

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

GABRIELA HAHN

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À RUPTURA NA TRAÇÃO EM FIBRAS
SINTÉTICAS SUBMETIDAS A CARREGAMENTO DE IMPACTO**

RIO GRANDE

2019

GABRIELA HAHN

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À RUPTURA NA TRAÇÃO EM FIBRAS
SINTÉTICAS SUBMETIDAS A CARREGAMENTO DE IMPACTO**

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

Área de Concentração: Materiais sintéticos

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Marcos Guilherme.

Rio Grande

2019

Ficha catalográfica

H148a Hahn, Gabriela.

Avaliação da resistência à ruptura na tração em fibras sintéticas submetidas a carregamento de impacto / Gabriela Hahn. – 2019.

60 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Rio Grande/RS, 2019.

Orientador: Dr. Carlos Eduardo Marcos Guilherme.

1. Fibras Sintéticas 2. Carregamento de Impacto 3. Condições de Ensaio 4. Resistência à Tração I. Guilherme, Carlos Eduardo Marcos II. Título.

CDU 677.494



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



Ata nº 06/2019 da Defesa de Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande - FURG. Aos vinte e oito dias do mês de março de dois mil e dezenove, foi instalada a Banca de Defesa de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, às dezessete horas no Policab, no Campus Carreiros desta Universidade, a que se submeteu a mestranda **Gabriela Hahn**, nacionalidade brasileira, dissertação ligada a Linha de Pesquisa Engenharia de Soldagem e Materiais do PPGMec, com o seguinte título: **AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À RUPTURA NA TRAÇÃO EM FIBRAS SINTÉTICAS SUBMETIDAS AO CARREGAMENTO DE IMPACTO**. Referendada pela Câmara Assessora do Curso, os seguintes Professores Doutores: Felipe Tempel Stumpf e Amanda Dantas de Oliveira, sob a orientação do Professor Carlos Eduardo Marcos Guilherme. Analisando o trabalho, a Banca Examinadora o considerou:

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

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. [Assinatura]
CPF: 732.846.700-25
2. [Assinatura]
CPF: 007.895.560-22
3. Amanda Oliveira
CPF: 012.372.664-67

Gabriela Hahn: Gabriela Hahn

RESUMO

Como as fibras sintéticas são materiais que apresentam alta resistência com um peso extremamente baixo, as mesmas vêm sendo cada vez mais utilizadas, fazendo-se necessário que possuam um bom desempenho mecânico durante a vida útil para a qual são projetadas. Contudo, existem alguns fatores indesejados que podem causar a degradação do material, sendo um deles os choques acidentais. Este estudo investiga o quanto uma carga de impacto, que não rompa o material, pode afetar na resistência à ruptura na tração de cinco fibras sintéticas, as quais são: poliéster, LCP (polímero de cristal líquido), aramida e dois tipos de HMPE (Polietileno de alto módulo, tratados como HMPE 1 e HMPE 2). O procedimento para realização dos ensaios considera diferentes cargas de impacto, que são determinadas como uma porcentagem da resistência à ruptura na tração do material virgem. Após o dano causado no multifilamento, é verificado o valor da carga de ruptura da fibra e duas condições são estudadas: imediatamente e 24 horas posterior ao carregamento quase instantâneo. Os testes são realizados com 30 corpos de provas para cada condição especificada, os resultados mostram que essas fibras rompem no impacto com uma força próxima a máxima de tração do material virgem (material íntegro, sem nenhum dano). Observa-se que os multifilamentos de poliéster, aramida e HMPE 2 apresentam estabilidade nos valores obtidos após aplicação do dano sem o rompimento do material. Para a condição de cargas de impactos de baixo valor, é constatado um aumento na resistência à ruptura dos materiais HMPE 1 e 2. Já, dos materiais estudados, os que menos resistem a um carregamento direto são a aramida e o LCP. Para o caso em que a ruptura é verificada após 24 horas, não é observado mudanças consideráveis quando comparadas com os testes realizados imediatamente.

Palavras-chave: Fibras sintéticas. Carregamento de Impacto. Condições de ensaio. Resistência à Tração.

ABSTRACT

Due to the fact that synthetic fibers are materials that have high resistance and extremely low weight, their use has been increasing so that good mechanical performance during the lifespan for which they were designed is required. Nevertheless, there are some unwanted factors that can cause the degradation of those fibers, e.g., accidental shocks. This study investigates to what extent an impact load, that does not break the material, can affect the breaking strength of five synthetic fiber yarns: polyester, LCP (liquid crystal polymer), aramid and two types of HMPE (high modulus polyethylene, treated as HMPE 1 and HMPE 2). The procedure for carrying out the tests considers different impact loads, which are determined by a percentage of the breaking strength in traction of the virgin yarn. After damaging the yarn, the value of the breaking strength is verified in two conditions: immediately after the impact and 24 hours after the impact. The tests are performed using 30 specimens for each specified condition and the results show that those fibers break on impact with a force close to the breaking strength of the virgin material. It is observed that the values obtained from polyester, aramid and HMPE 2 yarns, after the application of the load without breaking the material, have smaller deviations. For low impact loads, an increase in breaking strength is noticed for HMPE 1 and HMPE 2. On the other hand, among the studied materials, the less resistant to impact are aramid and LCP. In the cases that the breaking tests are carried out after 24 hours, no considerable changes are observed when compared to the tests performed immediately.

Keywords: Synthetic fibers. Impact Loading. Test conditions. Breaking strength.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fórmula Estrutural do PET	16
Figura 2 - Fórmula estrutural do LCP	17
Figura 3 - Velocidades típicas de algumas situações em que materiais sofrem impacto	26
Figura 4 - Esquema mostrando os diferentes tipos de ensaios padronizados sob impacto para plásticos	27
Figura 5 - Representação de massa em queda livre	29
Figura 6 - Exemplo de gráfico de força versus tempo de teste de queda livre de peso	30
Figura 7 - Exemplo de um box plot	34
Figura 8 - Corpos de prova de 500 mm com terminação “sanduíche”	35
Figura 9 - Dispositivo para teste de impacto com célula de carga	37
Figura 10 - Comportamento ao carregamento direto e força máxima média atingida com 3% de carga para todas as fibras sintéticas	40
Figura 11 - Box plot do Poliéster utilizando impacto de 3% do YBL	41
Figura 12 - Box plot do LCP utilizando impacto de 3% do YBL	42
Figura 13 - Box plot da Aramida utilizando impacto de 3% do YBL	42
Figura 14 - Box plot do HMPE 1 utilizando impacto de 3% do YBL	43
Figura 15 - Box plot do HMPE 2 utilizando impacto de 3% do YBL	43
Figura 16 - Comportamento ao carregamento direto e força máxima média atingida com 5% de carga para todas as fibras sintéticas	45
Figura 17 - Box plot do Poliéster utilizando impacto de 5% do YBL	46
Figura 18 - Box plot do HMPE 2 utilizando impacto de 5% do YBL	46
Figura 19 - Comportamento ao carregamento direto e força máxima média atingida com 7 % de carga para o poliéster e o HMPE 2	48
Figura 20 - Comportamento ao carregamento direto e força máxima média atingida com 9% e 11% de carga para o poliéster	49
Figura 21 - Box plot do Poliéster utilizando impacto de 7% do YBL	50
Figura 22 - Box plot do Poliéster utilizando impacto de 9% do YBL	50
Figura 23 - Box plot do Poliéster utilizando impacto de 5% do YBL em testes de 24 horas ..	53
Figura 24 - Box plot do HMPE 1 utilizando impacto de 3% do YBL em testes de 24 horas ..	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados dos testes de resistência a tração nos materiais virgens.....	39
Tabela 2 - Valores utilizados na análise estatística e na preparação do box plot, com carregamento direto de 3% do peso da resistência à ruptura na tração para cada material.....	41
Tabela 3 - Resultados dos testes de resistência a tração após teste de impacto com 3% da carga da resistência à ruptura na tração para cada material.....	44
Tabela 4 - Valores utilizados na análise estatística e na preparação do box plot, com carregamento direto de 5% do peso da resistência à ruptura na tração para cada material.....	46
Tabela 5 - Resultados dos testes de resistência a tração após teste de impacto com 5% da carga da resistência à ruptura na tração para o poliéster e o HMPE 2	47
Tabela 6 - Valores utilizados na análise estatística e na preparação dos box plots, com carregamento direto de 7% e 9% do peso da resistência à ruptura na tração do poliéster	49
Tabela 7 - Resultados dos testes de resistência a tração após testes de impacto com 7% e 9% da carga da resistência à ruptura na tração do poliéster	51
Tabela 8 - Limite de resistência ao impacto das fibras sintéticas.....	51
Tabela 9 - Valores utilizados na análise estatística e na preparação dos box plots, com carregamento direto de 3% para o HMPE 1 e 5% para o poliéster da força da resistência à ruptura na tração de cada material.....	52
Tabela 10 - Resultados dos testes de tração após 24 horas dos testes de impacto com carga de resistência à ruptura na tração de 5% para o poliéster e 3% para o HMPE 1.....	54

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 JUSTIFICATIVA	12
1.2 OBJETIVOS	13
1.2.1 Objetivo Geral.....	13
1.2.2 Objetivos Específicos	13
2 REVISÃO DA LITERATURA	14
2.1 POLÍMEROS.....	14
2.1.1 Fibras Sintéticas	15
2.1.1.1 Poliéster.....	15
2.1.1.1.1 Outros poliésteres	16
2.1.1.2 LCP.....	17
2.1.1.3 Fibras de Alto Módulo e Alta Tenacidade	18
2.1.1.3.1 Aramida	18
2.1.1.3.2 HMPE	19
2.2 DEGRADAÇÃO DOS POLÍMEROS	19
2.2.1 Degradação química.....	20
2.2.2 Tipos de processos de iniciação das reações de degradação.....	20
2.3 DEGRADAÇÃO MECÂNICA.....	21
2.4 ENSAIOS.....	23
2.4.1 Impacto Axial	24
2.4.1.1 Alguns parâmetros considerados para caracterizar as propriedades sob impacto.....	25
2.4.1.2 Tipos de ensaio de impacto	27
2.4.1.2.1 Ensaio de impacto através de queda de peso	28
2.4.1.2.2 Ensaio de Equipamentos Instrumentados	29
2.4.1.2.3 Ensaio de Impacto em Elevadas Velocidades.....	31
2.4.2 Ensaio de tração	31
2.5 ESTATÍSTICA	32

3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	35
3.1 SELEÇÃO DE MATERIAIS E PREPARO DAS AMOSTRAS.....	35
3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	36
3.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA	37
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
4.1 ENSAIOS DE TRAÇÃO NAS FIBRAS VIRGENS.....	39
4.2 ENSAIOS DE TRAÇÃO NAS FIBRAS APÓS CARREGAMENTO DE IMPACTO	40
4.2.1 Carregamento de impacto seguido de teste de tração	40
4.2.2 Teste de tração realizado após 24 horas do carregamento de impacto	52
5 CONCLUSÃO.....	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

1 INTRODUÇÃO

Os polímeros naturais – derivados de plantas e animais – têm sido usados há muitos séculos; esses materiais incluem a madeira, a borracha, o algodão, a lã, o couro e a seda. Ferramentas modernas de investigação científica tornaram possível a determinação das estruturas moleculares desse grupo de materiais e o desenvolvimento de numerosos polímeros, os quais são sintetizados a partir de moléculas orgânicas pequenas. Contudo, desde o fim da Segunda Guerra Mundial, o campo dos materiais foi virtualmente revolucionado pelo advento dos polímeros sintéticos. Estes podem ser reproduzidos a baixos custos e suas propriedades podem ser alteradas até o ponto onde muitas delas são superiores às dos materiais naturais. (CALLISTER, 2008)

Atualmente, os materiais sintéticos são essenciais para a manutenção da nossa qualidade de vida e são usados para confeccionar artefatos plásticos, elastômeros ou compósitos. Na indústria naval, a substituição de cabos de amarração de plataformas marítimas confeccionados em aço por cabos de polímeros, tem se tornado cada vez mais comum em face da necessidade de se ter uma redução no peso das plataformas, principalmente no caso de produção em águas profundas. Esses cabos usados nas embarcações são construídos a partir de fibras sintéticas, como a poliamida, poliéster, Aramida, HMPE, Technora®, Spectra®, LCP e polipropileno.

Como os materiais poliméricos estão sendo cada vez mais utilizados, torna-se necessário que esse produto possua um bom desempenho mecânico durante a vida útil para a qual é projetado. Porém, existem alguns fatores indesejados que causam a degradação do material e afetam a sua performance, sendo iniciados por temperaturas altas, oxidação, cisalhamento mecânico, entre outros.

As fibras sintéticas possuem a denominação de polímeros de alto desempenho (ou alta performance) justamente pelo conceito de serem um material de alta resistência, porém com o peso extremamente baixo (MCKENNA, et al., 2000). Nesta pesquisa fibras de poliéster, LCP, aramida e HMPE (*high-modulus polyethylene*) são estudadas. A escolha destes materiais é pertinente pois eles são ótimos absorvedores de choque, bem como possuem ampla resistência a abrasão, fadiga e tração.

Um conhecimento profundo dos mecanismos de degradação é necessário para alcançar o objetivo de o material manter a sua função no tempo para o qual foi programado. A degradação mecânica, por exemplo, pode ter como uma das suas causas uma carga acidental de impacto. Este é um carregamento dinâmico com uma taxa quase instantânea no qual podem ocorrer elevadas taxas de deformação do material ou até sua ruptura dependendo da carga. Como, de acordo com Hage Jr. (2003), os materiais poliméricos possuem um comportamento mecânico muito sensível à taxa de deformação por terem natureza viscoelástica, é de suma importância compreender como esse tipo de carregamento afeta esses materiais. Portanto, o enfoque deste trabalho é analisar o quanto uma carga de impacto, que não rompa o material, afeta na resistência à ruptura na tração (YBL, *yarn breaking load*) das fibras sintéticas.

Para sua execução, os multifilamentos são submetidos a diferentes carregamentos de impacto, e, após o dano causado no material, é verificado o valor da carga de ruptura do material, e duas condições são estudadas: imediatamente e 24 horas posterior ao carregamento quase instantâneo. Cinco variedades de fibras sintéticas são utilizadas, com o intuito de descobrir se o comportamento delas quando submetidas ao impacto é similar, e, caso não seja, buscar compreender quais os fatores que as fizeram diferir. Uma análise estatística também será realizada para excluir possíveis *outliers*, com o objetivo de dar maior confiabilidade ao estudo.

1.1 JUSTIFICATIVA

Do ponto de vista dos sistemas *offshore*, um dos maiores desafios é que os cabos sintéticos atendam aos requisitos de projeto, pois são submetidos à grandes solicitações mecânicas e outros degradantes do ambiente, e diante disso se torna indispensável que tenham as propriedades mecânicas necessárias para a sua aplicação. Tanto os cabos de amarração quanto os de ancoragem estão passíveis de sofrerem com impactos, o que torna crucial o entendimento do quanto isso pode afetar a vida útil do cabo.

O estudo sobre as cargas impacto acidentais e suas consequências em polímeros, mais especificamente as fibras sintéticas que compõem os cabos, ainda é um tema pouco abordado.

A importância de conhecer mais sobre o assunto é imensa, pois é fundamental saber o quanto as propriedades mecânicas desses materiais sofrem alterações com esse tipo de carregamento.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo dessa pesquisa é analisar e comparar a resistência à ruptura na tração de cinco fibras sintéticas diferentes, na forma virgem e também após sofrerem com diferentes carregamentos de impacto axial.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para ser realizado, o estudo passa pelos seguintes objetivos:

- Submissão das amostras virgens dos multifilamentos aos ensaios de tração quase-estática;
- Determinação das cargas utilizadas nos carregamentos de impacto e os tempos entre ensaios;
- Realização dos testes de impacto nos multifilamentos;
- Realização dos ensaios de tração nos materiais submetidos ao carregamento de impacto prévio;
- Determinação da carga máxima de resistência ao impacto de cada material;
- Análise dos resultados.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Nesta etapa são apresentados os polímeros sintéticos, com ênfase nas fibras utilizadas neste trabalho e mais comumente utilizadas na indústria naval. Também são discutidos os processos de deterioração, em que a degradação mecânica, que ocorre também através do impacto em materiais sintéticos, é explicada em mais detalhes. O capítulo finaliza-se com a discussão sobre os ensaios mecânicos realizados em polímeros para a obtenção de suas propriedades mecânicas.

2.1 POLÍMEROS

A palavra polímero vem do grego poli (muitos) e meros (iguais). São macromoléculas (grandes moléculas) formadas pela repetição de muitas unidades químicas idênticas, denominadas meros ou unidades repetitivas. Do ponto de vista da nomenclatura, para se denominar um polímero usa-se o nome do monômero – uma molécula com uma unidade de repetição – que foi usado na sua síntese e não o nome químico da unidade repetitiva do mesmo. Por exemplo, no caso do poli (etileno), o etileno $[H_2C=CH_2]$ é o monômero usado na síntese, mas a unidade repetitiva da cadeia polimérica é $[CH_2-CH_2]_n$, sem ligações duplas (PAOLI, 2008).

De acordo com Callister (2008), os polímeros sintéticos possuem baixo custo e propriedades mutáveis, o que acaba fazendo muitas destas serem superiores às dos polímeros naturais. Contudo, segundo Paoli (2008) esses materiais têm durabilidade limitada, que é determinada pelos seus processos de degradação. A degradação altera a qualidade de interesse de um material polimérico, como, por exemplo, a flexibilidade, a resistência elétrica, o aspecto visual, a resistência mecânica, a dureza, etc.

Em aplicações técnicas os polímeros possuem muitas vantagens quando comparados a outros tipos de materiais. Entre estas vantagens podem-se citar: é mais leve que os materiais metálicos ou cerâmicos; tenacidade que chega a ser equivalente à de materiais metálicos; alta resiliência; bom amortecimento vibracional, isolamento térmico e elétrico; baixo coeficiente de atrito; grande resistência à corrosão e baixo custo de fabricação. Entretanto, sofrem também uma série de limitações, como baixas rigidez, resistência térmicas ao intemperismo e

à radiação ultravioleta (UV); resistência mecânica em geral inferior a maioria dos metais, bem como, menores dureza e resistência à abrasão (ROSA, 1996, apud NILSEN, 1984).

2.1.1 Fibras Sintéticas

As fibras químicas podem ser divididas em: artificiais, que são produzidas a partir da celulose (substância fibrosa encontrada na pasta de madeira) ou do línter de algodão (fibra curta restante na semente do algodão após o descaroçamento), e sintéticas, que são produzidas a partir de resinas derivadas do petróleo, que originam o acrílico, a poliamida, o poliéster, o polipropileno, entre outros (MARTINS, 1995?). As fibras sintéticas são polímeros extrudados a partir do fundido e orientados por estiramento para proporcionar os "fios têxteis", que são o material de partida para a produção de cabos (MCKENNA, et al., 2000).

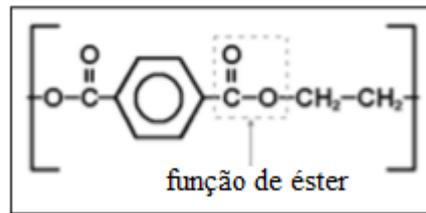
De acordo com Santos (2002), devido ao estiramento que as fibras sintéticas sofrem durante o seu processo de fabricação, a tensão limite de ruptura se torna superior àquela do polímero bruto, enquanto que a alongação máxima é reduzida. Essa melhora nas propriedades mecânicas resulta na orientação das cadeias poliméricas com possível formação de cristalitos orientados e redução da fase amorfa.

Existe uma variedade de fibras sintéticas disponíveis no mercado para a fabricação de cabos, desde as convencionais, utilizadas onde é exigida uma pequena ou média performance, até as de altas performance, onde são fabricados cabos de grande responsabilidade (LOPES, 2003). Nas seções a seguir serão brevemente caracterizados alguns dos materiais utilizados nesse estudo.

2.1.1.1 Poliéster

A fibra de poliéster é obtida a partir de polímeros sintéticos de cadeia longa que contém pelo menos 85% do peso de um éster dimetílico (AMRAN; KOTO, 2016, apud DEL VECCHIO, 1992). Segundo McKenna et al. (2000) embora tenham outros tipos, o poliéster é o termo usado comumente para o Tereftalato de Polietileno (PET) ou 2GT (adicionado quando é necessário se referir especialmente ao polietileno-tereftalato). O PET, possui a fórmula estrutural indicada na figura 1.

Figura 1 - Fórmula Estrutural do PET



Fonte: Adaptado de Amran e Koto (2016), pg 13

O poliéster é uma fibra de alto desempenho, e pode ser termoplástico ou termoendurecido. A diferença entre os dois tipos é que no segundo ocorre uma alteração na forma depois de inserir um pouco de calor, o que acaba conferindo alta tenacidade e maior módulo de Young. Já o termoplástico possui baixa absorção de água e um encolhimento mínimo comparado com outras fibras (AMRAN; KOTO, 2016).

A fibra de poliéster não é biodegradável, possui elevada resistência mecânica e tenacidade, tem encolhimento mínimo quando comparado com outras fibras industriais, e, como não há atração para moléculas de água, a taxa de absorção de umidade é muito baixa, sendo seu comportamento em meio úmido de alta resistência à abrasão (MCKENNA, et al., 2000). Em condições normais de trabalho o ponto de fusão do PET é de cerca de 260 °C, tem boa resistência ao UV e sofre um pouco com a fluência, mas este efeito é estável (AMRAN; KOTO, 2016, apud BEXCO, 2004).

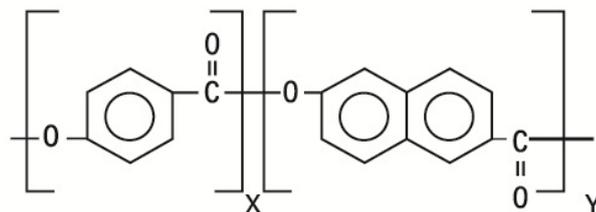
2.1.1.1.1 Outros poliésteres

De acordo com McKenna et al. (2000), existem outros tipos de fibras de poliéster, como o 3GT (politereftalato de trimetileno) e o 4GT (polibutileno-tereftalato). Estes possuem maior flexibilidade, o que torna as propriedades mais parecidas com as de poliamida. Contudo, é pouco provável que estes materiais sejam otimizados para produção de cabo.

2.1.1.2 LCP

A fibra de LCP é uma fibra de cristal líquido, constituída de poliéster aromático, sendo um material termotrópico à base de naftalina. Um diagrama esquemático da sua estrutura da cadeia molecular é mostrado na figura 2 (BEERS; RAMIREZ, 1990).

Figura 2 - Fórmula estrutural do LCP



Fonte: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Molecular_structure_Vectran_LCP_Fiber.png

As moléculas do polímero são rígidas e posicionam-se em domínios orientados aleatoriamente. Este material exibe comportamento anisotrópico no estado de fusão e, portanto, temos o termo polímero de cristal líquido. Sua estrutura de fibra altamente orientada, resulta em propriedades de elevada resistência à tração (BEERS; RAMIREZ, 1990).

O LCP possui muitos atributos, como excelentes propriedades mecânicas, que são mantidas em uma ampla gama de temperaturas, excelente resistência química e baixa absorção de água. A fibra também não exibe nenhuma fluência mensurável quando carregada até 50% da carga de ruptura do fio, o que lhe confere umas das suas características mais únicas e benéficas. Além do mais, tem uma excelente resistência à abrasão com os acabamentos adequados aplicados à fibra (BEERS; RAMIREZ, 1990). Contudo, o LCP tem uma perda de força enorme, cerca de 86% após 144h, submetido à exposição ao UV em lâmpadas de xenônio, ou seja, ele é muito sensível a radiação (SAID, et al., 2005). A escala de produção dessa fibra permaneceu pequena e ela é restrita a usos especializados (MCKENNA, et al., 2000).

2.1.1.3 Fibras de Alto Módulo e Alta Tenacidade

Segundo McKenna et al. (2000), foi reconhecido no início da década de 1930 que, para máxima força e rigidez, uma fibra de polímero deveria ter moléculas longas, totalmente estendidas e altamente orientadas. Para fazer tais estruturas, foram encontradas duas maneiras. A primeira usa moléculas de polímero novas, rígidas e interativas que formam cristais líquidos, que podem ser orientados durante a produção da fibra. Já a segunda, usa uma molécula de polímero inerte, flexível, que pode ser sobreposta à forma requerida.

2.1.1.3.1 Aramida

Podendo ser encontradas com diferentes seções transversais a sua designação decorre da junção dos termos poliamida aromática – *aromatic poliamida* –, que expressam sua composição química (BERNARDI, 2003). As fibras de aramida são genericamente definidas como tendo pelo menos 85% dos grupos amida unidos diretamente a dois anéis aromáticos.

As aramidas comerciais encontradas atualmente possuem uma estrutura de cadeia altamente cristalina e orientada, o que as confere alto módulo de elasticidade e tenacidade (MCKENNA, et al., 2000). A tecnologia de montagem de polímeros vigorosamente orientados deu início a diferentes dimensões na fabricação e processamento de fibras, pois o processo utiliza pouca energia para orientar fortemente moléculas poliméricas, permitindo produzir fibras muito resistentes (BERNARDI, 2003).

Segundo Bernardi (2003, apud ROCHA, 2002; SEN et al., 1999; YANG, 1993), por possuir uma estrutura cristalina bastante estável e firme, a aramida dispõe de elevada resistência e rigidez. É ligeiramente mais densa, e com tenacidade superior às fibras de poliamida e poliéster. Apresenta um alongamento baixo na ruptura, comparável ao do aço. As poliamidas aromáticas tendem a apresentar uma excepcional resistência ao calor, resistindo a temperaturas da ordem de 550 °C. Além disso, nota-se um grau alto de tolerância ao dano. Estas fibras apresentam uma retração muito pequena, baixa fluência e excelente resistência química, sendo resistentes à corrosão na presença da maioria dos produtos químicos, solventes, combustíveis, detergentes e ao ataque da água do mar.

2.1.1.3.2 HMPE

O polietileno de alto módulo é produzido a partir do processo de fiação chamado “*gel-spinning*” que consiste em dissolver o polietileno de ultra-alto peso molecular num solvente com uma concentração razoavelmente elevada, e posteriormente realizar a fiação e estirá-lo. Isso fornece a estrutura altamente cristalina, orientada e estendida da cadeia (MCKENNA, et al., 2000).

Segundo Lopes (2003), como o HMPE não contém na sua composição química anéis aromáticos, amidas, hidroxilas ou outro grupo químico que seja suscetível ao ataque por agentes agressivos, o resultado é uma excelente resistência à absorção de umidade e ataque pela água, produtos químicos, luz ultravioleta e micro-organismos.

Essas fibras apresentam densidade menor do que a umidade, e por isso flutuam na água, o que é muito interessante para o setor *offshore*. Possuem a tenacidade mais alta entre as fibras sintéticas, podendo até ser 15 vezes maior do que a de um arame de aço, e um módulo de elasticidade muito elevado. O alongamento na ruptura é um dos mais baixos encontrados em fibras sintéticas. O HMPE apresenta um ponto de fusão entre 144 e 152 °C. A tenacidade e o módulo da fibra diminuem em altas temperaturas, mas aumentam em temperaturas abaixo de 0 °C (LOPES, 2003).

2.2 DEGRADAÇÃO DOS POLÍMEROS

Segundo Canevarolo Jr. (2006), a degradação dos polímeros é qualquer fenômeno que provoque uma mudança química na cadeia polimérica, normalmente com redução da massa molar e, conseqüentemente, queda nas propriedades físico-mecânicas. De acordo com Turnbull e White (1994), ela ocorre em uma ampla variedade de ambientes e condições de serviço, e muitas vezes limita a vida útil de utilização do material, podendo ocorrer como resultado de um ataque químico ou físico conforme o ambiente, ou até por uma combinação de agentes degradantes, sendo capaz de envolver vários mecanismos químicos e mecânicos.

É possível analisar a degradação por diferentes aspectos, e há diferentes tipos de degradação. Se for ponderada segundo sua severidade, a degradação pode ser superficial

(altera o aspecto visual do material) ou estrutural (altera as propriedades e compromete o desempenho do polímero); quando observada segundo os mecanismos gerais das reações, ela é chamada de degradação "sem" ou "com" cisão da cadeia principal do polímero (ROSA, 1996, apud AGNELLI, 1991).

Paoli (2008) aborda que existem várias maneiras de discorrer sobre a degradação de polímeros, como:

- 1 - Pelos tipos de reações químicas que ocorrem no início e durante a degradação;
- 2 - Pelo processo de iniciação destas reações.

2.2.1 Degradação química

Em um meio químico agressivo, pode ocorrer a quebra (cisão) das ligações na cadeia principal ou em grupos laterais, reticulação, eliminação ou a substituição de cadeias laterais. A eliminação e a substituição de cadeias laterais ocorrem menos comumente, e causam as menores mudanças de propriedades, não sendo consideradas relevantes. A cisão acontece quando a energia inserida em uma ligação química for superior à energia da ligação. Quando tem-se a formação de radicais livres, a reação radicalar pode se propagar ou suceder uma recombinação intra/intermolecular. Se for intramolecular decorrerá a ciclização da cadeia polimérica e no caso de uma recombinação intermolecular teremos a reticulação (PAOLI, 2008).

2.2.2 Tipos de processos de iniciação das reações de degradação

De acordo com Haddad e Yousif (2013, apud FELDMAN, 2002; SCHNABEL 1981; WEIDNER et al., 1996; GUAITA et al., 1985; DINDAR AND ICLI, 2001; VINHAS et al., 2003; POTTS, 1991) os processos que envolvem a degradação dos polímeros são os causados por calor (degradação térmica), luz (fotodegradação), radiação ionizante (degradação de rádio), ação mecânica ou por fungos, bactérias, leveduras, algas e suas enzimas (biodegradação). Existem muitos modos diferentes de degradação de polímero. Esses são

muito semelhantes, uma vez que todos envolvem reações químicas que resultam na cisão da ligação, sendo, então, descritos abaixo:

- **Degradação térmica:** a degradação térmica refere-se ao caso em que o polímero, a temperaturas elevadas, começa a sofrer alterações químicas sem o envolvimento simultâneo de outro composto.
- **Biodegradação:** a degradação biologicamente iniciada também está fortemente relacionada à degradação química no que se refere ao ataque microbiano. Os microorganismos produzem uma variedade de enzimas que são capazes de reagir com os polímeros naturais e sintéticos.
- **Degradação por radiação:** quando os materiais poliméricos são submetidos a radiação de alta energia (por exemplo, radiação gama) são observadas alterações na sua estrutura molecular, principalmente na cisão da cadeia, o que leva à redução na massa molar.
- **Degradação mecânica:** refere-se a efeitos macroscópicos provocados sob a influência das forças de cisalhamento. Essas forças resultam na formação de radicais macro que podem se recombinar na ausência de oxigênio. Na presença de oxigênio, podem ser formados radicais peroxi, o que leva à degradação das correntes poliméricas.
- **Fotodegradação:** é a degradação de uma molécula fotodegradável causada pela absorção de fótons, particularmente os comprimentos de onda encontrados na luz solar, como radiação infravermelha, luz visível e luz ultravioleta.

Além dos processos citados acima, outro que merece a atenção é a hidrólise que segundo Paoli (2008) consiste na reação de uma molécula de água com um determinado grupo químico, ocorrendo a quebra da ligação e adição de oxigênio e de hidroxila a cada um dos grupos remanescentes. Ela é desencadeada por processo químico comum ou por hidrolases (enzimas) e pode ser acelerada tanto em um meio ácido quanto em um básico.

2.3 DEGRADAÇÃO MECÂNICA

De acordo com Paoli (2008), o início da degradação de polímeros por esforço mecânico, ou pela aplicação de uma tensão mecânica, é um assunto com um sentido bastante amplo, pois compreende: os fenômenos de fratura, no qual o material é submetido apenas a tensão mecânica, o processamento, quando o esforço mecânico é aplicado ao mesmo tempo

que o aquecimento, e as modificações químicas induzidas pela tensão mecânica ou por cisalhamento combinado com reação química (extrusão reativa), que associa o aquecimento, a tensão mecânica e um reagente químico.

A forma como um polímero responde à aplicação de uma tensão mecânica dependerá da sua estrutura química, das interações intermoleculares, do tempo de aplicação da tensão, da temperatura e da história de processamento do polímero. O mesmo também sofre modificações químicas bem profundas cada vez que é aquecido, submetido a esforços de cisalhamento, fraturado, amolecido e moldado (PAOLI, 2008).

Os materiais poliméricos podem sofrer alterações no momento em que são submetidos à uma força aplicada ou tensão. As deformações se dão por cisalhamento simples (deformação pela mudança de forma, sem alterar o volume), por compressão ou dilatação (ocorre a variação do volume e não da forma) ou por uma combinação dos efeitos anteriores (há alteração da forma e do volume por aplicação simultânea de tensões tangenciais e normais) (PAOLI, 2008).

Quando um polímero é estirado a frio, ocorre o alinhamento das cadeias na direção do estiramento, e em seguida a ruptura (PAOLI, 2008). As evidências experimentais publicadas mostram que ligações próximas às extremidades da cadeia polimérica têm muito menos probabilidade de serem quebradas durante a degradação mecânica do que as ligações mais próximas do centro da cadeia (BOOTH, 1962).

Segundo Paoli (2008), durante a aplicação do esforço mecânico a temperatura ambiente o material pode ter o comportamento elástico reversível ou o escoamento viscoso que é irreversível. Em ambos, ocorre o alinhamento e extensão das cadeias poliméricas. Quando aplicada uma tensão o material começa a se deformar com um comportamento elástico e vai até o ponto em que a deformação é reversível. Após este ponto, as interações intermoleculares (forças que mantêm as macromoléculas unidas) começam a romper e a provocar o escoamento das cadeias na fase amorfa, e em seguida ocorre o rompimento de ligações químicas na cadeia principal. Assim, a tensão fornecida poderá atingir a barreira de potencial para que decorra a quebra de ligações químicas. Já quando o esforço mecânico acontece nas temperaturas acima da temperatura de amolecimento ou de fusão, parte da energia necessária para o rompimento das ligações químicas já foi fornecida na forma de calor, e a quebra de ligações químicas é mais favorecida.

Dependendo do grau de cristalinidade do material polimérico, o esforço físico poderá ser todo dissipado na fase amorfa, sem afetar a fase cristalina. O rompimento das ligações

químicas competirá com os processos de relaxação, de forma que um maior número de ligações químicas poderá ser rompido com o aumento de rigidez do material (PAOLI, 2008). Quando uma ligação química é submetida a um suficiente nível de tensão, ela romperá. Isto pode ocorrer num polímero reticulado, onde os pequenos segmentos de cadeia são fortemente estendidos à baixas extensões equivalentes, ou em um polímero altamente orientado, ou ainda possivelmente em uma situação de ruptura (ROSA, 1996). As reações de ruptura de ligações químicas induzidas por esforço mecânico não seguem um mecanismo comum. Este dependerá da morfologia, do estado físico do material, do modo e do tempo de imposição do esforço mecânico (PAOLI, 2008).

2.4 ENSAIOS

A evolução das propriedades mecânicas é comumente utilizada para avaliar a resistência à degradação de materiais poliméricos. (ROBINSON, et al., 2011). Segundo Lopes (2010), as propriedades mecânicas dos materiais são verificadas pela realização de ensaios cuidadosamente programados, que reproduzem, de forma confiável, as condições de serviço. Dentre os fatores a serem considerados nos ensaios incluem-se a natureza da carga aplicada (tração, compressão ou cisalhamento, com magnitude constante ou flutuante ao longo do tempo), a duração de aplicação dessa carga (pode ser de apenas uma fração de segundo ou, até mesmo, se estender por anos) e as condições ambientais (com ênfase na temperatura como fator de grande importância).

Os ensaios dos materiais podem ser classificados:

- 1) Quanto à integridade geométrica e dimensional da peça:
 - Destrutivos: quando após executados provocam a inutilização parcial ou total da peças (tração, dureza, fadiga, etc.);
 - Não-destrutivos: quando após executados não comprometem a integridade da peça (raios X, ultrassom, etc.).
- 2) Quanto à velocidade de aplicação da carga, os ensaios podem ser:

- Estáticos: quando a carga é aplicada de maneira suficientemente lenta, induzindo a uma sucessão de estados de equilíbrio, caracterizando um processo quase-estático. Nessa categoria têm-se os ensaios tração, compressão, flexão, torção e dureza.
- Dinâmicos: quando a carga é aplicada rapidamente ou ciclicamente. Nesse têm-se os ensaios de fadiga e de impacto.
- Carga constante: quando a carga é aplicada durante um longo período, que é o caso do ensaio de fluência.

Por conseguinte, é imprescindível que exista alguma consistência na maneira de conduzir os ensaios e na interpretação de seus resultados, a qual é obtida por meio do uso de técnicas de ensaio padronizadas (LOPES, 2010).

2.4.1 Impacto Axial

Quando o comportamento mecânico dos polímeros é especificado, principalmente sob aplicações estruturais, a resistência ao impacto é uma das propriedades mais requeridas. O quanto um material polimérico consegue aguentar choques acidentais pode decidir sobre o sucesso ou o fracasso do seu uso em uma determinada aplicação. Existem normas para padronizar os diferentes ensaios sob impacto, algumas sem correlação com o comportamento do material em uso e outras procurando simular tal comportamento. A maioria delas difere entre si pelo modo de solicitação e o conseqüente tipo de corpo de prova (HAGE JR., 2003).

De acordo com Hage Jr. (2003), a resistência ao impacto, apesar de ter grande importância no desempenho de um material polimérico, é uma das propriedades mecânicas menos confiáveis num processo de seleção destes materiais por não ser uma propriedade intrínseca do material. Mas de uma forma geral, bons projetos são obtidos utilizando dados de ensaios de impacto realizados sob condições que representam adequadamente as condições de serviço. Desta forma, dados de resistência ao impacto, obtidos através de ensaios padronizados podem ser usados como uma etapa inicial de seleção de um material polimérico, com base num nível desejado de tenacidade sob impacto.

As propriedades específicas dos polímeros, como o módulo de elasticidade, a tenacidade, a resistência ao impacto, entre outros, quantifica várias características mecânicas

tais como a rigidez, flexibilidade, fragilidade, etc. Como a tenacidade é uma propriedade que determina a capacidade de um material se deformar durante a sollicitação mecânica, então quando um material sofre o impacto, a tenacidade depende da força máxima que um material pode suportar o choque sem se romper. Esta força multiplicada pela deformação correspondente proporciona o valor de energia gasto para romper o corpo de prova, que representa o valor quantitativo da tenacidade sob impacto (HAGE JR., 2003).

Existem diferentes ensaios de impacto, sendo um deles os convencionais não-instrumentados, que determinam a resistência ao impacto através da energia necessária para romper um corpo de prova dividida pela sua espessura ou área de sua seção transversal. O outro tipo são os instrumentados, que se utilizam dos mesmos modos de sollicitação dos não-instrumentados, porém proporcionam curvas de força de impacto em função do tempo ou deformação de impacto. Com estas curvas é possível calcular outros parâmetros, como módulo de elasticidade sob impacto e tensão de escoamento sob impacto, além da energia de impacto (HAGE JR., 2003).

Segundo Hage Jr. (2003), várias variáveis devem ser consideradas durante os ensaios de impacto para caracterizar o comportamento de um material polimérico, dentre elas a temperatura do ensaio, a velocidade do impacto durante o teste, a sensibilidade a entalhes padronizados, a força com que o corpo de prova sofre o impacto, a geometria do corpo de prova, as condições de fabricação do corpo de prova, as condições ambientais do ensaio, etc. Para garantir que os ensaios sejam realizados sob sollicitação brusca, a velocidade de impacto deve ser superior a um valor mínimo.

2.4.1.1 Alguns parâmetros considerados para caracterizar as propriedades sob impacto

Alguns parâmetros devem ser considerados nos ensaios de impacto para que ele seja realizado sob condições adequadas. A temperatura é um deles. Se ela for extremamente baixa (abaixo da T_g), a resistência ao impacto é reduzida drasticamente, porém caso ela seja elevada (acima da T_g) a resistência ao impacto do plástico apresenta um aumento significativo, devido ao efeito dissipativo provocado pela mobilidade molecular do polímero. Na maioria dos casos, os componentes poliméricos são projetados para serem utilizados na temperatura ambiente (em torno de 20°C). Contudo, muitos materiais são utilizados em condições *outdoor*

e estas condições afetam o comportamento dos materiais poliméricos, pois alguns destes têm seu comportamento sob impacto bastante dependente da temperatura (HAGE JR., 2003).

Outro efeito significativo no comportamento do material polimérico sob impacto, seja ele um corpo de prova ou quando é atingido por um objeto, é a velocidade. Todos os materiais poliméricos possuem uma velocidade crítica acima da qual eles se comportam como materiais vítreos, ou seja, essencialmente frágeis. A escalada de velocidades envolvidas em solicitações comumente sofridas por ensaios ou produtos sob uso é demonstrada na figura 3 (HAGE JR., 2003).

Figura 3 - Velocidades típicas de algumas situações em que materiais sofrem impacto

Velocidades de Impacto (m/s)	Casos Típicos
3 - 300	Projétil de arma de fogo
330 - 3300	Saque em Tênis de Campo
33 - 330	Ensaio de Impacto Izod
0,033 - 0,33	Ensaio Convencionais de Tração

Fonte: Canevaloro Jr (2003), pg 368

Outros parâmetros importantes são a orientação molecular, o grau de cristalinidade e a massa molar. A primeira é introduzida durante o processo de estiramento de um filme ou de uma fibra polimérica e proporciona um aumento na resistência e/ou tenacidade do produto na direção da orientação molecular, quando comparadas com sistemas mais isotrópicos. Já o grau de cristalinidade quando tem sua porcentagem aumentada, diminui a resistência ao impacto e aumenta a probabilidade da ocorrência da fratura frágil. E uma redução na massa molar média do polimérico proporciona redução na resistência ao impacto (HAGE JR., 2003).

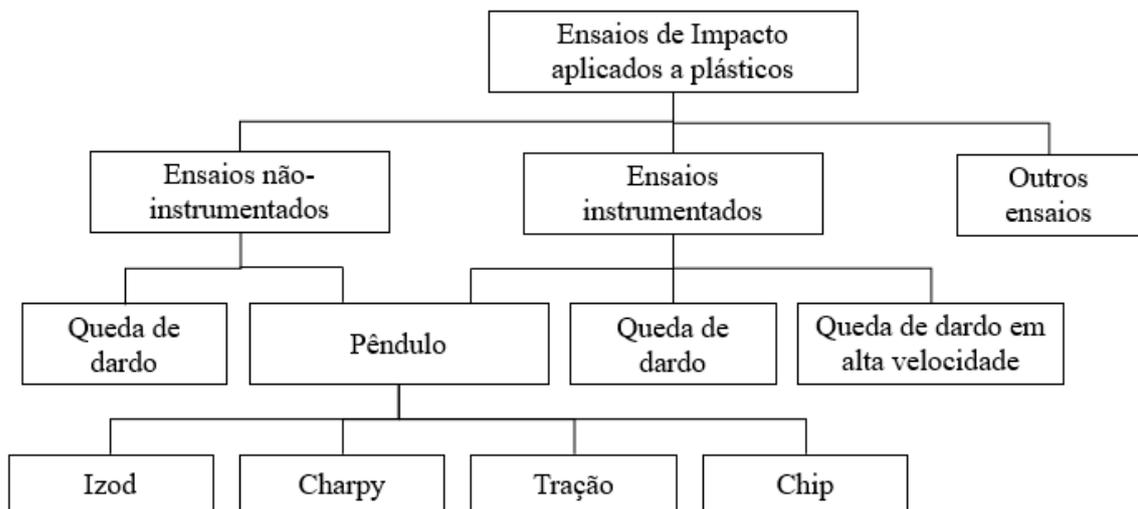
Outro item que deve ser considerado é o método de solicitação por impacto na peça ou no corpo de prova, pois afeta significativamente a resistência ao impacto. Por exemplo, corpos de prova que são ensaiados sob impacto utilizando martelo tipo pêndulo apresentam resultados bastante diferentes daqueles obtidos em sistemas tais como queda de dardo ou discos e placas. Por fim, o último item que será considerado e citado aqui é o condicionamento dos corpos de prova, visto que alguns materiais absorvem bastante umidade.

Poliamidas, como Náilon 6, poliésteres termoplásticos, como PET, policarbonato, entre outros, são plásticos muito sensíveis a absorção de umidade e podem mudar seu comportamento mecânico. Portanto, é necessário controlar muito bem a umidade do ambiente do ensaio (HAGE JR., 2003).

2.4.1.2 Tipos de ensaio de impacto

Segundo Hage Jr. (2003), o carregamento de impacto tem sido aplicado usando martelos, dardos e projéteis atrelados a pêndulos, a queda livre e a tiros, respectivamente. Sobre como escolher qual método de ensaio utilizar, não existe um consenso geral para saber qual é o mais adequado para definir o comportamento do material polimérico sob impacto. Apesar da complexidade, os ensaios de impacto podem ser divididos em 3 classes principais e subdivididos em diferentes modos de solicitação, como mostra a figura 4.

Figura 4 - Esquema mostrando os diferentes tipos de ensaios padronizados sob impacto para plásticos



Fonte: Canevaloro Jr. (2003), pg 373

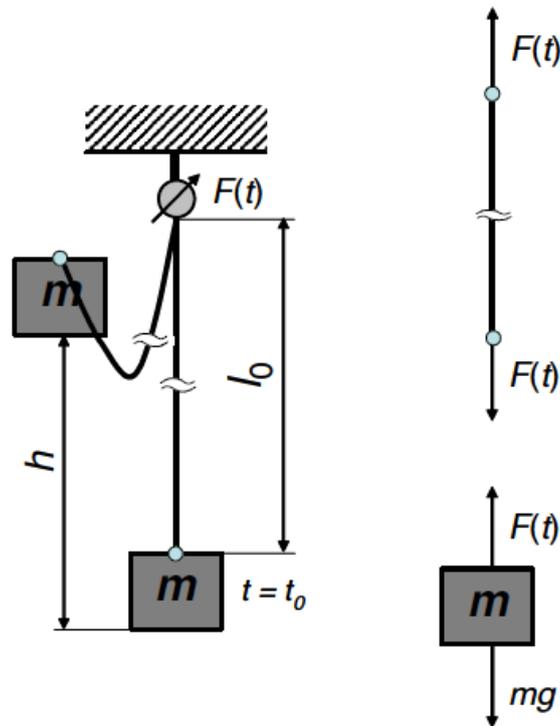
Os ensaios com pêndulos não se adequariam para serem realizados em fibras sintéticas, portanto, não serão tratados nas próximas seções.

2.4.1.2.1 Ensaios de impacto através de queda de peso

Este tipo de ensaio é baseado na queda livre de um peso pré-determinado sobre o corpo de prova a uma altura padronizada, como mostrado na figura 5, e com isso é descoberta a energia necessária romper o material. Então a energia potencial é calculada multiplicando o peso do projétil pela altura da queda (HAGE JR., 2003). É interessante notar que a energia de impacto é resultado da relação da massa e da altura de queda, enquanto que a velocidade de impacto depende apenas da altura de queda (JANG, et al., 1992). A maior vantagem deste tipo de teste sob impacto sobre aqueles utilizando máquina pendular é sua habilidade em reproduzir tensões multiaxiais no corpo de prova sob impacto e mede a tenacidade próxima aquela observada sob uso real. Além dessa vantagem, os corpos de prova podem ser testados em diferentes tamanhos e formas. Este tipo de ensaio sob impacto é também bastante adequado para teste de placas, chapas, laminados e filmes de plásticos. Porém, uma grande desvantagem é o número exagerado de corpos de prova para se estabelecer o nível de energia necessário para romper a amostra por impacto (HAGE JR., 2003).

Existem diversos modelos de equipamentos para a realização destes testes, onde a diferença entre eles é basicamente relativa à base de fixação dos corpos de prova. Há também testes de queda de peso em que uma massa é deixada cair em queda livre de alturas pré-determinadas, e é observado se o corpo de prova sofre a ruptura ou não. Neste caso a resistência ao impacto é obtida estatisticamente, ou seja, ela é determinada quando a energia potencial do peso, escolhida, romper 50% dos corpos de prova ensaiados. A resistência ao impacto de um corpo de prova, medida através queda de peso é diretamente proporcional à sua espessura. Se esta aumenta, a energia requerida para fraturar o corpo de prova também é elevada (HAGE JR., 2003).

Figura 5 - Representação de massa em queda livre



Fonte: Emri, et al., (2008), pg 209

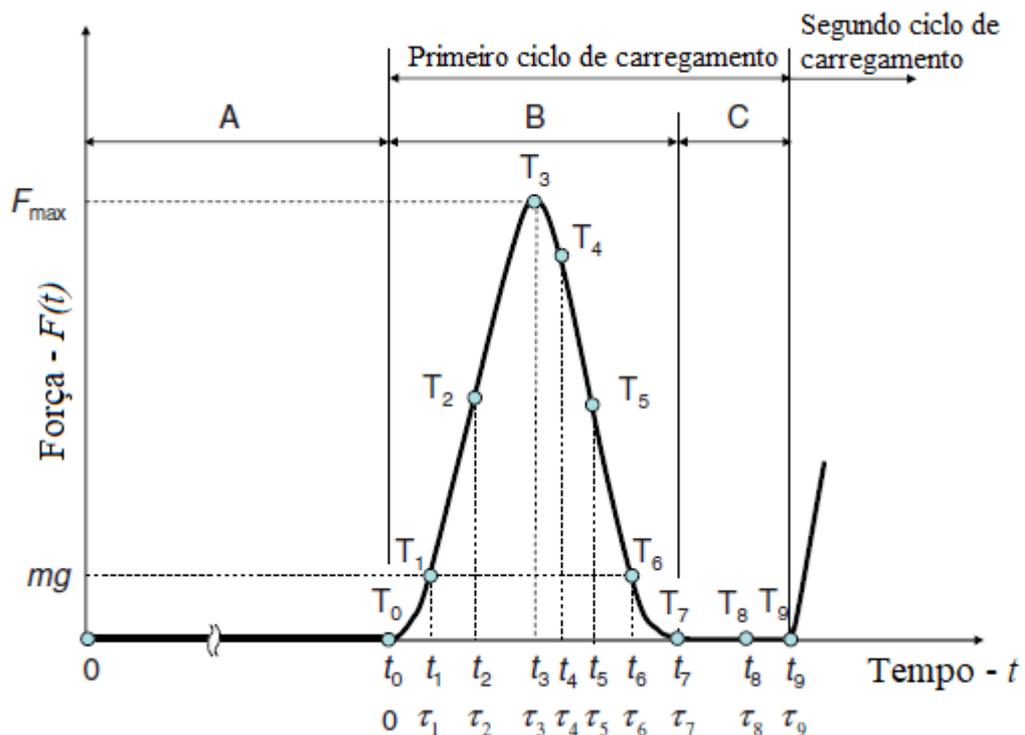
2.4.1.2.2 Ensaios de Equipamentos Instrumentados

Uma das principais características dos ensaios de impacto, é que os ensaios convencionais oferecem apenas a energia total de impacto, não sendo possível fornecer dados quantitativos como o grau de ductilidade, o valor da tenacidade dinâmica, o processo da fratura, as tensões de escoamento sob impacto e principalmente o comportamento dos corpos de prova a qualquer instante durante o evento do impacto. Estas limitações dificultam um entendimento melhor do comportamento do material durante o ensaio sob impacto e para superá-las foram desenvolvidos os ensaios de impacto instrumentados. Neste tipo de teste é colocada uma célula de carga no equipamento que registra continuamente a força exercida sobre o corpo de prova durante o espaço de tempo de impacto. Os dados resultantes formam uma curva de carga (força) *versus* tempo ou carga *versus* deflexão e podem ser utilizados para

determinar o tipo de falha, a carga máxima atingida no processo de ruptura e a quantidade de energia requerida para fraturar o corpo de prova (HAGE JR., 2003).

Em um ensaio instrumentado realizado através do método da queda de peso, com um teste igual ao da figura 5, um exemplo de gráfico força *versus* tempo é o da figura 6.

Figura 6 - Exemplo de gráfico de força *versus* tempo de teste de queda livre de peso



Fonte: Adaptado de Emri, et al., (2008), pg 210

O gráfico acima é de força em função do tempo de um peso em queda livre e ele mostra as três fases que acontecem no teste. Na fase A a carga é liberada em queda livre e o corpo de prova tem carregamento nulo até o cabo estar totalmente esticado em t_0 onde a velocidade atinge a velocidade de impacto v_0 . Entre os tempos t_0 e t_7 ocorre a fase B onde o carregamento é máximo e acontece o processo de deformação. Por fim, na fase C, a massa tem um movimento livre e o carregamento no cabo é nulo.

Algumas conclusões interessantes foram encontradas por diferentes autores em relação a ensaios de impacto em polímero. Vogwell e Minguez (2007) constataram que em testes de queda de carga em cordas de escalada, a rigidez aumenta ligeiramente nas cordas após estas

serem submetidas a quedas sucessivas em tempos de recuperação variados. E que as forças axiais de impacto aumentaram (quase dobrando) ao usar cordas antigas. Foi constatado também que era desejável ter maior flexibilidade na corda de escalada (o que minimiza possíveis cargas de choque) ao invés utilizar cordas com maior força.

Signoretti (2001) pesquisou sobre a utilização de cordas de poliamida molhadas, verificando que no primeiro ensaio de impacto ocorria um aumento de 5 a 10% na força de impacto em comparação ao seu estado seco, concluindo que isso ocorria em função das forças de atrito entre as fibras, causadas pela absorção de água. Por fim, Louzada (2018) constatou que a vida em fadiga de fibras de poliéster é reduzida quando os multifilamentos são submetidos a uma elevada carga de impacto.

2.4.1.2.3 Ensaio de Impacto em Elevadas Velocidades

Os métodos de ensaios convencionais não conseguem simular de forma real peças que são submetidas em condições reais a altas velocidades (como as peças de um automóvel que sofre um acidente). Para suprir esta deficiência foram desenvolvidos os ensaios de elevada velocidade que conseguem representar as condições reais de ruptura por impacto (HAGE JR., 2003).

2.4.2 Ensaio de tração

De acordo com Canto e Pessan (2003), a “Máquina Universal de Ensaio” é um aparelho que executa os ensaios de tração, flexão e compressão. Ela é um arranjo constituído por duas travessas (uma fixa e a outra móvel), uma célula de carga, um mecanismo de direcionamento, acessórios de afiação dos corpos de prova e extensômetros. Deve possuir a capacidade de manter velocidades constantes em um intervalo de 1 a 500 milímetros/segundo, com uma tolerância pequena de erro. A célula de carga, que possui capacidade normalmente para 0,5 kN, 5 kN e 50 kN, registra a carga durante o ensaio e precisa ter uma precisão maior que 99% do valor real da carga.

Para os ensaios de tração, são acoplados às travessas fixa e móvel, os dispositivos de afiação dos corpos de prova, as chamadas garras, que devem apresentar acionamento manual

ou pneumático. Em ensaios que exijam uma precisão do deslocamento elevada, os extensômetros medem a deformação do polímero durante o ensaio. Caso o teste necessite de uma precisão menor, esta pode ser medida pelo deslocamento da travessa móvel em relação à fixa (CANTO; PESSAN, 2003).

No ensaio de tração, submete-se um corpo de prova a um esforço, que tende a alongá-lo até a sua ruptura. Os esforços ou cargas aplicadas ao mesmo são medidas na própria máquina de ensaio. Geralmente, este ensaio é realizado utilizando-se um corpo de prova de formas e dimensões padronizadas, para que os resultados obtidos possam ser comparados, ou, dependendo da finalidade do ensaio, suas informações possam ser usadas tecnicamente (FREDERL, et al., 2015).

Através dos ensaios de tração são conhecidos como os materiais reagem aos esforços de tração, quais os limites de tração que suportam e a partir de que momento se rompem.

2.5 ESTATÍSTICA

Quando testes são realizados, é comum que um ou mais dos dados coletados difiram demasiadamente do seu conjunto. Esses valores discrepantes são chamados de *outliers* ou valores atípicos (OLIVEIRA, 2008). Sua detecção é primordial em uma investigação exploratória de um conjunto de observações, pois eles têm o poder de influenciar os resultados de uma análise mais do que as outras observações envolvidas, podendo afetar consideravelmente nas conclusões da pesquisa (MATTOS, et al, 2017). Em algumas situações este valor é tão diferente dos demais que pode ser excluído de maneira intuitiva, em outras utilizam-se técnicas estatísticas para decidir se esses dados devem ou não ser rejeitados (OLIVEIRA, 2008).

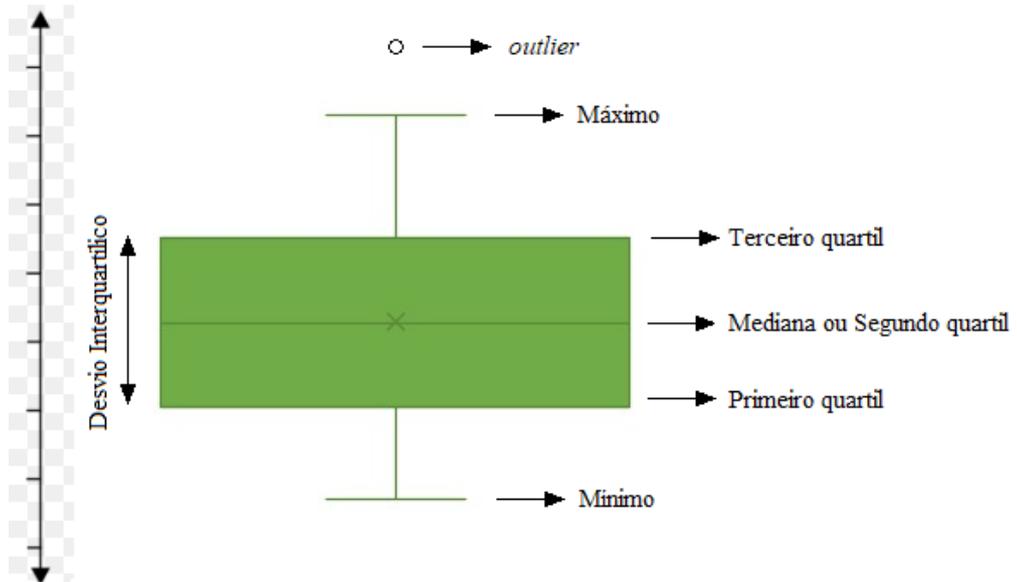
A técnica estatística utilizada com maior frequência entre as análises exploratórias para detectar a presença de valores atípicos, sendo a usada nesta pesquisa, é a que emprega medidas baseadas na ordenação das observações: primeiro quartil (Q_1), terceiro quartil (Q_3), mediana (Md ou Q_2) e desvio interquartilico (dq), além de valores mínimo e máximo. Caso uma observação seja maior que $Q_3 + 1,5dq$ ou menor que $Q_1 - 1,5dq$, ela pode ser considerada como suspeita de ser um *outlier*, contudo, se ela for superior a $Q_3 + 3dq$ ou inferior a $Q_1 - 3dq$ ela será um *outlier* (MATTOS, et al., 2017). Existem ainda outras

técnicas analíticas que também podem ser usadas para essa finalidade, como o teste de Dixon e o teste de Grubbs, porém elas não são abordadas neste trabalho.

A mediana é a realização que ocupa a posição central da série de observações, deixando 50% destas abaixo dela e 50% acima. Da mesma forma, o primeiro quartil (25º percentil) deixa 25% das observações abaixo dele e 75 % acima, enquanto que o terceiro quartil (75º percentil) deixa 75% das observações abaixo dele e 25% acima. Já o desvio interquartil, ou distância interquartil, é a diferença entre o terceiro e o primeiro quartis (BUSSAB; MORETTIN, 2010).

Para visualizar essa análise estatística de retirada de *outliers*, podem ser utilizados métodos gráficos. De acordo com Mattos, et al. (2007), o *box plot* é bastante útil, visto que fornece uma ideia da assimetria, tendência central, dispersão e presença de valores atípicos. Utiliza das mesmas medidas tratadas nesta seção e, depois de adotar uma escala para o eixo vertical, pode ser desenhado traçando uma caixa de qualquer largura, com base no primeiro quartil e topo no terceiro quartil, onde, na parte mais central, uma linha horizontal mais grossa indica a altura da mediana. Na região inferior (primeiro quartil), traça-se uma linha perpendicular, para baixo, que vai até o comprimento máximo de $1,5dq$ ou até o menor valor das variáveis, caso esse estiver a uma distância inferior a $1,5dq$. Acima é feito da mesma forma a partir do terceiro quartil, com uma linha máxima de $1,5dq$ ou ir até o maior valor das variáveis.

Quando existirem *outliers* eles serão plotados fora da área de abrangência do gráfico, sendo que se estiverem a uma distância entre $1,5dq$ e $3dq$, são plotadas como $^{\circ}$ (possível *outlier*), e caso estejam abaixo de $3dq$ do primeiro quartil ou acima de $3dq$ do terceiro quartil eles são representados por * (*outlier*) (MATTOS, et al., 2007). Uma representação modelo de um *box plot* se encontra na figura 7.

Figura 7 - Exemplo de um *box plot*

Fonte: A autora.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

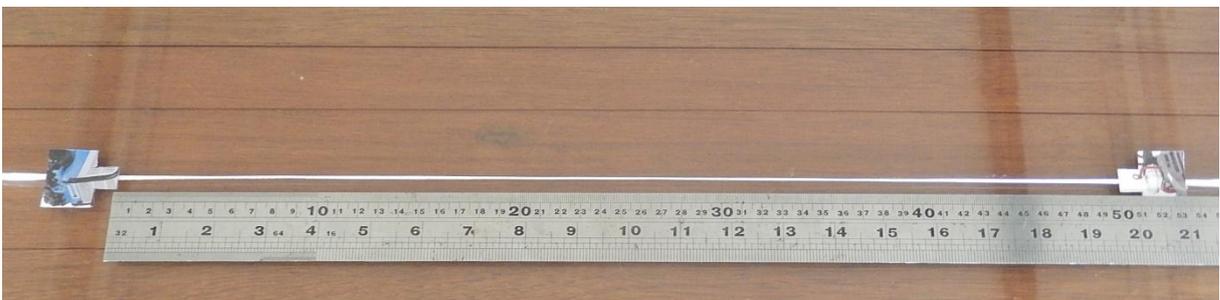
Com o propósito principal de observar e avaliar a resistência à ruptura em fibras sintéticas após um carregamento de impacto, a pesquisa passa por algumas etapas para que se possa alcançar a meta, sendo essas discutidas nas seções a seguir.

3.1 SELEÇÃO DE MATERIAIS E PREPARO DAS AMOSTRAS

Para a seleção dos materiais, sabendo que o propósito é analisar o quanto o impacto afeta as fibras sintéticas em geral, o coerente foi escolher as que apresentam algumas diferenças entre si, e, dentre outros, os aspectos cruciais nessa determinação é a rigidez e a resistência do material à ruptura. Baseado nisso, os multifilamentos utilizados neste trabalho são o poliéster, o LCP, a aramida e dois tipos de HMPE. Por uma questão de confidencialidade o fabricante de nenhum material é revelado, e o HMPE, por ter mais de um tipo, será tratado como HMPE 1 e HMPE 2.

Os corpos de prova são preparados com um comprimento de 500 mm e possuem terminações do tipo “sanduíche”, demonstrados na figura 8, que são ideais para que o fio não escorregue na garra da máquina. Para as condições de ensaio utilizam-se as recomendações da norma ISO 139:2014, que estabelece que as amostras devem ficar por no mínimo duas horas em um ambiente com temperatura de $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa do ar de $65\pm 4^{\circ}\text{C}$.

Figura 8 - Corpos de prova de 500 mm com terminação “sanduíche”



Fonte: A autora

3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A primeira etapa dos testes consiste na tração em materiais virgens. Para obter a força média de ruptura em tração, 30 amostras de cada material, não torcidas, são testadas em uma máquina Emic DL2000. Seguindo a norma ASTM D885:2014, uma pré-tensão de 1 N é aplicada nas amostras antes do início do ensaio de ruptura, com velocidade constante de 250 mm/min.

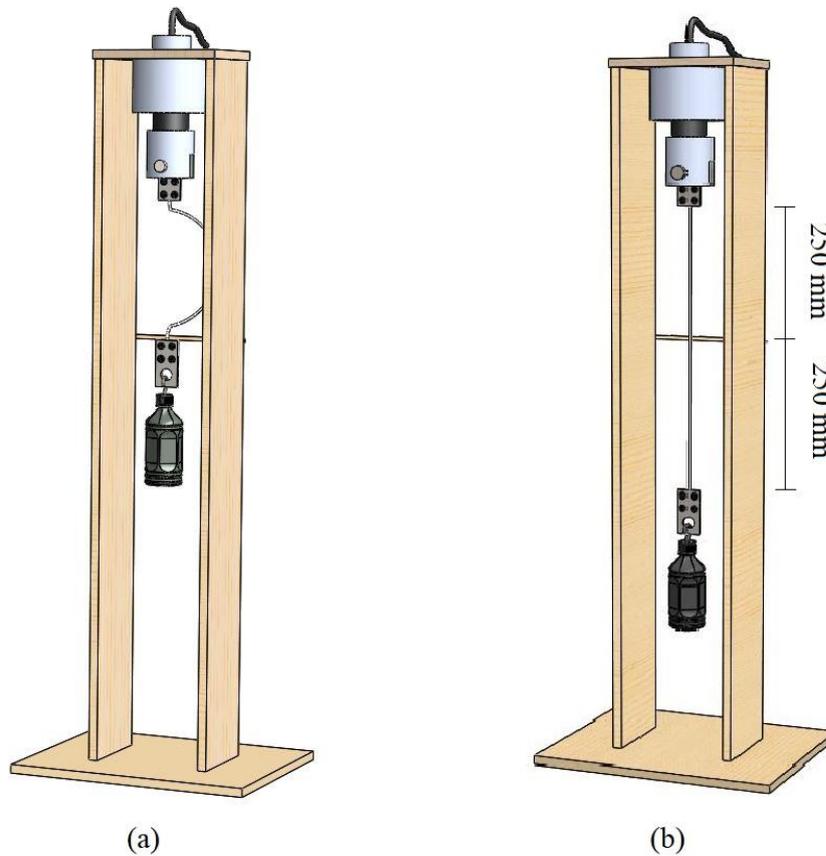
Posteriormente, são realizados os ensaios de tração com amostras submetidas ao impacto. Nesse estágio foram preparados 30 corpos de prova, sem torção, de cada material, que são submetidos a diferentes carregamentos súbitos, com peso em queda livre a partir de uma altura pré-determinada de 250 mm. Os testes iniciam-se com massas equivalentes à 3% do YBL de cada fibra, e depois, enquanto o limite de resistência ao impacto não é atingido, aumenta-se 2% do peso e são realizadas novas experimentações com uma nova bateria de amostras.

Duas condições relacionadas ao tempo de repouso após o ensaio de impacto são estudadas:

- em um primeiro momento o impacto é realizado na amostra e 1 minuto e 30 segundos depois (tempo para retirada da amostra das plaquetas que prendem o sanduíche no ensaio de carregamento direto) executa-se o teste de tração neste corpo de prova;
- a segunda condição consiste em realizar o choque na amostra e 24 horas após efetuar o teste de tração. Durante esse tempo as amostras foram mantidas em ambiente controlado de acordo com a norma ISO 139:2014.

Para saber os valores das forças de impacto uma célula de carga foi acoplada ao dispositivo de teste como é mostrado na figura 9.

Figura 9 - Dispositivo para teste de impacto com célula de carga



Fonte: A autora

3.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Além da observação e exclusão dos *outliers* e do *box plot* que foi tratado na seção 2.6, são ainda avaliadas as médias e o desvio padrão das amostragens. De acordo com Bussab e Morettin (2010) a média aritmética (\bar{x}) pode ser escrita com o:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

Onde n são os valores da variável X . Já o desvio padrão ($dp(X)$) é definido como a raiz quadrada positiva da variância ($var(X)$), portanto temos:

$$var(X) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n} \quad (2)$$

$$dp(X) = \sqrt{var(X)} \quad (3)$$

E, resumindo, as análises exploratórias utilizadas para retirar os valores atípicos são:

- Primeiro Quartil (Q_1): 25º percentil;
- Terceiro Quartil (Q_3): 75º percentil;
- Mediana ou Segundo Quartil (Md ou Q_2): 50º percentil;
- Desvio interquartilico (dq): $Q_3 - Q_1$;
- Limite inferior: abaixo de $Q_3 - 1,5dq$ (possível *outlier*) ou de $Q_3 - 3dq$ (*outlier*);
- Limite superior: acima de $Q_3 + 1,5dq$ (possível *outlier*) ou de $Q_3 + 3dq$ (*outlier*);

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão aplicados os conceitos e métodos vistos até o momento e discutido os seus resultados.

4.1 ENSAIOS DE TRAÇÃO NAS FIBRAS VIRGENS

Como explicado anteriormente na seção 3.2, nesta fase utilizam-se 30 corpos de prova sem torção de cada material e o tratamento estatístico de retirada de *outliers* não é empregado. Os valores das médias na força máxima, na deformação específica e no alongamento, bem como, o desvio padrão de cada material, são demonstrados na tabela 1.

Tabela 1 - Resultados dos testes de resistência a tração nos materiais virgens

Fibra sintética	Média da Força Máxima (N)	Desvio Padrão Força Máxima (N)	Média da Deformação Específica na Força Máxima (%)	Média do Alongamento na Força Máxima (mm)
Poliéster	251,18	4,13	10,85	54,28
LCP	375,16	5,53	3,30	16,49
Aramida	509,26	10,81	2,89	14,44
HMPE 1	535,79	26,65	3,28	16,42
HMPE 2	541,85	17,03	3,17	15,79

Fonte: A autora

Pode ser observado na tabela 1, que o Poliéster é a fibra com menor média de força na ruptura, porém com maior alongamento e menor desvio padrão, mostrando elevada estabilidade nos testes. O LCP possui o valor do alongamento similar aos outros materiais, contudo com uma resistência à ruptura consideravelmente inferior. Os outros três multifilamentos possuem um alongamento baixo e parecido, sendo que o HMPE 2 apresenta uma resistência à ruptura na tração superior as demais e o HMPE 1 exibe maior inconstância nos testes.

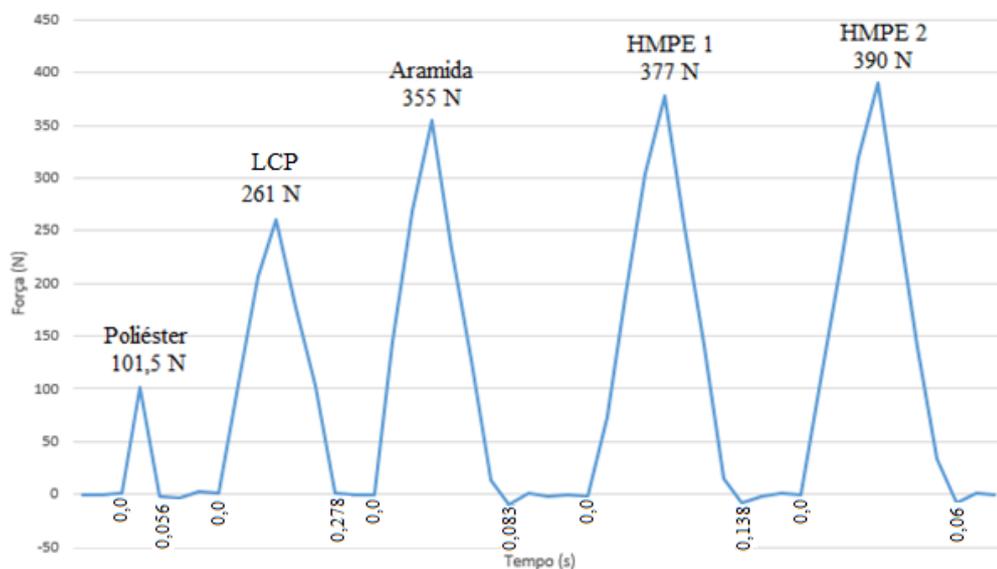
4.2 ENSAIOS DE TRAÇÃO NAS FIBRAS APÓS CARREGAMENTO DE IMPACTO

Esta etapa é dividida em dois momentos, nos quais em ambos são preparadas 30 amostras, não torcidas, para os cinco materiais. Primeiramente realizam-se os testes de impacto seguido de tração quase que instantaneamente. Subsequente, são efetuados os carregamentos diretos e somente 24 horas após o teste de tração é executado. Nas próximas seções estas duas etapas são abordadas detalhadamente.

4.2.1 Carregamento de impacto seguido de teste de tração

Com as condições do ambiente seguindo a ISO 139:2014, as amostras permanecem duas horas em temperatura e umidade controladas. Após esse período os testes de impacto são realizados e a fibra é rapidamente retirada da plaqueta e posta no teste de tração. Inicialmente utiliza-se uma carga de 3% do YBL dos materiais, sendo o comportamento e o valor médio de força de impacto alcançados neste percentual de peso para as fibras demonstrados na figura 10.

Figura 10 - Comportamento ao carregamento direto e força máxima média atingida com 3% de carga para todas as fibras sintéticas



Fonte: A autora

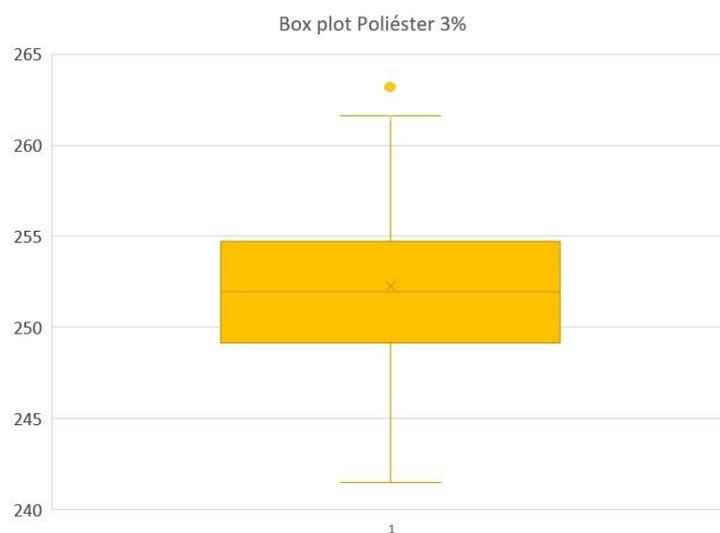
Após o dano com a carga de 3% no impacto, todas as fibras, com exceção do LCP que apresenta uma degradação amena, porém visível, continuam com aparência normal e sem multifilamentos arrebitado. Além disso, nenhum corpo de prova rompe durante o carregamento direto. Nesta fase aplica-se o método para excluir os *outliers*, caso existam, sendo as observações encontradas demonstradas na tabela 2, e os respectivos *box plots* que se encontram nas figuras 11, 12, 13, 14 e 15.

Tabela 2 - Valores utilizados na análise estatística e na preparação do *box plot*, com carregamento direto de 3% do peso da resistência à ruptura na tração para cada material

Material	Primeiro Quartil (N)	Terceiro Quartil (N)	Mediana (N)	Desvio interquartilico (N)	$Q_3 - 1,5dq$ (N)	$Q_3 + 1,5dq$ (N)	$Q_3 - 3dq$ (N)	$Q_3 + 3dq$ (N)
Poliéster	249,17	254,51	251,97	5,34	241,16	262,52	233,15	270,53
LCP	366,57	378,44	371,83	11,86	348,78	396,23	330,99	414,02
Aramida	488,40	511,56	493,70	23,16	453,67	546,29	418,94	581,02
HMPE 1	535,42	574,16	549,91	38,74	477,32	632,26	419,22	690,36
HMPE 2	526,79	561,81	552,45	35,02	474,26	614,34	421,73	666,87

Fonte: A autora

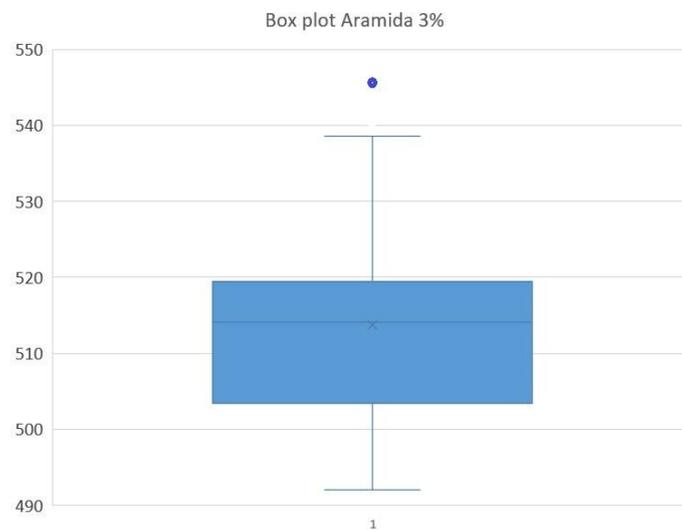
Figura 11 - *Box plot* do Poliéster utilizando impacto de 3% do YBL



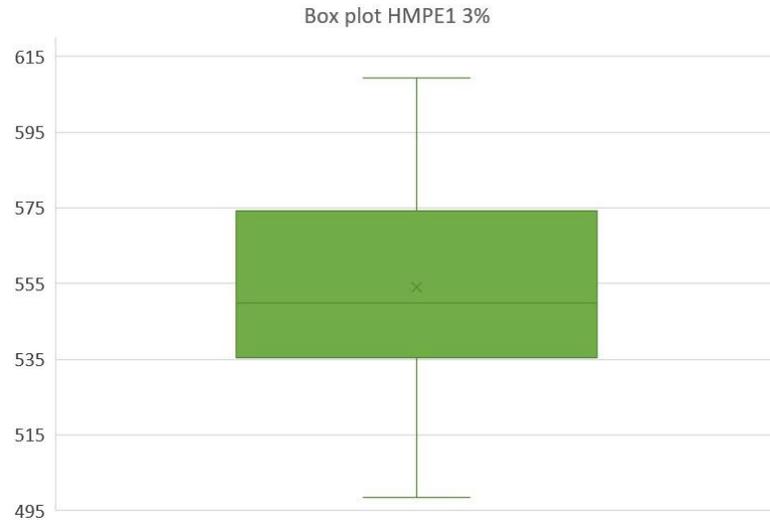
Fonte: A autora

Figura 12 - *Box plot* do LCP utilizando impacto de 3% do YBL

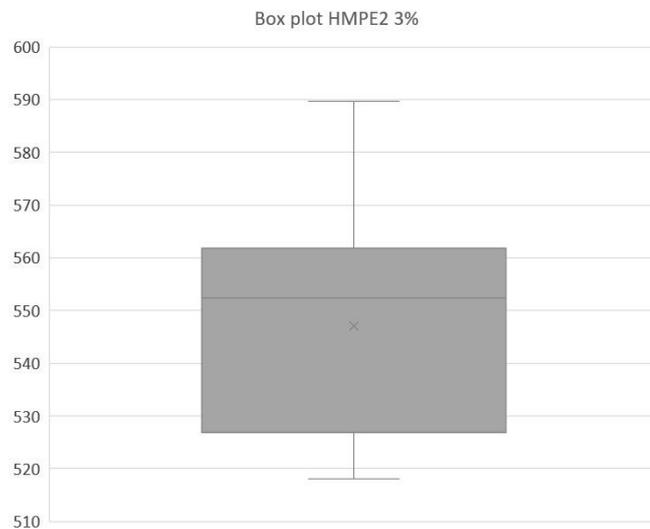
Fonte: A autora

Figura 13 - *Box plot* da Aramida utilizando impacto de 3% do YBL

Fonte: A autora

Figura 14 - *Box plot* do HMPE 1 utilizando impacto de 3% do YBL

Fonte: A autora

Figura 15 - *Box plot* do HMPE 2 utilizando impacto de 3% do YBL

Fonte: A autora

Analisando os *box plots*, pode-se observar que houve uma suspeita de valor atípico no Poliéster e outra na Aramida. Para garantir maior precisão na pesquisa, estas variáveis foram excluídas. Os resultados aos testes de resistência à ruptura na tração posterior ao impacto de 3%, já com o tratamento estatístico, estão expostos na tabela 3.

Tabela 3 - Resultados dos testes de resistência a tração após teste de impacto com 3% da carga da resistência à ruptura na tração para cada material

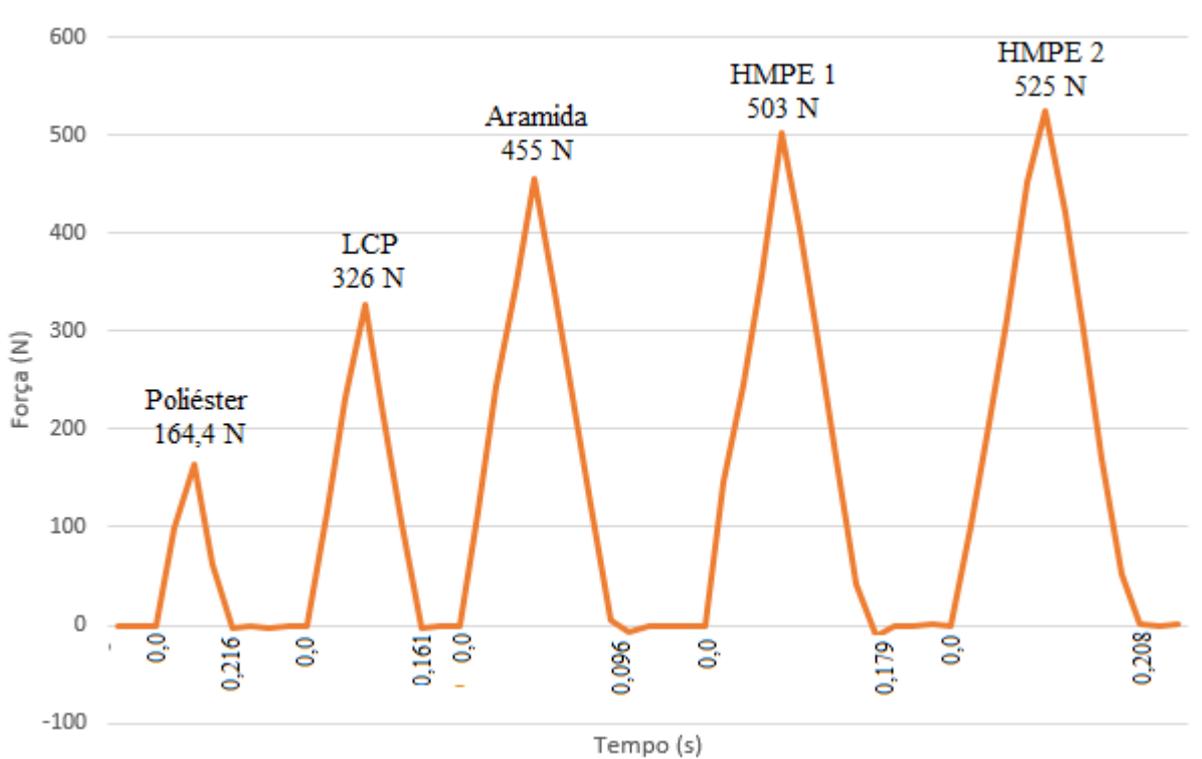
Fibra sintética	Média da Força Máxima de Impacto (N)	Quantidade de Outliers encontrados e excluídos	Média da Força Máxima de Tração do Material Virgem (N)	Média da Força Máxima de Tração após Impacto de 3% de carga (N)	Desvio Padrão Força Máxima Impacto 3% (N)	Média da Deformação Específica na Força Máxima (%)	Média do Alongamento na Força Máxima (mm)
Poliéster	101,5	1	251,18	251,91	4,71	10,33	51,66
LCP	261	0	375,16	371,61	8,64	3,31	16,54
Aramida	355	1	509,26	512,70	11,32	3,07	15,34
HMPE 1	377	0	535,79	554,01	29,49	3,23	16,18
HMPE 2	390	0	541,85	547,15	19,48	3,21	15,99

Fonte: A autora

Realizando um comparativo desses resultados com os que são obtidos nos materiais virgens, mostrados na tabela 1, pode-se constatar que todos os materiais têm um aumento do desvio padrão, ou seja, seus resultados são mais instáveis. O LCP, como citado anteriormente, sofre uma pequena degradação tendo alguns dos seus multifilamentos rompidos, o que explica a diminuição da resistência à ruptura na tração. Esta aumenta nos demais materiais, sendo no poliéster e na aramida de forma quase imperceptível, no HMPE 2 mais significativo e o HMPE 1 de forma considerável, contudo dentro do seu desvio padrão. Em relação à média da deformação específica e do alongamento na força máxima não ocorrem mudanças que podem ser consideradas.

Novos testes são realizados utilizando 5% do YBL de cada fibra sintética. Com este percentual descobre-se o limite de resistência ao impacto do HMPE 1, da aramida e do LCP, pois, de acordo com Hage Jr. (2003), se mais da metade dos corpos de prova rompem com determinada carga, esta é o limite. A tabela 8, ao final dessa seção, apresenta mais detalhes sobre o limite de resistência ao impacto encontrado para cada material. O comportamento e o valor médio de força de impacto atingidos com o carregamento de %, estão expostos na figura 16.

Figura 16 - Comportamento ao carregamento direto e força máxima média atingida com 5% de carga para todas as fibras sintéticas



Fonte: A autora

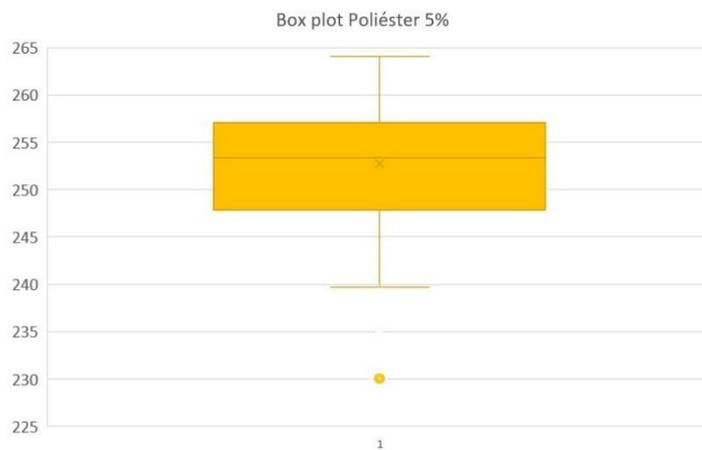
Posterior ao carregamento súbito, o poliéster e o HMPE 2 são as fibras sintéticas aptas para análise, sendo que o segundo tem alguns corpos de prova rompidos, contudo, como essa porcentagem não chega a 50%, os 30 corpos de prova que não rompem são testados. Visualmente, poucas das amostras aptas do HMPE 2 possuem uma degradação amena, enquanto a maioria, assim como todas do poliéster, dispõe de todos os seus multifilamentos intactos. Aplica-se o método para excluir os valores atípicos, em que os resultados se encontram na tabela 4, seguido dos correspondentes *box plots* expostos nas figuras 17 e 18.

Tabela 4 - Valores utilizados na análise estatística e na preparação do *box plot*, com carregamento direto de 5% do peso da resistência à ruptura na tração para cada material

Material	Primeiro Quartil (N)	Terceiro Quartil (N)	Mediana (N)	Desvio interquartilico (N)	$Q_3 - 1,5dq$ (N)	$Q_3 + 1,5dq$ (N)	$Q_3 - 3dq$ (N)	$Q_3 + 3dq$ (N)
Poliéster	249,26	257,22	254,07	7,97	237,31	269,17	225,36	281,12
HMPE 2	528,76	561,69	540,71	32,92	479,38	611,07	430,00	660,45

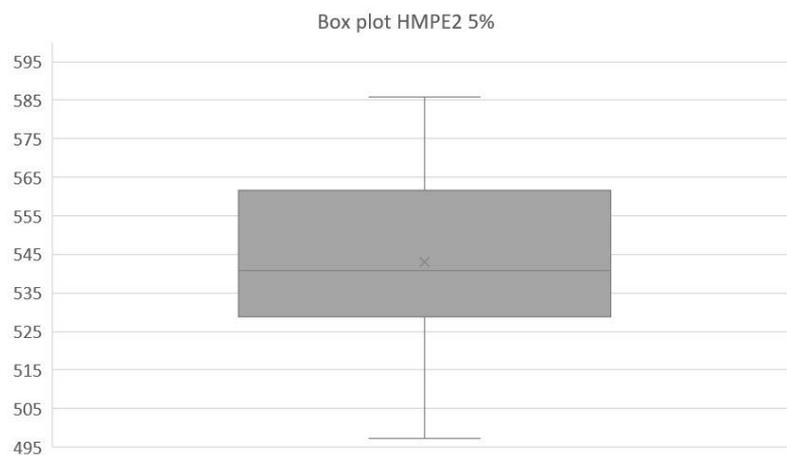
Fonte: A autora

Figura 17 - *Box plot* do Poliéster utilizando impacto de 5% do YBL



Fonte: A autora

Figura 18 - *Box plot* do HMPE 2 utilizando impacto de 5% do YBL



Fonte: A autora

Observando as figuras 17 e 18 nota-se uma suspeita de *outlier* no *box plot* do poliéster, e, seguindo a linha de ter uma maior exatidão nos resultados, esse valor é excluído. Com a abordagem estatística aplicada, os valores dos testes de resistência à ruptura na tração posterior ao impacto de 5% se encontram na tabela 5.

Tabela 5 - Resultados dos testes de resistência a tração após teste de impacto com 5% da carga da resistência à ruptura na tração para o poliéster e o HMPE 2

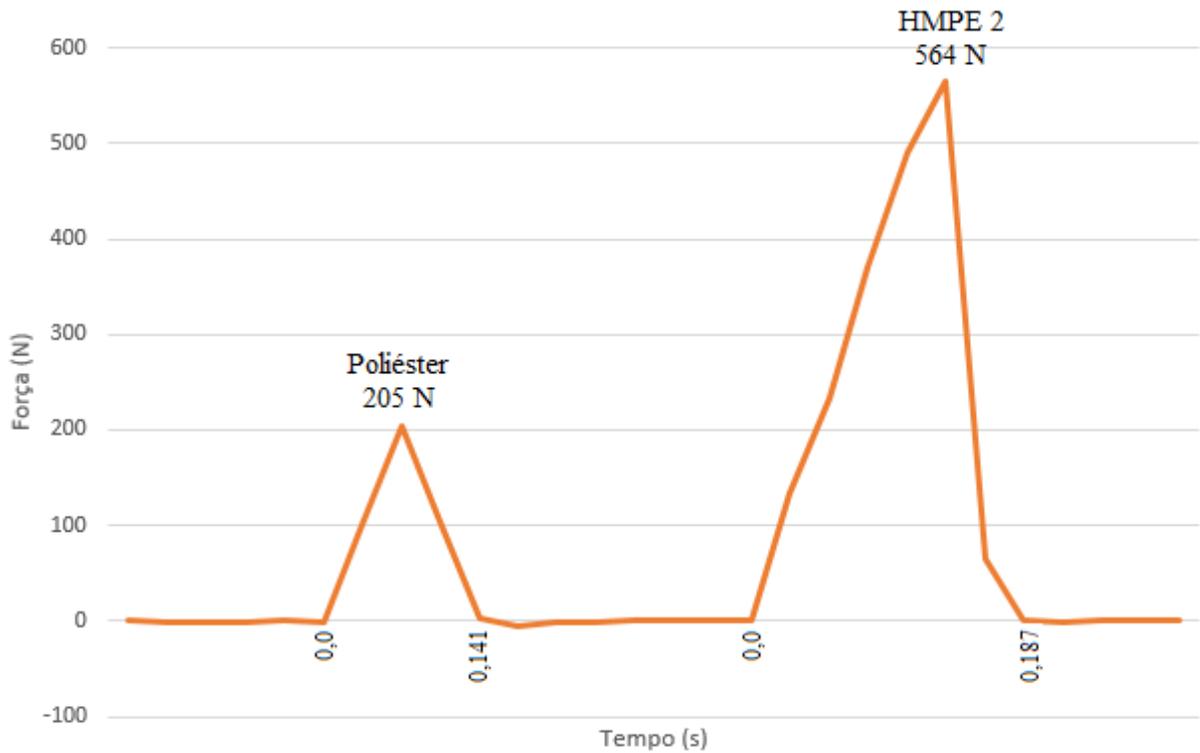
Fibra sintética	Média da Força Máx de Impacto (N)	Quantidade de Outliers encontrados e excluídos	Quantidade de amostras rompidas	Quantidade de amostras testadas	Média da Força Máxima de Tração após Impacto de 3% de carga (N)	Média da Força Máxima de Tração após Impacto de 5% de carga (N)	Desvio Padrão da Força Máxima com 5% de Impacto (N)	Média da Deformação Específica na Força Máxima (%)	Média do Alongamento na Força Máxima (mm)
Poliéster	164,4	1	0	30	251,91	253,53	5,72	10,54	52,67
HMPE 2	525	0	24	30	547,15	542,92	21,82	3,16	15,79

Fonte: A autora

Pode-se observar que, com relação aos resultados obtidos com um carregamento de 3% do YBL, mostrados na tabela 3, o desvio padrão segue aumentando quando se utiliza uma carga mais elevada. O HMPE 2 tem uma queda na média da força máxima de tração comparada à carga de 3%, contudo isso provavelmente se deve ao fato de alguns corpos de prova possuírem um pequeno número de seus multifilamentos rompidos no impacto de 5%. O poliéster apresenta, novamente, um aumento ameno na sua resistência à tração. Os valores da média da deformação específica e do alongamento máximo não sofreram alterações relevantes.

Seguindo o planejamento, é efetuado um aumento de 2% na carga, sendo agora utilizados carregamentos com o percentual de 7% do YBL do poliéster e do HMPE 2. Este último tem todos os seus corpos de prova rompidos nesta carga, de forma que mais detalhes são dados na tabela 8. Na figura 19 demonstra-se o comportamento e o valor médio da força de impacto atingidos com o novo peso.

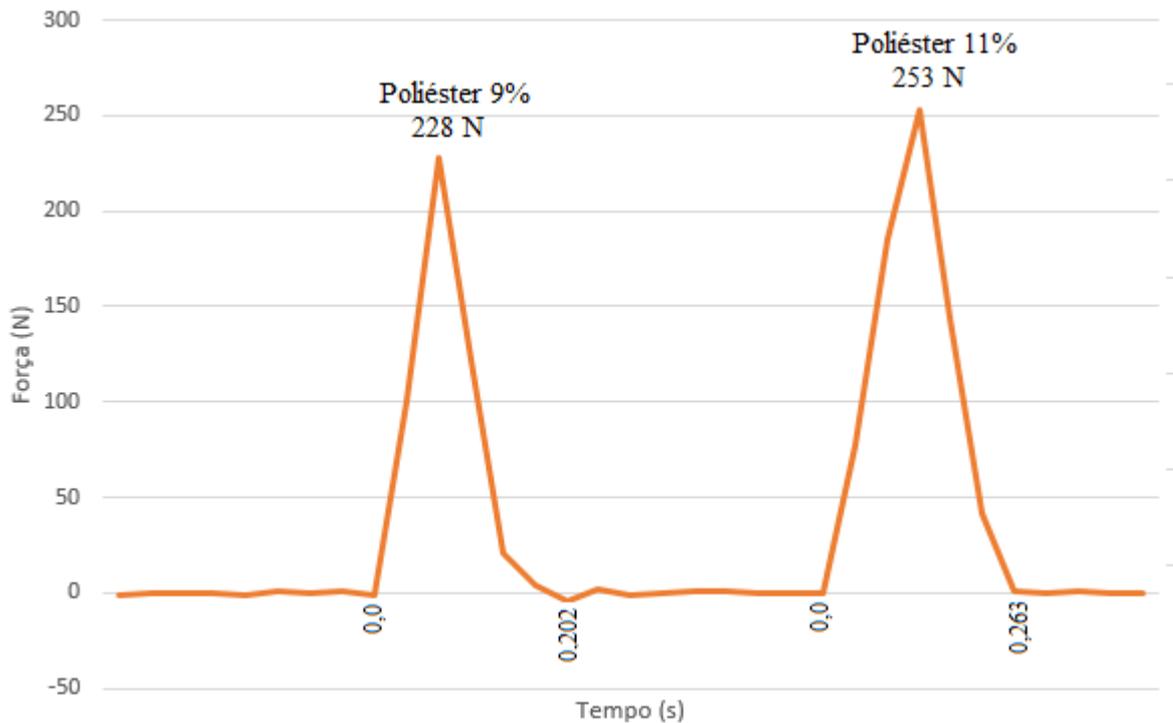
Figura 19 - Comportamento ao carregamento direto e força máxima média atingida com 7 % de carga para o poliéster e o HMPE 2



Fonte: A autora

Como o HMPE 2 ultrapassa o limite dele no impacto, o poliéster, por ser o único material passível de carregamentos diretos com maiores cargas, é testado com pesos de 9% e 11% do seu YBL, onde neste último o material atinge o limite de resistência ao impacto. O gráfico com o comportamento dos novos carregamentos está na figura 20.

Figura 20 - Comportamento ao carregamento direto e força máxima média atingida com 9% e 11% de carga para o poliéster



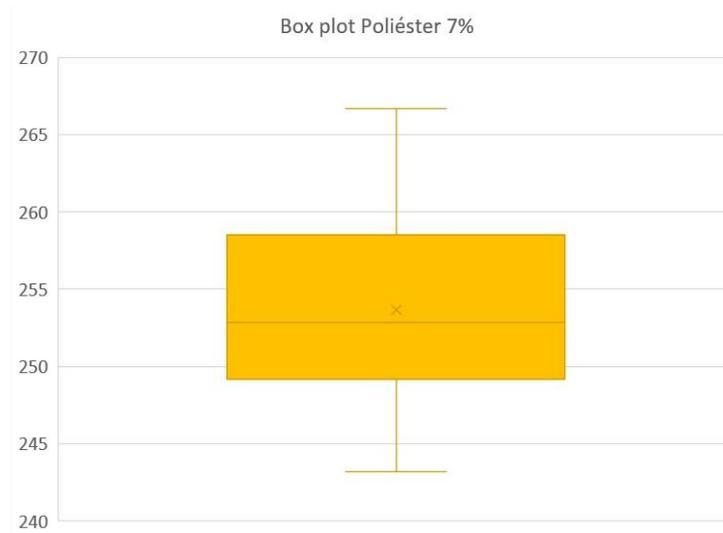
Fonte: A autora

Os carregamentos diretos de 7% e 9% do poliéster tem alguns corpos de prova rompidos, contudo não ultrapassam os 50% que definem o limite de resistência ao impacto, e as amostras que são testadas não apresentam nenhuma degradação visível. Posterior aos testes de tração, o tratamento estatístico para identificação de *outliers* é aplicado, sendo seus resultados e *box plots* mostrados, respectivamente, na tabela 6 e na figura 21 e 22.

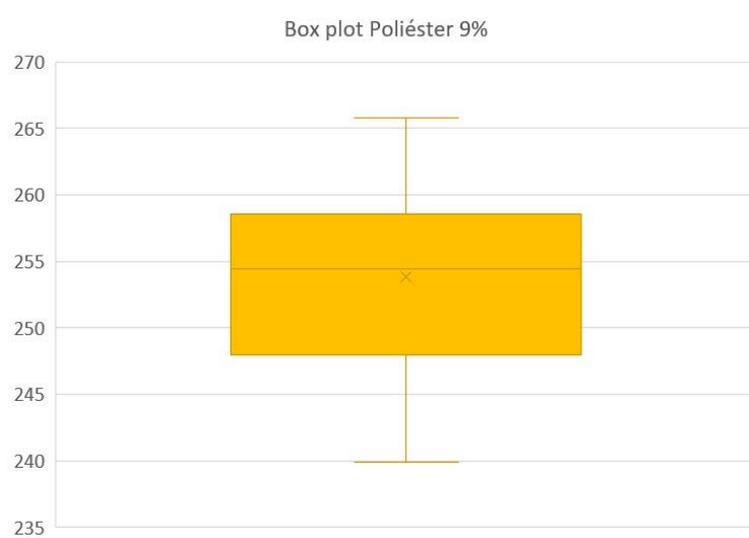
Tabela 6 - Valores utilizados na análise estatística e na preparação dos *box plots*, com carregamento direto de 7% e 9% do peso da resistência à ruptura na tração do poliéster

Material	Primeiro Quartil (N)	Terceiro Quartil (N)	Mediana (N)	Desvio interquartilico (N)	$Q_3 - 1,5dq$ (N)	$Q_3 + 1,5dq$ (N)	$Q_3 - 3dq$ (N)	$Q_3 + 3dq$ (N)
Poliéster 7%	249,17	258,50	252,85	9,33	235,18	272,48	221,20	286,47
Poliéster 9%	247,94	258,58	254,43	10,64	231,98	274,55	216,01	290,51

Fonte: A autora

Figura 21 - *Box plot* do Poliéster utilizando impacto de 7% do YBL

Fonte: A autora

Figura 22 - *Box plot* do Poliéster utilizando impacto de 9% do YBL

Fonte: A autora

Nenhuma suspeita de valor atípico é encontrada, como mostram as figuras 21 e 22. Os valores encontrados nos testes de resistência à ruptura na tração posterior aos impactos de 7% e 9% estão na tabela 7.

Tabela 7 - Resultados dos testes de resistência a tração após testes de impacto com 7% e 9% da carga da resistência à ruptura na tração do poliéster

Fibra sintética	Média da Força Máxima de Impacto (N)	Quantidade de Outliers encontrados e excluídos	Quantidade de amostras rompidas	Quantidade de amostras testadas	Média da Força Máxima de Tração (N)	Desvio Padrão na Força Máxima após Impacto (N)	Média da Deformação Específica na Força Máxima (%)	Média do Alongamento na Força Máxima (mm)
Poliéster 7%	205	0	10	30	253,64	5,82	10,51	52,50
Poliéster 9%	228	0	17	30	253,79	6,39	10,33	51,68

Fonte: A autora

Nenhuma alteração significativa ocorre com o aumento do carregamento, sendo que a única tendência que vale ressaltar é a elevação do desvio padrão a cada adição de carga.

A seguir vem a tabela 8, que como mencionado anteriormente, traz detalhes maiores sobre o limite de resistência ao impacto de cada material. Como o HMPE 2 tem todas as suas amostras rompidas com um carregamento de 7% do YBL, a carga de 6% é testada neste material para verificar com mais precisão o seu limite de impacto. Os valores colocados como força de resistência ao impacto são valores aproximados, pois não são realizados testes com cargas com espaçamento menor que 1%.

Tabela 8 - Limite de resistência ao impacto das fibras sintéticas

Material	Carga do limite da resistência ao impacto	Força equivalente ao impacto gerado pela carga máxima (N)	Força Máxima de Tração do material virgem (N)	Quantidade de amostras rompidas	Quantidade de amostras feito testes
Poliéster	11%	253	251,18	28	30
LCP	5%	326	375,16	28	2
Aramida	5%	455	509,26	38	30
HMPE 1	5%	503	535,79	48	30
HMPE 2	6%	543,2	541,85	22	8

Fonte: A autora

4.2.2 Teste de tração realizado após 24 horas do carregamento de impacto

Tendo a finalidade de observar se os materiais apresentam um comportamento divergente com o passar do tempo após absorverem um carregamento direto, os testes de tração são efetuados um dia posterior ao impacto. As amostras se constituem de 30 corpos de prova para cada material, sem torção, e seguindo as condições de ambiente da ISO 139:2014.

Para essa etapa dois dos cinco materiais testados anteriormente são selecionados. O critério de escolha baseia-se em materiais que tivessem comportamentos diferentes, sendo então escolhidos o HMPE 1, que com 3% da carga no impacto apresenta uma mudança significativa na resistência à ruptura na tração, e o poliéster, que possui o maior alongamento entre as fibras estudadas e é o material que mais resiste ao impacto.

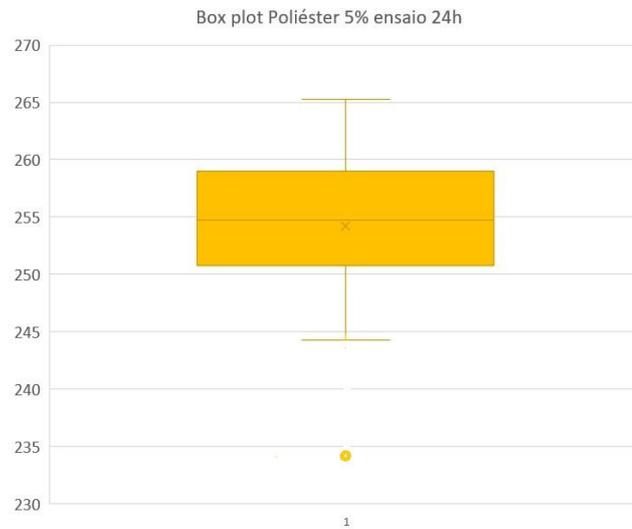
Os valores dos pesos escolhidos fundamentam-se na integridade do material após a submissão ao impacto, então para o HMPE 1 é utilizada uma carga de 3% do YBL e para o poliéster a de 5%, visto que com esses carregamentos nenhum dos materiais apresenta corpos de prova ou multifilamentos das fibras rompidos.

Como o comportamento ao impacto é o mesmo que se demonstrou nos gráficos anteriores, não será repetido nesta seção. Os materiais são submetidos aos carregamentos diretos e 24 horas depois é realizado o teste de tração. Durante esse período o ambiente é mantido em temperatura e umidade controladas de acordo com a norma ISO 139:2014. Posterior aos testes de tração realiza-se a análise estatística para verificar se há *outliers*, que está demonstrada na tabela 9, seguida dos *box plots* nas figuras 23 e 24.

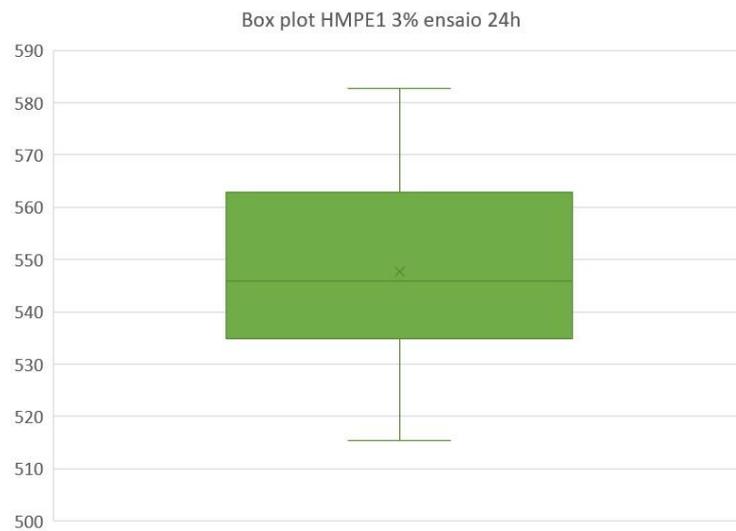
Tabela 9 - Valores utilizados na análise estatística e na preparação dos *box plots*, com carregamento direto de 3% para o HMPE 1 e 5% para o poliéster da força da resistência à ruptura na tração de cada material

Material	Primeiro Quartil (N)	Terceiro Quartil (N)	Mediana (N)	Desvio interquartilico (N)	$Q_3 - 1,5dq$ (N)	$Q_3 + 1,5dq$ (N)	$Q_3 - 3dq$ (N)	$Q_3 + 3dq$ (N)
Poliéster 5%	251,01	258,98	255,12	7,97	239,06	270,94	227,10	282,89
HMPE 1 3%	534,90	562,82	545,88	27,93	493,00	604,71	451,11	646,61

Fonte: A autora

Figura 23 - *Box plot* do Poliéster utilizando impacto de 5% do YBL em testes de 24 horas

Fonte: A autora

Figura 24 - *Box plot* do HMPE 1 utilizando impacto de 3% do YBL em testes de 24 horas

Fonte: A autora

De acordo com as figuras 23 e 24 ocorre uma suspeita de valor atípico no *box plot* do poliéster. Este valor é descartado e com isso os valores finais dos testes de resistência à ruptura na tração após 24 horas de um carregamento súbito, se encontram na tabela 10.

Tabela 10 - Resultados dos testes de tração após 24 horas dos testes de impacto com carga de resistência à ruptura na tração de 5% para o poliéster e 3% para o HMPE 1

Fibra sintética	Média da Força Máxima de Impacto (N)	Quantidade de Outliers encontrados e excluídos	Média da Força Máxima de Tração (N)	Desvio Padrão na Força Máxima após o Impacto (N)	Média da Deformação Específica na Força Máxima (%)	Média do Alongamento na Força Máxima (mm)
Poliéster 5%	164,40	1	254,93	5,22	11,23	56,12
HMPE 1 3%	390,00	0	547,65	17,55	3,16	15,81

Fonte: A autora

Em relação aos testes realizados de forma imediata, pode-se observar que há uma queda no desvio padrão para ambos os materiais, sendo o do HMPE 1 menor do que o do próprio material virgem. O poliéster tem aumento nas médias da força máxima de tração, da deformação específica e do alongamento, porém todos de forma branda, seguindo o comportamento comum desse material, que é o de estabilidade. Já o HMPE 1, apesar de ainda ter uma média da força máxima de tração maior que a da fibra sem o dano, apresentou um decréscimo de 3% comparado ao do ensaio realizado sem tempo de repouso.

5 CONCLUSÃO

Esta pesquisa propôs analisar a resistência à ruptura, o alongamento máximo e a deformação específica em cinco fibras sintéticas submetidas ao carregamento de impacto. Para obtenção dos resultados são realizados testes de carregamento direto em diferentes condições de tempo de repouso e cargas, e posterior teste de tração quase estática.

Fazendo uma análise individual pode-se perceber que o poliéster demonstra ser o material mais estável desde o estado virgem até após todos os carregamentos aos quais é submetido. Apesar da sua resistência à ruptura na tração ter aumentado proporcionalmente ao aumento da carga de impacto, e, seu alongamento ser mais baixo quando realizado o carregamento direto seguido do teste de tração, esses valores oscilam muito pouco, mantendo-se dentro do desvio padrão. Ademais, esse material se mostra o mais resistente ao dano, chegando a suportar 9% de carga de impacto referente ao seu YBL, e atinge seu limite no impacto com uma força 0,73% maior que a de ruptura na tração. Nos testes de tração realizados um dia após o impacto, utilizando uma carga de 5% do YBL, há um aumento em todos os fatores observados com relação aos resultados do teste realizado de imediato, exceto no desvio padrão.

Com relação ao impacto o LCP se mostra o material mais vulnerável. Na carga inicial de 3% este material possui multifilamentos fragilizados em alguns corpos de prova, o que diminui sua resistência à ruptura na tração após o choque, contudo o alongamento e a deformação específica se mantêm praticamente imutáveis. O limite de impacto para este material é encontrado com 5% do seu YBL, resultando em uma força 13% menor do que a de rompimento por tração.

Um dos materiais que menos apresenta alterações quando submetido ao carregamento direto é a aramida. A mesma exhibe um aumento ameno nas médias da força máxima na tração, da deformação específica e do alongamento, bem como do seu desvio padrão, com uma carga de 3% do seu YBL no impacto, indicando estabilidade do material para este carregamento. A aramida atinge seu limite de impacto com 5% da carga de YBL, com uma força 11% menor que a da resistência à ruptura na tração do material virgem, sendo, portanto, o segundo material menos resistente ao impacto estudado nesta pesquisa.

O HMPE 1 apresenta uma resistência de ruptura na tração 3% maior que a da fibra virgem, quando realizado um impacto com uma carga de 3% do seu YBL. Apesar do aumento do YBL, a média da deformação específica e do alongamento na força máxima diminuem, contudo de uma forma praticamente desprezível. Esse material atinge seu limite no impacto com 5% do YBL, resultando em uma média de força 6,12% menor que a média da sua força máxima na tração. No teste de tração realizado após 24 horas do dano, utilizando a carga de 3% do YBL no impacto, o aumento na força máxima de tração é de 2,2% quando comparado ao material virgem, e, apesar desse aumento ser um pouco menor que o do teste feito sem tempo de repouso, ainda está dentro do desvio padrão, que, por sua vez, decresce significativamente. O HMPE 1 é o material que apresenta maior YBL depois de submetido a pequenos carregamentos de impacto, contudo possui a maior instabilidade nos resultados.

Por fim, o multifilamento HMPE 2 apresenta resultados melhores do que o HMPE 1. De forma similar a este último, com um carregamento de 3% do YBL o HMPE 2 eleva a média da força de ruptura na tração, resultando em cerca de 1% maior que a do material virgem. Com 5% da carga, apesar de alguns multifilamentos e corpos de prova rompidos, o material ainda resiste, alcançando um YBL muito próximo ao do material virgem. Seu limite no impacto é alcançado com 6% da carga, resultando em uma força praticamente igual à de ruptura. Apesar de ter um desvio padrão considerável, o material variou muito pouco com o aumento das cargas de impacto, o que mostra uma estabilidade do mesmo quando submetido a esse tipo de carregamento.

Uma observação importante é a de que enquanto o poliéster, com o carregamento direto de 3% do YBL do material virgem, gera uma força de impacto que representa apenas 40% da força de ruptura na tração, os demais materiais atingem uma força de 70% do seu YBL. Para 5% de carga, o limite de impacto é encontrado para o LCP, Aramida e HMPE 1, o poliéster obtém uma força de impacto que configura 65% do YBL virgem e o HMPE 2 chega a 97% do seu YBL, mostrando considerável capacidade de resistir a uma força elevadíssima de impacto. É possível observar com esses valores, que o poliéster tem uma habilidade maior de absorver choques devido ao grande alongamento que possui, enquanto os outros materiais, por serem mais rígidos, suportam menos.

Sintetizando, pode-se concluir que as fibras sintéticas estudadas nessa pesquisa rompem com o impacto com uma força próxima a do YBL do material virgem. Quando sofrem um carregamento direto que não as faz atingir seu limite, o poliéster e a aramida se

mostram estáveis, o LCP bastante fragilizado e os HMPE 1 e HMPE 2 aumentam sua resistência à ruptura na tração com cargas menores, o que provavelmente é desencadeado pelo realinhamento dos multifilamentos, tornando as fibras ainda mais resistentes. É importante ressaltar que, num estado estático, não ocorre degradação mecânica nas fibras após um carregamento de impacto que não rompa os multifilamentos. A medida que as massas utilizadas vão aumentando, como alguns multifilamentos são rompidos e as fibras se degradam, a resistência diminui. Realizando o teste de tração um dia após as fibras sofrerem o impacto, não ocorre nenhuma mudança relevante com relação ao teste feito de imediato.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBRECHT, C.H. **Algoritmos Evolutivos Aplicados a Síntese e Otimização de Sistemas de Ancoragem**. 171 f. Tese de Doutorado, Curso de Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.
- 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.
- AMRAN, N.A.; KOTO, J. **A review on Types of Mooring Material for Deep Water Offshore Structure**. *Journal of Subsea and Offshore Vol. 7*, [SI], set. 2016.
- BEERS, D.E., RAMIREZ, J. **Vectran High-performance Fibre**. *The Journal of The Textile Institute*, [SI], dez. 2008.
- BERNARDI, T.S. **Avaliação do Comportamento de Materiais Compósitos de Matrizes Cimentícias Reforçadas Com Fibra de Aramida Kevlar**. 179f. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2003.
- BICO, V.M.P. **Amarração de Plataformas Offshore Flutuantes com Cabos de Poliéster**. 102 f. Dissertação de Mestrado, Curso de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2013.
- BUSSAB, W.O.; MORETTIN, P.A. **Estatística Básica**. 6ª ed. São Paulo: Saraiva, 2010.
- CALLISTER JR., W.D. **Ciência e Engenharia de Materiais**. 7ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- CANEVALORO JR., S.V. **Ciência dos Polímeros**. São Paulo: Artliber, 2006.
- CANEVALORO JR., S.V. **Técnicas de Caracterização de Polímeros**. São Paulo: Artliber, 2003.
- CANTO, L.B; PESSAN, L.A. Resistência à tração, flexão e compressão. In: CANEVALORO JR., S.V. **Técnicas de Caracterização de Polímeros**. São Paulo: Artliber, 2003.
- EMRI, I., et al. **Time-dependent behavior of ropes under impact loading: A dynamic analysis**. *Sports Technology*, v.1, n. 4-5, pg 208-219, 2008.

FERNANDES, A.C.; ROSSI, R.R. **Distorted polyester lines for model testing of offshore moored platforms**. *Elsevier*, [SI], dez. 2014. Disponível em: www.sciencedirect.com. Acesso em: 15 abril 2017.

FREDEL, M.C. et al. **Propriedades Mecânicas: Ensaio Fundamentais - Vol.1**. 2015. Disponível em: <http://cermat.ufsc.br/wp-content/uploads/2015/03/APOSTILA-DO-LABORATORIO-DE-PROPRIEDADES-MEC-160315.pdf>. Acesso em: 15 set. 2017.

HAAG, R.B. et al. **Desenvolvimento de Polietileno para Aplicação em Cabos Navais**. In: Congresso Brasileiro de Polímeros, 7º, Rio de Janeiro, RJ.

HADDAD, R.; YOUSIF, E. **Photodegradation and photostabilization of polymers, especially polystyrene: review**. *SpringerPlus*, [SI], 2013, Disponível em: <http://www.springerplus.com/content/2/1/398>. Acesso em: 28 abril 2017.

HAGE JR., E. Resistência ao Impacto. In: CANEVALORO JR., S.V. **Técnicas de Caracterização de Polímeros**. São Paulo: Artliber, 2003.

International Standardization Organization, ISO 139: **Textiles – Standard atmospheres for conditioning and testing**. Geneva, 2005.

JANG, B.P. et al. **Impact behavior and impact-fatigue testing of polymer composites**. *Composites Science and Technology*, 44, pg 107-118, 1992.

LOPES, C.A. **Análise de Fluência em Fibra de HMPE para Cabos Utilizados na Ancoragem tipo “Taut Leg” de Sistemas Flutuantes em Águas Profundas**. 145 f. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio Grande, 2003.

LOPES, J.T.B. **Ensaio Mecânicos dos Materiais**. 2010. Disponível em: <https://jorgeteofilos.files.wordpress.com/2010/08/epm-apostila-capitulo09-ensaios-mod1.pdf>. Acesso em: 15 set. 2017.

LOUZADA, E.L.V. **Estudo Experimental Sobre o Comportamento Mecânico de Multifilamentos de Poliéster Submetidos a Carregamentos Dinâmicos**. 67 f. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande, 2018.

- MARTINS, F.R. et al. **Fibras Artificiais e Sintéticas**. [1995?], Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/4241/1/BS%2001%20Fibras%20Artificiais%20e%20Sint%C3%A9ticas_P.pdf. Acesso em: 08 nov. 2018.
- MATTOS, V.L.D., et al. **Introdução à Estatística: Aplicações em Ciências Exatas**. 1ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.
- MCKENNA, H.A. et al. **Handbook of fibre rope technology**. Boca Raton: CRC PRESS LLC, 2000.
- OLIVEIRA, C.E. **Comparação das Diferentes Técnicas para a Exclusão de “Outliers”**. In: CONGRESSO DA QUALIDADE EM METROLOGIA, 2008, São Paulo.
- PAOLI, M.A. **Degradação e Estabilização de Polímeros**. Editora Chemkeys, 2008.
- ROBINSON, J. et al. **Comparison of Standard UV test methods for the ageing of cables**. *International Wire & Cable Symposium*, [SI], 2011?.
- ROSA, D.S.D. **Correlação entre Envelhecimentos Acelerado e Natural do Polipropileno Isotático (PPi)**. 230f. Tese de Doutorado, Curso de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 1996.
- SAID, M.A. et al. **Investigation of Ultra Violet (UV) Resistance for High Strenght Fibers**. *Elsevier*, [SI], abril 2005. Disponível em: www.sciencedirect.com. Acesso em: 24 maio 2017.
- SANTOS, L.A. **Desenvolvimento de cimento de fosfato de cálcio reforçado por fibras para uso na área médico-odontológica**. 247f. Tese de Doutorado, Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2002.
- SIGNORETTI, G. **Wet and icy ropes may be dangerous**. *La Revista del Club Alpino Italiano*, 2001.
- TURNBULL, A.; WHITE, J.R. **Weathering of polymers: mechanisms of degradation and stabilization, testing strategies and modelling**. *Journal of Materials Science*, 29, pg 584-613, 1994. Disponível em: <http://link.springer.com/article/10.1007/BF00445969>. Acesso em: 9 set. 2018.
- Vectran**. Disponível em: <http://www.kuraray.com.br/Produtos/Vectran?Idioma=pt-BR>. Acesso em: 12 ago. 2017.

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