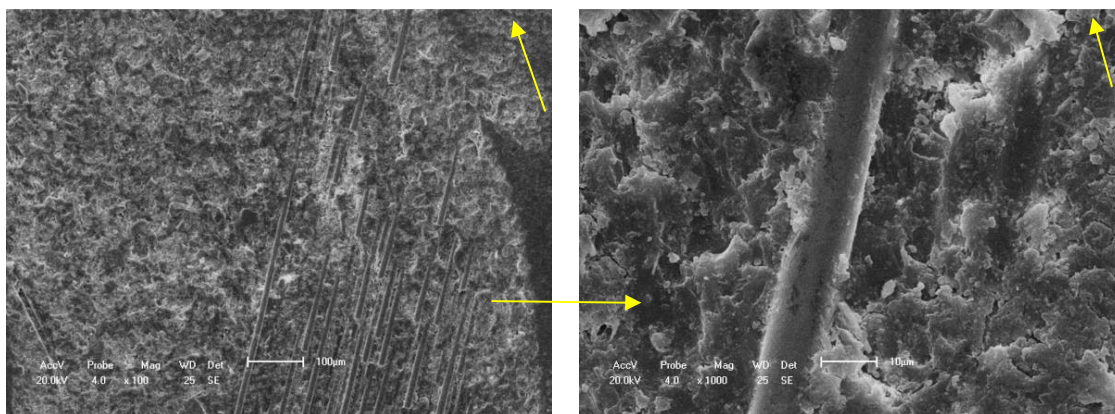
**Figura 65.** Imagens de MEV da pista de desgaste do compósito Poliéster/FV/CaCO<sub>3</sub> do grupo B na condição de 100 rpm e 5 N e microanálise (a seta indica a direção do deslizamento)



**MEV (SE) Poliéster/FV/CaCO<sub>3</sub> (50:25:25) / 100 rpm – 10 N: EVOLUÇÃO DAS TRINCAS**

**Figura 66.** Imagens de MEV da pista de desgaste do compósito Poliéster/FV/CaCO<sub>3</sub> do grupo B na condição de 100 rpm e 10 N (a seta indica a direção do deslizamento)

Na Figura 67 observa-se que com a velocidade de 200 rpm e carga de 10 N a camada de resina é removida em alguns locais na pista de desgaste chegando a alcançar a camada de fibra de vidro, justificando a alta taxa de desgaste apresentada por esta composição na Figura 52, entretanto não houve remoção da fibra de vidro como visualizado para o compósito Poliéster/Fibra de vidro (Figura 62), nas mesmas condições de ensaio.

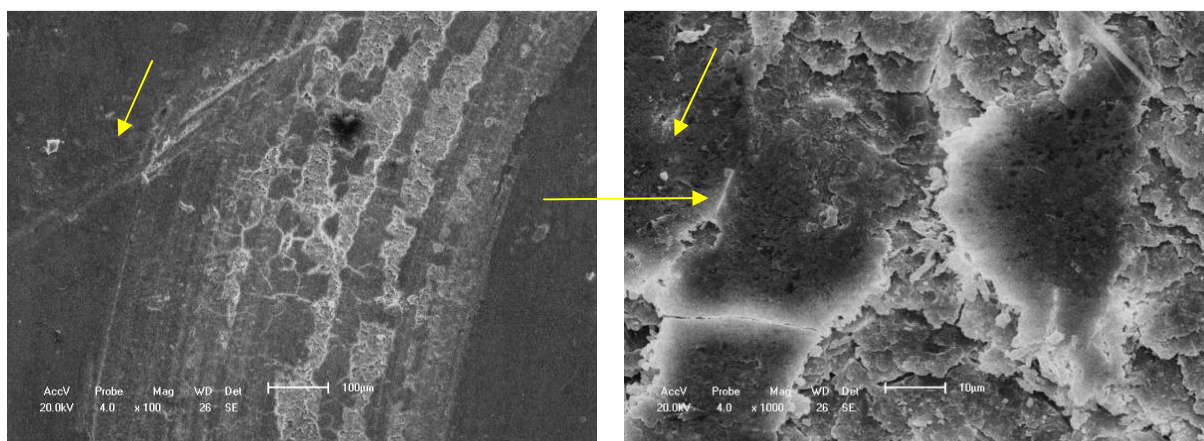


**MEV (SE) Poliéster/FV/CaCO<sub>3</sub> (50:25:25) / 200 rpm – 10 N: REMOÇÃO DA CAMADA DE RESINA POLIÉSTER**

**Figura 67.** Imagens de MEV da pista de desgaste do compósito Poliéster/FV/CaCO<sub>3</sub> do grupo B na condição de 200 rpm e 10 N (a seta indica a direção do deslizamento)

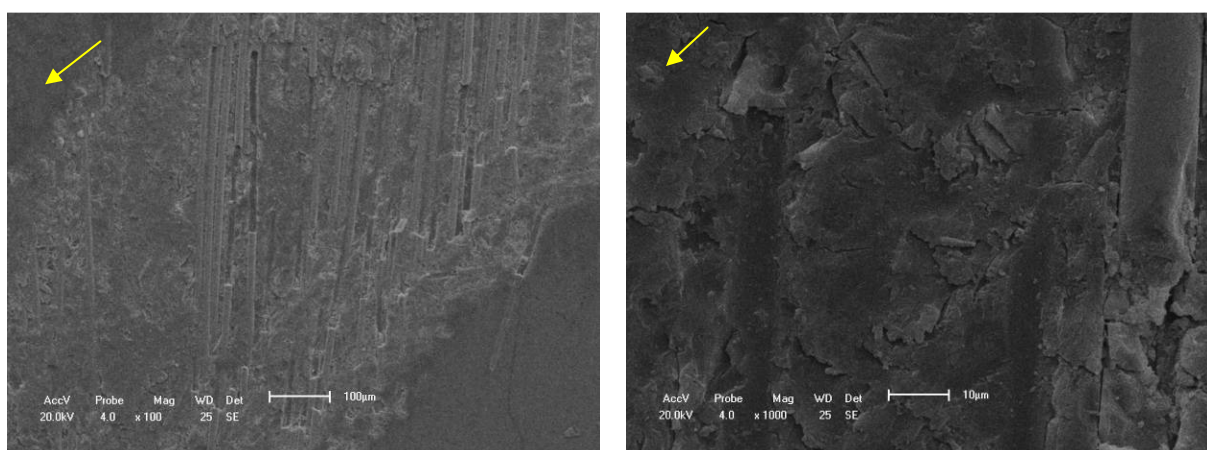
Para a composição 50:35:15, na qual têm-se a maior quantidade de Fibra de vidro, quando ensaiada com velocidade de 200 rpm e carga de 5 N apresenta riscos abrasivos com delaminação localizada e o início da formação de trincas na delaminação (Figura 68).

Na Figura 69 observa-se que com a velocidade de 200 rpm e carga de 10 N também houve a remoção da camada de resina na pista de desgaste e início da remoção das Fibras de vidro como visualizado para o compósito Poliéster/Fibra de vidro (Figura 62), nas mesmas condições de ensaio, mas neste caso em menor intensidade.



**MEV (SE) Poliéster/FV/CaCO<sub>3</sub> (50:15:35) / 200 rpm – 5 N: ABRASÃO COM DELAMINAÇÃO E FORMAÇÃO DE TRINCAS**

**Figura 68.** Imagens de MEV da pista de desgaste do compósito Poliéster/FV/CaCO<sub>3</sub> do grupo B na condição de 200 rpm e 5 N (a seta indica a direção do deslizamento)



**MEV (SE) Poliéster/FV/CaCO<sub>3</sub> (50:15:35) / 200 rpm – 10 N: QUEBRA DAS FIBRAS DE VIDRO**

**Figura 69.** Imagens de MEV da pista de desgaste do compósito Poliéster/FV/CaCO<sub>3</sub> do grupo B na condição de 200 rpm e 10 N (a seta indica a direção do deslizamento)

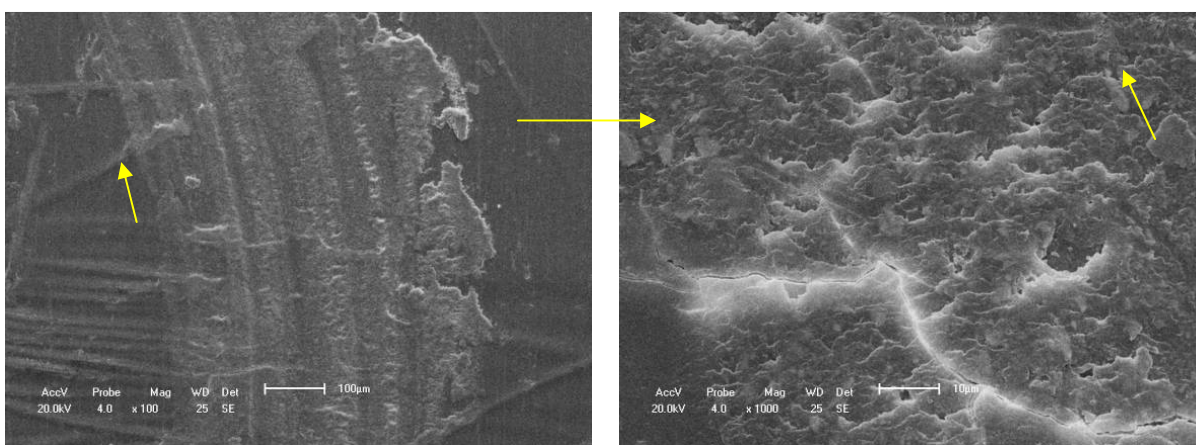
#### **4.5.3 Grupo B (Resíduos)**

Nas Figura 70, 71, 72, 73, 74, 75 e 76 têm-se as morfologias das superfícies desgastadas em imagens de MEV para os compósitos do grupo B com resíduos.

Para a composição 50:15:35, aquela com a maior quantidade de Resíduos verifica-se riscos abrasivos com delaminação e formação de trincas na pista de desgaste, sob velocidade de 100 rpm e carga de 5 N (Figura 70). Na velocidade de 100 rpm e carga de 10 N (Figura 71)

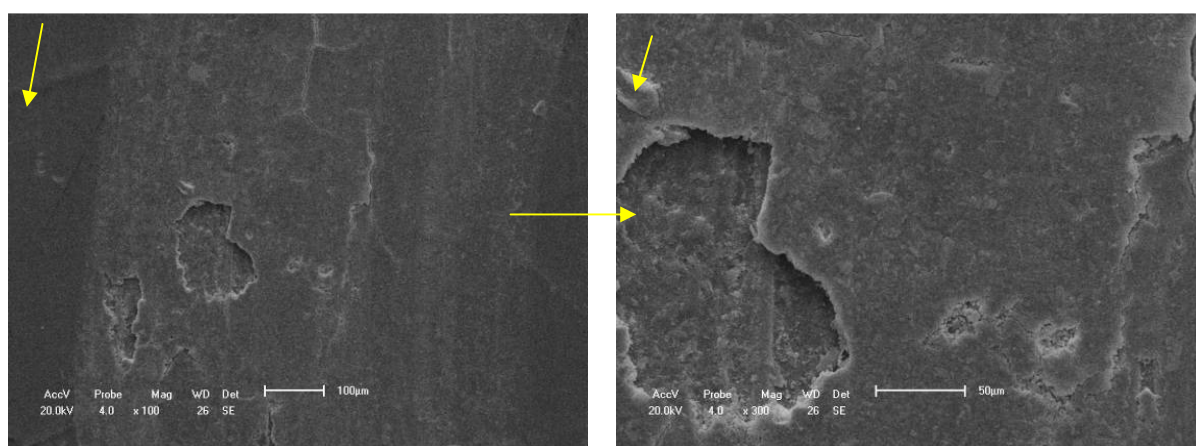
observa-se um arrancamento localizado de resina Poliéster oriundo da passagem do pino na pista de desgaste.

Levanta-se a suspeita de ter ocorrido o mecanismo de microlascamento (“spalling”). Este mecanismo de desgaste foi identificado por Medeiros (2002) estudando o desgaste de aço AISI 52100 na configuração disco-disco. Segundo ele, os ciclos termomecânicos subsequentes de deformações plásticas e encruamento induzem a nucleação e propagação de trincas subsuperficiais, estas se propagam até a superfície e promovem o destacamento do material resultando na formação de crateras microscópicas.



**MEV (SE) Poliéster/FV/Resíduos (50:15:35) 100 rpm – 5 N: ABRASÃO COM DELAMINAÇÃO E FORMAÇÃO DE TRINCAS**

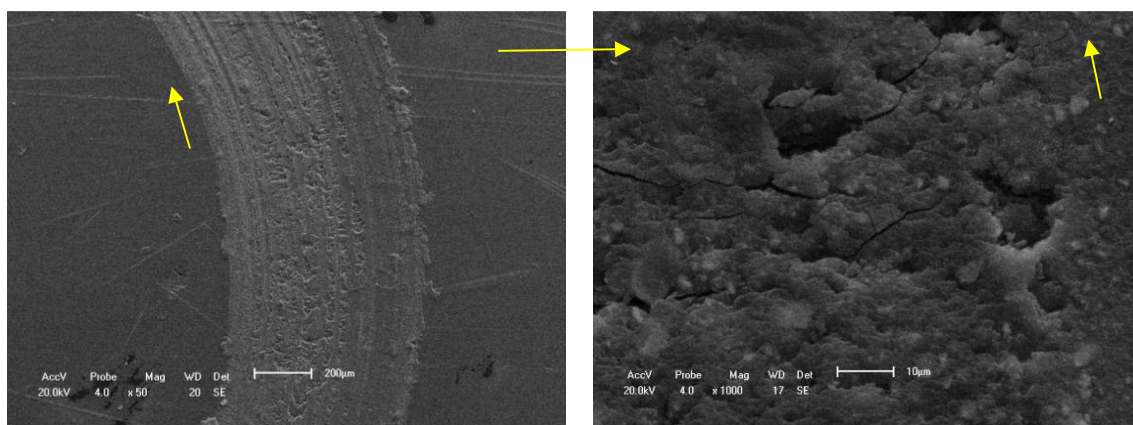
**Figura 70.** Imagens de MEV da pista de desgaste do compósito Poliéster/FV/Resíduos do grupo B na condição de 100 rpm e 5 N (a seta indica a direção do deslizamento)



**MEV (SE) Poliéster/FV/Resíduos (50:15:35) 100 rpm – 10 N**

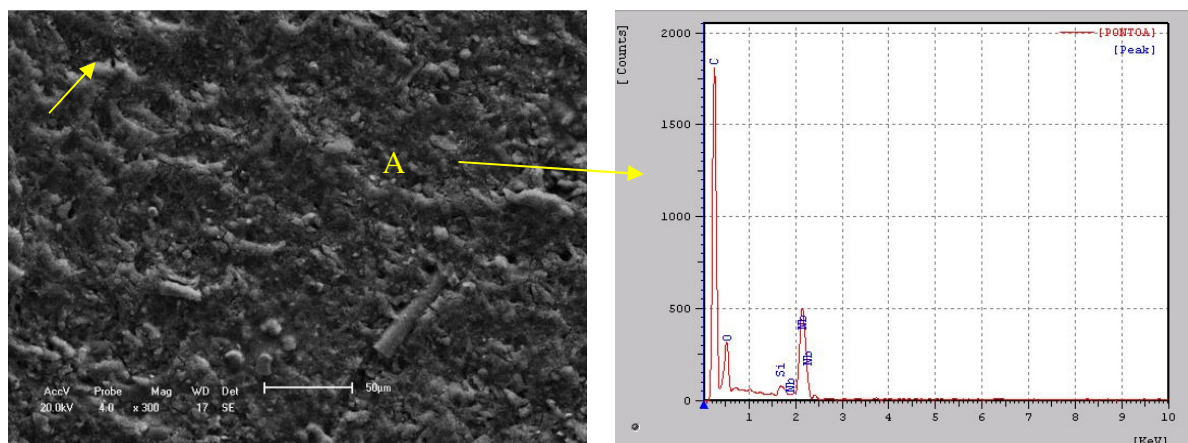
**Figura 71.** Imagens de MEV da pista de desgaste do compósito Poliéster/FV/Resíduos do grupo B na condição de 100 rpm e 10 N (a seta indica a direção do deslizamento)

Para a composição 50:25:25 ensaiada com a velocidade de 100 rpm e carga de 5 N também verifica-se riscos abrasivos com delaminação e formação de trincas devido a fadiga na pista de desgaste (Figura 72). Enquanto que para a velocidade de 200 rpm e carga de 10 N identifica-se apenas a formação de ondas com aspecto de delaminação e a presença de Si em sua microanálise EDS (Figura 73).



**MEV (SE) Poliéster/FV/Resíduos (50:25:25) 100 rpm – 10 N: ABRASÃO COM DELAMINAÇÃO E TRINCAS**

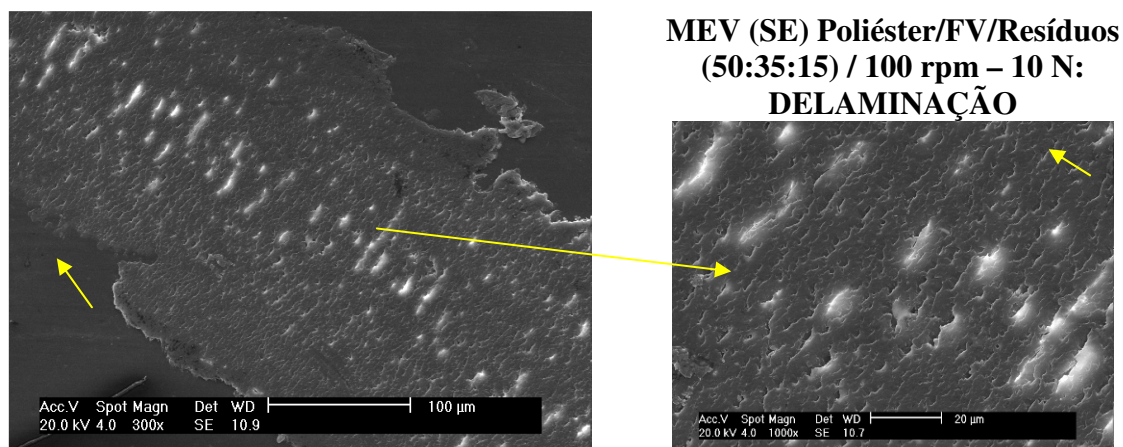
**Figura 72.** Imagens de MEV da pista de desgaste do compósito Poliéster/FV/Resíduos do grupo B na condição de 100 rpm e 10 N (a seta indica a direção do deslizamento)



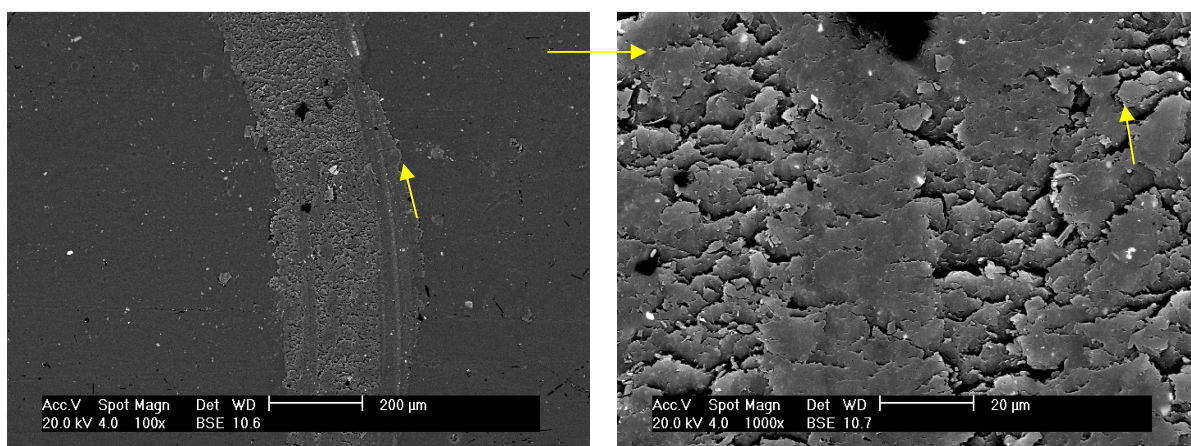
**MEV (SE) Poliéster/FV/Resíduos (50:25:25) 200 rpm – 10 N: ONDAS**

**Figura 73.** Imagens de MEV da pista de desgaste do compósito Poliéster/FV/Resíduos do grupo B na condição de 200 rpm e 10 N e microanálise (a seta indica a direção do deslizamento)

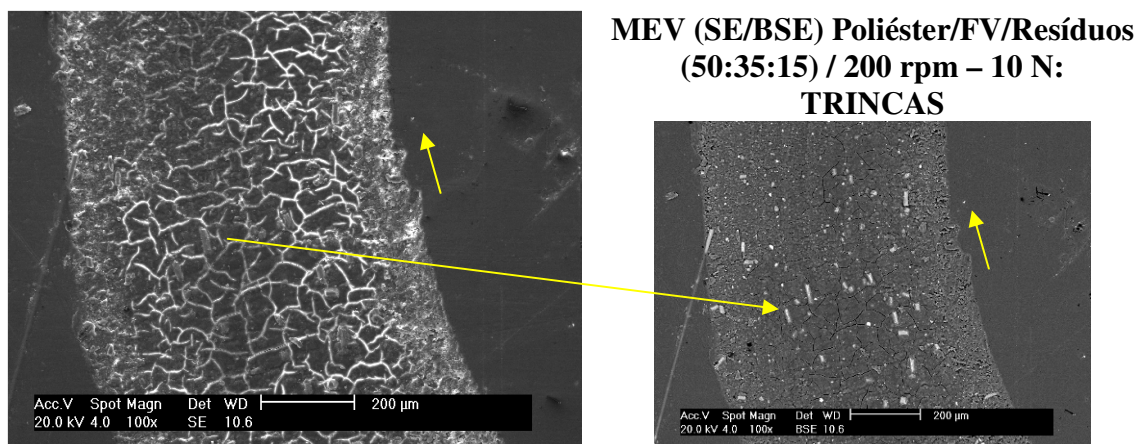
Para a composição 50:35:15 ensaiada na velocidade de 100 rpm e carga de 10 N verifica-se a ocorrência de delaminação no interior do sulco (Figura 74), já na velocidade de 200 rpm e carga de 1 N observa-se abrasão com delaminação (Figura 75) e na velocidade de 200 rpm e carga de 10 N, condição de ensaio mais severa, verifica-se trincas em toda a pista de desgaste (Figura 76).



**Figura 74.** Imagens de MEV da pista de desgaste do compósito Poliéster/FV/Resíduos do grupo B na condição de 100 rpm e 10 N (a seta indica a direção do deslizamento)



**Figura 75.** Imagens de MEV da pista de desgaste do compósito Poliéster/FV/Resíduos do grupo B na condição de 200 rpm e 1 N (a seta indica a direção do deslizamento)



**Figura 76.** Imagens de MEV da pista de desgaste do compósito Poliéster/FV/Resíduos do grupo B na condição de 200 rpm e 10 N (a seta indica a direção do deslizamento)

B. F. YOUSIF *et al*, 2010 ao estudar compósitos à base de poliéster com fibra de noz para aplicações tribológicas, usando a configuração de ensaio bloco contra disco, com diferentes cargas aplicadas e velocidade de deslizamento de 2,8 m/s, em condições de contato seco e molhado, encontraram um melhor desempenho de atrito e desgaste para a condição de contato molhado em relação ao seco e que a partir das imagens de MEV das superfícies desgastadas os mecanismos de desgaste predominantes foram os de macro e micro trincas, descolamento e remoção das fibras.

SIERROS e KUKUREKA, 2007, investigaram tribologicamente substratos de poliéster finos (Politereftalato de etileno (PET) e polietileno naftalato (PEN)), usados atualmente como substratos de visores flexíveis e finos, telas de toque e monitores de tela plana, pelo fato de que poucas pesquisas têm sido relatadas até agora sobre as propriedades tribológicas de componentes de visor. Ensaios foram realizados em um tribômetro com configuração pino contra disco e de acordo com os resultados, o desgaste por fadiga com o surgimento de micro trincas e trincas na pista de desgaste foram observados, assim como a remoção de partículas da pista de desgaste para a borda pela ação do contracorpo rígido. Deformação plástica e fragmentos da camada superficial delaminados também foram evidentes.

## 5. CONCLUSÕES

O estudo do comportamento tribológico de compósitos Poliéster/Fibra de vidro utilizando Resíduos de Poliéster/Fibra de vidro e Carbonato de cálcio como carga, através de ensaios pino contra disco, variando-se velocidade e carregamento permitiu evidenciar que a reutilização dos resíduos de Poliéster/Fibra de vidro na forma de carga em compósitos de matriz poliéster é uma alternativa eficiente para a diminuição de seu descarte, explicada pelas seguintes conclusões:

- 1) Identificou-se a influência das cargas na taxa de desgaste, verificando-se que quanto maior o teor de carga menor é a taxa de desgaste resultante e comprovando-se que os compósitos com carga de Resíduos apresentaram taxa de desgaste inferior aos compósitos com carga de  $\text{CaCO}_3$ , sendo estes os mais indicados para aplicações em que o desgaste é indesejado.
- 2) Os compósitos com as maiores taxas de desgaste foram àqueles com os menores coeficientes de atrito, justificando o fato de que não existe uma relação direta entre coeficiente de atrito e taxa de desgaste.
- 3) Encontrou-se através da Microscopia Eletrônica de Varredura mecanismos de desgaste decorrentes de desgastes por abrasão e fadiga, para as condições de ensaio utilizadas como:
  - a) Sulcamento
  - b) Delaminação
  - c) Trincas
  - d) Spalling (Microlascamento)
- 4) Comprovou-se através de microanálise em EDS a presença de partículas do pino (Aço inoxidável) depositadas na pista de desgaste após os ensaios devido a ocorrência de interface.
- 5) De acordo com a temperatura de estabilidade térmica alcançada nas análises de TG e DSC estes compósitos podem ser aplicados onde se exijam resistência a temperaturas de no máximo 200 C.
- 6) Os ângulos de contato realizados com a utilização de água foram superiores, em todos os compósitos ensaiados, aos com a utilização de Diodometano e a superfície de todos os compósitos ensaiados apresentam característica hidrofílica.
- 7) A melhor molhabilidade e maior energia de superfície encontrada foi para o compósito Poliéster/Fibra de vidro/Resíduos (50:15:35), aquele com a maior quantidade de resíduos em sua composição.

## 6. SUGESTÕES DE 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. Tal situação favorece o surgimento do dano por rasgamento se desenvolvendo por várias camadas (delaminação), como citado por LIMA DA SILVA, 2006.
- Monitorar a temperatura próxima ao contato, devido ao aquecimento gerado pelo atrito.
- Monitorar a vibração do sistema, já que a carga utilizada em ensaios tribológicos com configuração pino contra disco, nem sempre é suficiente para manter o contato entre o pino e o disco, dependendo da velocidade de ensaio.
- Realizar ensaios utilizando outros tipos de metais, de acordo com as necessidades do mercado, nas mesmas condições.

## REFERÊNCIAS

ANDERSON, B.S. – “Company perspective in vehicle tribology – Volvo”, In 17th Leeds-Lion Symposium on Tribology, Elsevier Science Pub Co, p. 503-506 (Elsevier Technology Series 18)(1991). Citado em: SINATORA, A., “Tribologia: um resgate histórico e o estado da arte”. Prova de Erudição, São Paulo (2005).

AMBIENTES BRASIL – Disponível em: [www.ambientes.ambientebrasil.com.br](http://www.ambientes.ambientebrasil.com.br), Acesso em: 25/08/2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MATERIAIS COMPÓSITOS – Disponível em [www.abmaco.org.br](http://www.abmaco.org.br), acesso em 24/09/2010.

BARCELLOS, I.O., SOUZA, A.C., SELKE, A.E. – Incorporação de Lodo Industrial em Compósitos de Resina Poliéster, Departamento de Química, Universidade Regional de Blumenau, Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 19, nº 2, p. 1-5, (2009).

BELY, V.A., SVIRIDENOK, A.I., PETROKOVETS, M.I. AND SAVKIN, V.G. – Friction and wear in polymer based materials, Pergamon Press, Oxford, 1982.

BHUSHAN, B. Introduction to tribology. New York: John Wiley & Sons Inc., 752p (2002).

BRISCOE, B.J., STOLARSKI, T.A. – Wear of polymers in the pin-on-disc configuration, in: L. H. Lee (Ed.), Chapter 20 in Polymer Wear and its Control, ACS Symposium Series, vol. 287, American Chemical Society, Washington, DC, pp. 303–313 (1985).

BROEKEL, J.; SCHARR, G. The specialities of fibre-reinforced plastics in terms of product lifecycle management. Journal of Materials Processing Technology, v. 162-163, p. 725-729, 2005.

BROSTOW, W., BUJARD, B., CASSIDY, P.E., HAGG, H.E., MONTEMARTINI, P.E., “Effects of fluoropolymer to an epoxy on scratch depth and recovery” Mater. Res. Innovat., 6, 7-12 (2002).

BROSTOW, W., DAMARLA, G., HOWE, J. AND PIETKIEWICZ, D. – e-Polymers, 25, 1 (2004).

BROSTOW, W., HAGG LOBLAND, H.E. & NARKIS, M. – Sliding wear, viscoelasticity and brittleness of polymers, J. Mater. Res. 2006, 21, 2422

BROSTOW, W. AND HAGG LOBLAND, H. E. – Predicting wear from mechanical properties of thermoplastic polymers, Polym. Eng. Sci. 48, p. 1982, 2008.

BROWN, M.E. Introduction to thermal analysis: techniques and applications. London: Chapman and Hall, p.1 (1988).

BROSTOW, W., CASSIDY, P.E., MACOSSAY, J. AND PIETKIWICZ, D., Polym. Int., 52, 1498 (2003).

CAMPOS, J.S.C., RIBEIRO A.A., CARDOSO, C.X. – Preparation and characterization of PVDF/CaCO<sub>3</sub> composites, Materials Science and Engineering B 136 p. 123–128 (2007).

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.

CHAND, N. AND SHARMA, M.K. (2008) Development and sliding wear behaviour of milled carbon fibre reinforced epoxy gradient composites. *Wear* 264:69–74.

CHU-HUA LU, YI-CHE SU, CHIH-FENG WANG, CHIH-FENG HUANG, YUUNG-CHING SHEEN, FENG-CHIC CHANG – Thermal properties and surface energy characteristics of interpenetrating polyacrylate and polybenzoxazine networks, *Polymer* 49 p. 4852-4860, (2008).

CIÊNCIA DOS MATERIAIS MULTIMÍDIA – Disponível em [www.cienciasdosmateriais.org](http://www.cienciasdosmateriais.org), capítulo 12, Superfícies e Interfaces, 12.1 Introdução. Acesso em: 21/01/2010.

CRAWFORD, R. J. – *Plastics engineering*. 3rd ed. British Library Cataloguing in Publication Data, p. 84-85, (1998).

CRAY VALLEY – Disponível em [www.crayvalley.com.br](http://www.crayvalley.com.br). Acesso em 29/4/2007.

DATAPHYSICS – Understanding Interfaces. Disponível em [www.surface-tension.de](http://www.surface-tension.de). Acesso em: 08/07/2009.

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS DA UFMG – Disponível em: [www.demet.ufmg.br](http://www.demet.ufmg.br), acesso em: 17/05/2010.

DONG, H.; BELL, T. – State-of-the-art overview: ion beam surface modification of polymers towards improving tribological properties. *Surface and Coatings Technology*, v. 111, p. 29–40, (1999).

DUTTA MADHURI – Modified epoxy coatings on mild steel: A study of tribology and surface energy. Master of Science, University of North Texas. August 2009.

EDCLEIDE M. ARAÚJO, KASSELYNE D. ARAÚJO, OSANILDO D. PEREIRA, POLLYANA C. RIBEIRO, TOMÁS J. A. DE MELO – Fiberglass Wastes/Polyester Resin Composites: Mechanical Properties and Water Sorption. *Departamento de Engenharia de Materiais, UFCG. Polímeros: Ciência e Tecnologia*, vol. 16, nº 4, p. 332-335 (2006).

EL-TAYEB, N.S.M., YOUSIF, B.F., YAP, T.C. – Tribological studies of polyester reinforced with CSM 450-R-glass fiber sliding against smooth stainless steel counterface, *Wear*, Vol. 261, nº 3-4, (2006) p. 443–452.

GIOLITO, I. Desenvolvimento, classificação e aplicações dos métodos termoanalíticos. *Rev. Quím. Ind.*, Rio de Janeiro, n.663, p.12-20,1988.

GIOLITO, I.; IONASHIRO, M. A nomenclatura em análise térmica – parte II. *Cerâmica*, São Paulo, v.34, n.225, p.163-164, 1988.

HAINES, P. J. *Thermal methods of analysis: principles, applications and problems*. London: Blackie Academic & Professional, 1995. 286p.

HARTIKAINEN, J.;HINE, P.;SZABO, J.S.;LINDNER, M.;HARMIA, T.;DUCKETT, R.A.;FRIEDRICH, K. – Polypropylene hybrid composites reinforced with long glass fibres

and particulate filler. *Composites Science and Technology*, Vol. 65, Issue 2, February 2005, pp. 257–267.

HONG H. – The role of atmospheres and lubricants in the oxidational wear of metals, *Tribology International*, 35, 725-729 (2002).

HUTCHINGS, I.M. – *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*, Edward Arnold, UK, 1992;

IONASHIRO, M.A.; GIOLITO, I. Nomenclatura, padrões e apresentação dos resultados em análise térmica. *Cerâmica*, São Paulo, v.26, n.121, p.17-24, 1980.

JOHNSON, K. L. – *Contact Mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1989. 452p.

JOST, H.P. – *Tribology - Origin and Future*, *Wear* (136), 1990, pp.1-17

JOST, H.P. – “Lubrication (tribology) education and research, Jost Rep., Department of Education and Science, HMSO, London, 1966, p.4. Citado em: SINATORA, A. - “Tribologia: um resgate histórico e o estado da arte” Prova de Erudição, São Paulo, 2005.

KERS, J.; MAJAK, J. Modelling a new composite from a recycled GFRP. *Mechanics of Composite Materials*, 44 (6), p. 623-632 (2008).

KUBIAK, K.J., WILSON, M.C.T., MATHIA, T.G., CARVAL, PH., Wettability versus roughness of engineering surfaces, 12th International Conference on Metrology & Properties of Engineering Surfaces, 8-10 July 2009, Rzeszow, Poland.

LARSEN, T., ANDERSEN, T.L., THORNING, B., HORSEWELL, A. AND VIGILD, M.E. – *Wear*, 262, 1013 (2007).

LEE, H.G., KIM, S.S., LEE, D.G.: Effect of compacted wear debris on the tribological behavior of carbon/epoxy composites. *Compos. Struct.* 74, 136–144 (2006).

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 apresentada à Universidade Federal do Rio Grande do Norte, RN, Brasil, 2006.

LIMA DA SILVA, R.C., SILVA C. H., MEDEIROS, J. T. N. – Is there delamination wear in polyurethane? *Wear* 263 (2007) 974–983.

LIMA DA SILVA, R.C., BOSCO DA SILVA, J., MEDEIROS, J.T.N. – Sliding contact metal – polymer with variable stiffness. *International Symposium on Friction, Wear and Wear Protection*. April, 9th to 11th , 2008. Aachen, Germany.

LIMA DA SILVA, R.C., NASCIMENTO E., SOUZA, J.R., MEDEIROS, J.T.N. *Caracterização de náilons utilizados em centralizadores de hastes de bombeio de petróleo*. Anais do VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Campina Grande – PB, Brasil, 2010.

LIU, Y., CHEN, X., XIN, J.H. "Super-hydrophobic surfaces from a simple coating method: a bionic nanoengineering approach", *Nanotechnology*, 17, 3259-3263 (2006).

MATOS, J.R.; MACHADO, L.D.B. Análise térmica – termogravimetria. In: CANEVAROLO JUNIOR, S.V., (Ed.). *Técnicas de caracterização de polímeros*. São Paulo: Artliber, 2004. p.209-228.

MEDEIROS, J.T.N. – Fadiga de contato de discos metálicos não-conformes submetidos a ensaio a seco de rolamento cíclico; Tese de doutorado apresentada a Escola Politécnica em São Paulo, para obtenção do título de Doutor em Engenharia, 2002. 2 Vol.;

MYSHKIN, N.K., PETROKOVETS, M.I. AND CHIZHIK, S.A. – Simulation of real contact in tribology. *Tribology International*. 31, pp. 79–86, (1998).

NASCIMENTO, I.V.I., SILVA, L.V., MEDEIROS, J.S., LIMA DA SILVA, R.C., MEDEIROS, J.T.N. – Sphere-Plan Contact of Metal-Polymer: Hertz Model x Experiment. 20th International Congress of Mechanical Engineering November 15-20, 2009, Gramado, RS, Brazil.

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

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.

PIHTILI, H., CANPOLAT, N. – Investigating of Surface Roughness and Capability of Being Drilled of Different Reinforced Composite Materials, *Journal of Composite Materials*, Volume 43 Issue 19, 2070-2080, 2009.

RABINOWICZ, E. 1995. *Friction and Wear of Materials*, 2nd ed. John Wiley & Sons, New York.

RADI, P.A., SANTOS, L.V., HAYECK, L.F.F.G.M.; MILAN, J.C.G., FRANCO, S.D. – Influência dos óxidos sobre o desgaste de um aço rápido para cilindros de laminação a quente, 2008;

RAIF SAKIN, IRFAN AY, RAMAZAN YAMAN – An investigation of bending fatigue behavior for glass-fiber reinforced polyester composite materials, *Materials and Design* 29 (2008) p. 212-217.

RAM, A. – *Fundamentals of Polymers Engineering*. Library of Congress Cataloging-in-Publication Data. (1997) 237p;

RAY, D., SARKAR, B.K., RANA, A.K. AND BOSE N.R. (2001). The Mechanical Properties of Vinylester Resin Matrix Composites Reinforced with Alkali-Treated Jute Fibers, *Composites A*, 32: 119—127.

RISSON, P., CARVALHO, G.A., VIEIRA, S.L., ZATTERA, M.Z. e ADEMIR J. – Reaproveitamento de Resíduos de Laminados de Fibra de Vidro na Confecção de Placas Reforçadas de Resina Poliéster, *Polímeros: Ciência e Tecnologia* - Jul/Sel – 98, p. 89-92.

ROSS, S.; EVANS, D. The environmental effect of reusing and recycling a plastic-based packaging system. *Journal of Cleaner Production*, 11, 561-571 (2003).

SANTNER, E. & CZICHOS, H. Tribology of polymers. *Tribology International*, vol. 22, no 2, p 103-109, 1989;

SERBINO E. M. – Um estudo dos mecanismos de desgaste em disco de freio automotivo ventilado de ferro fundido cinzento perlítico com grafita lamelar, São Paulo, 2005;

SHI, G., ZHANG, M.Q., RONG, M.Z., WETZEL, B. AND FRIEDRICH, K. – Friction and Wear of low nanometer  $\text{Si}_3\text{N}_4$  filled epoxy composites. *Wear*, Vol. 254, pp. 784-796, (2003).

SIERROS, K.A., KUKUREKA, S.N. – Tribological investigation of thin polyester substrates for displays. *Wear*, 263, 992–999 (2007).

SILVA, C.H. Degradação de UHMWPE e de POM devido à ação tribológica contra aço inoxidável e alumina. Tese de doutorado apresentada a Escola Politécnica de São Paulo para a obtenção do título de Doutor em Engenharia, 2003.

SILVA, L.V.; AMICO, S.C. – Desenvolvimento de Pesquisa nas Áreas de Materiais Compósitos utilizando como carga resídua de Poliéster/Fibra de vidro. Trabalho de conclusão de curso apresentado à UFRN, p.12-14, 2009.

STACHOWIAK, G.W.; BATCHELOR, A.W. – *Engineering Tribology*, 1996.

STRONG, A. BRENT *Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods, and Applications*. Dearborn, SME – Society of manufacturing Engineers, 2008. 627 p. 2nd Ed.

THE EUROPEAN UP/VE RESIN ASSOCIATION – Disponível em <http://www.upresins.org/upload/documents/webpage/safety-guidelines/english/guide-12.pdf>, Acesso em: 12/01/2011

TONELA, M.V.M., CASIRAGH, D., FREIRE, E., VIEIRA, C.A.B., ZENI, M., ZATTERA, A.J. – Avaliação das propriedades de compósitos utilizando resíduos de fibreglass. Departamento de Engenharia Química da UCS – DENQ e Departamento de Física e Química da UCS – DEFQ, Programa de Pós-Graduação em Materiais (PGMAT). 9 Congresso Brasileiro de Polímeros (2007).

WENDLANDT, W.W. *Thermal analysis*. 3.ed. New York: John Wiley & Sons, 1986. p.1. (Chemical analysis, v.19).

WETTON, R.E. – *Developments in Polymer Characterization*; Dawkins, J.V., ed.; Elsevier Applied Sci. Publishers: London, 1986, p. 179.

WILLIAMS, J.– *Engineering Tribology*, Cambridge University Press, New York, 2005.

WU, S. – *Polymer Interface and Adhesion*, Marcel Dekker Inc., New York, 1982.

WUNDERLICH, B. – *Thermal Characterization of Polymer Materials*; Turi, E. A., ed.; 2nd.ed., Academic Press Inc.: New York, 1997, vol. 1, p. 305.

XIAO-LIN XIE, QING-XI LIU, ROBERT KWOK-YIU LI, XING-PING ZHOUA, QING-XIN ZHANG, ZHONG-ZHEN YU, YIU-WING MAI – Rheological and mechanical

properties of PVC/CaCO<sub>3</sub> nanocomposites prepared by in situ polymerization, *Polymer* 45 (2004) p. 6665–6673

XU, Y.M. AND MELLOR, B.G. – The effect of fillers on the wear resistance of thermoplastic polymeric coatings. *Wear*, 251, (1-12), 1522-1531 (2001).

YOUSIF, B.F. and EL-TAYEB, N.S.M. – Wear and friction characteristics of CGRP composite under wet contact condition using two different test techniques, *Wear*, Vol. 265, p. 856–864 (2008).

YOUSIF, B.F.; LAU, S.T.W. AND MCWILLIAM, S. Polyester composite based on betelnut fibre for tribological applications, *Tribology International*, Vol. 43, Issues 1-2, January-February 2010, pp. 503-511.

ZHANG, H., ZHANG, Z., FRIEDRICH, K. AND EGER, C.: Property improvements of in situ epoxy nanocomposites with reduced interparticle distance at high nanosilica content. In: *Acta Materialia*. 54, p. 1833 – 1842 (2006).

ZHANG, M.Q., RONG, M.Z., YU, S.L., WETZEL, B. AND FRIEDRICH, K., Effect of particle surface treatment on the tribological performance of epoxy based nanocomposites, *Wear* **253** (2002), pp. 1086–1093.

ZHANG, Z., BREIDT, C., CHANG, L. AND FRIEDRICH, K. – Wear of PEEK composites related to their mechanical performances, *Tribology International* 37, pp. 271–277 (2004).

ZILBERMAN, S., PERSSON, B.N.J. – Adhesion between elastic bodies with rough surfaces. *Solid State Communications*, Julich, n, p.173-177, 19 abr. 2002. Bianual.

ZUM GAHR, K.H. – Microstructure and Wear of Materials. Tribology Series 10, Institute of Materials Technology, University of Siegen, Siegen, Federal Republic of Germany, Elsevier 1987.