

PEDRO HENRIQUE LOURENÇO PERES

**IDENTIFICAÇÃO DE MECANISMOS DE DESGASTE EM
CABOS POLIMÉRICOS DE ANCORAGEM NAVAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Mecânica.

Orientadora: Henara Lillian Costa Murray

Coorientador: Carlos Eduardo Marcos Guilherme

Rio Grande

Abril de 2022

Ficha Catalográfica

P437i Peres, Pedro Henrique Lourenço.
Identificação de mecanismos de desgaste em cabos poliméricos de ancoragem naval / Pedro Henrique Lourenço Peres. – 2022.
79 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Rio Grande/RS, 2022.

Orientadora: Dra. Henara Lillian Costa Murray.

Coorientador: Dr. Carlos Eduardo Marcos Guilherme.

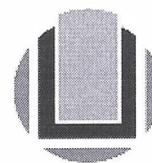
1. Desgaste 2. Poliéster 3. Poliamida 4. Cabos de ancoragem
5. Atmosfera salina I. Murray, Henara Lillian Costa II. Guilherme, Carlos Eduardo Marcos III. Título.

CDU 627

Catálogo na Fonte: Bibliotecário José Paulo dos Santos CRB 10/2344



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG
ESCOLA DE ENGENHARIA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
PPMec



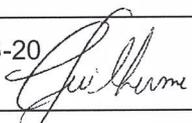
Ata nº **8/2022** da Defesa de Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande - FURG. Aos dois dias do mês de maio de dois mil e vinte e dois, foi instalada a Banca de Defesa de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, às quinze horas e trinta minutos, online via web conferência, a que se submeteu o mestrando Pedro Henrique Lourenço Peres, nacionalidade brasileira, dissertação ligada a Linha de Pesquisa simulação e controle de processos de fabricação, com o seguinte título: **IDENTIFICAÇÃO DE MECANISMOS DE DESGASTE EM CABOS POLIMÉRICOS DE ANCORAGEM NAVAL**. Referendada pela Câmara Assessora do Curso, os seguintes Professores Doutores: Henara Lillian Costa Murray, Carlos Eduardo Marcos Guilherme, Kleber Eduardo Bianchi, Lúcia Vieira sob a presidência da Professora Henara Lillian Costa Murray. Analisando o trabalho, os Professores da Banca Examinadora o consideraram:

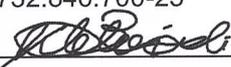
1. Henara Lillian Costa Murray: Aprovado
2. Carlos Eduardo Marcos Guilherme: Aprovado
3. Kleber Eduardo Bianchi: Aprovado
4. Lúcia Vieira: Aprovado

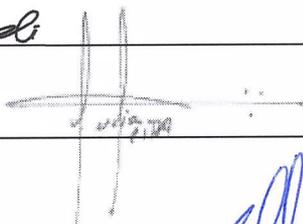
Foi concedido um prazo de 30 dias para o candidato efetuar as correções sugeridas pela Comissão Examinadora (anexo) e apresentar o trabalho em sua redação definitiva, sob pena de não expedição do Diploma. A ata foi lavrada e vai assinada pelos membros da Comissão.

Assinaturas:

1. 

CPF: 847.359.106-20
2. 

CPF: 732.846.700-25
3. 

CPF: 440.783.230-49
4. 

CPF: 102.932.288-09

Pedro Henrique Lourenço Peres: 

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais, Fábio Trifonas Peres (in memoriam) e Simoni Lourenço Peres e à minha vó Gilca Borges Lourenço.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente aos meus familiares que sempre estiveram ao meu lado apoiando e incentivando a conclusão deste trabalho;

À minha esposa Ana Paula, pelo incentivo e paciência dados à realização deste trabalho;

Aos meus amigos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desta dissertação;

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPMEC) e à Universidade Federal do Rio Grande (FURG) por proporcionarem a realização do curso do Mestrado em Engenharia Mecânica e por todo o conhecimento adquirido;

Em especial à Prof. Dr. Henara Lilian Costa Murray pela disponibilidade em ajudar, por toda a atenção, dedicação e orientação passadas durante as etapas realizadas deste trabalho e pela confiança em mim depositada;

À equipe do Laboratório POLICAB pelo suporte e disponibilidade no uso dos equipamentos do laboratório;

Ao Centro de Microscopia Eletrônica da Zona Sul (CEME-SUL), pelo apoio técnico e laboratorial na coleta de imagens no Microscópio Eletrônico de Varredura.

RESUMO

Os cabos de fibra sintética ganharam espaço na área marítima, com grande utilização devido às suas vantagens e aplicações, fazendo-se necessário que possuam excelente desempenho durante sua vida útil. Entretanto, existem alguns efeitos mecânicos que influenciam na degradação do material, particularmente causando o seu desgaste. Este estudo analisa o quanto o desgaste entre os monofilamentos que compõem o cabo polimérico multifilamento (“*yarn-on-yarn*”) impacta na resistência mecânica e na ruptura da fibra sintética. Particular ênfase foi dada neste trabalho aos mecanismos de desgaste em diferentes condições atmosféricas. O procedimento envolveu a realização de ensaios de desgaste *yarn-on-yarn* em dois tipos de fibras (poliéster e poliamida) sob diferentes cargas de tração e em atmosferas de trabalho variadas (seca, úmida e salina). Para o cabo de poliéster, analisou-se também o efeito do uso prévio do cabo no seu desgaste e resistência mecânica (condições virgem e usado). As regiões tanto desgastadas quanto não desgastadas durante os ensaios foram avaliadas num microscópio eletrônico de varredura (MEV) com o intuito de avaliar os mecanismos de desgaste que atuam no processo. Nos monofilamentos desgastados, identificou-se que os mecanismos de desgaste puderam ser caracterizados principalmente como delaminação e adesão. Percebeu-se que os ensaios em meios úmido e salino tiveram melhores desempenhos quando comparados aos ensaios em atmosfera seca. Acredita-se que além do meio aquoso conferir melhor transferência de calor da zona de enlace, o mesmo pode contribuir para a formação de um filme protetor nos monofilamentos.

Palavras Chaves: Desgaste, poliéster, poliamida, cabos de ancoragem, atmosfera salina.

ABSTRACT

The use of synthetic fiber cables has substantially increased in the marine area due to their advantages and wide application, making it necessary that they have excellent performance during their useful life. However, there are some mechanical effects that influence the degradation of the material, particularly causing its wear. This study analyzes how the wear between the monofilaments that compose the multifilament polymeric cable (“yarn-on-yarn”) impacts the mechanical strength and the rupture of the synthetic fiber. Particular emphasis was given in this work to wear mechanisms under different atmospheric conditions. The procedure involved carrying out yarn-on-yarn wear tests on two types of fibers (polyester and polyamide) under different tensile loads and environments (dry, wet and saline). For the polyester cable, the effect of the previous use of the cable on its wear and mechanical strength (virgin and used conditions) was also analyzed. The regions both worn and not worn during the tests were evaluated in a scanning electron microscope (SEM) in order to evaluate the wear mechanisms that act on the process. In the worn monofilaments, the wear mechanisms were mainly delamination and adhesion. It was noticed that the tests in humid and saline environments had better performances when compared to the tests in dry atmosphere. It is believed that in addition to the aqueous medium providing better heat transfer from the lace zone, it can contribute to the formation of a protective film on the monofilaments.

Keywords: Wear, polyester, polyamide, anchor cables, saline atmosphere.

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	14
OBJETIVOS.....	17
Objetivo Geral	17
Objetivos Específicos.....	17
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1. Cabos poliméricos	18
2.1.1. Definição.....	18
2.1.2. Informações gerais sobre estrutura química e aplicações de polímeros.....	19
2.2. Comportamento mecânico de cabos sintéticos de ancoragem.....	23
2.3. Degradação em cabos sintéticos.....	25
2.4. Desgaste de polímeros	26
2.5. Ensaio de desgaste fio contra fio em multifilamentos (<i>yarn-on-yarn</i>).....	32
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	35
3.1. Materiais ensaiados	35
3.2. Ensaio de título.....	37
3.3. Ensaio de tração	38
3.4. Ensaio de desgaste fio-contra-fio	39
3.4.1. Descrição do equipamento	39
3.4.2. Preparação dos corpos de prova.....	40
3.4.3. Ajustes dos parâmetros e condições de ensaio	41
3.5. Avaliação dos mecanismos de desgaste	42
4. Resultados e discussões	44
4.1. Força de Ruptura estática dos materiais.....	44
4.2. Ensaio de título.....	45
4.3. Comportamento perante aos ensaios de desgaste	45
4.4. Verificação da interrupção de ciclos	48
4.5. Mecanismos de desgaste nos cabos multifilamentos por MEV.....	49
4.5.1. PET B carga 4%	50
4.5.2. Mecanismos de desgaste Pet B carga 6%	52
4.5.3. Cabo usado de poliéster (PET A) carga 4% <i>Ybl</i>	54
4.5.4. Mecanismos de desgaste PET A carga 6% <i>Ybl</i>	57
4.5.5. Mecanismos de desgaste PA 4% <i>Ybl</i>	59
5. CONCLUSÕES.....	68

6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	70
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71

Lista de figuras

Figura 1. Composição de um cabo sintético	18
Figura 2. Sistema de ancoragem de plataforma do tipo (a) catenária (b) taut leg	19
Figura 3. Sistema de reboque de um navio	19
Figura 4. Classificação dos polímeros em função de sua estrutura molecular: (a) cadeia linear, (b) ramificações e (c) cadeia com ligações cruzadas	20
Figura 5. Estrutura química do Poliéster	21
Figura 6. Molécula de poliamida	22
Figura 7. Diagramas tensão-deformação esquemáticos para diferentes polímeros.....	24
Figura 8 . Forma de atuação da partícula do desgaste por abrasão: (a) asperidades duras em uma das superfícies (b) partículas abrasivas livres entre as duas superfícies (c) partículas abrasivas engastadas numa das superfícies.	27
Figura 9. Mecanismo de delaminação proposto por Suh: (a) alisamento da superfície do material de menor dureza (b) acumulação de deformação abaixo da superfície (c) formação de trincas sub-superficiais (d) formação de uma partícula com a forma de uma lâmina. Mecanismo de adesão por delaminação.	29
Figura 10. Esquema do ensaio de desgaste entre fios em cabos multifilamentos.	33
Figura 11. Posição inicial do multifilamento.	33
Figura 12. Organograma do trabalho.....	35
Figura 13. Material PET A: (a) Cabo de ancoragem já ensaiado, (b) amostra retirada do cabo.	36
Figura 14. Cabo PET B: (a) cabo como recebido; (b) traçado do cabo virgem; (c) amostra retirada do cabo.....	37
Figura 15. Máquina de tração utilizada, modelo Emic DL20000.....	39
Figura 16. Sistema estático do equipamento de desgaste fio-contra-fio	40
Figura 17. Corpo de prova para ensaio de desgaste	41

Figura 18. Ciclos de ruptura para ensaios de desgaste sob carga de 4% do <i>Ybl</i>	47
Figura 19. Ciclos de ruptura para ensaios de desgaste sob carga de 6% do <i>Ybl</i>	47
Figura 20. Superfícies dos filamentos após ensaios de desgaste em PET B 4% <i>Ybl</i> atmosfera seca: (a) fora do enlace; (b) enlace interrupção em 1/3; (c) enlace interrupção em 2/3; (d) detalhe região fora do enlace; (e) detalhe região de enlace interrupção em 1/3 do total de ciclos; (f) detalhe região de enlace interrupção em 2/3.	50
Figura 21. Superfícies dos filamentos após ensaios de desgaste em PET B 4% <i>Ybl</i> atmosfera úmida: (a) fora do enlace; (b) enlace interrupção em 1/3; (c) enlace interrupção em 2/3; (d) detalhe região fora do enlace; (e) detalhe região de enlace interrupção em 1/3 do total de ciclos; (f) detalhe região de enlace interrupção em 2/3.	51
Figura 22. Superfícies dos filamentos após ensaios de desgaste em PET B 4% <i>Ybl</i> atmosfera salina: (a) fora do enlace; (b) enlace interrupção em 1/3; (c) enlace interrupção em 2/3; (d) detalhe região fora do enlace; (e) detalhe região de enlace interrupção em 1/3 do total de ciclos; (f) detalhe região de enlace interrupção em 2/3.	52
Figura 23. Superfícies dos filamentos após ensaios de desgaste em PET B 6% <i>Ybl</i> atmosfera seca: (a) fora do enlace; (b) enlace interrupção em 1/3; (c) enlace interrupção em 2/3; (d) detalhe região fora do enlace; (e) detalhe região de enlace interrupção em 1/3 do total de ciclos; (f) detalhe região de enlace interrupção em 2/3.	53
Figura 24. Superfícies dos filamentos após ensaios de desgaste em PET B 6% <i>Ybl</i> atmosfera úmida: (a) fora do enlace; (b) enlace interrupção em 1/3; (c) enlace interrupção em 2/3; (d) detalhe região fora do enlace; (e) detalhe região de enlace interrupção em 1/3 do total de ciclos; (f) detalhe região de enlace interrupção em 2/3.	53
Figura 25. Superfícies dos filamentos após ensaios de desgaste em PET B 6% <i>Ybl</i> atmosfera salina: (a) fora do enlace; (b) enlace interrupção em 1/3; (c) enlace interrupção em 2/3; (d) detalhe região fora do enlace; (e) detalhe região de enlace interrupção em 1/3 do total de ciclos; (f) detalhe região de enlace interrupção em 2/3.	54

Figura 26. Superfícies dos filamentos após ensaios de desgaste em PET A 4% *Ybl* atmosfera seca: (a) fora do enlace; (b) enlace interrupção em 1/3; (c) enlace interrupção em 2/3; (d) detalhe região fora do enlace; (e) detalhe região de enlace interrupção em 1/3 do total de ciclos; (f) detalhe região de enlace interrupção em 2/3. 55

Figura 27. Superfícies dos filamentos após ensaios de desgaste em PET A 4% *Ybl* atmosfera úmida: (a) fora do enlace; (b) enlace interrupção em 1/3; (c) enlace interrupção em 2/3; (d) detalhe região fora do enlace; (e) detalhe região de enlace interrupção em 1/3 do total de ciclos; (f) detalhe região de enlace interrupção em 2/3. 56

Figura 28. Superfícies dos filamentos após ensaios de desgaste em PET A 4% *Ybl* atmosfera salina: (a) fora do enlace; (b) enlace interrupção em 1/3; (c) enlace interrupção em 2/3; (d) detalhe região fora do enlace; (e) detalhe região de enlace interrupção em 1/3 do total de ciclos; (f) detalhe região de enlace interrupção em 2/3. 57

Figura 29. Superfícies dos filamentos após ensaios de desgaste em PET A 6% *Ybl* atmosfera seca: (a) fora do enlace; (b) enlace interrupção em 1/3; (c) enlace interrupção em 2/3; (d) detalhe região fora do enlace; (e) detalhe região de enlace interrupção em 1/3 do total de ciclos; (f) detalhe região de enlace interrupção em 2/3. 58

Figura 30. Superfícies dos filamentos após ensaios de desgaste em PET A 6% *Ybl* atmosfera úmida: (a) fora do enlace; (b) enlace interrupção em 1/3; (c) enlace interrupção em 2/3; (d) detalhe região fora do enlace; (e) detalhe região de enlace interrupção em 1/3 do total de ciclos; (f) detalhe região de enlace interrupção em 2/3. 58

Figura 31. Superfícies dos filamentos após ensaios de desgaste em PET A 6% *Ybl* atmosfera salina: (a) fora do enlace; (b) enlace interrupção em 1/3; (c) enlace interrupção em 2/3; (d) detalhe região fora do enlace; (e) detalhe região de enlace interrupção em 1/3 do total de ciclos; (f) detalhe região de enlace interrupção em 2/3. 59

Figura 32. Superfícies dos filamentos após ensaios de desgaste em PA 4% *Ybl* atmosfera seca: (a) fora do enlace; (b) enlace interrupção em 1/3; (c) enlace interrupção em 2/3; (d) detalhe região fora do enlace; (e) detalhe região

de enlace interrupção em 1/3 do total de ciclos; (f) detalhe região de enlace interrupção em 2/3. 60

Figura 33. Superfícies dos filamentos após ensaios de desgaste em PA 4% *Ybl* atmosfera úmida: (a) fora do enlace; (b) enlace interrupção em 1/3; (c) enlace interrupção em 2/3; (d) detalhe região fora do enlace; (e) detalhe região de enlace interrupção em 1/3 do total de ciclos; (f) detalhe região de enlace interrupção em 2/3. 60

Figura 34. Superfícies dos filamentos após ensaios de desgaste em PA 4% *Ybl* atmosfera salina: (a) fora do enlace; (b) enlace interrupção em 1/3; (c) enlace interrupção em 2/3; (d) detalhe região fora do enlace; (e) detalhe região de enlace interrupção em 1/3 do total de ciclos; (f) detalhe região de enlace interrupção em 2/3. 61

Figura 35. Superfícies dos filamentos após ensaios de desgaste em PA 6% atmosfera úmida: (a) fora do enlace; (b) enlace interrupção em 1/3; (c) enlace interrupção em 2/3; (d) detalhe região fora do enlace; (e) detalhe região de enlace interrupção em 1/3 do total de ciclos; (f) detalhe região de enlace interrupção em 2/3. 62

Figura 36. Superfícies dos filamentos após ensaios de desgaste em PA 6% atmosfera salina: (a) fora do enlace; (b) enlace interrupção em 1/3; (c) enlace interrupção em 2/3; (d) detalhe região fora do enlace; (e) detalhe região de enlace interrupção em 1/3 do total de ciclos; (f) detalhe região de enlace interrupção em 2/3. 63

Figura 37. Exemplos de ocorrência do mecanismo de adesão em PA: (a) a seco 4% *Ybl*, 1/3, elétrons secundários; (b) a seco 4% *Ybl*, 1/3, elétrons retroespalhados; (c) PA atmosfera salina 6% *Ybl*, 2/3 elétrons secundários; (d) espectros EDS de pontos selecionadas em (c). 64

Figura 38. Exemplo de análise de EDS em regiões onde ocorreu delaminação para um cabo PET B, 6% *Ybl* em 1/3, atmosfera úmida: (a) pontos selecionados na imagem MEV; (b) espectros de EDS. 64

Lista de Tabelas

Tabela 1. Dados ensaio de tração	44
Tabela 2. Dados ensaio de título	45
Tabela 3. Dados de peso para tensionamento	45
Tabela 4. Dados de ruptura do ensaio de desgaste	46
Tabela 5 - Ciclos de interrupção	49

Lista de abreviaturas

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM - American Society for Testing and Materials

BSE - Elétrons Retroespalhados

CEME SUL – Centro de Microscopia Eletrônica do Sul

CI – Cordage Institute

CLP – Controlador Lógico Programável

CP – Corpo de Prova

DIN - Deutsches Institut für Normung

EDS - Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios-X

FURG –Universidade Federal do Rio Grande

MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura

NBR – Normal Brasileira Regulamentadora

PA – Poliamida virgem

PET A – Polietileno cabo usado

PET B – Polietileno cabo virgem

POLICAB – Laboratório de Análises de Tensões

RPM – Rotação Por Minuto

SE – Elétrons Secundários

Ybl - Yarn Break Load

Lista de símbolos

C - comprimento da amostra

K - constante de medição de título

N - desvio padrão

P - massa do multifilamento

T - título

1. INTRODUÇÃO

Cerca de 260 milhões de toneladas de polímeros são produzidas anualmente a partir de matérias-primas vindas do petróleo [HUNDERTMARK, 2018], que apresentam a capacidade de substituir metais, cerâmicos e materiais naturais em diversos ramos como: domésticos, comerciais, industriais, aeroespaciais e principalmente navais [PITT, 2011].

Há mais de duas décadas, os materiais poliméricos vêm substituindo os cabos de aço em operações marítimas, pois oferecem ao operador maior segurança. Em caso de sobrecarga do cabo, o rompimento do mesmo ocorre de forma diferente em cada um dos sub-cabos, portanto o efeito hélice existente nos cabos de aço não é observado neste tipo de material. Além disso, são mais leves, flutuam na água, suportam altas cargas e seu curso se torna inferior devido ao menor tempo de duração das manobras e de sua durabilidade. Os cabos de materiais poliméricos possuem melhor razão entre diâmetro e força suportada, o que resulta num melhor desempenho durante as manobras [ROBERTS, 2002].

Além de serem utilizados em aplicações marítimas os cabos sintéticos atuam em atividades de risco, como içamentos e reboques, ganhando espaço também em práticas esportivas como escalada e alpinismo, reduzindo a ocorrência de acidentes, além de facilitarem o transporte e a instalação [MCKENNA ET AL., 2004].

A poliamida, um dos primeiros polímeros sintetizados, substituiu as fibras naturais usadas nos cabos utilizados por soldados para escalar montanhas na Segunda Guerra Mundial por causa de seu desempenho mecânico. Outros polímeros como o poliéster surgiram nas cordoarias e ganharam espaço devido às suas excelentes propriedades mecânicas [MCKENNA ET AL., 2004].

Embora esses cabos possuam excelentes qualidades, quando aplicados em condições severas em ambiente marinho, eles estão sujeitos a danos em função de desgaste, fluência, cortes, compressão em guincho de reboque, torção, cargas cíclicas de impacto e combinadas, entre tantas outras avarias que podem levar à redução da sua vida útil. Ainda que todas estas formas de dano

aconteçam em conjunto quando o cabo está em operação, é comum que eles sejam estudados separadamente em busca de soluções e melhorias para futuros projetos.

Dentre as possíveis formas de dano aos cabos, a mais severa entre elas por ser considerada o desgaste entre os fios do cabo, o qual em conjunto com outros esforços mecânicos na superfície externa do cabo, podem reduzir em até 40% a capacidade de força a ser suportada pelo mesmo [ROBERTS, 2002]. Também podem levar a uma redução de carga residual e a um potencial rompimento do mesmo, devido ao carregamento excessivo nos filamentos remanescentes [HERDUIN, 2015].

Isso ocorre porque, quando utilizados em navios atracados, os cabos permanecem enrolados às buzinhas de atracação e sob tração causadas pela influência do empuxo, vento, ondas e correnteza, podendo causar movimento relativo entre os fios que constituem o cabo, e conseqüentemente contribui a sua degradação. Para avaliar este tipo de desgaste, é comum na literatura a utilização de um ensaio conhecido por “ensaio de abrasão *yarn-on-yarn*” [ASTM D1776, 2007], apesar de tecnicamente não se tratar exatamente de uma situação de desgaste por abrasão, conforme abordado no capítulo de fundamentação teórica.

Apesar de ser amplamente conhecido na literatura o efeito deletério do desgaste entre os fios de cabos multifilamentos, a literatura é muita escassa em informação sobre os mecanismos de desgaste envolvidos, bem como no efeito de parâmetros operacionais neste desgaste. Para saber as conseqüências do ensaio de desgaste *yarn-on-yarn* no seu comportamento mecânico, bem como nos mecanismos de desgaste atuantes, torna-se necessário um profundo conhecimento do sistema tribológico. Este tipo de estudo exige o inter-relacionamento com áreas como a tribologia, a engenharia de superfícies, a ciência dos materiais e o comportamento mecânico dos materiais.

Dentre as condições operacionais que podem influenciar no desgaste entre os multifilamentos durante o uso dos cabos poliméricos, o ambiente pode ser considerado um dos mais importantes, uma vez que a presença de umidade e salinidade são constantes em aplicações de amarração marítima.

Diversos autores realizaram pesquisas e análises relacionadas a polímeros sintéticos em diferentes escopos de trabalho. Tais pesquisas têm mostrado como diferentes meios [CHEN, 2012; POODTS, 2013; COHEN, 1966; RANDHAWA, 2021] e revestimentos dos cabos [NING, 2021] podem influenciar o seu desgaste para diferentes tipos de materiais sintéticos.

Este trabalho visa ensaiar os multifilamentos presentes nos cabos de ancoragem em uma máquina de ensaio fio-contra-fio (*yarn-on-yarn*), em diferentes atmosferas, levando-os à ruptura, de forma a avaliar os mecanismos de desgaste atuantes durante o movimento relativo entre os fios e como estes mecanismos influenciam na vida útil do material. Desta forma, o presente trabalho contribui com a pesquisa acadêmica específica na área de desgaste de cabos poliméricos com testes de desgaste *yarn-on-yarn* que por sua vez avalia o comportamento mecânico de três tipos de multifilamentos (sendo dois poliésteres e uma poliamida). Tal pesquisa envolveu ensaios de tração, título e desgaste, na qual esses dados foram interpretados de forma estatística. Em seguida, foi realizada uma interrupção dos ensaios de ruptura por desgaste em 1/3 e 2/3 da vida útil (em diferentes atmosferas: seca, úmida e salina), na qual a zona de deslizamento do corpo de prova foi levada para caracterização da sua morfologia e composição química em um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), de forma a investigar e interpretar os mecanismos de desgaste atuantes para cada tipo de ensaio de cabo e atmosfera. Neste estudo, foi realizado uma aproximação das áreas afins, para que os principais conhecimentos e ferramentas da tribologia foram usados para explicar os mecanismos de desgastes existentes nos ensaios, correlacionando-os com a literatura.

No primeiro capítulo é apresentado o contexto do assunto deste trabalho, bem como a justificativa que motivou a pesquisa e os objetivos gerais e específicos alcançados.

No segundo capítulo estão reunidas as informações da bibliografia de pesquisas, conceitos básicos e resultados obtidos em trabalhos anteriores relevantes para este estudo. Os temas abordados especificamente nessa revisão envolveram a estrutura química e as aplicações de cabos poliméricos,

suas formas de degradação, aspectos teóricos do desgaste em polímeros e os fundamentos do ensaio de desgaste *yarn-on-yarn*.

O terceiro capítulo descreve detalhadamente a metodologia para alcançar os objetivos propostos no trabalho, a qual envolveu ensaios de tração, ensaios de título, ensaios de desgaste multifilamento e a investigação de mecanismos de desgaste via microscopia eletrônica de varredura (MEV).

No quarto capítulo estão exibidos os resultados obtidos por meio do procedimento metodológico e análise dos dados experimentais, além de uma discussão dos resultados encontrados, procurando-se correlacionar o comportamento mecânico dos cabos poliméricos e os resultados do teste de desgaste *yarn-on-yarn* com os mecanismos de desgaste atuantes nos monofilamentos em diferentes meios de ensaio (seco, úmido e atmosfera salina).

O quinto capítulo apresenta as considerações finais e conclusões.

Finalmente, o sexto capítulo traz sugestões para trabalhos futuros.

OBJETIVOS

Objetivo Geral

Identificar os mecanismos de desgaste atuantes em multifilamentos de cabos poliméricos utilizados em amarrações de sistemas navais sob diferentes condições atmosféricas e como esse desgaste influencia na resistência mecânica dos cabos.

Objetivos Específicos

- Avaliar o efeito da presença de umidade nos mecanismos de desgaste;
- Avaliar o efeito da presença de atmosfera salina nos mecanismos de desgaste;
- Avaliar a evolução dos mecanismos de desgaste em cabos virgens e em cabos já utilizados.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

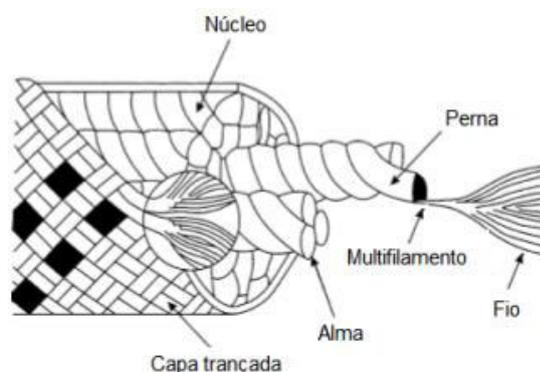
Este capítulo tem por objetivo avaliar as contribuições teóricas que serão utilizadas para a estruturação deste estudo, de forma a estabelecer o estado da arte, bem como auxiliar na discussão dos resultados. As seções relacionam o ordenamento do capítulo, encadeando os assuntos selecionados de acordo com o eixo de segmento da pesquisa.

2.1. Cabos poliméricos

2.1.1. Definição

Um cabo sintético de ancoragem é um produto de multicamadas complexo, fabricado por um entrelaçamento de multifilamentos (composto por centenas de monofilamentos), que formam pernas, que por sua vez, são torcidas e entrelaçadas com outras pernas a fim de formar um sub cabo. O posicionamento de sub cabos paralelamente é envolvido por uma capa de forma a gerar o cabo de ancoragem. Um diagrama genérico de um cabo sintético de ancoragem é mostrado na Figura 1.

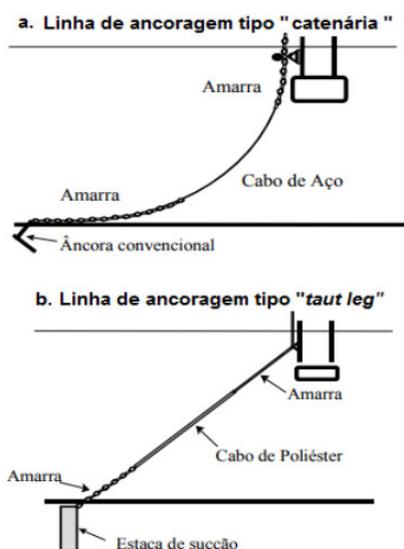
Figura 1. Composição de um cabo sintético



Fonte: McLaren [2006]

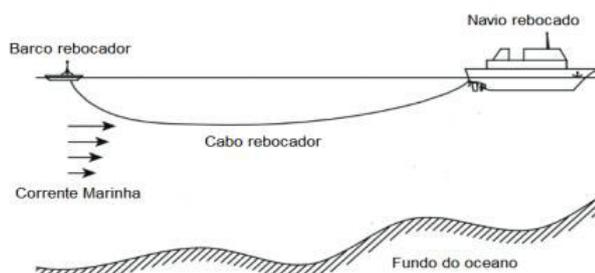
No ramo *offshore*, houve uma substituição do método tradicional do sistema de amarração de plataformas (catenária), por uma geometria *Taut leg* que utiliza uma amarração com cabos sintéticos, conforme Figura 2. Os polímeros sintéticos também são empregados na operação com navios e reboques (Figura 3), a qual submete o cabo a esforços dinâmicos [WANG; 2008].

Figura 2. Sistema de ancoragem de plataforma do tipo (a) catenária (b) taut leg



Fonte: Lacerda [2005]

Figura 3. Sistema de reboque de um navio



Fonte: Wang [2008].

2.1.2. Informações gerais sobre estrutura química e aplicações de polímeros

Os primeiros polímeros foram produzidos em escala industrial em 1933, como materiais alternativos em relação aos materiais convencionais (metais e cerâmicos). Desde então, tem-se observado um contínuo aumento da comunidade de profissionais que trabalham e estudam nesta área [HAGE, 1998]. Os polímeros são constituídos de uma macromolécula, ligado por repetidas unidades chamadas de monômero (meros), unidas por ligações covalentes. Por outro lado, as ligações entre as cadeias (se juntam na parte interna da molécula via ponte de hidrogênio entre as bases nitrogenadas de cada uma delas) são geralmente uniões fracas, por forças de van der Waals. Este monômeros (meros)

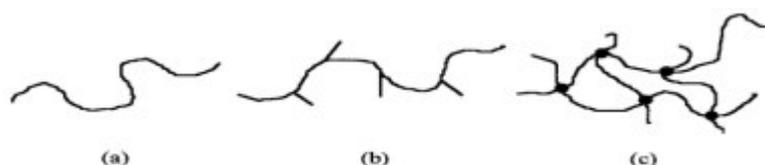
são a matéria prima para produção dos polímeros, ou seja, repetição de várias unidades [CANEVAROLO 2006]. Pode-se classificar os polímeros em três tipos de acordo com a ligação covalente e número médio de monômeros por cadeia: plásticos, borrachas e fibras.

Polímeros podem ser naturais (encontrados na forma crua) ou sintéticos (produzidos na indústria moderna) [MANO, 1999]. O primeiro registro de uso formal de um polímero natural se deu há 3000 anos, onde os chineses, a partir da descoberta de um verniz, extraíam seiva da árvore *Rhus vernicflua* [GORNI, 2003]. Os avanços nos estudos de química orgânica proporcionaram o desenvolvimento de polímeros sintéticos criados em laboratório, capazes de substituir os polímeros naturais tais como couro, madeira, fibra dentre outros.

Os polímeros sintéticos tem propriedades que podem ser modificadas, dessa forma, tendo desempenho superior aos polímeros naturais [CALLISTER, 2008]. Segundo PAOLI [2008], esses materiais têm durabilidade limitada, sendo determinada pela degradação, de acordo com o processo por onde é utilizado, além da degradação alterar as propriedades dos polímeros, como por exemplo, resistência mecânica, dureza e resistência elétrica.

Os polímeros podem ser classificados de acordo com a cadeia molecular, que depende dos grupos funcionais e das condições de polimerização implementadas, como: a) lineares b) ramificada ou, c) ligações cruzadas, conforme Figura 4. Grupos funcionais que merecem destaque nos polímeros comerciais atuais são poliésteres, poliéteres, poliolefinas e poliamidas [BOWER, 2002].

Figura 4. Classificação dos polímeros em função de sua estrutura molecular: (a) cadeia linear, (b) ramificações e (c) cadeia com ligações cruzadas

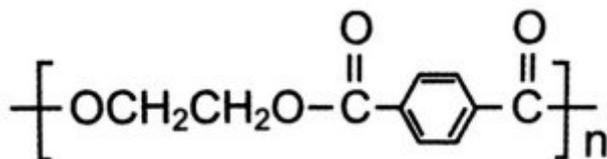


Fonte: Bower [2002].

O poliéster consiste de macromoléculas lineares (conforme Figura 5), cuja cadeia possui 85% (em massa) de matéria-prima à base de p-xileno, que pode

ser obtido por duas diferentes formas de produção: derivados de DMT (dimetil tereftato + monoetilenoglicol) ou à base de ácido PTA (ácido tereftálico puro) + monoetilenoglicol [MANO, 1999].

Figura 5. Estrutura química do Poliéster



Fonte: Mano, 1999 (adaptado).

As fibras de poliéster possuem alta elasticidade e excelente estabilidade dimensional. São termoplásticas, resistentes à ruptura e ao desgaste. Sua solidez em estado úmido é igual à solidez em estado seco e apresentam alta resistência às influências da luz e das condições climáticas, bem como aos insetos nocivos e à formação de bolor. São resistentes aos agentes químicos sintéticos e naturais e são difíceis de tingir além de ter capacidade reduzida de absorver umidade [ARAÚJO, 1986].

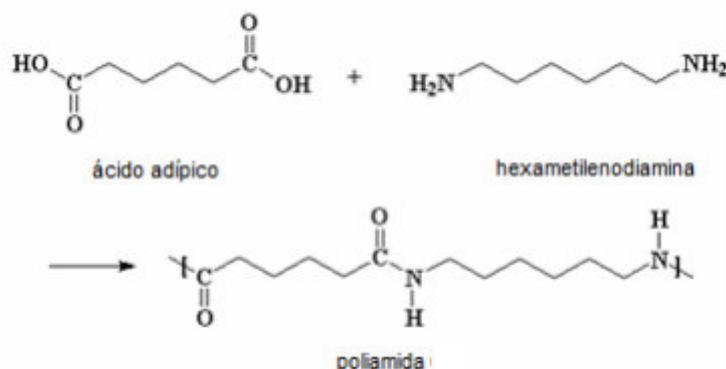
As fibras de poliéster, além de serem elásticas, são muito resistentes à tração e ao desgaste. Quando expostos a luz, aos ácidos e aos solventes são muito estáveis. Além disso, são fáceis de lavar e secam rapidamente. As modernas tecnologias nos segmentos de fiação, malharia, tecelagem e beneficiamento dessas fibras permitem que elas atendam perfeitamente às exigências de diversas aplicações no ramo têxtil, tornando-as uma das mais versáteis fibras têxteis, podendo ser usadas na fabricação de artigos para vestuário, decoração e lar, na indústria automobilística, em artigos de passamanaria e em tecidos técnicos, entre outras aplicações [PALMA, 2003].

O poliéster é um dos materiais mais utilizados em cabos sintéticos para manobras e atracções no ramo naval, pois oferece segurança para o operador, são mais leves, flutuam na água, suportam altas cargas e seu curso se torna inferior devido ao menor tempo de duração das manobras e de sua durabilidade. Além disso, esses cabos possuem uma melhor relação de diâmetro em relação à força suportada, o que resulta em um melhor desempenho durante as manobras [ROBERTS, 2002].

As poliamidas pertencem a uma classe de polímeros muito interessante para aplicações no ramo de engenharia devido à uma combinação de boa resistência química, boa resistência ao desgaste, elevada resistência à tração e flexão, estabilidade dimensional e fácil processamento [KOHAN, 1973]. Poliamidas são segmentos do polietileno separados por unidades de peptídeos (NH-CO), assim sua distribuição espacial é organizada tanto em paralelo como em antiparalelos [DASGUPTA, 1996]. Estes peptídeos permitem ligações intermoleculares entre oxigênio e hidrogênio, dando à poliamida algumas propriedades bastante desejáveis na área de engenharia. Em oposição aos polímeros altamente cristalinos como o polietileno, as poliamidas, que são polímeros semicristalinos, podem ter seu grau de cristalinidade moderado e monitorado em larga escala [HUANG, 2004]. Sua rentabilidade é alto em relação ao mercado competitivo mundial, devido à capacidade de produção de seus monômeros [RADICI, 2001].

A partir de um ácido dicarboxílico (ácido adípico) e uma diamina (hexametileno diamina), ambos por sua vez, possuem seis átomos de carbono cada, ao serem aquecidos a mistura dos compostos elimina a molécula de água entre o grupo de amina e um grupo carboxílico e há formação de uma amina, conforme Figura 6. A reação se repete inúmeras vezes de modo a formar um polímero de cadeia longa chamado de poliamida [KOHAN, 1995].

Figura 6. Molécula de poliamida



Fonte: Kohan, 1995.

2.2. Comportamento mecânico de cabos sintéticos de ancoragem

Quando um cabo sintético de ancoragem se encontra em operação, está sujeito a diferentes solicitações mecânicas como: fratura, fadiga, fluência, desgaste e degradação do material devido aos agentes agressivos do meio marinho (radiação ultravioleta, água salgada, temperatura, etc.) [OLIVIER, 2007]. As falhas são originadas devido a vários fatores tais como: sobrecargas, fadiga mecânica, impacto, corrosão, envelhecimento do material, desgaste entre diferentes camadas ou abrasão externa [FUKU, 1992]. Ukooa [2001]; Lépure, [2003] listaram alguns motivos que podem levar ao colapso os cabos de ancoragem, dentre eles: ruptura da capa externa, por variáveis não controladas (meio marinho, radiação ultravioleta e luz solar), que permite penetração da água do mar; ruptura por tração devido a sobrecarga; ruptura por fadiga devido a movimento cíclico; curvatura extrema que pode levar à instabilidade durante operação; ruptura por tração durante o desenrolar da bobina; ruptura em terminações e conexões devido a equívoco na instalação; ruptura por fluência, que pode comprometer a selagem dos cabos. Vale ressaltar que na operação destes cabos sintéticos de ancoragem os esforços mecânicos ocorrem simultaneamente, e existem muitas variáveis que não podem ser controladas como ondas, marés e temperatura. Ainda que todos estes esforços aconteçam em conjunto quando o cabo está em operação, cada um deles é estudado separadamente em busca de soluções e melhorias para futuros projetos.

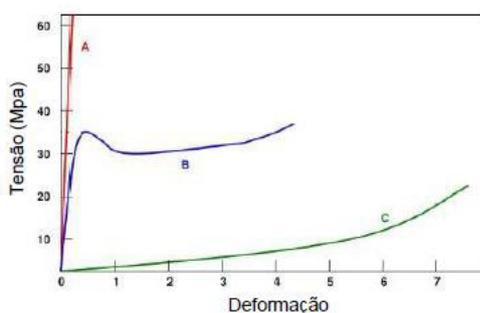
Nos polímeros, quando submetidos a tensão e/ou deformação, o módulo de elasticidade não é definido pela constante de proporcionalidade entre tensão e deformação. As respostas dos polímeros submetidos a solicitações mecânicas são exponenciais e dependentes de fatores estruturais como o procedimento do ensaio e de variáveis externas como temperatura e umidade [PESSAN, 2002].

Para materiais de baixa massa molecular o comportamento mecânico é definido por dois tipos de ideais: líquido viscoso e sólido estático. Num líquido viscoso, dessa forma submetido a tensão e/ou deformação, suas características se tornam irreversíveis na ausência de forças externas. Em compensação, um sólido elástico retorna à sua forma inicial após removido o esforço. Os polímeros se caracterizam por apresentar um comportamento intermediário entre o líquido

viscoso e o sólido elástico, dependendo também da influência da temperatura e do tempo submetido ao esforço. Esta característica se chama viscoelasticidade [PESSAN, 2002; FROLUND, 1996; FERRY, 1960].

As propriedades mecânicas dos polímeros podem ser avaliadas por meio de ensaios estáticos ou dinâmicos, atingindo-se ou não a ruptura do material [CANEVAROLO, 2006]. O ensaio de tração submete o material a um esforço que tende a alongá-lo até sua ruptura. Como mostra a Figura 7 existem três tipos de comportamento para tensão-deformação para materiais poliméricos, sendo que o material A é considerado frágil, o material B é considerado plástico e o material C é considerado como altamente elastomérico [CALLISTER, 2008]. No caso de cabos, a carga de ruptura é comumente chamada de *Yarn Break Load (Yb)*.

Figura 7. Diagramas tensão-deformação esquemáticos para diferentes polímeros



Fonte: Callister [2008]

Ao aplicar-se um gradiente de tensão em um polímero, inicia-se o processo de deformação elástica, em que as interações intermoleculares fazem as macromoléculas se manterem unidas. A partir de um certo valor de tensão, as ligações intermoleculares começam a se romper até provocar o escoamento da cadeia da fase amorfa, ou seja, quebra das ligações da cadeia principal. Dessa mesma forma, a tensão aplicada atinge a barreira potencial para quebrar as ligações químicas. Quando o esforço mecânico ocorre em temperaturas acima da temperatura de amolecimento ou fusão, a quebra das ligações química é favorecida, pois a energia depositada no material na forma de calor é muito alta. O rompimento das ligações químicas que acontece no polímero por emprego de esforço mecânico está relacionado com a quantidade de energia elástica armazenada na macromolécula e o tempo em que ela fica sob esforço [PAOLI, 2008].

2.3. Degradação em cabos sintéticos

Segundo Paoli [2008], a degradação em cordas poliméricas pode ocorrer de diversas formas: térmica, mecânica, ultrassônica, hidrolítica, química, biológica e radioativa. A degradação mecânica caracteriza-se por fraturas microscópicas e macroscópicas nos cabos devido à solicitação mecânica, causada pelas forças atuantes dependendo da sua utilização. Além disso, o autor cita que existem várias formas de explicar a respeito da degradação dos polímeros, conforme o tipo de reações químicas que ocorrem no início e durante o processo de desgaste e pelo processo de iniciação destas reações.

A degradação de polímeros por forma mecânica depende de vários fatores como: tensão mecânica, fenômenos de fratura, como se desenvolve as reações químicas associadas com esforços mecânicos, combinadas ou não com aquecimento simultâneo. Estes fatores modificam quimicamente a estrutura do polímero e dessa forma, responderá à aplicação de uma tensão de acordo com as novas interações intermoleculares, do tempo de aplicação de carga, temperatura e processo que está sendo utilizado. O polímero sofre também modificações químicas quando é colocado em situações de aquecimento, submetido a esforços de cisalhamento, fraturado, moldado e amolecido. As deformações se dão por compressão ou dilatação (ocorrendo a variação de volume), por cisalhamento simples (ocorrendo deformação pela mudança de forma), ou por combinação dos efeitos anteriores (alteração de forma e volume por aplicação simultânea de tensão normal e tensão tangencial) [PAOLI, 2008].

Além da degradação mecânica, quase todo polímero produzido em escala industrial contém algum tipo de contaminante que pode incentivar uma degradação por ataque químico. Estes contaminantes podem ser: resíduos de catalisador ou iniciador, aditivos, impureza do monômero, entre outros. Alguns destes contaminantes não são reativos em atmosfera inerte e em ambiente escuro, mas quando expostos à luz solar e na presença de oxigênio se tornam um pró-degradante. Além dos agentes internos, agentes externos presentes no meio também podem causar degradação química dos polímeros, como por exemplo: ataque químico de óleos lubrificantes, combustíveis ou fluidos hidráulicos em tubos e vedações, migração ou contato de polímeros com óxidos

metálicos, contato com insertos (peças metálicas), ataque químico por poluentes atmosféricos, hidrólise, solução de lavagem e esterilização [PAOLI, 2008].

Acontece em uma ampla gama de ambientes e condições de serviço, limitando a vida útil do material, ocorrendo por fatores externos, conforme o ambiente e modo de utilização, inclusive combinando os mecanismos desses agentes químicos e mecânicos [TURNBULL E WHITE 1994]. Se for mensurável sua severidade, a degradação pode ser superficial, ou seja, altera o aspecto visual do material, ou estrutural, onde alteram-se as propriedades de desempenho do polímero. Dependendo dos mecanismos das reações, é conhecida como degradação sem ou com cisão da cadeia principal do polímero [ROSA, 1996 APUD AGNELLI, 1991].

2.4. Desgaste de polímeros

O comportamento dos materiais quanto à sua resistência ao desgaste é muito complexo. Além do par de material em contato, para mensurar a taxa de desgaste de um sistema tribológico depende de alguns fatores como: da geometria de contato, pressão de contato, rugosidade da superfície, velocidade de deslizamento, condições ambientais (temperatura e umidade), presença e eficácia de qualquer lubrificante e de outros detalhes metodológicos [PAOLI, 2008].

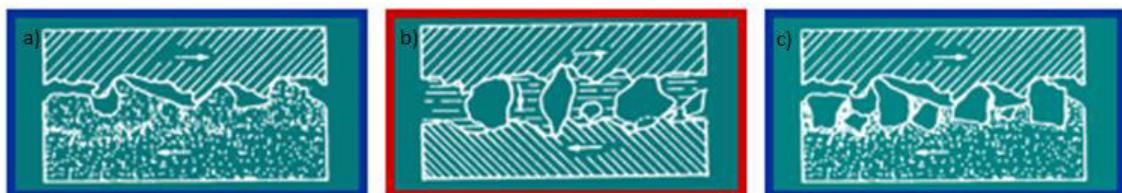
O desgaste pode ocorrer como dano superficial ou perda de material, sendo que os inúmeros termos existentes para descrever estes processos dificultam a discussão sobre o tema [LUDEMA, 1966]. Para Bayer [1994], existem três modos em que o desgaste pode ser classificado. O primeiro diz respeito à aparência dos vestígios de dano, ou seja, fissuras, trincas, polimentos, sulcamentos, cavaco, lascamentos e riscamentos. O segundo envolve os mecanismos físico-químicos que causaram a perda do material, sendo eles: adesão, abrasão, delaminação e oxidação. O terceiro tange às condições onde ocorreu o desgaste, no caso, desgaste lubrificado ou não-lubrificado, desgaste por deslizamento em geral, desgaste por rolamento, desgaste por alta tensão e desgaste em altas temperaturas.

Quando duas superfícies possuem movimento relativo, o desgaste pode ocorrer por mecanismos de abrasão, adesão, fadiga ou oxidação, podendo ocorrer por um ou mais mecanismos simultâneos [ZUM GAHR, 1987]. A norma DIN 50320 explica detalhadamente as características do desgaste físico químico dos materiais: *i.* abrasão: remoção de material por sulcamento, corte, fadiga ou trincamento resultante da presença de asperezas ou partículas duras no contato; *ii.* adesão: formação e posterior rompimento de ligações adesivas interfaciais; *iii.* fadiga: a fadiga mecânica e a posterior formação de trincas em regiões da superfície devido a tensões cíclicas tribológicas que resultam na separação do material; *iv.* reação triboquímica: formação de produtos de reações químicas resultantes da interação química entre os elementos de um tribosistema, iniciada por ação tribológica. Muitas vezes o desgaste triboquímico é designado apenas por oxidação, já que é a condição normalmente mais influente para este mecanismo.

Os danos superficiais causados devido à penetração de asperezas da superfície ou partículas duras de um contra-corpo em uma região considerada mais mole em contatos de deslizamento causa o fenômeno de desgaste por riscamento ou ranhuramento, também conhecido como abrasão ou desgaste abrasivo. Ocorre pela ação da partículas duras (fragmentos de desgaste encruados ou sujidades do ecossistema) entre duas superfícies que estão em movimento relativo ou por estas, estarem engastadas em uma ou nas duas superfícies de contato [ZUM GAHR, 1987].

O desgaste abrasivo é normalmente classificado em 2 ou 3 corpos, quanto a forma de atuação da partícula conforme Figura 8, visto que o abrasivo pode estar livre ou fixo entre as duas superfícies em contato [HUTCHINGS, 2017].

Figura 8 . Forma de atuação da partícula do desgaste por abrasão: (a) asperezas duras em uma das superfícies (b) partículas abrasivas livres entre as duas superfícies (c) partículas abrasivas engastadas numa das superfícies.



Fonte: Burwell (adaptado), 1957.

No que tange ao desgaste dos polímeros, quando existe o deslizamento entre duas superfícies poliméricas, o desgaste normalmente acontece por adesão e/ou fadiga. Porém, quando o contra-corpo é um metal, muitas vezes o mecanismo é a abrasão, mesmo sem a presença de partículas duras livres na interface. Isso ocorre porque para o polímero a rugosidade do metal, que possui dureza bem superior ao polímero, pode funcionar como asperezas duras, levando à formação de sulcos e riscos na superfície do polímero [HUTCHINGS, 2017].

O desgaste por adesão refere-se ao contato e interação entre as asperezas das superfícies quando um contato desliza sobre o outro. Nessa condição, geram-se grandes forças de atração nos pontos de contato da superfície rugosa, que são de caráter covalente, iônico, metálico ou pela forças de Van der Waals. A área de contato é na escala de micrometros, assim desenvolvem-se localmente altas pressões de contato que geram deformações plásticas, adesão e por último se formam em junções localizadas. O deslizamento relativo das superfícies em contato gera a ruptura dessas junções, bem como a transferência de material de uma superfície para outra. Fatores como limpeza da superfície (presença de óxidos ou outros filmes, meio ambiente (ar ou vácuo) e as propriedades físicoquímicas dos materiais deslizantes influenciam na formação e ruptura destas junções. As frações aderidas a uma superfície podem ser convertidos diretamente em resíduos de desgaste ou voltar a superfície inicial [SCHUITEK, 2007].

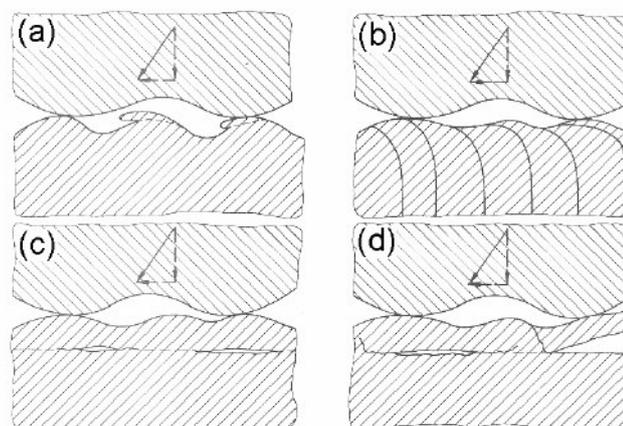
Kayaba [1979] propôs o modelo de transferência adesiva, onde um conjunto de sucessivas trincas se deformam até a separação da cunha do volume do material, gerando uma partícula. Nesse modelo, o contato entre asperezas leva à formação de uma junção, seguida da propagação de uma trinca. Com deslizamentos subsequentes tem-se a formação de uma segunda junção, seguida da propagação de uma nova trinca, até que ocorra a separação da cunha do volume de material por ruptura. Em contra partida, o modelo de Sasada [1984] explica que as partículas de desgaste não são produzidas a partir dos fragmentos desprendidos do material da superfície em deslizamento, mas sim de partículas que se aderem às superfícies e se aglomeram de forma a

ficarem maiores, até que possa ocorrer sua auto remoção do contato, se tornando fragmentos de desgaste.

O desgaste por fadiga de contato é caracterizado pela formação de trincas e conseqüentemente o lascamento do material por carregamento cíclico e repetitivo das superfícies. A falha segue uma orientação, inicia uma deformação elástica, em seguida uma deformação plástica, assim o material sofre um encruamento e por último, forma e propaga trincas. [ZUM GAHR, 1987]

Para Suh [1973], o deslizamento entre duas superfícies pode levar ao mecanismo de delaminação, o qual pode ser resumido em quatro etapas, conforme Figura 9. Durante o contato por deslizamento, carregamentos e descarregamentos cíclicos podem impulsionar a formação de trincas superficiais ou abaixo desta, ocorrendo assim o trincamento e conseqüentemente o arrancamento de um fragmento de material. Conforme a teoria de delaminação, as trincas sub-superficiais tendem a se propagar paralelas à superfície. As partículas de desgaste são formadas quando uma trinca chega à superfície. A degradação por delaminação da superfície se deve à ação conjunta dos outros mecanismos de desgaste. O carregamento cíclico é provocado pela força de atrito na superfície e pela força normal atuante na área de contato, sendo que as asperidades entram e saem do contato de forma cíclica durante o movimento.

Figura 9. Mecanismo de delaminação proposto por Suh: (a) alisamento da superfície do material de menor dureza (b) acumulação de deformação abaixo da superfície (c) formação de trincas sub-superficiais (d) formação de uma partícula com a forma de uma lâmina. Mecanismo de adesão por delaminação.



Fonte: Suh [1973], adaptado.

Alguns trabalhos investigam correlações entre força aplicada, área de contato e rugosidade com o desgaste dos polímeros, interligados com fatores externos como velocidade de desgaste e temperatura, além de verificarem como estes fatores influenciam em ensaios com diferentes tipos de atmosfera. Por exemplo, segundo Ludema [1966], a área de contato de desgaste varia com a taxa de deformação e temperatura de polímeros elastoméricos (borrachas), sendo que quanto maior a força normal, maior a importância das características viscoelásticas do polímero.

Pogacnik [2012] realizou ensaios de desgastes entre materiais poliméricos onde provou que a rugosidade influencia no coeficiente de fricção. Em seus testes provou que as forças de adesão entre superfícies semelhantes causam deformações plásticas ao invés de abrasão, além de detectar fusão de material quando ocorre o deslizamento de superfícies diferentes.

Unal [2004] ensaiou diferentes tipos de materiais poliméricos contra superfícies de aço e concluiu que o coeficiente de atrito diminuiu linearmente com o aumento da pressão normal. Observou ainda que quanto maior a velocidade de deslizamento maior foi a tendência de aumento de temperatura dos polímeros usados.

Watanabe [1986] realizou testes com poliamida contra aço em diferentes velocidades de deslizamento com o objetivo de avaliar os efeitos da temperatura, provando que o atrito máximo aconteceu no pico máximo de temperatura. Quando uma superfície desliza sobre a outra produz um atrito que gera picos de temperatura nas reais áreas de contato. A amplitude da temperatura depende muito da velocidade relativa da superfície e dos tipos de materiais envolvidos e pode alcançar facilmente elevados valores [Zum Gahr, 1987]. Estas podem induzir a ocorrência de reações triboquímicas, levando à formação de compostos químicos superficiais, sendo bem comum a formação de óxidos e/ou hidróxidos. No caso do desgaste de cabos poliméricos multifilamentos (*yarn-on-yarn*), as reações triboquímicas ocorrerão na camada superficial do multifilamento, geralmente conforme exposição do corpo de prova mediante condições mais severas.

Chen et al [2012] realizaram ensaios de desgaste bloco-sobre-anel em misturas de polímeros (*blends*), onde blocos de teflon misturado a diferentes polímeros eram ensaiados contra anéis de aço inoxidável 316. Os autores compararam o coeficiente de atrito em água do mar e água pura, concluindo que o filme formado por água do mar possui efeito lubrificante, mas não explicaram como tal filme é formado.

Os polímeros têm baixo ponto de fusão e baixa condutividade térmica, portanto tendem a concentrar calor na zona de fricção. Dessa forma, a pesquisa de [Ning et al, 2021] sobre revestimento de polímeros com grafeno em testes *yarn-on-yarn* demonstrou que o desempenho em desgaste melhorou com a adição deste tipo de revestimento devido à sua boa condutividade térmica. O mecanismo de falha térmica da fibra do cabo depende do tempo de ensaio e do número de ciclos por segundo (velocidade). Quando se varia a velocidade altera-se a frequência com que ocorre interação entre as superfícies dos filamentos. Para baixas velocidades e cargas, o calor gerado consegue se dissipar e manter a temperatura do fio mais estável. Em contrapartida, com o aumento de carga o calor gerado é maior, não se dissipando o suficiente até o próximo ciclo, assim se concentrando em um núcleo, aumentando a temperatura e gerando falha [Ning et al, 2019]. De forma semelhante, Sheng [2021] explica em testes *yarn-on-yarn* em polímeros que o calor gerado amolece a fibra e causa nodulações que deterioram sua resistência ao desgaste.

Ross [1996] pesquisou sobre o peso molecular da fibra e capacidade de absorção de energia, concluindo que multifilamentos com alto peso molecular (título), baixa tenacidade e altos alongamentos possuem melhores resultados de desgaste fio-contra-fio. O autor identificou que o mecanismo de desgaste que leva à falha do multifilamento se dá a partir de um rasgo e descascamento dos fragmentos superficiais da fibra. Apesar de não terem usado tal nomenclatura, provavelmente estes “descascamentos” são resultados de mecanismos de delaminação, já que em virtude dos baixos valores da relação entre o módulo de elasticidade e a dureza (E/H) dos polímeros é comum a ocorrência de mecanismos de desgaste envolvendo fadiga (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017). Alirezazadeh [2018] desenvolveu uma equação polinomial para calcular força de

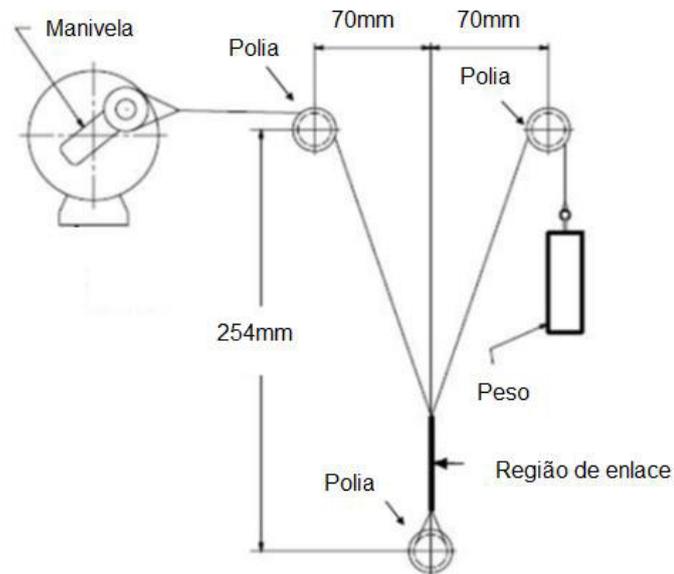
atrito entre fios e concluiu que quanto maior o diâmetro do fio melhores as características de resistência ao desgaste.

Para avaliar o efeito da atmosfera no comportamento mecânico de multifilamentos, Poodts et al [2013] realizaram testes de fadiga em polímeros em ambientes úmidos e secos, concluindo que o material exposto em ambiente de água do mar apresentou maior vida em fadiga, o que foi atribuído à melhor transferência de calor proporcionada pelo ambiente aquático. Cohen [1966] também relata em testes com poliamida a capacidade dos polímeros de absorver água e o surgimento de um filme de lubrificação. Randhawa [2021] realizou testes em multifilamentos compósitos e percebeu que o condicionamento dos multifilamentos com água resultou na melhora da resistência ao desgaste.

2.5. Ensaio de desgaste fio contra fio em multifilamentos (*yarn-on-yarn*)

As normas do *Cordage Institute, CI 1503-99* e *ASTM Standards* [ASTM D1776, 2007] definem as características do ensaio *yarn-on-yarn*. Para simular o desgaste que os fios sofrem, um moto-reductor transmite potência para um sistema que converte o movimento circular do eixo conduzido em movimento linear da massa tensionadora, que é responsável pela tensão no corpo de prova. Essa transformação de movimento é realizada segundo um conjunto de polias responsáveis pelo direcionamento do fio segundo normas citadas anteriormente. Na preparação do Corpo de Prova (CP) as polias direcionam o fio de forma que este sofra um entrelaçamento controlado e que posteriormente, no decorrer dos ensaios, se desgaste conforme a solicitação e ambiente ao qual este for exposto. O equipamento deve consistir de polias superiores centrais e uma polia inferior cujo arranjo produz um ângulo de 34°. O motor impulsiona a manivela e o fio deve ter três voltas completas, produzindo um ângulo de abraçamento ou região de enlace de 1080°, conforme Figura 10.

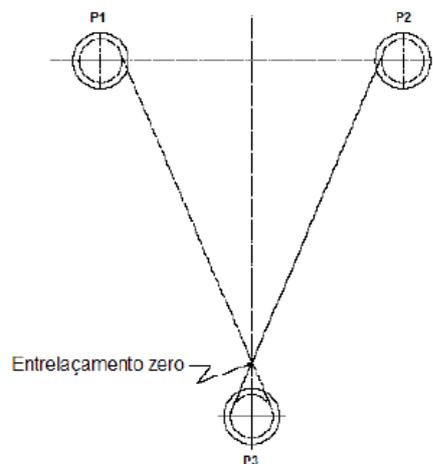
Figura 10. Esquema do ensaio de desgaste entre fios em cabos multifilamentosos.



Fonte: ASTM D1776 [2007] (adaptado)

O posicionamento do corpo de prova é muito importante para realização do ensaio. Segundo a norma, a zona de entrelaçamento no início do ensaio deve ter 1080° , conforme Figura 11.

Figura 11. Posição inicial do multifilamento.



Fonte: ASTM D1776 [2007] (adaptado)

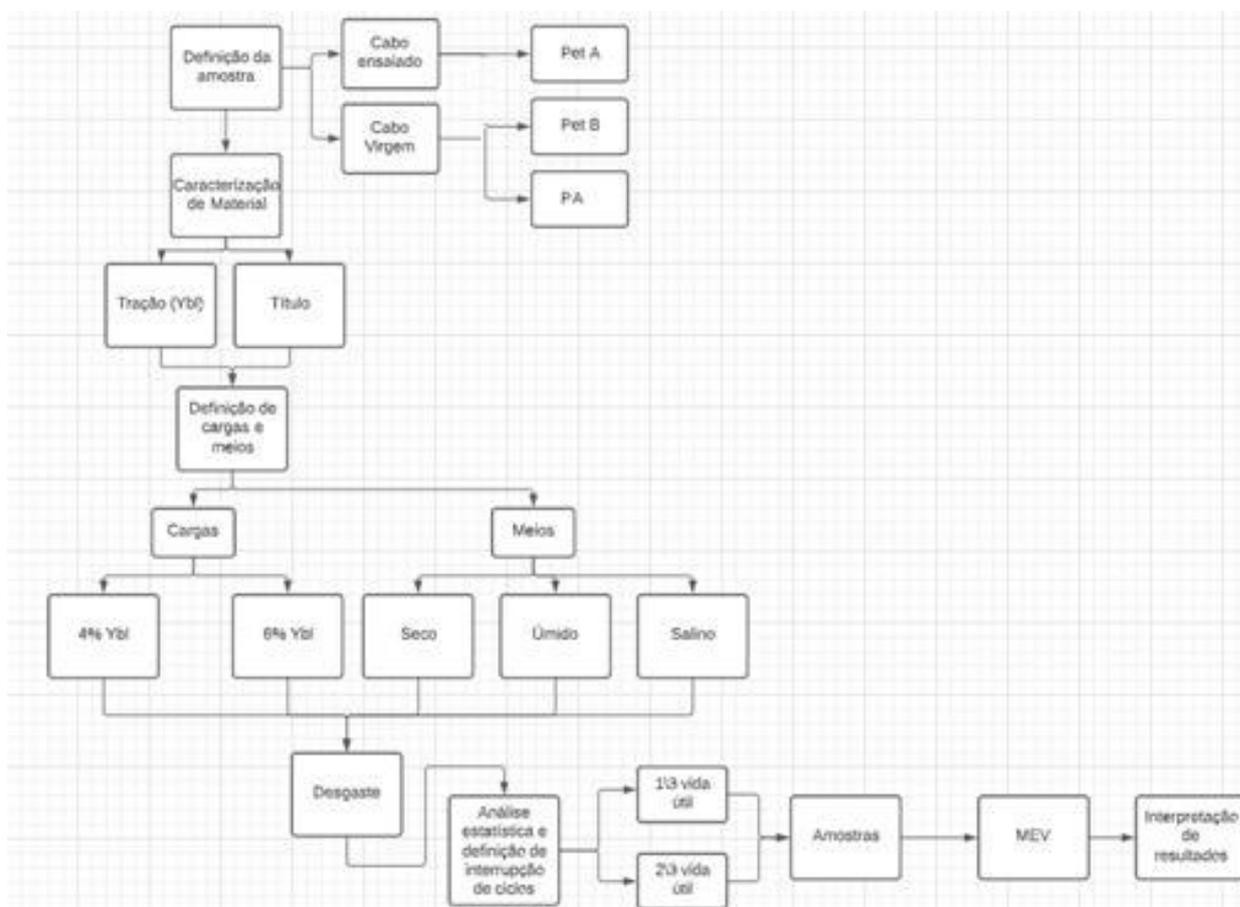
A norma ABTN NBR 6611 – 00 estabelece algumas condições iniciais para validar o ensaio, como temperatura ambiente entre 15°C e 26°C, umidade média do ar entre 55 e 75% e tempo de imersão entre 56 e 68 minutos em temperatura de 16 a 21°C. Ensaio de desgaste comparativos devem necessariamente ser realizados sob condições externas constantes (temperatura e umidade), visto que a resposta do polímero submetido a esforços mecânicos é muito sensível às condições ambientais. Além disso, qualquer dano ou contaminação do cabo com sujeira a nível monofilamentar influenciará nos resultados do teste.

É importante salientar que este ensaio é conhecido por ensaio de abrasão *yarn-on-yarn*, inclusive no título da norma que o rege [ASTM D1776, 2007]. Porém, o movimento relativo ocorre entre monofilamentos poliméricos, os quais possuem superfícies bastante lisas. Além disso, não existe uma superfície de dureza mais elevada (corpo ou contra-corpo). Conforme a definição de desgaste abrasivo, que corresponde à perda de massa devido à presença de asperidades duras no contato (as quais podem ser ou partículas abrasivas livres ou asperidades duras no contra-corpo, ver seção 2.4), o contato no ensaio *yarn-on-yarn* não apresenta condições que poderiam levar a abrasão. Com a investigação dos mecanismos de desgaste aqui proposta nesse trabalho, essa hipótese levantada foi investigada.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 12 apresenta o organograma da metodologia do projeto que direcionou a sequência das tarefas executadas durante a realização do trabalho.

Figura 12. Organograma do trabalho



Fonte: Próprio autor.

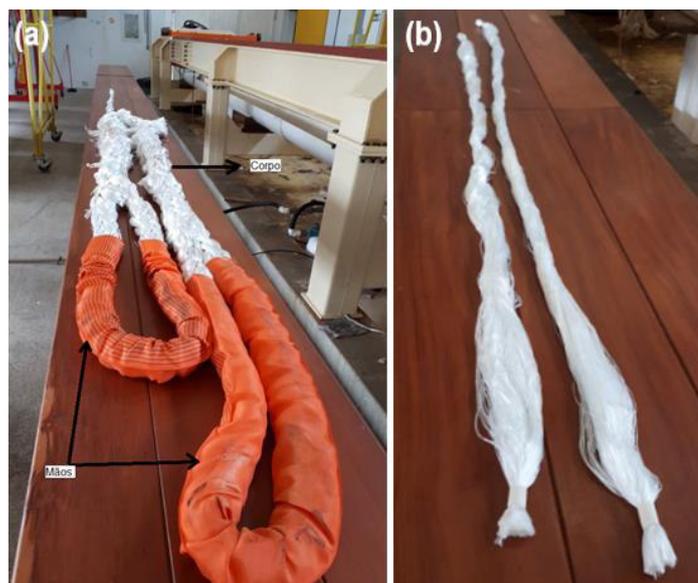
3.1. Materiais ensaiados

Para realização desta pesquisa foram utilizados dois tipos de cabos de poliéster, um já ensaiado e um virgem (nunca utilizado), a qual os objetos de estudo neste trabalho são os multifilamentos que se encontram no corpo dos cabos. Os cabos foram fornecidos pelo laboratório POLICAB, da Universidade Federal do Rio Grande (FURG), situado na cidade de Rio Grande – RS, que realiza análises de tensões em cabos de ancoragem, que inclusive disponibilizaram suas salas e equipamentos para efetivar e validar este trabalho. Foram fornecidos 02 cabos com comprimento de 20 metros para retirada de

multifilamentos, que por razão de confidencialidade serão denominados como PET A e PET B. Adicionalmente, avaliou-se também uma bobina de cabo multifilamento de poliamida virgem que será denominada como PA.

Os corpos de prova do PET A foram retirados de um cabo de ancoragem já ensaiado (sob tração, não rompido), conforme mostrado na Figura 13.a. Percebe-se que o cabo já ensaiado possui um traçado “gasto”, isso se deve ao fato do cabo já ser submetido a um elevado esforço causado pelo ensaio de tração. Como o cabo foi tracionado em condições abaixo do seu limite de ruptura, apenas deformou-se plasticamente. Como este cabo já havia sido previamente utilizado, este encontrava-se sem proteção, armazenado dentro de um saco de aniagem sobre paletes de madeira. Para selecionar as pernas que contêm os multifilamentos deste cabo de ancoragem o mesmo passou por um corte longitudinal em seu corpo e mão, para retirada de duas amostras para testes de desgaste, tração e título, conforme mostrado na Figura 13.b. Optou-se por selecionar pernas predominantemente internas do cabo de ancoragem, visto que esta região se encontrava melhor conservada, embora o modo do traçado da perna também apareça na camada externa do cabo devido ao entrelaçamento dos subcabos.

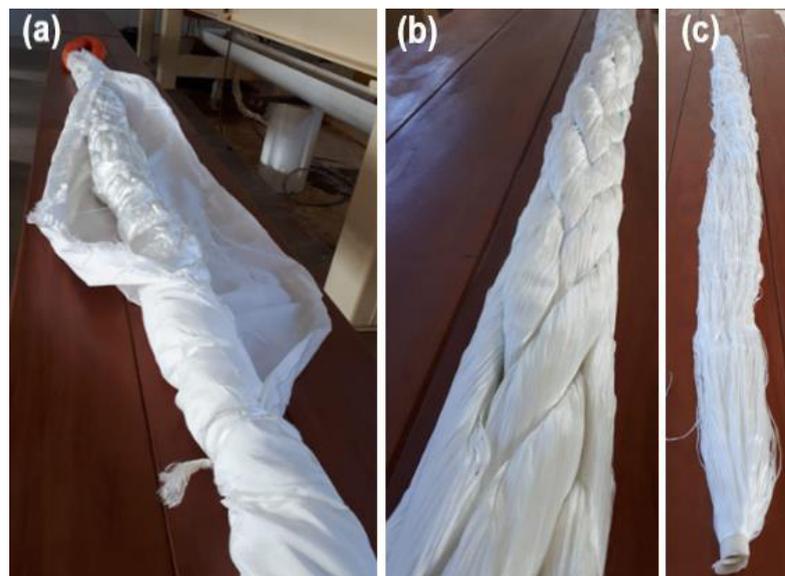
Figura 13. Material PET A: (a) Cabo de ancoragem já ensaiado, (b) amostra retirada do cabo.



Fonte: Próprio Autor

Os corpos de prova do PET B foram retirados de um cabo virgem, ou seja, nunca ensaiado ou utilizado. Como nunca foram utilizados, os multifilamentos que se encontravam na parte da mão do cabo não sofreram esforços de flexão, de forma que se optou por retirar amostras do corpo do material, conforme mostrado na Figura 14. O cabo virgem encontrava-se perfeitas condições, em sacos lacrados de aniagem e inclusive envolvido com tecido de proteção, além de um excelente estado de armazenamento sem qualquer tipo de umidade, conforme Figura 14.a. Percebe-se a limpeza e a uniformidade do cabo virgem, em estado novo, direto do fabricante, como mostra a Figura 14.b. Como o cabo virgem possuía grande uniformidade, foi escolhida aleatoriamente uma perna para a produção das amostras (Figura 14.c).

Figura 14. Cabo PET B: (a) cabo como recebido; (b) traçado do cabo virgem; (c) amostra retirada do cabo



Fonte: Próprio Autor

Os corpos de prova de poliamida (PA) foram analisados a partir de uma bobina de poliamida virgem que se encontrava em perfeitas condições de armazenamento.

3.2. Ensaio de título

O ensaio de titulação de produtos têxteis define a densidade linear do material, sendo expressa num sistema direto que relaciona um comprimento fixo, chamado Tex. Segundo as normas, ABNT NBR 13214, ABNT NBR 13316 e

ABNT 8427, título define-se como a distribuição da massa ao longo do comprimento. O emprego da constante (numeral) Tex representa a massa em gramas por 1000m de fio, da mesma forma como dTex representa massa em gramas para 10000m, sendo expressa pela fórmula:

$$K.P = C.T \quad (1)$$

Onde:

K = constante (1000 para Tex, 10000 para dTex);

P = massa do multifilamento (g)

C = comprimento da amostra (m)

T = título.

Para fins da pesquisa e estudo, foram realizados ensaios com 10 amostras de 1000mm \pm 1mm, a fim de realizar uma análise média estatística do título dos materiais PET A, PET B e PA em condições secas. A unidade da constante K utilizada é dTex. Todos os ensaios foram realizados em equipamento laboratorial, na balança eletrônica modelo Ohaus – Adventurer ar2140 com resolução de 0,0001g sob condições controladas de temperatura (24°C \pm 1°C) e umidade (65% \pm 2%), conforme padronização normalizada.

3.3. Ensaio de tração

O ensaio de tração simples tem por finalidade caracterizar o material em termos de resistência à tração, que é uma das propriedades que diferencia a especificação do cabo polimérico. O equipamento utilizado para os ensaios de tração simples é da marca Instron, modelo Emic DL20000, de capacidade máxima de 200 kN (Figura 15). A máquina testa corpos de prova de pelo menos 500 mm de comprimento a uma velocidade de 50 mm/s, na qual os dados são armazenados e obtidos pelo programa Tesc, software do próprio fabricante. Foram realizados 30 ensaios de tração para cada material em condição seca, conforme a norma ASTM D885, onde foi calculada a média da carga de ruptura de cada cabo polimérico (Yb), além de outros dados como alongamento e

deformação viscoplástica. O maior enfoque, porém, foi dado à carga de ruptura em tração, cujos dados serviram para estabelecer as condições dos ensaios de desgaste.

Figura 15. Máquina de tração utilizada, modelo Emic DL20000.



Fonte: Emic, Soluções Industriais.

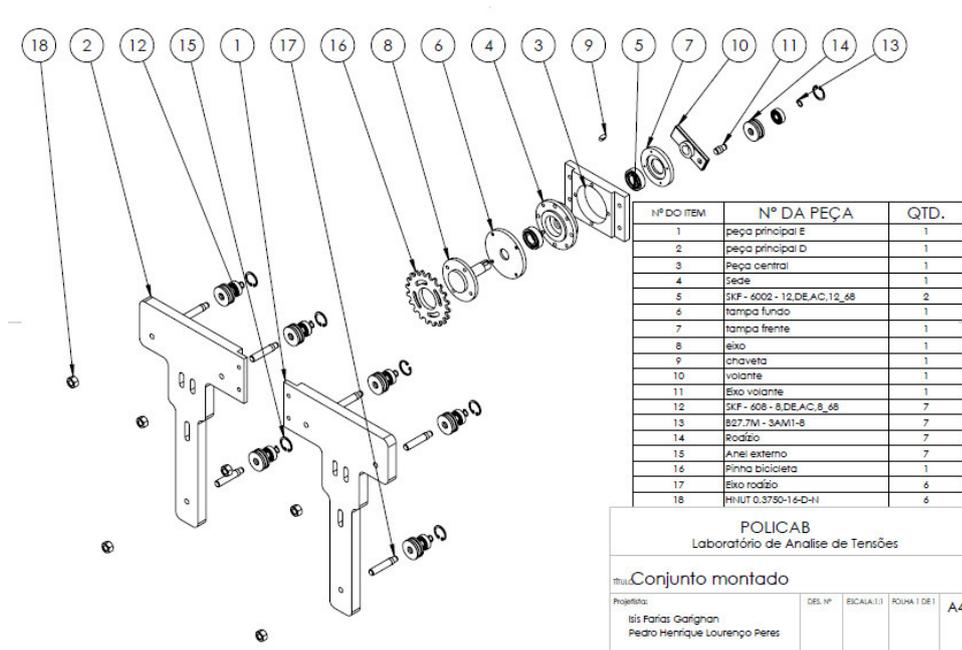
3.4. Ensaios de desgaste fio-contra-fio

3.4.1. Descrição do equipamento

O dispositivo usado nos ensaios de desgaste fio-contra-fio (*yarn-on-yarn*) foi um projeto mecânico baseado nas normas *CI 1503-99* e *ASTM Standards* [ASTM D1776, 2007]. O projeto da máquina se encontra totalmente especificada e detalhada, consistindo de um sistema de partida com motor e redutor, um sistema estático fixo que suporta e conduz o multifilamento no conjunto (Figura 16) e um sistema de contagem de ciclos. O sistema de partida é composto por um motor, da marca WEG de 0,33 cv com 1710 RPM (carcaça 63); e um redutor, da marca Geremia, de 0,5 cv (modelo GS 41) com relação de transmissão 1:30. O sistema de transmissão é composto por polias, correia e coroa da saída do redutor para o conjunto de manivela (onde é presa uma extremidade do corpo de prova) do sistema estático. É o sistema que transforma o movimento rotacional do redutor para linear da manivela. O sistema estático é fixado em

uma mesa, além de conduzir o multifilamento a partir de rolamentos conforme a norma e dar suporte para alterar-se a atmosfera do ensaio (de seco para úmido e salina) na zona entrelaçada. É composto por uma manivela, conjunto de rolamentos e suporte de mudança de atmosfera. Para registrar o número de ciclos até a ruptura do corpo de prova, utilizou-se um sensor indutivo que transmite um sinal para um controlador lógico programável (CLP) toda vez que uma peça metálica localizada no sistema de transmissão passa em sua frente a cada revolução. O sensor indutivo é posicionado atrás da manivela, no sistema de transmissão. Após o rompimento do corpo de prova o sistema se desliga automaticamente, ficando registrado o número de ciclos no visor do CLP. Um sistema de massas tensionadoras se encontra na outra extremidade do corpo de prova, é uma garrafa pet com chumbo. O peso da massa está diretamente relacionado com a carga de ruptura do corpo de prova.

Figura 16. Sistema estático do equipamento de desgaste fio-contra-fio



Fonte: Próprio autor.

3.4.2. Preparação dos corpos de prova

A partir de uma amostra de fio previamente recolhida do cabo multifilamento, separou-se uma porção correspondente ao comprimento suficiente para passar por todas as polias e para as devidas amarrações (em torno de um metro). Caso o ensaio não fosse realizado imediatamente à retirada

do material, o mesmo era armazenado em um recipiente à prova de umidade, longe de qualquer forma de luz direta.

As extremidades formam um laço (Figura 17) que é posicionado na manivela e na massa tensionadora a partir de um gancho. Durante a montagem inicial, as três voltas que totalizam a zona de entrelaçamento foram realizadas com uma tampa de caneta para evitar a manipulação do corpo de prova.

Figura 17. Corpo de prova para ensaio de desgaste



Fonte: Próprio Autor

3.4.3. Ajustes dos parâmetros e condições de ensaio

Os ensaios foram realizados em três condições: a seco, após imersão em água e após imersão em água salina. No trabalho estas condições serão chamadas simplesmente de seca, úmida e salina. Os ensaios nas condições úmida e salina foram realizados com a ajuda de um suporte na zona de entrelaçamento, onde os corpos de prova eram mergulhados em água normal e água do mar, respectivamente. Para os ensaios a seco utilizou-se condição ambiente, ao ar. O tempo de imersão se refere às condições úmida e salina onde o corpo de prova ficou de molho (repouso), submerso no meio antes do ensaio.

A preparação da condição salina se deu a partir da retirada da água do mar do próprio oceano atlântico da praia do Cassino, especificamente na região dos molhes da barra onde foi coletada galões para todos os ensaios. Não foi realizado nenhum tipo de caracterização da água do ambiente salino para verificar os componentes químicos e partículas presentes, por exemplo grãos de sílica e cálcio.

Com relação às cargas utilizadas nos ensaios de desgaste, é comum utilizar cargas baixas, pois a região entrelaçada está sujeita a condições de carregamento e desgaste extremamente severas. A referência para a seleção das cargas foi a carga de ruptura à tração dos corpos de prova (Ybl), sendo que nos ensaios de desgaste optou-se por usar 2 níveis de carga: 4% e 6% do valor de Ybl .

Para a realização dos ensaios, foi utilizada uma sequência que deve ser rigorosamente observada. Com o peso determinado, a amostra do CP preparada, o entrelaçamento do fio realizado e a contagem dos ciclos no visor do CLP zerada, deu-se então início aos ensaios, na qual o acompanhamento do teste ocorreu até que o técnico responsável pelos ensaios estivesse ciente de todos os procedimentos e riscos que pudessem afetar os resultados. Depois de tal conhecimento o responsável voltou ao ensaio somente para acompanhamento, verificação ou troca do CP quando necessário, já que a sua presença poderia afetar os resultados dos testes.

3.5. Avaliação dos mecanismos de desgaste

Para a obtenção das amostras utilizadas na avaliação do ensaio de desgaste, foram retiradas amostras para 3 tempos de ensaio: *i.* ensaio de desgaste até a ruptura do multifilamento, com cargas de 4 e 6% de Ybl ; *ii.* interrupção no ensaio de desgaste para um tempo correspondente a 1/3 da média de número de ciclos necessários para a ruptura do multifilamento com cargas de 4 e 6%; *c) iii* interrupção no ensaio de desgaste para um tempo correspondente a 2/3 da média do número de ciclos necessários para a ruptura do multifilamento com cargas de 4 e 6%. Para tanto, inicialmente os corpos de prova foram levados à ruptura para extrair a média de ciclos necessários para arrebitá-los, sendo que o valor médio entre as repetições foi utilizado para a

determinação dos números de ciclos necessários para as interrupções dos ensaios em 1/3 e 2/3 da vida útil do multifilamento. Dessa forma, foi possível obter CPs que permitissem avaliar a evolução dos micromecanismos de desgaste ao longo da vida útil do multifilamento.

Após os corpos de prova terem sido submetidos ao ensaio de desgaste com seus respectivos ciclos, as amostras foram preparadas para análise em microscopia eletrônica de varredura (MEV) para avaliar com maior precisão os micromecanismos de desgaste atuantes nos multifilamentos. A preparação das amostras para análise seguiu o mesmo procedimento de corte da amostra na região de enlace. Como os polímeros utilizados não são condutores, foi necessário o seu recobrimento com um banho de ouro antes das análises. Para identificação da composição química dos multifilamentos, bem como de possíveis tribofilmes formados, e identificação de presença de impurezas, utilizou-se a técnica de espectroscopia de energia dispersiva de raios-X (EDS). Esta é uma ferramenta importante acoplada ao MEV, pois permite identificar a composição das amostras, mesmo que qualitativamente, em pontos específicos da imagem. A análise por MEV foi feita no Centro de Microscopia Eletrônica do Sul (CEME-SUL) da FURG. O equipamento utilizado foi o microscópio eletrônico de varredura marca JEOL modelo JSM-6610LV. Nas análises, utilizou-se tanto imagens de elétrons secundários (SE), para avaliar a morfologia das superfícies, quanto imagens de elétrons retroespalhados (BSE), que fornece contraste de composição química, sob uma voltagem de 10 kV.

4. Resultados e discussões

Nesta seção serão apresentados e comentados os resultados obtidos por meio da metodologia utilizada. Primeiramente os resultados apresentados serão da parte de caracterização dos multifilamentos (ensaio de tração e título), seguidos dos resultados do comportamento do material perante ensaio de desgaste. Logo após, serão apresentados e discutidos os ensaios de microscopia eletrônica de varredura, onde serão identificados e comparados os mecanismos atuantes no desgaste de cada tipo de multifilamento.

4.1. Força de Ruptura estática dos materiais

Para encontrar a força de ruptura do multifilamento foram utilizadas 30 amostras, conforme descrito na metodologia. A Tabela 1 resume os resultados obtidos para os três diferentes tipos de materiais.

Tabela 1. Dados do ensaio de tração

Material	Força Média de Ruptura (N)	Desvio padrão (N)	Alongamento médio máximo (mm)	Deformação média máxima (mm)
PET A	170,23	7,37	48,34	9,66
PET B	262,26	6,02	54,23	10,94
PA	207,36	5,30	93,77	18,75

Percebe-se a variação da força de ruptura em tração nos materiais, que está diretamente relacionada com o tipo de material, com a quantidade de monofilamentos da amostra e com a sua densidade, que foi calculada no ensaio de título. Pode ser observado que o desvio padrão de ambos materiais são parecidos, expressando uma melhor estabilidade e confiança no resultado do ensaio de tração. Conclui-se que o poliéster virgem (PET B) possui maior resistência à tração que o Poliamida virgem (PA). Além disso, observa-se que o uso prévio do cabo de poliéster (PET A) reduziu sua resistência à tração em relação ao poliéster virgem (PET B).

Também é possível observar que o alongamento e a deformação da poliamida são maiores que os do poliéster. Da mesma forma percebe-se que o

poliéster do cabo usado (PET A), possui menor alongamento e deformação que o cabo virgem (PET B), isso porque o material já foi exposto a trabalho.

4.2. Ensaio de título

Para o ensaio título na caracterização de multifilamentos utilizou-se 10 amostras que foram pesadas para determinar sua densidade e conseqüentemente, seu título na unidade dTex conforme metodologia. A Tabela 2 mostra os resultados do ensaio.

Tabela 2. Dados ensaio de título

Material	Massa (g)	Título (dTex)	Desvio padrão (g)
PET A	0,2210	2,210	0,0008
PET B	0,3429	3,429	0,0022
PA	0,2851	2,851	0,0006

Percebe-se que o desvio padrão de ambos materiais são semelhantes, mostrando confiabilidade no ensaio e na calibração da balança eletrônica. Em relação aos resultados percebe-se entre os poliésteres que o PET B possui mais massa que o PET A, isso significa que os cabos de ancoragem embora de mesmo material possuem diferentes densidades concluindo que não há similaridade entre estes cabos, ou seja, são de fabricantes diferentes.

Nota-se que a Poliamida possui menor densidade que o PET B, porém maior que o Pet A. De forma geral, o ensaio de título mostrou congruência proporcional com o ensaio de tração, mostrando que quando maior a densidade do material mais esforço de tração é necessário para rompe-lo.

4.3. Comportamento perante aos ensaios de desgaste

A Tabela 3 mostra como determinou-se a carga de tensionamento usada nos ensaios de desgaste a partir da carga de ruptura do ensaio de tração (Ybl).

Tabela 3. Dados de peso para tensionamento

Material	Força média de Ruptura (N)	Carga 4% Ybl (gf)	Carga 6% Ybl (gf)
PET A	170,23	694	1041
PET B	262,26	1070	1604
PA	207,36	846	1268

Pode-se perceber a massa expressa em grama x força, que corresponde à massa tensionadora do ensaio de desgaste, na qual foi decidido utilizar cargas de 4% e 6% da carga de ruptura do ensaio de tração. Sendo calculada a partir da conversão de Newton (N) para grama força (gf). Percebe-se que o PET B está exposto a maiores cargas, seguida pelo PA e pelo PET A.

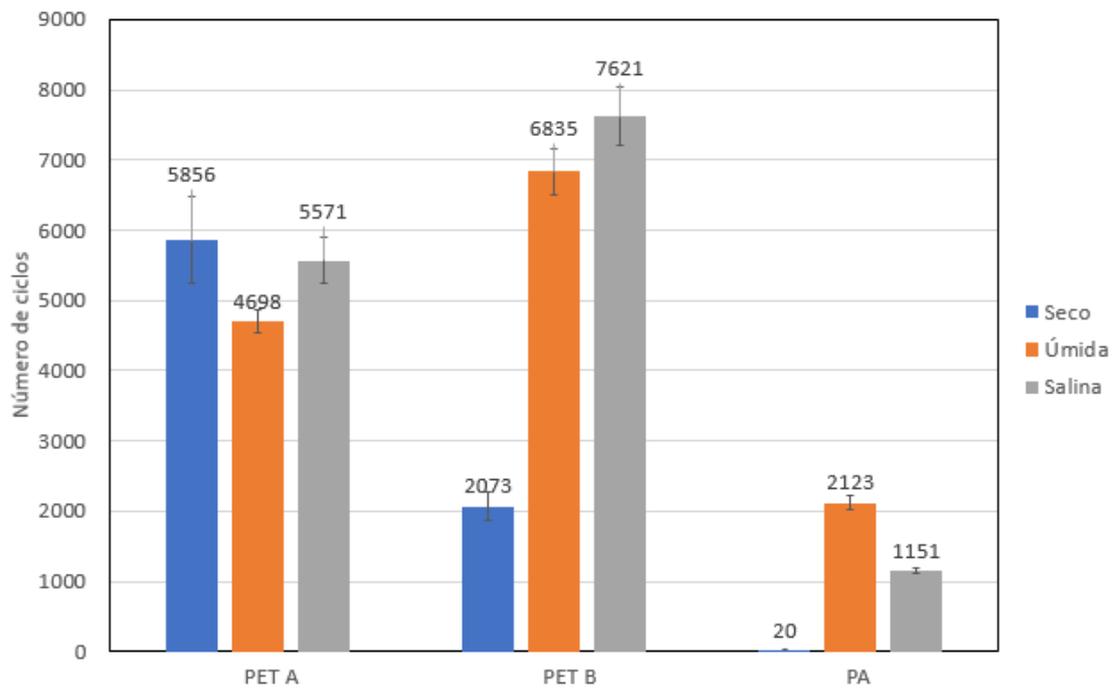
Apresentados os três meios onde os multifilamentos foram testados, a Tabela 4 apresenta os resultados de número de ciclos médio necessário para levar os filamentos até a ruptura durante os ensaios de desgaste *yarn-on-yarn*. Os demais detalhes do ensaio como desvio padrão e verificação por corpo de prova encontram-se em anexo.

Tabela 4. Dados de ruptura do ensaio de desgaste

Condição seca		
Material	Ciclos para carga de 4% <i>Ybl</i>	Ciclos para carga de 6% <i>Ybl</i>
PET A	5856	7
PET B	2073	11
PA	20	6
Condição Úmida		
Material	Ciclos para carga de 4% <i>Ybl</i>	Ciclos para carga de 6% <i>Ybl</i>
PET A	4698	4621
PET B	6835	4179
PA	2123	996
Condição Salina		
Material	Ciclos para carga de 4% <i>Ybl</i>	Ciclos para carga de 6% <i>Ybl</i>
PET A	5571	4950
PET B	7621	3556
PA	1151	365

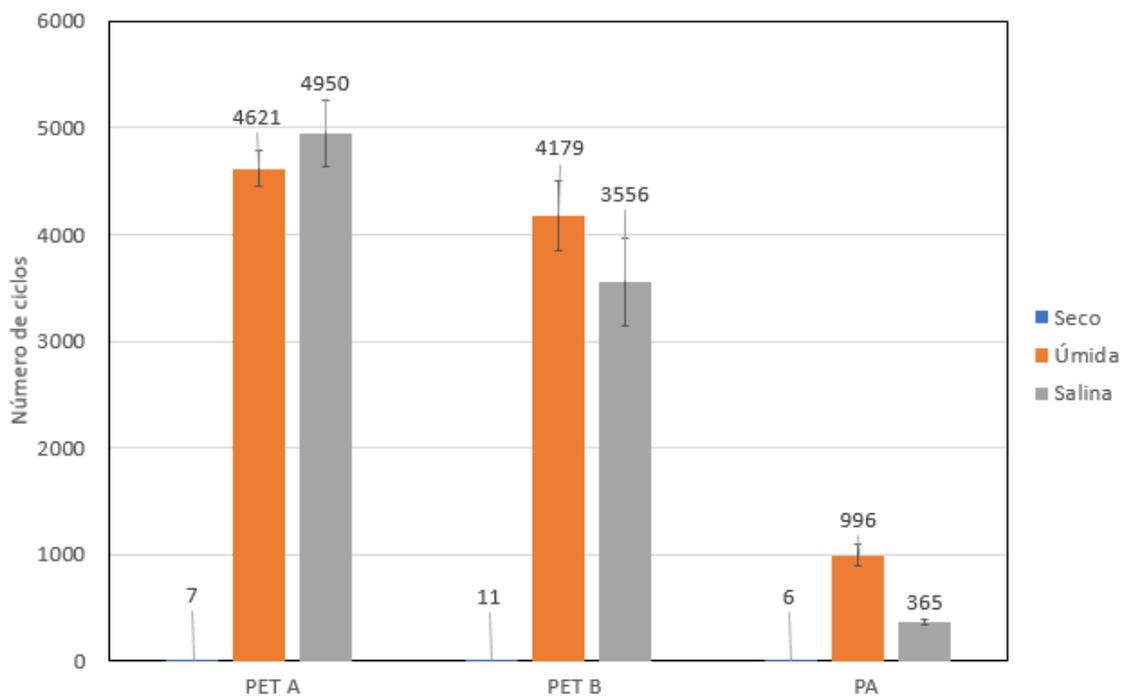
Os mesmos dados são expressos em gráficos, de modo que fiquem mais facilmente interpretados tendo em vista uma classificação via meio. Respectivamente a Figura 18 e a Figura 19 mostram os resultados dos ensaios nas condições seca, úmida e salina, bem como mostram o desvio padrão para cada tipo de carga.

Figura 18. Ciclos de ruptura para ensaios de desgaste sob carga de 4% do Ybl



Fonte: Próprio Autor.

Figura 19. Ciclos de ruptura para ensaios de desgaste sob carga de 6% do Ybl



Fonte: Próprio Autor.

4.4. Verificação da interrupção de ciclos

Conforme estabelecido em procedimento foram efetuadas duas interrupções nos ensaios de desgastes a fim de levar amostras ao Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) para identificar os mecanismos de desgaste presentes. Tendo a média de cada tipo de ensaio (vida útil) e em cada diferente meio foram efetuadas as interrupções da seguinte maneira:

- a) Interrupção de ciclo em $1/3$ da vida útil para cargas de 4% e 6% *Yb* nos meios seco, úmido e salino.
- b) Interrupção de ciclo em $2/3$ da vida útil para cargas de 4% e 6% nos meios seco, úmido e salino.

A Tabela 5 apresenta a quantidade de ciclos necessárias para cada específica interrupção de meio, carga e tipo de material, de modo a retirar adequadamente o corpo de prova para análise.

Tabela 5 - Ciclos de interrupção

Condição seca		
Material	Ciclos para interrupção de 4% <i>Ybl</i>	Ciclos para interrupção de 6% <i>Ybl</i>
PET A	1/3 = 1952	1/3 = 3
	2/3 = 3904	2/3 = 5
PET B	1/3 = 691	1/3 = 4
	2/3 = 1382	2/3 = 8
PA	1/3 = 7	1/3 = 2
	2/3 = 14	2/3 = 4
Condição Úmida		
Material	Ciclos para interrupção de 4% <i>Ybl</i>	Ciclos para interrupção de 6% <i>Ybl</i>
PET A	1/3 = 1566	1/3 = 1540
	2/3 = 3132	2/3 = 3081
PET B	1/3 = 2278	1/3 = 1393
	2/3 = 4557	2/3 = 2786
PA	1/3 = 708	1/3 = 332
	2/3 = 1415	2/3 = 664
Condição Salina		
Material	Ciclos para interrupção de 4% <i>Ybl</i>	Ciclos para interrupção de 6% <i>Ybl</i>
PET A	1/3 = 1857	1/3 = 650
	2/3 = 3714	2/3 = 1300
PET B	1/3 = 2540	1/3 = 1185
	2/3 = 5081	2/3 = 2371
PA	1/3 = 384	1/3 = 122
	2/3 = 767	2/3 = 244

4.5. Mecanismos de desgaste nos cabos multifilamentos por MEV

Para as análises de microscopia foram usados os corpos de prova coletados do ensaio de desgaste (região de enlace), na qual foi selecionado uma pequena parte (recorte) dessa amostra que era posicionada sobre uma fita condutora no microscópio. Antes de posicioná-la no equipamento, essa amostra era colocada em estufa, devido ao excesso de umidade e também recebia um banho de vapor de ouro para tornar o material condutor de forma a ser avaliado pelo feixe de elétrons.

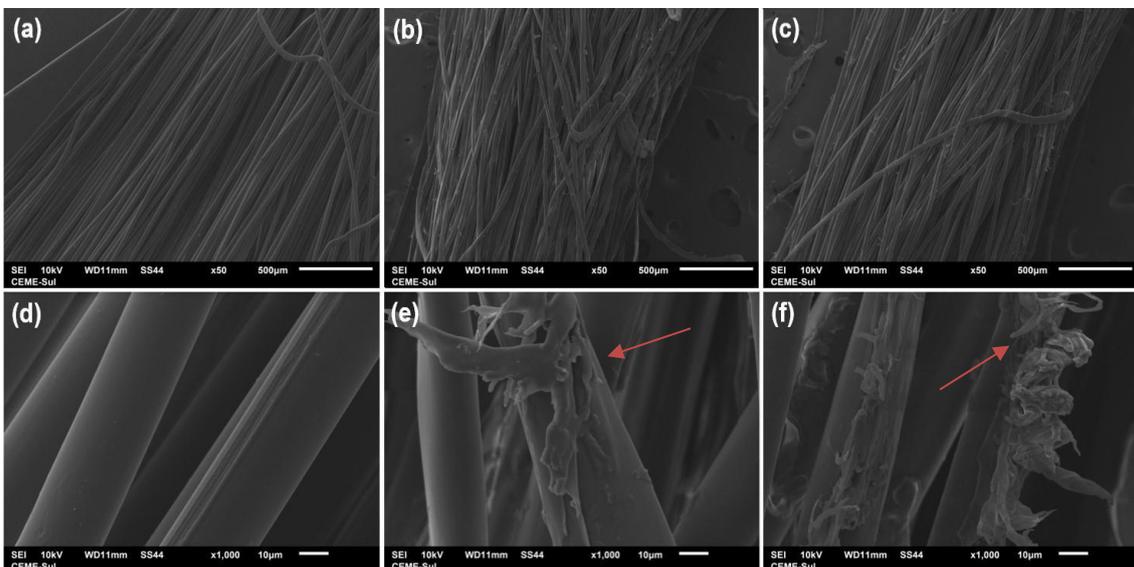
Para melhor análise e interpretação dos mecanismos de desgaste atuantes, as figuras dividem-se em seis etapas para cada tipo de carga e nos seus diferentes meios conforme ordem seca, úmida e por fim salina, onde a) apresenta a região lisa logo acima a região de enlace onde tem-se pouca ou

nenhuma interação entre fios; b) região de enlace com interrupção em 1/3; c) região de enlace com interrupção em 2/3; d) zoom em monofilamento região lisa; e) zoom em monofilamento com interrupção em 1/3 e f) zoom em monofilamento com interrupção em 2/3.

4.5.1. PET B carga 4%

A Figura 20 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta a superfície dos multifilamentos analisada por MEV após o ensaio de desgaste do multifilamento de poliéster na condição novo (PET B) sob carga de 4% em atmosfera seca. Percebe-se que a região fora do enlace (a) é relativamente lisa e uniforme, pois é a região onde tem-se pouco ou nenhum desgaste. Isso é melhor evidenciado ao se observar em detalhe um único monofilamento da região fora do enlace (d), na qual sua superfície permanece intacta, sem ocorrência de desgaste evidente. Nas regiões de enlace (b) e (c) analisadas com menor aumento observa-se uma sobreposição dos fios, onde algum dano superficial pode ser identificado. Porém deve-se salientar que parte dessa sobreposição pode ter ocorrido quando a amostra ensaiada foi cortada para observação no MEV. Ao analisar-se a região de enlace com maior aumento, observa-se na superfície dos monofilamento a ocorrência de delaminação, indicada por setas vermelhas, a qual é ainda mais severa em 2/3 dos ciclos (f) do que em 1/3 dos ciclos (e).

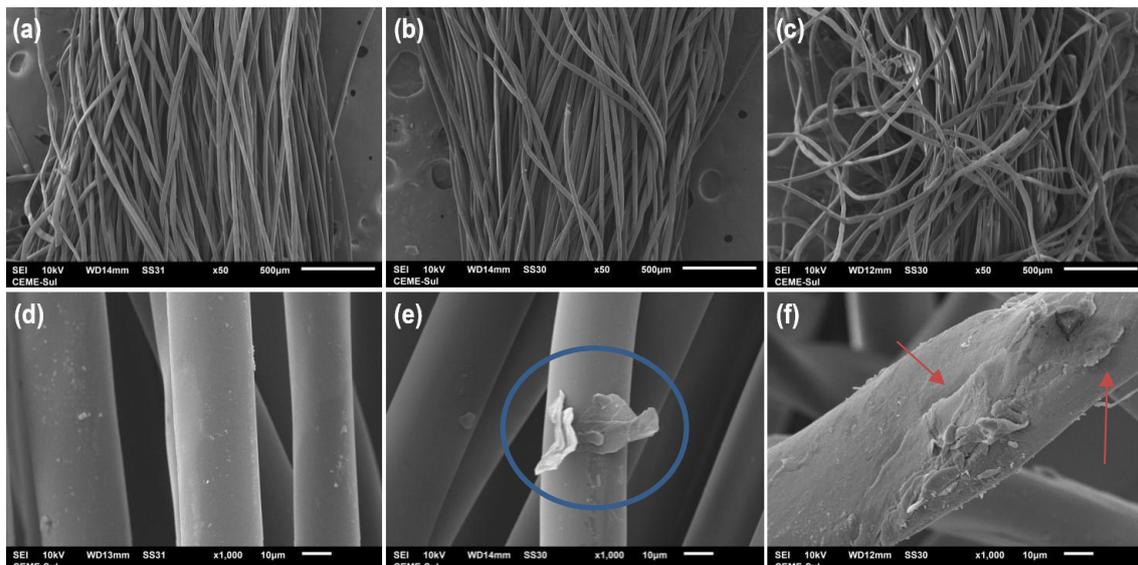
Figura 20. Superfícies dos filamentos após ensaios de desgaste em PET B 4% Ybl atmosfera seca: (a) fora do enlace; (b) enlace interrupção em 1/3; (c) enlace interrupção em 2/3; (d) detalhe região fora do enlace; (e) detalhe região de enlace interrupção em 1/3 do total de ciclos; (f) detalhe região de enlace interrupção em 2/3.



Fonte: Próprio Autor

A Figura 21 apresenta a superfície dos multifilamentos após o ensaio de desgaste do PET B (virgem) com carga de 4% *Ybl* em atmosfera úmida. No ensaio em atmosfera úmida percebe-se menor intensidade na ocorrência de delaminação quando comparado com o ensaio a seco. A superfície dos monofilamentos dentro da região de enlace para interrupção em 1/3 (e) apresenta alguma adesão, destacada pelo círculo azul, mas com muito pouca delaminação. Já no detalhe da região de enlace com interrupção em 2/3 (f) percebe-se além da ocorrência de adesão uma delaminação significativa (setas vermelhas), mas ainda em menor intensidade que o cabo virgem ensaiado na condição a seco.

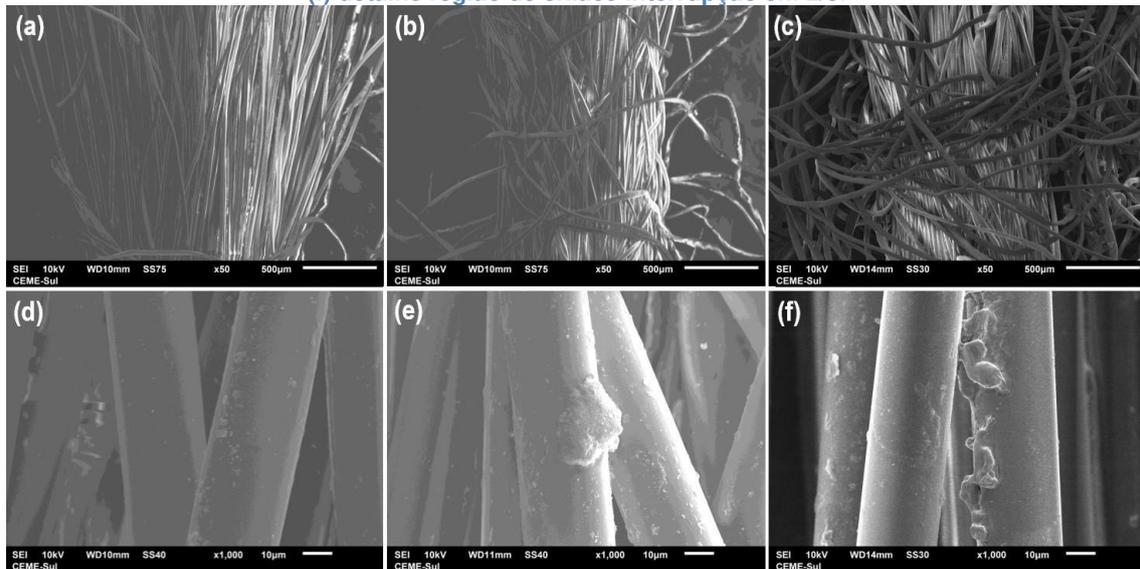
Figura 21. Superfícies dos filamentos após ensaios de desgaste em PET B 4% *Ybl* atmosfera úmida: (a) fora do enlace; (b) enlace interrupção em 1/3; (c) enlace interrupção em 2/3; (d) detalhe região fora do enlace; (e) detalhe região de enlace interrupção em 1/3 do total de ciclos; (f) detalhe região de enlace interrupção em 2/3.



Fonte: Próprio Autor

A Figura 22 apresenta a superfície dos multifilamentos após o ensaio de desgaste do Pet B com carga de 4% na atmosfera salina. A região de enlace para interrupção em 1/3 (f) não apresenta sinais de delaminação e aparentemente acúmulo de sujeira com leve adesão. Na região de enlace para interrupção de 2/3 percebe-se um pouco mais desse acúmulo.

Figura 22. Superfícies dos filamentos após ensaios de desgaste em PET B 4% *Ybl* atmosfera salina: (a) fora do enlace; (b) enlace interrupção em 1/3; (c) enlace interrupção em 2/3; (d) detalhe região fora do enlace; (e) detalhe região de enlace interrupção em 1/3 do total de ciclos; (f) detalhe região de enlace interrupção em 2/3.

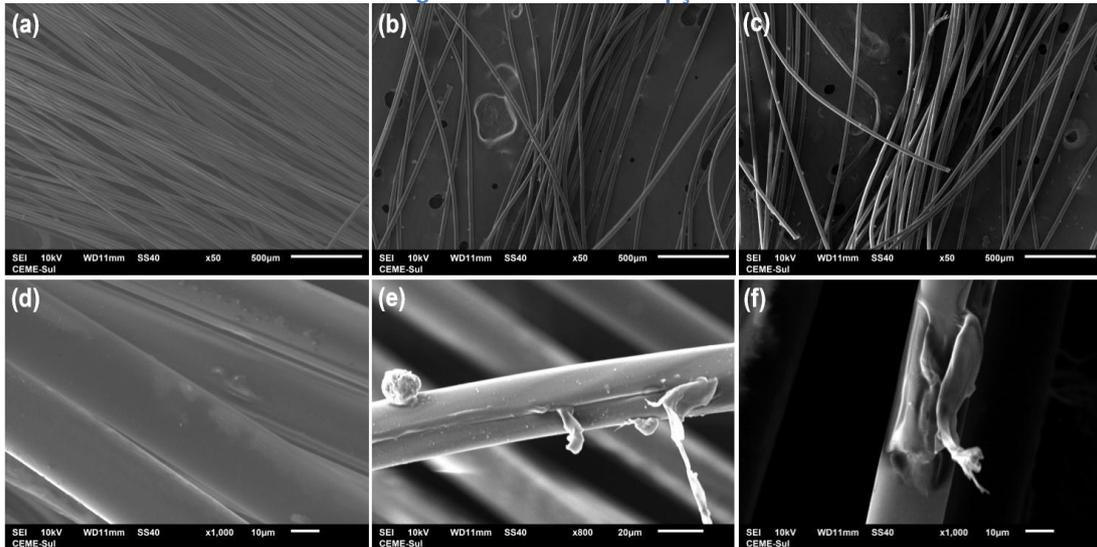


Fonte: Próprio Autor

4.5.2. Mecanismos de desgaste Pet B carga 6%

A Figura 23 apresenta a superfície dos multifilamentos após o ensaio de desgaste do PET B com carga de 6% na atmosfera seca. No detalhe da região de enlace observa-se um dano severo na superfície do filamento para as interrupções em 1/3 (e) e em 2/3 (f), com grande arrancamento de material. Quando comparado com a condição de ensaio para uma carga de 6% *Ybl*, o dano observado para uma carga de 4% *Ybl* foi mais superficial.

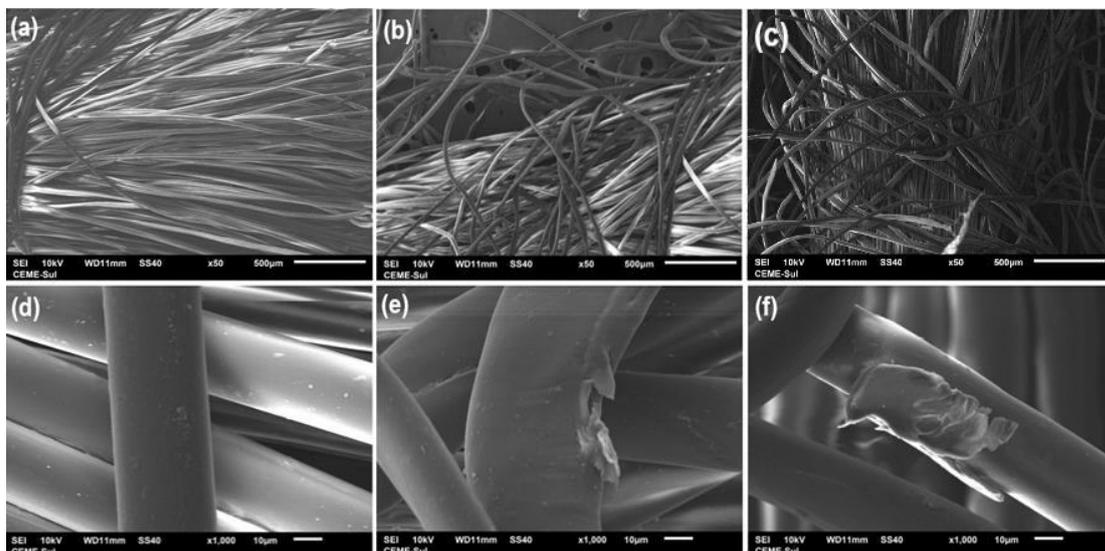
Figura 23. Superfícies dos filamentos após ensaios de desgaste em PET B 6% *Ybl* atmosfera seca: (a) fora do enlace; (b) enlace interrupção em 1/3; (c) enlace interrupção em 2/3; (d) detalhe região fora do enlace; (e) detalhe região de enlace interrupção em 1/3 do total de ciclos; (f) detalhe região de enlace interrupção em 2/3.



Fonte: Próprio Autor

A Figura 24 apresenta a superfície dos multifilamentos após o ensaio de desgaste do PET B com carga de 6% na atmosfera úmida. No detalhe da região de enlace com interrupção em 1/3 (e), mesmo utilizando-se uma carga mais elevada, o dano à superfície do filamento foi ainda muito pequeno quando comparado com a condição a seco, com pequena ocorrência de delaminação. Para a interrupção em 2/3 (f), observa-se um pequeno aumento da delaminação.

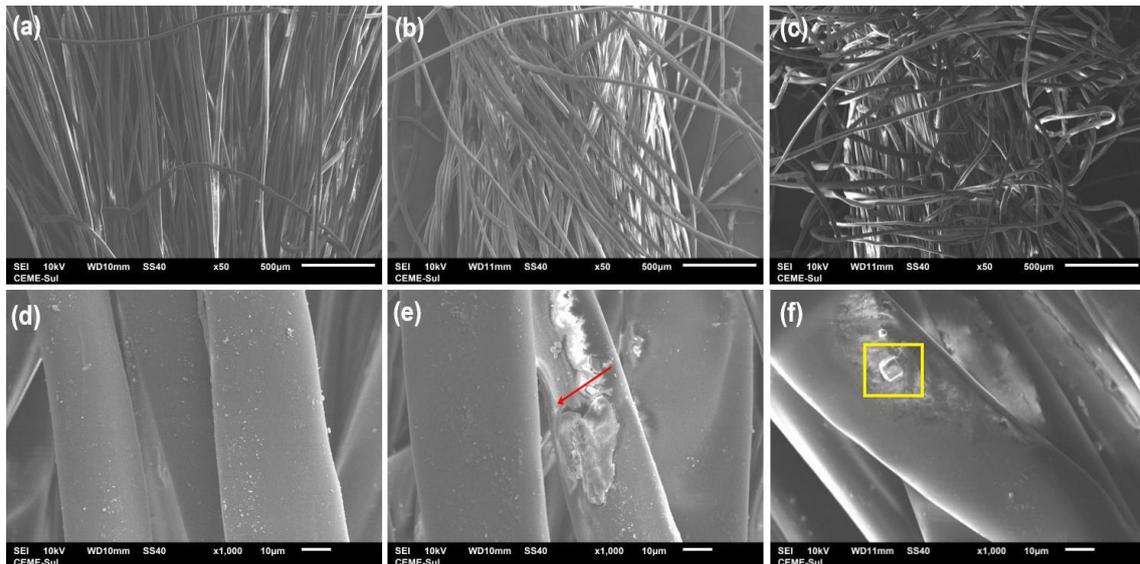
Figura 24. Superfícies dos filamentos após ensaios de desgaste em PET B 6% *Ybl* atmosfera úmida: (a) fora do enlace; (b) enlace interrupção em 1/3; (c) enlace interrupção em 2/3; (d) detalhe região fora do enlace; (e) detalhe região de enlace interrupção em 1/3 do total de ciclos; (f) detalhe região de enlace interrupção em 2/3.



Fonte: Próprio Autor

A Figura 25 apresenta a superfície dos multifilamentos após o ensaio de desgaste do PET B com carga de 6% na atmosfera salina. De forma semelhante ao observado para os ensaios com uma carga de 4%, no detalhe da região de enlace percebe-se a ocorrência de delaminação (como a mostrada pela seta vermelha em (e) para interrupção em 1/3), mas muito menos frequente que a observada na condições a seco. Na imagem mostrada em (f) para interrupção em 2/3 chama-se a atenção para a presença de um grão cristalino na região de adesão marcado por um quadrado amarelo, sendo que análise de EDS confirmou que trata-se de um cristal de NaCl.

Figura 25. Superfícies dos filamentos após ensaios de desgaste em PET B 6% Yb/ atmosfera salina: (a) fora do enlace; (b) enlace interrupção em 1/3; (c) enlace interrupção em 2/3; (d) detalhe região fora do enlace; (e) detalhe região de enlace interrupção em 1/3 do total de ciclos; (f) detalhe região de enlace interrupção em 2/3.



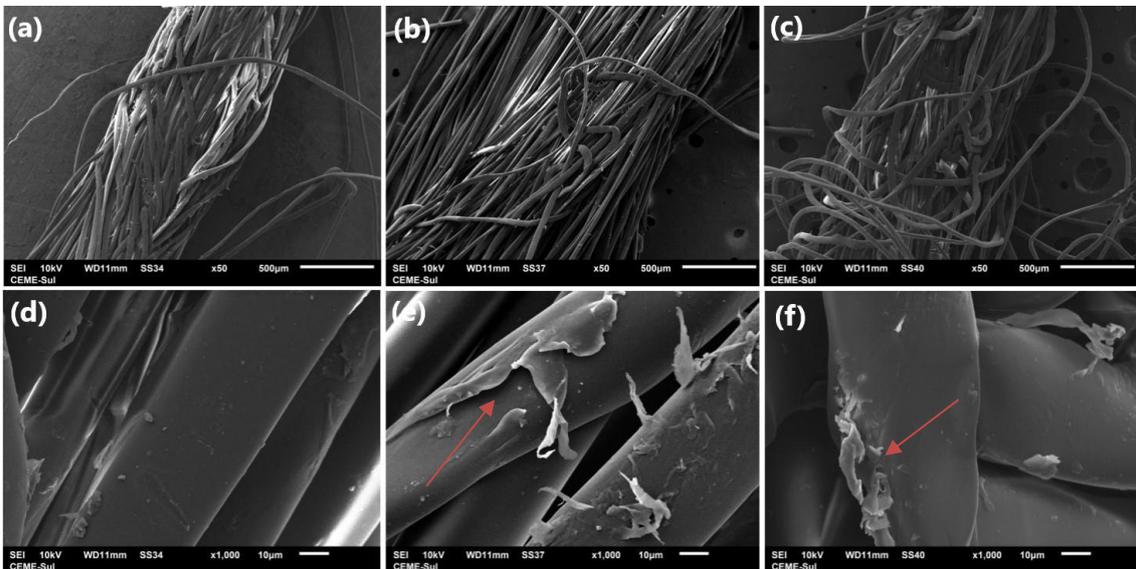
Fonte: Próprio Autor

4.5.3. Cabo usado de poliéster (PET A) carga 4% Yb/

A Figura 26 apresenta imagens por MEV após o ensaio de desgaste do multifilamento de polietileno previamente usado (PET A) com carga de 4% Yb/ em atmosfera seca. Os mecanismos de desgaste observados foram semelhantes aos observados para o cabo virgem (PET B), na qual percebe-se no detalhe da região do enlace para interrupção em 1/3 (e) e 2/3 (f) a ocorrência de delaminação na superfície dos filamentos (setas vermelhas). Porém a

quantidade dessa delaminação foi um pouco menor que a observada para o cabo virgem na condição a seco (comparar com Figura 20).

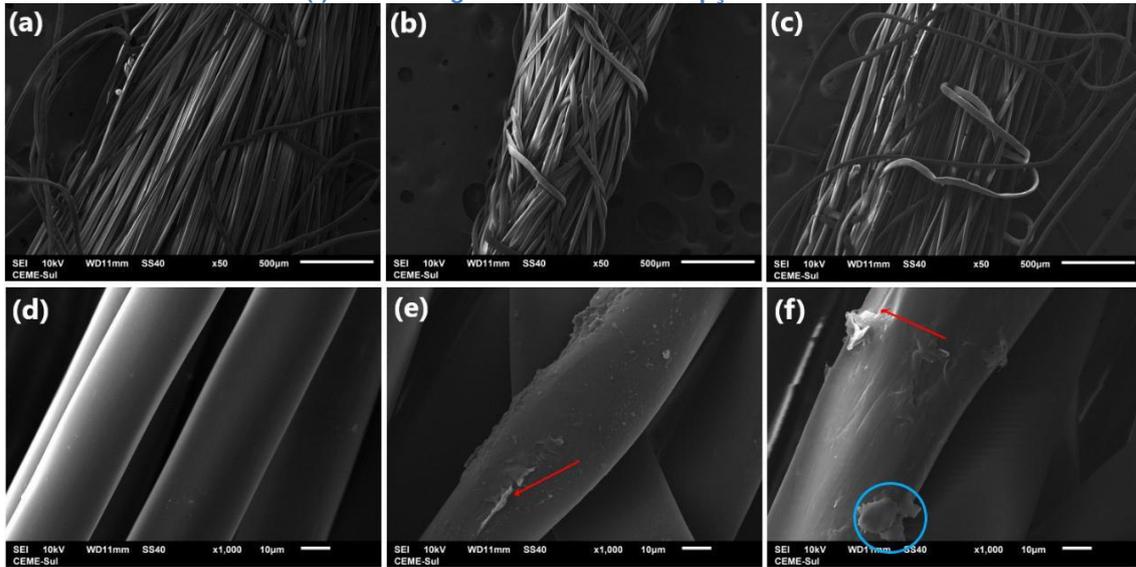
Figura 26. Superfícies dos filamentos após ensaios de desgaste em PET A 4% *Ybl* atmosfera seca: (a) fora do enlace; (b) enlace interrupção em 1/3; (c) enlace interrupção em 2/3; (d) detalhe região fora do enlace; (e) detalhe região de enlace interrupção em 1/3 do total de ciclos; (f) detalhe região de enlace interrupção em 2/3.



Fonte: Próprio Autor

A Figura 27 apresenta a superfície dos multifilamentos após o ensaio de desgaste do PET A com carga de 4% *Ybl* em atmosfera úmida. Para a interrupção em 2/3 (f), além da presença de adesão (círculo azul), observa-se uma pequena quantidade de delaminação, indicada pelas setas vermelhas, porém bem mais sutil que a observada em atmosfera seca.

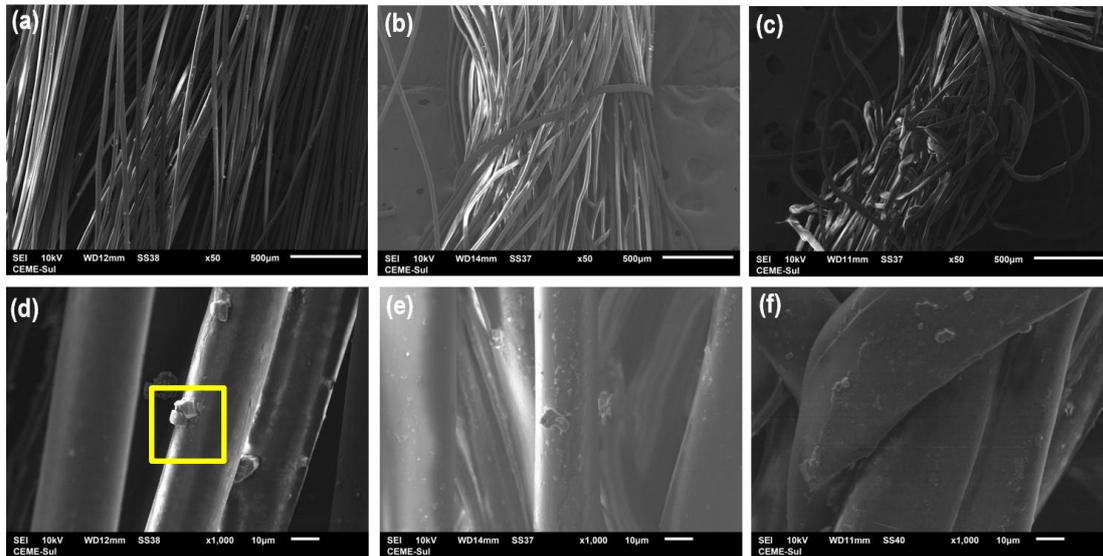
Figura 27. Superfícies dos filamentos após ensaios de desgaste em PET A 4% *Ybl* atmosfera úmida: (a) fora do enlace; (b) enlace interrupção em 1/3; (c) enlace interrupção em 2/3; (d) detalhe região fora do enlace; (e) detalhe região de enlace interrupção em 1/3 do total de ciclos; (f) detalhe região de enlace interrupção em 2/3.



Fonte: Próprio Autor

A Figura 28 apresenta a superfície dos multifilamentos após o ensaio de desgaste do PET A com carga de 4% na atmosfera salina. Chama-se atenção primeiramente ao grão de NaCl identificado com uma seção quadrada em amarelo indicado no detalhe da região lisa (d). A região de enlace para interrupção em 1/3 (f) apresenta poucos sinais de delaminação e adesão de material, que se mantém para interrupção em 2/3.

Figura 28. Superfícies dos filamentos após ensaios de desgaste em PET A 4% *Ybl* atmosfera salina: (a) fora do enlace; (b) enlace interrupção em 1/3; (c) enlace interrupção em 2/3; (d) detalhe região fora do enlace; (e) detalhe região de enlace interrupção em 1/3 do total de ciclos; (f) detalhe região de enlace interrupção em 2/3.

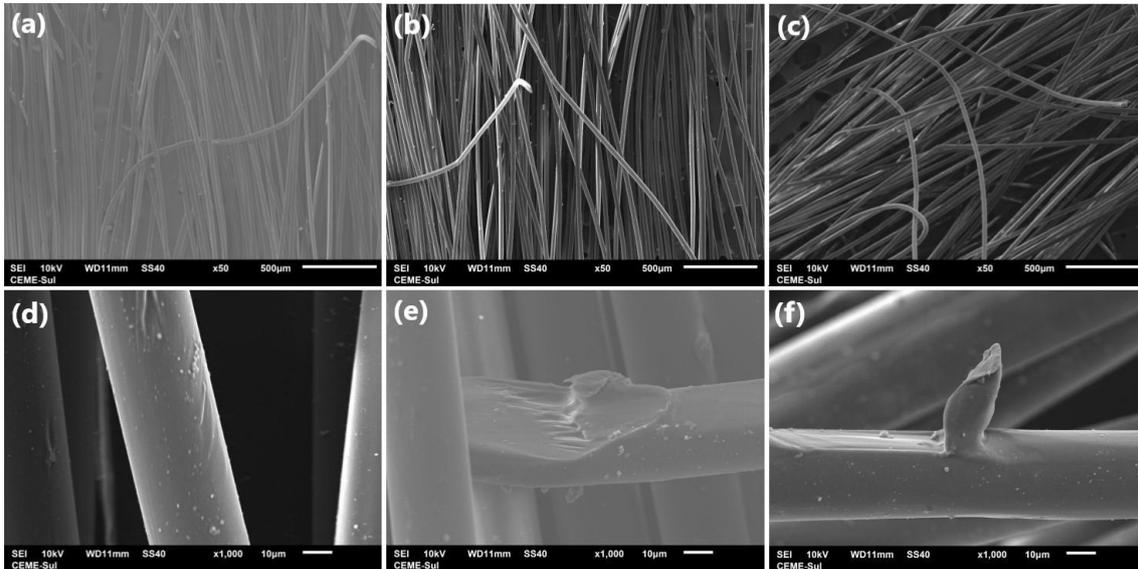


Fonte: Próprio Autor

4.5.4. Mecanismos de desgaste PET A carga 6% *Ybl*

A Figura 29 apresenta a superfície dos multifilamentos após o ensaio de desgaste do PET A com carga de 6% na atmosfera seca. O teste levou a um desgaste severo em condições secas, isso deve-se ao fato de expor o multifilamento a uma maior carga no ensaio quando comparado ao de 4% *Ybl*. No detalhe da zona de enlace para interrupção em 1/3 (e) percebe-se significativa perda de massa no monofilamento. No detalhe da zona de enlace 2/3 (f) evidencia-se o mecanismo de remoção de material da superfície do monofilamento.

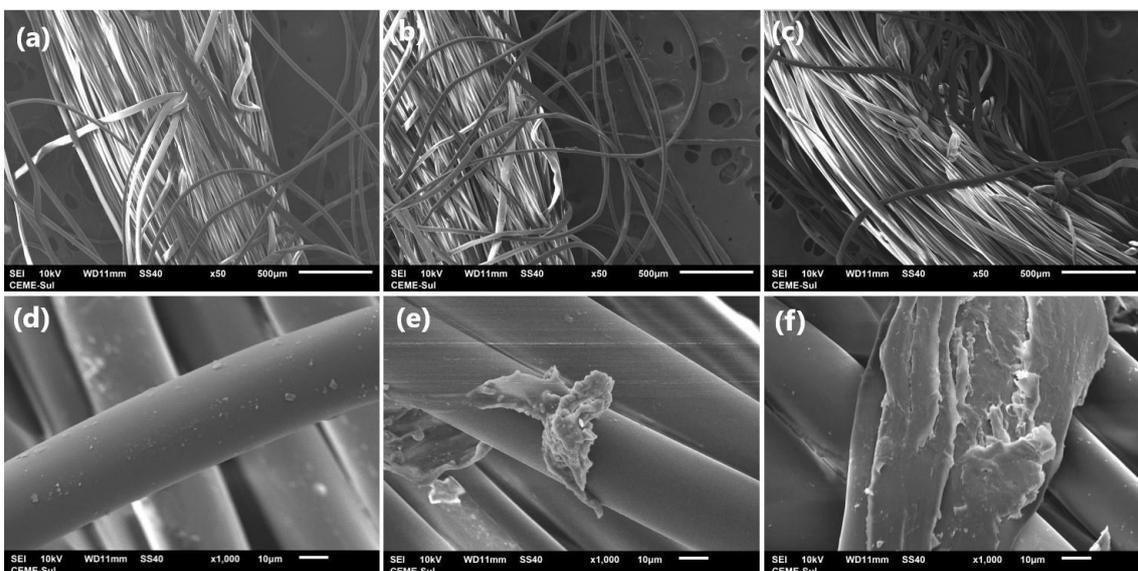
Figura 29. Superfícies dos filamentos após ensaios de desgaste em PET A 6% *Ybl* atmosfera seca: (a) fora do enlace; (b) enlace interrupção em 1/3; (c) enlace interrupção em 2/3; (d) detalhe região fora do enlace; (e) detalhe região de enlace interrupção em 1/3 do total de ciclos; (f) detalhe região de enlace interrupção em 2/3.



Fonte: Próprio Autor

A Figura 30 apresenta a superfície dos multifilamentos após o ensaio de desgaste do PET A com carga de 6% na atmosfera úmida. Apesar de uma delaminação menor que a observada na condição seca, observa-se um aumento do dano quando comparado com o ensaio realizado para uma carga de 4% *Ybl*.

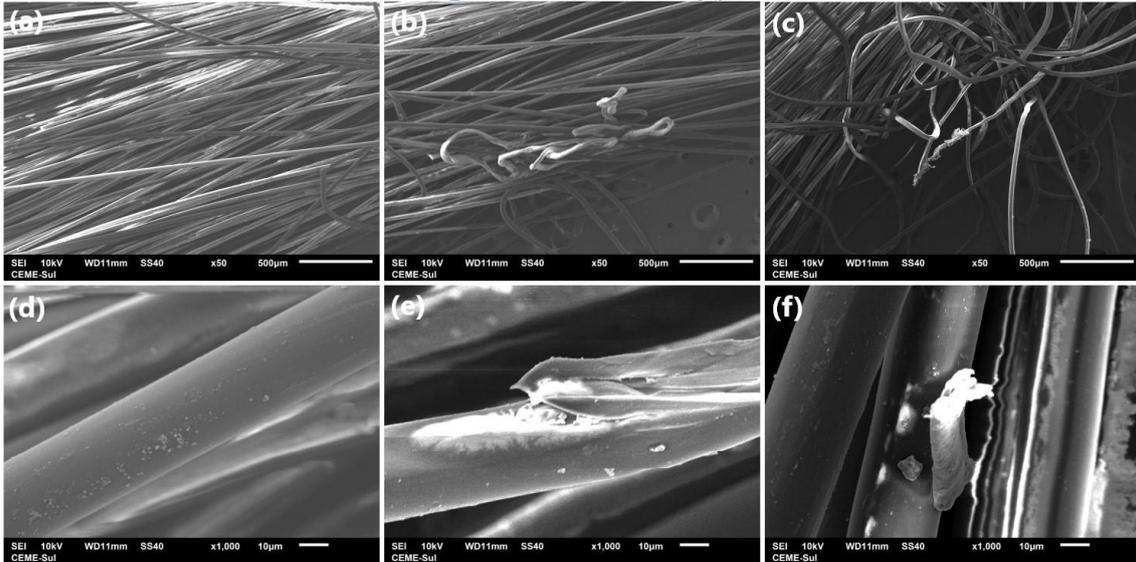
Figura 30. Superfícies dos filamentos após ensaios de desgaste em PET A 6% *Ybl* atmosfera úmida: (a) fora do enlace; (b) enlace interrupção em 1/3; (c) enlace interrupção em 2/3; (d) detalhe região fora do enlace; (e) detalhe região de enlace interrupção em 1/3 do total de ciclos; (f) detalhe região de enlace interrupção em 2/3.



Fonte: Próprio Autor

A Figura 31 apresenta a superfície dos multifilamentos após o ensaio de desgaste do PET A com carga de 6% na atmosfera salina. Observa-se novamente uma menor delaminação que na condição seca, porém maior que a observada na condição úmida.

Figura 31. Superfícies dos filamentos após ensaios de desgaste em PET A 6% *Ybl* atmosfera salina: (a) fora do enlace; (b) enlace interrupção em 1/3; (c) enlace interrupção em 2/3; (d) detalhe região fora do enlace; (e) detalhe região de enlace interrupção em 1/3 do total de ciclos; (f) detalhe região de enlace interrupção em 2/3.

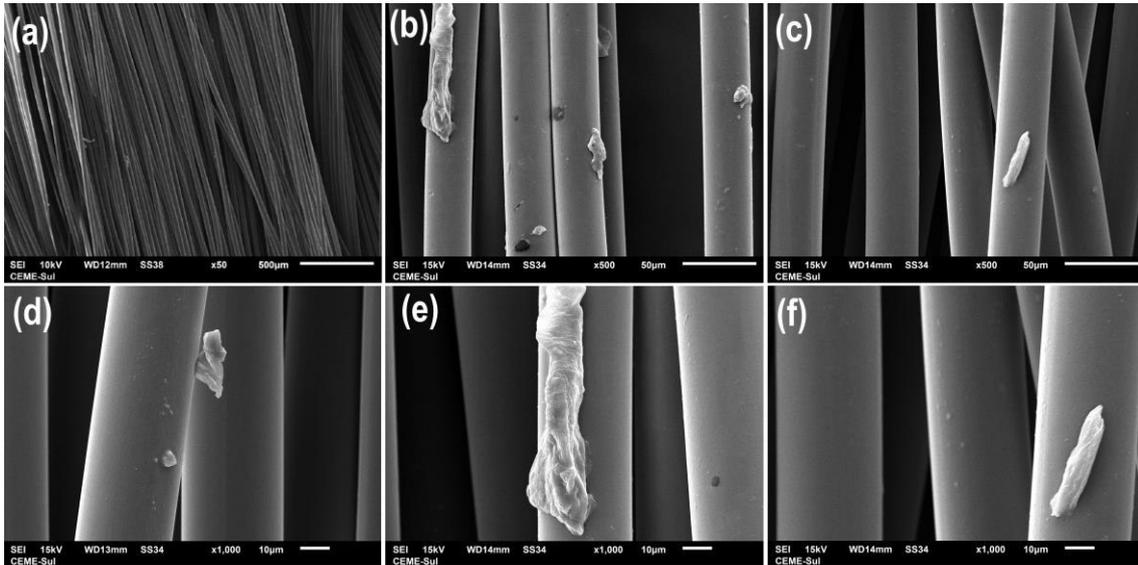


Fonte: Próprio Autor

4.5.5. Mecanismos de desgaste PA 4% *Ybl*

A Figura 32 apresenta a superfície dos monofilamentos após o ensaio de desgaste da poliamida (PA) com carga de 4% em atmosfera seca. Percebe-se pontos específicos com material aderido nos detalhes das regiões de enlace e mecanismos de desgaste menos agressivo comparado com respectivos ensaios 4% *Ybl* secos dos PETs A e B, com pouca delaminação e alguma adesão. Os mecanismos de desgaste observados na PA para uma carga de 6% a seco foram semelhantes aos observados a 4% e por esse motivo não serão apresentados.

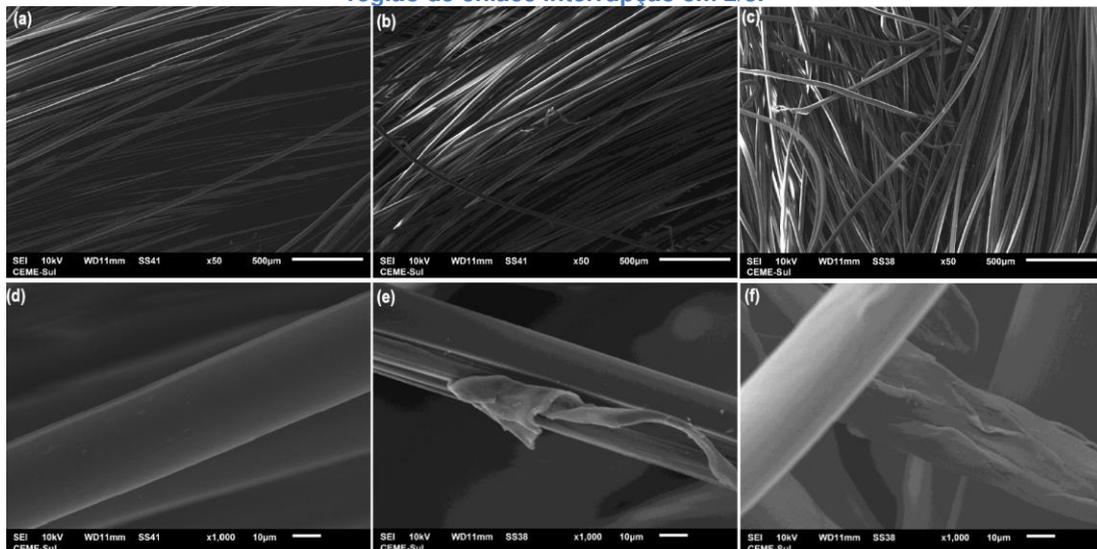
Figura 32. Superfícies dos filamentos após ensaios de desgaste em PA 4% *Ybl* atmosfera seca: (a) fora do enlace; (b) enlace interrupção em 1/3; (c) enlace interrupção em 2/3; (d) detalhe região fora do enlace; (e) detalhe região de enlace interrupção em 1/3 do total de ciclos; (f) detalhe região de enlace interrupção em 2/3.



Fonte: Próprio Autor

A Figura 33 apresenta a superfície dos monofilamentos após o ensaio de desgaste de poliamida com carga 4% em atmosfera úmida. Percebe-se sinais de adesão no detalhe e alguma delaminação da região de enlace com interrupção em 1/3 (e) a qual se mostrou um pouco mais intensa no detalhe da região de enlace com interrupção em 2/3 (f).

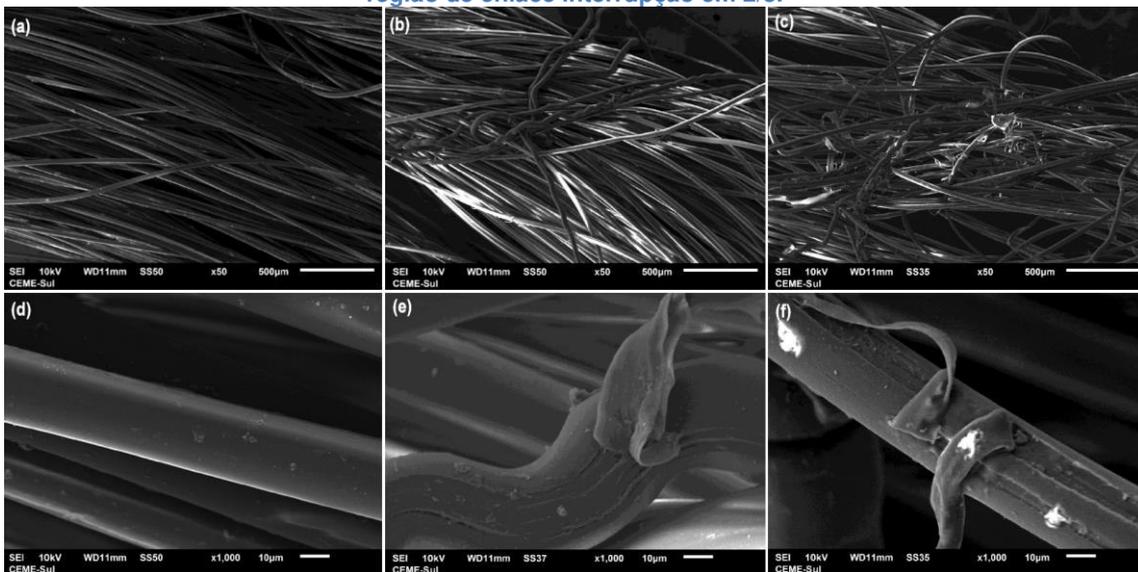
Figura 33. Superfícies dos filamentos após ensaios de desgaste em PA 4% *Ybl* atmosfera úmida: (a) fora do enlace; (b) enlace interrupção em 1/3; (c) enlace interrupção em 2/3; (d) detalhe região fora do enlace; (e) detalhe região de enlace interrupção em 1/3 do total de ciclos; (f) detalhe região de enlace interrupção em 2/3.



Fonte: Próprio Autor

A Figura 34 apresenta a superfície dos monofilamentos após o ensaio de desgaste de poliamida com carga 4% em atmosfera salina. Observa-se sinais de delaminação nos detalhes das regiões de enlace (e) e (f).

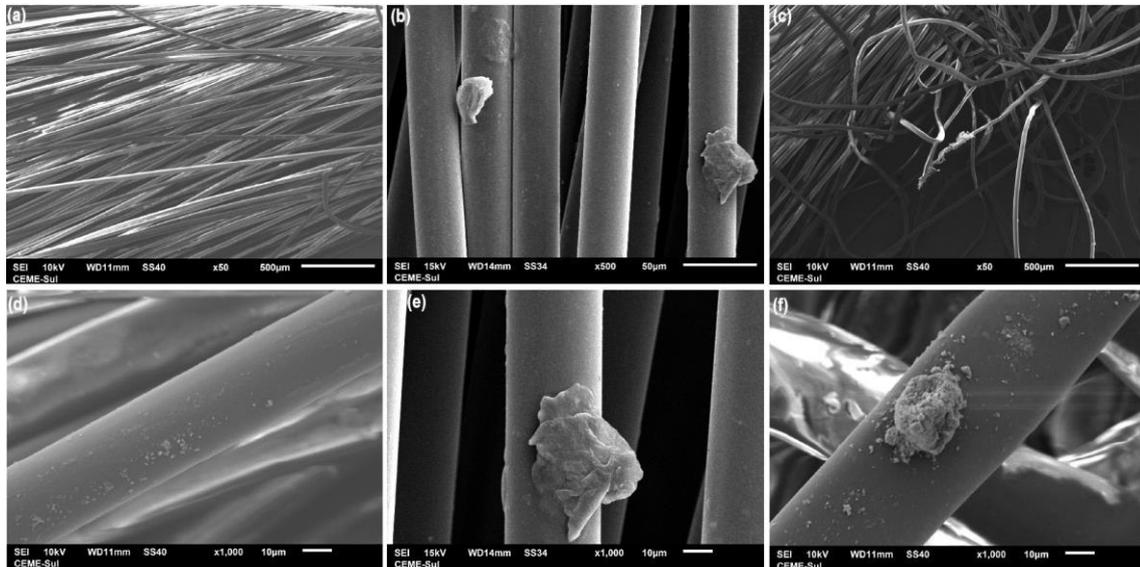
Figura 34. Superfícies dos filamentos após ensaios de desgaste em PA 4% Yb/ atmosfera salina: (a) fora do enlace; (b) enlace interrupção em 1/3; (c) enlace interrupção em 2/3; (d) detalhe região fora do enlace; (e) detalhe região de enlace interrupção em 1/3 do total de ciclos; (f) detalhe região de enlace interrupção em 2/3.



Fonte: Próprio Autor

A Figura 35 apresenta a superfície dos monofilamentos após o ensaio de desgaste de poliamida com carga 6% em atmosfera úmida. Percebe-se pontos de adesão no detalhe da região de enlace 1/3 (e) e acúmulo de material no detalhe da região de enlace 2/3 (f), mas negligenciável ocorrência de delaminação.

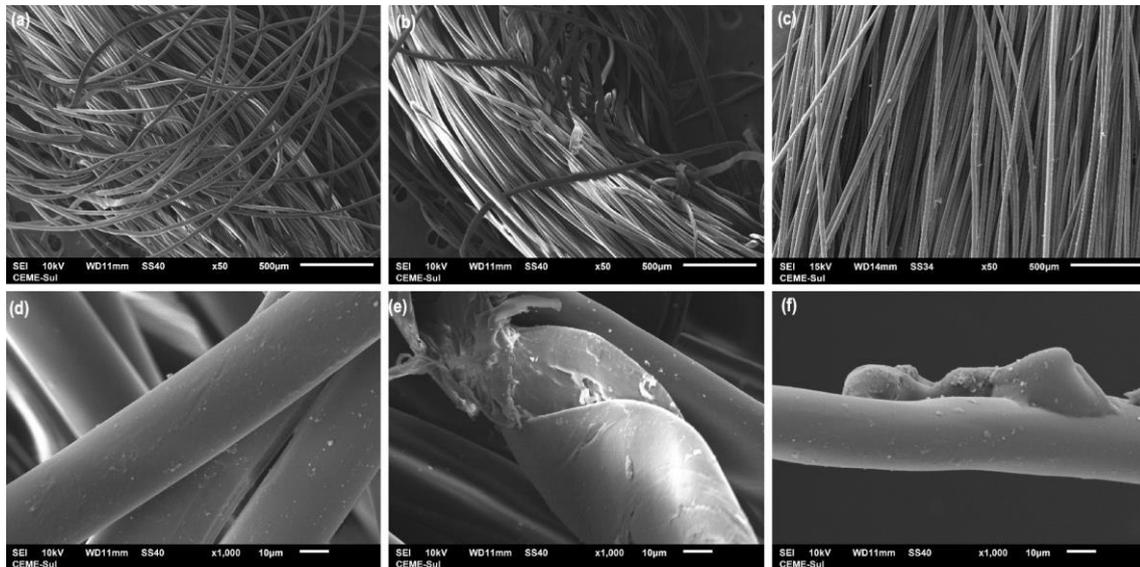
Figura 35. Superfícies dos filamentos após ensaios de desgaste em PA 6% atmosfera úmida: (a) fora do enlace; (b) enlace interrupção em 1/3; (c) enlace interrupção em 2/3; (d) detalhe região fora do enlace; (e) detalhe região de enlace interrupção em 1/3 do total de ciclos; (f) detalhe região de enlace interrupção em 2/3.



Fonte: Próprio Autor

A Figura 36 apresenta a superfície dos monofilamentos após o ensaio de desgaste de poliamida com carga 6% em atmosfera salina. Apesar da presença da delaminação ser pequena, percebe-se no detalhe da região de enlace em 1/3 (e) o possível local de rompimento do monofilamento. O detalhe da região de enlace 2/3 (f) indica grande adesão no monofilamento, além de alguma delaminação.

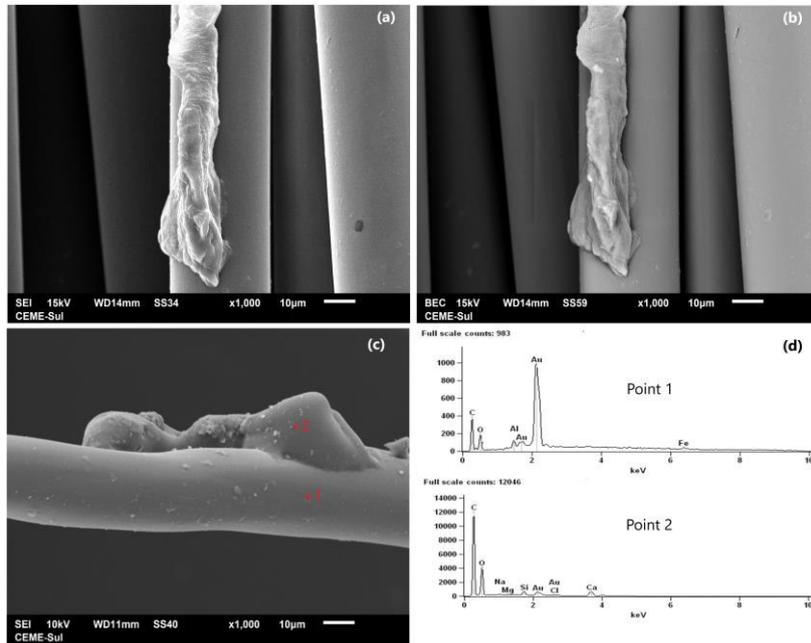
Figura 36. Superfícies dos filamentos após ensaios de desgaste em PA 6% atmosfera salina: (a) fora do enlace; (b) enlace interrupção em 1/3; (c) enlace interrupção em 2/3; (d) detalhe região fora do enlace; (e) detalhe região de enlace interrupção em 1/3 do total de ciclos; (f) detalhe região de enlace interrupção em 2/3.



Fonte: Próprio Autor

Com relação aos mecanismos de desgaste atuantes em todos os cabos poliméricos avaliados, identificou-se a ocorrência de delaminação dos monofilamentos e adesão. Essa adesão observada nos monofilamentos pode ser confirmada por imagens de elétrons retroespalhados nas regiões dentro do enlace, conforme exemplificado na Figura 37. Comparando-se as imagens (a) e (b) tem-se que a aparente adesão observada pela imagem de elétrons secundários confirma-se porque não existe contraste de composição na imagem de elétrons retroespalhados apresentada em (b), ou seja, trata-se de material com mesma composição que provavelmente aderiu-se a este monofilamento. Em (c) foram selecionadas uma região no monofilamento (1) e outra na região de aparente adesão (2), nas quais foram feitas análises de EDS após ensaios em atmosfera salina. Nos espectros apresentados em (d) os picos de ouro estão associados à deposição executada para tornar os filamentos condutores e devem ser ignorados. A única diferença entre os espectros das regiões (1) e (2) é a presença de pequena quantidade de Na e Cl na região aderida resultante da atmosfera salina do ensaio, mas trata-se do mesmo material do monofilamento, provavelmente proveniente de pequenos destroços arrancados de outros monofilamentos, que foram aglutinados, deformados e aderidos à superfície.

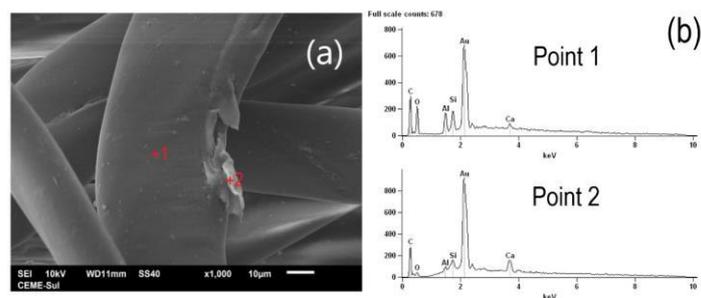
Figura 37. Exemplos de ocorrência do mecanismo de adesão em PA: (a) a seco 4% *Ybl*, 1/3, elétrons secundários; (b) a seco 4% *Ybl*, 1/3, elétrons retroespalhados; (c) PA atmosfera salina 6% *Ybl*, 2/3 elétrons secundários; (d) espectros EDS de pontos selecionadas em (c).



Fonte: Próprio Autor

No caso da ocorrência de delaminação, análises de EDS também confirmam composições semelhantes nas regiões onde ocorre delaminação e no restante do monofilamento. Isso é exemplificado na Figura 38 para um cabo de polietileno em estado virgem, carga 6% *Ybl*, atmosfera úmida.

Figura 38. Exemplo de análise de EDS em regiões onde ocorreu delaminação para um cabo PET B, 6% *Ybl* em 1/3, atmosfera úmida: (a) pontos selecionados na imagem MEV; (b) espectros de EDS.



Fonte: Próprio Autor

De acordo com Hutchings [2017], fadiga de contato é um importante mecanismo de desgaste para polímeros termoplásticos quando estes deslizam em relação a um contracorpo liso. Trincas (principalmente associadas com deformação elástica) são formadas causando um dano cumulativo à medida em que o número de ciclos de contato aumenta. Adesão é um outro mecanismo de desgaste interfacial que comumente ocorre em polímeros em movimento relativo contra superfícies lisas. Em nenhuma das análises de MEV realizadas neste trabalho a ocorrência de abrasão foi observada. Dessa forma, sugere-se que a nomenclatura utilizada em ensaios de desgaste fio-contra-fio (“Standard Test Method for Wet and Dry Yarn-on-Yarn Abrasion Resistance Cracks”) definido pela norma ASTM D1776 [2007] esteja equivocado. Espera-se que os resultados aqui apresentados possam servir de base para que engenheiros das áreas de tribologia e comportamento mecânico possam juntos repensar conceitos utilizados na área.

Sumarizando-se os resultados dos ciclos suportados pelos cabos até a sua ruptura durante os ensaios de desgaste *yarn-on-yarn*, para a carga em 4% *Ybl*, percebeu-se certa similaridade em ciclos de ruptura para o cabo de poliéster previamente usado (PET A) em todas as atmosferas (seca, úmida e salina), enquanto o poliéster virgem (PET B) mostrou maior resistência em atmosfera salina (3,68x em relação à atmosfera seca) e em seguida pela atmosfera úmida (3,3x em relação à atmosfera seca). Já o cabo de poliamida mostrou menores resistências em relação aos poliésteres, mostrando resistência muito baixa em atmosfera seca. Isso evidenciou o quão agressiva é a carga de 4% para esse cabo polimérico. Os ensaios em condição úmida e salina levaram a resultados bem superiores à condição seca, mas para o cabo de poliamida a atmosfera úmida sobressaiu-se 1,84x em relação à atmosfera salina. A respeito aos ensaios de desgaste com carga 6% percebe-se que em ambos os materiais a atmosfera seca é extremamente agressiva, na qual todos os ensaios mostraram baixíssima resistência. Comparando os ensaios em atmosferas úmida e salina, as diferenças observadas entre as atmosferas úmida e salina não foram estatisticamente significativas seja para o cabo de poliéster virgem ou usado.

Para o cabo virgem de poliamida, novamente a atmosfera úmida levou a comportamento superior em relação à atmosfera salina.

Em todas as condições testadas, o número de ciclos suportado pelo cabo de poliamida foi bem inferior aos cabos de poliéster, por exemplo comparando com o poliéster virgem, sobre cargas de 4% mostrou-se inferioridade de 3,22x ciclos em atmosfera úmida e 3,59x ciclos em atmosfera salina, já sobre cargas de 6% a diferença é ainda mais significativa sendo inferior 4,19x ciclos em atmosfera úmida e 9,74x ciclos em atmosfera salina . Isso corrobora os resultados encontrados por Ross [1996] que também realizou ensaios *yarn-on-yarn* em vários tipos de multifilamentos, concluindo que fibras com maior peso molecular (consequentemente maior título) apresentam melhor desempenho.

As análises em MEV mostraram para o cabos de poliéster virgem muito mais delaminação na condição a seco (análise visual). Os ensaios na condição úmida diminuíram muito a ocorrência de delaminação, e ainda menor delaminação foi observada na atmosfera salina, apesar de as diferenças entre as atmosfera úmida e salina serem menores para a carga de 6% *Ybl*. Já para o cabo de poliéster previamente usado, os mecanismos de desgaste não foram tão diferentes entre as condições a seco, úmida e a salina como havia sido observado para o cabo virgem. Para o cabo de poliamida, também houve uma tendência de menor delaminação em atmosfera úmida. Já para a atmosfera salina a morfologia de desgaste foi intermediária entre as condições a seco e úmida.

Acredita-se que um dos efeitos da presença de água no ensaio possa estar associado à troca do calor gerado pelo atrito entre os fios. Tal hipótese também foi levantada por Poodts et al [2013] ao avaliarem o efeito da presença de água do mar durante ensaios de fadiga em multifilamentos poliméricos, ao encontrarem maior vida em fadiga em atmosfera salina. Esse efeito deve ser relevante porque polímeros têm baixa condutividade térmica, portanto baixa dissipação do calor gerado pelo atrito, portanto tendem a concentrar calor na zona de fricção. Por exemplo, para testes *yarn-on-yarn* em polímeros, Sheng [2021] sugere que o calor gerado pode amolecer a fibra, deteriorando sua resistência ao desgaste. Por esse motivo, quando revestimentos que aumentam

a condutividade térmica são aplicados aos filamentos, tem-se uma tendência a aumentar sua resistência ao desgaste em ensaios *yarn-on-yarn* [Ning et al, 2021].

Outro efeito pode estar associado à formação de um filme lubrificante líquido entre os monofilamentos. Tal efeito foi sugerido por Chen et al [2012] quando realizaram ensaios de desgaste bloco-sobre-anel em misturas de polímeros contra anéis de aço inoxidável 316, ao encontrarem menores taxas de desgaste para testes realizados em água marinha.

Porém, os dois efeitos citados acima não conseguem explicar porque o desgaste do cabo de poliéster usado, mesmo na condição a seco, teve desempenho comparável ao do poliéster virgem nas condições úmidas. Considerando-se a natureza altamente higroscópica das fibras poliméricas e sua elevada capilaridade (ALMOUGHNI; GONG, 2015), é razoável supor um efeito da presença de umidade no desgaste do poliéster associado a possível água absorvida, a qual durante o deslizamento pode formar um tribofilme protetor na superfície dos monofilamentos, reduzindo o seu desgaste.

Outra importante observação foi um melhor comportamento tribológico do cabo de poliéster virgem em atmosfera salina quando comparado com a atmosfera úmida. Acredita-se que as moléculas de NaCl atuem na formação de um tribofilme protetor, mas essa hipótese precisa ser investigada em mais profundidade em trabalhos futuros. Já para a poliamida, a presença de NaCl resultou em um pior comportamento quando comparado com a atmosfera úmida.

5. CONCLUSÕES

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões elaboradas a partir dos resultados obtidos por este trabalho. Inicialmente, conclui-se que foi possível com o método aplicável, verificar a evolução do comportamento dos mecanismos de desgaste presentes em diferentes materiais para cabos de ancoragem via ensaio de abrasão *yarn-on-yarn*.

O trabalho identificou que os mecanismos de desgaste para todas as amostras testadas foram delaminação e adesão, sem ocorrência de abrasão, corroborando a hipótese que o termo “abrasão” na nomenclatura da norma para ensaios *yarn-on-yarn* é equivocada.

Os ensaios de tração mostraram que o poliéster virgem possui maior resistência à ruptura (Yb) seguido da poliamida e finalmente o cabo de poliéster previamente usado. Os resultados também mostraram que o poliéster usado apresentou menores alongamentos e deformações devido ao fato do mesmo cabo e sub cabos já serem usados e ensaiados em laboratório. Entre os materiais virgens, o cabo de poliamida apresentou aproximadamente 1,72x maior alongamento e deformação em relação ao poliéster.

O ensaio de título mostrou que o poliéster virgem possui 1,55x maior densidade que o poliéster usado e 1,20x maior que o cabo de poliamida. Isso refletiu diretamente no ensaio de tração, que apresentou a mesma tendência.

A presença de uma atmosfera úmida durante os ensaios diminuiu a ocorrência do mecanismo de delaminação e adesão, o que corroborou os resultados dos ensaios de desgaste *yarn-on-yarn*, nas quais, tanto para o cabo de poliéster quanto de poliamida, a presença de água aumentou significativamente o número de ciclos suportados antes da ocorrência da sua ruptura.

Com relação à presença de NaCl no meio, este reduziu a delaminação e aumentou a resistência ao desgaste do poliéster virgem quando comparado com a atmosfera úmida. Já para o cabo de poliamida virgem, o comportamento

tribológico foi inferior na presença de atmosfera salina quando comparado com a atmosfera úmida.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros indicam-se os seguintes aspectos a serem avaliados:

- Controlar temperatura e umidade na sala de ensaio de desgaste, de modo que a variação contemplada em norma não efetue o resultado do experimento;
- Realizar ensaio de FTIR para verificar composição química sob efeito da condição úmida e salina.
- Caracterização química da água do mar coletada, para verificar propriedades e componentes presentes na preparação e no decorrer do ensaio em atmosfera salina;
- Realizar ensaios com mais opções de carga;
- Correlacionar YbI de ensaio de tração em ensaio de desgaste de amostras de diferentes materiais;
- Realizar novas intervenções de vida útil e levar ao MEV verificar comportamento e mecanismos de desgaste;
- Controlar a temperatura da região de enlace em ensaios em atmosfera úmida e salina a fim de garantir maior similaridade com a atuação do cabo de ancoragem;
- Estudar o comportamento da transferência de calor da região de enlace para o meio do ensaio;
- Comparar ensaios em MEV de cabos de ancoragem virgem e usado de mesmo fabricante com e sem acabamento superficial;
- Estudar, utilizando técnicas superficiais mais adequadas, a hipótese da presença de tribofilmes protetores. Caso estes sejam evidenciados, caracterizar detalhadamente sua composição e morfologia.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALIREZAZADEH, Azam, et al. "Fiber-on-fiber friction measurement using hanging fiber method." *The Journal of The Textile Institute* 109.5 2018.

ALMOUGHNI, H.; GONG, H. Capillary flow of liquid water through yarns: a theoretical model. *Textile Research Journal*, 85, n. 7, p. 722-732, May 2015.

ARAÚJO, Mario de; CASTRO, Ernesto Manuel de Melo e. *Manual da Engenharia Têxtil*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1986-87. Volume 1.

ASTM Standards, D1776/2007. ASTM 6611-00 Standard Test Method for Wet and Dry Yarn-on-Yarn Abrasion Resistance. *PO Box C700, West Conshohocken, Estados Unidos*.

BAYER, Raymond J. *Mechanical Wear Fundamentals and Testing*, revised and expanded. CRC Press, 2004.

BOWER, David I. *An Introduction to Polymer Physics*; Cambridge University Press: Cambridge, 2002.

BURWELL, Jim T. Survey of possible wear mechanisms. *Wear*, 1, p. 119-141, 1957.

CALLISTER JR., William D. *Ciência e Engenharia de Materiais*. 7ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CANEVALORO JR., Sebastião Vicente, *Ciência dos Polímeros*. São Paulo: Artliber, 2006.

CHEN, Beibei, Jianzhang Wang, and Fengyuan Yan. "Microstructure of PTFE-based polymer blends and their tribological behaviors under aqueous environment." *Tribology letters* 45.3 2012.

CHIMISSO, Fulvio Enrico Giacomo; Mattos, Heraldo da Costa, *Modelling creep tests in HMPE fibers used in ultra-deep-sea mooring ropes*. *International Journal of Solids and Structures*, v.48, n.1, p. 144-152, 2011.

COHEN, S. C., and David Tabor. "The friction and lubrication of polymers." *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences* 291.1425 1966.

Cordage Institute, CI 1503-99. Test Method for Yarn-on-Yarn Abrasion. 2009. PA 19087, Wayne, Estados Unidos.

DASGUPTA, Siddharth, Willis B. Hammond, and William A. Goddard. "Crystal structures and properties of nylon polymers from theory." *Journal of the American Chemical Society* 118.49, 1996.

FERRY, John D., and Robert A. Stratton. "The free volume interpretation of the dependence of viscosities and viscoelastic relaxation times on concentration, pressure, and tensile strain." *Kolloid-Zeitschrift* 171.2, 1960.

FROLUND, Bo, et al. "Extraction of extracellular polymers from activated sludge using a cation exchange resin." *Water research* 30.8, 1996.

FUKU, Tadashi et al. Fatigue properties and analysis of flexible risers. 24th Offshore Technology Conference, Houston, p. 35-41, 1992.

HAGE JR, Elias. Aspectos Históricos sobre o Desenvolvimento da Ciência e da Tecnologia de Polímeros. *Polímeros*, v. 8, n. 2, p. 6-9, 1998.

HERDUIM, Manuel; Banfield, Stephen; Weller, Sam; Thies, Philipp; Johanning, Lars. Abrasion Process between a fiber mooring line and a corroded steel element during the transit and commissioning of a marine renewable energy device. *Engineering Failure Analysis*, Elsevier, 2015.

HUANG, P-K., et al. "Multi-principal-element alloys with improved oxidation and wear resistance for thermal spray coating." *Advanced Engineering Materials*, 2004.

HUNDERTMARK, Thomas et al. How plastics waste recycling could transform the chemical industry. *McKinsey & Company*, v. 12, 2018.

HUTCHINGS, Ian; SHIPWAY, Philip. *Tribology: friction and wear of engineering materials*. Butterworth-Heinemann, 2017.

KAYABA, T., and K. Kato. "Theoretical representation of the coefficient of friction for multiple contact points." *Wear* 52.1, 1979.

KOHAN, Melvin Ira, ed. *Nylon plastics*. Wiley, 1973.

KOHAN, Melvin Ira, ed. Nylon plastics handbook. Hanser&Gardner publications inc, New York, 631p, 1995.

LACERDA, Thiago Ângelo Gonçalves de. Análise de sistemas de ancoragem de plataforma flutuantes. 2005. 67 f. Projeto de final de curso (Graduação em engenharia civil) – Escola politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

LÉPORE, Paula Ferreira. Implementação de um procedimento de projeto estrutural e homologação de umbilicais. Tese (Doutorado) – Escola politécnica, Universidade de São Paulo.2003.

LUDEMA, K. C., and D. Tabor. "The friction and visco-elastic properties of polymeric solids." Wear 9.5, 1966.

MANO, Eloisa Biasotto; MENDES, Luís Cláudio. Introdução a polímeros. 2.ed São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda, 1999.

MCLAREN, A. J. Design and performance of ropes for climbing and sailing. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, v. 220, n. 1, p. 1-12, 2006.

NING, Fanggang, et al. "Thermal failure mechanism of fiber ropes when bent over sheaves." Textile Research Journal 89.7 2019.

NING, Fanggang, et al. "Yarn on yarn abrasion performance of high modulus polyethylene fiber improved by graphene/polyurethane composites coating." Journal of Engineered Fibers and Fabrics 16, 2021.

GORNI, Antonio Augusto. A Evolução dos Materiais Poliméricos ao Longo do Tempo. São Paulo: Aranda, 2003.

OLIVIER, Nelson Cárdenas; Análise de falha da camada polimérica externa de cabos umbilicais. Ed. rev. São Paulo, 2007.

PALMA, Jorge. Fibras, Filamentos e Fios. Rio de Janeiro, 2003.

PAOLI, Marco Aurelio. Degradação e estabilização de polímeros. São Paulo: Editora Chemkeys, 2008.

PESSAN, LA, and E. HAGE JR. "Curso UFSCar: Correlação entre processamento, estrutura e propriedades dos polímeros, Aperfeiçoamento em tecnologia de plásticos." 2002.

PITT, Fernando Darci; Boing, Denis; BARROS, Antônio André Chivanga. Desenvolvimento Histórico, Científico e Tecnológico de Polímeros Sintéticos e de Fontes Renováveis. Brusque: Revista da UNIFEBE, [S.l.], v.1, nov. 2011.

POGACNIK, A., and M. Kalin. "Parameters influencing the running-in and long-term tribological behaviour of polyamide (PA) against polyacetal (POM) and steel." *Wear* 290, 2012.

POODTS, E., G. Minak, and A. Zucchelli. "Impact of sea-water on the quasi static and fatigue flexural properties of GFRP." *Composite Structures* 97 2013.

RADICI, N. "Polyamides, Properties and Resistance to Chemicals Agents." 2001.

RANDHAWA, Kawaljit Singh, and Ashwin D. Patel. "Influence of water absorption on friction, wear and abrasion resistance of PA6-hBN composites." *Engineering Research Express* 3.3 2021.

ROBERTS, Phil; STENVERS, Danielle. Residual Strength Testing of Dyneema, Fibre Tuglines, ITS 2002 – The 17th International Tug and Salvage Convention and Exhibition, Bilbao, Spain, 3-17 May 2002.

ROSA, Derval dos Santos. Correlação entre Envelhecimentos acelerado e natural do polipropileno isotático (PPi). 230f. Tese de doutorado, Curso de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 1996.

ROSS, Stanley E., and Harold W. Wolf. "Abrasion characteristics of polypropylene yarns." *Journal of Applied Polymer Science* 10.10 1966.

SASADA, Tadashi, Mamoru Oike, and Nobuhiko Emori. "The effect of abrasive grain size on the transition between abrasive and adhesive wear." *Wear* 97.3, 1984.

SCHUITEK, Aloisio José. "Study of wear behavior of mettalic materials in circular scratching test [doctor thesis]." USP: Polytechnic School, 2007.

SHENG, Chunfu, et al. "Yarn on yarn abrasion failure mechanism of ultrahigh molecular weight polyethylene fiber." *Journal of Engineered Fibers and Fabrics* 16, 2021.

SUH, Nam P. "The delamination theory of wear." *Wear* 25.1, 1973.

TURNBULL, A.; WHITE, J.R. Weathering of polymers: mechanims of degradation and stabilization, testing strategies and modelling. *Journal of Materials and Science*, 29,pg 584-613, 1994.

UKOOA Work Group. State of the art flexible risers integrity issues. Study report for MSC International. 2001.

UNAL, H., et al. "Sliding friction and wear behaviour of polytetrafluoroethylene and its composites under dry conditions." *Materials & Design* 25.3, 2004.

WANG, Fei; HUANG, Guo-liang; DENG,De-heng. Steady state analysis of towed marine cables. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, v.13, n.2, p. 239-244, 2008.

WATANABE, Makoto, and Haruchiyo Yamaguchi. "The friction and wear properties of nylon." *Wear* 110.3-4, 1986.

ZUM GAHR, K-H. *Microstructure and wear of materials*. Vol. 10. Elsevier, 1987.