

EMILIO LUIZ VIEIRA LOUZADA

**ESTUDO EXPERIMENTAL SOBRE O COMPORTAMENTO MECÂNICO DE
MULTIFILAMENTOS DE POLIÉSTER SUBMETIDOS A CARREGAMENTOS
DINÂMICOS**

Rio Grande

2018

EMILIO LUIZ VIEIRA LOUZADA

**ESTUDO EXPERIMENTAL SOBRE O COMPORTAMENTO MECÂNICO DE
MULTIFILAMENTOS DE POLIÉSTER SUBMETIDOS A CARREGAMENTOS
DINÂMICOS**

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

Área de concentração: Engenharia de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Marcos Guilherme.

Rio Grande

2018

EMILIO LUIZ VIEIRA LOUZADA

**ESTUDO EXPERIMENTAL SOBRE O COMPORTAMENTO MECÂNICO DE
MULTIFILAMENTOS DE POLIÉSTER SUBMETIDOS A CARREGAMENTOS
DINÂMICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPMEC da Universidade Federal do Rio Grande como requisito para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Engenharia de Fabricação

Data de aprovação: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Dr. Felipe Tempel Stumpf
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Prof. Dr. Amanda Dantas de Oliveira
UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS



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



Ata nº **06/2018** da Defesa de Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande - FURG. Aos cinco dias do mês de março de dois mil e dezoito, foi instalada a Banca de Defesa de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, às quatorze horas na sala 1205, no prédio 1 do Campus Carreiros desta Universidade, a que se submeteu o mestrando **Emílio Luiz Vieira Louzada**, nacionalidade brasileira, dissertação ligada a Linha de Pesquisa em Engenharia de Soldagem e Materiais do PPMec, com o seguinte título: **ESTUDO EXPERIMENTAL SOBRE O COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MULTIFILAMENTOS DE POLIÉSTER SUBMETIDOS A CARREGAMENTOS DINÂMICOS**. Referendada pela Câmara Assessora do Curso, os seguintes Professores(a) Doutores(a) Amanda Dantas de Oliveira e Felipe Tempel Stumpf, sob a presidência do Professor Carlos Eduardo Marcos Guilherme. Analisando o trabalho, os Professores da Banca Examinadora o consideraram:

1. Amanda Dantas de Oliveira: APROVADO
2. Carlos Eduardo Marcos Guilherme: APROVADO
3. Felipe Tempel Stumpf: APROVADO

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

Assinaturas:

1. Amanda D. de Oliveira
CPF: 012.372.664-67
 2. Carlos Eduardo Marcos Guilherme
CPF: 732.846.700-25
 3. Felipe Tempel Stumpf
CPF: 007.895.560-22
- Emílio Luiz Vieira Louzada: Emílio Luiz Vieira Louzada

RESUMO

Recentemente, cabos sintéticos têm sido empregados em sistemas de amarração de plataformas *offshore*, operações de reboque de navio, esportes de escalada, serviços de bombeiros, iatismo e entre outros, em função do seu baixo peso específico e bom desempenho mecânico em condições de carregamento severas. Em comum, todas essas aplicações caracterizam-se pela presença de esforços dinâmicos. Então, devido à necessidade do desenvolvimento de pesquisas sobre o comportamento mecânico de cabos de poliéster perante os carregamentos, súbitos e cíclicos, foi realizado no presente trabalho uma análise de diferentes parâmetros, tais como força, deformação e energia absorvida, após um teste de impacto. Além disso, algumas amostras submetidas a um ensaio de impacto foram analisadas em um Microscópio Eletrônico de Varredura. Por último, foi investigado o efeito de uma carga de impacto na vida em fadiga de multifilamentos de poliéster através de um procedimento experimental que consiste em testar em fadiga os espécimes em seu estado virgem e quando submetidos previamente a um teste de impacto. Foram utilizados multifilamentos de poliéster produzidos por três diferentes fabricantes disponibilizados pelo Laboratório de Análise de Tensões – POLICAB da Universidade Federal do Rio Grande.

Palavras-chave: Cabos sintéticos. Carregamentos dinâmicos. Impacto. Poliéster. Fadiga.

ABSTRACT

Nowadays, the synthetic ropes have been applied in mooring systems for offshore platforms, ship towing operations, climbing sports, fire services, sailing and among others because of low specific weight and good mechanical performance in severes conditions of loading. In common, these applications are characterized by the dynamic loads becamas necessary the development of researchs about the the mechanical behavior of polyester cables when subbmitted to a sudden loading and a cyclic load. Therefore, it was analysed differents parameters such as force, deformation and absorbed energy after an impact test. In addition, it was analyzed some samples submitted to an impact test on the Scanning Electron Microscope. Finally, it was investigated the effect of an impact load on fatigue life of polyester yarns through an experimental procedure. This procedure tested the fatigue life of polyester yarns virgins and previously submitted to an impact test. It was tested polyester yarns produced by three different manufacturers and available by the Tension Analysis Laboratory – POLICAB of the Federal University of Rio Grande.

Keywords: Synthetic cables. Dynamic loadings. Impact. Polyester. Fatigue.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1– Sistema de ancoragem de plataforma <i>taut leg</i> | 9 |
| Figura 2 – Diagrama da massa em queda livre..... | 12 |
| Figura 3 – Diagrama de força versus tempo | 13 |
| Figura 4 – 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..... | 15 |
| Figura 5 – Geometria de queda de um escalador | 19 |
| Figura 6 - Ilustração da trajetória da corda durante o escape de um bombeiro de uma zona critica | 19 |
| Figura 7 - Sistema de ancoragem de plataforma do tipo (a) catenária (b) <i>taut leg</i> | 20 |
| Figura 8 - Ensaio experimental do lançamento em queda livre da âncora torpedo. (a) estrutura da máquina de ensaio; (b) polia fixa; (c) fio; (d) âncora torpedo; (e) suporte do balde; (f) balde com solo do oceano | 21 |
| Figura 9 – Sistema de reboque de navio..... | 21 |
| Figura 10 – Composição de um cabo sintético utilizado no alpinismo, conhecido como kernmantle..... | 24 |
| Figura 11 – Terminação do espécime do tipo “sanduíche”. | 25 |
| Figura 12 – Procedimento experimental..... | 26 |
| Figura 13 – Máquina de ensaio de impacto. (a) célula de carga; (b) fixadores do espécime; (c) multifilamento de poliéster; (d) marcador de deformação; (e) massa (f) altura de queda livre | 27 |
| Figura 14 – Procedimento para a aplicação da análise de variância | 32 |
| Figura 15 – Curva da força de impacto versus tempo para os poliésteres A, B e C utilizando às massas suficientes para causarem as falhas dos PETs..... | 34 |
| Figura 16 - Curva da força de impacto versus tempo para os materiais, PET A, PET B e PET C devido o lançamento em queda livre de uma massa igual a 6%YBL..... | 35 |
| Figura 17 - Curva da força de impacto versus tempo para os materiais, PET A e PET B, devido ao lançamento em queda livre de uma massa igual a 9%YBL..... | 36 |
| Figura 18 –Parâmetros físicos medidos e calculados para uma massa igual a 6%YBL | 36 |
| Figura 19 – Parâmetros físicos medidos e calculados para uma massa igual a 9%YBL | 37 |

| | |
|--|----|
| Figura 20 – Filamentos do PET C após um ensaio de impacto utilizando uma massa de 9%YBL | 38 |
| Figura 21 – Diagramas da média do número de ciclos até a ruptura em cada faixa de carregamento | 39 |
| Figura 22 – Curva do logaritmo do número de ciclos até a falha versus amplitude de carregamento para diferentes amostras de PET A: virgens e previamente submetidas a um teste de impacto | 40 |
| Figura 23 – Curva do logaritmo do número de ciclos até a falha versus amplitude de carregamento para diferentes amostras de PET B: virgens e previamente submetidas a um teste de impacto | 41 |
| Figura 24 – Curva do logaritmo do número de ciclos até a falha versus amplitude de carregamento para diferentes amostras de PET B: virgens e previamente submetidas a um teste de impacto | 41 |
| Figura 25 – Diagrama do logaritmo natural das médias da vida útil em fadiga versus os três materiais submetidos às diferentes cargas de impacto para os limites de carregamento de 10% a 90% de YBL | 44 |
| Figura 26 – Diagrama do logaritmo natural das médias da vida útil em fadiga versus os três materiais submetidos às diferentes cargas de impacto para os limites de carregamento de 20% a 90% de YBL | 46 |
| Figura 27 – Diagrama do logaritmo natural das médias da vida útil em fadiga versus os três materiais submetidos às diferentes cargas de impacto para os limites de carregamento de 30% a 90% de YBL | 48 |
| Figura 28 – Diagrama do logaritmo natural das médias da vida útil em fadiga versus os três materiais submetidos às diferentes cargas de impacto para os limites de descarregamento de 40% YBL a 90%YBL | 50 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Experimento fatorial 3^2 | 29 |
| Tabela 2 – Teste de Tukey..... | 30 |
| Tabela 3 – Força de ruptura em tração | 33 |
| Tabela 4 – Comparação das forças de ruptura por impacto com as forças de ruptura em tração | 34 |
| Tabela 5–Comparação da força de impacto com a força peso produzida pela massa igual a 6%YBL..... | 35 |
| Tabela 6 –Número de ciclos até a ruptura coletados nos ensaios de fadiga utilizando os limites de carregamento de 10% a 90% de YBL | 42 |
| Tabela 7 - Teste de homogeneidade de variâncias populacionais e teste de normalidade dos erros experimentais | 43 |
| Tabela 8 – p-value..... | 43 |
| Tabela 9 – Número de ciclos até a ruptura para as diferentes amostras utilizando os limites de carregamento de 20% a 90% de YBL | 45 |
| Tabela 10 – Testes realizados nos dados experimentais obtidos em ensaios de fadiga utilizando os limites de carregamento de 20% a 90% de YBL | 46 |
| Tabela 11 – Número de ciclos até a ruptura para as diferentes amostras utilizando os limites de carregamento de 30% a 90% de YBL | 47 |
| Tabela 12 – Testes realizados nos dados experimentais obtidos em ensaios de fadiga utilizando os limites de carregamento de 30% a 90% de YBL | 48 |
| Tabela 13 - Número de ciclos até a ruptura para as diferentes amostras utilizando os limites de carregamento de 40% a 90% de YBL | 49 |
| Tabela 14 – Testes realizados nos dados experimentais obtidos em ensaios de fadiga utilizando os limites de carregamento de 40% a 90% de YBL | 50 |
| Tabela 15 - Número de ciclos até a ruptura para as diferentes amostras utilizando os limites de carregamento de 50% a 90% de YBL | 51 |
| Tabela 16 – Testes realizados nos dados experimentais obtidos em ensaios de fadiga utilizando os limites de carregamento de 50% a 90% de YBL | 52 |
| Tabela 17 – Teste de Tukey..... | 52 |
| Tabela 18 - Número de ciclos até a ruptura para as diferentes amostras utilizando os limites de carregamento de 60% a 90% de YBL | 53 |

| | |
|--|----|
| Tabela 19 – Testes realizados nos dados experimentais obtidos em ensaios de fadiga utilizando os limites de carregamento de 60%YBL a 90%YBL..... | 54 |
| Tabela 20 – Teste de Tukey..... | 54 |
| Tabela 21 - Número de ciclos até a ruptura para as diferentes amostras utilizando os limites de carregamento de 70% a 90% de YBL | 55 |
| Tabela 22 – Testes realizados nos dados experimentais obtidos em ensaios de fadiga utilizando os limites de carregamento de 70%YBL a 90%YBL..... | 55 |
| Tabela 23 - Resumo da análise de variância | 56 |

SUMÁRIO

| | | |
|------------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 8 |
| 1.1 | Objetivos | 9 |
| 1.1.1 | Objetivo Geral | 9 |
| 1.1.2 | Objetivos Específicos | 10 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 11 |
| 2.1 | Degradação dos cabos sintéticos | 11 |
| 2.2 | Aplicação dos cabos sintéticos | 18 |
| 2.3 | Estudos sobre o comportamento de cabos sintéticos perante cargas de impacto | 22 |
| 2.4 | Poliéster | 23 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS | 24 |
| 3.1 | Escala do corpo de prova | 24 |
| 3.2 | Condições de ensaios | 25 |
| 3.3 | Procedimento experimental | 25 |
| 3.4 | Análise estatística | 28 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 33 |
| 4.1 | Força de ruptura média em tração | 33 |
| 4.2 | Análise do comportamento mecânico e da microestrutura dos materiais submetidos a um teste de impacto | 33 |
| 4.3 | Análise da resistência à fadiga dos materiais virgens e previamente submetidos a um teste de impacto | 38 |
| 5 | CONCLUSÃO | 57 |
| 6 | SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS | 59 |
| | REFERÊNCIAS | 60 |

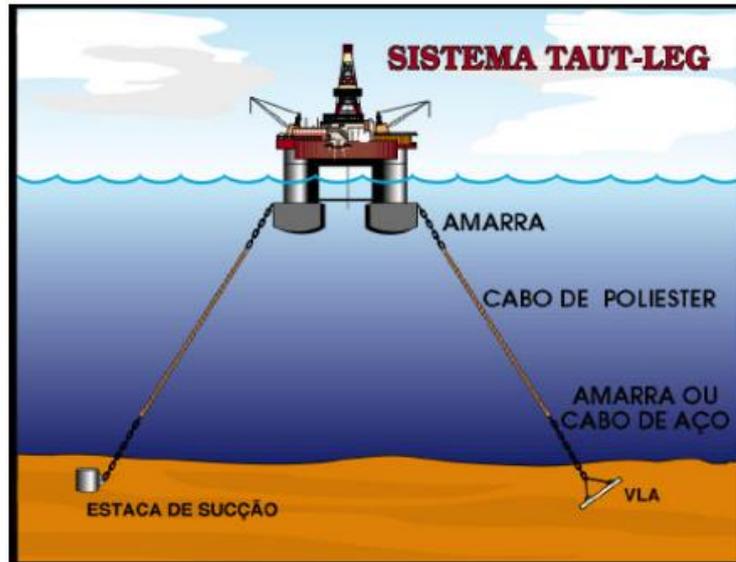
1 INTRODUÇÃO

A estreita relação homem/materiais é diretamente ligada com alguns períodos registrados na Terra, tais como a Idade da Pedra, Idade do Cobre, Idade do Bronze, Idade do Ferro e Idade do Aço, cujos nomes foram atribuídos para representar as necessidades do homem em termos de materiais em cada período (HAGE, 1998). Recentemente, o surgimento dos polímeros como materiais alternativos em relação aos materiais tradicionais (metais e cerâmicas) está acarretando no aumento da comunidade de profissionais que trabalham nessa área (HAGE, 1998).

Encontrados na natureza na forma de borracha natural, celulose, amido e entre outras, os polímeros foram desenvolvidos na forma sintética somente no início do século XX em função da maior compreensão de suas características moleculares. Entre os primeiros polímeros sintetizados, a poliamida destacou-se por substituir as fibras naturais nos cabos usados pelos soldados nas escaladas de montanhas durante a Segunda Guerra Mundial em função de um melhor desempenho mecânico (Mckenna *et al.*, 2004; Smith, 1998). Mais tarde, outros polímeros utilizados pelas cordoarias surgiram, tais como: polietileno tereftalato, aramida, polietileno de alto módulo (Mckenna *et al.*, 2004).

Produzidas a partir do estiramento de um polímero sólido no sentido longitudinal, as fibras sintéticas são utilizadas nos dias atuais em diversas áreas (CANEVAROLO JR, 2002). Nos sistemas de amarração de plataformas *offshore* (Fig. 1), os cabos sintéticos passaram a substituir os cabos de aço em função das suas melhores propriedades no ambiente de trabalho e a menor carga vertical (DA COSTA MATTOS E CHIMISSO, 2011). Nos esportes de escalada e serviços de bombeiros, as cordas sintéticas são utilizadas devido à elevada capacidade de absorver energia, protegendo o corpo humano de lesões graves (MARTIN *et al.*, 2014, VOGWELL; MINGUEZ, 2007).

Figura 1– Sistema de ancoragem de plataforma *taut leg*



Fonte – Gonçalves e Costa, (2002)

No entanto, 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; GUILHERME; STUMPF, 2016). As condições de uso envolvem temperatura, umidade e os tipos de cargas, como por exemplo, as súbitas e as cíclicas. Com relação aos valores das propriedades mecânicas, são obtidas por meio de ensaios mecânicos padronizados (CANEVAROLO JR, 2004).

Então, no presente trabalho foi avaliado por meio de ensaios experimentais o comportamento mecânico de multifilamentos de poliéster produzidos por três diferentes fabricantes perante um teste de impacto, e também o efeito de uma carga de impacto na resistência à fadiga desses multifilamentos. Os dados experimentais são interpretados através diferentes ferramentas estatísticas, tais como, gráficos, medidas descritivas, curvas de tendências e análise de variância, e com o auxílio de programas computacionais.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo do presente trabalho é analisar o comportamento mecânico de multifilamentos de poliéster submetidos a um ensaio de impacto e avaliar o efeito de uma carga de impacto na vida em fadiga destes multifilamentos.

1.1.2 Objetivos Específicos

- a)** avaliar o desempenho dos três materiais (PET A, PET B e PET C) perante um carregamento súbito devido ao lançamento em queda livre de uma massa equivalente a 6% da carga de ruptura do fio (Yarn Break Load), e também a 9% YBL.
- b)** analisar a microestrutura dos multifilamentos após o ensaio de impacto no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV);
- c)** comparar a vida útil em fadiga dos diferentes materiais, virgens e previamente submetido a um teste de impacto;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são abordados sobre os tipos de processos de degradação que as cordas poliméricas podem ser submetidas, os carregamentos dinâmicos (súbitos e cíclicos), algumas aplicações dos cabos sintéticos, pesquisas recentes a respeito do seu comportamento perante cargas de impacto e as características do poliéster.

2.1 Degradação dos cabos sintéticos

Os diferentes tipos de processos de degradação em cordas poliméricas são: térmica, mecânica, ultrassônico, hidrolítico, química, biológica e radioativa. Dentre esses, a degradação mecânica caracteriza-se por fraturas microscópicas e/ou macroscópicas nos cabos devido às solicitações mecânicas causadas pela transmissão de forças entre diferentes pontos no espaço (DE PAOLI, 2008).

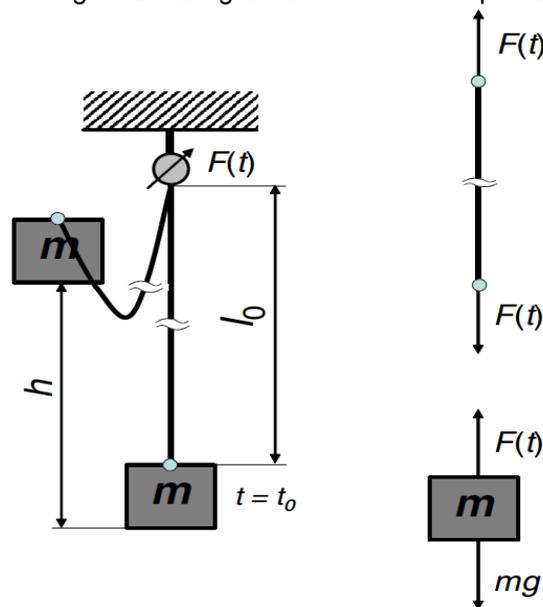
Com relação à investigação sobre carregamentos súbitos, Emri et al. (2008) aborda que umas das formas alternativas para analisar o comportamento dos cabos perante essas solicitações é por meio de uma metodologia Experimental – Numérica – Analítica (ENA). Essa metodologia avalia cabos poliméricos quantificando 13 parâmetros físicos, experimentalmente e analiticamente, sendo eles:

- a) força máxima (F_{max});
- b) deformação máxima (s_{max});
- c) deformação visco-plástica (s_{vp});
- d) deformação elástica (s_{el});
- e) deformação visco-elástico (s_{ve});
- f) deformação plástica (s_{pl});
- g) energia armazenada (W_{arm});
- h) energia recuperada (W_{rec});
- i) energia dissipada (W_{dis});
- j) rigidez inicial da corda (k_{ini});
- k) rigidez final da corda (k_{fi});
- l) razão de rigidez (χ);
- m) taxa de desaceleração (j).

Ainda, de acordo com a metodologia, no que diz respeito a ensaios experimentais, estes são semelhantes aos ensaios da norma BS EN 892:2012,

padronizadora de testes de impacto em cordas de montanhismo, e consistem basicamente em uma massa em movimento de queda livre (Fig. 2). Os 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 (EMRI et al., 2008; NIKONOV et al., 2011; VOGWELL; MINGUEZ, 2007). É importante salientar que a norma BS EN 892:2012 apresenta diferentes procedimentos dependendo dos fatores investigados, tais como relação de rigidez, número de testes que a corda suporta antes de romper, força transmitida ao longo do cabo e alongamento máximo, porém ela falha em apresentar meios para medir a deformação do cabo ao longo tempo, limitando a compreensão do seu comportamento (EMRI et al., 2008).

Figura 2 – Diagrama da massa em queda livre



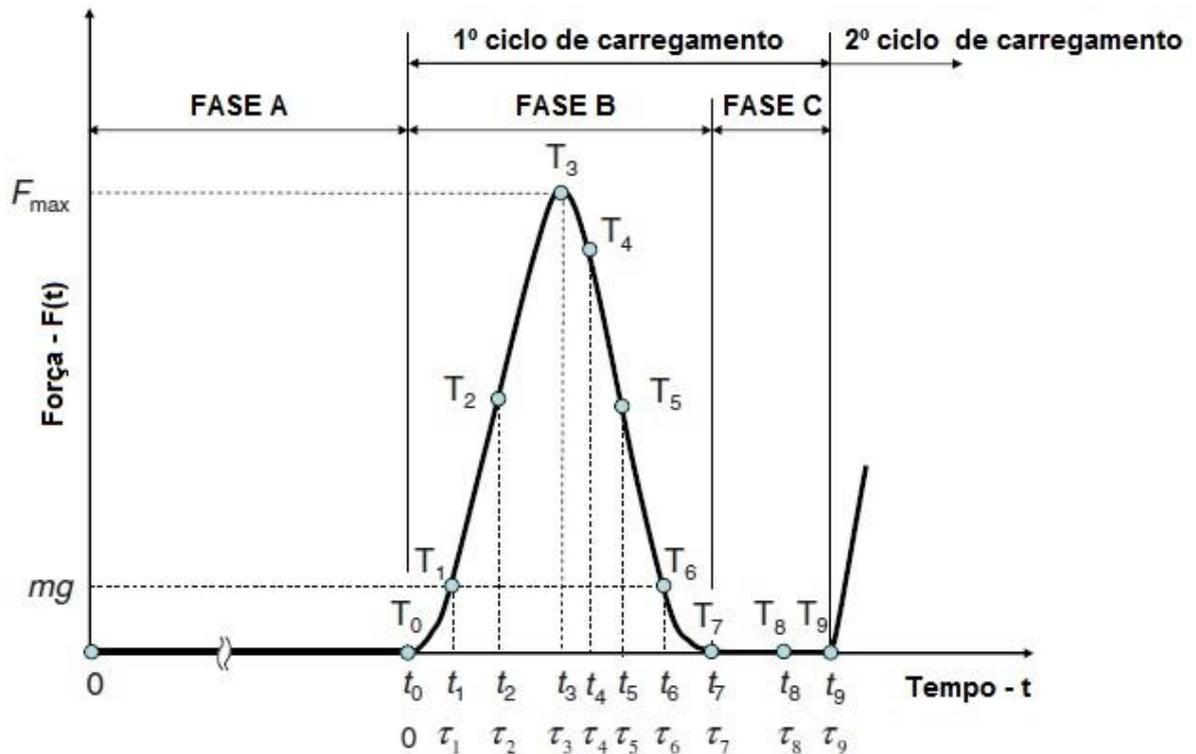
Fonte: Emri et al., (2008)

Por fim é realizado um breve resumo do procedimento analítico da metodologia ENA, no qual é baseado na análise do experimento de queda livre mostrado na Fig. 2. Ressalta-se que o procedimento analítico é disponibilizado com maiores detalhes na bibliografia Emri et al. (2008).

Ao passo em que a massa é solta de uma altura arbitrária, é possível medir à força em função do tempo $F(t)$ na fixação superior do cabo (Fig. 2) e, conseqüentemente, estabelecer a força transmitida através da corda e atuante na

massa (m). Logo, a curva de força versus tempo gerada (Fig. 3) é basicamente dividida em três fases: A, B e C.

Figura 3 – Diagrama de força versus tempo



Fonte: Emri et al., (2008)

- Fase A** – A primeira fase é representada pela massa em movimento de queda livre exercendo um carregamento nulo até o cabo estar totalmente esticado em $t=t_0=\sqrt{2h/g}$ e a massa com velocidade igual a $v_0=\sqrt{2gh}$. Ressalta-se que t_0 é o tempo (Fig. 3), h é a altura de queda livre e g é a gravidade.
- Fase B** – Esta fase é caracterizada pelo processo de deformação do cabo e acontece entre os pontos T_0 e T_7 .
- Fase C** – Entre os pontos T_7 e T_9 , ocorre a fase C. Nesta fase, o carregamento no cabo volta a ser nulo e a massa passa a executar um movimento vertical, livre e ascendente. Na sequência, se houver a existência de um novo teste de impacto, é iniciado o 2º ciclo de carregamento, o qual é analisado de forma idêntica ao 1º ciclo.

A respeito da fase B, a equação de movimento da massa é descrita através de

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

Onde 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. Ressalta-se que 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 Eq. 1 e, na sequência, aplicando as condições iniciais de contorno da fase B ($s(\tau=0)=0$ e $\dot{s}(\tau=0)=v_0=\sqrt{2gh}$) na equação integrada, é encontrada a expressão do deslocamento da massa como função do tempo (Eq. 2), a qual é equivalente à equação de deformação viscoplástica e viscoelástica do cabo.

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

A partir da Eq. 2, é possível obter as expressões de velocidade, aceleração e derivada da aceleração atuando no peso.

$$v(\tau)=\dot{s}(\tau)=g\tau-\frac{1}{m}\int_0^{\tau} F(\tau)d\tau+v_0 \quad (3)$$

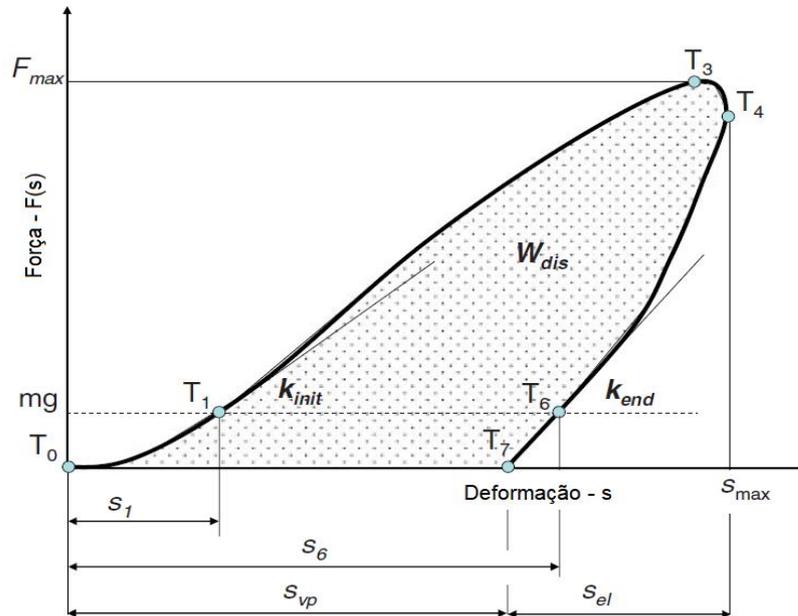
$$a(\tau)=\ddot{s}(\tau)=g-\frac{F(\tau)}{m} \quad (4)$$

$$j=\ddot{\ddot{s}}(\tau)=\frac{1}{m}\frac{dF(\tau)}{d\tau} \quad (5)$$

Quanto à derivada da aceleração (Eq. 5), conhecida em inglês como *jolt*, é um importante indicador de segurança nos estudos sobre acidentes de carros e explorações espaciais humanas (NIKONOV et al., 2011). Segundo Nikonov et al. (2011), sua elevada magnitude é considerada mais crítica para o corpo humano do que a exposição a uma considerável aceleração ou desaceleração.

Quanto à curva força *versus* deformação (Fig 4), é traçada através da substituição da expressão da curva Força – Tempo (Fig. 3) na equação da deformação do cabo (Eq. 2).

Figura 4 – 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_2 , a derivada de desaceleração atinge seu valor máximo. Já em 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 consequência 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) deduziu através da Eq. 2 as componentes máxima (Eq. 6), viscoplástica (Eq. 7) e elástica (Eq. 8) do material. Além dessas, as expressões das componentes viscoelástica (Eq. 9) e plástica (Eq. 10) também foram deduzidas.

$$s_{\max}=s(\tau_4)=\frac{g(\tau_4^2)}{2}-\frac{1}{m}\int_0^{\tau_4} F(\tau)d\tau+v_0(\tau_4) \quad (6)$$

$$s_{vp}=s(\tau_7)=\frac{g(\tau_7^2)}{2}-\frac{1}{m}\int_0^{\tau_7} F(\tau)d\tau+v_0(\tau_7) \quad (7)$$

$$s_{el}=s(\tau_4)-s(\tau_7)=\frac{1}{m}\int_{\tau_4}^{\tau_7} F(\tau)d\tau-\frac{g(\tau_7^2-\tau_4^2)}{2}-v_0(\tau_7-\tau_4) \quad (8)$$

$$s_{ve}=s(\tau_4)-s(\tau_3)=s(\tau_7)=\frac{g(\tau_4^2-\tau_3^2)}{2}+v_0(\tau_4-\tau_3)-\frac{1}{m}\int_{\tau_3}^{\tau_4} F(\tau)d\tau \quad (9)$$

$$s_{pl}=s_{vp}-s_{ve}=s(\tau_7)+s(\tau_3)-s(\tau_4) \quad (10)$$

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 através da equação da energia de deformação do cabo ao longo do tempo (Eq. 11), sendo equivalente à soma das energias cinética e potencial da massa no instante desejado, como mostrado na Eq. 12 (EMRI et al., 2008; NIKONOV et al., 2011).

$$W(\tau)=\int_0^{s(\tau)} F(x)dx \quad (11)$$

$$W(\tau)=W_k(\tau)+W_p(\tau) \quad (12)$$

Segundo Emri et al. (2008) e Nikonov et al. (2011), 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. Ressalta-se que a energia armazenada pelo cabo é a única fonte de absorção de energia durante o ciclo de carregamento (EMRI et al., 2008).

$$W_{\text{store}} = \overbrace{mg (h+s(\tau_4))}^{\text{energia potencial}} \quad (13)$$

Com relação à energia dissipada pelo cabo (Eq. 14), 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 entre as energias armazenada e restauradora. Essa última é relacionada à elasticidade do material e impulsiona a massa para o alto no instante T_4 . É importante salientar que fatores térmicos são desprezados no procedimento analítico (CUSTER, 2006; EMRI et al., 2008; NIKONOV et al., 2011).

$$W_{\text{dis}} = \overbrace{mg (h+s(\tau_4))}^{\text{energia armazenada}} - \overbrace{\left(\frac{mv(\tau_7)^2}{2} + mg \left(\overbrace{s(\tau_4)-s(\tau_7)}^{\text{def. elástica}} \right) \right)}^{\text{energia restauradora}} \quad (14)$$

Por último, em relação à razão de rigidez, à rigidez inicial e à rigidez final. Esses parâmetros são modificados a cada ciclo de carregamento já que os cabos se tornam mais rígidos a cada teste de queda livre. Com relação à rigidez inicial (Eq. 15) e à rigidez final (Eq. 16), são calculadas nos pontos T_1 e T_6 quando a força transmitida no cabo é equivalente à força peso. Sobre a razão de rigidez (Eq. 17), é um dos indicadores de qualidade dos cabos e sempre será menor do que 1 (EMRI et al., 2008; NIKONOV et al., 2011).

$$k_{\text{in}} = \frac{dF(s_1)}{ds} \quad (15)$$

$$k_{\text{fi}} = \frac{dF(s_6)}{ds} \quad (16)$$

$$\chi = \frac{k_{\text{in}}}{k_{\text{fi}}} \quad (17)$$

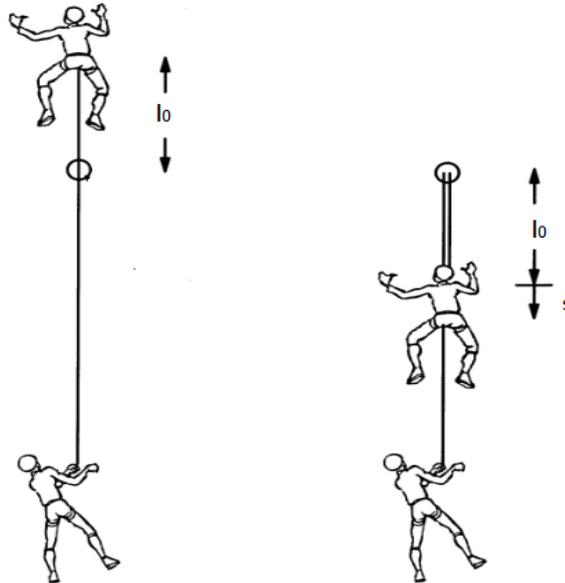
Quanto ao fenômeno de fadiga, ele é caracterizado por carregamentos cíclicos e sua manifestação dependente de variáveis, tais como escala do corpo de prova, formato da onda de ciclagem, amplitude de carregamento, frequência, temperatura, umidade e pH ambiental (BANFIELD et al., 1999; DE CAMARGO et al., 2016; MCKENNA; HEARLE; O'HEAR, 2004).

Sabendo que em condições reais de operação *offshore* os cabos de poliéster sujeitos a carregamentos cíclicos apresentam uma vida útil de aproximadamente 20 anos é inviável reproduzir em laboratório os ensaios de fadiga. Com isso, a bibliografia (BANFIELD et al., 1999) aborda, como alternativa, testes que utilizem maiores amplitude ou carga média não nula. Dessa maneira, os ensaios seguem como referência condições de carregamentos extremas e a frequência de ciclagem seguindo a norma DNV-OS-E303, a qual contém os requisitos para a certificação de cabos de amarração utilizados na indústria *offshore*.

2.2 Aplicação dos cabos sintéticos

Segundo Smith (1998), 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 livre (Fig. 5). Além disso, Smith (1998) ressalta que essas cordas, fabricadas geralmente em poliamida, são projetadas 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).

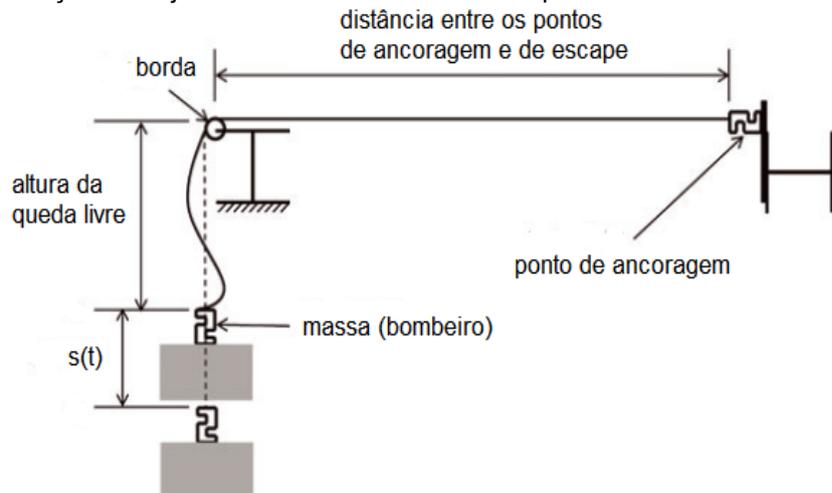
Figura 5 – Geometria de queda de um escalador
Antes da queda Depois da queda



Fonte: Vogwell e Minguez, (2007)

Segundo Martin et al. (2014), cabos sintéticos também são usados em operações de resgate, mais especificamente em atividades de combate a incêndio, sendo responsáveis pela proteção individual do bombeiro, pois permite um movimento de escape rápido pela janela de um local com alta temperatura e elevada altura em relação ao solo (Fig. 6). Em geral esses cabos são fabricados em aramida, poliamida e em alguns casos, com ambos os materiais. (MARTIN et al, 2014).

Figura 6 - Ilustração da trajetória da corda durante o escape de um bombeiro de uma zona crítica

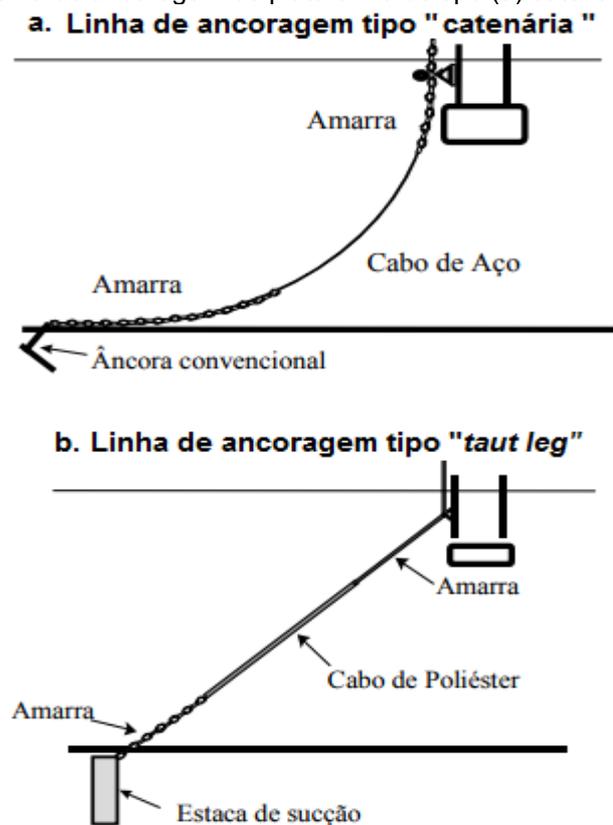


Fonte: Martin et al, (2014)

No iatismo, cordas sintéticas são fabricadas geralmente em poliéster, e são responsáveis por formarem a estrutura do veleiro e controlarem suas velas (MCLAREN, 2006). Visto isso, McLaren (2006) afirma que esses cabos devem apresentar boa resistência à abrasão, estabilidade das propriedades na presença de água, boas propriedades de manipulação, elevada rigidez e elevada resistência mecânica aos diferentes carregamentos (estáticos ou dinâmicos) que surgem devido à força do vento. Com relação ao desempenho mecânico perante cargas súbitas, é desvantajoso que apresentem uma grande deformação, visto que prejudicariam o ajuste fino das velas durante a navegação (MCLAREN, 2006).

Na indústria *offshore*, o tradicional sistema de amarração de plataformas em catenária (Fig. 7) é impraticável devido ao excesso de carga vertical dos cabos de aço. Por isso, foi substituído por uma geometria “*Taut Leg*” que utiliza amarração com cabos sintéticos (DA COSTA MATTOS; CHIMISSO, 2011).

Figura 7 - Sistema de ancoragem de plataforma do tipo (a) catenária (b) *taut leg*

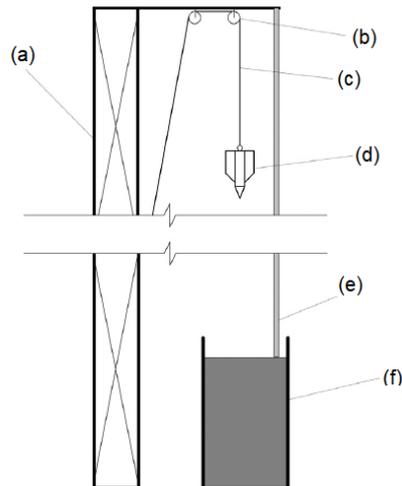


Fonte: Aguiar, 2005

Ao passo que os mecanismos de ancoragem evoluíram, novas âncoras foram desenvolvidas tentando facilitar a operação de fixação dos cabos no fundo do oceano.

Entre essas âncoras, destaca-se a estaca torpedo, que apresenta semelhança com um foguete e caracteriza-se pela elevada força de penetração no solo devido ao seu mecanismo de lançamento em queda livre. Na figura 8, é ilustrado um ensaio experimental desse mecanismo (WANG, Wenkai; WANG, Xuefeng; YU, 2016).

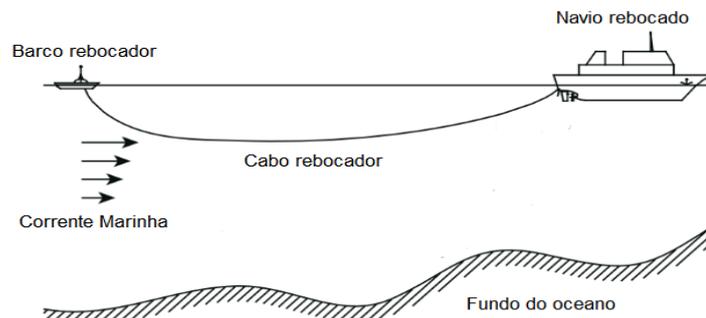
Figura 8 - Ensaio experimental do lançamento em queda livre da âncora torpedo. (a) estrutura da máquina de ensaio; (b) polia fixa; (c) fio; (d) âncora torpedo; (e) suporte do balde; (f) balde com solo do oceano



Fonte: Wang, Wenkai; Wang, Xuefeng; Yu, (2016)

Além das aplicações abordadas, as cordas poliméricas também são bastante empregadas em operações de reboque de navio (Fig. 9) que submetem os cabos a forças hidrodinâmica e/ou inercial e, conseqüentemente, a esforços dinâmicos (WANG; HUANG; DENG, 2008).

Figura 9 – Sistema de reboque de navio



Fonte: Wang; Huang; Deng, (2008)

2.3 Estudos sobre o comportamento de cabos sintéticos perante cargas de impacto

Nessa seção são abordados alguns estudos experimentais que tratam da resistência ao impacto dos cabos sintéticos.

a) Efeito da utilização de cordas de poliamida molhadas

Signoretta (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 em função do aumento das forças de atrito entre as fibras causadas pela absorção de água. O autor também observou uma redução de 30% na resistência a quedas livres sucessivas. Alguns anos depois, Nikonov et al. (2011) também estudaram o assunto e descobriram que essas cordas dissipam menos energia e apresentam uma maior recuperação elástica.

b) Efeito da exposição de cordas de poliamida a luz solar

Mclaren (2006) observou que a exposição de amostras de cordas de poliamida a 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.

c) Efeito da alteração do fator de queda (h/l_0)

Vogwell e Minguez (2007) analisaram os efeitos da alteração do fator de queda (h/l_0), e concluíram que a força transmitida ao longo da corda permanece inalterada se a razão continuar constante. Além disso, descobriu que a força de impacto é reduzida ao passo que a razão h/l_0 diminui.

d) Efeito de testes sucessivos de impacto

Vogwell e Minguez (2007) também estudaram o comportamento dos cabos sujeitos a testes sucessivos de impacto, com intervalos de 5 min, 30 min e 3600 min entre cada ensaio, e descobriram que ocorre um aumento da rigidez axial da corda a cada ensaio de impacto.

e) Comparação entre as forças de impacto transmitidas em cabos fabricados em aramida, poliamida e em ambos os materiais

Martin et al. (2014) compararam as forças de impacto transmitidas nos cabos utilizados por bombeiros fabricados em aramida, poliamida e em ambos os materiais, e observaram que em todos os casos estudados as cordas de aramidas apresentavam os valores das cargas dinâmicas mais elevados, inclusive atingindo valores fatais para o corpo de um bombeiro que segundo a OSHA (Occupational Safety and Health Administration) é equivalente a 8kN.

2.4 Poliéster

Entre os multifilamentos poliméricos que atualmente mais se aplicam a cabos de amarração, podem-se destacar as fibras de poliéster. Com características de comportamento não-linear viscoplástico e viscoelástico (HUANG et al., 2013), o poliéster possui uma elevada resistência à fadiga (BANFIELD et al., 1999).

No entanto, o poliéster apresenta uma redução significativa do número de ciclos até a ruptura quando sujeito a limites de carregamento cíclico com elevada força máxima (BOSMAN, 1996), suportando aproximadamente 100.000 ciclos quando opera entre 0% e 70% YBL (Yarn Break Load). Quando a força de carregamento de pico é reduzida para 60% YBL, a vida em fadiga do material gira em torno de 1.000.000 de ciclos (DE CAMARGO et al., 2016).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

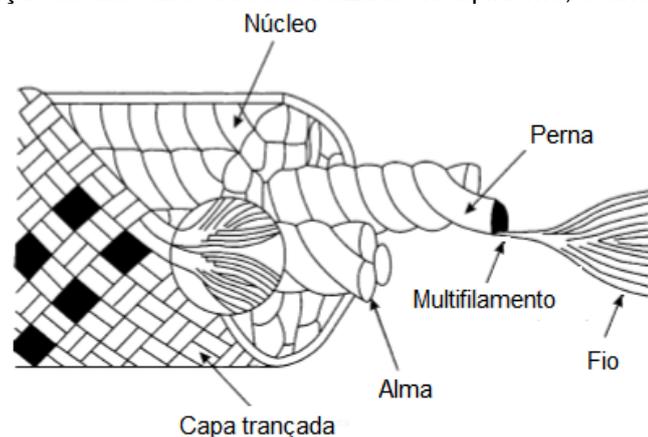
Com o objetivo de avaliar o comportamento de cabos sintéticos quando submetidos a carregamentos dinâmicos (súbito e cíclico), o primeiro passo é determinar a escala do corpo de prova e discutir sobre as condições de ensaio devido à sensibilidade dos polímeros para fatores já citados. Em seguida, será abordada a metodologia experimental que permite analisar o comportamento mecânico de multifilamentos sintéticos perante um carregamento súbito, e também avaliar a resistência à fadiga dos materiais, virgens e previamente submetidos a um teste de impacto.

O material utilizado é o poliéster produzido por três diferentes fabricantes que por razão de confidencialidade, serão tratados como PET A, PET B e PET C. A sala, os equipamentos e os materiais utilizados na pesquisa foram disponibilizados pelo Laboratório de Análise de Tensões (POLICAB) da Universidade Federal do Rio Grande

3.1 Escala do corpo de prova

Os cabos sintéticos são compostos genericamente por capa e núcleo (Fig. 10). A capa caracteriza-se por proteger o núcleo de danos ambientais e abrasão externa, enquanto o núcleo é responsável pelas propriedades mecânicas do cabo, como resistência à tração, fadiga, impacto e entre outras solicitações. Sendo assim, o núcleo é o componente a ser estudado no presente trabalho.

Figura 10 – Composição de um cabo sintético utilizado no alpinismo, conhecido como kernmantle



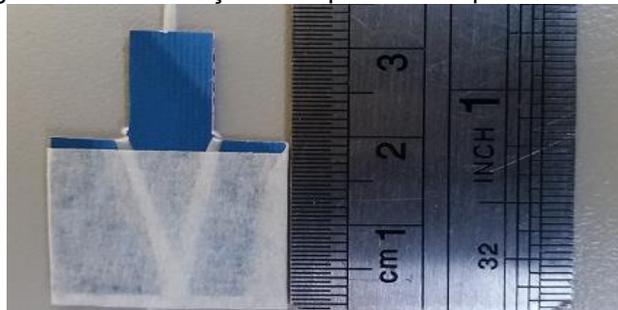
Fonte: McLaren, (2006)

A escolha da geometria mais adequada a ser utilizada nos ensaios é baseada na capacidade nominal das células de carga das máquinas de ensaio, disponibilidade de material e o custo dos componentes (alma, perna, multifilamento e fio) que formam o núcleo. Assim, a escala dos multifilamentos é considerada a ideal para o andamento desta pesquisa.

3.2 Condições de ensaios

Os espécimes apresentam 500 mm de comprimento com terminações do tipo “sanduíche” (Fig. 11) em função do bom desempenho que esse tipo de terminal apresentou em ensaios prévios (PFARRIUS; DUARTE; CHIMISSO, 2007). Os espécimes são mantidos 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, ou seja, nas mesmas condições recomendadas pela norma ISO 139:2014, a qual aborda a atmosfera padrão para condicionamento e testes em fibras.

Figura 11 – Terminação do espécime do tipo “sanduíche”.

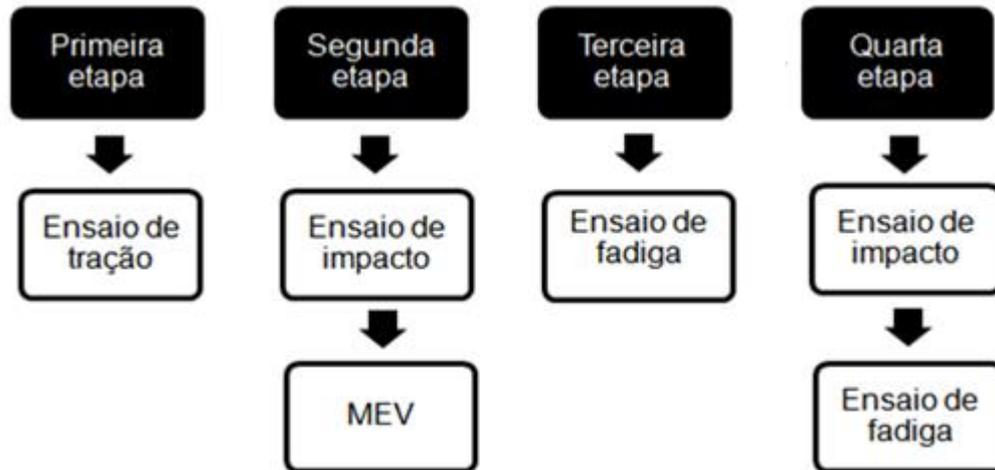


Fonte: Elaborado pelo autor

3.3 Procedimento experimental

Na figura 12 é mostrado o procedimento experimental realizado para PET A, PET B e PET C, sendo as discussões sobre cada etapa abordadas adiante.

Figura 12 – Procedimento experimental

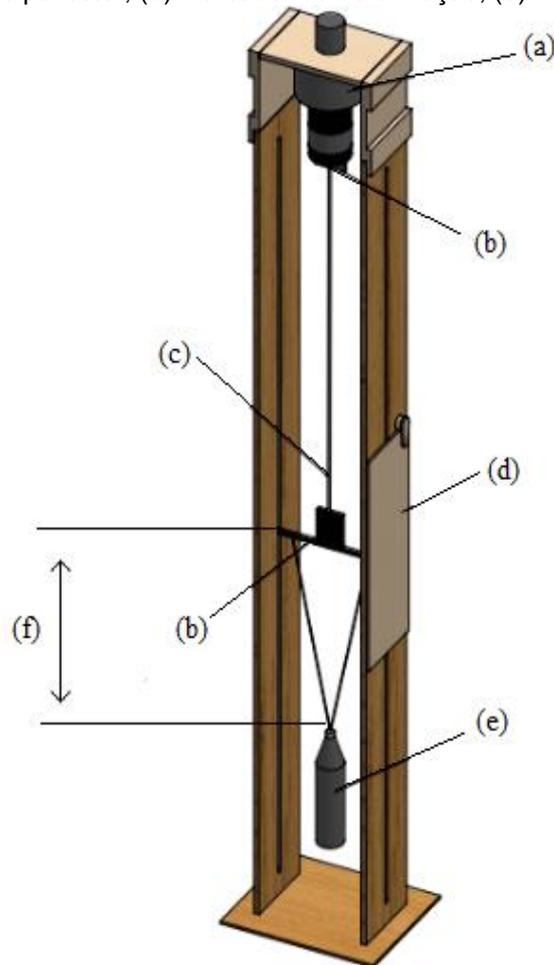


Fonte: Elaborado pelo autor

Primeiramente é obtida a força de ruptura média em tração do material em uma máquina de ensaios modelo INSTRON 3365 nas condições de ensaios já citadas e sendo utilizada uma velocidade controlada de rampa até a ruptura equivalente a 500 mm/min (ASTM D885: 2014). A quantidade de amostras ensaiadas é igual a 30 espécimes não torcidos.

Na segunda etapa, é realizada a análise do comportamento mecânico do material perante um carregamento súbito em um dispositivo (Fig. 13) que mede diferentes parâmetros físicos, tais como força de impacto, alongamento máximo e deformação viscoplástica. Os testes de impacto seguem as condições de ensaios já abordadas. São utilizadas massas iguais a 6% YBL e 9% YBL e 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 entre o meio de fixação da corda na estrutura da máquina de impacto e a massa em queda livre. O conjunto de equipamentos (célula de carga e sistema de aquisição de dados) para medir e registrar a força na corda apresenta uma frequência de amostragem de 5 kHz e atende ao requisito da norma BS EN 892:2012 de pelo menos 1 kHz. A deformação elástica e energia absorvida são calculadas nessa etapa a partir dos parâmetros medidos nos ensaios de impacto. Além disso, são encontrados os valores dos pesos suficientes para causarem as falhas dos PETs.

Figura 13 – Máquina de ensaio de impacto. (a) célula de carga; (b) fixadores do espécime; (c) multifilamento de poliéster; (d) marcador de deformação; (e) massa (f) altura de queda livre



Fonte: Elaborado pelo autor

Em seguida, algumas amostras de poliésteres sujeitas a um ensaio de impacto foram analisadas no Microscópio Eletrônico de Varredura localizado no Centro de Microscopia Eletrônica da Zona Sul - FURG.

Nas duas últimas etapas é realizada a investigação da resistência à fadiga dos materiais, virgens e previamente submetidos a um teste de impacto. Portanto, uma amostra virgem é encaminhada a ensaios de fadiga em uma máquina modelo INSTRON 8801 utilizando uma frequência de ciclagem equivalente a 0,1 Hz e cargas cíclicas de:

- a) 10% a 90% de YBL
- b) 20% a 90% de YBL
- c) 30% a 90% de YBL
- d) 40% a 90% de YBL
- e) 50% a 90% de YBL

- f) 60% a 90% de YBL
- g) 70% a 90% de YBL.

Em cada intervalo de carregamento cíclico são ensaiados vinte espécimes, o que significa uma amostra de 140 multifilamentos. O teste de fadiga foi controlado por força e aplicada uma pré-tensão de 1 N seguido de uma rampa de velocidade controlada até a força média do intervalo de carregamento (ASTM D885: 2014). Por fim é investigada a vida em fadiga quando os corpos de prova são previamente submetidos a uma carga de impacto equivalente a uma massa de 6%YBL lançada de uma altura igual a 300 mm. Essa etapa é repetida para uma massa de 9%YBL.

Após a execução de todas as etapas do procedimento experimental para os três materiais são utilizados gráficos, medidas descritivas (média e desvio padrão), curvas de tendências e análise de variância para a interpretação dos resultados.

3.4 Análise estatística

Segundo Barbetta, Reis e Bornia (2010), as medidas descritivas são formas de sintetizar, representar e compreender um conjunto de dados quantitativos permitindo obter respostas que dificilmente seriam alcançadas analisando os dados na forma bruta. Dentre elas, se destacam a média e o desvio padrão, que são utilizadas para avaliar a posição central e a dispersão de uma amostra. Contudo, essas medidas podem fornecer conclusões precipitadas a respeito do conjunto de dados, tornando necessária a utilização de testes estatísticos.

Então, a análise de variância (ANOVA) paramétrica é empregada para investigar a influência do efeito de cada um dos fatores, material e carga de impacto, e também suas interações, sobre a vida em fadiga dos multifilamentos de poliéster (MAROCO, 2007; MONTGOMERY, 2013).

Na tabela 1 é mostrada uma das maneiras para dispor as observações do número de ciclos até a ruptura (y_{ijk}) do experimento que se caracteriza por conter dois fatores ensaiados em três níveis. 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 repetições ($k = 1,2,\dots,20$).

Tabela 1 – Experimento fatorial 3²

| | | Fator B – Carga de impacto | | | | | | | | | | | |
|--------------------|-------|----------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | | Virgem | | | | 6%YBL | | | | 9%YBL | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| Fator A – Material | PET A | y ₁₁₁ | y ₁₁₂ | y ₁₁₃ | y ₁₁₄ | y ₁₂₁ | y ₁₂₂ | y ₁₂₃ | y ₁₂₄ | y ₁₃₁ | y ₁₃₂ | y ₁₃₃ | y ₁₃₄ |
| | | y ₁₁₅ | y ₁₁₆ | y ₁₁₇ | y ₁₁₈ | y ₁₂₅ | y ₁₂₆ | y ₁₂₇ | y ₁₂₈ | y ₁₃₅ | y ₁₃₆ | y ₁₃₇ | y ₁₃₈ |
| | | y ₁₁₉ | y ₁₁₁₀ | y ₁₁₁₁ | y ₁₁₁₂ | y ₁₂₉ | y ₁₂₁₀ | y ₁₂₁₁ | y ₁₂₁₂ | y ₁₃₉ | y ₁₃₁₀ | y ₁₃₁₁ | y ₁₃₁₂ |
| | | y ₁₁₁₃ | y ₁₁₁₄ | y ₁₁₁₅ | y ₁₁₁₆ | y ₁₂₁₃ | y ₁₂₁₄ | y ₁₂₁₅ | y ₁₂₁₆ | y ₁₃₁₃ | y ₁₃₁₄ | y ₁₃₁₅ | y ₁₃₁₆ |
| | | y ₁₁₁₇ | y ₁₁₁₈ | y ₁₁₁₉ | y ₁₁₂₀ | y ₁₂₁₇ | y ₁₂₁₈ | y ₁₂₁₉ | y ₁₂₂₀ | y ₁₃₁₇ | y ₁₃₁₈ | y ₁₃₁₉ | y ₁₃₂₀ |
| | PET B | y ₂₁₁ | y ₂₁₂ | y ₂₁₃ | y ₂₁₄ | y ₂₂₁ | y ₂₂₂ | y ₂₂₃ | y ₂₂₄ | y ₂₃₁ | y ₂₃₂ | y ₂₃₃ | y ₂₃₄ |
| | | y ₂₁₅ | y ₂₁₆ | y ₂₁₇ | y ₂₁₈ | y ₂₂₅ | y ₂₂₆ | y ₂₂₇ | y ₂₂₈ | y ₂₃₅ | y ₂₃₆ | y ₂₃₇ | y ₂₃₈ |
| | | y ₂₁₉ | y ₂₁₁₀ | y ₂₁₁₁ | y ₂₁₁₂ | y ₂₂₉ | y ₂₂₁₀ | y ₂₂₁₁ | y ₂₂₁₂ | y ₂₃₉ | y ₂₃₁₀ | y ₂₃₁₁ | y ₂₃₁₂ |
| | | y ₂₁₁₃ | y ₂₁₁₄ | y ₂₁₁₅ | y ₂₁₁₆ | y ₂₂₁₃ | y ₂₂₁₄ | y ₂₂₁₅ | y ₂₂₁₆ | y ₂₃₁₃ | y ₂₃₁₄ | y ₂₃₁₅ | y ₂₃₁₆ |
| | | y ₂₁₁₇ | y ₂₁₁₈ | y ₂₁₁₉ | y ₂₁₂₀ | y ₂₂₁₇ | y ₂₂₁₈ | y ₂₂₁₉ | y ₂₂₂₀ | y ₂₃₁₇ | y ₂₃₁₈ | y ₂₃₁₉ | y ₂₃₂₀ |
| | PET C | y ₃₁₁ | y ₃₁₂ | y ₃₁₃ | y ₃₁₄ | y ₃₂₁ | y ₃₂₂ | y ₃₂₃ | y ₃₂₄ | y ₃₃₁ | y ₃₃₂ | y ₃₃₃ | y ₃₃₄ |
| | | y ₃₁₅ | y ₃₁₆ | y ₃₁₇ | y ₃₁₈ | y ₃₂₅ | y ₃₂₆ | y ₃₂₇ | y ₃₂₈ | y ₃₃₅ | y ₃₃₆ | y ₃₃₇ | y ₃₃₈ |
| | | y ₃₁₉ | y ₃₁₁₀ | y ₃₁₁₁ | y ₃₁₁₂ | y ₃₂₉ | y ₃₂₁₀ | y ₃₂₁₁ | y ₃₂₁₂ | y ₃₃₉ | y ₃₃₁₀ | y ₃₃₁₁ | y ₃₃₁₂ |
| | | y ₃₁₁₃ | y ₃₁₁₄ | y ₃₁₁₅ | y ₃₁₁₆ | y ₃₂₁₃ | y ₃₂₁₄ | y ₃₂₁₅ | y ₃₂₁₆ | y ₃₃₁₃ | y ₃₃₁₄ | y ₃₃₁₅ | y ₃₃₁₆ |
| | | y ₃₁₁₇ | y ₃₁₁₈ | y ₃₁₁₉ | y ₃₁₂₀ | y ₃₂₁₇ | y ₃₂₁₈ | y ₃₂₁₉ | y ₃₂₂₀ | y ₃₃₁₇ | y ₃₃₁₈ | y ₃₃₁₉ | y ₃₃₂₀ |

Fonte: Elaborado pelo autor

Maroco (2007) e Montgomery (2013) explicam o comportamento da variável dependente através 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.

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (18)$$

Sobre o efeito da interação, ele ocorre quando a influência da carga de impacto na vida em fadiga depende do material escolhido (MAROCO, 2007; MONTGOMERY, 2013). Por exemplo, se os três PETs submetidos a uma carga de impacto forem encaminhados ao ensaio de fadiga e somente um deles sofrer redução da vida útil, então existe interação entre os fatores. Quanto ao erro experimental, inclui as diferenças entre os dados experimentais de uma mesma combinação de níveis de

fatores devido à não homogeneidade dos multifilamentos (MONTGOMERY, 2013). Em uma única análise de variância são verificadas três hipóteses nulas (H_0) associadas aos três testes estatísticos:

- a) $H_0^{(A)}: \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = 0$ (não há diferença na vida em fadiga entre os materiais);
- b) $H_0^{(B)}: \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = 0$ (não há redução da vida em fadiga devido à aplicação prévia de uma carga de impacto);
- c) $H_0^{(AB)}: (\tau\beta)_{ij} = 0$ (não há interação entre os fatores, material e carga de impacto).

Utilizando um intervalo de confiança igual a 99% é calculado o p-value para cada um dos três testes estatísticos. Caso p-value $\leq 1\%$, a hipótese nula é rejeitada, e se p-value $\geq 1\%$ a hipótese nula é aceita (MAROCO, 2007; MONTGOMERY, 2013).

Sabendo que a análise de variância apenas indica que existe pelo menos uma média da vida em fadiga que é diferente das outras, Maroco (2007) e Montgomery (2013) abordam a necessidade da aplicação de um método de comparação múltipla chamado de Teste de Tukey, que permite conhecer entre quais materiais e cargas de impacto as médias do número de ciclos até a ruptura são diferentes. Tal método consiste na comparação entre pares de médias (Tab. 2).

Tabela 2 – Teste de Tukey

| Fatores | Comparações |
|-------------------------------|--|
| Fator A (Material) | PET A versus PET B PET A versus PET C PET B versus PET C |
| Fator B (Carga de impacto) | Virgem versus 6% YBL Virgem versus 9% YBL 6% YBL versus 9% YBL |

Fonte: Elaborado pelo autor

Entretanto, na presença de interação os resultados obtidos na análise de variância podem ser difíceis de serem interpretados e o método de comparações múltiplas pode produzir resultados não verdadeiros, logo, Maroco (2007) sugere a utilização dos gráficos das médias da vida útil em fadiga relacionando os três materiais submetidos às diferentes cargas de impacto para a interpretação dos resultados.

Por fim, é importante salientar que para a validação dos resultados da análise de variância algumas premissas devem ser satisfeitas (BARBETTA, REIS E BORNIA 2010; MAROCO, 2007; MONTGOMERY, 2013):

- a) as observações devem ser independentes;
- b) as variâncias populacionais devem ser homogêneas;
- c) a distribuição dos erros experimentais deve ser normal.

Maroco (2007) e Montgomery (2013) destacam o teste Levene para investigar a hipótese de igualdade das variâncias populacionais (σ) das várias amostras. A hipótese a testar é:

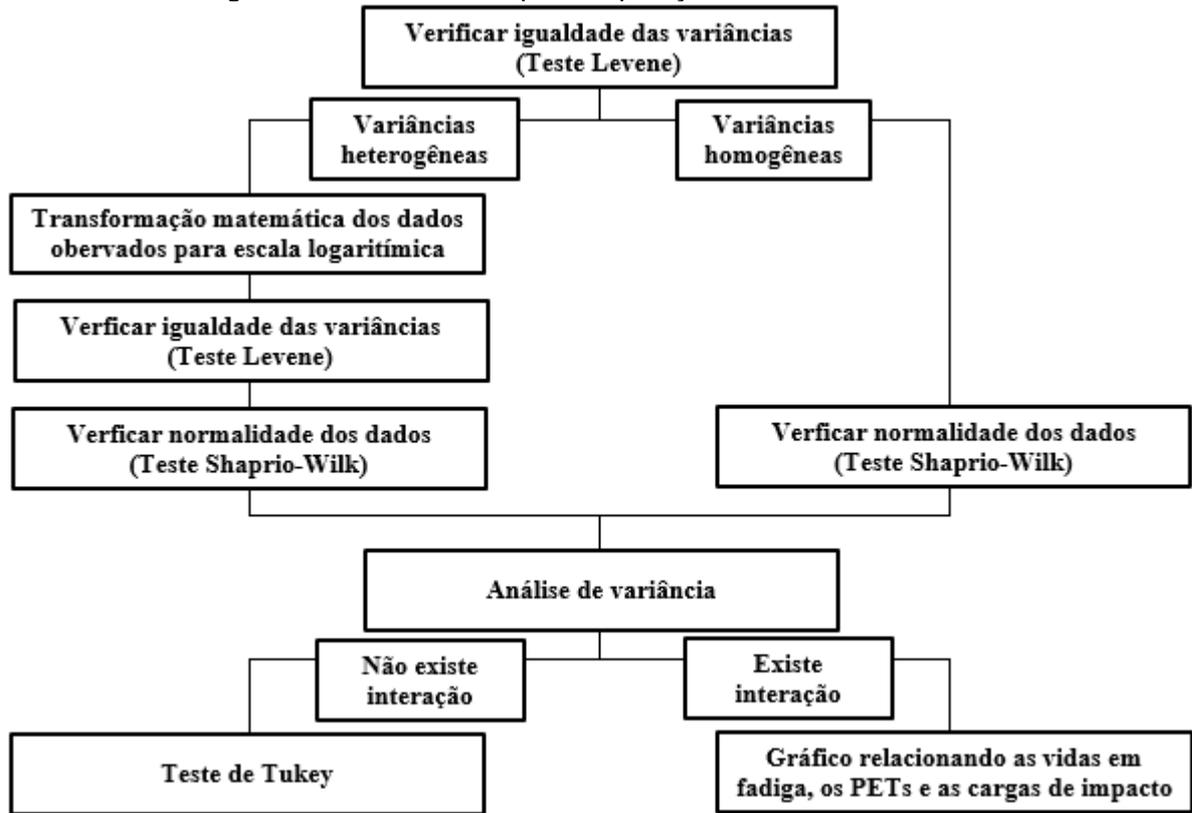
a) $H_0: \sigma_{11} = \sigma_{21} = \sigma_{31} \dots = \sigma_{ij}$

Utilizando um intervalo de confiança igual a 99% é calculado o p-value. Caso $p\text{-value} \geq 1\%$, o resultado é significativo e as variâncias populacionais das várias amostras são iguais, e se $p\text{-value} \leq 1\%$ o resultado é insignificante e a hipótese nula é rejeitada. Segundo Maroco (2007) e Montgomery (2013), na presença de heterogeneidade das variâncias 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. Logo, Maroco (2007) e Montgomery (2013) salientam que a análise de variância também deverá ser efetuada com os dados transformados.

Quanto ao teste de normalidade dos erros, no presente trabalho é empregado o teste de Shapiro-Wilk (BARBETTA, REIS E BORNIA 2010; MAROCO, 2007; MONTGOMERY, 2013) para avaliar se a forma da distribuição dos erros da variável dependente (número de ciclos) em estudo é do tipo normal. Este teste é indicado por Maroco (2007) para amostras de pequena dimensão ($n < 20$).

A seguir, na Fig. 14 é apresentado um resumo do procedimento abordado para a aplicação da análise de variância.

Figura 14 – Procedimento para a aplicação da análise de variância



Fonte: Elaborado pelo autor

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nessa seção é abordado sobre as forças médias de ruptura em tração para os poliésteres produzidos pelos três diferentes fabricantes. Na sequência é analisado o comportamento mecânico do material perante um carregamento súbito, sendo tratado sobre diferentes parâmetros físicos, tais como força de impacto, alongamento máximo, deformação viscoplástica, deformação elástica e energia absorvida. Além disso, são mostradas as imagens da microestrutura dos filamentos após os ensaios de impacto.

Por fim, é tratado a respeito da influência do material e de uma carga de impacto na vida em fadiga dos multifilamentos de poliéster através de medidas descritivas, curvas de tendências e uma análise de variância.

4.1 Força de ruptura média em tração

Primeiramente são apresentados os seguintes valores de resistência à tração (Tab. 3) para os diferentes poliésteres.

Tabela 3 – Força de ruptura em tração

| Material | PET A | PET B | PET C |
|----------|--------|--------|--------|
| YBL [N] | 165,44 | 171,71 | 268,35 |

Na tabela 3 é observado que o poliéster A apresenta a menor resistência a tração em relação aos demais poliésteres, enquanto o poliéster C apresenta a maior força de ruptura em tração.

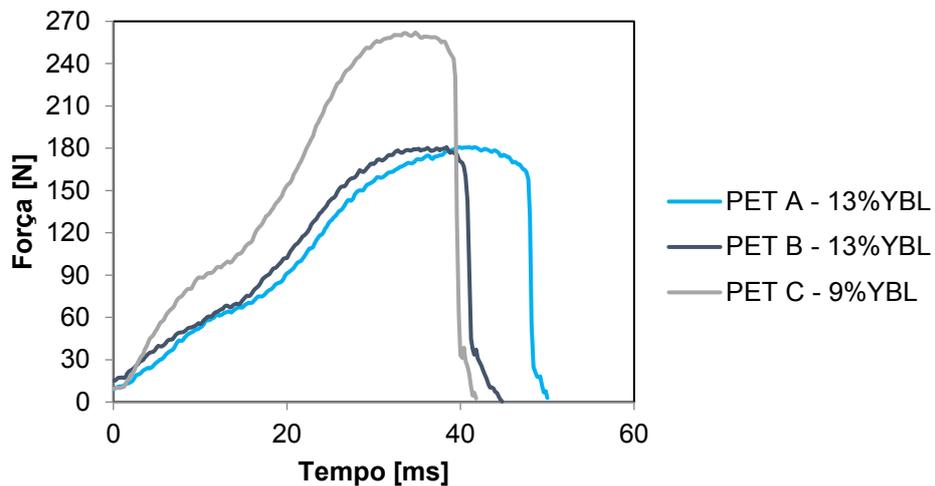
4.2 Análise do comportamento mecânico e da microestrutura dos materiais submetidos a um teste de impacto

Nessa seção são apresentados os resultados referentes à segunda etapa do procedimento experimental. Logo, são mostrados os valores das massas suficientes para causarem as falhas dos PETs, sendo elas:

- a) Uma massa de 13%YBL (aproximadamente de 2,19 kg) é suficiente para causar a falha do PET A;
- b) Uma massa de 13%YBL (aproximadamente de 2,27 kg) é suficiente para causar a falha do PET B;
- c) Uma massa de 9%YBL (aproximadamente de 2,46 kg) é suficiente para romper os multifilamentos de poliéster produzidos pelo fabricante C.

A seguir, na Fig. 15, são mostradas as curvas de forças versus tempo para cada poliéster utilizando as massas suficientes para causarem suas falhas. Note que o tempo é apresentado em milissegundos (ms).

Figura 15 – Curva da força de impacto versus tempo para os poliésteres A, B e C utilizando às massas suficientes para causarem as falhas dos PETs.



Como mostrado na Fig. 15, as forças de ruptura por impacto para PET A, PET B e PET C são aproximadamente de 180 N, 180 N e 261 N. A seguir, estas forças são comparadas com as forças de ruptura em tração (Tab. 4).

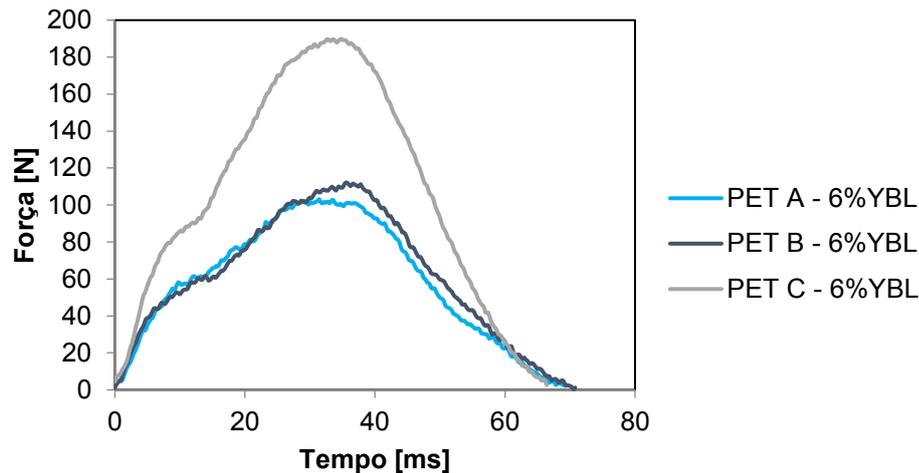
Tabela 4 – Comparação das forças de ruptura por impacto com as forças de ruptura em tração

| Poliéster | Força de ruptura por impacto | Força de ruptura em tração [N] |
|-----------|------------------------------|--------------------------------|
| | [N] | |
| A | 180 | 165,44 |
| B | 180 | 171,71 |
| C | 261 | 268,35 |

Nota-se que os diferentes poliésteres apresentam os valores das forças de ruptura por impacto próximo aos valores das forças de ruptura por tração.

A seguir, são apresentadas as curvas das forças versus tempo produzidas pelo lançamento em queda livre de uma massa equivalente a 6%YBL. Ressalta-se que uma massa de 6% do YBL dos PETs A, B e C, são respectivamente iguais a, 1,01kg, 1,05kg e 1,64kg.

Figura 16 - Curva da força de impacto versus tempo para os materiais, PET A, PET B e PET C devido o lançamento em queda livre de uma massa igual a 6%YBL



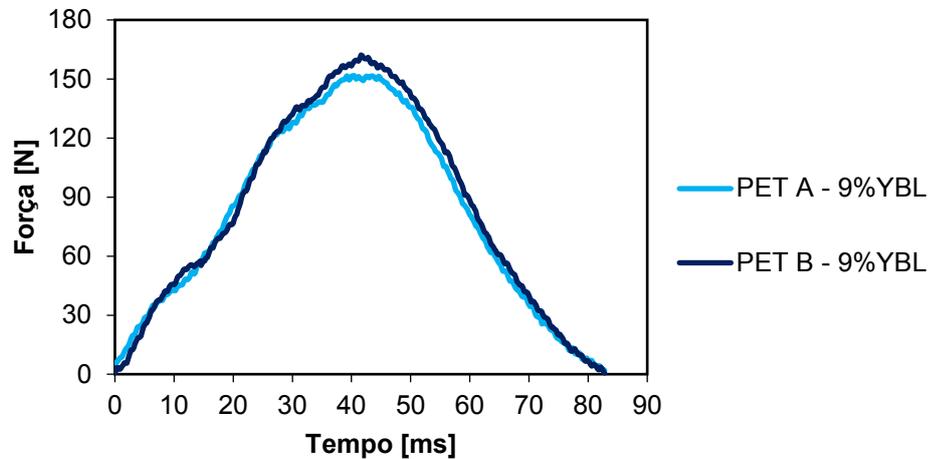
Analisando a Fig. 16, é observado que os multifilamentos PET A, PET B e PET C produziram forças de impacto, respectivamente iguais a 103 N, 112 N e 189 N ao longo dos multifilamentos, ou seja, equivalentes a 10,39, 10,87 e 11,75 vezes às forças peso das massas, como mostrado na Tab. 5.

Tabela 5–Comparação da força de impacto com a força peso produzida pela massa igual a 6%YBL

| Poliéster | Força máxima de impacto[N] | Força peso [N] | Força de impacto / Força peso |
|------------------|-----------------------------------|-----------------------|--------------------------------------|
| A | 103 | 9,91 | 10,39 |
| B | 112 | 10,30 | 10,87 |
| C | 189 | 16,09 | 11,75 |

A seguir, na Fig. 17, são apresentadas as curvas das forças versus tempo para os poliésteres A e B devido ao lançamento em queda livre de uma massa equivalente a 9%YBL. Ressalta-se que uma massa de 9% do YBL dos multifilamentos de poliéster A e B, são respectivamente iguais a, 1,52kg e 1,57kg. Quanto à curva para poliéster produzido pelo fabricante C, ela foi apresentada anteriormente na Fig. 15, pois uma massa de 9%YBL é suficiente para causar a falha deste material.

Figura 17 - Curva da força de impacto versus tempo para os materiais, PET A e PET B, devido ao lançamento em queda livre de uma massa igual a 9%YBL



Na Fig. 17, é observado que os materiais PET A e PET B transmitiram forças máximas de impacto, respectivamente iguais a 151 N e 162 N ao longo dos multifilamentos, ou seja, equivalentes a 10,14 e 10,52 vezes às forças peso das massas.

A seguir, nas figuras 18 e 19 são mostradas 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, calculadas a partir das Eqs. (8), (13), também são apresentadas.

Figura 18 –Parâmetros físicos medidos e calculados para uma massa igual a 6%YBL

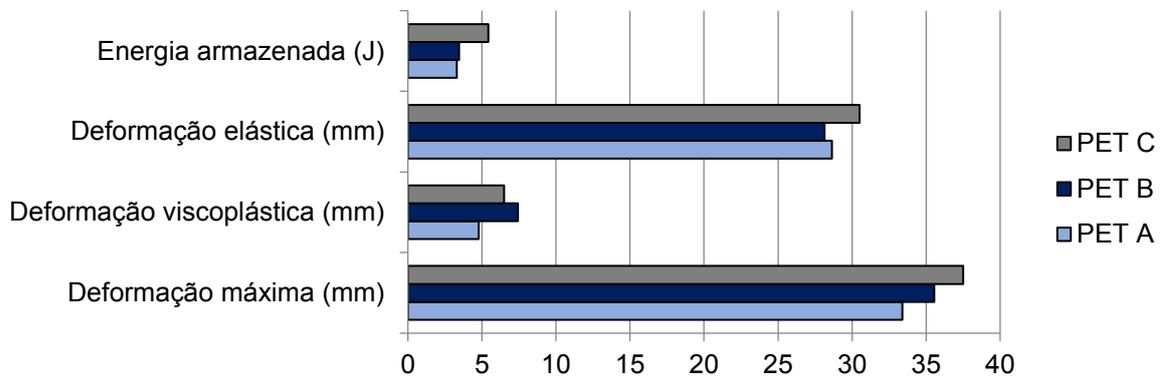
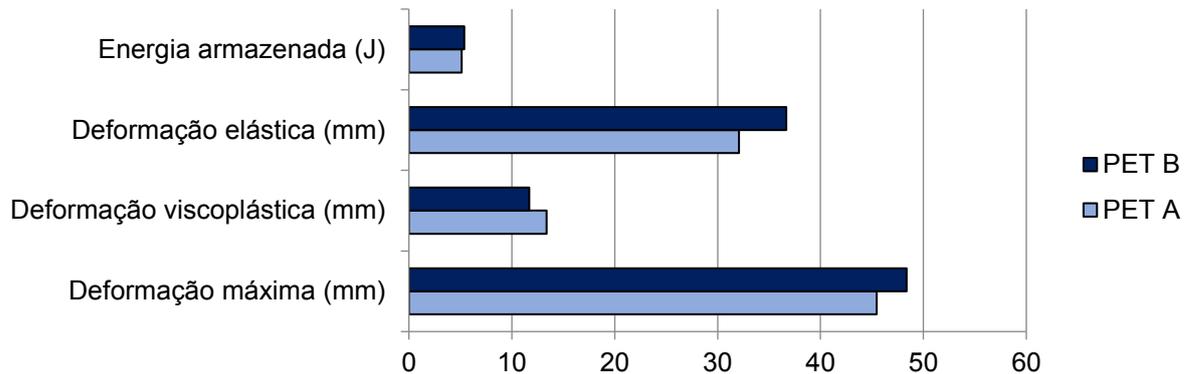


Figura 19 – Parâmetros físicos medidos e calculados para uma massa igual a 9%YBL



Como abordado na seção 2.1, é sabido que a energia armazenada pelo multifilamentos de poliéster é calculada pela Eq. 13, e consequentemente diretamente proporcional à massa e à deformação máxima do material, logo, analisando a energia armazenada pelos multifilamentos de poliéster nos testes de impacto utilizando uma massa igual 6%YBL (Fig. 18) é observado que o poliéster C armazenou a maior quantidade de energia durante o carregamento súbito em função da maior massa (1,64 kg) lançada em queda livre em relação às demais, e também pelo fato deste multifilamento sofrer a maior deformação máxima, como mostrado na Fig. 18.

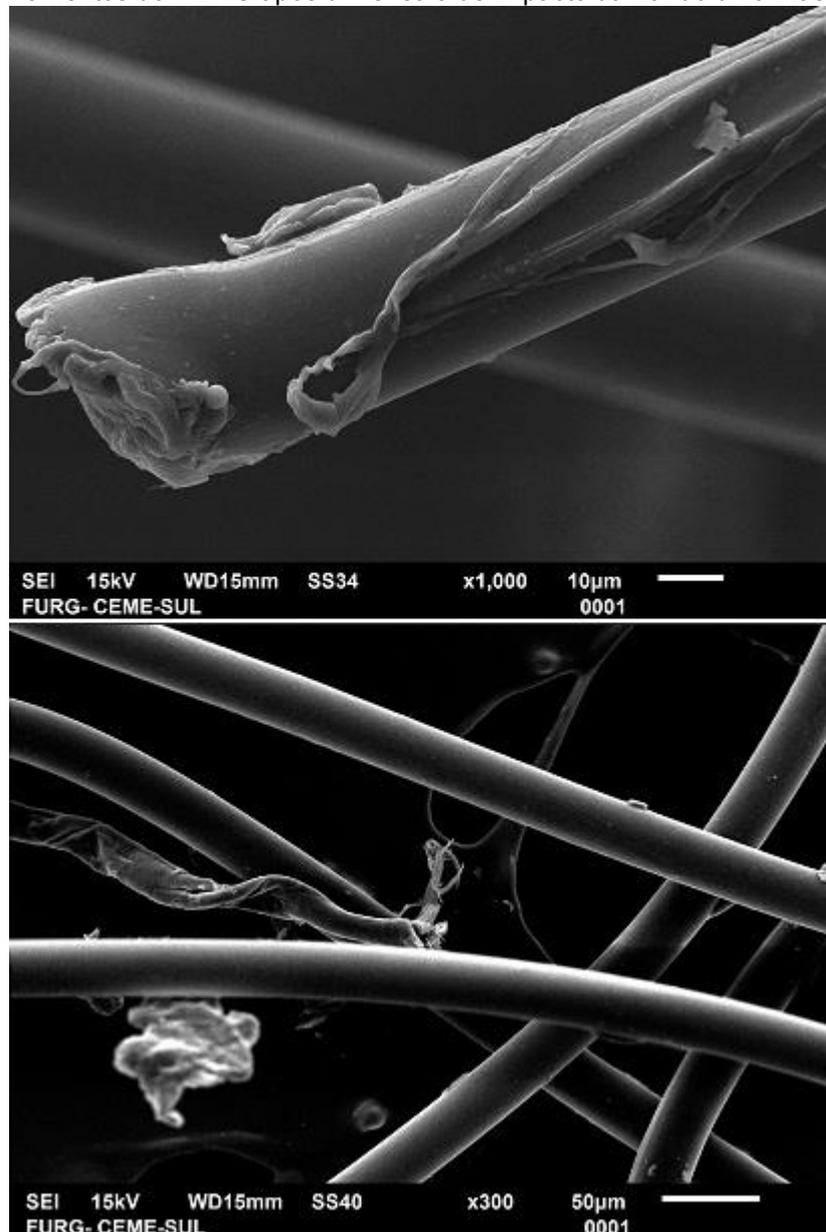
A respeito da componente elástica, é verificada na Fig.18 uma maior elasticidade do material C. No entanto, na seção 2.1 foi abordado que ela é indesejável para o cabo visto que é responsável por impulsionar a massa na direção vertical oposta após o cabo atingir sua deformação máxima, expondo a massa a uma considerável aceleração.

Quanto aos parâmetros medidos e calculados (Fig. 19) para os poliésteres utilizando uma massa igual a 9%YBL nos testes de impacto, são encontrados maiores valores de energia armazenada e deformação elástica para o material B.

Por último, os multifilamentos de poliéster A, B e C são analisados no Microscópio Eletrônico de Varredura após serem submetidos a um teste de impacto. Logo, não foram encontradas alterações na morfologia dos filamentos dos materiais A, B e C submetidos a uma carga de impacto utilizando uma massa de 6%YBL. Quanto aos PETs submetidos a um ensaio de impacto utilizando uma massa de 9%YBL, também não foram encontradas alterações na morfologia dos filamentos dos materiais A e B. Quanto aos multifilamentos de poliéster C rompidos nos ensaios de

impacto utilizando uma massa de 9% YBL, são mostrados alguns filamentos fraturados na Fig. 20.

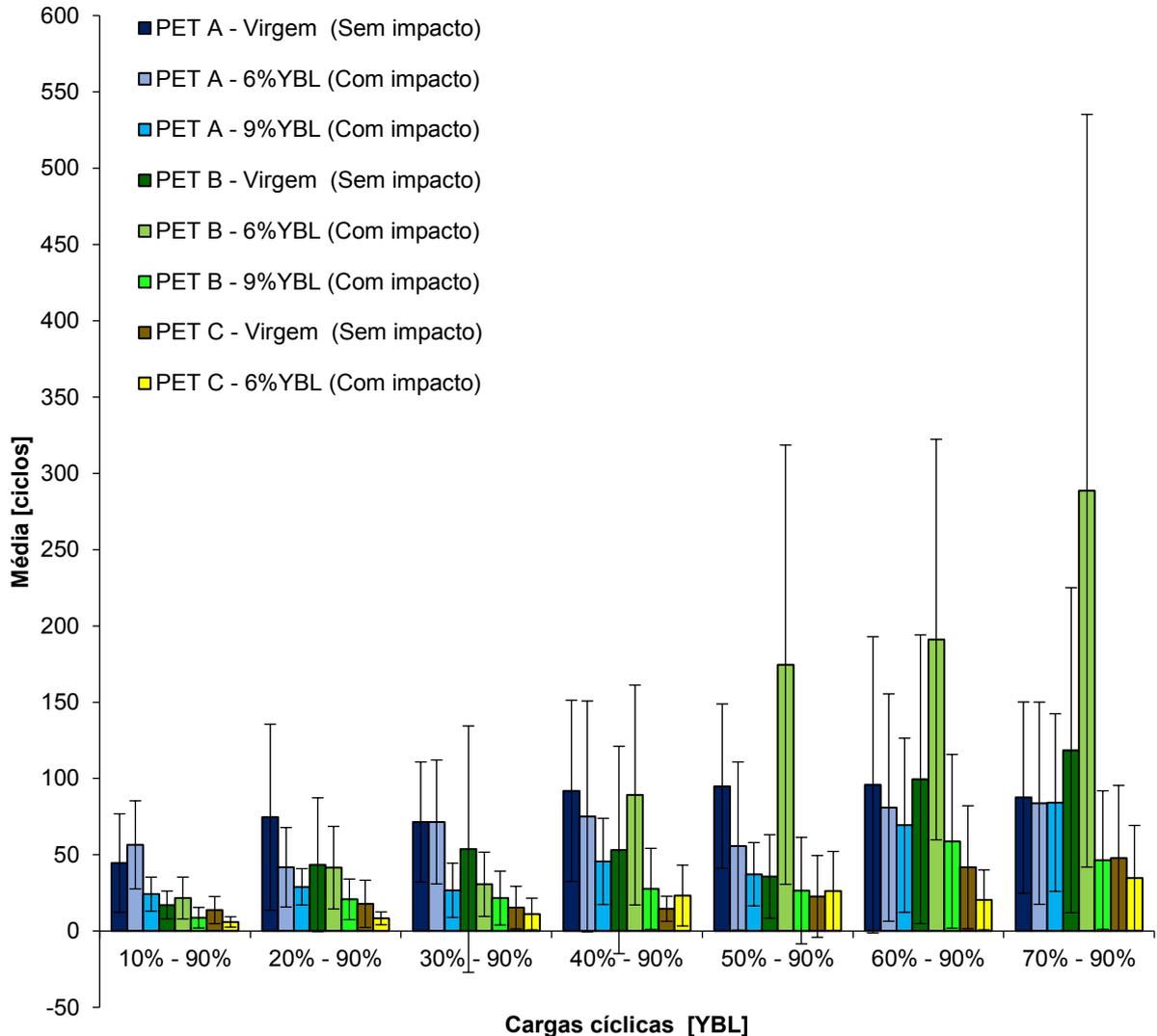
Figura 20 – Filamentos do PET C após um ensaio de impacto utilizando uma massa de 9%YBL



4.3 Análise da resistência à fadiga dos materiais virgens e previamente submetidos a um teste de impacto

Primeiramente, os dados coletados em experimentos serão representados por meio de medidas descritivas, tais como média (Fig. 21) e desvio padrão, na tentativa obter algumas conclusões.

Figura 21 – Diagramas da média do número de ciclos até a ruptura em cada faixa de carregamento



Comparando através da Fig. 21 as amostras virgens e as amostras submetidas previamente a um teste de impacto utilizando uma massa igual a 9%YBL é observado que em todas as faixas de carregamento tanto para PET A quanto para PET B houve reduções da vida em fadiga dos materiais. Podemos explicar a diminuição da vida útil desses materiais pelas elevadas forças de impacto (Fig. 17) transmitidas ao longo dos multifilamentos durante os testes de impacto que em alguns casos causavam a ruptura de alguns filamentos.

Comparando as amostras do material A virgens e submetidas previamente a um teste de impacto utilizando uma massa igual a 6%YBL, não é possível observar uma redução tão significativa da vida em fadiga como a que ocorreu para o teste de impacto utilizando uma massa igual a 9%YBL.

Com relação às amostras do material B, virgens e submetidas previamente a um teste de impacto utilizando uma massa igual a 6%YBL, é observado na Fig. 21 que a partir do intervalo de carregamento de 40% a 90% do YBL os valores das medidas descritivas, média e desvio padrão, das amostras submetidas ao teste de impacto são demasiadamente elevados, logo, é sugerido que esse acontecimento é decorrência da heterogeneidade do poliéster, sugerindo que sejam ensaiadas novas amostras de multifilamentos do poliéster B nestas faixas de carregamento.

Por fim, é analisado o comportamento mecânico das amostras do material C através da Fig. 21. Então, é possível observar que nos intervalos de carregamento de 10%YBL a 90%YBL, 20%YBL a 90%YBL, 30%YBL a 90%YBL, 60%YBL a 90%YBL e 70%YBL a 90%YBL houve reduções da vida em fadiga quando os multifilamentos foram submetidos previamente a um ensaio de impacto.

A seguir, as curvas de tendências relacionando a amplitude de carregamento com o logaritmo médio do número de ciclos até a falha para os diferentes materiais são apresentadas.

Figura 22 – Curva do logaritmo do número de ciclos até a falha versus amplitude de carregamento para diferentes amostras de PET A: virgens e previamente submetidas a um teste de impacto

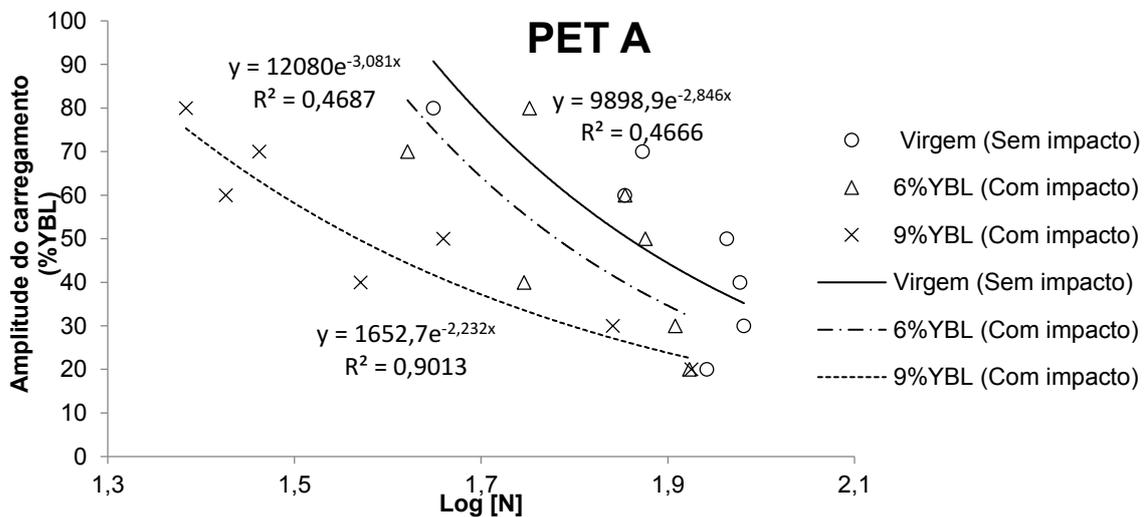


Figura 23 – Curva do logaritmo do número de ciclos até a falha versus amplitude de carregamento para diferentes amostras de PET B: virgens e previamente submetidas a um teste de impacto

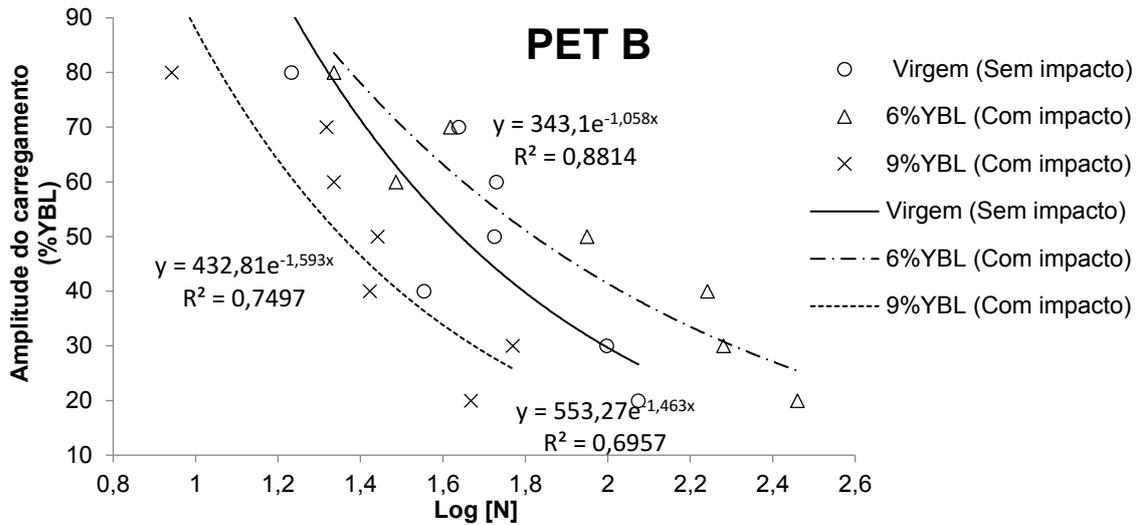
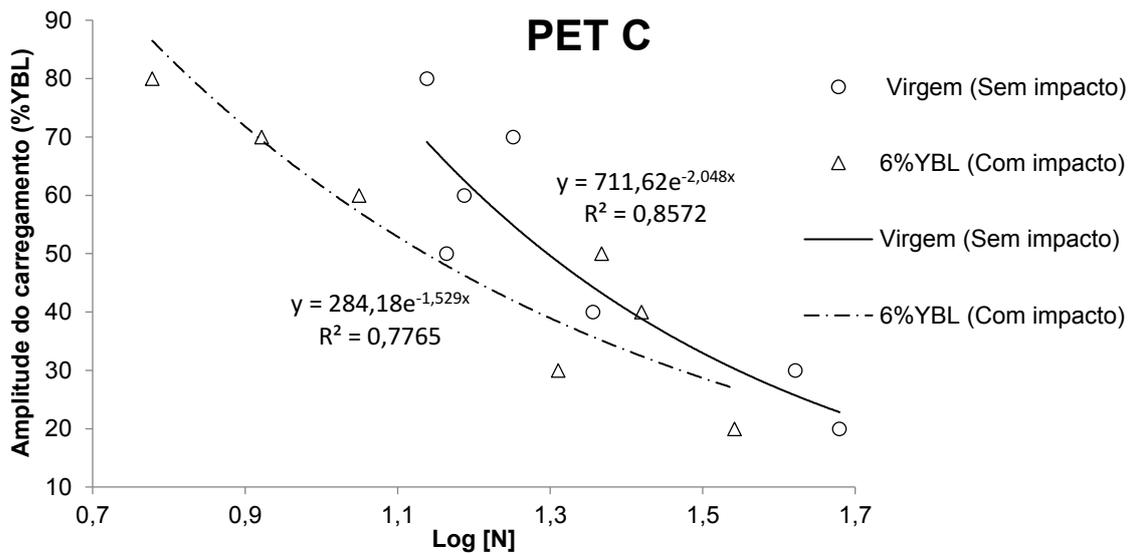


Figura 24 – Curva do logaritmo do número de ciclos até a falha versus amplitude de carregamento para diferentes amostras de PET B: virgens e previamente submetidas a um teste de impacto



Nas figuras 22, 23 e 24 é observado que os multifilamentos ensaiados (A, B e C) tanto virgens quanto previamente danificados em um teste de impacto apresentam tendências de aumentar a resistência à fadiga à medida que as amplitudes de carregamento em fadiga diminuem.

A seguir é aplicada uma análise de variância, abordada na seção 3.4, em cada intervalo de carregamento cíclico (10% a 90% de YBL, 20% a 90% de YBL, 30% a 90% de YBL, 40% a 90% de YBL, 50% a 90% de YBL, 60% a 90% de YBL e 70% a 90% de YBL) para investigar os efeitos dos fatores, material e carga de impacto, na vida em fadiga dos diferentes poliésteres visto que na presença de valores

discrepantes as médias e os desvios padrão podem fornecer conclusões precipitadas a respeito do conjunto de dados.

a) 10% a 90% de YBL

Na seção 3.4 foi mostrada na Tab. 1 uma maneira de representar os dados coletados nos ensaios de fadiga. Logo, são mostrados na Tab. 6 os dados coletados (número de ciclos até a ruptura) nos ensaios de fadiga utilizando os limites de carregamento de 10% a 90% de YBL para os PETs, virgem, submetidos previamente a uma carga de impacto utilizando uma massa de 6%YBL e uma massa de 9%YBL.

Tabela 6 –Número de ciclos até a ruptura coletados nos ensaios de fadiga utilizando os limites de carregamento de 10% a 90% de YBL

| | | Fator B – Carga de impacto | | | | | | | | | | | |
|--------------------|-------|----------------------------|----|----|----|-------|-----|-----|----|-------|----|----|----|
| | | Virgem | | | | 6%YBL | | | | 9%YBL | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| Fator A – Material | PET A | 25 | 47 | 42 | 22 | 14 | 94 | 112 | 20 | 22 | 16 | 28 | 24 |
| | | 18 | 44 | 32 | 38 | 23 | 56 | 47 | 49 | 34 | 44 | 28 | 57 |
| | | 17 | 61 | 24 | 13 | 12 | 109 | 68 | 63 | 33 | 15 | 21 | 18 |
| | | 35 | 30 | 36 | 49 | 42 | 49 | 50 | 79 | 15 | 23 | 15 | 19 |
| | | 27 | 25 | 15 | 31 | 77 | 53 | 76 | 37 | 14 | 21 | 11 | 26 |
| | PET B | 24 | 7 | 19 | 27 | 24 | 2 | 3 | 11 | 2 | 5 | 3 | 5 |
| | | 12 | 18 | 33 | 9 | 9 | 18 | 13 | 24 | 3 | 11 | 7 | 8 |
| | | 14 | 20 | 7 | 18 | 14 | 31 | 43 | 26 | 4 | 25 | 12 | 15 |
| | | 30 | 25 | 2 | 14 | 22 | 23 | 22 | 30 | 2 | 3 | 11 | 9 |
| | | 20 | 29 | 2 | 12 | 9 | 39 | 13 | 57 | 3 | 7 | 19 | 21 |
| | PET C | 16 | 36 | 9 | 21 | 7 | 6 | 4 | 5 | - | - | - | - |
| | | 3 | 7 | 5 | 8 | 8 | 4 | 9 | 8 | - | - | - | - |
| | | 9 | 12 | 27 | 8 | 6 | 3 | 10 | 5 | - | - | - | - |
| | | 16 | 28 | 13 | 11 | 3 | 2 | 2 | 11 | - | - | - | - |
| | | 9 | 23 | 5 | 9 | 15 | 2 | 4 | 6 | - | - | - | - |

Nota-se na Tab. 6 que cada número mostrado é equivalente à vida útil (ciclos) de cada multifilamento de poliéster no ensaio de fadiga utilizando os limites de carregamento de 10% a 90% de YBL. Além disso, os dados do número de ciclos até a ruptura para o poliéster C submetido a uma carga de impacto utilizando uma massa

de 9%YBL não são apresentados visto que os multifilamentos rompem nos testes de impacto.

Continuando, foi abordado na seção 3.4 que algumas premissas devem ser satisfeitas preliminarmente à aplicação da análise de variância, tais como, as variâncias populacionais das amostras (Tab. 6) devem ser homogêneas e os erros experimentais (Tab. 6) devem ter distribuição normal.

A condição de homogeneidade das variâncias populacionais das amostras (Tab. 6) não foi satisfeita pelo teste Levene (abordado na seção 3.4), sendo encontrado um p-value $\leq 0,01\%$. Portanto, foi efetuada a transformação matemática do número de ciclos até a ruptura para a escala logarítmica e em seguida este teste é feito. Então, é verificada a hipótese da igualdade de variâncias (Tab. 7) visto que p-value $\geq 1\%$. A seguir, a condição de normalidade dos erros experimentais também é investigada. Como também mostrado na Tab. 7, o teste de Shapiro-Wilk atesta que a distribuição dos erros tem forma normal, ou seja, p-value $\geq 1\%$. Então, os dados experimentais são validados.

Tabela 7 - Teste de homogeneidade de variâncias populacionais e teste de normalidade dos erros experimentais

| Teste | p-value |
|-----------------------------|----------------|
| Homogeneidade de variâncias | 20,4% |
| Normalidade dos erros | 1,5% |

Visto que as premissas abordadas na seção 3.4 foram satisfeitas, é aplicada a análise de variância no conjunto de dados (Tab. 6) transformados na escala logarítmica para estudar os efeitos dos fatores, material e carga de impacto, no número de ciclos até a ruptura, e também a interação entre os fatores. Então, efetuando os três testes estatísticos são encontrados os seguintes p-value (Tab. 8).

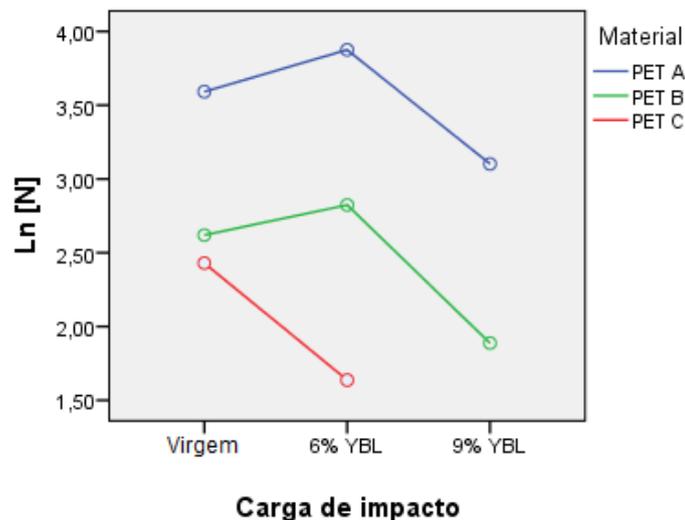
Tabela 8 – p-value

| p-value | |
|------------------|--------|
| Material | <0,01% |
| Carga de impacto | <0,01% |
| Interação | 0,14% |

Analisando a Tab. 8, são encontradas evidências de que o material e a carga de impacto influenciam nas vidas em fadiga dos multifilamentos de poliéster visto que p-value é menor que 1%, e também que existe interação entre os fatores, material e carga de impacto, pois p-value é menor que 1%.

Como abordado na seção 3.4, na presença de interação, o teste de Tukey responsável por comparar as médias das vidas em fadiga entre os três materiais submetidos a diferentes cargas de impacto pode produzir resultados não verdadeiros, portanto, é utilizado para a correta interpretação dos resultados um diagrama relacionando o logaritmo natural das médias da vida útil em fadiga dos três materiais com as diferentes cargas de impacto (Fig. 25). Nesta figura, os círculos representam a média do número de ciclos até a ruptura na escala logarítmica para os PETs, virgem, submetidos a uma carga de impacto prévia utilizando uma massa de 6%YBL e uma massa de 9%YBL.

Figura 25 – Diagrama do logaritmo natural das médias da vida útil em fadiga versus os três materiais submetidos às diferentes cargas de impacto para os limites de carregamento de 10% a 90% de YBL



Analisando a Fig. 25, são encontradas evidências de que PET A apresenta uma maior resistência à fadiga enquanto o material C suporta um menor número de ciclos até a ruptura, e também que os materiais PET A e PET B sofreram uma redução da vida em fadiga quando submetidos a um teste de impacto utilizando uma massa igual a 9%YBL.

Além disso, é observado na Fig. 25 que um teste de impacto utilizando uma massa igual a 6%YBL reduziu apenas a vida em fadiga do material C. Ressalta-se que os diferentes comportamentos mecânicos dos materiais submetidos a um teste

de impacto utilizando uma massa igual a 6%YBL justificam a presença do efeito de interação entre os fatores.

b) 20% a 90% de YBL

Na sequência, são mostrados na Tab. 9 os dados coletados (número de ciclos até a ruptura) nos ensaios de fadiga utilizando os limites de carregamento de 20% a 90% de YBL para os PETs, virgem, submetidos previamente a uma carga de impacto utilizando uma massa de 6%YBL e uma massa de 9%YBL. Ressalta-se que o procedimento estatístico é realizado da mesma maneira que no item a (10% a 90% de YBL).

Tabela 9 – Número de ciclos até a ruptura para as diferentes amostras utilizando os limites de carregamento de 20% a 90% de YBL

| | | Fator B – Carga de impacto | | | | | | | | | | | |
|--------------------|-------|----------------------------|-----|-----|-----|-------|-----|----|----|-------|----|----|----|
| | | Virgem | | | | 6%YBL | | | | 9%YBL | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| Fator A – Material | PET A | 91 | 72 | 248 | 121 | 17 | 20 | 29 | 34 | 38 | 47 | 27 | 31 |
| | | 61 | 20 | 117 | 32 | 29 | 25 | 30 | 76 | 12 | 27 | 26 | 8 |
| | | 119 | 120 | 12 | 32 | 40 | 61 | 79 | 9 | 30 | 41 | 36 | 33 |
| | | 39 | 21 | 10 | 38 | 29 | 104 | 42 | 24 | 32 | 16 | 46 | 6 |
| | | 124 | 30 | 151 | 35 | 32 | 77 | 14 | 65 | 29 | 32 | 44 | 19 |
| | PET B | 7 | 46 | 23 | 35 | 35 | 11 | 40 | 14 | 39 | 20 | 25 | 58 |
| | | 25 | 28 | 54 | 23 | 24 | 108 | 20 | 46 | 17 | 11 | 17 | 13 |
| | | 4 | 26 | 41 | 55 | 24 | 37 | 49 | 38 | 30 | 12 | 13 | 9 |
| | | 70 | 86 | 4 | 6 | 70 | 81 | 86 | 7 | 13 | 10 | 28 | 18 |
| | | 5 | 151 | 156 | 25 | 61 | 26 | 25 | 29 | 11 | 26 | 4 | 42 |
| | PET C | 13 | 7 | 9 | 19 | 8 | 9 | 12 | 5 | - | - | - | - |
| | | 7 | 75 | 13 | 8 | 3 | 2 | 9 | 12 | - | - | - | - |
| | | 8 | 22 | 19 | 4 | 11 | 7 | 7 | 8 | - | - | - | - |
| | | 16 | 18 | 9 | 15 | 16 | 15 | 11 | 8 | - | - | - | - |
| | | 10 | 28 | 24 | 33 | 2 | 5 | 14 | 3 | - | - | - | - |

A seguir, são apresentados na Tab. 10, para o conjunto de dados (Tab. 9) transformados na escala logarítmica, os resultados do teste de homogeneidade das variâncias, teste de normalidade dos erros e dos três testes estatísticos efetuados na análise de variância.

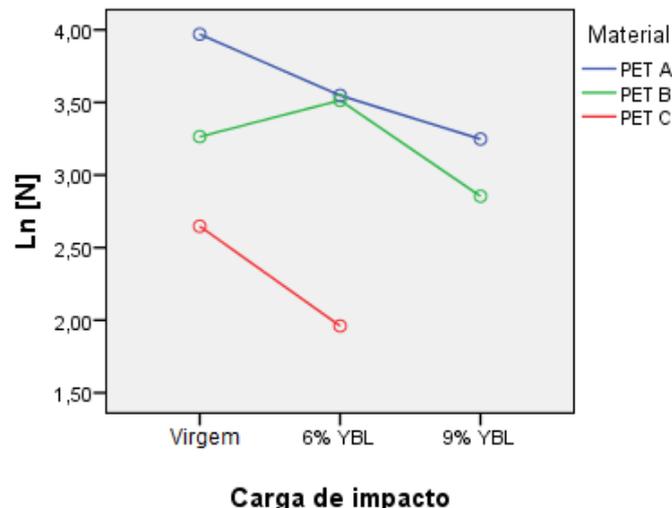
Tabela 10 – Testes realizados nos dados experimentais obtidos em ensaios de fadiga utilizando os limites de carregamento de 20% a 90% de YBL

| Teste | p-value |
|-----------------------------|---------|
| Homogeneidade de variâncias | 2,55% |
| Normalidade dos erros | 5,12% |
| Material | < 0,01% |
| Carga de impacto | 0,03% |
| Interação | 4,51% |

Na tabela 10 é verificada a homogeneidade das variâncias populacionais e a forma normal da distribuição dos erros. Além disso, na Tab. 10, são encontradas evidências de que o material e a carga de impacto influenciam nas vidas em fadiga dos multifilamentos de poliéster, e também que existe interação entre os fatores.

Em virtude da existência de interação é apresentado um diagrama relacionando o logaritmo natural das médias da vida útil em fadiga dos três materiais submetidos às diferentes cargas de impacto (Fig. 26).

Figura 26 – Diagrama do logaritmo natural das médias da vida útil em fadiga versus os três materiais submetidos às diferentes cargas de impacto para os limites de carregamento de 20% a 90% de YBL



Fonte: Elaborado pelo autor

Analisando a Fig. 26, são encontradas evidências de que novamente o PET A apresenta uma maior resistência à fadiga na faixa de carregamento estudada, seguido dos materiais B e C. Além disso, é verificado novamente que PET A e PET B sofreram uma significativa redução da vida em fadiga quando submetidos a um teste de impacto utilizando uma massa igual a 9%YBL.

Por fim, analisando a Fig. 26, é verificado o efeito de uma carga de impacto devido à queda livre de uma massa igual a 6%YBL na resistência à fadiga do material C. Em relação ao material A houve uma pequena redução da média do número de ciclos até a ruptura.

c) 30% a 90% de YBL

Na sequência, são mostrados na Tab. 11 os dados coletados (número de ciclos até a ruptura) nos ensaios de fadiga utilizando os limites de carregamento de 30% a 90% de YBL.

Tabela 11 – Número de ciclos até a ruptura para as diferentes amostras utilizando os limites de carregamento de 30% a 90% de YBL

| | | Fator B – Carga de impacto | | | | | | | | | | | |
|--------------------|----------|----------------------------|-----|-----|-----|-------|-----|-----|----|-------|----|----|----|
| | | Virgem | | | | 6%YBL | | | | 9%YBL | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| Fator A – Material | PET A | 92 | 49 | 111 | 121 | 5 | 124 | 97 | 69 | 66 | 10 | 37 | 9 |
| | | 22 | 97 | 139 | 94 | 15 | 78 | 74 | 23 | 28 | 24 | 29 | 41 |
| | | 90 | 101 | 74 | 47 | 29 | 63 | 94 | 61 | 38 | 50 | 8 | 3 |
| | | 20 | 125 | 17 | 63 | 48 | 45 | 75 | 70 | 36 | 12 | 25 | 4 |
| | | 70 | 37 | 4 | 56 | 116 | 179 | 96 | 69 | 54 | 7 | 29 | 24 |
| | PET B | 29 | 16 | 15 | 7 | 33 | 49 | 4 | 3 | 7 | 5 | 16 | 7 |
| | | 24 | 64 | 20 | 23 | 11 | 51 | 101 | 28 | 55 | 2 | 30 | 8 |
| | | 21 | 8 | 6 | 14 | 38 | 26 | 26 | 21 | 42 | 9 | 14 | 16 |
| | | 60 | 14 | 62 | 202 | 23 | 39 | 36 | 31 | 70 | 12 | 28 | 11 |
| | | 37 | 23 | 340 | 89 | 31 | 22 | 10 | 30 | 19 | 24 | 24 | 34 |
| | PET C | 7 | 13 | 12 | 9 | 17 | 32 | 4 | 19 | - | - | - | - |
| | | 3 | 4 | 4 | 20 | 2 | 4 | 3 | 8 | - | - | - | - |
| | | 5 | 29 | 22 | 65 | 17 | 3 | 5 | 27 | - | - | - | - |
| | | 6 | 24 | 15 | 13 | 2 | 2 | 6 | 2 | - | - | - | - |
| | | 4 | 15 | 18 | 20 | 2 | 17 | 22 | 30 | - | - | - | - |

A seguir, são apresentados na Tab. 12, para o conjunto de dados (Tab. 11) transformados na escala logarítmica, os resultados do teste de homogeneidade das variâncias, teste de normalidade dos erros e dos três testes estatísticos efetuados na análise de variância.

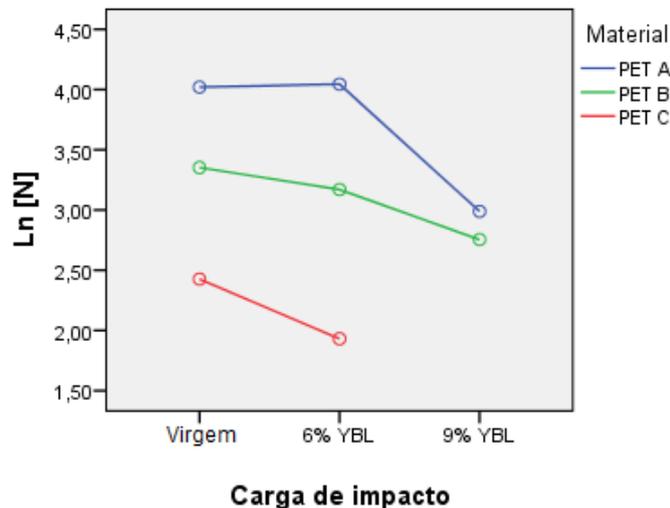
Tabela 12 – Testes realizados nos dados experimentais obtidos em ensaios de fadiga utilizando os limites de carregamento de 30% a 90% de YBL

| Teste | p-value |
|-----------------------------|---------|
| Homogeneidade de variâncias | 35,96% |
| Normalidade dos erros | 7,26% |
| Material | < 0,01% |
| Carga de impacto | < 0,01% |
| Interação | 26,22% |

Na tabela 12 é verificada a homogeneidade das variâncias populacionais e a forma normal da distribuição dos erros. Além disso, na Tab. 12, são encontradas evidências de que o material e a carga de impacto influenciam nas vidas em fadiga dos multifilamentos de poliéster, e também que existe interação entre os fatores.

Em virtude da existência de interação, é apresentado um diagrama relacionando o logaritmo natural das médias da vida útil em fadiga dos três materiais com as diferentes cargas de impacto (Fig. 27).

Figura 27 – Diagrama do logaritmo natural das médias da vida útil em fadiga versus os três materiais submetidos às diferentes cargas de impacto para os limites de carregamento de 30% a 90% de YBL



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Fig. 27 é mostrado evidências de que novamente o PET A apresenta uma maior resistência à fadiga na faixa de carregamento estudada, seguido dos materiais B e C. Além disso, é mostrado novamente que PET A e PET B sofreram uma significativa redução da vida em fadiga quando submetidos a um teste de impacto utilizando uma massa igual a 9%YBL.

Por fim, analisando a Fig. 27 a influência de uma carga de impacto devido à queda livre de uma massa igual a 6%YBL na resistência à fadiga dos materiais, é observado uma diminuição significativa do número de ciclos até a ruptura para os materiais C e B.

d) 40% a 90% de YBL

Na sequência, os resultados obtidos em fadiga para os limites de carregamento de 40% a 90% de YBL são apresentados na Tab. 13.

Tabela 13 - Número de ciclos até a ruptura para as diferentes amostras utilizando os limites de carregamento de 40% a 90% de YBL

| | | Fator B – Carga de impacto | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|--------------|-----------------------------------|-----|-----|-----|--------------|-----|-----|-----|--------------|----|----|-----|
| | | Virgem | | | | 6%YBL | | | | 9%YBL | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| Fator A – Material | PET A | 130 | 114 | 137 | 84 | 65 | 90 | 117 | 82 | 38 | 18 | 18 | 53 |
| | | 26 | 227 | 24 | 168 | 71 | 10 | 42 | 33 | 67 | 23 | 54 | 54 |
| | | 63 | 20 | 79 | 20 | 83 | 17 | 88 | 45 | 19 | 45 | 61 | 28 |
| | | 64 | 123 | 60 | 126 | 363 | 117 | 81 | 29 | 25 | 64 | 62 | 22 |
| | | 82 | 68 | 30 | 193 | 38 | 95 | 21 | 16 | 18 | 89 | 28 | 127 |
| | PET B | 10 | 2 | 2 | 11 | 143 | 139 | 114 | 45 | 42 | 15 | 7 | 22 |
| | | 43 | 47 | 37 | 36 | 151 | 125 | 259 | 58 | 4 | 11 | 36 | 6 |
| | | 32 | 49 | 13 | 63 | 73 | 173 | 182 | 139 | 24 | 6 | 10 | 14 |
| | | 200 | 224 | 192 | 12 | 34 | 2 | 22 | 19 | 41 | 95 | 24 | 5 |
| | | 6 | 37 | 17 | 30 | 20 | 18 | 59 | 8 | 4 | 39 | 73 | 75 |
| | PET C | 15 | 15 | 4 | 2 | 19 | 24 | 36 | 85 | - | - | - | - |
| | | 10 | 4 | 25 | 20 | 16 | 16 | 2 | 29 | - | - | - | - |
| | | 14 | 22 | 18 | 27 | 6 | 28 | 14 | 6 | - | - | - | - |
| | | 8 | 12 | 22 | 24 | 12 | 24 | 6 | 42 | - | - | - | - |
| | | 8 | 6 | 28 | 8 | 58 | 11 | 19 | 13 | - | - | - | - |

A seguir, são apresentados na Tab. 14, para o conjunto de dados (Tab. 13) transformados na escala logarítmica, os resultados do teste de homogeneidade das variâncias, teste de normalidade dos erros e dos três testes estatísticos efetuados na análise de variância.

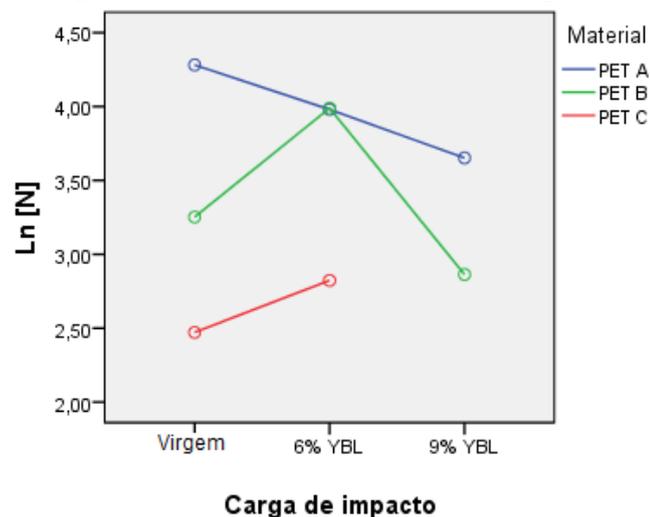
Tabela 14 – Testes realizados nos dados experimentais obtidos em ensaios de fadiga utilizando os limites de carregamento de 40% a 90% de YBL

| Teste | p-value |
|-----------------------------|---------|
| Homogeneidade de variâncias | 1,88% |
| Normalidade dos erros | 2,47% |
| Material | < 0,01% |
| Carga de impacto | 0,16% |
| Interação | 8,94% |

Na tabela 14 é verificada a homogeneidade das variâncias populacionais e a forma normal da distribuição dos erros. Além disso, na Tab. 14, são encontradas evidências de que o material e a carga de impacto influenciam nas vidas em fadiga dos multifilamentos de poliéster, e também que existe interação entre os fatores.

Em virtude da existência de interação, é apresentado um diagrama relacionando o logaritmo natural das médias da vida útil em fadiga dos três materiais com as diferentes cargas de impacto (Fig. 28).

Figura 28 – Diagrama do logaritmo natural das médias da vida útil em fadiga versus os três materiais submetidos às diferentes cargas de impacto para os limites de carregamento de 40% YBL a 90%YBL



Na figura 27 é observado que existem evidências de que novamente o PET A apresenta uma maior resistência à fadiga na faixa de carregamento estudada, seguido dos materiais B e C. Além disso, é verificado novamente que PET A e PET B sofreram uma significativa redução da vida em fadiga quando submetidos a um teste de impacto utilizando uma massa igual a 9%YBL.

A seguir, analisando a Fig. 27 o efeito de uma carga de impacto devido à queda livre de uma massa igual a 6%YBL na resistência à fadiga dos multifilamentos de poliéster, não é observado uma diminuição do número de ciclos até a ruptura para os materiais B e C. Em relação ao material A houve uma pequena redução da média do número de ciclos até a ruptura.

e) 50% a 90% de YBL

Na sequência, os resultados obtidos em fadiga para os limites de carregamento de 50% a 90% de YBL são apresentados na Tab. 15.

Tabela 15 - Número de ciclos até a ruptura para as diferentes amostras utilizando os limites de carregamento de 50% a 90% de YBL

| | | Fator B – Carga de impacto | | | | | | | | | | | |
|--------------------|----------|----------------------------|-----|-----|-----|-------|-----|-----|-----|-------|----|----|-----|
| | | Virgem | | | | 6%YBL | | | | 9%YBL | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| Fator A – Material | PET A | 166 | 71 | 111 | 31 | 11 | 17 | 34 | 31 | 67 | 59 | 30 | 44 |
| | | 173 | 94 | 71 | 124 | 44 | 81 | 36 | 66 | 21 | 84 | 75 | 20 |
| | | 81 | 112 | 65 | 42 | 15 | 34 | 66 | 40 | 37 | 33 | 16 | 47 |
| | | 179 | 45 | 36 | 90 | 36 | 37 | 31 | 34 | 8 | 32 | 18 | 22 |
| | | 51 | 43 | 93 | 221 | 37 | 107 | 263 | 95 | 17 | 46 | 33 | 36 |
| | PET B | 9 | 34 | 69 | 29 | 122 | 111 | 123 | 306 | 21 | 12 | 15 | 13 |
| | | 8 | 41 | 12 | 35 | 46 | 480 | 287 | 27 | 9 | 21 | 14 | 18 |
| | | 23 | 114 | 25 | 62 | 131 | 36 | 287 | 6 | 5 | 21 | 23 | 162 |
| | | 2 | 21 | 18 | 66 | 228 | 400 | 292 | 93 | 10 | 14 | 17 | 26 |
| | | 67 | 36 | 20 | 25 | 35 | 55 | 371 | 56 | 8 | 72 | 35 | 14 |
| | PET C | 6 | 2 | 23 | 5 | 15 | 71 | 90 | 20 | - | - | - | - |
| | | 15 | 15 | 10 | 21 | 76 | 8 | 29 | 55 | - | - | - | - |
| | | 7 | 9 | 27 | 13 | 6 | 24 | 28 | 14 | - | - | - | - |
| | | 8 | 12 | 22 | 24 | 12 | 24 | 6 | 42 | - | - | - | - |
| | | 8 | 6 | 28 | 8 | 58 | 11 | 19 | 13 | - | - | - | - |

A seguir, são apresentados na Tab. 16, para o conjunto de dados (Tab. 15) transformados na escala logarítmica, os resultados do teste de homogeneidade das variâncias, teste de normalidade dos erros e dos três testes estatísticos efetuados na análise de variância.

Tabela 16 – Testes realizados nos dados experimentais obtidos em ensaios de fadiga utilizando os limites de carregamento de 50% a 90% de YBL

| Teste | p-value |
|-----------------------------|----------------|
| Homogeneidade de variâncias | 2,81% |
| Normalidade dos erros | 34,65% |
| Material | < 0,01% |
| Carga de impacto | < 0,01% |
| Interação | < 0,01% |

A partir da Tab.16, é verificada a homogeneidade das variâncias populacionais, a forma normal da distribuição dos erros e a existência de influência, do material e da carga de impacto, na vida em fadiga dos multifilamentos de poliéster visto que p-value é menor que 1%. Além disso, na Tab. 16, não é observada a presença interação entre os fatores, logo, serão realizadas diversas comparações através do teste de Tukey que permitem conhecer entre quais materiais e cargas de impacto as médias do número de ciclos até a ruptura são diferentes, como mostrado na Tab. 17.

Tabela 17 – Teste de Tukey

| Fatores | Comparações | p-value |
|------------------|----------------------|----------------|
| Material | PET A versus PET B | 26,89% |
| | PET A versus PET C | < 0,01% |
| | PET B versus PET C | < 0,01% |
| Carga de impacto | 0% YBL versus 6% YBL | 9,22% |
| | 0% YBL versus 9% YBL | 38,41% |
| | 6% YBL versus 9% YBL | 0,46% |

Na tabela 17 são encontradas evidências de que o material C apresenta vida em fadiga menor do que os materiais A e B, visto que p-value é menor que 1%. Além disso, são encontradas evidências de que o número de ciclos até a ruptura para às amostras virgens são iguais as das amostras submetidas a diferentes cargas de impacto, visto que p-value é maior que 1%.

f) 60% a 90% de YBL

Na sequência, os resultados obtidos em fadiga para os limites de carregamento de 60%YBL a 90%YBL (Tab. 18) são apresentados.

Tabela 18 - Número de ciclos até a ruptura para as diferentes amostras utilizando os limites de carregamento de 60% a 90% de YBL

| | | Fator B – Carga de impacto | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|--------------|-----------------------------------|-----|-----|-----|--------------|-----|-----|-----|--------------|-----|-----|-----|
| | | Virgem | | | | 6%YBL | | | | 9%YBL | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| Fator A – Material | PET A | 100 | 51 | 67 | 251 | 30 | 96 | 139 | 21 | 97 | 94 | 85 | 25 |
| | | 8 | 281 | 300 | 106 | 221 | 158 | 54 | 285 | 59 | 74 | 36 | 20 |
| | | 254 | 156 | 29 | 45 | 82 | 100 | 136 | 76 | 87 | 222 | 46 | 200 |
| | | 20 | 34 | 14 | 22 | 53 | 30 | 27 | 6 | 41 | 117 | 32 | 59 |
| | | 59 | 53 | 36 | 31 | 37 | 11 | 23 | 54 | 36 | 13 | 20 | 24 |
| | PET B | 351 | 19 | 86 | 101 | 84 | 37 | 78 | 98 | 36 | 25 | 16 | 7 |
| | | 206 | 26 | 68 | 92 | 128 | 203 | 253 | 97 | 15 | 50 | 17 | 29 |
| | | 42 | 71 | 146 | 290 | 136 | 549 | 184 | 132 | 60 | 11 | 4 | 52 |
| | | 76 | 107 | 193 | 10 | 102 | 127 | 144 | 277 | 113 | 146 | 66 | 130 |
| | | 5 | 47 | 37 | 17 | 116 | 404 | 384 | 288 | 121 | 26 | 215 | 37 |
| | PET C | 118 | 12 | 80 | 18 | 24 | 55 | 6 | 10 | - | - | - | - |
| | | 22 | 3 | 22 | 15 | 10 | 69 | 26 | 14 | - | - | - | - |
| | | 24 | 23 | 67 | 4 | 14 | 5 | 62 | 30 | - | - | - | - |
| | | 2 | 127 | 113 | 29 | 5 | 24 | 8 | 17 | - | - | - | - |
| | | 10 | 25 | 72 | 51 | 9 | 3 | 5 | 13 | - | - | - | - |

A seguir, são apresentados na Tab. 19, para o conjunto de dados (Tab. 18) transformados na escala logarítmica, os resultados do teste de homogeneidade das variâncias, teste de normalidade dos erros e dos três testes estatísticos efetuados na análise de variância.

Tabela 19 – Testes realizados nos dados experimentais obtidos em ensaios de fadiga utilizando os limites de carregamento de 60%YBL a 90%YBL

| Teste | p-value |
|-----------------------------|----------------|
| Homogeneidade de variâncias | 53,10% |
| Normalidade dos erros | 2,05% |
| Material | < 0,01% |
| Carga de impacto | 2,90% |
| Interação | < 0,01% |

A tabela 19 informa que as variâncias populacionais são homogêneas, os erros experimentais apresentam distribuição normal, existe influência apenas do material na vida em fadiga dos multifilamentos de poliéster e que não existe interação entre os fatores. Portanto, serão realizadas diversas comparações através do teste de Tukey, apresentado na seção 3.4, que permite conhecer entre quais poliésteres as médias do número de ciclos até a ruptura são diferentes, como mostrado na Tab. 20.

Tabela 20 – Teste de Tukey

| Fatores | Comparações | p-value |
|----------------|--------------------|----------------|
| Material | PET A versus PET B | 36,59% |
| | PET A versus PET C | < 0,01% |
| | PET B versus PET C | < 0,01% |

Logo, são encontradas evidências na Tab. 20 de que o poliéster C apresenta vida em fadiga menor do que os poliésteres, A e B, visto que p-value é menor que 1% nas comparações, PET A versus PET C e PET B versus PET C. Enquanto isso, é encontrada evidência de que os poliésteres, A e B, apresentam vidas em fadiga iguais visto que na comparação, PET A versus PET B, que p-value é maior que 1%.

g) 70% a 90% de YBL

Na sequência, os resultados obtidos em fadiga para os limites de carregamento de 70%YBL a 90%YBL (Tab. 21) são apresentados.

Tabela 21 - Número de ciclos até a ruptura para as diferentes amostras utilizando os limites de carregamento de 70% a 90% de YBL

| | | Fator B – Carga de impacto | | | | | | | | | | | |
|-------|-----|----------------------------|-------|-----|-----|-------|-----|-----|-----|-------|-----|-----|-----|
| | | Virgem | | | | 6%YBL | | | | 9%YBL | | | |
| | | Fator A – Material | PET A | 64 | 136 | 165 | 108 | 7 | 69 | 84 | 47 | 76 | 61 |
| 100 | 38 | | | 149 | 116 | 247 | 78 | 69 | 153 | 61 | 82 | 51 | 119 |
| 224 | 174 | | | 109 | 11 | 14 | 65 | 92 | 240 | 21 | 12 | 68 | 61 |
| 19 | 38 | | | 32 | 10 | 108 | 63 | 22 | 60 | 160 | 160 | 69 | 243 |
| 83 | 19 | | | 125 | 30 | 129 | 51 | 71 | 7 | 92 | 37 | 34 | 91 |
| PET B | 90 | | 245 | 389 | 77 | 334 | 18 | 213 | 482 | 54 | 20 | 13 | 11 |
| | 269 | | 30 | 47 | 53 | 161 | 489 | 100 | 31 | 4 | 32 | 19 | 7 |
| | 220 | | 34 | 5 | 69 | 169 | 416 | 393 | 67 | 29 | 49 | 101 | 38 |
| | 232 | | 33 | 4 | 177 | 13 | 26 | 421 | 664 | 141 | 157 | 88 | 38 |
| | 92 | | 76 | 192 | 37 | 690 | 813 | 100 | 172 | 2 | 31 | 9 | 88 |
| PET C | 110 | | 40 | 12 | 62 | 3 | 73 | 69 | 15 | - | - | - | - |
| | 50 | | 87 | 30 | 55 | 22 | 28 | 2 | 28 | - | - | - | - |
| | 2 | | 35 | 194 | 104 | 7 | 46 | 5 | 3 | - | - | - | - |
| | 71 | | 19 | 23 | 14 | 15 | 107 | 10 | 20 | - | - | - | - |
| | 5 | | 36 | 5 | 2 | 31 | 22 | 79 | 111 | - | - | - | - |

A seguir, são apresentados na Tab. 22, para o conjunto de dados (Tab. 21) transformados na escala logarítmica, os resultados do teste de homogeneidade das variâncias, teste de normalidade dos erros e dos três testes estatísticos efetuados na análise de variância.

Tabela 22 – Testes realizados nos dados experimentais obtidos em ensaios de fadiga utilizando os limites de carregamento de 70%YBL a 90%YBL

| Teste | p-value |
|-----------------------------|---------|
| Homogeneidade de variâncias | 27,91% |
| Normalidade dos erros | < 0,01% |
| Material | < 0,01% |
| Carga de impacto | 1,11% |
| Interação | 0,1% |

Na tabela 22 é mostrado que a distribuição dos erros não apresenta forma normal visto que p-value é menor que 1%, logo a análise de variância paramétrica não pode ser aplicada no conjunto de dados mostrado na Tab. 21, sendo necessário a aplicação de uma análise de variância não paramétrica.

A seguir, na Tab. 23 é apresentado um resumo da análise de variância.

Tabela 23 - Resumo da análise de variância

| Limite de carregamento | Resumo |
|-------------------------------|---|
| 10%YBL a 90%YBL | Efeito do material - Vida em fadiga de PET A > PET B > PET C. |
| | Efeito da carga de impacto - 9% YBL = PET A e PET B reduziram às vidas em fadiga; - 6% YBL = PET C reduziu à vida em fadiga. |
| 20%YBL a 90%YBL | Efeito do material - Vida em fadiga de PET A > PET B > PET C. |
| | Efeito da carga de impacto - 9% YBL = PET A e PET B reduziram às vidas em fadiga; - 6% YBL = PET C reduziu à vida em fadiga. |
| 30%YBL a 90%YBL | Efeito do material - Vida em fadiga de PET A > PET B > PET C. |
| | Efeito da carga de impacto - 9% YBL = PET A e PET B reduziram às vidas em fadiga; - 6% YBL = PET C reduziu à vida em fadiga. |
| 40%YBL a 90%YBL | Efeito do material - Vida em fadiga de PET A > PET B > PET C. |
| | Efeito da carga de impacto - 9% YBL = PET A e PET B reduziram à vida em fadiga. |
| 50%YBL a 90%YBL | Efeito do material - Vida em fadiga de PET A = PET B > PET C. |
| 60%YBL a 90%YBL | Efeito do material - Vida em fadiga de PET A = PET B > PET C. |
| 70%YBL a 90%YBL | - A análise de variância paramétrica não pode ser aplicada. |

5 CONCLUSÃO

No presente trabalho foi estudado o comportamento mecânico de multifilamentos de poliéster perante carregamentos dinâmicos através da investigação de diferentes parâmetros em testes de impacto, tais como carga de ruptura, força de impacto, deformação máxima, deformação viscoplástica, deformação elástica e energia absorvida. Além disso, foi analisada a vida em fadiga dos multifilamentos de poliéster, virgens e submetidos previamente a um teste de impacto.

Quanto à carga de ruptura por impacto, foi verificado que uma massa de 9%YBL caindo de uma altura de 300 mm é suficiente para romper os multifilamentos produzidos pelo fabricante C enquanto os outros poliésteres precisaram de uma massa de 13%YBL para falharem, logo, é importante que sejam empregos elevados coeficientes de segurança no projeto de cabos de poliéster que venham a serem sujeitos a um carregamento súbito.

Em relação às forças de impacto, PET C transmitiu a maior força para a massa de 6%YBL durante os testes (aproximadamente 189 N) enquanto o PET A transmitiu a menor. Quanto às forças de impacto utilizando uma massa igual a 9%YBL, novamente o poliéster A transmitiu uma menor força (aproximadamente 151 N) para a massa de 9%YBL lançada em queda livre.

A partir da bibliografia Vogwell e Minguez (2007) e Martin et al. (2014), que estudam forças de impacto em cabos de poliamida, também é possível concluir que a utilização de cabos de poliéster em esportes de escalada ou serviços de resgate, colocaria em risco a segurança dos alpinistas e dos bombeiros, pois no presente trabalho os multifilamentos de poliéster produziram forças de impacto de aproximadamente 10 vezes as forças peso das massas.

Quanto à vida em fadiga dos multifilamentos de poliéster, é possível concluir, a partir da análise estatística, que o material C apresenta a menor resistência em fadiga em todos os intervalos de carregamentos, enquanto o material A suporta um maior número de ciclos até a ruptura nas maiores amplitudes de carregamento cíclico.

Quanto ao efeito de uma carga de impacto na vida em fadiga, devemos atentar ao fato de que PET C apresenta evidências de reduzir sua vida útil quando submetido previamente a um teste de impacto utilizando uma massa igual a 6%YBL enquanto PET A e PET B não apresentaram esse comportamento. Quando a massa foi alterada para 9%YBL, é constatado através da análise de variância que os materiais A e B

tiveram uma redução no número de ciclos até a ruptura. Portanto, é concluído que existe uma redução da vida em fadiga quando os multifilamentos de poliéster forem submetidos previamente a uma elevada carga de impacto.

Finalmente, a presente pesquisa também constatou que propriedades como resistência à tração, à fadiga e ao impacto devem ser tratadas de maneira separada, visto que o material C apresenta a maior resistência em tração, ao passo que tem o pior desempenho mecânico perante os carregamentos dinâmicos.

6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Do presente trabalho podem-se extrair sugestões para trabalhos futuros, bem como:

- Avaliação do efeito de dois testes sucessivos de impacto na vida em fadiga dos multifilamentos de poliéster;
- Avaliação do efeito de uma carga de impacto na vida em fadiga de outros materiais sintéticos, tais como aramida e polietileno de alto módulo.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, **ASTM D885**: Standard Test Methods for Tire Cords, Tire Cord Fabrics, and Industrial Filament Yarns Made from Manufactured Organic-Base Fibers. West Conshohocken, 2014.

BANFIELD, Stephen J. et al. Comparison of fatigue data for polyester and wire ropes relevant to deepwater moorings. In: **18th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering Proceedings**. 1999.

BARBETTA, Pedro Alberto; REIS, Marcelo Menezes; BORNIA, Antonio Cezar. **Estatística: para cursos de engenharia e informática**. São Paulo: Atlas, 2010.

BICO, Victor Manuel Pires. **Amarração de plataformas offshore flutuantes com cabos de poliéster**. 2013. Tese de Doutorado. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.

BOSMAN, Rig0 LM. On the origin of heat build-up in polyester ropes. In: **OCEANS'96. MTS/IEEE. Prospects for the 21st Century. Conference Proceedings**. IEEE, 1996. p. 332-338.

CANEVAROLO JR, Sebastião V. Ciência dos polímeros. **Artliber editora, São Paulo**, 2002.

CANEVAROLO JR, Sebastião V. et al. Técnicas de caracterização de polímeros. **Artliber, São Paulo**, v. 430, n. 2004, 2004.

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

DA COSTA MATTOS, H. S.; CHIMISSO, F. E. G. Modelling creep tests in HMPE fibres used in ultra-deep-sea mooring ropes. **International Journal of Solids and Structures**, v. 48, n. 1, p. 144-152, 2011.

DE CAMARGO, Felipe Vannucchi et al. CYCLIC STRESS ANALYSIS OF POLYESTER, ARAMID, POLYETHYLENE AND LIQUID CRYSTAL POLYMER YARNS. **Acta Polytechnica**, v. 56, n. 5, p. 402-408, 2016.

DE PAOLI, Marco Aurelio. **Degradação e estabilização de polímeros**. São Paulo: Artliber, 2009.

DNV-OS-E303 “Offshore FibreRopes”, DetNorskeVeritas, Høvik, Norway, 2013.

EMRI, Igor et al. Time-dependent behavior of ropes under impact loading: A dynamic analysis. **Sports Technology**, v. 1, n. 4-5, p. 208-219, 2008.

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

ESTRUTURAS, ANÁLISE DE VIBRAÇÕES LIVRES EM. **ESCOLA POLITÉCNICA ENGENHARIA CIVIL DEPARTAMENTO DE MECÂNICA APLICADA E ESTRUTURAS**. 2005. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

GONÇALVES, R. C. F.; COSTA, L. C. S. Inspeção em linhas de ancoragem de unidades de produção. In: **Anais do 21º Congresso Nacional de Ensaios não Destrutivos**. 2002. p. 19-22.

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

HUANG, Wei et al. Modeling nonlinear creep and recovery behaviors of synthetic fiber ropes for deepwater moorings. **Applied Ocean Research**, v. 39, p. 113-120, 2013.

INTERNATIONAL STANDARDIZATION ORGANIZATION, **ISO 139**: Textiles – Standard atmospheres for conditioning and testing. Geneva, 2005.

LOUZADA, Emilio Luiz Vieira; GUILHERME, Carlos Eduardo Marcos; STUMPF, Felipe Tempel. EVALUATION OF THE FATIGUE RESPONSE OF POLYESTER YARNS AFTER THE APPLICATION OF ABRUPT TENSION LOADS. **ActaPolytechnica CTU Proceedings**, v. 7, p. 76-78, 2016.

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

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

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

MCKENNA, Henry A.; HEARLE, John WS; O'HEAR, Nick. **Handbook of fibre rope technology**. Elsevier, 2004.

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

NIKONOV, A. et al. Influence of moisture on functional properties of climbing ropes. **International Journal of Impact Engineering**, v. 38, n. 11, p. 900-909, 2011.

PAVIER, Martyn. Experimental and theoretical simulations of climbing falls. **Sports Engineering**, v. 1, n. 2, p. 79-91, 1998.

PFARRIUS, J. D.; DUARTE, E.; CHIMISSO, F. E. G. Theoretical and experimental modeling of a socket sandwich for use in tension tests of synthetic ropes. In: **Vrnjacka Banja: 6th Youth Symposium on Experimental Solid Mechanics**. 2007.

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

SIGNORETTI, Gigi. Wet and icy ropes may be dangerous. **La Rivistadel Club Alpino Italiano**, 2001.

VOGWELL, Jeffrey; MINGUEZ, J. M. The safety of rock climbing protection devices under falling loads. **Engineering Failure Analysis**, v. 14, n. 6, p. 1114-1123, 2007.

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

WANG, Wenkai; WANG, Xuefeng; YU, Guoliang. Penetration depth of torpedo anchor in cohesive soil by free fall. **Ocean Engineering**, v. 116, p. 286-294, 2016.

WELLER, S. D. et al. Synthetic rope responses in the context of load history: Operational performance. **Ocean Engineering**, v. 83, p. 111-124, 2014.