

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

EDUARDA DA SILVA BELLONI

**INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL SOBRE O COMPORTAMENTO MECÂNICO DE
MULTIFILAMENTOS DE POLIETILENO DE ALTO MÓDULO APÓS SOFREREM
CARREGAMENTOS DINÂMICOS**

RIO GRANDE
2019

EDUARDA DA SILVA BELLONI

**INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL SOBRE O COMPORTAMENTO MECÂNICO DE
MULTIFILAMENTOS DE POLIETILENO DE ALTO MÓDULO APÓS SOFREREM
CARREGAMENTOS DINÂMICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica.
Área de Concentração: Materiais sintéticos Orientador:
Prof. Dr. Carlos Eduardo Marcos Guilherme.

RIO GRANDE

2019

EDUARDA DA SILVA BELLONI

**INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL SOBRE O COMPORTAMENTO MECÂNICO DE
MULTIFILAMENTOS DE POLIETILENO DE ALTO MÓDULO APÓS SOFREREM
CARREGAMENTOS DINÂMICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica.
Área de Concentração: Materiais sintéticos

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Marcos Guilherme
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE

Prof. Dr. Kleber Eduardo Bianchi
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE

Prof^a. Dra. Amanda Dantas de Oliveira
UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS

AGRADECIMENTOS

A presente dissertação de mestrado não poderia chegar a bom porto sem o precioso apoio de várias pessoas. Em primeiro lugar, não posso deixar de agradecer aos meus familiares, pois sem eles não poderia ter concluído essa etapa. Agradeço também ao meu orientador, Professor Dr. Carlos Eduardo Marcos Guilherme, por toda a paciência, empenho e sentido prático com que sempre me orientou neste trabalho e em todos aqueles que realizei durante o período do mestrado.

Desejo igualmente agradecer aos técnicos do Laboratório de Análise de Tensões – POLICAB, principalmente ao técnico Devanir José de Oliveira, que teve papel importante para a conclusão do presente trabalho. Agradeço aos demais professores do programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica que fizeram parte da minha formação, em especial ao Professor Dr. Kleber Eduardo Bianchi. Por último, gostaria de agradecer às empresas que forneceram os materiais poliméricos necessários para a conclusão da pesquisa.

RESUMO

Os cabos sintéticos têm sido utilizados como alternativa para a substituição de cabos de aço, devido ao seu baixo peso específico e excelentes características mecânicas. São essenciais na ancoragem *offshore* de plataformas de petróleo em águas profundas, pois nessas profundidades o peso dos cabos e correntes de aço excederiam a capacidade de carga da estrutura da plataforma. Além disso, estão sendo utilizados em inúmeras aplicações, como nos campos robóticos, na forma de músculos artificiais, devido à alta flexibilidade; no alpinismo, resgates em incêndio e elevação de cargas, bem como, fechamento do esterno após cirurgia médica e endoscópios ativos. Essas aplicações geralmente são caracterizadas pela presença de esforços dinâmicos. Com isso, o presente trabalho teve como objetivo investigar experimentalmente o comportamento mecânico de multifilamentos de polietileno de alto módulo, fornecidos por três fabricantes diferentes, após sofrerem carregamentos de impacto, fadiga e interação entre eles. Parâmetros como força, deformação e energia absorvida após carregamento de impacto foram verificadas. Além disso, foi analisada a influência de um carregamento de impacto na vida em fadiga dos materiais. Por fim, análises térmicas através de calorimetria exploratória diferencial (DSC) e termografia (TGA), além de análises químicas, como espectrometria na região do infravermelho (FTIR), difração de raio x (DRX) e microanálise química elementar (EDS) foram feitas com o objetivo de comparar os materiais. Observou-se que o comportamento mecânico e térmico dos três materiais difere entre si. Além do que, existe uma redução da vida em fadiga dependendo do carregamento de impacto, pois há degradação de alguns filamentos, faz com que o material perca resistência. Por fim, conclui-se que as propriedades como resistência à tração não devem ser utilizadas como única referência para dimensionamento em projetos quando se trata de materiais poliméricos, visto que os materiais possuem resistência à tração semelhante, porém, nos outros testes apresentaram discrepância nos resultados.

Palavras-chave: Fadiga. Impacto. Filamentos. Cabos sintéticos. Degradação.

ABSTRAT

Synthetic ropes have been used as an alternative to replace wire ropes due to their low specific weight and excellent mechanical characteristics. They are essential for offshore mooring in deepwater, because at these depths the weight of steel cables and chains would exceed the forces supported by the platform structure. Besides, they are being used in many applications, such as robotic fields, as artificials muscles due to high flexibility, mountain climbing, fire rescue and lifting loads, as well as in sternum closure after medical surgery and active endoscopes. These applications are usually characterized by the presence of dynamic loads. Thus, the present work aimed to experimentally investigate the mechanical behavior of high modulus polyethylene yarns, supplied by three different manufacturers, after suffering impact load, fatigue and interaction between them. Parameters such as force, strain and energy absorbed after impact load were verified. In addition, the influence of impact load on fatigue life of the materials was analyzed. Finally, thermal analysis (DSC and TGA) and chemical analysis (FTIR, DRX and EDS) were made to compare the materials. It was observed that the mechanical and thermal behavior of the three materials differ and there is a reduction in fatigue life, wich depends on the impact load, due to yarns degradation. Finally, it is concluded that the properties such as tensile strength should not be used as a single parameter for size design when it comes to polymeric materials, since the three materials had similar tensile strength, but presented results discrepancy in the other tests.

Keywords: Fatigue. Impact load. Yarns. Ropes. Degradation.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - CLASSIFICAÇÃO DOS POLÍMEROS.....	21
FIGURA 2 - ORIENTAÇÃO MACROMOLECULAR DO HMPE E O PE REGULAR.....	24
FIGURA 3 - MODELO UTILIZADO NO ENA.....	28
FIGURA 4 - FORÇA VERSUS TEMPO NO CABO.....	29
FIGURA 5 - DIAGRAMA DE FORÇA VERSUS DEFORMAÇÃO. (SMAX) DEFORMAÇÃO MÁXIMA; (SVP) DEFORMAÇÃO VISCOPLÁSTICA; (SEL) DEFORMAÇÃO ELÁSTICA; (KINIT) RIGIDEZ INICIAL;(KEND) RIGIDEZ FINAL; (WDISS) ENERGIA DISSIPADA.....	31
FIGURA 6 - SITUAÇÃO DE ALPINISMO.....	35
FIGURA 7 - EXEMPLO DA SITUAÇÃO DE RESGATE DE UM BOMBEIRO.....	36
FIGURA 10 - ORGANOGRAMA DAS ETAPAS DA PESQUISA.....	48
FIGURA 28 - DIÂMETRO DOS FILAMENTOS DO HMPE 2.....	66
FIGURA 29 - DIÂMETRO DOS FILAMENTOS DO HMPE 3.....	66
FIGURA 31 - MEV DOS MULTIFILAMENTOS DE HMPE 2. (A) VIRGEM; (B) IMPACTO DE 4% DE YBL E (C) IMPACTO DE 5% DE YBL.....	67
FIGURA 37 - CURVA DO LOGARITMO DO NÚMERO DE CICLOS ATÉ A FALHA VERSUS A AMPLITUDE DE CARREGAMENTO PARA O HMPE 2.....	71
FIGURA 38 - CURVA DO LOGARITMO DO NÚMERO DE CICLOS ATÉ A FALHA VERSUS A AMPLITUDE DE CARREGAMENTO PARA O HMPE 3.....	72
FIGURA 43 - DIAGRAMA DO LOGARITMO DAS MÉDIAS DO NÚMERO DE CICLOS ATÉ A RUPTURA DO HMPE 1 E HMPE 2 PARA CARREGAMENTO CÍCLICO DE 50% - 90% DE YBL.....	82
FIGURA 46 - DIAGRAMA DO LOGARITMO DAS MÉDIAS DO NÚMERO DE CICLOS ATÉ A RUPTURA DOS TRÊS MATERIAIS PARA CARREGAMENTO CÍCLICO DE 10% - 90% DE YBL.....	87
FIGURA 52 - DIAGRAMA DO LOGARITMO DAS MÉDIAS DO NÚMERO DE CICLOS ATÉ A RUPTURA DOS TRÊS MATERIAIS PARA CARREGAMENTO CÍCLICO DE 60% - 90% DE YBL.....	96
FIGURA 52 - DIAGRAMA DO LOGARITMO DAS MÉDIAS DO NÚMERO DE CICLOS ATÉ A RUPTURA DOS TRÊS MATERIAIS PARA CARREGAMENTO CÍCLICO DE 70% - 90% DE YBL.....	97
FIGURA 54 - MÉDIA DA RIGIDEZ QUASE ESTÁTICA DOS TRÊS MULTIFILAMENTOS DE HMPE.....	99
FIGURA 56 - MÉDIA DA FLUÊNCIA DOS TRÊS MULTIFILAMENTOS DE HMPE PARA 80% DE YBL.....	101

FIGURA 60 - ESPECTROMETRIA DE ENERGIA DISPERSIVA (EDS) DO HMPE 2.	104
--	-----

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - FORÇA DE RUPTURA EM TRAÇÃO DOS MATERIAIS VIRGENS.....	59
TABELA 2 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA ENSAIOS DE IMPACTO COM QUEDA LIVRE DE 300 MM DO HMPE 1.	60
TABELA 3 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA ENSAIOS DE IMPACTO COM QUEDA LIVRE DE 300 MM DO HMPE 2.	61
TABELA 4 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA ENSAIOS DE IMPACTO COM QUEDA LIVRE DE 300 MM DO HMPE 3.	61
TABELA 5 - COMPARAÇÃO ENTRE FORÇAS DE RUPTURA POR IMPACTO E POR TRAÇÃO ESTÁTICA.	62
TABELA 6 - NÚMERO DE CICLOS ATÉ A RUPTURA OBTIDOS NOS ENSAIOS DE FADIGA COM AMPLITUDE DE 10% A 90% DE YBL.	73
TABELA 7 - NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA PARA HMPE 1 E HMPE 2 COM 10% - 90 % DE YBL DE AMPLITUDE.	74
TABELA 8 - NÚMERO DE CICLOS ATÉ A RUPTURA OBTIDOS NOS ENSAIOS DE FADIGA COM AMPLITUDE DE 20% A 90% DE YBL.	75
TABELA 9 - NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA PARA HMPE 1 E HMPE 2 COM 20% - 90 % DE YBL DE AMPLITUDE.	76
TABELA 10 - NÚMERO DE CICLOS ATÉ A RUPTURA OBTIDOS NOS ENSAIOS DE FADIGA COM AMPLITUDE DE 30% A 90% DE YBL.	77
TABELA 11 - NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA PARA HMPE 1 E HMPE 2 COM 30% - 90 % DE YBL DE AMPLITUDE.	77
TABELA 12 - NÚMERO DE CICLOS ATÉ A RUPTURA OBTIDOS NOS ENSAIOS DE FADIGA COM AMPLITUDE DE 40% A 90% DE YBL.	79
TABELA 13 - NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA PARA HMPE 1 E HMPE 2 COM 40% - 90 % DE YBL DE AMPLITUDE.	80
TABELA 14 - NÚMERO DE CICLOS ATÉ A RUPTURA OBTIDOS NOS ENSAIOS DE FADIGA COM AMPLITUDE DE 50% A 90% DE YBL.	81
TABELA 15 - NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA PARA HMPE 1 E HMPE 2 COM 50% - 90 % DE YBL DE AMPLITUDE.	81

TABELA 16 - NÚMERO DE CICLOS ATÉ A RUPTURA OBTIDOS NOS ENSAIOS DE FADIGA COM AMPLITUDE DE 60% A 90% DE YBL.	82
TABELA 17 - NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA PARA HMPE 1 E HMPE 2 COM 60% - 90 % DE YBL DE AMPLITUDE.	83
TABELA 18 - NÚMERO DE CICLOS ATÉ A RUPTURA OBTIDOS NOS ENSAIOS DE FADIGA COM AMPLITUDE DE 70% A 90% DE YBL.	84
TABELA 19 - NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA PARA HMPE 1 E HMPE 2 COM 70% - 90 % DE YBL DE AMPLITUDE.	84
TABELA 20 - NÚMERO DE CICLOS ATÉ A RUPTURA OBTIDOS NOS ENSAIOS DE FADIGA COM AMPLITUDE DE 10% A 90% DE YBL.	86
TABELA 21 - NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA PARA OS TRÊS MATERIAIS COM 10% - 90 % DE YBL DE AMPLITUDE.	87
TABELA 22 - NÚMERO DE CICLOS ATÉ A RUPTURA OBTIDOS NOS ENSAIOS DE FADIGA COM AMPLITUDE DE 20% A 90% DE YBL.	88
TABELA 23 - NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA PARA OS TRÊS MATERIAIS COM 20% - 90 % DE YBL DE AMPLITUDE.	88
TABELA 24 - NÚMERO DE CICLOS ATÉ A RUPTURA OBTIDOS NOS ENSAIOS DE FADIGA COM AMPLITUDE DE 30% A 90% DE YBL.	89
TABELA 25 - NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA PARA OS TRÊS MATERIAIS COM 30% - 90 % DE YBL DE AMPLITUDE.	90
TABELA 26 - NÚMERO DE CICLOS ATÉ A RUPTURA OBTIDOS NOS ENSAIOS DE FADIGA COM AMPLITUDE DE 30% A 90% DE YBL.	91
TABELA 27 - NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA PARA OS TRÊS MATERIAIS COM 40% - 90 % DE YBL DE AMPLITUDE.	92
TABELA 28 - NÚMERO DE CICLOS ATÉ A RUPTURA OBTIDOS NOS ENSAIOS DE FADIGA COM AMPLITUDE DE 50% A 90% DE YBL.	93
TABELA 29 - NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA PARA OS TRÊS MATERIAIS COM 50% - 90 % DE YBL DE AMPLITUDE.	94
TABELA 30 - NÚMERO DE CICLOS ATÉ A RUPTURA OBTIDOS NOS ENSAIOS DE FADIGA COM AMPLITUDE DE 60% A 90% DE YBL.	95

TABELA 31 - NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA PARA OS TRÊS MATERIAIS COM 60% - 90 % DE YBL DE AMPLITUDE.	95
TABELA 32 - NÚMERO DE CICLOS ATÉ A RUPTURA OBTIDOS NOS ENSAIOS DE FADIGA COM AMPLITUDE DE 70% A 90% DE YBL.	96
TABELA 33 - NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA PARA TRÊS MATERIAIS COM 70% - 90 % DE YBL DE AMPLITUDE.	97
TABELA 34 - RESUMO DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA).....	98

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DSC	Calorimetria Diferencial de Varredura
TGA	Análise Termogravimétrica
DTG	Termogravimetria Derivada
DTA	Análise Térmica Diferencial
DRX	Difratômetro de Raio X
FTIR	Espectroscopia na Região do Infravermelho
EDS	Microanálise Química Elementar
YBL	Yarn Break Load
HMPE	Polietileno de Alto Módulo
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
UHMWPE	Polietileno de Ultra Peso Molecular
ENA	Metodologia Experimental Numérica Analítica
Fmax	Força Máxima
Smax	Deformação Máxima
Svp	Deformação Visco-Plástica
Sel	Deformação Elástica
Sve	Deformação Visco-Elástica
Spl	Deformação Plástica
Warm	Energia Armazenada
Wrec	Energia Recuperada
Wdis	Energia Dissipada
Kini	Rigidez Inicial
Kfi	Rigidez Final
χ	Razão de Rigidez
j	Taxa de Desaceleração
Tg	Temperatura de Transição Vítrea
Tm	Temperatura de Fusão Cristalina
Tc	Temperatura de Cristalização
QSS	Rigidez Quase Estática

DS	Rigidez Dinâmica
LCP/TLCP	Polímero de Cristal Líquido
ANOVA	Análise de Variância

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1. JUSTIFICATIVA	18
1.2. OBJETIVOS	19
1.2.1. Objetivo Geral	19
1.2.2. Objetivos Específicos	19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1. POLÍMEROS	20
2.1.1. Polietileno de alto módulo (HMPE).....	22
2.2. DEGRADAÇÃO DOS POLÍMEROS	24
2.2.1. Degradação química	25
2.2.2. Degradação Térmica.....	26
2.2.3. Degradação mecânica	27
2.3. APLICAÇÃO DE MULTIFILAMENTOS.....	35
2.4. COMPORTAMENTO TÉRMICO	37
2.4.1. Técnicas de caracterização térmica	37
2.5. COMPORTAMENTO MECÂNICO.....	38
2.5.1. Ensaio de Tração	40
2.5.2. Ensaio de Fadiga.....	41
2.5.3. Ensaio de Impacto	41
2.5.4. Ensaio de Fluência.....	42
2.5.5. Ensaio de rigidez quase estática e dinâmica	42
2.5.6. Estudos do comportamento mecânico de materiais sintéticos perante carregamentos cíclicos	43

2.5.7. Estudos do comportamento mecânico de materiais sintéticos perante à carregamentos de impacto.....	45
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	48
3.1. DEFINIÇÃO DA AMOSTRA	49
3.2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL – ENSAIOS MECÂNICOS	50
3.3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL – ANÁLISE QUÍMICA	55
3.4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL – ANÁLISE TÉRMICA.....	55
3.5. ANÁLISE ESTATÍSTICA	57
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	59
4.1. FORÇA DE RUPTURA ESTÁTICA DOS MATERIAIS	59
4.2. COMPORTAMENTO PERANTE AO CARREGAMENTO DE IMPACTO	60
4.3. ESTRUTURA DE UM MULTIFILAMENTO APÓS CARREGAMENTOS DINÂMICOS	65
4.4. COMPORTAMENTO DA VIDA EM FADIGA APÓS CARREGAMENTO DE IMPACTO	68
4.4.1. Comparação entre o HMPE 1 e HMPE 2.....	72
4.4.2. Comparação entre os três materiais	85
4.5. CARACTERIZAÇÃO DA RIGIDEZ QUASE ESTÁTICA, DINÂMICA E FLUÊNCIA	
99	
4.5.1. Rigidez quase estática.....	99
4.5.2. Rigidez dinâmica.....	99
4.5.3. Fluência	100
4.6. CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL	102

4.6.1.	Difração de raio x (DRX)	102
4.6.2.	Espectrometria de energia dispersiva (EDS).....	103
4.6.3.	Espectroscopia na região do infravermelho (FTIR)	105
4.6.4.	Análise termogravimétrica (TGA)	106
4.6.5.	Calorimetria exploratória diferencial (DSC).....	107
5.	CONCLUSÕES.....	108
6.	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	110
	REFERÊNCIAS.....	111

1. INTRODUÇÃO

Desde a antiguidade, o homem retira produtos da natureza para utilização no seu dia a dia. Devido à oferta insuficiente de recursos naturais, surge a necessidade da modificação e criação de novos materiais, para atender plenamente suas aspirações, dando origem aos materiais sintéticos (CANDIAN, 2007). Os primeiros polímeros foram produzidos em escala industrial em 1933, já o HMPE (high modulus polyethylene) teve seu início em 1959 (HAGE, 1998).

Um polímero é uma macromolécula composta por muitas unidades de repetição denominadas meros, ligadas por ligação covalente. O monômero é a matéria prima para a produção do polímero, isto é, uma molécula com uma unidade de repetição. De acordo com o tipo de ligação covalente, número médio de meros por cadeias e monômero, podemos classificar os polímeros em três tipos: Plásticos, borrachas e fibras (CANEVALORO, 2006).

As características mecânicas dos polímeros, em sua maioria, são altamente sensíveis à taxa de deformação, à temperatura e à natureza química do ambiente (a presença de água, oxigênio, solventes orgânicos etc.) (CALLISTER, 2008). O comportamento mecânico não linear dos polímeros tornou a investigação das propriedades mecânicas desses materiais em diferentes condições de uso um desafio para os engenheiros (LOUZADA, 2016).

A avaliação das propriedades mecânicas pode ser realizada de forma estática ou dinâmica. Além disso, a caracterização do comportamento mecânico pode ser feita atingindo-se ou não a ruptura do material. Por exemplo: módulos elásticos, tensão e deformação no escoamento, tensão de ruptura, resistência a fadiga etc., são parâmetros caracterizados por atingir a ruptura do polímero. Por outro lado, dureza, análise dimensional etc., são propriedades determinadas através de ensaios não destrutivos (CANEVALARO, 2006).

Visando contribuir com as pesquisas relacionadas aos materiais sintéticos, no presente trabalho foi avaliado o comportamento mecânico de três tipos de multifilamentos de HMPE (polietileno de alto módulo) produzidos por fabricantes diferentes. Essa análise foi realizada por meio de ensaios experimentais de tração, fadiga, impacto, fluência e

rigidez quase estática e dinâmica. Esses dados experimentais foram interpretados com diferentes métodos estatísticos, dentre eles, análise de variância, gráficos, medidas descritivas e curvas de tendências. Além disso, foi realizado uma breve caracterização do material, por meio de ensaios de difração em raio x, microscópio eletrônico de varredura e espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR). Por fim, foi realizada uma análise térmica por meio de DSC (calorimetria exploratória diferencial) e TGA (análise termogravimétrica).

O atual capítulo apresenta uma pequena introdução sobre o assunto abordado neste trabalho, juntamente com as justificativas que motivaram esse estudo e os objetivos específicos. No segundo capítulo estão reunidas as informações da literatura com os conceitos básicos e estudos realizados em trabalhos anteriores, os quais foram essenciais para o desenvolvimento dessa pesquisa.

O terceiro capítulo apresenta a metodologia aplicada para alcançar os objetivos propostos no trabalho. No quarto capítulo estão expostos os resultados obtidos por meio de ensaios e análise dos dados experimentos. Por fim, no quinto capítulo são apresentadas as considerações finais, as conclusões em relação aos dados obtidos e as sugestões para trabalhos futuros.

1.1. JUSTIFICATIVA

Os cabos fabricados de materiais sintéticos foram desenvolvidos para substituir os de aço, pois possuem vantagens como, por exemplo, menor peso, alta resistência, alta flexibilidade, baixo coeficiente de fricção, entre outros. Atualmente são utilizados em sistemas de amarração *offshore*, cabos para escalada de montanhas, campos robóticos em músculos artificiais, cabos de resgate de bombeiros e içamento de cargas.

O comportamento mecânico desses materiais é complexo, principalmente devido à natureza polimérica das fibras que são utilizadas na sua fabricação, dessa forma, a maioria dos trabalhos de pesquisas são realizados experimentalmente (MIZUTANI,2017).

Portanto, conhecer o comportamento mecânico desses materiais após sofrerem cargas súbitas e cíclicas é de extrema importância, pois, na prática, todas as aplicações citadas nesse trabalho sofrem esse tipo de carregamento.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo Geral

O objetivo da pesquisa é analisar de maneira experimental o comportamento mecânico e a resistência à fadiga antes e após os multifilamentos de HMPE (polietileno de alto módulo) serem submetidos a um carregamento de impacto por tração não destrutivo.

1.2.2. Objetivos Específicos

Essa análise será feita conforme objetivos específicos apresentados abaixo:

- a) Verificar a carga de ruptura estática (ensaio de tração) para os tipos de polietileno que serão analisados, totalizando três materiais de fabricantes diferentes;
- b) Averiguar qual a carga de ruptura para os polietilenos com uma queda de 300 mm;
- c) Analisar a vida em fadiga de três tipos de polietileno de alto módulo (HMPE 1, HMPE 2 e HMPE 3) virgens, ou seja, sem sofrer nenhum tipo de carregamento anterior, apenas o carregamento cíclico;
- d) Analisar a vida em fadiga dos filamentos após serem submetidos a uma carga de impacto equivalente a 4% YBL (Yarn Break Load) e 5% YBL (Yarn Break Load). Está carga é aplicada por meio de pesos em queda livre, a uma altura de 300 mm;
- e) Comparar a vida em fadiga dos materiais virgens e dos que foram submetidos às cargas de impacto;
- f) Analisar a rigidez quase estática e dinâmica dos materiais virgens;
- g) Analisar a fluência dos materiais virgens;
- h) Comparar os resultados obtidos na vida em fadiga, rigidez e fluência;
- i) Realizar uma breve caracterização do material por meio de espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), difração de raio x (DRX), calorimetria exploratória diferencial (DSC) e análise termogravimétrica (TGA);

- j) Analisar a microestrutura dos multifilamentos antes e após os ensaios de impacto com 4% YBL e 5% YBL em uma queda livre de 300 mm, por meio de microscópio eletrônico de varredura (MEV) e espectrometria de energia dispersiva (EDS).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentado o conteúdo extraído da literatura e trabalhos anteriores, considerados como importante para a construção do presente trabalho. A seguir, são exibidas as características gerais dos polímeros, bem como seu comportamento térmico e mecânico. Além dos ensaios utilizados nesse estudo para fazer a caracterização mecânica, morfológica e térmica.

2.1. POLÍMEROS

Os polímeros são macromoléculas caracterizadas por seu tamanho, estrutura química e interações intramoleculares e intermoleculares. Possuem unidades químicas ligadas por covalências, repetidas regularmente ao longo da cadeia, denominadas meros. O número de meros da cadeia polimérica é denominado grau de polimerização (MANO, et al. 2004). Suas propriedades físicas são dependentes do comprimento da molécula e de sua massa molecular, podendo assim variar conforme o tipo de polímero. Um polímero com uma massa molecular maior, possui propriedades físicas superiores as de um polímero com uma massa molecular menor (CANEVAROLO, 2006).

Atualmente, com o desenvolvimento científico, existe um número grande de polímeros para atender diferentes demandas. Portanto, podemos classificá-los de diversas maneiras. A figura 1 apresenta uma classificação baseada nos seguintes critérios: origem do polímero, número de monômeros, método de preparação, estrutura química, encadeamento da cadeia, configuração dos átomos, taticidade¹, fusibilidade e comportamento mecânico (MANO, et al. 2004; CANEVAROLO, 2006).

¹ Taticidade é a forma como as unidades repetitivas se dispõem na cadeia polimérica.

Figura 1 - Classificação dos polímeros.

Critério	Classe do Polímero
Origem do polímero	Natural
	Sintético
Número de monômeros	Homopolímero
	Copolímero
Método de preparação do polímero	Polímero de adição
	Polímero de condensação
	Modificação de outro polímero
Estrutura química da cadeia polimérica	Poli-hidrocarboneto
	Poliamida
	Poliéster
	Polietileno
	etc
Encadeamento da cadeia polimérica	Sequência cabeça-cauda
	Sequência cabeça-cabeça, cauda-cauda
Configuração dos átomos da cadeia polimérica	Sequência cis
	Sequência trans
Taticidade da cadeia polimérica	Isotático
	Sindiotático
	Atático
Fusibilidade e/ou solubilidade do polímero	Termoplástico
	Termorrígido
Comportamento mecânico do polímero	Borracha ou elastômero
	Plástico
	Fibra

Fonte: Adaptado de MANO, et al. (2004)

O polímero em análise no presente trabalho, é classificado como um polímero sintético, termoplástico, com estrutura química obtida pela polimerização do etileno, tornando-se um polietileno. Segundo Callister (2008), os polímeros sintéticos possuem baixo custo de fabricação e com propriedades mutáveis, o que acaba fazendo muitas destas serem superiores às dos polímeros naturais. Contudo, um dos maiores desafios da área de materiais poliméricos, é a aplicação de produtos sintéticos em condições agressivas – ambiental, térmica, química – sem que ocorram reações químicas, envolvendo a cisão ou reticulação de cadeias macromoleculares responsáveis por

alterações em suas propriedades físicas, fenômeno, este, conhecido como “Degradação de polímeros”.

Os materiais poliméricos, de uma forma geral, apresentam muitas vantagens quando empregados em aplicações técnicas comparados a outros tipos de materiais. Entre estas vantagens podem-se citar:

- Volume específico menor que os materiais metálicos ou cerâmicos;
- Elevada tenacidade, que em alguns casos é equivalente aos materiais metálicos;
- Alta resiliência; bom amortecimento vibracional, isolamento térmico e elétrico;
- Baixo coeficiente de atrito;
- Resistente à corrosão e baixo custo de fabricação.

Entretanto, sofrem também uma série de limitações, como por exemplo: Baixa rigidez; Resistência mecânica, dureza e resistência ao atrito inferior aos metais; baixa resistência térmica, à radiação ultravioleta (ROSA, 1996) e hidrólise (STUMPF et al, 2018).

Além disso, os materiais sintéticos têm durabilidade limitada, que é determinada pelos seus processos de degradação. Pois, ela altera a qualidade de interesse de um material polimérico, como, por exemplo, a flexibilidade, a resistência elétrica, o aspecto visual, a resistência mecânica, a dureza etc. (PAOLI, 2008).

2.1.1. Polietileno de alto módulo (HMPE)

Polietileno é um polímero semicristalino, flexível, cujas propriedades são influenciadas diretamente pela quantidade relativa das fases amorfa e cristalina. As menores unidades cristalinas, lamelas, são planares e consistem em cadeias perpendiculares ao plano da cadeia principal e dobradas em zig-zag (DOAK, 1986; COUTINHO, et al. 2003).

Dependendo das condições reacionais e do sistema catalítico empregado na polimerização, existem cinco tipos diferentes de polietileno que podem ser produzidos:

- Polietileno de baixa densidade (PEBD ou LDPE),
- Polietileno de alta densidade (PEAD ou HDPE),

- Polietileno linear de baixa densidade (PELBD ou LLDPE),
- Polietileno de ultra alto peso molecular (PEUAPM ou UHMWPE)
- Polietileno de ultrabaixa densidade (PEUBD ou ULDPE) (COUTINHO, et al. 2003).

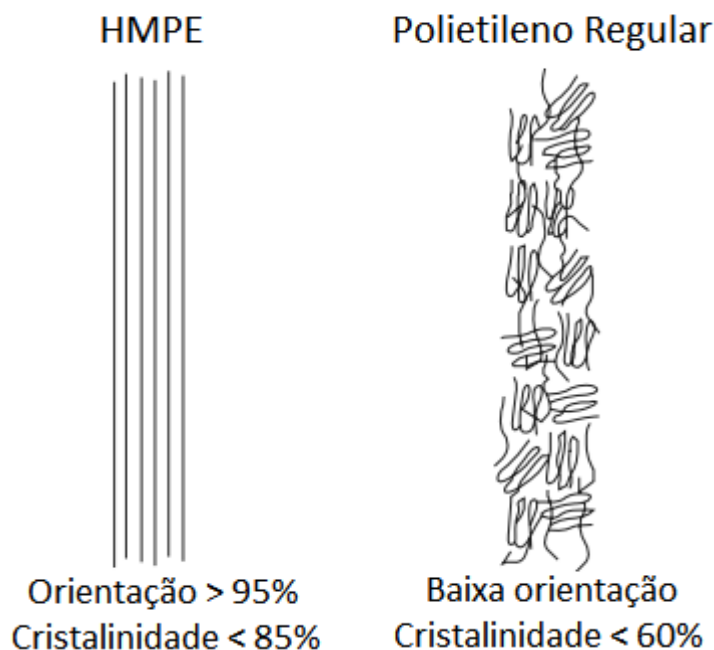
Os polietilenos de alto módulo (HMPE) são fibras de alto desempenho, produzidas a partir do polietileno de ultra peso molecular (UHMWPE), com massa molecular maior que 10^6 g/mol. Este material é quimicamente idêntico ao polietileno de alta densidade normal (HDPE), mas o peso molecular é maior.

O UHMWPE tem moléculas muito mais longas e flexíveis e somente por tratamentos físicos, essas moléculas podem ser forçadas a assumir a conformação e uma grande orientação no eixo longitudinal. Todas as propriedades físicas e químicas do polietileno permanecem nas fibras. As diferenças resultam da alta extensão da fibra (alongamento), orientação e cristalinidade. Com a presença de ligações laterais fracas (Van der Waals) entre as cadeias moleculares, a baixa resistência transversal e a vulnerabilidade à fluência se tornam características intrínsecas, embora possa ser melhorada pelo uso de um polímero de base ramificada.

Para fabricar um polímero com características melhoradas, foi desenvolvido um processo chamado *gel-spinning*, no qual as moléculas de UHMWPE são dissolvidas em um solvente com concentração elevada. Nessa solução, as moléculas se desembaraçam e o material é estirado por uma extensão muito alta. Desta forma é atingido um nível muito alto de orientação macromolecular conforme apresentado na figura 2, resultando em uma fibra com alta tenacidade e módulo de elasticidade elevado. Por esse motivo, a fibra resultante do *gel-spinning* é denominada de polietileno de alto módulo (HMPE) (VAN DINGENEN, 2000).

O polietileno de alto módulo (HMPE) apresenta uma excelente resistência à abrasão e à ruptura; alta resistência à radiação ultravioleta e elevada flexibilidade, quando comparado com os demais materiais poliméricos. A rigidez deste material é excepcionalmente alta em relação às outras fibras, permitindo ser submetida a uma tensão maior para o mesmo diâmetro de cabo (MOHNSAM, 2008).

Figura 2 - Orientação macromolecular do HMPE e o PE regular.



Fonte: Adaptado de Van Dingenen, (2000).

Porém, como a tenacidade e o módulo da fibra diminuem com o aumento da temperatura, seu ponto de fusão é uma característica prejudicial, pois fica em torno de 144 a 152°C (LOPES, 2003).

Na sua composição química, não contém anéis aromáticos, amidas, hidroxilas ou outro grupo químico que tornem suscetível ao ataque por agentes agressivos (LOPES, 2003).

2.2. DEGRADAÇÃO DOS POLÍMEROS

A degradação é qualquer reação química destrutiva dos polímeros, que pode ser causada por agentes físicos e/ou por agentes químicos. Causa uma modificação irreversível nas propriedades dos materiais poliméricos, sendo evidenciada pela deterioração progressiva destas propriedades, incluindo o aspecto visual (CANEVAROLO, 2006).

Segundo Paoli (2008), existem formas de abordar a degradação dos polímeros, entre elas há as seguintes estratégias: degradação pelos tipos de reações químicas que

ocorrem no início e durante a degradação, geralmente ocorre quebra de ligações na cadeia principal, eliminação ou substituição de cadeias laterais, reações intramoleculares, auto-oxidação e despolimerização; degradação pelo processo de iniciação de reações térmicas, fotoquímica, mecânica, radiação de alta energia, química ou *stress-cracking*.

As reações térmicas causam oxidação no material, ocorrem durante o processamento ou uso de temperaturas elevadas. Já a degradação mecânica ocorre pela aplicação de carga, podendo envolver fratura do material ou quebra de cadeias poliméricas. Por fim, a degradação ultrassônica ocorre quando é aplicado um sinal sonoro em determinadas frequências, o que induz a vibração das cadeias até levá-las à ruptura.

Além disso, os polímeros são sensíveis à presença de água, esse fenômeno é chamado de degradação hidrolítica. Agentes químicos corrosivos ou certos gases, podem atacar facilmente as funções estruturais do polímero, causando quebra de cadeias e oxidação. Por fim, quando exposto à luz do sol ou à radiação de alta energia, o polímero absorve tal radiação, o que induz reações que resultam na perda de suas propriedades (DUARTE, 2017).

2.2.1. Degradação química

A degradação iniciada por agentes químicos aparentemente só poderia ocorrer em situações muito específicas no qual o polímero estivesse exposto a uma substância agressiva específica. No entanto, quando se trata de um material produzido em escala industrial, certamente ele irá possuir algum tipo de contaminante, o qual será responsável pelo início da sua degradação por ataque químico (PAOLI, 2008).

Contaminantes podem ser resíduos de catalisador, impurezas, aditivos, entre outros. Alguns destes contaminantes se tornam perniciosos para a degradação apenas quando o material é exposto a luz, não são reativos em atmosfera inerte e no escuro. Em outros casos o material polimérico é usado em contato com outros materiais, metais por exemplo, que aparentemente são inertes, mas que podem ser quimicamente ativados por aquecimento. Com isso, a degradação pode ser classificada de duas maneiras: degradação por agentes externos e internos (RAMÃO et al. 2009).

Os agentes externos são basicamente ataque químico por óleos lubrificantes, combustíveis ou fluidos hidráulicos, no caso de tubos e vedações. Também pode haver a migração ou o contato de polímeros com óxidos metálicos com conteúdo sólido ou líquido de embalagens, contato com peças metálicas (insertos). Por fim, pode haver o ataque químico por poluentes atmosféricos, soluções de lavagem e de esterilização, hidrólise, entre outros.

Os agentes internos podem ser resumidos como contaminações resultantes do processo de polimerização, resíduos de catalisador, aditivos, mistura com produto off-grade, cargas, agentes de cor e componentes da formulação em geral (RAMÃO et al. 2009).

2.2.2. Degradação Térmica

A exposição do polímero sem a adição de estabilizantes de calor, radiação ultravioleta ou radiação gama, dependendo da intensidade e tempo de exposição ao calor, pode causar danos irreversíveis no material (RODOLFO et al. 2007). Grande parte das propriedades poliméricas são sensíveis a mudança de temperatura. O polímero exposto ao calor, tem suas propriedades físicas, mecânicas e químicas alteradas, cujo o tempo e a intensidade de exposição, podem determinar o grau de mudança dessas propriedades.

O aumento da temperatura, pode levar à perda de substâncias voláteis, como por exemplo, solventes e plastificantes. Além disso, pode haver um aumento na cristalinidade do material e, conseqüentemente, mudança em sua estrutura cristalina e aumento da densidade. A temperatura é um parâmetro importante no processo de degradação dos polímeros, devido a sua alta capacidade de influenciar as taxas de reações, propriedades mecânicas (ruptura e deformação) e de abrasão (LODI, 2003).

Em nível molecular, as forças das ligações secundárias são diminuídas à medida que se elevam as temperaturas e pressões, devido ao aumento do movimento molecular, de tal forma que o movimento relativo das cadeias adjacentes é facilitado quando uma solicitação mecânica é aplicada. Uma degradação irreversível acontece quando a temperatura de um polímero é elevada até o ponto no qual a vibração molecular torna-se

forte o bastante para quebrar as ligações covalente primárias (VAN VLACK, 1984; OLIVIER, 2007).

2.2.3. Degradação mecânica

A iniciação da degradação de polímeros por esforço mecânico estático ou dinâmico, além de causar degradação devido a fluência, fadiga, entre outros fenômenos, podem causar modificações químicas induzidas pela tensão mecânica ou por cisalhamento combinado com reação química (PAOLI, 2008).

A degradação mecânica de polímeros no estado sólido, de forma geral, inclui todo tipo de indução mecânica e colapso do material. Portanto, as deformações irreversíveis, fibrilamento, fissuramento, fratura e fadiga de polímeros são processos que levam à redução das propriedades mecânicas (KELEN, 1983).

Diferentes tipos de carregamentos podem causar a cisão de cadeias poliméricas em qualquer estado do polímero, seja ele, sólido, fundido ou em solução. Os esforços, podem ser de cisalhamento, tração/compressão ou por combinação destas. Quando cadeias poliméricas lineares são esticadas sob cisalhamento, na mesma direção da força aplicada, estas tendem a concentrar a tensão principalmente na parte média e sofrer cisão de cadeias (RAUWENDAAL, 2001).

Segundo Paoli (2008), quando um polímero é estirado a frio, ocorre o alinhamento das cadeias na direção do estiramento. As ligações próximas às extremidades da cadeia polimérica têm muito menos probabilidade de serem quebradas durante a degradação mecânica do que as ligações mais próximas do centro da cadeia.

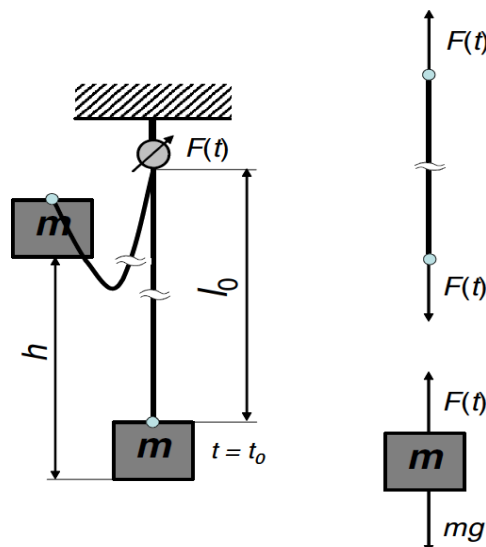
2.2.3.1. Degradação mecânica de multifilamentos devido a carregamento de impacto

A metodologia experimental numérica analítica (ENA) é uma das alternativas para realizar uma análise da degradação de multifilamentos após serem submetidos a carregamentos súbitos. Essa metodologia avalia 13 parâmetros físicos de cabos poliméricos, experimentalmente e analiticamente, sendo eles: Força máxima (F_{max}), deformação máxima (S_{max}), deformação visco-plástica (S_{vp}), deformação elástica (S_{el}),

deformação visco-elástico (Sve), deformação plástica (Spl), energia armazenada (Warm), energia recuperada (Wrec), energia dissipada (Wdis), rigidez inicial da corda (Kini), rigidez final da corda (Kfi), razão de rigidez (χ) e taxa de desaceleração (j) (EMRI et al.2008).

Semelhante a metodologia ENA, temos os ensaios da norma BS EN 892:2012, padronizadora de testes de impacto para cabos de montanhismo, conforme mostrado na Figura 3. O teste consiste em uma massa em movimento de queda livre, cujos dados de entrada (comprimento do cabo (l_0), altura de queda livre (h), massa (m) e aceleração gravitacional (g), temperatura e umidade relativa) para condicionamento e testes, interferem diretamente no comportamento do material (NIKONOV et al., 2011; VOGWELL et al., 2007).

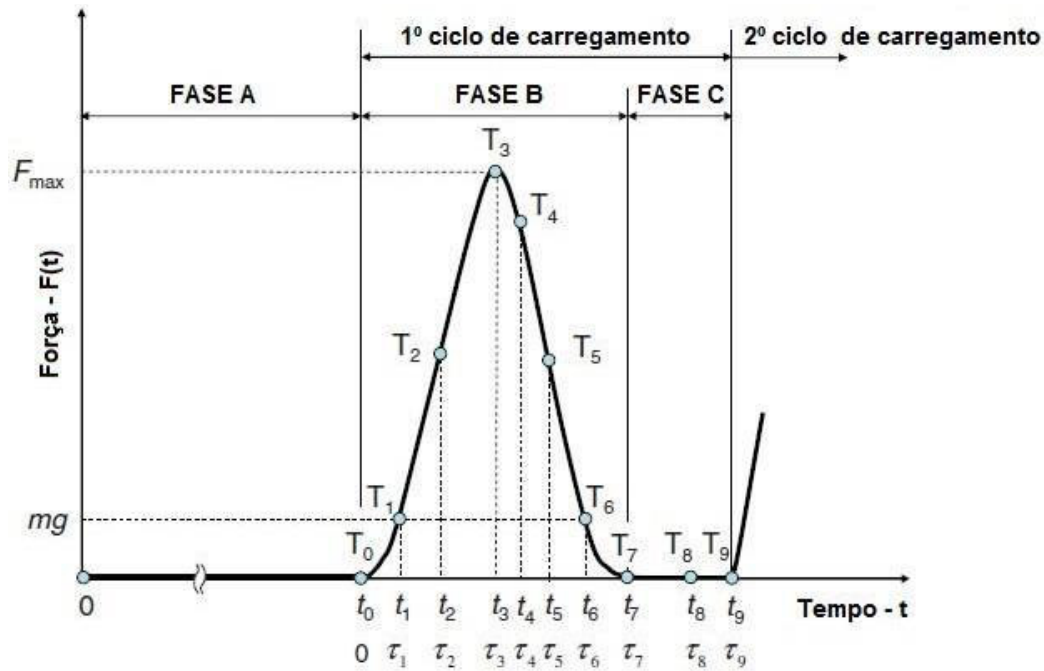
Figura 3 - Modelo utilizado no ENA.



Fonte: EMRI et al., (2008)

Para analisar analiticamente a figura 3, devemos entender que, ao passo em que a massa é solta de uma altura arbitrária, é possível medir a força em função do tempo $F(t)$ na fixação superior do cabo e, conseqüentemente, estabelecer a força transmitida através do mesmo. Logo, uma curva de força versus tempo é gerada, conforme mostrado na figura 4.

Figura 4 - Força versus tempo no cabo.



Podemos observar que a análise é dividida em três fases, sendo elas: A, B e C. A fase A é representada pela massa em queda livre sem exercer carregamento até o cabo estar totalmente esticado. A fase B é caracterizada pelo processo de deformação do cabo e acontece entre os pontos T_0 e T_7 . Por fim, na fase C o carregamento do cabo volta a ser nulo e a massa passa a executar um movimento vertical, livre e ascendente. Se houver novamente um teste de impacto, os ciclos irão se repetir (EMRI et al., 2008).

Desconsiderando a resistência do ar e a propagação de onda da corda, a equação de movimento da massa na fase B é descrita por meio de:

$$m\ddot{s}(\tau) = mg - F(\tau) \quad (1)$$

Em que:

- m é igual à massa,
- g é a aceleração gravitacional (m/s^2),
- $\ddot{s}(\tau)$ é a segunda derivada do deslocamento da massa em função do tempo.

O deslocamento da massa é equivalente à deformação da corda e τ é igual ao tempo em segundos, sendo zero no ponto T_0 . Integrando duas vezes a equação 1, é obtido a expressão do deslocamento da massa em função do tempo (equação 2), a qual é equivalente à equação de deformação viscoplástica e viscoelástica do cabo.

$$x(\tau) = \frac{g\tau^2}{2} - \frac{1}{m} \int_0^\tau \left[\int_0^\lambda F(v) dv \right] d\lambda + C_1\tau + C_2 \quad (2)$$

As constantes C_1 e C_2 deveram ser obtidas a partir das condições iniciais de T_0 .

$$C_1 = v_0 + \left[\frac{1}{m} \int_0^\tau F(\lambda) d\lambda \right]_{\tau=0} = v_0 \quad (3)$$

$$C_2 = 0 \quad (4)$$

$$x(\tau = 0) = 0, \text{ and } \dot{x}(\tau = 0) = v_0 = \sqrt{2gh} \quad (5)$$

Com isso, o deslocamento do peso, que é igual à deformação do cabo, pode ser expresso agora como:

$$x(\tau) = \frac{g\tau^2}{2} - \frac{1}{m} \int_0^\tau \left[\int_0^\lambda F(v) dv \right] d\lambda + v_0\tau \quad (6)$$

A partir da equação 6, é possível obter as expressões de velocidade, aceleração e derivada da aceleração atuando no peso, conforme apresentadas a seguir:

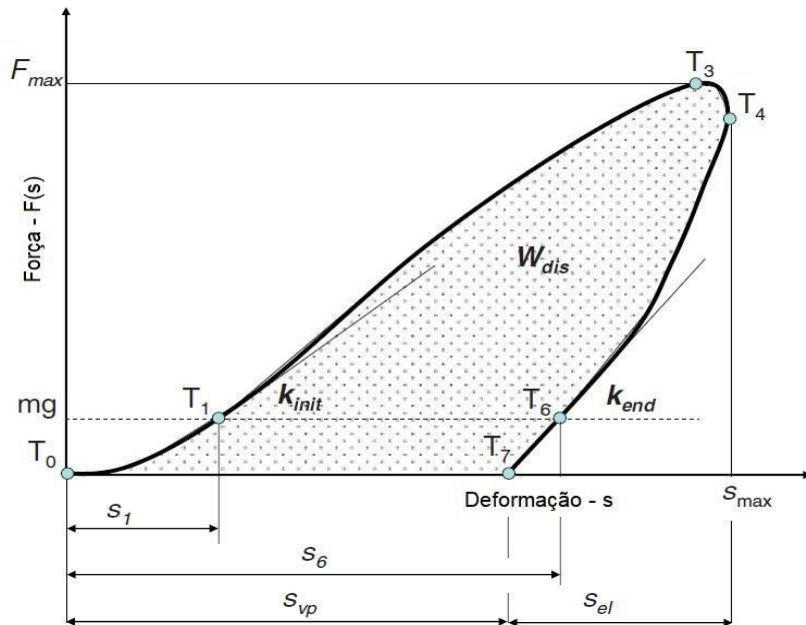
$$v(\tau) = \dot{x}(\tau) = g\tau - \frac{1}{m} \int_0^\tau F(\lambda) d\lambda + v_0 \quad (7)$$

$$a(\tau) = \ddot{x}(\tau) = g - \frac{F(\tau)}{m} \quad (8)$$

$$j(\tau) = \ddot{x}(\tau) = -\frac{dF(\tau)}{md\tau} \quad (9)$$

A curva força *versus* deformação apresentada na figura 5, é traçada por meio da substituição da expressão da curva Força – Tempo apresentada na figura 4, considerando a equação 6.

Figura 5 - Diagrama de força versus deformação. (s_{max}) deformação máxima; (s_{vp}) deformação viscoplástica; (s_{el}) deformação elástica; (k_{init}) rigidez inicial; (k_{end}) rigidez final; (W_{diss}) energia dissipada.



Fonte: EMRI et al., (2008)

Em T_1 , a força atuando na corda é igual a $F(\tau_1) = mg$ e a massa caracteriza-se por apresentar velocidade máxima. No ponto T_3 , as forças atuantes na corda e na massa atingem seus valores máximos. Em seguida ($\tau = T_4$), o cabo atingiu sua deformação máxima e, conseqüentemente, a velocidade da massa torna-se nula. Em função da viscoelasticidade dos materiais poliméricos, o ponto de força máxima não coincide com o ponto de deformação máxima. A partir do ponto T_4 é iniciado o descarregamento da corda, e em conseqüência a massa é acelerada na direção oposta ao movimento em função da componente elástica do cabo. No ponto T_5 , a derivada da aceleração atinge

seu valor máximo e em T_6 a força atuante na corda torna-se novamente igual à força peso (mg).

Com relação às deformações, Emri et al. (2008) deduziram por meio da equação 6 as componentes máxima (Eq. 10), viscoplástica (Eq. 11) e elástica (Eq. 12) do material. Além dessas, as expressões das componentes viscoelástica (Eq. 13) e plástica (Eq. 14) também foram deduzidas.

$$S_{max} = s(\tau_4) = \frac{g(\tau_4^2)}{2} - \frac{1}{m} \int_0^{\tau_4} F(\tau) d\tau + v_0(\tau_4) \quad (10)$$

$$S_{vp} = s(\tau_7) = \frac{g(\tau_7^2)}{2} - \frac{1}{m} \int_0^{\tau_7} F(\tau) d\tau + v_0(\tau_7) \quad (11)$$

$$S_{el} = s(\tau_4) - s(\tau_7) = -\frac{1}{m} \int_0^{\tau_7} F(\tau) d\tau - \frac{g(\tau_7^2 - \tau_4^2)}{2} - v_0(\tau_7 - \tau_4) \quad (12)$$

$$S_{ve} = s(\tau_4) - s(\tau_3) = s(\tau_7) = \frac{g(\tau_4^2 - \tau_3^2)}{2} + v_0(\tau_4 - \tau_3) - \frac{1}{m} \int_{\tau_3}^{\tau_4} F(\tau) d\tau \quad (13)$$

$$S_{pl} = S_{vp} - S_{ve} = s(\tau_7) + s(\tau_3) - s(\tau_4) \quad (14)$$

Além dos parâmetros já abordados, outros fatores importantes, como energia armazenada, energia recuperada e, principalmente, energia dissipada também são utilizados para caracterizar a qualidade dos materiais sintéticos. Esses parâmetros podem ser encontrados por meio da equação da energia de deformação do cabo ao longo do tempo apresentada na equação 15, sendo equivalente à soma das energias cinética e potencial da massa no instante desejado, como mostrado na equação 16 (EMRI et al., 2008; NIKONOV et al., 2011).

$$W(\tau) = \int_0^{s(\tau)} F(x) dx \quad (15)$$

$$W(\tau) = W_k(\tau) + W_p(\tau) \quad (16)$$

Integrando a curva força versus deformação do ponto T_0 até T_4 é encontrada a chamada energia armazenada (W_{store}) pelo material, a qual é equivalente à energia potencial da massa. A energia armazenada pelo cabo é a única fonte de absorção de energia durante o ciclo de carregamento (EMRI et al., 2008).

$$W_{store} = \overbrace{mg(h + s(\tau_4))}^{\text{Energia Potencial}} \quad (17)$$

Com relação à energia dissipada pelo cabo, ela que influencia diretamente na força de impacto transmitida para a massa, é calculada pela integração entre os pontos T_0 e T_7 ou pela subtração entres as energias armazenada e restaurada. Está relacionada à elasticidade do material e impulsiona a massa para o alto no instante T_4 (CUSTER, 2006; EMRI et al., 2008; NIKONOV et al., 2011).

$$W_{diss} = \overbrace{mg(h + s(\tau_4))}^{\text{Energia Potencial}} - \overbrace{\left(\frac{mv(\tau_7)^2}{2}\right) + mg\left(\frac{\text{def. elástica}}{s(\tau_4) - s(\tau_7)}\right)}^{\text{Energia Restauradora}} \quad (18)$$

Por fim, em relação à razão de rigidez, pode – se realizar uma análise da rigidez inicial e a rigidez final. Esse parâmetro é modificado a cada ciclo de carregamento já que os cabos se tornam mais rígidos a cada teste de queda livre. A rigidez inicial e a rigidez final, são calculadas nos pontos T_1 e T_6 quando a força transmitida no cabo é equivalente à força peso (EMRI et al., 2008; NIKONOV et al., 2011).

$$K_{inicial} = \frac{dF(s_1)}{ds} \quad (19)$$

$$K_{final} = \frac{dF(s_6)}{ds} \quad (20)$$

$$x = \frac{K_{inicial}}{K_{final}} \quad (21)$$

2.2.3.2. Degradação mecânica de multifilamentos devido a carregamento de fadiga

Na degradação de fibras por fadiga destacam três tipos de falhas: falhas induzidas por fenômenos de fluência, por atrito externo ou por atrito interno. A falha mais comum de fadiga é relacionada à fluência. Se a falha for controlada por fluência e nenhum outro mecanismo interferir, o tempo de falha será independente da frequência de teste, dependendo apenas do tempo gasto sob carga (LO et al., 1999; MANDEL, 1987; KARAYAKA, 1999). Assim, podem ser utilizados modelos para previsão de deformação sob carga estática, substituindo assim a carga constante por uma cíclica (LO et al., 1999; MANDEL, 1987).

Porém, fenômenos de atrito entre as fibras produzem desvios no comportamento da vida em fadiga do material. Neste caso, o estudo da localização da falha permite entender o motivo da degradação. Existe a possibilidade de localizar uma falha quando os resultados experimentais começam a se desviar da previsão de fluência, isso é a explicação para um fenômeno de atrito que leva a degradação do material. Este tipo de mecanismo depende apenas do número de ciclos, portanto, é governado pela frequência de teste (MANDEL, 1987).

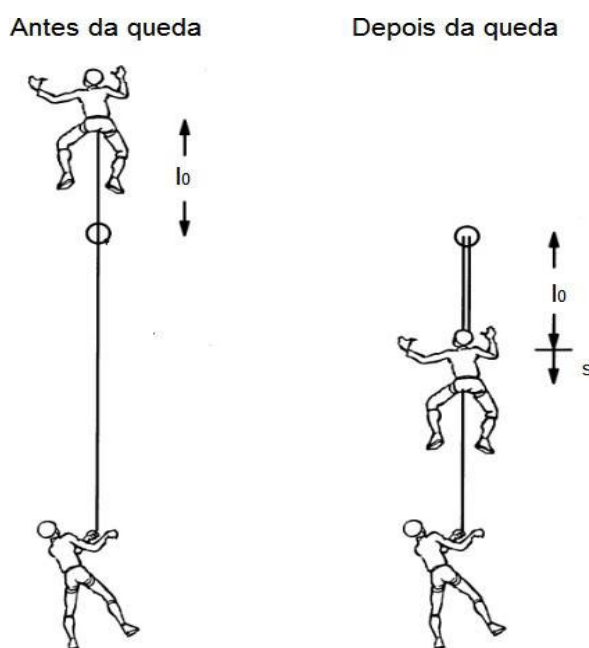
Ao contrário dos metais, nos quais a fadiga é caracterizada pela propagação de trincas, este fenômeno tem características diferentes quando trata de materiais poliméricos. Neste caso, a sensibilidade ao desgaste é aumentada por fatores como módulo, taxa e amplitude de carregamento, bem como, frequência, temperatura, umidade relativa e pH ambiental (VANNUCCHI et al., 2016).

Investigações de fadiga no HMPE têm sido focadas principalmente no desempenho de fadiga por flexão do cabo, uma vez que ele foi identificado como o caso mais grave durante as operações. Neste caso, o fenômeno de fadiga é decorrente da fluência devido a carga aplicada no material (HUMEAU et al., 2018).

2.3. APLICAÇÃO DE MULTIFILAMENTOS

Cabos sintéticos são utilizados na prática de escalada há mais de 120 anos, visto que são um importante equipamento de segurança responsável por proteger os alpinistas em eventuais quedas livres, conforme mostrado na figura 6. A fabricação deste tipo de cabo, geralmente em poliamida, pois é projetada para reduzir a força de impacto transmitida para o corpo do alpinista e, conseqüentemente, diminuir o risco de morte (MCLAREN, 2006; PAVIER, 1998; VOGWELL; MINGUEZ, 2007). Esse tipo de cabo possui uma maior parcela de deformação elástica, fazendo com que a energia dissipada seja maior durante o impacto no cabo, causado pela queda do alpinista (VOGWELL;MINGUEX, 2007).

Figura 6 - Situação de alpinismo.

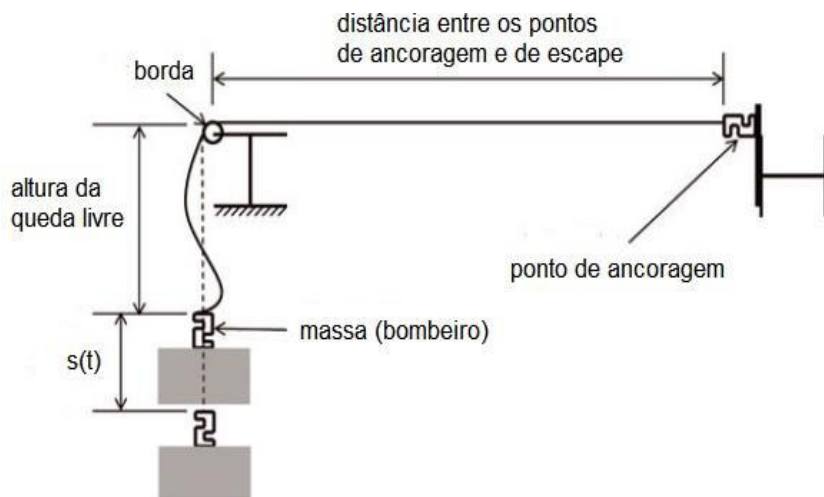


Fonte: Vogwell e Minguez, (2007)

Também são usados em operações de resgate, mais especificamente em atividades de bombeiros, pois permitem um movimento de escape rápido pela janela de um local com alta temperatura e elevada altura em relação ao solo, conforme mostrado na figura 7. Esses tipos de cabo são fabricados em aramida, poliamida pois são os

materiais sintéticos mais resistentes à altas temperatura (MARTIN et al, 2014).

Figura 7 - Exemplo da situação de resgate de um bombeiro.



Fonte: Martin et al, (2014)

Os cabos feitos em poliéster são mais utilizados para o iatismo como amarras de ancoragem e também são responsáveis por formarem a estrutura responsável por controlar as velas (MCLAREN, 2006). As fibras de HMPE (polietileno de alto módulo) estão sendo utilizadas atualmente em inúmeras aplicações, entre elas, médica, proteção balística, ancoragens *offshore*, esportes e içamento de cargas, devido à sua alta resistência e baixa peso, aliadas a excelentes propriedades mecânicas e químicas (VAN DINGENEN, 2000). Mizutani et al. (2017) ressaltam que o HMPE também é utilizado no campo da robótica.

Esse material é amplamente considerado o mais adequado para maiores comprimentos de linha de ancoragem em águas profundas. As fibras são caracterizadas por alta resistência e módulo elevado, produzindo cabos de rigidez elevadas e diâmetros menores e mais leves, proporcionando vantagens técnicas e operacionais sobre linhas de ancoragem de poliéster tradicionais. Um sistema mais rígido de ancoragem em HMPE é de elevação potencialmente mais compatível do que o poliéster. Cabos HMPE têm tipicamente uma deformação entre 2% - 2,5% enquanto o poliéster possui um alongamento de 10% - 11% na ruptura (VLASBOW et al., 2013).

2.4. COMPORTAMENTO TÉRMICO

A mobilidade de uma cadeia polimérica determina as características físicas do polímero, seja ele, um plástico duro ou frágil, borrachoso e tenaz, ou um fluido viscoso, em função da agitação dos átomos nas moléculas, sendo esta diretamente proporcional à temperatura (CANEVAROLO, 2006).

Um polímero pode apresentar pelo menos três temperaturas de transição:

- A temperatura de transição vítrea (T_g) é o valor médio da faixa de temperatura no qual, durante o aquecimento de um material polimérico, as cadeias poliméricas da fase amorfa adquirem mobilidade. As principais propriedades que mudam com o T_g , são utilizadas para determinar o módulo de elasticidade, coeficiente de expansão, índice de refração, calor específico, etc. (CANEVAROLO, 2006).
- A temperatura de fusão cristalina (T_m) é o valor médio da faixa de temperatura em que durante o aquecimento, desaparecem as regiões cristalinas com a fusão dos cristalitos. Dessa forma, a energia do sistema atinge o nível necessário para vencer as forças intermoleculares entre as cadeias poliméricas cristalinas, destruindo a estrutura do polímero, fazendo com que o material mude de estado, perdendo volume específico (CANEVAROLO, 2006).
- A temperatura de cristalização (T_c) é onde ocorre a cristalização do material. Pode ocorrer de forma isotérmica, quando a temperatura é rapidamente abaixada até um dado valor de temperatura de cristalização (T_c), estabilizada e mantida constante até que toda a cristalização ocorra; ou de forma dinâmica, quando a temperatura é reduzida continuamente, e a cristalização ocorrer dentro de uma faixa de temperatura diferente (CANEVAROLO, 2006).
-

2.4.1. Técnicas de caracterização térmica

A caracterização térmica dos polímeros é um parâmetro muito importante a ser determinado. A estabilidade térmica desses materiais pode ser estudada por

termogravimetria (TGA), termogravimetria derivativa (DTG), análise térmica diferencial (DTA) e calorimetria diferencial de varredura (DSC) (COWIE,1991; LUCAS et al.,2001).

A termogravimetria (TGA) é uma técnica que permite conhecer, entre outros parâmetros, a temperatura em que os polímeros começam a se degradar. Junto com a sua derivada (DTG) elas indicam a perda de massa do material em cada estágio, fornecendo informações sobre a natureza e a extensão de degradação do material (JOSEPH et al., 2003).

A calorimetria exploratória diferencial (DSC), nos permite conhecer a temperatura vítrea (T_g), de fusão cristalina (T_m) e de cristalização, como também as entalpias envolvidas nos processos de fusão e cristalização (para os compósitos). O equipamento de DSC mede a variação de energia entre a amostra e uma determinada referência em função da temperatura e/ou tempo, enquanto a amostra é submetida a uma programação controlada de temperatura (LUCAS et al. 2001).

Os eventos térmicos que geram modificações em curvas de DSC podem ser basicamente transições de primeira e de segunda ordem. As transições de primeira ordem apresentam variações de entalpia e dão origem à formação de picos. Como exemplos de eventos endotérmicos que podem ocorrer em amostras de materiais, pode-se citar: fusão, perda de massa da amostra (vaporização de água, aditivos ou produtos voláteis de reação ou de decomposição), dessorção e reações de redução.

Eventos exotérmicos podem ser: cristalização, reações de polimerização, cura, oxidação, degradação oxidativa, adsorção, entre outros. As transições de segunda ordem caracterizam-se pela variação de capacidade calorífica, porém sem variações de entalpia (LUCAS et al.,2001).

2.5. COMPORTAMENTO MECÂNICO

As propriedades mecânicas dos materiais são avaliadas a partir de uma solicitação, na forma de uma deformação ou na aplicação de uma força, com o monitoramento da resposta do material (CASSU et al.,2005). O comportamento mecânico de um material será governado por sua viscoelasticidade, que será função do tipo de ensaio e de solicitação aplicados.

Dependendo da resposta ao estímulo mecânico, o material pode ser classificado como elástico ou viscoso. Para um sólido perfeitamente elástico ou Hookiano a deformação é proporcional à tensão aplicada, segundo a lei de Hooke. Um material viscoso ideal obedece à lei de Newton, que estabelece que a tensão e a taxa de cisalhamento estão relacionadas por meio de uma característica intrínseca que é a viscosidade (WUNDERLICH, 1997; WETTON, 1986).

Materiais poliméricos apresentam comportamento mecânico elástico e viscoso ao mesmo tempo, sendo denominados viscoelásticos. Quando um polímero é analisado, alguns fatores devem ser levados em conta, sendo eles, a temperatura e o tempo de ensaio (CANEVAROLO, 2006).

O HMPE (polietileno de alto módulo) é um polímero altamente resistente à tração, possui alto módulo de elasticidade em combinação com baixo peso. Sua tenacidade é alta comparado com as outras fibras e chega a ser 10 vezes maior que a de um aço carbono. O alongamento na ruptura é relativamente baixo e devido à alta tenacidade, a energia para quebrar é alta.

Devido ao seu alto módulo combinado com o alongamento até a ruptura, as fibras HMPE podem absorver uma grande quantidade de energia, propriedade interessante para o uso balístico. Porém, o material possui uma estrutura com baixa interação lateral (van der Waals) entre as cadeias adjacentes. Isso resulta que, em contraste com sua alta resistência à tração, as fibras têm uma baixa resistência à compressão de cerca de 2 a 3% de sua resistência à tração, limitando sua aplicabilidade em compósitos (VAN DINGENEN, 2000).

A fibra tem sensibilidade a cargas estáticas de longo prazo. Esse fenômeno é geralmente conhecido como fluência, tratando-se de um processo no qual as longas cadeias moleculares deslizam umas sobre as outras (VAN DINGENEN, 2000). Além disso, em altas taxas de deformação ou a baixas temperaturas, o comportamento do HMPE muda de maneira significativa, podendo perder duas propriedades.

Essa avaliação das propriedades mecânicas, pode ser analisada por meio de ensaios de forma estática ou dinâmica. Além disso, a caracterização do comportamento pode ser feita atingindo ou não a ruptura do material (CANEVAROLO, 2006).

Para a caracterização mecânica do material em estudo no presente trabalho, foram utilizados os ensaios de tração, fadiga, impacto, fluência e rigidez quase estática e dinâmica utilizando especificações técnicas adaptadas da norma ABNT ISO/TS 14909:2013.

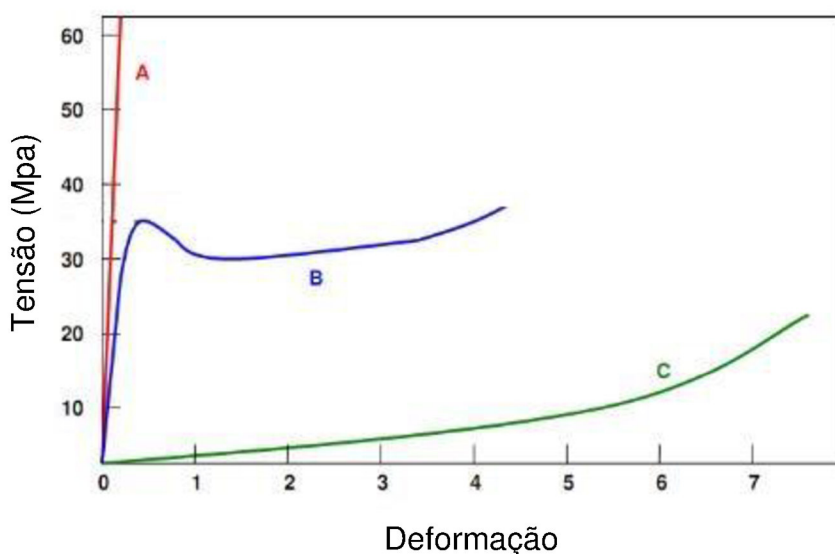
2.5.1. Ensaio de Tração

No ensaio de tração, submete-se um corpo de prova a um esforço, que tende a alongá-lo até a sua ruptura. Os esforços ou cargas aplicadas ao mesmo são medidas no equipamento em que é realizado o ensaio.

O ensaio é realizado utilizando-se um corpo de prova de formas e dimensões padronizadas, para que os resultados obtidos possam ser comparados, ou, dependendo da finalidade do ensaio, suas informações possam ser usadas tecnicamente. Por meio dos ensaios de tração é possível construirmos uma curva de tensão-deformação (FREDEL, et al., 2015).

Geralmente, são encontrados três tipos diferentes de comportamento tensão-deformação para materiais poliméricos, conforme apresentado na figura 8.

Figura 8 - Tensão-deformação para polímeros.



Fonte: Callister, (2008).

Em que o material A é um polímero frágil, o B é plástico e o C é um altamente elastômero (CALLISTER, 2008).

2.5.2. Ensaio de Fadiga

A American Society for Testing and Materials, por meio da norma ASTM E1823 (2002), define a fadiga como sendo um processo de alteração estrutural permanente, progressivo e localizado. Este fenômeno ocorre em um material sujeito a condições que produzem tensões e deformações cíclicas em um ponto ou em vários pontos, e que podem culminar em trincas ou fratura completa após um número suficiente de ciclos.

O ensaio de fadiga consiste em provocar um esforço cíclico no corpo de prova e analisar o número de tensões suportadas até a ruptura do espécime, o qual é designado por N (FREDEL, et al. 2015).

2.5.3. Ensaio de Impacto

O ensaio de impacto é um ensaio dinâmico empregado para a análise da fratura frágil de materiais. É largamente utilizado nas indústrias naval e bélica e, em particular, nas construções que deverão suportar baixas temperaturas. O resultado do ensaio é representado por uma medida da energia absorvida pelo corpo de prova, não fornecendo indicações seguras sobre o comportamento de toda uma estrutura em condições de serviço. Entretanto, permite a observação de diferenças de comportamento entre materiais, as quais não são observadas em um ensaio de tração (FREDEL, et al. 2015).

Os procedimentos mais comuns para determinar a energia de impacto são os ensaios de Charpy e Izod (CALLISTER, 2008). Para determinar a resistência ao impacto de cabos por tração, a norma BS EN 892:2012 e EMRI et al., (2008), apresentam uma metodologia, conforme já apresentada no item 2.2.3.1 desta rubrica.

Como os ensaios de impacto são de natureza complexa devido ao modelo do seu corpo de prova, é necessária a realização de uma adaptação em seu procedimento. Por exemplo, Mizutani et al. (2017) utiliza para seus ensaios de impacto com uma adaptação

da norma BS EM 892:2012, em que ele insere no procedimento, uma aplicação de pré carga.

2.5.4. Ensaio de Fluência

A fluência é um fenômeno físico devido à presença de imperfeições na microestrutura de um material. Isto ocorre quando ele é mantido sob uma carga constante ou quase constante, podendo levar à ruptura, sem necessariamente atingir a força final do material. Este fenômeno tem três parâmetros principais de interferência: carga, tempo e temperatura (Findley et al., 1976).

O ensaio de fluência consiste em submeter um corpo de prova a uma carga e temperatura constantes. A deformação é medida e traçada em função do tempo decorrido de ensaio. A curva resultante define três regiões com características diferentes: Primária, secundária e terciária (CALLISTER, 2008).

A etapa primária ocorre a uma taxa de fluência decrescente, ou seja, a inclinação da curva diminui ao longo do tempo. Na secundária, a taxa é praticamente constante, ou seja, a curva se torna linear. Por fim, na região terciária ocorre uma aceleração na taxa e a ruptura do material (CALLISTER, 2008).

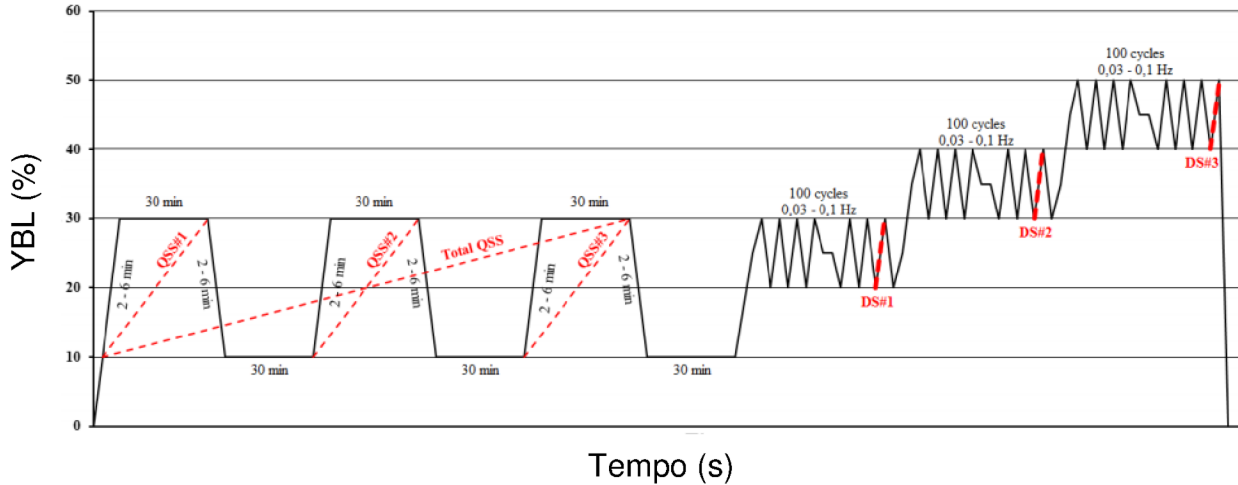
2.5.5. Ensaio de rigidez quase estática e dinâmica

A rigidez quase estática (QSS) tenta avaliar a perda de rigidez do cabo devido ao regime de fluência ao qual ele é submetido durante sua vida útil. Enquanto, a rigidez dinâmica (DS) é a relação entre a variação na carga e a variação na deformação sob carregamento cíclico (STUMPF et al., 2016).

Segundo a norma ABNT ISO/TS 14909:2013 o procedimento do ensaio consiste em duas fases: A primeira fase aplica-se uma carga de tração de 30% YBL em um período de 2 min a 6 min; Manter a carga de 30% YBL durante 30 min e reduzir a carga de 30% YBL para 10% YBL e manter por mais 30 min. Este ciclo deverá ser repetido 3 vezes. A segunda fase, com uma frequência entre 0,03 e 0,1 Hz, aplica-se 100 ciclos

entre 30% YBL a 40% YBL, subindo a carga em 10%, deve-se repetir o ciclo por 3 vezes. A figura 9 apresenta o esquema de ensaio.

Figura 9 - Esquema do ensaio de rigidez de acordo com a norma ABNT ISO/TS 14909:2013.



Fonte: STUMPF et al., (2016).

Para calcularmos a rigidez quase estática e dinâmica, utilizamos a equação 22, também prevista na norma ABNT ISO/TS 14909:2013.

$$QSS, DS = \frac{\frac{Fy - Fx}{YBL}}{\frac{Ly - Lx}{Lo - Ly}} \quad (22)$$

Em que $(Fy - Fx)$ é a variação da carga registrada, $(Ly - Lx)$ é a variação do alongamento registrado, Lo é o comprimento inicial e YBL a carga de ruptura do cabo.

2.5.6. Estudos do comportamento mecânico de materiais sintéticos perante carregamentos cíclicos

Nessa seção são apresentados alguns realizados e que retratam o comportamento mecânico dos materiais sintéticos sob carga cíclica.

- a) Mandell (1987) comparou dados de testes em fadiga de cabos de poliéster e nylon úmidos. Concluiu que carregamentos cíclicos a partir de 30% YBL – 40% YBL causam ruptura por deformação plástica no nylon e para o poliéster a partir de 60% YBL – 70% YBL. As falhas por fadiga com carregamentos mais baixos e ciclos mais altos, ocorrem geralmente por fricção interna ou externa dos fios. Os resultados da vida em fadiga do poliéster, superaram o nylon.
- b) Liu et al. (2014) analisaram a rigidez dinâmica e a vida em fadiga de cabos de poliéster, aramida e HMPE. A resistência à ruptura do HMPE se mostrou 3 vezes maior que a da aramida e 4 vezes maior que a do poliéster, para um cabo de 6 mm de diâmetro. Além disso, o HMPE mostrou os melhores resultados no gráfico de tensão - deformação estática e rigidez dinâmica. A variação da rigidez após os ciclos de carregamento de fadiga foi próxima para todos os materiais, não sendo significativa.
- c) Davies et al. (2015) estudaram a fadiga em cabos sintéticos de HMPE, analisando o comportamento do cabo úmido na curvatura de uma roldana. A falha ocorreu na metade do comprimento da amostra. Os ensaios mostraram que, quanto maior a amplitude de tensão, tanto menor é o número de ciclos atingidos até a ruptura. Observou-se o surgimento de tensões residuais nos cabos após o carregamento cíclico e quatro mecanismos distintos de danos causados pela polia foram notados: achatamento da superfície em contato com a roldana, extrusão de alças de fibra na superfície externa, abrasão entre fios dentro do cabo e a quebra de fibras.
- d) Vannucchi et al. (2016) analisaram o comportamento da vida em fadiga de fibras de poliéster, aramida, HMPE e LCP. As fibras de poliéster e LCP apresentaram uma tendência similar na resistência cíclica, a qual foi diminuindo proporcionalmente com a amplitude da carga aplicada. Enquanto, a aramida e HMPE apresentaram o maior número de ciclos em todas as amplitudes.
- e) Humeau et al. (2018) estudaram a falha por fadiga em cabos de HMPE (polietileno de alto módulo), concluindo que o aumento da temperatura de ensaio é diretamente proporcional à redução da vida em fadiga e que a falha é induzida pela abrasão e ditada pelo número de ciclos, sem influência da frequência. O

número de ciclos até a falha se mostrou uma função exponencial da tensão máxima aplicada.

- f) Wehr et al. (2018) fizeram uma análise na vida em fadiga considerando carregamentos aplicados ao campo de robótica (flexão de cabos) e uma análise na tensão de ruptura versus peso específico. Utilizaram três materiais diferentes: HMPE, aramida e TLCP. Comparando os três, o HMPE se mostrou mais resistente à tração e apresentou a menor massa específica. Já a aramida e o TLCP não mostraram muita diferença. Os cabos de aramida e HMPE tiveram praticamente os mesmos resultados na vida em fadiga por flexão, já os cabos de TLCP apresentaram resultados bem inferiores.

2.5.7. Estudos do comportamento mecânico de materiais sintéticos perante à carregamentos de impacto

Nessa seção são apresentados alguns estudos experimentos realizados anteriormente ao presente trabalho e que retratam o comportamento mecânico dos materiais sintéticos após o carregamento de impacto.

- a) Northolt et al. (1995) estudaram o comportamento mecânico das fibras poliméricas sob carga de cisalhamento e tensão súbitas. Foi descoberto que um rearranjo de moléculas no cabo foi o principal fator que alterou o comportamento mecânico do material. Um aumento na força de tração provoca um aumento na rigidez das fibras devido aos ângulos decrescentes em relação ao eixo do cabo.
- b) Signoretti (2001) abordou em seu trabalho o cuidado com a utilização de cordas de poliamida molhadas, visto que no primeiro ensaio de impacto foi identificado um aumento de 5-10% na força de impacto em comparação ao seu estado seco. O autor atribui esse fenômeno ao aumento das forças de atrito entre as fibras, causadas pela absorção de água. Ainda observou uma redução de 30% na resistência a quedas livres sucessivas.
- c) McLaren (2006) observou que a exposição de amostras de cordas de poliamida à luz solar durante 3 meses em uma montanha a 2250 metros de altitude provocou uma redução de 35% no número de testes de queda livre sucessivos, enquanto

as amostras expostas em uma montanha a 1834 metros, nas mesmas condições, houve uma diminuição de 15%. Essa redução do número de quedas foi atribuída a degradação foto-oxidativa que altera a estrutura química das moléculas de poliamida e em consequência diminui a taxa de absorção de energia e a elasticidade do material.

- d) Vogwell e Minguez (2007) estudaram o efeito do fator de queda (h/l) para carregamentos de impacto, eles analisaram os efeitos dessa alteração e concluíram que a força transmitida ao longo da corda permanece inalterada se a razão continuar constante e que a força de impacto é diretamente proporcional à razão h/l .
- e) Vogwell e Minguez (2007) também estudaram o comportamento dos cabos submetidos a cargas sucessivas de impacto. Concluíram que ocorre o aumento da rigidez axial da corda a cada ensaio de impacto.
- f) Davies et al. (2011) compararam cabos de HMPE e aramida submetidos a carregamentos semelhantes a operações *offshore*. Eles concluíram que, aplicando uma pré carga nos cabos, o HMPE apresentou uma rigidez maior em comparação com a aramida. Já para a vida em fadiga, considerando os materiais em estado natural (secos) é maior para a aramida. Porém, quando os materiais são testados após estarem imersos em água, os resultados da vida em fadiga para a aramida não foram tão bons quanto o do HMPE.
- g) Nikonov et al. (2011) utilizaram a metodologia experimental numérica analítica (ENA), para diferenciar o comportamento mecânico de cordas de escaladas de poliamida secas e molhadas. As cordas molhadas tiveram uma perda da resistência ao impacto em comparação com às secas. Além disso, se deformam muito mais do que as secas. Mas para ambos os cabos, a deformação diminui lentamente com o aumento do número de ciclos de carga, o que significa que ambos os cabos se tornam mais rígidos de um ciclo de carregamento para outro. A energia armazenada no impacto é muito maior para cordas molhadas, e durante os primeiros carregamentos, a mudança dessa característica é significativa em comparação com às cordas secas. Para ambos os casos, as principais características para analisar o comportamento mecânico das cordas perante o

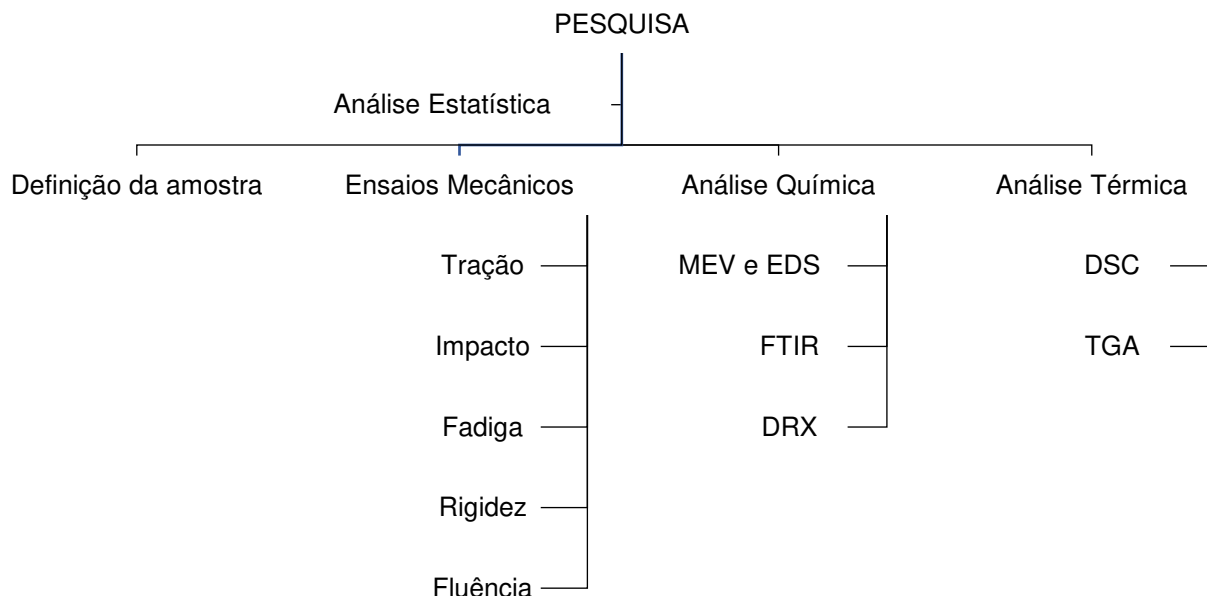
impacto foram detectadas nos primeiros 3 ciclos de carregamento, ou seja, após o quarto ciclo a diferença entre propriedades não foi significativa.

- h) Martin et al. (2014) compararam as forças de impacto transmitidas nos cabos utilizados por bombeiros fabricados em aramida, poliamida e em ambos os materiais. Em todos os casos estudados, as cordas de aramidas apresentaram os valores das cargas dinâmicas mais elevados, inclusive atingindo valores fatais para o corpo de um bombeiro, segundo a OSHA (Occupational Safety and Health Administration) o limite é equivalente a 8 kN.
- i) Mizutani et al. (2017) estudaram mudanças na rigidez de cabos de HMPE após sofrerem uma carga de impacto, bem como o efeito da aplicação de uma pré carga na rigidez. Concluíram que o carregamento de impacto consecutivo afeta as propriedades do cabo HMPE virgem, devido ao rearranjo das fibras e a alteração da geometria de construção do cabo. Verificou-se que a rigidez da corda se torna estável e endurecida pelo tratamento de pré-carga e quando a carga de impacto é de cerca de 0.344 de YBL. A pré-carga e/ou carga de impacto consecutiva devem ser implementadas em cabos de fibra sintética, se for necessária uma alta rigidez em uma aplicação prática.
- j) Louzada et al. (2017) estudaram o comportamento mecânico na vida em fadiga de multifilamentos de poliéster após serem submetidos a uma carga de impacto. Concluíram que a redução da vida em fadiga depende da magnitude da carga de impacto aplicada.
- k) Hahn (2019) estudou a resistência à ruptura na tração de fibras sintéticas após essas serem submetidas a um carregamento de impacto. Os resultados mostraram que as fibras rompem no impacto com uma carga próxima àquela obtida no teste de tração. Além disso, observou-se que as fibras de poliéster, aramida e HMPE apresentam estabilidade nos valores obtidos de força máxima a tração, após a aplicação do carregamento de impacto sem ruptura do material. Para as condições de impacto de baixo valor, houve um aumento na resistência à tração das fibras de HMPE. Por fim, as fibras de aramida e LCP apresentaram os menores resultados de resistência ao carregamento de tração.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para avaliar o comportamento dos multifilamentos quando são submetidos a carregamentos cíclicos e súbitos, foram realizadas algumas etapas conforme apresentadas na figura 10. Nesta seção será apresentada a metodologia experimental que permite avaliar o comportamento mecânico dos multifilamentos perante os carregamentos. Além disso, técnicas de caracterização do material foram utilizadas no presente trabalho e serão apresentados a seguir.

Figura 80 - Organograma das etapas da pesquisa.



Fonte: O autor.

O material utilizado foi o HMPE (polietileno de alto módulo) produzido por três diferentes fabricantes, os quais serão tratados como HMPE 1, HMPE 2 e HMPE 3. Os ensaios mecânicos foram realizados no Laboratório POLICAB, pertencente à Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande – FURG.

3.1. DEFINIÇÃO DA AMOSTRA

O cabo é composto por sua capa e seu núcleo conforme apresentado na figura 11. O núcleo é formado por alma e pernas, as quais são constituídas por multifilamentos. Esse arranjo do núcleo é o responsável pelas propriedades mecânicas do cabo. Enquanto a capa, tem por função, a proteção do núcleo contra danos ambientais e abrasão.

Figura 11 - Estrutura de um cabo sintético.

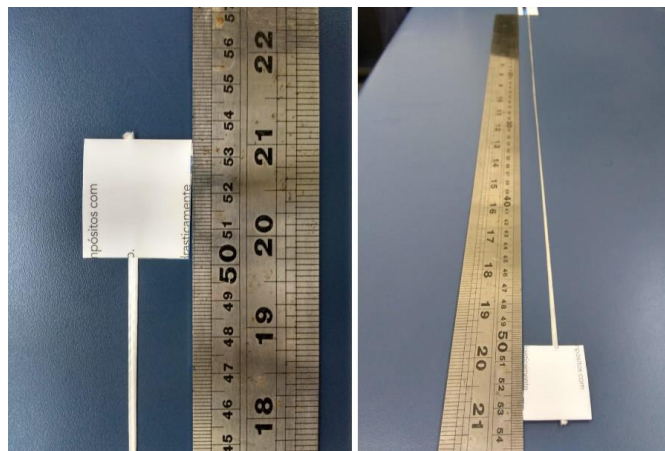


Fonte: Haach (2010).

No presente trabalho, foram utilizados multifilamentos, matéria prima para a composição de cabos. A escolha da geometria da amostra utilizada é fundamentada na capacidade de carga das máquinas de ensaio e materiais disponíveis para a pesquisa. Os corpos de prova são fabricados contendo 500 mm de comprimento, com as suas extremidades envolvidas por “sanduíches” feitos de papel para fornecer maior resistência ao atrito, devido ao baixo coeficiente dos filamentos com a garra da máquina conforme apresentado na figura 12.

As condições de ensaio seguem as recomendações da norma ISO 139:2014, que apresenta a atmosfera padrão para condicionamento e testes em fibras. As amostras são mantidas no mínimo por 2 horas em ambiente com temperatura e umidade relativa controladas de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e $65 \pm 4\%$, respectivamente, antes e durante os testes.

Figura 12 - Exemplo de amostra.



Fonte: O autor.

3.2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL – ENSAIOS MECÂNICOS

Na primeira etapa, é obtida a força de ruptura dos multifilamentos através do ensaio de tração, realizado em uma máquina modelo INSTRON 3365 conforme apresentado na figura 13, utilizando uma velocidade de rampa até a ruptura igual a 250 mm/min (ASTM D885:2014). Como resultado de referência, é utilizado a média de 30 amostras virgens ensaiadas.

Figura 13 - Máquina de tração (INSTRON 3365).

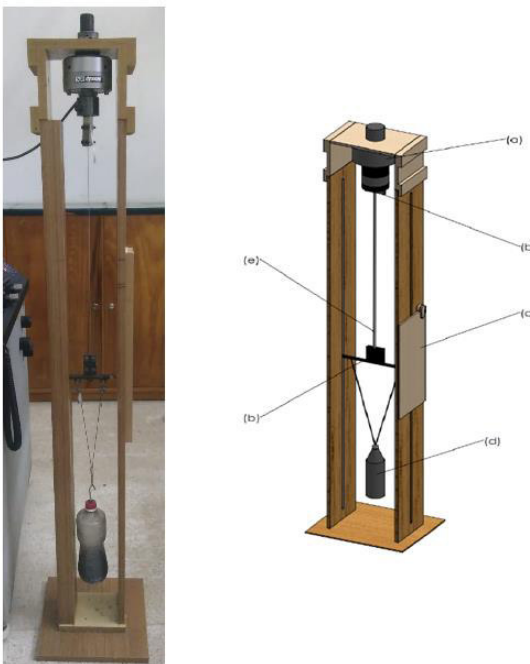


Fonte: O autor.

Na segunda etapa é realizada uma análise do material perante a carga de impacto, utilizando um dispositivo desenvolvido pelo Laboratório de Análise de Tensões – POLICAB conforme figura 14. Com ele é possível medir a força de impacto aplicada no cabo, alongamento máximo e deformação viscoplástica. Essa etapa consiste em duas fases: (i) Realizar ensaios de impacto (rompe/não rompe) para obter a porcentagem de YBL crítica; (ii) Realizar ensaios de impacto com massas iguais a 4% YBL e 5% YBL; ambas com uma altura de queda livre de 300 mm.

Para a medição da força de impacto ao longo do tempo nos multifilamentos é utilizada uma célula de carga de ± 10 kN localizada na extremidade superior do equipamento. Ela possui uma frequência de amostragem de 5 kHz, atendendo aos requisitos da norma BS EN 892:2012. A deformação elástica e a energia absorvida são calculadas nessa etapa a partir dos parâmetros medidos nos ensaios de impacto, por meio das Eqs. (12) e (17).

Figura 14 - Máquina de ensaio de impacto do POLICAB. (a) célula de carga; (b) fixadores do espécime; (c) multifilamento de poliéster; (d) marcador de deformação; (e) massa (f) altura de queda livre.



Fonte: O autor.

Na terceira etapa, ensaios de fadiga foram realizados para as amostras virgens e impactadas com 4% YBL e 5% YBL, utilizando uma máquina modelo INSTRON 8801, conforme apresentada na figura 15, com uma frequência de ciclagem equivalente a 0,1 Hz, conforme norma ASTM D885:2014 e cargas cíclicas de:

- a) 10% - 90% de YBL;
- b) 20% - 90% de YBL;
- c) 30% - 90% de YBL;
- d) 40% - 90% de YBL;
- e) 50% - 90% de YBL;
- f) 60% - 90% de YBL;
- g) 70% - 90% de YBL.

Foram utilizados carregamentos com valores extremos, devido ao tempo e para entender o comportamento do material no seu limite de carga.

Figura 15 - Máquina para ensaios de Fadiga (INSTRON 8801).



Fonte: O autor.

Na quarta etapa, foi realizado o ensaio de rigidez quase estática e dinâmica, com o objetivo de comparar os resultados obtidos com os demais. Como valor de referência, foi utilizado a média de 3 amostras testadas de cada material. Os parâmetros de ensaio

Figura 17 - Máquina para ensaio de rigidez.



Fonte: O autor.

Por fim, também foram realizados testes de fluência para comparar com o comportamento do material obtido nos resultados de fadiga e rigidez. Os ensaios foram feitos em uma máquina EMIC DL-2000, conforme apresentado na figura 18, utilizando carregamentos de 70% YBL, 80% YBL e 90% YBL com uma taxa de deformação inicial de 450 mm/min.

Figura 18 - Máquina para ensaio de fluência.



Fonte: O autor.

3.3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL – ANÁLISE QUÍMICA

Na primeira etapa da análise química e morfológica, foi utilizado um microscópio eletrônico da varredura analítico (MEV) modelo JSM – 6610LV para analisar as amostras antes e após o impacto com 4% YBL, impacto com 5% YBL e amostras rompidas por fadiga. Juntamente com o MEV, foi realizado uma microanálise química elementar (EDS) de cada material.

Na segunda etapa, foi realizada uma análise com espectroscopia na região do infravermelho (FTIR) para identificar os grupamentos funcionais presentes dos materiais. As amostras foram submetidas à determinação espectroscópica na região do infravermelho ($450\text{-}4500\text{ cm}^{-1}$) utilizando uma máquina modelo PRESTIGE 21, 210045, usando a técnica de refletância atenuada total (ATR-FTIR).

Por fim, foi utilizado o difratômetro de raios x (DRX) modelo D8 ADVANCE/DAVINCI nas amostras virgens e após o impacto com 4% YBL e 5% YBL. As amostras foram picotadas e alocadas nos recipientes para a realização da análise em temperatura ambiente. O ângulo de difração variou de 5° a 75° em intervalos de $0,05\text{ nm}$ (KUMIRSKA et al., 2010).

3.4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL – ANÁLISE TÉRMICA

As características térmicas das amostras foram determinadas por meio de análise por calorimetria exploratória diferencial (DSC) e análise termogravimétrica (TGA). Nas análises térmicas de DSC foi utilizado um calorímetro modelo Shimadzu DSC-6, conforme apresentado na figura 19. As amostras com massa de $3,0\text{ mg}$ foram alocadas em recipientes tipo painéis de alumínio hermeticamente fechadas, e como referência foi utilizado um recipiente vazio. As amostras foram analisadas em atmosfera de N_2 com vazão de gás de 50 mL min^{-1} , em intervalo de temperatura de 25°C a 300°C , a uma taxa de aquecimento de $10^\circ\text{C min}^{-1}$.

Figura 19 - Shimadzu DSC – 60 comercial.



Fonte: Shimadzu¹

¹ Disponível em: <http://www.shimadzu.com.br/analitica/produtos/thermal/dsc-60_plus.shtml>. Acesso em: 22 Jun. 2019.

As curvas termogravimétricas (TG) das amostras foram obtidas em uma termobalança modelo Shimadzu TGA-60, conforme apresentado na figura 20, com fluxo de nitrogênio 50 mL min⁻¹ e uma taxa de aquecimento de 10 °C min⁻¹. As amostras foram colocadas em cadinhos de alumínio e aquecidas na faixa de temperatura de 35 a 550°C.

Figura 20 - Shimadzu TGA – 60 comercial.



Fonte: Shimadzu²

² Disponível em: <<http://www.shimadzu.com.br/analitica/produtos/thermal/dtg-60.shtml>>. Acesso em: 22 Jun. 2019.

3.5. ANÁLISE ESTATÍSTICA

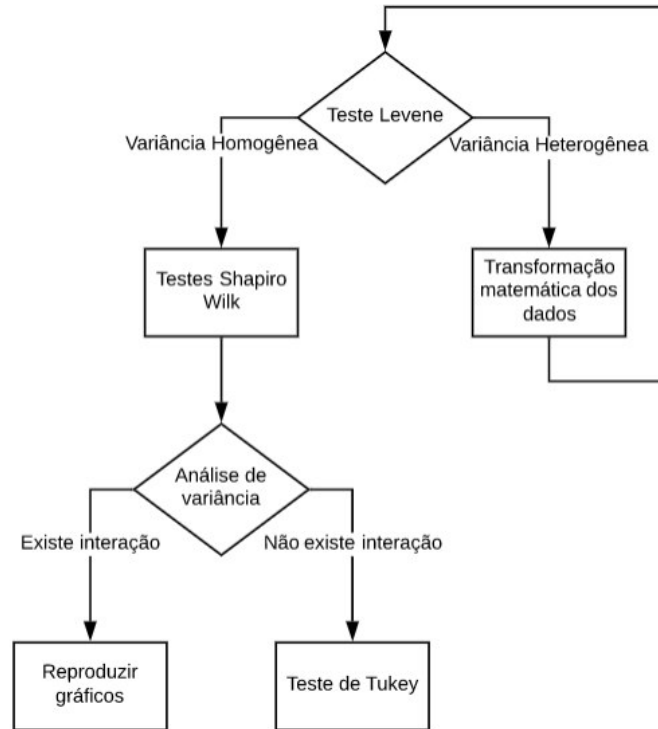
A média e o desvio padrão são utilizados para avaliar a posição central e a dispersão de um conjunto de dados obtidos. Porém, esses parâmetros podem não ser o suficiente para expressar resultados com grandes desvios de valores da posição central. Com isso, foi necessário a utilização da análise de variância (ANOVA). A análise foi realizada para investigar a influência do efeito de cada um dos fatores, material e carga de impacto, e suas interações sobre a vida em fadiga do material em cada intervalo. A figura 21 apresenta a sequência necessária para aplicação da ANOVA.

O teste de Levene serve para verificar a hipótese de igualdade das variâncias populacionais (σ) das amostras (hipótese nula). Utilizando um intervalo de confiança igual a 99% é calculado o p-valor. Se $p\text{-valor} \geq 1\%$, o resultado é significativo e as variâncias populacionais das amostras são iguais, sendo assim, consideradas homogêneas. Se $p\text{-valor} \leq 1\%$ o resultado é insignificante e a hipótese nula é rejeitada, com isso, as amostras são consideradas heterogêneas. Para corrigir o desvio é empregado o recurso da transformação matemática nos dados observados para a escala logarítmica na tentativa de homogeneizar as variâncias populacionais e evitar a utilização de testes não paramétricos que se caracterizam por apresentar um menor poder (MAROCO, 2007; MONTGOMERY, 2013).

Após essa etapa, foi realizado o teste de Shapiro – Wilk. Esse teste de normalidade dos erros serve para avaliar se a forma da distribuição dos erros da variável em questão no estudo é do tipo normal. É necessário a realização desse teste pois uma das premissas para validar os resultados encontrados na ANOVA é a distribuição dos erros experimentais seja normal.

Em seguida, foi realizada a análise de variância (ANOVA). Dois fatores foram trabalhados: o fator A (material) tem três níveis ($i = 1, 2, 3$) e o fator B (carga de impacto) também tem três níveis ($j = 1, 2, 3$), sendo que cada uma das combinações dos níveis dos fatores A e B possui 20 amostras ensaiadas ($k = 1, 2, \dots, 20$).

Figura 21 - Procedimento para aplicação da ANOVA.



Fonte: O autor.

O comportamento da variável dependente por meio de um modelo teórico da análise de variância em que y_{ijk} é o número de ciclos até a ruptura, μ é igual à média global da resposta, os termos τ_i e β_j são respectivamente os efeitos dos fatores (material e carga de impacto) sobre a resposta, γ_{ij} é o efeito da interação entre os fatores e ε_{ijk} é o erro experimental, conforme equação 22 (MAROCO, 2007; MONTGOMERY, 2013).

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (22)$$

Na análise de variância são verificadas três hipóteses nulas: $H_0^{(A)}$: $\tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = 0$ (não há diferença na vida em fadiga entre os materiais); $H_0^{(B)}$: $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$ (não há redução da vida em fadiga devido à aplicação prévia de uma carga de impacto) e $H_0^{(AB)}$: $(\tau\beta)_{ij} = 0$ (não há interação entre o material e a carga de impacto). Utilizando um intervalo de confiança igual a 99% é calculado o p-valor para cada um dos três testes estatísticos. Caso p-valor $\leq 1\%$, a hipótese nula é rejeitada, e se p-valor $\geq 1\%$ a hipótese

nula é aceita (MAROCO, 2007; MONTGOMERY, 2013).

Se alguma das médias da vida em fadiga for diferente das demais, se faz necessária a aplicação do teste de Tukey, que consiste na comparação de pares de médias. Esse método permite conhecer em quais dos casos de materiais e de cargas de impacto as médias do número de ciclos até a ruptura são diferentes.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados obtidos por meio da metodologia aplicada. Primeiramente, são apresentados os resultados do ensaio de tração e do comportamento do material perante a um carregamento de impacto. Em seguida, a influência do material e o do carregamento de impacto na vida em fadiga são apresentados.

Além disso, características mecânicas como rigidez quase estática, dinâmica e fluência, assim como características químicas e térmicas são apresentadas. Por fim, os resultados são comparados e avaliados com o objetivo de tecer conclusões e estabelecer novas hipóteses a serem testadas futuramente.

4.1. FORÇA DE RUPTURA ESTÁTICA DOS MATERIAIS

Para encontrar a força de ruptura média dos multifilamentos foram utilizadas 30 amostras, conforme descrito na metodologia. A tabela 1 apresenta os resultados obtidos para os três diferentes polietilenos de alto módulo.

Tabela 1 - Força de ruptura em tração dos materiais virgens.

Material	Força média de Ruptura (N)	Alongamento médio máximo (mm)	Deformação média máxima (%)	Desvio Padrão (N)
HMPE 1	503,48	14,37	2,87	21,72
HMPE 2	532,46	15,97	3,19	21,19
HMPE 3	500,84	16,15	3,23	16,36

A força da ruptura em tração se mostrou semelhante para os três materiais. Porém o desvio padrão do HMPE 3 foi inferior aos demais, com isso expressando uma melhor estabilidade nos resultados de ensaio tração. Pode ser observado que o HMPE 2 possui a maior resistência a tração. Além disso, o HMPE 1 apresentou a menor média de alongamento, enquanto o HMPE 3 apresentou a maior média.

4.2. COMPORTAMENTO PERANTE AO CARREGAMENTO DE IMPACTO

A análise do comportamento mecânico dos materiais perante a um carregamento de impacto foi realizado em duas etapas:

- a) Verificação do valor de carga necessária para romper os multifilamentos com um peso em queda livre de 300 mm de altura;
- b) Análise da força transmitida versus o tempo, além da determinação dos parâmetros físicos dos fios após o impacto.

Os resultados obtidos nos ensaios de impacto do HMPE 1, HMPE 2 e HMPE 3, são apresentados na tabela 2, tabela 3 e tabela 4, respectivamente. Observa-se que para os materiais HMPE1 e HMPE 2, todos os multifilamentos romperam com cargas a partir de 7% YBL (aproximadamente 3,593 kg para o HMPE 1 e 3,799 kg para o HMPE 2). Para o HMPE 3 a partir de 6% YBL (aproximadamente 3,063 kg) todos os multifilamentos romperam.

Tabela 2 - Resultados experimentais para ensaios de impacto com queda livre de 300 mm do HMPE 1.

Carga [% YBL]	3%	4%	5%	6%	7%	8%
Peso [kg]	1,540	2,053	2,566	3,079	3,593	4,106
Nº de amostras rompidas	0	0	4	9	20	20
Nº de amostras não rompidas	20	20	16	11	0	0

Tabela 3 - Resultados experimentais para ensaios de impacto com queda livre de 300 mm do HMPE 2.

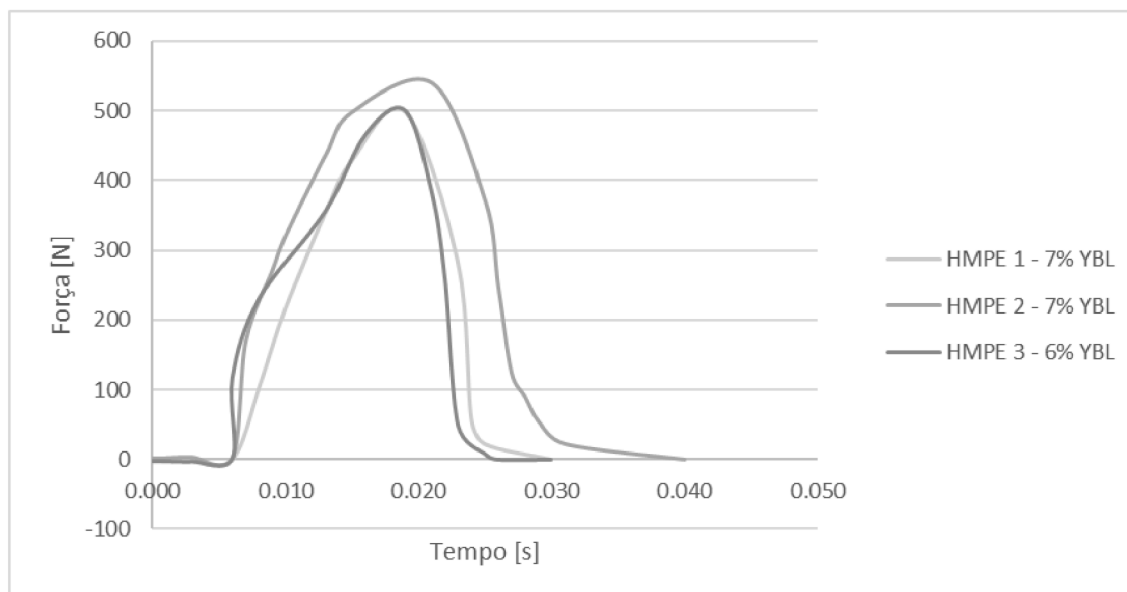
Carga [% YBL]	3%	4%	5%	6%	7%	8%
Peso [kg]	1,628	2,171	2,714	3,257	3,799	4,342
Nº de amostras rompidas	2	7	11	15	20	20
Nº de amostras não rompidas	18	13	9	5	0	0

Tabela 4 - Resultados experimentais para ensaios de impacto com queda livre de 300 mm do HMPE 3.

Carga [% YBL]	3%	4%	5%	6%	7%
Peso [kg]	1,532	2,042	2,553	3,063	3,574
Nº de amostras rompidas	2	5	14	20	20
Nº de amostras não rompidas	18	15	6	0	0

As cargas de 6% YBL para os HMPE 1 e HMPE 2 (aproximadamente 3,079 kg e 3,257 kg, respectivamente) e as cargas de 5% YBL para o HMPE 3 (aproximadamente 2,553 kg), devem ser consideradas como críticas, pois rompem grande parte dos corpos de prova. A seguir, na figura 22, são mostradas as curvas de forças versus tempo para cada HMPE utilizando as massas suficientes para causarem a ruptura. Foi utilizada a média de 30 amostras para plotar a curva.

Figura 22 - Curva da força de impacto versus tempo para os HMPE 1, 2 e 3.



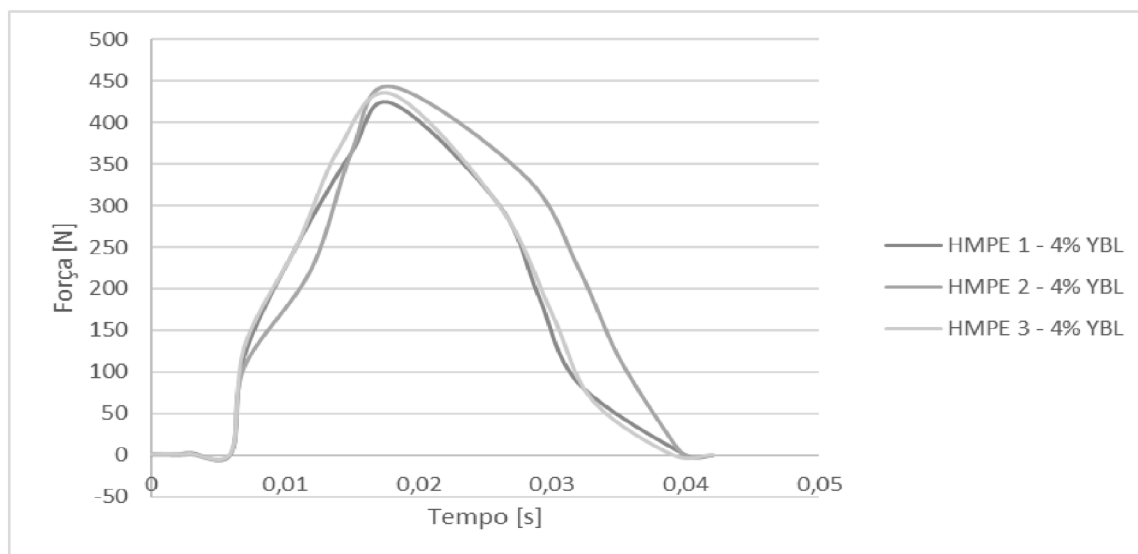
Como mostrado na figura 22, as forças de ruptura por impacto dos HMPE 1, 2 e 3, são respectivamente 498,4 N, 539,6 N e 500,0 N, ou seja, próximas da força de ruptura estática. A tabela 5 compara essas forças encontradas nos ensaios de impacto com as forças de ruptura obtidas pelo teste de tração, ressaltando que, a força crítica de ruptura foi considerada como sendo 6% YBL para o HMPE 1 e HMPE 2 e 5% YBL para o HMPE 3.

Tabela 5 - Comparação entre forças de ruptura por impacto e por tração estática.

Material	Força crítica de ruptura por impacto [N]	Força de ruptura por impacto [N]	Força de ruptura por tração estática [N]
HMPE 1	472,1	498,4	503,4
HMPE 2	522,2	539,6	532,4
HMPE 3	451,5	500,0	500,8

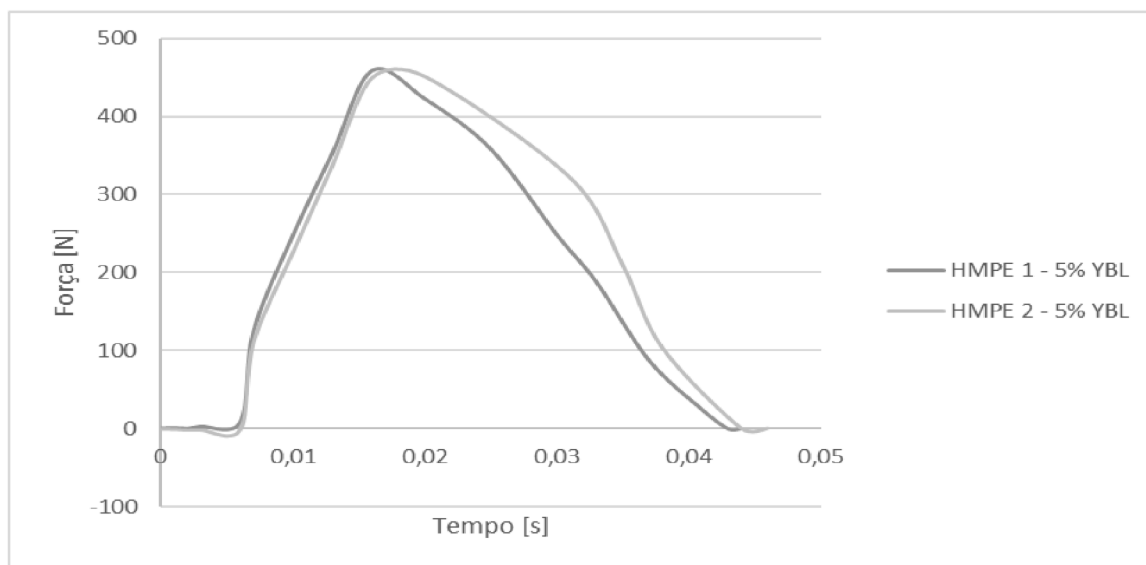
Escolheu-se os carregamentos de 4% YBL e 5% YBL para serem analisados e aplicados a fadiga, pois o carregamento inferior ao de ruptura foi considerado como crítico. A figura 23 mostra as curvas de força versus tempo para uma queda livre de 4% YBL. Foi utilizada a média de 30 amostras para plotar a curva.

Figura 23 - Curva da força de impacto versus tempo devido o lançamento em queda livre de uma massa igual a 4%YBL.



A figura 24 mostra as curvas de força versus tempo para uma queda livre de 5% YBL. Ressalta-se que a curva para o HMPE 3, não foi apresentada, pois uma massa de 5% YBL é suficiente para causar a falha em aproximadamente 70% dos corpos de prova. Foi utilizada a média de 30 amostras para plotar a curva.

Figura 24 - Curva da força de impacto versus tempo devido o lançamento em queda livre de uma massa igual a 5%YBL.



A seguir, nas figuras 25 e 26 são mostras as deformações máximas e viscoplásticas, medidas por meio de uma escala nos testes de impacto. Além desses parâmetros, a deformação elástica e a energia armazenada são calculadas numericamente partir das equações 12 e 17, apresentadas na revisão bibliográfica.

É possível observar que o material HMPE 2 armazenou a maior quantidade de energia durante o carregamento de impacto para 4% YBL e 5% YBL, devido à queda da maior massa. Esse resultado era esperado, pois a energia armazenada do multifilamento é diretamente proporcional à massa e à deformação máxima (EMRI et al., 2008).

Para 6% YBL, o HMPE 1 mostrou a menor deformação total, enquanto os demais apresentaram uma maior deformação, porém sem diferença significativa entre o HMPE 2 e HMPE 3. Analisando a deformação elástica, a qual é um parâmetro importante dependendo da aplicação, pois é responsável por impulsionar a massa na direção vertical oposta, causando uma aceleração indesejável, é possível observar que o HMPE 2

apresentou a menor deformação, enquanto o HMPE 1 e HMPE 3 apresentaram deformações superiores e semelhantes.

Figura 25 - Parâmetros físicos medidos e calculados para uma massa igual a 4%YBL.

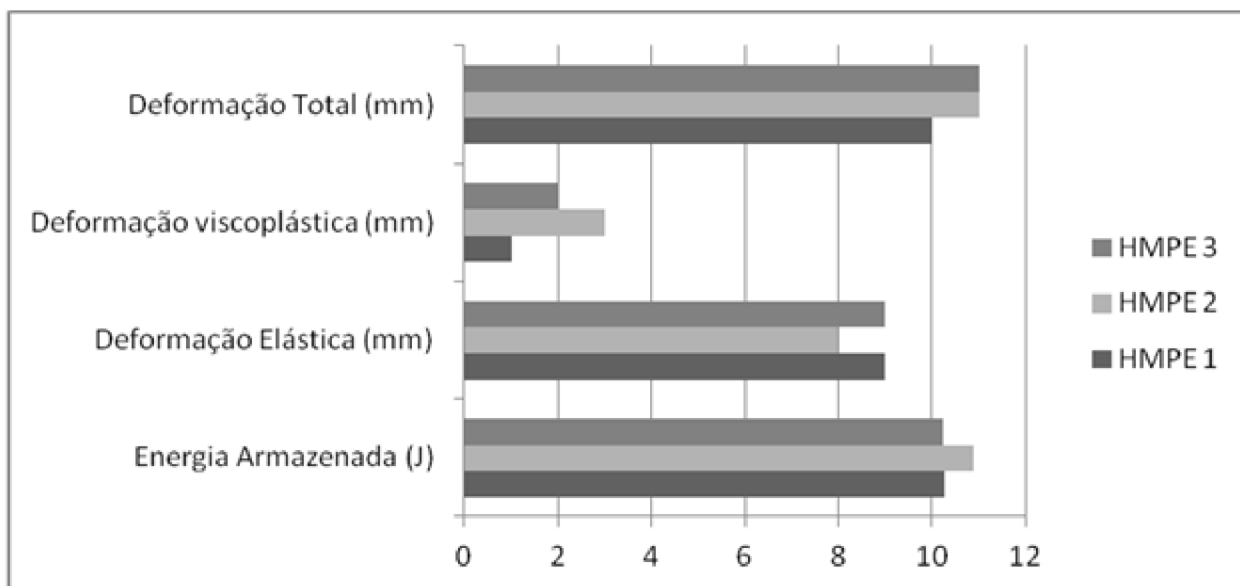
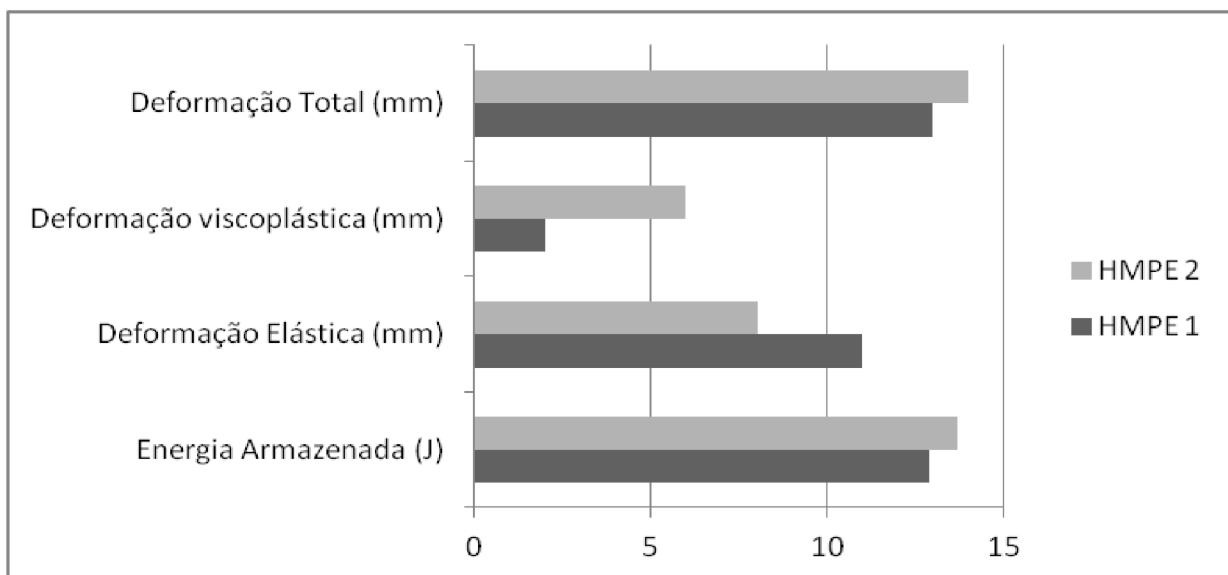


Figura 26 - Parâmetros físicos medidos e calculados para uma massa igual a 5%YBL.



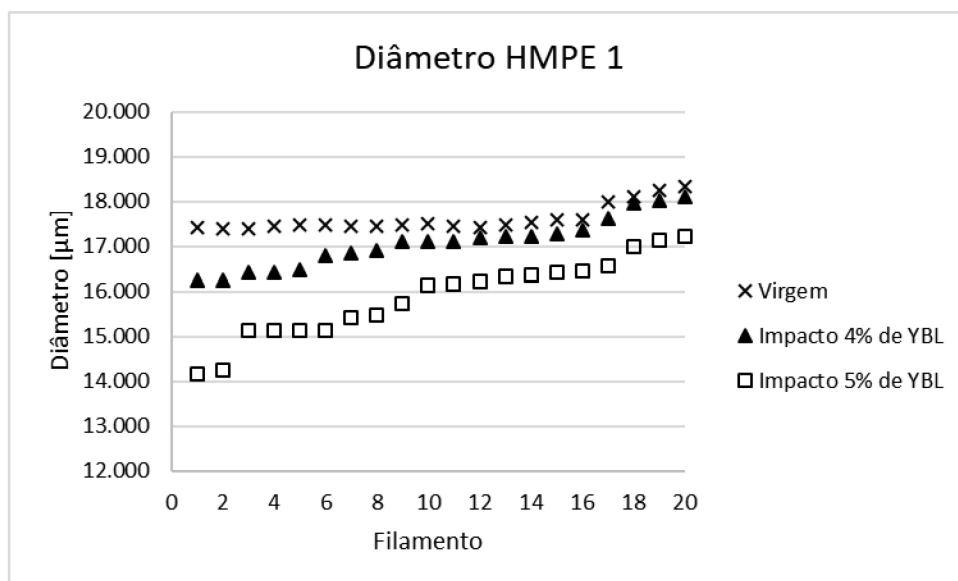
Além disso, realizando uma comparação da energia dissipada para os carregamentos, nota-se que as cargas que levam a ruptura, apresentam um valor de energia inferior as demais para os três materiais. Logo, pode-se levar em consideração

que a falta de dissipação de energia, pode ter causado a ruptura do material (EMRI et al., 2008).

4.3. ESTRUTURA DE UM MULTIFILAMENTO APÓS CARREGAMENTOS DINÂMICOS

Os multifilamentos dos três materiais foram analisados no microscópio eletrônico de varredura (MEV). Foram mensurados os diâmetros dos filamentos virgens, impactados com uma massa de 4% de YBL e 5% de YBL. Essas medições foram realizadas através do software analisador de imagem IMAGE J e foram comparadas conforme apresentado nas figuras 27, 28 e 29. Ressalta-se que foram realizadas 20 medições de cada material.

Figura 27 - Diâmetro dos filamentos do HMPE 1.



Analisando as figuras 27, 28 e 29, é possível perceber que o multifilamento HMPE 3 possui a maior degradação dos fios após o impacto de 4% de YBL, apesar de terem apresentado a maior média de diâmetro dos multifilamentos virgens. Porém, a análise por meio do microscópio eletrônico de varredura, não esclarece se a degradação é causada pelo alongamento do fio durante o impacto o qual faz o filamento ter redução do

diâmetro devido a permanência do volume de material ou a degradação é causada pela divisão dos filamentos ou até mesmo descascamento dos mesmos.

Figura 289 - Diâmetro dos filamentos do HMPE 2.

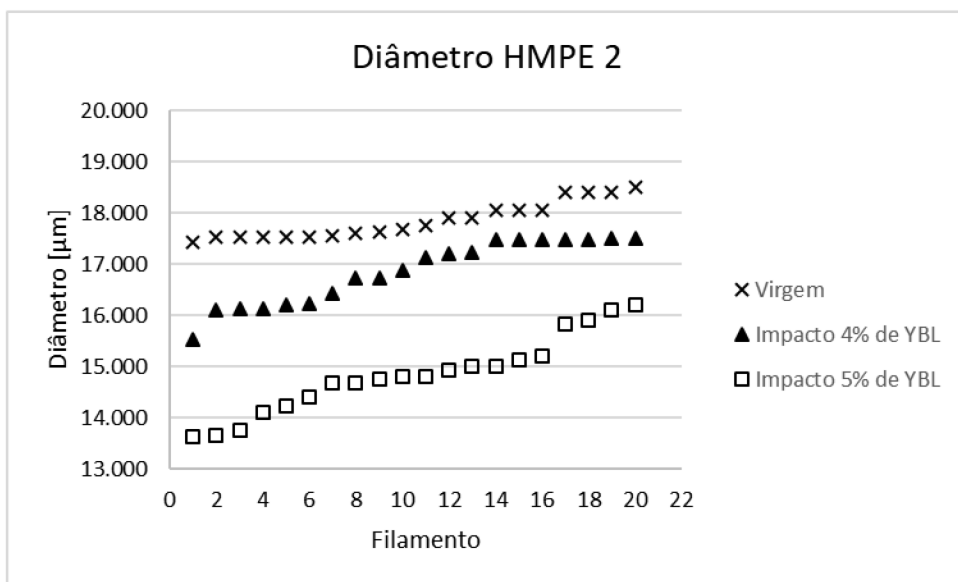
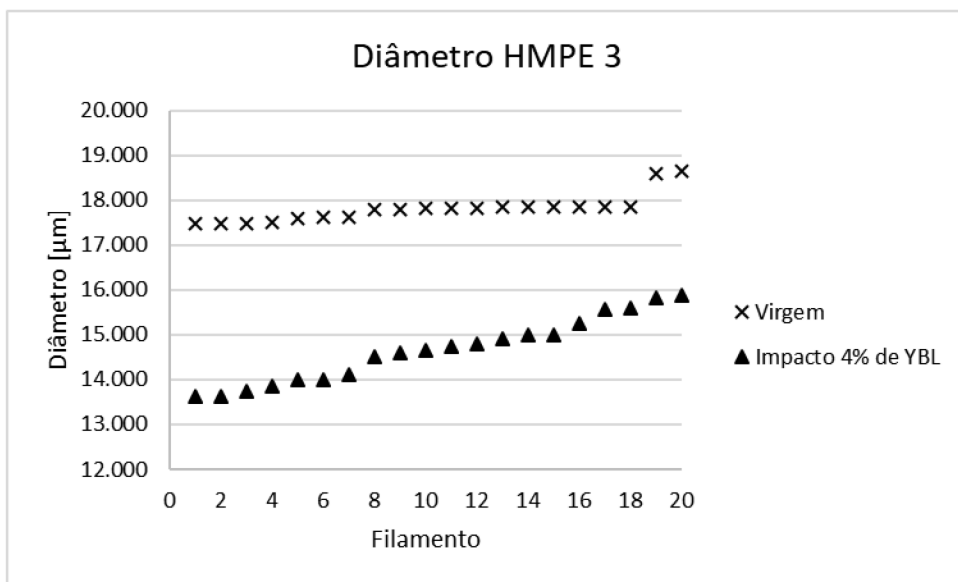


Figura 2910 - Diâmetro dos filamentos do HMPE 3.



As figuras 30, 31 e 32 apresentam as imagens da análise por microscopia eletrônica de varredura.

Figura 30 - MEV dos multifilamentos de HMPE 1. (a) Virgem; (b) Impacto de 4% de YBL e (c) Impacto de 5% de YBL.

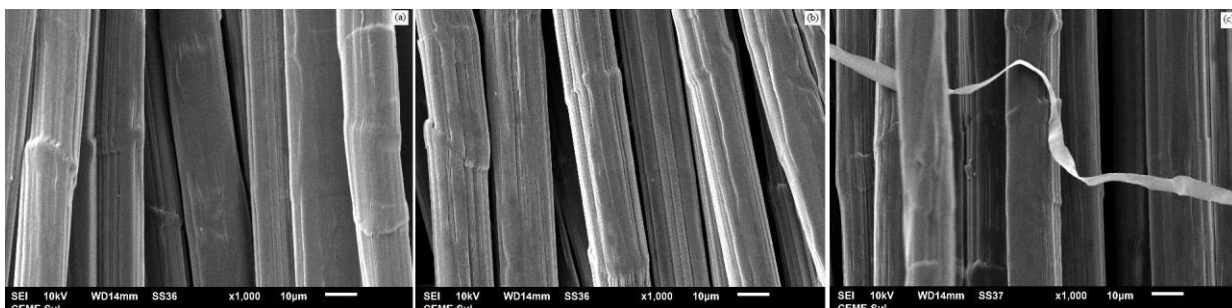


Figura 111 - MEV dos multifilamentos de HMPE 2. (a) Virgem; (b) Impacto de 4% de YBL e (c) Impacto de 5% de YBL.

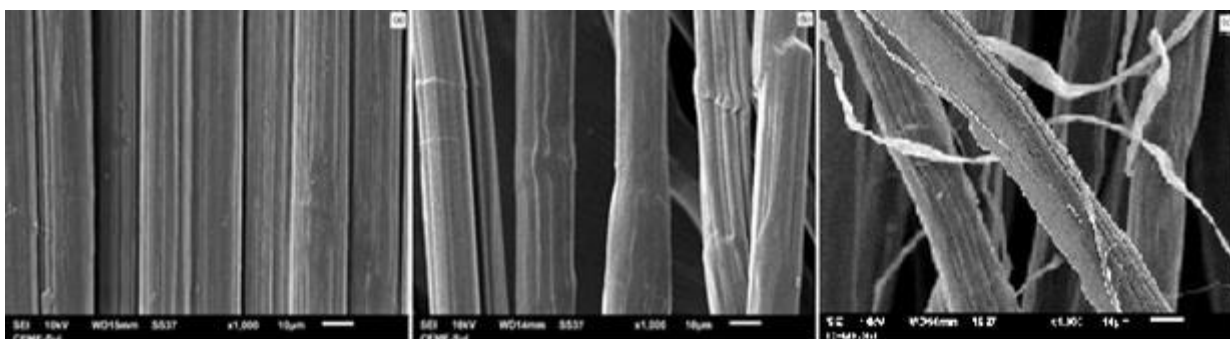
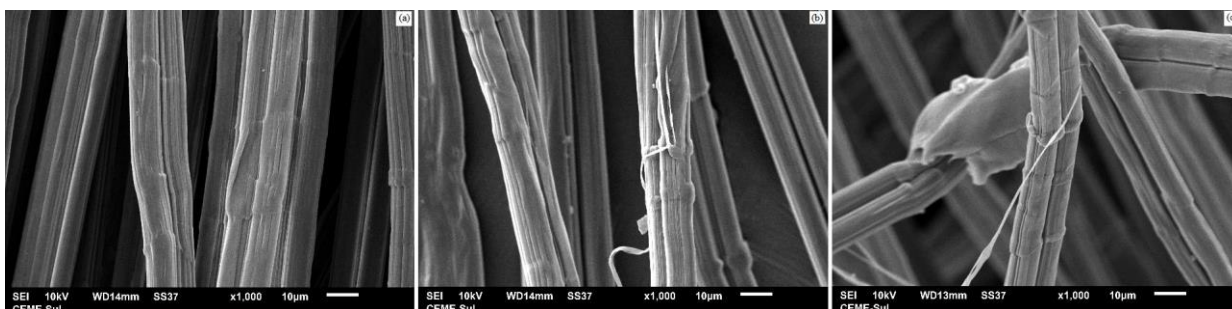


Figura 32 - MEV dos multifilamentos de HMPE 3. (a) Virgem; (b) Impacto de 4% de YBL e (c) Impacto de 5% de YBL.



Para um carregamento de impacto de 4% de YBL e 5% de YBL, é evidenciado que o HMPE 3 apresenta a maior degradação nos fios. Com 5% de YBL o HMPE 3 apresenta filamentos rompidos, com isso, é comprovado novamente que esse carregamento deve ser considerado como crítico. Os materiais 1 e 2 não apresentam sinais de degradação para o carregamento de 4% de YBL, porém para 5% de YBL é visível a deterioração.

4.4. COMPORTAMENTO DA VIDA EM FADIGA APÓS CARREGAMENTO DE IMPACTO

O tratamento de dados obtidos nos ensaios de fadiga, é processado em duas etapas. Sendo a primeira a análise dos valores atípicos, utilizando o método gráfico *box plot* e apresentando um gráfico de tendência sem esses valores. Posteriormente, como segunda etapa, é realizado a aplicação da análise de variância (ANOVA) com os dados originais. Para a realização das análises estatísticas, é utilizado o software IBM SPSS Statistic 22.

As figuras 33, 34 e 35 apresentam o diagrama de caixa dos três diferentes materiais, separadamente. No eixo y é apresentado o número de ciclos até a ruptura do material e o eixo x refere-se ao estado inicial do material, podendo ele ser: Virgem, ter sofrido um carregamento de impacto com uma massa de 4% de YBL e ter sofrido um carregamento de impacto com uma massa de 5% de YBL, conforme metodologia apresentada. Além disso, é apresentado separadamente o comportamento por faixa de carregamento da fadiga, destacado por cores diferentes, conforme legenda na figura.

Figura 33 - Box plot para o HMPE 1.

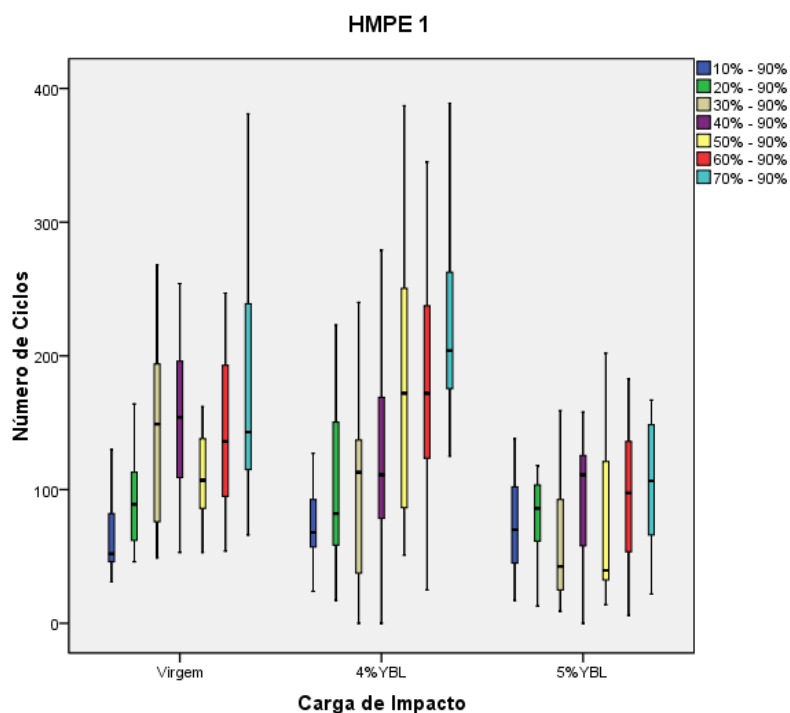


Figura 34 - Box plot para o HMPE 2.

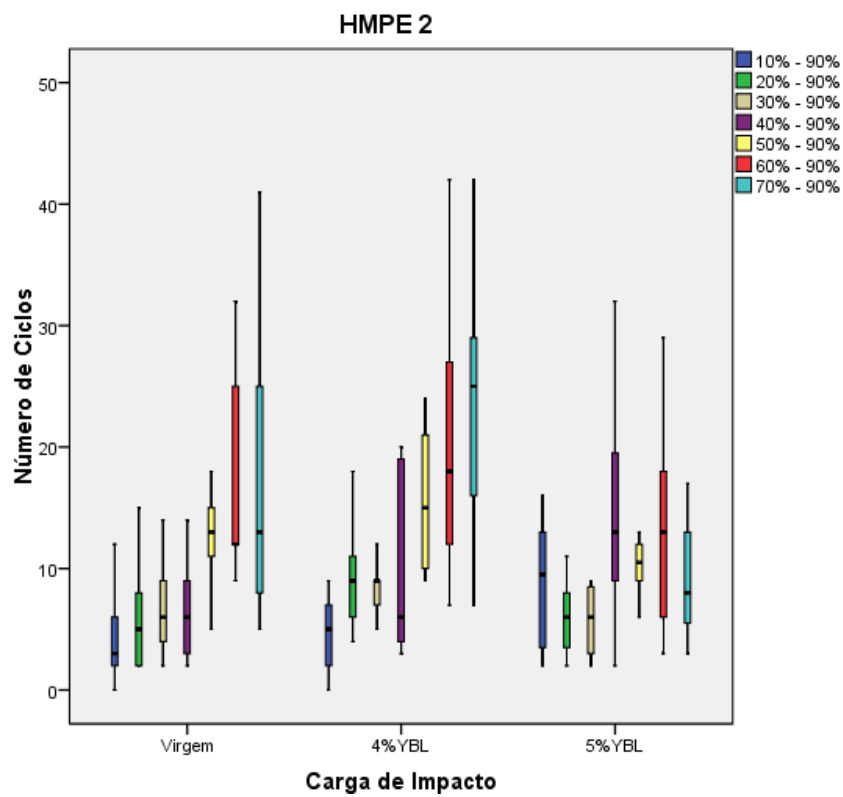
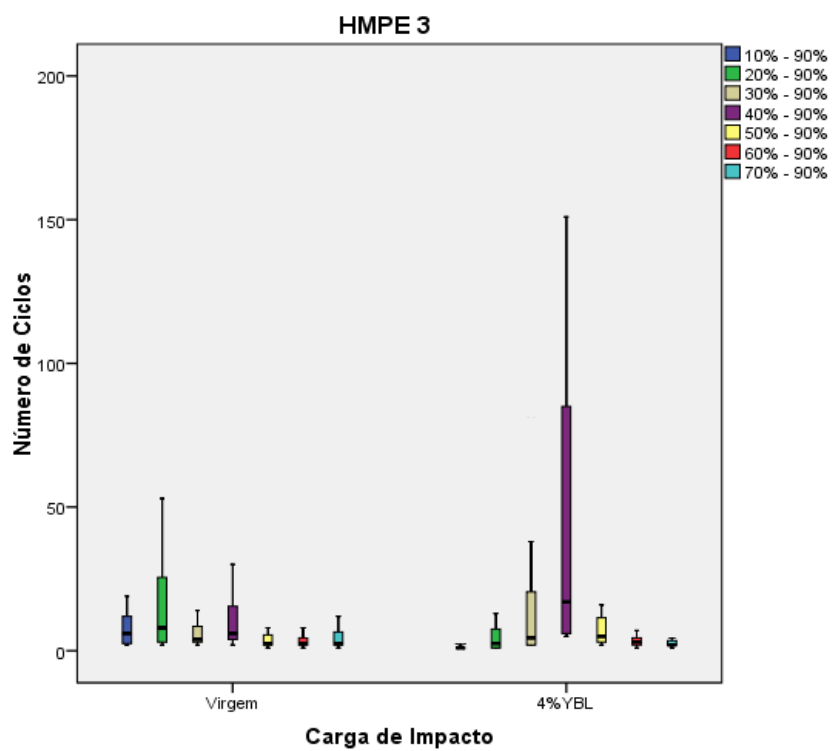


Figura 35 - Box plot para o HMPE 3.



A vida em fadiga do HMPE 1 e do HMPE 2 virgens, tiveram um aumento conforme a diminuição da amplitude da carga. Pode-se notar através da análise *box plot*, o HMPE 1 e o HMPE 2 não sofreram variação significativa na vida em fadiga com o carregamento de impacto igual a 4% de YBL. Porém, para o carregamento de 5% de YBL, ambos os materiais mostraram uma redução no número de ciclos.

Analisando as amplitudes separadamente, no HMPE 1 observa-se que alteração da vida em fadiga do material, dependeu diretamente da amplitude de carga. Para o carregamento de impacto de 4% de YBL, tivemos um leve aumento no número médio de ciclos nas amplitudes de 10% - 90% de YBL, 20% - 90% de YBL, 50% - 90% de YBL, 60% - 90% de YBL e 70% - 90 % de YBL e uma leve diminuição nas amplitudes 30% - 90 % de YBL e 40% - 90% de YBL. Para o carregamento de impacto de 5% de YBL, tivemos diminuição em todas as amplitudes ensaiadas.

Já no HMPE 2, para carga de impacto de 4% de YBL, todos as amplitudes tiveram um leve aumento na sua média, exceto 10% - 90% de YBL. Para cargas de impacto de 5% de YBL, as amplitudes 10% - 90% de YBL e 40% - 90% de YBL mostraram um leve aumento no número médio de ciclos e para as amplitudes de 20% - 90% de YBL, 30% - 90% de YBL, 50% - 90% de YBL, 60% - 90% de YBL e 70% - 90% de YBL tiveram uma leve diminuição no número médio de ciclos.

O HMPE 3 virgem, não apresentou relação entre a resistência à fadiga com a diminuição da amplitude da carga, conforme foi apresentado pelos materiais 1 e 2. Analisando o *box plot* do HMPE 3, é possível observar que existente um aumento significativo na vida em fadiga após o carregamento de impacto de 4% YBL na amplitude de 40% - 90% YBL. Enquanto, na amplitude de 10% - 90% YBL houve uma diminuição significativa na vida em fadiga após o impacto. As demais amplitudes também apresentaram uma variação na vida em fadiga, portanto, para ser mais preciso no resultado, a análise de variância foi aplicada.

A seguir, as curvas de tendência são apresentadas nas figuras 36, 37 e 38 relacionando a amplitude do carregamento de fadiga pelo logaritmo do número médio de ciclos até a ruptura. Ressalta-se que, nessa análise, os valores atípicos foram eliminados.

Figura 36 - Curva do logaritmo do número de ciclos até a falha versus a amplitude de carregamento para o HMPE 1.

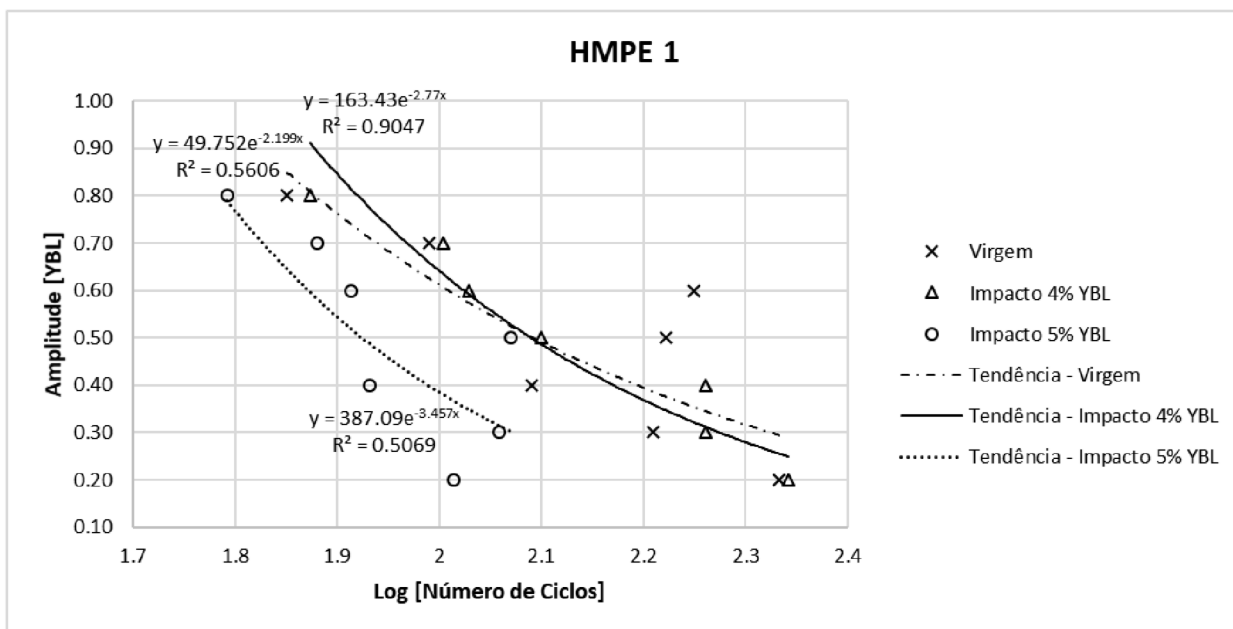


Figura 127 - Curva do logaritmo do número de ciclos até a falha versus a amplitude de carregamento para o HMPE 2.

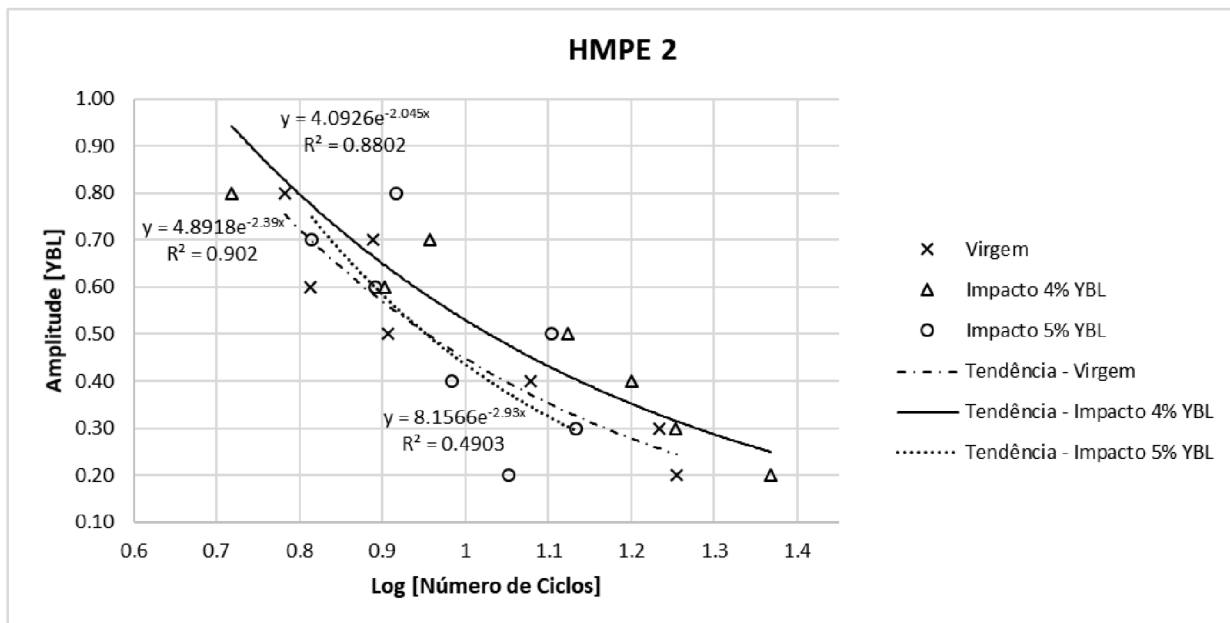
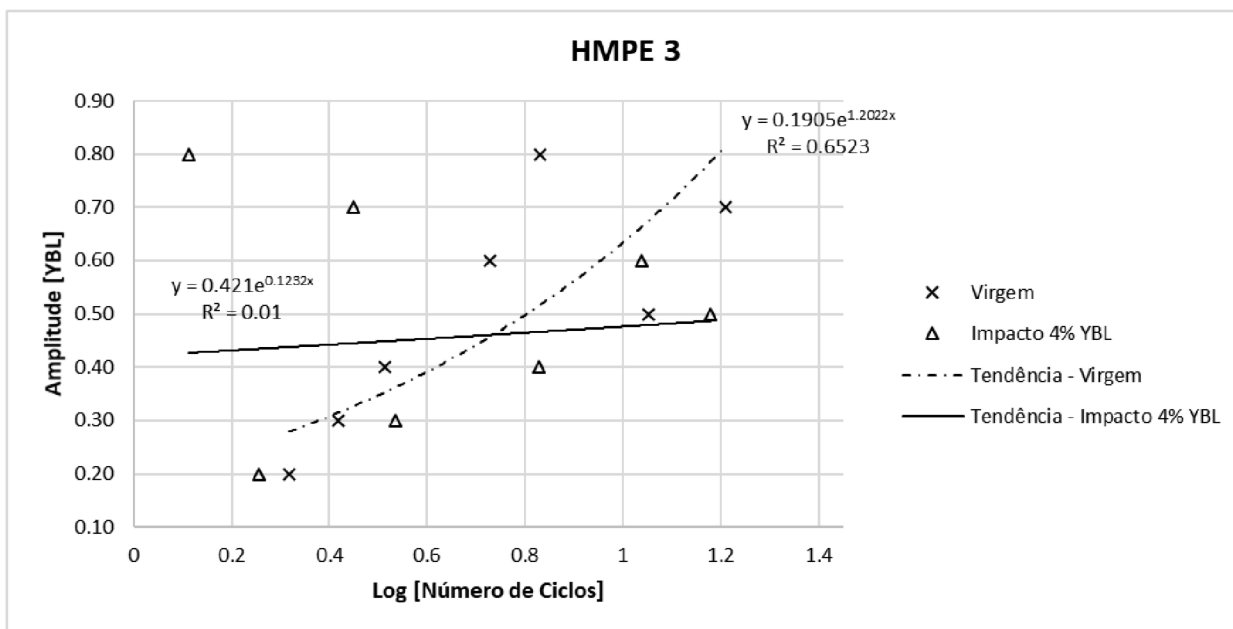


Figura 3813 - Curva do logaritmo do número de ciclos até a falha versus a amplitude de carregamento para o HMPE 3.



Com a análise gráfica apresentada nas figuras 36, 37 e 38 é observado que os multifilamentos do HMPE 1 e HMPE 2 virgens apresentam novamente um aumento na vida em fadiga conforme a amplitude de carga diminui. O HMPE 3 apresenta dados aleatórios, com comportamento diferente dos demais.

Em sequência foi aplicada a análise de variância (ANOVA) em cada intervalo de carregamento cíclico (10% - 90% YBL a 70% - 90% de YBL) para investigar o efeito do material e da carga de impacto aplicada. Esta etapa foi necessária separar em duas fases, pois devido à ausência do comportamento na vida em fadiga do HMPE 3 com carregamento de impacto de 5% YBL, a análise de variância comparando diretamente os três materiais, não satisfaz o critério de igualdade das amostras. Logo, a primeira fase compara apenas o HMPE 1 e HMPE 2 com os três fatores de carregamento de impacto (virgem, 4% de YBL e 5% de YBL) e a segunda fase, compara os três materiais virgens e com carregamento de 4% de YBL.

4.4.1. Comparação entre o HMPE 1 e HMPE 2

Nessa fase é analisada a influência do material, carregamento de impacto de 4% de YBL e 5% de YBL do HMPE 1 e HMPE 2, além da interação entre eles, para cada intervalo de amplitude.

a) 10% - 90% de YBL

Na tabela 6 são mostrados os dados obtidos nos ensaios de fadiga utilizando amplitude de carregamento de 10% a 90% de YBL para os materiais virgens, submetidos a uma carga de impacto com uma massa de 4% de YBL e 5% de YBL para o HMPE 1 e HMPE 2.

Tabela 6 - Número de ciclos até a ruptura obtidos nos ensaios de fadiga com amplitude de 10% a 90% de YBL.

Fator A - Material		Fator B - Carga de Impacto														
		Virgem					4% de YBL					5% de YBL				
		104	130	145	145	206	58	48	56	36	63	28	45	57	45	138
Fator A - Material	HMPE 1	46	48	49	52	55	120	94	60	120	127	250	56	111	30	59
		60	62	82	84	96	69	91	49	185	110	78	68	108	85	17
		31	42	43	45	46	66	24	85	68	75	10	45	81	20	96
		2	4	2	2	11	6	2	5	18	11	4	5	9	8	2
	HMPE 2	6	2	3	3	12	3	7	7	5	6	21	13	13	2	14
		26	15	2	6	3	7	2	4	3	30	8	2	4	3	13
		2	19	9	6	6	6	6	3	9	2	10	3	11	16	4

Os dados precisaram ser tratados, pois pelo teste de Levene foi encontrado um p-valor $\leq 0,01$, sendo assim, não atendendo a condição de homogeneidade das variâncias populacionais das amostras. Portanto, é necessário a logaritmização do número de ciclos até a ruptura. Então, é verificado a homogeneidade das variâncias e encontrado o p-valor $> 0,01$. Além disso, a distribuição dos dados também é verificada, pois uma premissa para utilização da análise de variância (ANOVA) é a distribuição dos erros experimentais ser normal. Com o p-valor $> 0,01$ o teste de Shapiro – Wilk atesta que a distribuição do resíduo dos dados logaritmizados é normal.

Com isso, os dados experimentais são validados e realizados os testes estatísticos. A tabela 7 apresenta os valores encontrados para a significância do efeito dos fatores, material, carga de impacto e interação entre eles.

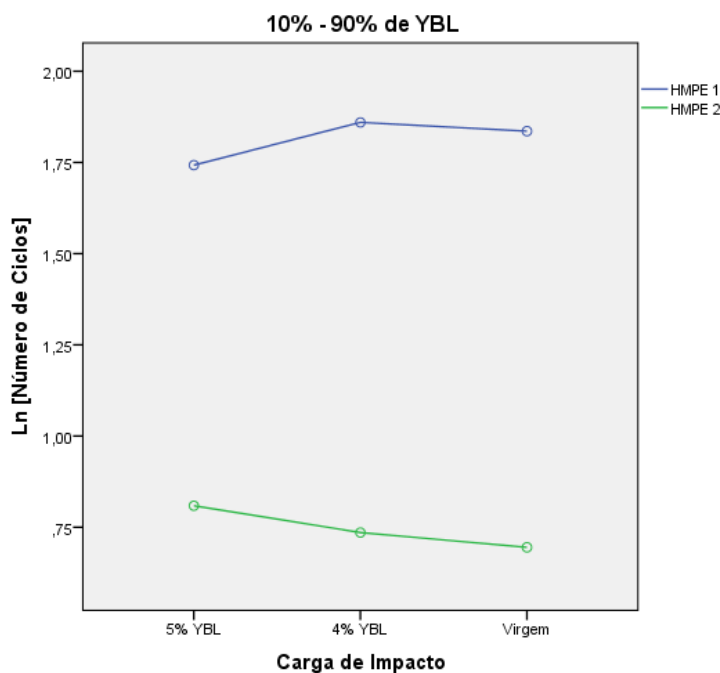
Tabela 7 - Nível de significância para HMPE 1 e HMPE 2 com 10% - 90 % de YBL de amplitude.

Nível de significância	
Material	p-valor < 0,01
Impacto	p-valor > 0,01
Material*Impacto	p-valor > 0,01

Analisando a tabela 7, é comprovado que o material influencia na vida em fadiga dos multifilamentos de HMPE, visto que o p-valor foi menor que 0,01. Porém, não existe influência das cargas de impacto com massas de 4% de YBL e 5% de YBL na vida em fadiga do HMPE 1 e HMPE 2 para a amplitude de carregamento de 10% - 90% de YBL. Além de que, a interação entre material e carregamento de impacto também não se mostrou significativa para ambos multifilamentos, dado que o p-valor foi maior que 0,01.

A figura 39 apresenta o logaritmo do número médio de ciclos até a ruptura do HMPE 1 e HMPE 2 para um carregamento cíclico de 10% - 90% de YBL considerando o material virgem, impactado com uma massa de 4% de YBL e 5% de YBL.

Figura 39 - Diagrama do logaritmo das médias do número de ciclos até a ruptura do HMPE 1 e HMPE 2 para carregamento cíclico de 10% - 90% de YBL.



Na figura 39, pode-se notar que o HMPE 1 apresentou uma maior resistência à fadiga comparado com o HMPE 2. O HMPE 1 sofreu uma leve diminuição na sua vida em fadiga com um carregamento de 5% de YBL, enquanto o HMPE 2 sofreu um leve aumento, porém ambas situações não mostraram variações significativas, portanto, a hipótese de que a vida em fadiga mudou após o impacto, foi descartada para o carregamento cíclico de 10% - 90% de YBL.

b) 20% - 90% de YBL

Na sequência, a tabela 8 mostra os dados obtidos nos ensaios de fadiga utilizando amplitude de carregamento de 20% a 90% de YBL para os materiais virgens, submetidos a uma carga de impacto com uma massa de 4% de YBL e 5% de YBL para o HMPE 1 e HMPE 2.

Tabela 8 - Número de ciclos até a ruptura obtidos nos ensaios de fadiga com amplitude de 20% a 90% de YBL.

Fator A – Material		Fator B - Carga de Impacto														
		Virgem					4% de YBL					5% de YBL				
		64	71	86	89	90	44	35	61	214	207	31	66	29	79	52
HMPE 1	HMPE 1	161	164	171	305	366	73	56	175	95	143	119	54	116	32	13
		46	54	56	62	62	82	17	158	106	223	31	97	80	118	101
		90	100	113	137	143	110	69	44	38	68	152	95	57	92	106
		8	2	2	5	2	6	8	17	4	18	2	11	6	8	6
	HMPE 2	22	2	2	26	2	36	4	12	17	12	23	5	7	5	3
		5	9	7	12	4	11	3	25	6	4	8	19	9	9	3
		6	35	13	15	3	5	9	9	9	9	4	17	8	8	9

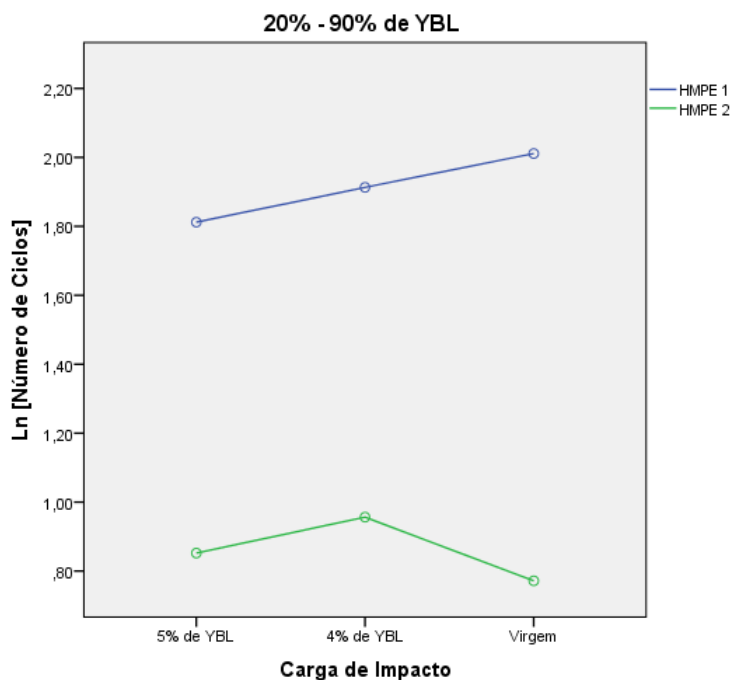
Na tabela 9 são apresentados, os resultados do teste de homogeneidade das variâncias, teste de normalidade dos erros e dos três testes estatísticos efetuados na análise de variância, para os dados da tabela 8 transformada na escala logarítmica.

Tabela 9 - Nível de significância para HMPE 1 e HMPE 2 com 20% - 90 % de YBL de amplitude.

Nível de significância	
Levene	p-valor > 0,01
Shapiro-Wilk	p-valor > 0,01
Material	p-valor < 0,01
Impacto	p-valor > 0,01
Material*Impacto	p-valor > 0,01

Para o carregamento cíclico de 20% a 90% YBL, também é comprovado que apenas o material influencia na vida em fadiga dos multifilamentos de HMPE, visto que o p-valor foi menor que 0,01. A figura 40 apresenta o logaritmo do número médio de ciclos até a ruptura do HMPE 1 e HMPE 2 para um carregamento cíclico de 20% - 90% de YBL considerando o material virgem, impactado com uma massa de 4% de YBL e 5% de YBL.

Figura 40 - Diagrama do logaritmo das médias do número de ciclos até a ruptura do HMPE 1 e HMPE 2 para carregamento cíclico de 20% - 90% de YBL.



Analisando a figura 40, é possível perceber que novamente o HMPE 1 mostra maior resistência a fadiga do que o HMPE 2.

c) 30% - 90% de YBL

Na tabela 10 são mostrados os dados obtidos através do ensaio de fadiga utilizando amplitude de carregamento de 30% a 90% de YBL para os materiais virgens, submetidos a uma carga de impacto com uma massa de 4% de YBL e 5% de YBL para o HMPE 1 e HMPE 2.

Tabela 10 - Número de ciclos até a ruptura obtidos nos ensaios de fadiga com amplitude de 30% a 90% de YBL.

		Fator B - Carga de Impacto														
		Virgem					4% de YBL					5% de YBL				
Fator A – Material	HMPE 1	108	143	148	149	159	68	35	474	138	139	212	103	32	14	34
		248	268	286	331	378	240	27	127	338	56	130	25	41	208	153
		49	62	69	73	76	136	150	128	22	76	44	214	16	159	44
		181	181	194	210	234	128	113	40	117	185	24	82	34	62	9
	HMPE 2	6	8	9	9	8	19	5	12	31	8	6	2	8	16	6
		3	5	12	7	8	8	5	23	56	15	8	11	9	9	9
		2	38	3	5	5	9	37	5	9	3	10	8	29	5	3
		3	29	4	6	14	7	11	5	9	9	2	13	7	3	13

A seguir, na tabela 11 são apresentados os resultados do teste de homogeneidade das variâncias, teste de normalidade dos erros e dos três testes estatísticos efetuados na análise de variância, para os dados da tabela 10 transformada na escala logarítmica.

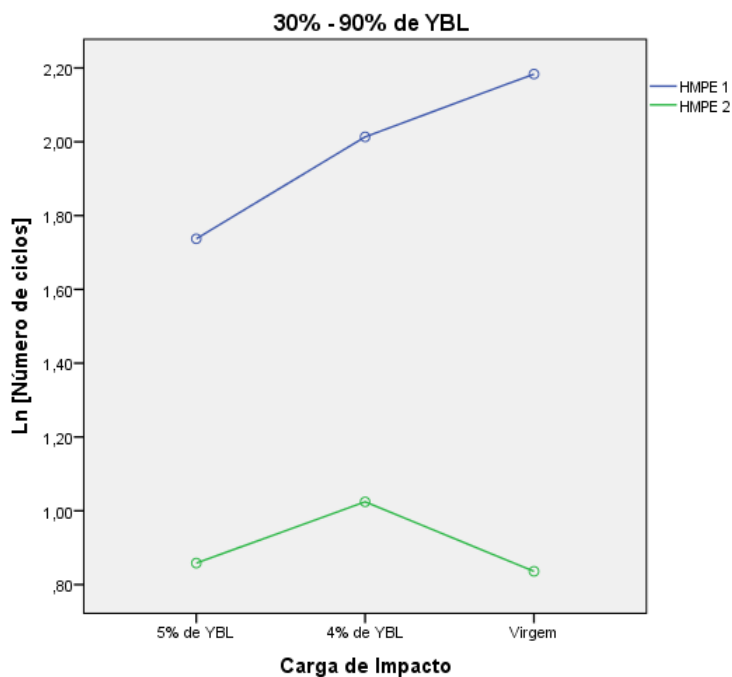
Tabela 11 - Nível de significância para HMPE 1 e HMPE 2 com 30% - 90 % de YBL de amplitude.

Nível de significância	
Levene	p-valor > 0,01
Shapiro-Wilk	p-valor > 0,01
Material	p-valor < 0,01
Impacto	p-valor < 0,01
Material*Impacto	p-valor < 0,01

Para o carregamento cíclico de 30% a 90% YBL, além da comprovação de que o material influencia na vida em fadiga dos multifilamentos, tivemos o carregamento de impacto e a interação entre eles, visto que o p-valor foi menor que 0,01. Essa análise mostrou que o HMPE 1 teve variação significativa na vida em fadiga do material virgem para o impactado com uma massa de 5% de YBL, enquanto para o HMPE 2 não houve essa variação.

A figura 41 apresenta o logaritmo do número médio de ciclos até a ruptura do HMPE 1 e HMPE 2 para um carregamento cíclico de 30% - 90% de YBL considerando o material virgem, impactado com uma massa de 4% de YBL e 5% de YBL. Os diferentes comportamentos mecânicos dos materiais submetidos a um ensaio de impacto utilizando uma massa igual a 5% de YBL justificam a presença do efeito de interação entre os fatores.

Figura 41 - Diagrama do logaritmo das médias do número de ciclos até a ruptura do HMPE 1 e HMPE 2 para carregamento cíclico de 30% - 90% de YBL.



Analisando a figura 41, nota-se que existe essa diferença na resistência a fadiga entre materiais, além disso o HMPE 1 apresentou uma diminuição na vida em fadiga conforme o aumento do carregamento de impacto, já o HMPE 2 se mostrou instável.

d) 40% - 90% de YBL

Na tabela 12 são mostrados os dados obtidos através do ensaio de fadiga utilizando amplitude de carregamento de 40% a 90% de YBL para os materiais virgens, submetidos a uma carga de impacto com uma massa de 4% de YBL e 5% de YBL para o HMPE 1 e HMPE 2.

Tabela 12 - Número de ciclos até a ruptura obtidos nos ensaios de fadiga com amplitude de 40% a 90% de YBL.

		Fator B - Carga de Impacto														
		Virgem					4% de YBL					5% de YBL				
		53	54	56	73	109	141	247	149	89	189	56	283	96	121	108
Fator A – Material	HMPE 1	182	184	196	197	204	37	279	90	121	116	154	51	122	240	74
		117	141	147	154	170	375	191	68	231	111	212	219	110	138	158
		205	254	335	335	389	107	33	97	40	53	75	42	129	112	17
		7	9	16	42	6	20	3	4	23	9	2	12	7	5	13
	HMPE 2	9	11	10	3	2	18	26	3	22	60	3	6	13	16	11
		3	19	6	2	7	3	21	22	4	20	3	26	12	23	26
		9	13	4	3	14	19	19	6	6	4	13	19	32	7	5

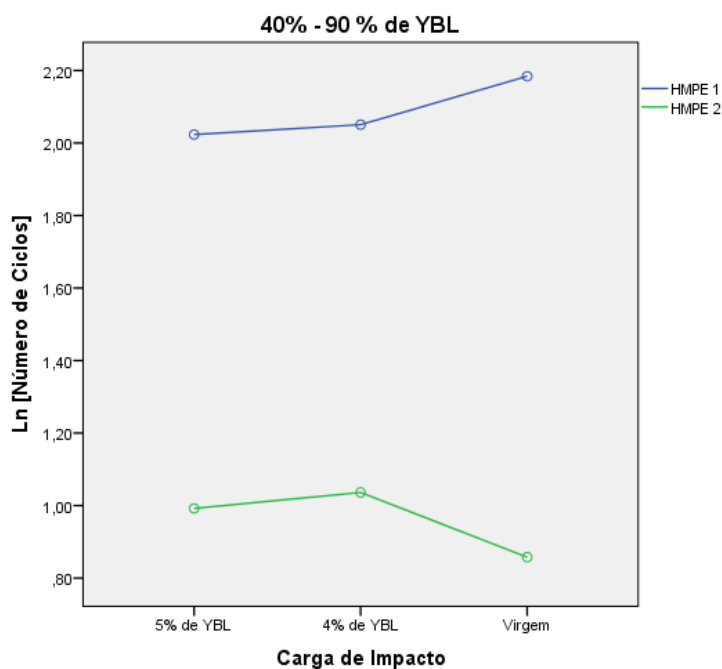
Na tabela 13 são apresentados os resultados do teste de homogeneidade das variâncias, teste de normalidade dos erros e dos três testes estatísticos efetuados na análise de variância, para os dados da tabela 12 transformada na escala logarítmica.

Para o carregamento cíclico de 40% a 90% YBL, tivemos apenas a influência do material na vida em fadiga dos multifilamentos, visto que o p-valor foi menor que 0,01. A figura 42 apresenta o logaritmo do número médio de ciclos até a ruptura do HMPE 1 e HMPE 2 para um carregamento cíclico de 40% - 90% de YBL considerando o material virgem, impactado com uma massa de 4% de YBL e 5% de YBL.

Tabela 13 - Nível de significância para HMPE 1 e HMPE 2 com 40% - 90 % de YBL de amplitude.

Nível de significância	
Levene	p-valor > 0,01
Shapiro-Wilk	p-valor > 0,01
Material	p-valor < 0,01
Impacto	p-valor > 0,01
Material*Impacto	p-valor > 0,01

Figura 42 - Diagrama do logaritmo das médias do número de ciclos até a ruptura do HMPE 1 e HMPE 2 para carregamento cíclico de 40% - 90% de YBL.



Analisando a figura 42, percebe-se que novamente o HMPE 1 se mostrou mais resistente a fadiga que o HMPE 2. O HMPE 1 teve uma diminuição no número de ciclos conforme o aumento da carga de impacto, enquanto o HMPE 2 teve um aumento.

e) 50% - 90% de YBL

Na tabela 14 são mostrados os dados obtidos através do ensaio de fadiga utilizando amplitude de carregamento de 50% a 90% de YBL para os materiais virgens,

submetidos a uma carga de impacto com uma massa de 4% de YBL e 5% de YBL para o HMPE 1 e HMPE 2.

Tabela 14 - Número de ciclos até a ruptura obtidos nos ensaios de fadiga com amplitude de 50% a 90% de YBL.

Fator A – Material		Fator B - Carga de Impacto														
		Virgem					4% de YBL					5% de YBL				
HMPE 1	HMPE 1	102	102	106	107	109	294	172	80	70	271	32	35	123	14	14
		160	162	199	261	398	230	68	228	387	89	390	227	32	185	202
		53	54	56	76	86	321	89	220	51	345	73	78	124	33	33
		123	134	138	156	158	203	118	84	163	158	14	150	94	118	44
	HMPE 2	18	13	13	15	3	24	23	16	18	17	9	13	3	47	13
		5	47	13	10	8	10	7	23	21	2	13	6	6	12	9
		25	7	9	23	14	24	19	16	12	9	39	12	5	11	10
		12	6	11	6	17	14	22	9	21	10	9	10	11	12	9

Na tabela 15 são apresentados os resultados do teste de homogeneidade das variâncias, teste de normalidade dos erros e dos três testes estatísticos efetuados na análise de variância, para os dados da tabela 14 transformada na escala logarítmica.

Tabela 15 - Nível de significância para HMPE 1 e HMPE 2 com 50% - 90 % de YBL de amplitude.

Nível de significância	
Levene	p-valor > 0,01
Shapiro-Wilk	p-valor > 0,01
Material	p-valor < 0,01
Impacto	p-valor < 0,01
Material*Impacto	p-valor < 0,01

Para o carregamento cíclico de 50% a 90% YBL, tivemos influência dos três fatores. Apenas o HMPE 1 apresentou uma variação significativa na vida em fadiga do material virgem para o impactado com uma massa de 5% de YBL, conforme mostrado no diagrama da figura 43.

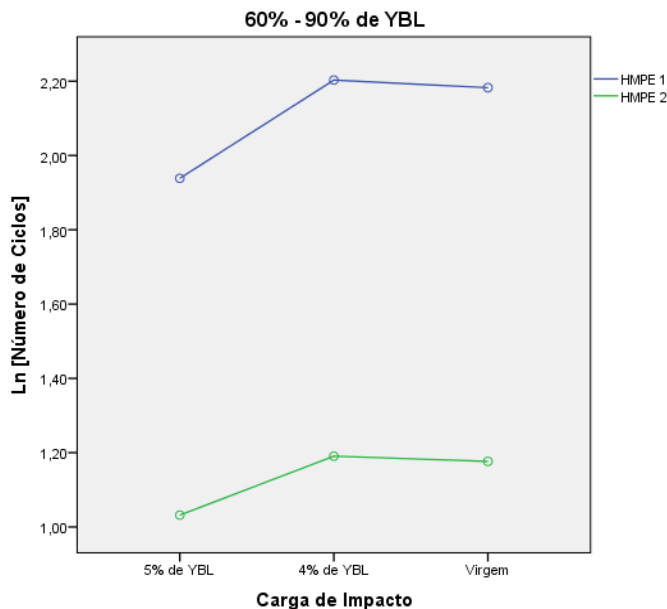
Na tabela 17 são apresentados os resultados do teste de homogeneidade das variâncias, teste de normalidade dos erros e dos três testes estatísticos efetuados na análise de variância, para os dados da tabela 16 transformada na escala logarítmica.

Tabela 17 - Nível de significância para HMPE 1 e HMPE 2 com 60% - 90 % de YBL de amplitude.

Nível de significância	
Levene	p-valor > 0,01
Shapiro-Wilk	p-valor > 0,01
Material	p-valor < 0,01
Impacto	p-valor < 0,01
Material*Impacto	p-valor < 0,01

Para o carregamento cíclico de 60% a 90% YBL, tivemos influência dos três fatores novamente. Ambos materiais tiveram uma variação significativa na vida em fadiga do material virgem para o impactado com uma massa de 5% de YBL. Porém, o HMPE 1 apresentou uma maior representatividade da redução da vida em fadiga, conforme mostrado no diagrama da figura 44.

Figura 44 - Diagrama do logaritmo das médias do número de ciclos até a ruptura do HMPE 1 e HMPE 2 para carregamento cíclico de 60% - 90% de YBL.



g) 70% - 90% de YBL

Por fim, na tabela 18 são mostrados os dados obtidos através do ensaio de fadiga utilizando amplitude de carregamento de 70% a 90% de YBL para os materiais virgens, submetidos a uma carga de impacto com uma massa de 4% de YBL e 5% de YBL para o HMPE 1 e HMPE 2.

Tabela 18 - Número de ciclos até a ruptura obtidos nos ensaios de fadiga com amplitude de 70% a 90% de YBL.

Fator A – Material		Fator B - Carga de Impacto														
		Virgem					4% de YBL					5% de YBL				
		121	125	136	143	158	192	245	389	345	156	368	22	89	57	153
Fator A – Material	HMPE 1	302	381	393	398	472	125	187	154	189	204	207	50	117	46	63
		66	68	69	105	115	378	250	298	142	178	12	267	106	154	69
		211	232	239	282	289	275	207	173	60	245	57	167	144	107	77
		41	30	5	13	51	35	64	29	23	12	5	3	6	23	13
	HMPE 2	12	23	15	56	12	32	59	26	24	23	9	37	11	7	6
		27	24	69	22	5	7	4	16	42	16	13	26	15	16	13
		25	22	8	16	6	24	24	26	28	29	9	8	17	3	34

Na tabela 19 são apresentados os resultados do teste de homogeneidade das variâncias, teste de normalidade dos erros e dos três testes estatísticos efetuados na análise de variância, para os dados da tabela 18 transformada na escala logarítmica.

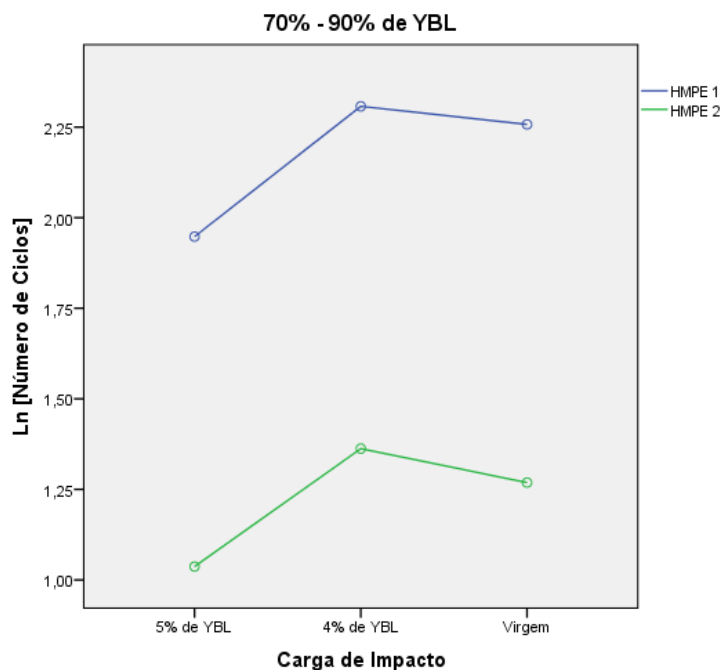
Tabela 19 - Nível de significância para HMPE 1 e HMPE 2 com 70% - 90 % de YBL de amplitude.

Nível de significância	
Levene	p-valor > 0,01
Shapiro-Wilk	p-valor > 0,01
Material	p-valor < 0,01
Impacto	p-valor < 0,01
Material*Impacto	p-valor > 0,01

Para o carregamento cíclico de 70% a 90% YBL, é comprovado que existe influência do material e do carregamento de impacto, porém não existe interação entre

eles. Ambos materiais apresentaram uma variação significativa na vida em fadiga do material virgem para o impactado com uma massa de 5% de YBL, conforme mostrado no diagrama da figura 45. Pode ser observado também, que o carregamento de impacto não causou danos diferentes de um material para o outro.

Figura 45 - Diagrama do logaritmo das médias do número de ciclos até a ruptura do HMPE 1 e HMPE 2 para carregamento cíclico de 70% - 90% de YBL.



Comparando os dois materiais (HMPE 1 e HMPE2), conseguimos perceber que o fator mais significativo na resistência a fadiga é o material. Para todas as amplitudes o HMPE 1 se mostrou mais resistente que o HMPE 2. Em algumas amplitudes, ambos materiais apresentaram redução na sua vida em fadiga após receberem um carregamento de impacto com uma massa de 5% de YBL, porém, o HMPE 1 apresentou maior degradação do material comparado com seu estado virgem.

4.4.2. Comparação entre os três materiais

Nessa fase é analisado a influência do material e do carregamento de impacto de 4% de YBL dos três materiais para cada intervalo de amplitude.

a) 10% - 90% de YBL

Na tabela 20 são mostrados os dados obtidos através do ensaio de fadiga utilizando amplitude de carregamento de 10% a 90% de YBL para os materiais virgens e submetidos a uma carga de impacto com uma massa de 4% de YBL.

Tabela 20 - Número de ciclos até a ruptura obtidos nos ensaios de fadiga com amplitude de 10% a 90% de YBL.

		Fator B - Carga de Impacto																			
		Virgem										4% de YBL									
Fator A – Material	HMPE 1	60	62	82	84	96	104	130	145	145	206	69	91	49	185	110	58	48	56	36	63
		31	42	43	45	46	46	48	49	52	55	66	24	85	68	75	120	94	60	120	127
	HMPE 2	2	4	2	2	11	26	15	2	6	3	6	2	5	18	11	7	2	4	3	30
		6	2	3	3	12	2	19	9	6	6	3	7	7	5	6	6	6	3	9	2
	HMPE 3	7	7	8	10	11	13	18	19	35	56	1	1	2	2	1	1	1	2	1	1
		2	2	2	2	2	3	3	4	4	5	1	1	1	1	1	2	1	1	1	2

Os dados também precisaram ser tratados, pois pelo teste de Levene foi encontrado um $p\text{-valor} \leq 0,01$, sendo assim, não atendendo a condição de homogeneidade das variâncias populacionais das amostras. Portanto, sendo necessário a logaritmização do número de ciclos até a ruptura. Após a transformação dos dados para a escala logarítmica, é verificado a homogeneidade das variâncias e encontrado o $p\text{-valor} > 0,01$. Além disso, a distribuição dos dados também é verificada, e encontrado o $p\text{-valor} > 0,01$ no teste de Shapiro – Wilk, atestando que a distribuição do resíduo dos dados logaritmizados é normal.

Na tabela 21 são apresentados, os resultados do teste de homogeneidade das variâncias, teste de normalidade dos erros e dos três testes estatísticos efetuados na análise de variância, para os dados da tabela 20 transformada na escala logarítmica.

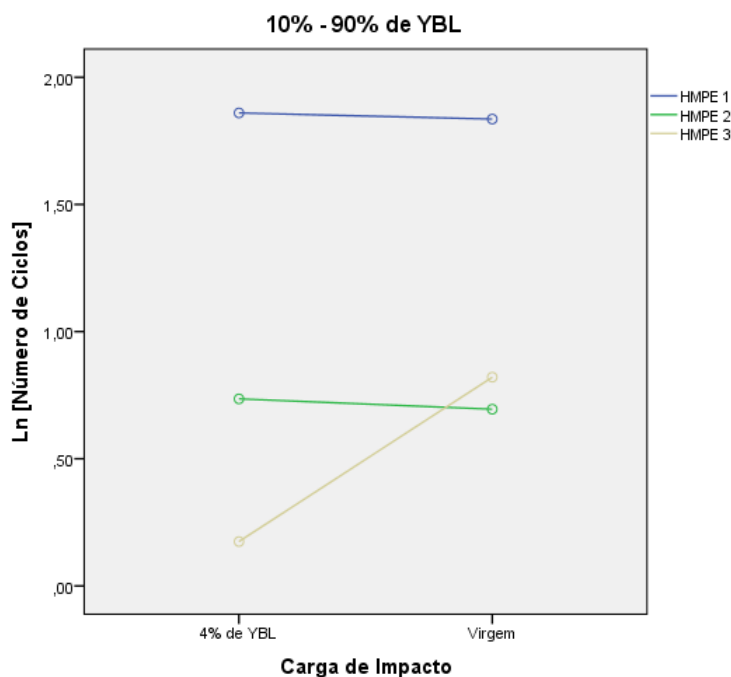
Na amplitude de carregamento de 10% a 90% de YBL, é comprovado que existe influência do material na vida em fadiga. O HMPE 1 mostrou diferença significativa entre o HMPE 2 e 3, porém ambos não apresentaram diferença significativa entre si para o material virgem. Além disso, é evidenciado que o carregamento de impacto com 4% de YBL foi mais agressivo no HMPE 3 do que para os demais.

Tabela 21 - Nível de significância para os três materiais com 10% - 90 % de YBL de amplitude.

Nível de significância	
Levene	p-valor > 0,01
Shapiro-Wilk	p-valor > 0,01
Material	p-valor < 0,01
Impacto	p-valor < 0,01
Material*Impacto	p-valor < 0,01

A figura 46 apresenta o logaritmo do número médio de ciclos até a ruptura dos três materiais em análise, para um carregamento cíclico de 10% - 90% de YBL considerando o material virgem e impactado com uma massa de 4% de YBL.

Figura 4615 - Diagrama do logaritmo das médias do número de ciclos até a ruptura dos três materiais para carregamento cíclico de 10% - 90% de YBL.



Através do diagrama apresentado na figura 46, podemos perceber novamente que o HMPE 3 teve uma grande redução na vida em fadiga após o impacto, enquanto nos outros multifilamentos, ela não foi significativa.

b) 20% - 90% de YBL

Na sequência, na tabela 22 são mostrados os dados obtidos através do ensaio de fadiga utilizando amplitude de carregamento de 20% a 90% de YBL para os três materiais virgens e submetidos a uma carga de impacto com uma massa de 4% de YBL.

Tabela 22 - Número de ciclos até a ruptura obtidos nos ensaios de fadiga com amplitude de 20% a 90% de YBL.

		Fator B - Carga de Impacto																			
		Virgem										4% de YBL									
Fator A – Material	HMPE 1	46	54	56	62	62	64	71	86	89	90	158	17	82	106	223	44	35	61	214	207
		90	100	113	137	143	161	164	171	305	366	110	69	44	38	68	73	56	175	95	143
	HMPE 2	8	2	2	5	2	5	9	7	12	4	6	8	17	4	18	11	3	25	6	4
		22	2	2	26	2	6	35	13	15	3	36	4	12	17	12	5	9	9	9	9
	HMPE 3	2	2	2	2	3	3	3	5	6	8	3	3	5	5	6	9	13	13	22	30
		8	12	17	21	22	29	33	41	52	53	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2

Na tabela 23 são apresentados, os resultados do teste de homogeneidade das variâncias, teste de normalidade dos erros e dos três testes estatísticos efetuados na análise de variância, para os dados da tabela 22 transformada na escala logarítmica.

Tabela 23 - Nível de significância para os três materiais com 20% - 90 % de YBL de amplitude.

Nível de significância	
Levene	p-valor > 0,01
Shapiro-Wilk	p-valor > 0,01
Material	p-valor < 0,01
Impacto	p-valor < 0,01
Material*Impacto	p-valor < 0,01

Para o carregamento cíclico de 20% a 90% YBL, é evidenciado que o material, o impacto e a interação entre eles, influencia na vida em fadiga dos multifilamentos de HMPE, visto que o p-valor foi menor que 0,01. Novamente existe uma diferença na resistência a fadiga no HMPE 1 para os demais. Além disso, nessa faixa de

A seguir, na tabela 25 são apresentados os resultados do teste de homogeneidade das variâncias, teste de normalidade dos erros e dos três testes estatísticos efetuados na análise de variância, para os dados da tabela 24 transformada na escala logarítmica.

Tabela 25 - Nível de significância para os três materiais com 30% - 90 % de YBL de amplitude.

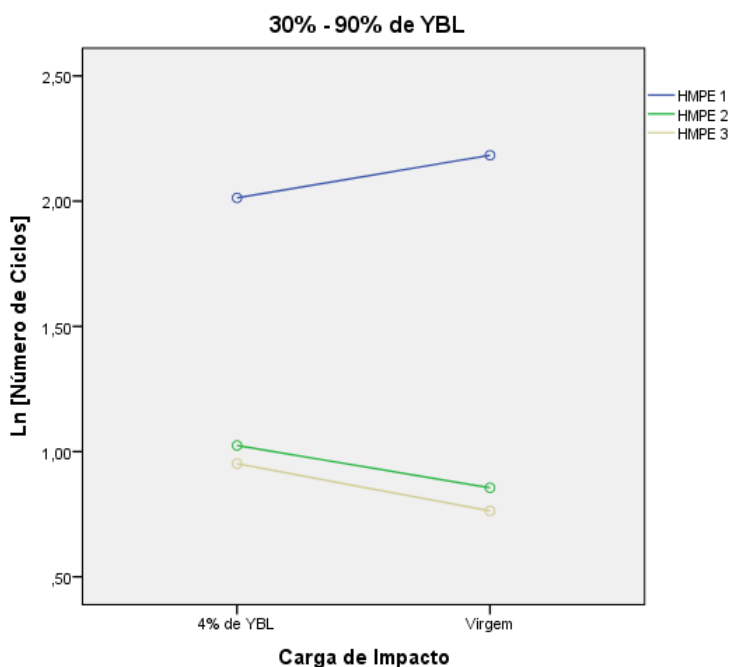
Nível de significância	
Levene	p-valor > 0,01
Shapiro-Wilk	p-valor > 0,01
Material	p-valor < 0,01
Impacto	p-valor > 0,01
Material*Impacto	p-valor > 0,01

Na faixa de carregamento cíclico de 30% a 90% YBL, existe a influência do material na vida em fadiga, visto que o p-valor foi menor que 0,01. O HMPE 1 apresentou maior resistente dentre os três, enquanto o HMPE 2 e HMPE 3 não apresentaram diferença na sua resistência. O impacto de 4% de YBL não causou mudança expressiva suficiente para atestar que o material teve alteração no seu comportamento.

A figura 48 apresenta o logaritmo do número médio de ciclos até a ruptura dos três materiais para um carregamento cíclico de 30% - 90% de YBL considerando o material virgem e impactado com uma massa de 4% de YBL.

Analisando a figura 48, nota-se que o comportamento mecânico dos materiais 1 e 2 são semelhantes, enquanto o HMPE 1 possui uma resposta a solicitação consideravelmente diferente dos demais. Apesar da análise não ter apresentado diferença significativa na vida em fadiga, a figura 50 nos mostra que o HMPE 1 sofre uma degradação fazendo com que sua resistência diminua, enquanto os demais tem um leve aumento no número de ciclos até a ruptura.

Figura 48 - Diagrama do logaritmo das médias do número de ciclos até a ruptura dos três materiais para carregamento cíclico de 30% - 90% de YBL.



d) 40% - 90% de YBL

Na tabela 26 são mostrados os dados obtidos através do ensaio de fadiga utilizando amplitude de carregamento de 40% a 90% de YBL para os materiais virgens e submetidos a uma carga de impacto com uma massa de 4% de YBL.

Tabela 26 - Número de ciclos até a ruptura obtidos nos ensaios de fadiga com amplitude de 30% a 90% de YBL.

Fator A - Material		Fator B - Carga de Impacto																			
		Virgem										4% de YBL									
		53	54	56	73	109	117	141	147	154	170	375	191	68	231	111	141	247	149	89	189
Fator A - Material	HMPE 1	182	184	196	197	204	205	254	335	335	389	107	33	97	40	53	37	279	90	121	116
		3	19	6	2	7	7	9	16	42	6	20	3	4	23	9	3	21	22	4	20
	HMPE 2	9	13	4	3	14	9	11	10	3	2	18	26	3	22	60	19	19	6	6	4
		2	3	3	3	4	4	4	4	5	5	20	31	41	42	74	96	104	117	136	151
	HMPE 3	7	8	10	10	11	20	27	29	30	36	6	5	5	5	5	6	8	10	13	14

Na tabela 27 são apresentados os resultados do teste de homogeneidade das variâncias, teste de normalidade dos erros e dos três testes estatísticos efetuados na

análise de variância, para os dados da tabela 26 transformada na escala logarítmica.

Tabela 27 - Nível de significância para os três materiais com 40% - 90 % de YBL de amplitude.

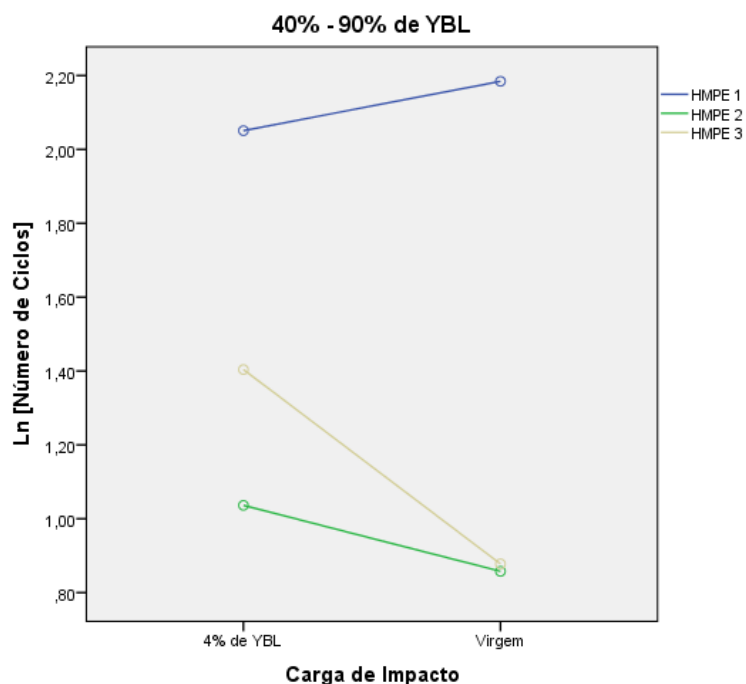
Nível de significância	
Levene	p-valor > 0,01
Shapiro-Wilk	p-valor > 0,01
Material	p-valor < 0,01
Impacto	p-valor < 0,01
Material*Impacto	p-valor < 0,01

Na faixa de carregamento de 40% a 90% de YBL, quando analisamos os três materiais, é possível comprovar que além da influência do material, existe a influência do carregamento de impacto e interação entre eles. Para os materiais virgens, a resistência a fadiga do HMPE 1 se mostrou superior aos demais, enquanto a resistente do HMPE 2 e 3 foi semelhante. Entretanto, para os multifilamentos que sofreram o carregamento de impacto com uma massa de 4% de YBL, os materiais tiveram respostas diferentes.

A figura 49 apresenta o logaritmo do número médio de ciclos até a ruptura para um carregamento cíclico de 40% - 90% de YBL considerando o material virgem e impactado com uma massa de 4% de YBL.

Analisando a figura 49, percebe-se que o HMPE 1 teve uma leve diminuição no número de ciclos conforme o aumento da carga de impacto, enquanto o HMPE 2 teve um leve aumento. Porém, o HMPE 3 mostrou um aumento significativo no aumento a resistência à fadiga. Apesar desse fenômeno ser diferente das outras amplitudes, não podemos desprezar esse resultado, visto que o procedimento é o mesmo, além de que, as condições ambientais serem controladas.

Figura 49 - Diagrama do logaritmo das médias do número de ciclos até a ruptura dos três materiais para carregamento cíclico de 40% - 90% de YBL.



e) 50% - 90% de YBL

Na tabela 28 são mostrados os dados obtidos através do ensaio de fadiga utilizando amplitude de carregamento de 50% a 90% de YBL para os materiais virgens e submetidos a uma carga de impacto com uma massa de 4% de YBL.

Tabela 28 - Número de ciclos até a ruptura obtidos nos ensaios de fadiga com amplitude de 50% a 90% de YBL.

Fator A - Material		Fator B - Carga de Impacto																			
		Virgem										4% de YBL									
		53	54	56	76	86	102	102	106	107	109	321	89	220	51	345	294	172	80	70	271
HMPE 1	1	123	134	138	156	158	160	162	199	261	398	203	118	84	163	158	230	68	228	387	89
		HMPE 2	18	13	13	15	3	25	7	9	23	14	24	23	16	18	17	24	19	16	12
	5		47	13	10	8	12	6	11	6	17	10	7	23	21	2	14	22	9	21	10
	HMPE 3	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	5	7	9	10	11	12	14	16	16	39
		3	3	3	4	5	6	6	6	8	12	2	2	2	2	3	3	3	3	3	5

Na tabela 29 são apresentados, os resultados do teste de homogeneidade das variâncias, teste de normalidade dos erros e dos três testes estatísticos efetuados na

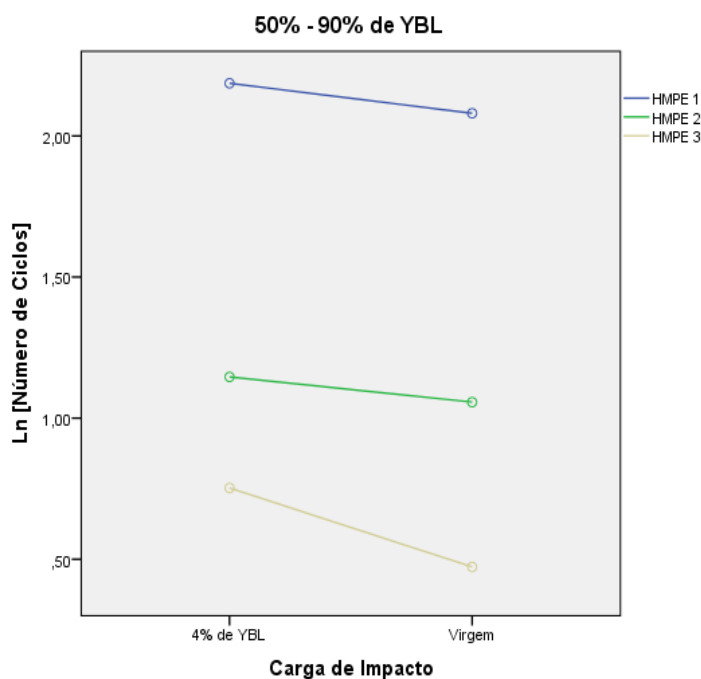
análise de variância, para os dados da tabela 28 transformada na escala logarítmica.

Tabela 29 - Nível de significância para os três materiais com 50% - 90 % de YBL de amplitude.

Nível de significância	
Levene	p-valor > 0,01
Shapiro-Wilk	p-valor > 0,01
Material	p-valor < 0,01
Impacto	p-valor > 0,01
Material*Impacto	p-valor > 0,01

Para o carregamento cíclico de 50% a 90% YBL, apenas o material apresenta influência na vida em fadiga. A variação dos ciclos para o material impactado com massa de 4% de YBL não foi significativa. Para essa faixa, os três materiais mostraram comportamento de resposta diferentes, ficando o HMPE 1 mais resistente e o HMPE 3 menos resistente a fadiga, conforme mostrado na figura 50.

Figura 50 - Diagrama do logaritmo das médias do número de ciclos até a ruptura dos três materiais para carregamento cíclico de 50% - 90% de YBL.



f) 60% - 90% de YBL

Na tabela 30 são mostrados os dados obtidos através do ensaio de fadiga utilizando amplitude de carregamento de 60% a 90% de YBL para os materiais virgens e submetidos a uma carga de impacto com uma massa de 4% de YBL.

Tabela 30 - Número de ciclos até a ruptura obtidos nos ensaios de fadiga com amplitude de 60% a 90% de YBL.

		Fator B - Carga de Impacto																			
		Virgem										4% de YBL									
Fator A - Material	HMPE 1	54	58	84	92	95	109	118	124	136	137	180	170	271	230	68	124	25	92	123	145
		141	181	193	210	220	235	247	306	338	477	286	118	245	158	230	220	151	345	294	172
	HMPE 2	16	25	12	9	9	9	13	11	42	30	13	9	34	25	23	25	18	9	13	27
		12	10	12	9	30	32	16	9	25	12	23	6	12	15	25	13	7	12	42	7
	HMPE 3	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	4	4	4	4	5	6	7	45
		3	3	4	4	4	5	8	8	10	10	5	1	2	2	2	2	2	3	3	3

Na tabela 31 são apresentados os resultados do teste de homogeneidade das variâncias, teste de normalidade dos erros e dos três testes estatísticos efetuados na análise de variância, para os dados da tabela 30 transformada na escala logarítmica.

Tabela 31 - Nível de significância para os três materiais com 60% - 90 % de YBL de amplitude.

Nível de significância	
Levene	p-valor > 0,01
Shapiro-Wilk	p-valor > 0,01
Material	p-valor < 0,01
Impacto	p-valor > 0,01
Material*Impacto	p-valor > 0,01

Para esta faixa de carregamento (60% a 90% de YBL), a influência se apresentou no material. Não houve alteração na vida em fadiga para os materiais que foram impactados com 4% de YBL. O HMPE 1 apresentou maior resistente a fadiga e o HMPE 3 apresentou a menor. A seguir, na figura 52, pode-se observar essa diferença na resistência entre os materiais.

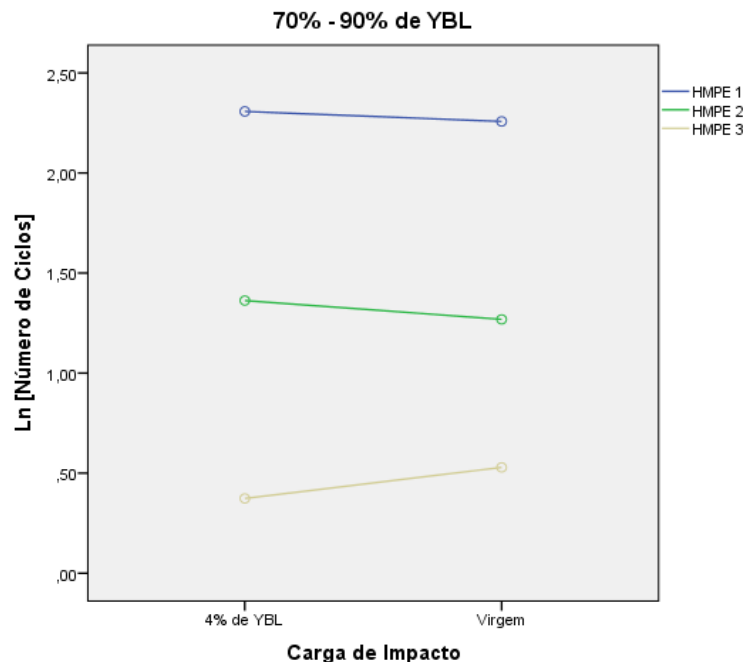
Na tabela 33 são apresentados os resultados do teste de homogeneidade das variâncias, teste de normalidade dos erros e dos três testes estatísticos efetuados na análise de variância, para os dados da tabela 32 transformada na escala logarítmica.

Tabela 33 - Nível de significância para três materiais com 70% - 90 % de YBL de amplitude.

Nível de significância	
Levene	p-valor > 0,01
Shapiro-Wilk	p-valor > 0,01
Material	p-valor < 0,01
Impacto	p-valor > 0,01
Material*Impacto	p-valor > 0,01

Para o carregamento cíclico de 70% a 90% YBL, é comprovado que existe apenas influência do material novamente. O HMPE 1 apresentou mais resistência a fadiga e o HMPE 3 a menor resistência. Pode-se observar também que existe uma grande diferença entre o HMPE 1 para os demais, conforme mostrado na figura 52.

Figura 172 - Diagrama do logaritmo das médias do número de ciclos até a ruptura dos três materiais para carregamento cíclico de 70% - 90% de YBL.



A seguir, na tabela 34 é apresentado um resumo da análise de variância (ANOVA).

Tabela 34 - Resumo da análise de variância (ANOVA).

Amplitude de Carga [% YBL]	Resumo
10 - 90	Material Virgem
	Resistencia à fadiga = HMPE 1 > HMPE 2 = HMPE 3
	Carga de Impacto
	4% YBL = HMPE 3 reduziu à vida em fadiga
	5% YBL = N/A
20 - 90	Material Virgem
	Resistencia à fadiga = HMPE 1 > HMPE 2 = HMPE 3
	Carga de Impacto
	4% YBL = HMPE 3 reduziu à vida em fadiga
	5% YBL = N/A
30 - 90	Material Virgem
	Resistencia à fadiga = HMPE 1 > HMPE 2 = HMPE 3
	Carga de Impacto
	4% YBL = N/A
	5% YBL = HMPE 1 reduziu à vida em fadiga
40 - 90	Material Virgem
	Resistencia à fadiga = HMPE 1 > HMPE 2 = HMPE 3
	Carga de Impacto
	4% YBL = HMPE 3 aumentou à vida em fadiga
	5% YBL = N/A
50 - 90	Material Virgem
	Resistencia à fadiga = HMPE 1 > HMPE 2 > HMPE 3
	Carga de Impacto
	4% YBL = N/A
	5% YBL = HMPE 1 reduziu à vida em fadiga
60 - 90	Material Virgem
	Resistencia à fadiga = HMPE 1 > HMPE 2 > HMPE 3
	Carga de Impacto
	4% YBL = N/A
	5% YBL = HMPE 1 e HMPE 2 reduziram à vida em fadiga
70 - 90	Material Virgem
	Resistencia à fadiga = HMPE 1 > HMPE 2 > HMPE 3
	Carga de Impacto
	4% YBL = N/A
	5% YBL = HMPE 1 e HMPE 2 reduziram à vida em fadiga

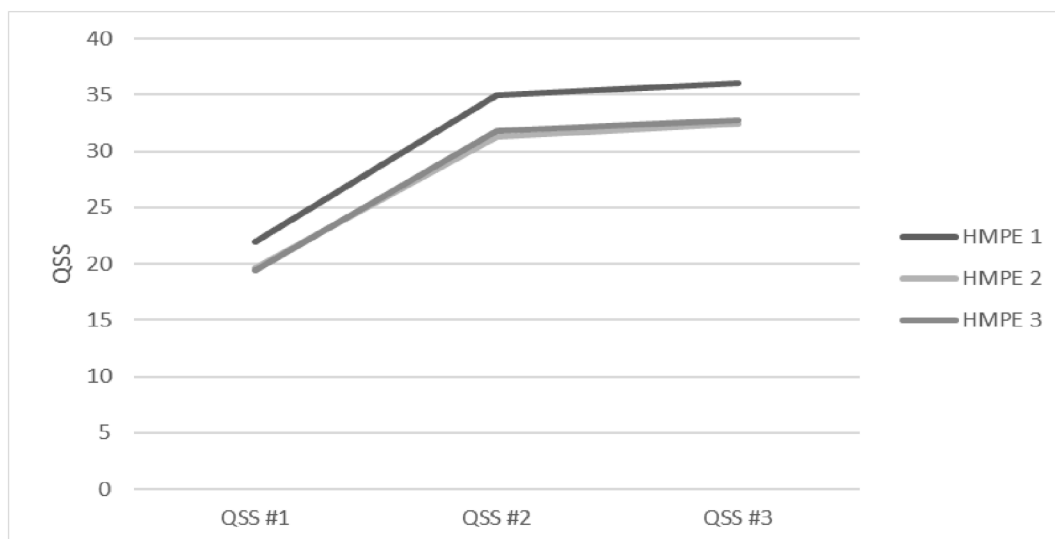
4.5. CARACTERIZAÇÃO DA RIGIDEZ QUASE ESTÁTICA, DINÂMICA E FLUÊNCIA

Nesta seção, é avaliado o comportamento mecânico dos três multifilamentos. Iremos apresentar os resultados obtidos nos ensaios de rigidez quase estática, dinâmica e fluência. Com o objetivo de comparar com os resultados obtidos anteriormente.

4.5.1. Rigidez quase estática

A seguir, a figura 53 mostra a evolução da rigidez quase estática dos três multifilamentos de HMPE, submetidos ao teste conforme a norma ISO 18692.

Figura 184 - Média da rigidez quase estática dos três multifilamentos de HMPE.

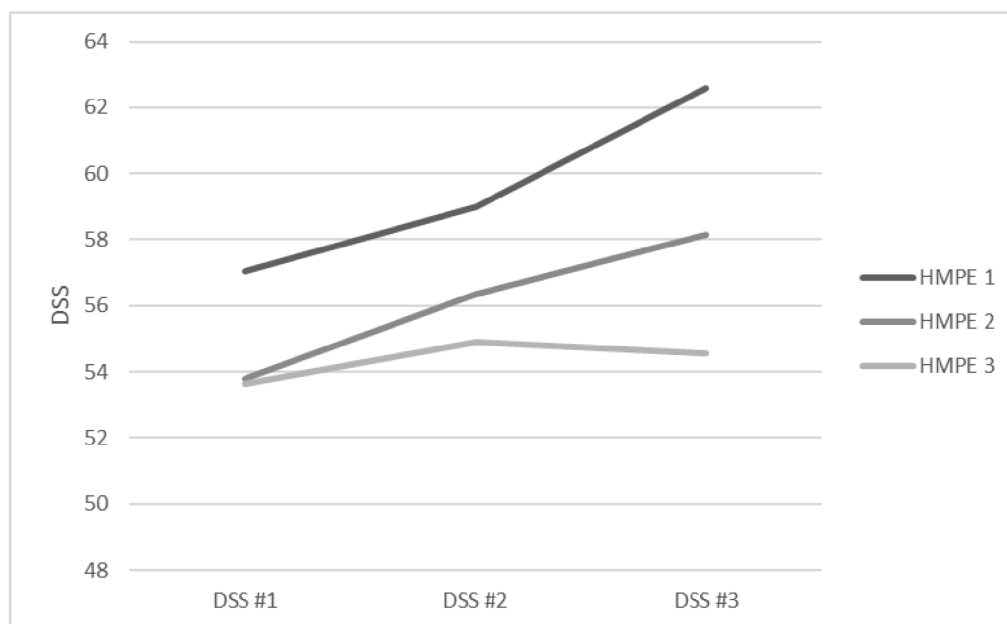


Analisando a figura 53, podemos observar que o HMPE 1 possui uma rigidez superior ao HMPE 2 e HMPE 3, porém o comportamento dos materiais é semelhante. A primeira rigidez avaliada (QSS#1) é sempre mais baixa para todos, seguido da segunda (QSS#2) onde se tem um aumento significativo e por fim, a terceira rigidez (QSS#3) onde o aumento é reduzido até uma faixa onde a tendência e a rigidez se manter constante.

4.5.2. Rigidez dinâmica

A seguir, a figura 54 mostra a evolução da rigidez dinâmica dos três multifilamentos de HMPE, submetidos ao teste conforme a norma ISO 18692. Novamente, podemos observar que o HMPE 1 apresentou a maior rigidez dinâmica. A primeira rigidez avaliada (DSS#1) é mais baixa para os três materiais, seguido da segunda (DSS#2) onde se tem um aumento significativo e por fim, na terceira rigidez (DSS#3), cada material mostrou um comportamento diferente. O HMPE 1 continuou tendo um aumento significativo na rigidez, enquanto o HMPE 2 teve um aumento na rigidez, porém reduziu a variação, já o HMPE 3 teve uma leve redução na rigidez do DSS#2 para o DSS#3, mas não o suficiente para chegar na rigidez inicial.

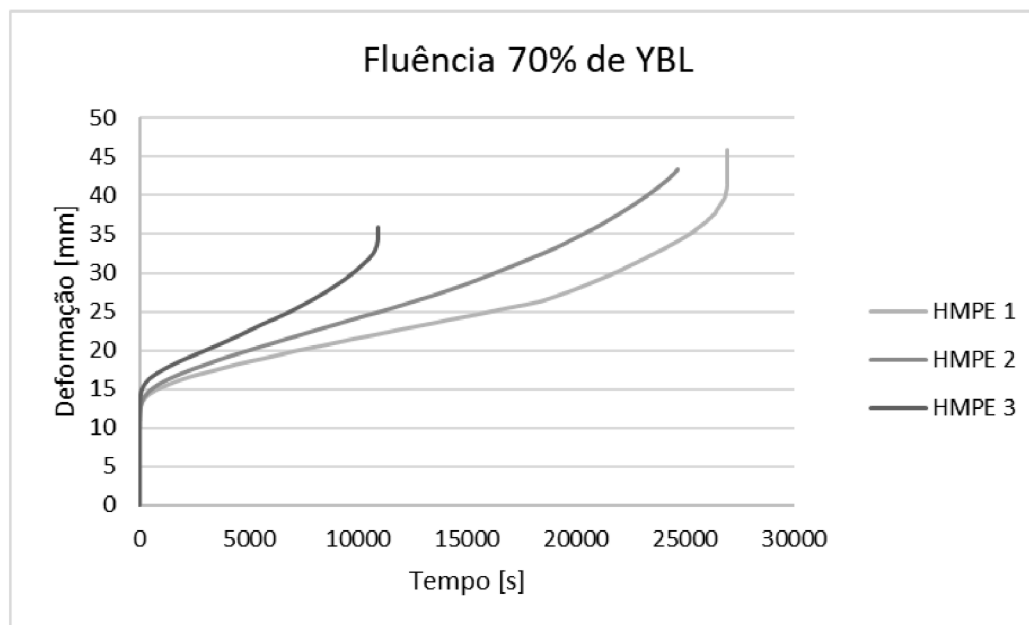
Figura 54 - Média da rigidez dinâmica dos três multifilamentos de HMPE.



4.5.3. Fluência

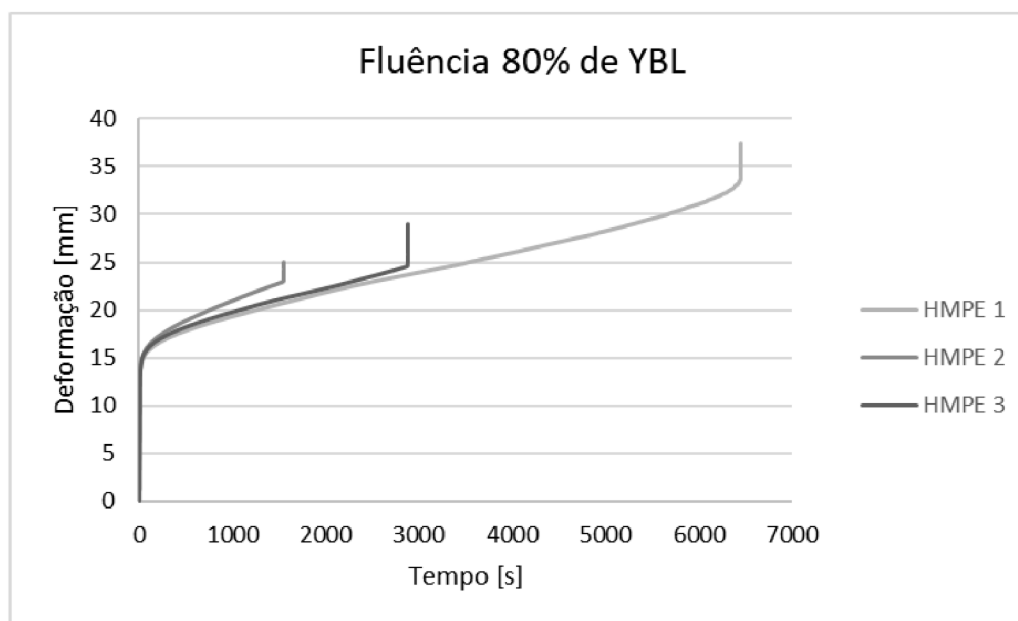
Na figura 55 é apresentado a média dos resultados obtidos nos ensaios de fluência para um carregamento de 70% de YBL dos três multifilamentos de HMPE.

Figura 55 - Média da fluência dos três multifilamentos de HMPE para 70% de YBL.



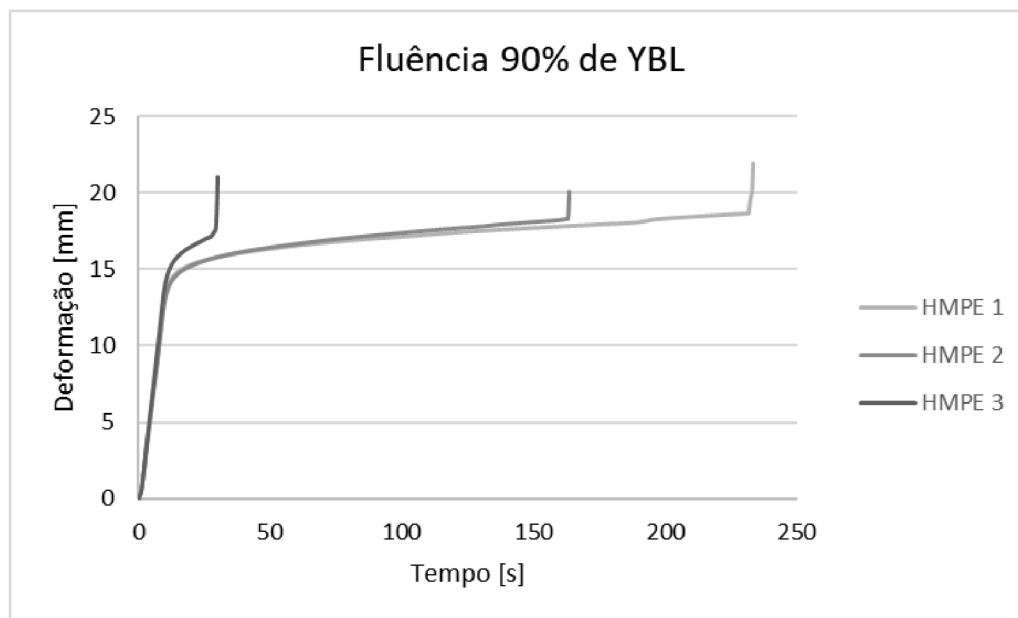
A seguir, na figura 56 é apresentado a média dos resultados obtidos nos ensaios de fluência para um carregamento de 80% de YBL dos três multifilamentos de HMPE.

Figura 196 - Média da fluência dos três multifilamentos de HMPE para 80% de YBL.



Por fim, na figura 57 é apresentado a média dos resultados obtidos nos ensaios de fluência para um carregamento de 90% de YBL dos três multifilamentos de HMPE.

Figura 57 - Média da fluência dos três multifilamentos de HMPE para 90% de YBL.



Verificando a rigidez quase estática, rigidez dinâmica e fluência dos três materiais, é comprovado que realmente existe influência do material para os resultados. Como podemos observar, em todos os testes o HMPE 1 apresentou os melhores resultados, enquanto o HMPE 3 apresentou os piores resultados.

4.6. CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

Nesta seção, são avaliados o comportamento térmico e a estrutura química dos três materiais. Iremos apresentar os resultados obtidos nos testes de DRX, EDS, FTIR, TGA e DSC. Com o objetivo de comparar se existe diferença entre os materiais.

4.6.1. Difração de raio x (DRX)

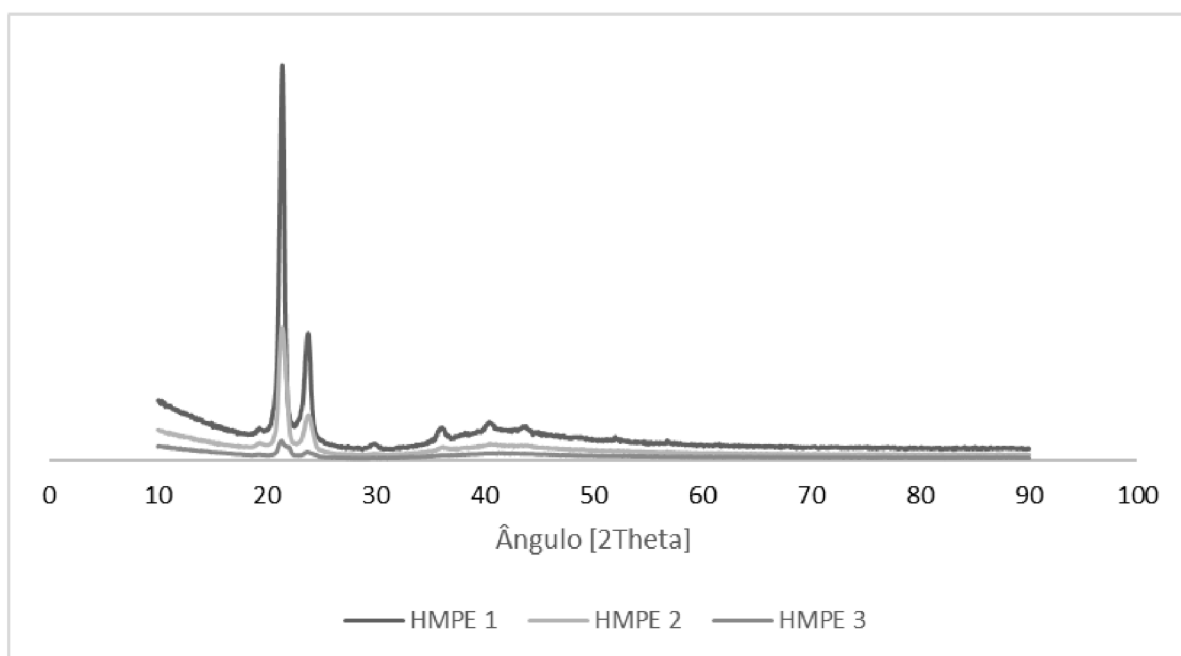
A partir dos resultados de difração de raios X apresentados na figura 58, foi possível identificar as regiões cristalinas dos três materiais, devido ao aparecimento de picos estreitos e intensos. A determinação do grau de cristalinidade das amostras foi realizada utilizando a equação 23 (KALISTRATOVA et al., 2017).

$$\chi = \frac{A_c}{A_c + A_a} 100 \quad (23)$$

O grau de cristalinidade χ é calculado de maneira padrão usando a relação entre a áreas abaixo das reflexões cristalinas (A_c) e a área total abaixo da curva de dispersão das áreas amorfa (A_a) e cristalina.

A Figura 58 mostra que os três materiais possuem os picos cristalinos de difração quase na mesma posição $2\theta = 21,52^\circ$ e $24,09^\circ$, indicando que esses materiais possuem estruturas cristalinas típicas. Além disso, com o auxílio do difratograma, foi possível a determinação dos graus de cristalinidade para cada material. O HMPE 1 apresentou 60,61% de cristalinidade, seguido pelo HMPE 2 com 54,39% e por fim, o HMPE 3 apresentou 36,50%. Com isso, é possível comprovar que a cristalinidade tem consequências nas propriedades mecânicas dos polímeros. O HMPE 1 apresentou maior resistência e maior cristalinidade.

Figura 58 - Difratograma dos três materiais.



4.6.2. Espectrometria de energia dispersiva (EDS)

Juntamente com as análises microscópicas (MEV), é realizado a espectrometria de energia dispersiva (EDS) dos materiais, visando comparar os elementos existentes na superfície dos multifilamentos. As figuras 59, 60 e 61 apresentam essas análises.

Figura 59 - Espectrometria de energia dispersiva (EDS) do HMPE 1.

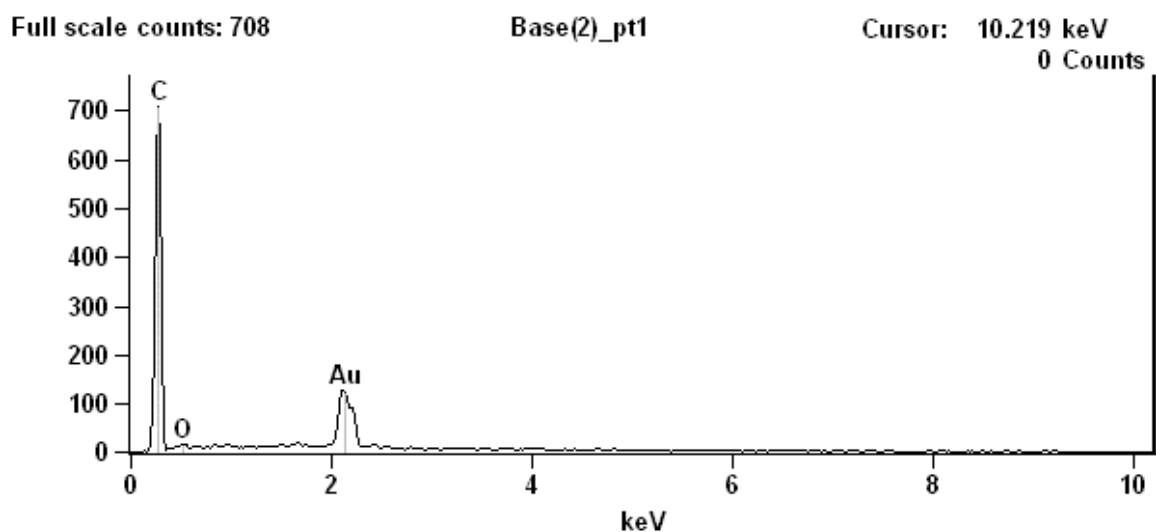


Figura 6020 - Espectrometria de energia dispersiva (EDS) do HMPE 2.

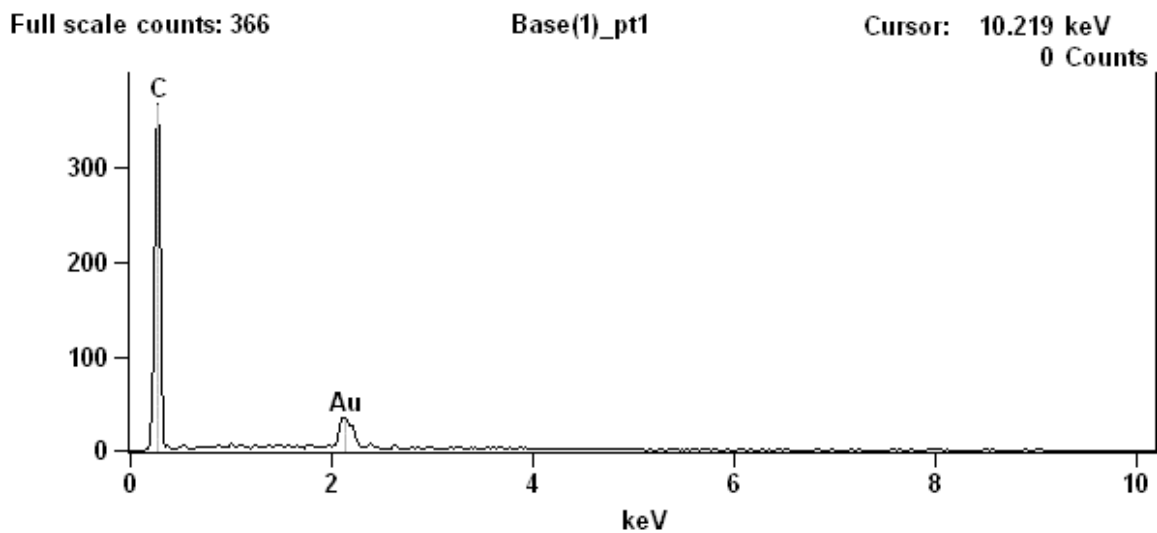
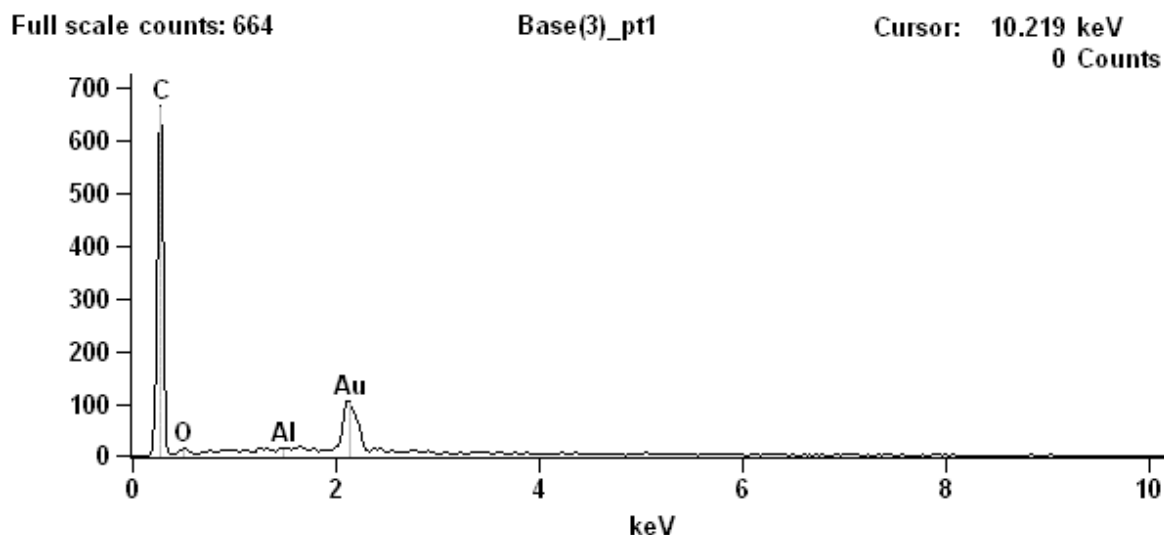


Figura 61 - Espectrometria de energia dispersiva (EDS) do HMPE 3.



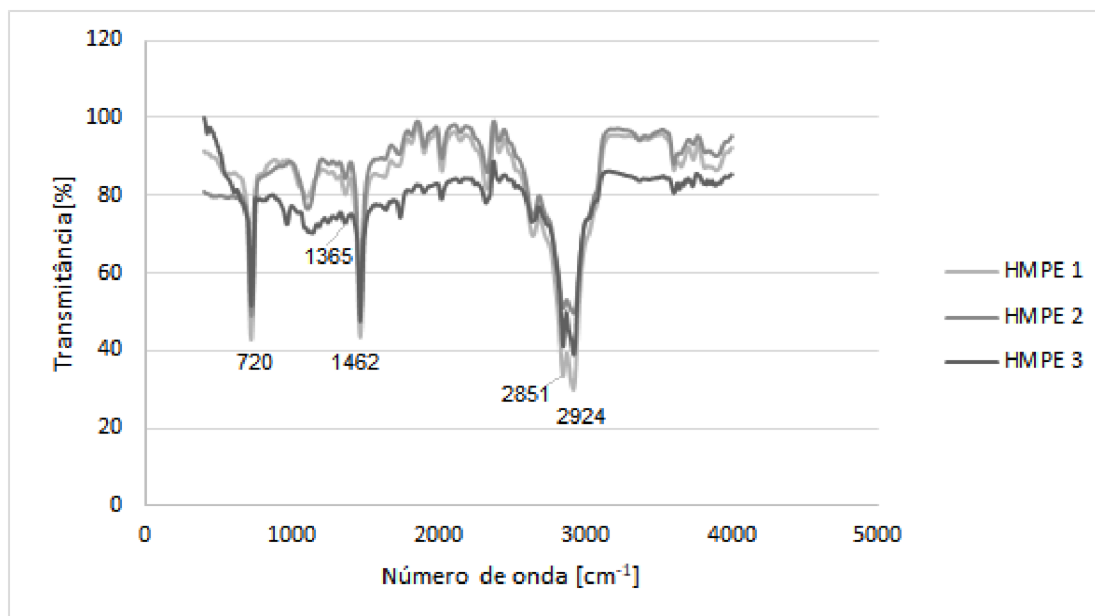
A análise feita através da espectrometria de energia dispersiva (EDS) não detectou diferença significativa entre os materiais. Ressaltando que o ouro (Au) encontrado nas amostras é devido ao banho metalizado para a realização da análise.

4.6.3. Espectroscopia na região do infravermelho (FTIR)

Os espectros dos três materiais apresentaram basicamente as mesmas bandas de absorção na região do infravermelho, conforme apresentado na figura 62. Diferenciando-se apenas nas intensidades das absorções, as quais podem ser explicadas pelas espessuras dos fios das amostras.

As bandas em 2924 e 2851 cm^{-1} correspondem ao estiramento CH_2 assimétrico e simétrico, respectivamente. As bandas em 1462 e 1365 cm^{-1} se referem à deformação angular do tipo tesoura dos grupos CH_2 e CH_3 , respectivamente. A banda em 720 cm^{-1} está relacionada com a deformação fora do plano do grupo CH_2 (SILVERSTEIN, 2006).

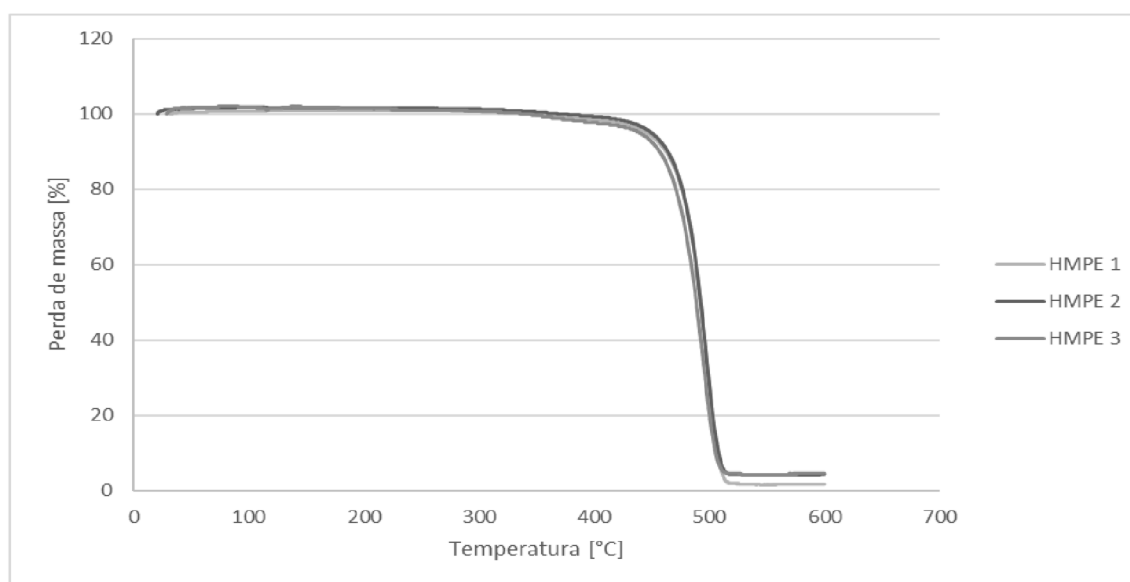
Figura 62 - Espectro do FTIR dos três materiais.



4.6.4. Análise termogravimétrica (TGA)

Na figura 63, são apresentadas as curvas termogravimétricas (TGA) em atmosfera inerte para os três materiais: HMPE 1, HMPE 2 e HMPE 3.

Figura 63 - Curvas termogravimétricas (TGA) dos três materiais.

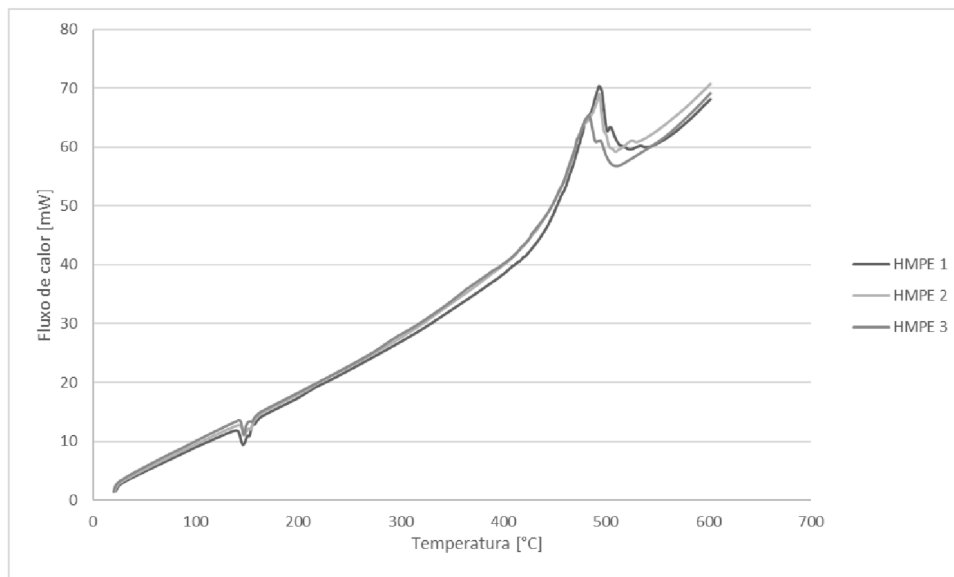


Analisando a figura 63, as curvas de termogravimétricas (TGA) demonstraram que todos os materiais possuem massa residual após a degradação térmica do polímero (acima de 500°C). Porém, o HMPE 1 apresentou uma menor quantidade de resíduo, o que foi aproximadamente 1% da massa inicial quando comparada aos demais materiais, onde se observou uma massa residual de aproximadamente, 4,5% para ambos. Além disso, é possível verificar uma degradação da matéria orgânica a uma menor temperatura para o HMPE 3.

4.6.5. Calorimetria exploratória diferencial (DSC)

Na figura 64, estão apresentadas as curvas de calorimetria exploratória diferencial (DSC) em atmosfera inerte para os três materiais: HMPE 1, HMPE 2 e HMPE 3.

Figura 64 - Curvas de calorimetria exploratória diferencial (DSC) dos três materiais.



Analisando a figura 64, as curvas de calorimetria exploratória diferencial apresentaram picos endotérmicos na faixa de 150°C referente à fusão para todos os polímeros. Neste ponto a energia do sistema proporciona a redução das forças intermoleculares secundárias entre as cadeias de fase cristalina, mudando do estado borrachoso para estado viscoso (fluido). Além disso, são observados picos exotérmicos acentuados em 500°C referente à degradação da cadeia polimérica. Este comportamento

também pode ser observado na perda de massa demonstrada nas curvas termogravimétrica para os três materiais, conforme figura 65.

Portando, podemos observar que o HMPE 1 também se difere termicamente, pois sua degradação acontece posteriormente aos demais materiais, enquanto o HMPE 2 e HMPE 3 não apresentam diferenças significativas entre eles.

5. CONCLUSÕES

No presente trabalho, foram estudados três multifilamentos de HMPE de diferentes fabricantes. Tendo como objetivo principal a investigação experimental sobre o comportamento mecânico dos fios de polietileno de alto módulo após sofrerem carregamentos dinâmicos.

A força de ruptura média encontrada para os três multifilamentos apresentou semelhança, todos foram superiores a 500 N. Com relação ao alongamento obtido, o HMPE 1 apresentou a maior rigidez, enquanto o HMPE 3 apresentou a menor. O comportamento mecânico dos materiais perante ao carregamento de impacto, mostrou que o HMPE 2 possui a maior resistência, pois os gráficos apresentaram maior dissipação de energia. Porém, nos ensaios de ruptura por impacto, o HMPE 1 apresentou maior resistência ao impacto consecutivo. Desta forma, não é possível concluir qual dos materiais é mais resistente ao impacto, pois cargas sucessivas de impacto afetam o comportamento do material.

A força de ruptura por impacto foi próxima a força de ruptura estática, contudo, grande parte das amostras romperam com forças inferiores. Para o HMPE 3 a força crítica média por impacto chegou a ser 10% menor do que a força de ruptura estática. Além disso, a estrutura dos multifilamentos foi analisada, para impacto com massa de 4% de YBL e 5% de YBL, e foi possível notar que o HMPE 3 sofreu a maior degradação nos fios.

Na resistência à fadiga, o fator material apresentou a maior influência nos resultados. O HMPE 1 apresentou, resistência superior para todas amplitudes, tanto virgem quanto impactado. O HMPE 2 e HMPE 3 apresentaram resistência semelhante no geral, porém o HMPE 3 mostrou menor estabilidade nos dados. Para um impacto com

massa de 4% de YBL, apenas o HMPE 3 sofreu variação na vida em fadiga e para impacto com massa de 5% de YBL o HMPE 1 e HMPE 2 tiveram redução. Para verificar a influência do material, foram realizados ensaios de rigidez e fluência. E novamente o HMPE 1 mostrou os melhores resultados e o HMPE 3 os piores.

A análise por DRX e FTIR mostraram que os materiais possuem algumas diferenças, mesmo sendo polietilenos de alto módulo. Além disso, as características térmicas dos três multifilamentos foram analisadas por meio do TGA e DSC e foi possível perceber que o HMPE 1 se difere também termicamente, devido sua degradação iniciar posteriormente aos demais materiais.

Portanto, é concluído que existe uma redução da vida em fadiga dependendo do carregamento de impacto pois há degradação de alguns filamentos, fazendo com que o material perca resistência. Porém, se o carregamento não degradar o filamento, ele pode afetar de forma a aumentar a resistência em alguns casos, uma vez que, a força aplicada cause um mecanismo de orientação plástica das moléculas, causado pela tensão de cisalhamento.

Apesar do polietileno de alto módulo possuir uma alta resistência, quando comparado com as outras fibras, devido ao seu alto nível de orientação, pode ser que o HMPE 3 possua uma menor orientação entre os materiais estudados, o que explicaria seu aumento na vida em fadiga para algumas amplitudes.

Por fim, também é concluído que propriedades como resistência à tração não devem ser utilizadas como única referência para dimensionamento em projetos quando se trata de materiais poliméricos, visto que os materiais possuem resistência à tração semelhante, porém nos outros testes apresentaram discrepância nos resultados.

6. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Do presente trabalho podem-se extrair sugestões para trabalhos futuros, visando dar continuidade no estudo. Abaixo estão citadas algumas sugestões:

- Avaliação da rigidez após cargas consecutivas de impacto para os multifilamentos de HMPE;
- Avaliação do efeito na vida em fadiga após impacto com massas de 2% de YBL e 3% de YBL nos multifilamentos de HMPE;
- Avaliação da vida em fadiga após duas ou mais cargas de impacto nos multifilamentos de HMPE;
- Avaliação do efeito de queda (massa e altura) no impacto dos multifilamentos de HMPE;
- Avaliação o efeito de carregamento de impacto com multifilamentos de HMPE úmidos;
- Avaliação do efeito de degradação por meio de abrasão nos multifilamentos de HMPE.

REFERÊNCIAS

ABNT ISO/TS 14909:2013. **Cabos de fibra para ancoragem de estruturas oceânicas – Polietileno de alto módulo (HMPE).**

ASTM E1823 – 13. **Standard Terminology Relating to Fatigue and Fracture Testing.**

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

CANDIAN, L. M. **Estudo do polietileno de alta densidade reciclado para uso de elementos estruturais.** Dissertação de Mestrado, Curso de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, 2007.

CANEVALORO JR., S.V. **Ciência dos Polímeros.** São Paulo: Artliber, 2006.

COFERRI L.; GUILHERME C.E.M.; STUMPF F.T.; DA SILVA A. H. M. F. T. **Application of the stepped isothermal method to evaluate creep behavior in high-modulus polyethylene yarns.** Anais do 27º Congresso Internacional de Transporte Aquaviário, Construção Naval e Offshore, 2018.

COUTINHO F. M. B; MELLO I. L.; DE SANTA MARIA L. C. **Polietileno: Principais Tipos, Propriedades e Aplicações.** *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 13, pg 1-13, 2003.

COWIE J.M.G. **Polymers: Chemistry and Physics of Modern Materials Materials**, 2nd edition, Blackie Blackie Academic and Professional, 1991.

CUSTER, Dave. **An estimation of the load rate imparted to a climbing anchor during fall arrest.** *The Engineering of Sport*, v. 6, pg 45-50, 2006.

DAVIES, P.; FRANÇOIS M.; LACOTTER N.; DURVILLE D. **An empirical model to predict the lifetime of braided HMPE handling ropes under cyclic bend over sheave (CBOS) loading.** *Ocean Engineering*, vol. 97, pg 74-81, 2015.

DAVIES, P.; REAUD, Y.; DUSSUD, L.; WOERTHER, P. **Mechanical Behavior of HMPE and Aramid Fiber Ropes for Deep Sea Handling Operations.** *Journal of Ocean Engineering*, v. 38, pg 2208-2214, 2011.

DE PAOLI, M. A. **Degradação e Estabilização de Polímeros** 2 ed. Chenkeys, 2008.

DOAK, K. W. **Ethylene Polymers.** In: MARK, H. M.; BIKALES, N. M.; OVERBERG, C. G.; MENGES, G. **Encyclopedia of Polymer Science and Engineering.** John-Wiley & Sons, New York, v.6, 1986.

DUARTE, J. P. **Avaliação do efeito da hidrólise no comportamento mecânico de fios sintéticos aplicados à ancoragem offshore.** Dissertação de mestrado, Curso de engenharia mecânica, Universidade Federal do Rio Grande, 2017.

EMRI, I. et al. **Time-dependent behavior of ropes under impact loading: A dynamic analysis.** *Sports Technology*, v. 1, pg 208-219, 2008.

EN 892:2012 (E). **Mountaineering equipment. Dynamic mountaineering ropes. Safety requirements and test methods.**

FINDLEY, W. N.; LAI, J. S.; ONARAN, K. **Creep and Relaxation of Nonlinear Viscoelastic Materials.** *Dover Publications*, 1976.

FREDEL, M.C. et al. **Propriedades mecânica: ensaios fundamentais**, v.1, 2015.

HAACH, L F.; POITEVIN, D. T; BASTOS, M. B. (2010). **Prospects of synthetic fibers for deepwater mooring**, IBP2745_10, Anais da Rio Oil & Gas Expo and Conference, 2010, Rio de Janeiro, Brasil, Setembro 13-16, 2010 ISO 18692:2007, Fibre ropes for offshore stationkeeping – Polyester.

HAGE JR. Elias, **Aspectos históricos sobre o desenvolvimento da ciência e tecnologia dos polímeros**. Polímeros, v.8, n.2, n.6-9,1998.

HAHN, G. **Avaliação da resistência à ruptura na tração em fibras sintéticas submetidas ao carregamento de impacto**. Dissertação de mestrado, Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande. 2019

HUMEAU C.; DAVIES P.; SMEETS P.; ENGELS T.A.P.; GOVAERTD E.; VLASBLOMB M.; JACQUEMINE F. **Tension fatigue failure prediction for HMPE fibre ropes**. *Polymer Testing*, v. 65, pg 497-504, 2018.

JOSEPH, P. V.; JOSEPH, K.; THOMAS, S.; PILLAI, C. K. S.; PRASAD, V. S.; GROENINCKX, G.; SARKISSOVA, M. **The Thermal and Crystallization Studies of Short Sisal Fiber Reinforced Polypropylene Composites**. *Composites: Part A*, v.34, pg 253-266, 2003.

KARAYAKA M.; SRINIVASAN S.; WANG S.S. **Advanced design methodology for synthetic moorings**, Presented at the Off shore Technology Conference, 1999.

KUMIRSKA, J.; CZERWICKA, M.; KACZYŃSKI, Z.; BYCHOWSKA, A.; BRZOZOWSKI, K.; THÖMING, J.; STEPNOWSKI, P. **Application of Spectroscopic Methods for Structural Analysis of Chitin and Chitosan**. *Marine Drugs*. V.8, p.1567-1636, 2010.

KWAN, C.T., MARINE, J.D., DEVLIN, P., TAN, P.L. AND HUANG, K. **Stiffness Modelling, Testing, and Global Analysis for Polyester Mooring**. *Proceedings of the ASME 2012 31st International Conference on Ocean Offshore Arctic Engineering*, pg 777-785, 2012.

LIU, H.; HUANG, W.; LIAN, Y.; LI, L. **An Experimental Investigation on Nonlinear Behaviors of Synthetic Fiber Ropes for Deepwater Moorings under Cyclic Loading**. *Journal of Applied Ocean Research*, v. 45, pg 22-32, 2014.

LO, K.H.; XÜ, H.; SKOGSBERG, L.A. **Polyester rope mooring design considerations**, Presented at the the Ninth International Offshore and Polar Engineering Conference, 1999.

LODI, P.C. **Aspectos de degradação polimérica de polietileno de alta densidade (PEAD) e de POLI (cloreto de vinila) (PVC)**. Tese de doutorado, curso de geotecnia, Universidade de São Paulo, 2009.

LOPES, C.A. **Análise de Fluência em Fibra de HMPE para Cabos Utilizados na Ancoragem tipo “Taut Leg” de Sistemas Flutuantes em Águas Profundas**. Dissertação de Mestrado, Curso de Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio Grande, 2003.

LOUZADA, E. L. V.; GUILHERME, C. E. M.; STUMPF, F. T. **Evaluation of the consequences of free falling loads in polyester yarns**. In: 24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering, 2017.

LOUZADA, E. L. V.; GUILHERME, C. E. M.; STUMPF, F. T. **Evaluation of the fatigue response of polyester yarns after the application of abrupt tesion loads**. *Acta polytechnica*, v.7, pg 76-78, 2016.

LUCAS F.E.; SOARES B.G.; MONTEIRO E.E.C. **Caracterização de polímeros**. Editora e-papers LTDA, 2001.

MANDELL J.F. **Modeling of marine rope fatigue behavior**, *Textil*. v.6, pg 318–330, 1987.

MANO, E. B.; MENDES, L. C. **Introdução aos polímeros**. 2ª ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher LTDA, 2004.

MAROCO, João. **Análise estatística com o SPSS Statistics**. 3ª edição ed. Lisboa: Edições Sílabo; 2007.

MARTIN, D. A. et al. **An approach for quantifying dynamic properties and simulated deployment loading of fire service escape rope systems.** *Experimental Techniques*, 2014.

MCLAREN, A. J. **Design and performance of ropes for climbing and sailing.** *Journal of Materials: Design and Applications*, v. 220, pg 1-12, 2006.

MIZUTANI, Y.; ENDO G.; SUZUKI Y.; TODOROKI A.; SRY V. **Consecutive impact loading an preloading effect on stiffness of woven synthetic-fiber rope.** *Journal of textile science and technology*, 2017.

MOHNSAN, L.A. **Simulação numérica do comportamento de cabos viscoelásticos.** Dissertação de mestrado, curso de engenharia oceânica, Universidade Federal do Rio Grande, 2008.

MONTGOMERY, Douglas C. **Design and analysis of experiments.** John Wiley & Sons, 2013.

MULINARI, D. R. **Comportamento térmico, mecânico e morfológico dos compósitos de polietileno de alta densidade reforçados com fibras de celulose do bagaço de cana de açúcar.** Tese de doutorado, Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, 2009.

NASSU, S.N. **Comportamento dinâmico-mecânico e relaxações em polímeros e blendas poliméricas.** Dissertação de mestrado, Curso de Química, Universidade Estadual de Campinas ,2005.

NIKONOV, A. et al. **Influence of moisture on functional properties of climbing ropes.** *International Journal of Impact Engineering*, v. 38, pg 900-909, 2011.

NORTHOLT, M.G. **Tensile Deformation of Poly (P-Phenylene Terephthalamide) Fibers, an Experimental and Theoretical Analysis.** *Polymer*, v. 21, pg 1199-1204, 1980.

NORTHOLT, M.G., BALTUSSEN, J.J.M. AND SCHAFFERS-KORFF, B. **Yielding and Hysteresis of Polymer Fibers.** *Polymer*, v. 36, pg 3485-3492, 1995.

OLIVIER, N. C. **Análise de falhas da camada polimérica externa de cabos umbilicais.** Tese de Doutorado, Curso de Engenharia mecânica, Universidade de São Paulo, 2007.

PAVIER, M. **Experimental and theoretical simulations of climbing falls.** *Sports Engineering*, v. 1, pg 79-91, 1998.

RODOLFO JR., A.; MEI, L. H. **Mecanismos de Degradação e Estabilização Térmica do PVC.** *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, vol. 17, pg 263-275, 2007.

ROMÃO, W.; SPINACÉ, M. A. S.; PAOLI, M. A. **Poli (Tereftalato de Etileno), PET: Uma Revisão Sobre os Processos de Síntese, Mecanismos de Degradação e sua Reciclagem.** *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, vol. 19, pg 121-132, 2009.

ROSA, D.S. **Correlação entre envelhecimento acelerado e natural do polipropileno isotático (ppi).** Tese de Doutorado, Curso de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 1996.

SIGNORETTI, G. **Wet and icy ropes may be dangerous.** *La Rivista del Club Alpino Italiano*, 2001.

SMITH, R. A. **The development of equipment to reduce risk in rock climbing.** *Sports Engineering*, v. 1, pg 27-39, 1998.

STUMPF F.T.; GUILHERME C.E.M.; CHIMISSO F.E.G. **Preliminary assessment of the change in the mechanical behavior of synthetic yarns submitted to consecutive stiffness tests.** *Acta Polytechnica*, v. 3, pg 75–77, 2016.

VAN DINGENEN, J. L. J. **Gel-spun high-performance polyethylene fibres.** In: HEARLE, J. W. S. **High-performance fibres.** Boca Raton FL 33431, Usa: Crc Press Llc, 2000.

VAN VLACK, L.H. **Princípio de ciência e tecnologia dos materiais.** 4 ed. Rio de Janeiro, Elsevier Editora LTDA, 1984.

VANNUCCHI F.C.; GUILHERME C.E.M; FRAGASSA C.; PAVLOVIC A. **Cyclic stress analysis of polyester, aramid, polyethylene and liquid crystal polymer yarns.** *Acta Polytechnica*, v. 56, pg 402–408, 2016.

VLASBLOW, M.; BOESTEN J.; DAVIES, P.; LEITE, S. **Ancoragem offshore TN Petroleo.** 2013. Disponível em: <
https://www.dsm.com/content/dam/dsm/dyneema/en_GB/Downloads/v2/Ancoragem%20offshore%20%20TN%20Petroleo%20September%202013.pdf>

VOGWELL, J.; MINGUEZ, J. M. **The safety of rock climbing protection devices under falling loads.** *Engineering Failure Analysis*, v. 14, pg 1114-1123, 2007.

WEHR, M.; POTT A.; WEHKING K.H. **Bending Fatigue strength and Lifetime of Fiber Ropes.** *Mechanisms and Machine Science*, v. 71, 2018.

WETTON, R. E. **Developments in Polymer Characterization.** Elsevier Applied Sci., London, 1986.

WUNDERLICH, B. **Thermal Characterization of Polymer Materials.** Academic Press, New York, 1997.