

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DA MECÂNICA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

RITIERY MOREIRA SEZEFREDO

**ENSAIOS DE TRAÇÃO EM COMPÓSITOS COM MATRIZ  
BIOPOLIMÉRICA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO  
2015

RITIERY MOREIRA SEZEFREDO

## **ENSAIOS DE TRAÇÃO EM COMPÓSITOS COM MATRIZ BIOPOLIMÉRICA**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Dr. Romeu Rony Cavalcante da Costa

CORNÉLIO PROCÓPIO  
2015



**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
**Campus Cornélio Procópio**  
**Departamento Acadêmico de Mecânica**  
**Curso de Engenharia Mecânica**



## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

**Ritery Moreira Sezefredo**

### **Ensaio de Tração em Compósitos com Matriz Biopolimérica**

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 15:00hs do dia 12/06/2015 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico no programa de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof(a). Dr(a). Romeu Rony Cavalcante da Costa - Presidente (Orientador)

---

Prof(a). Dr(a). Amauri Bravo Fereda - (Membro)

---

Prof(a). Me(a). José Aparecido Lopes Junior - (Membro)

Dedico este trabalho à toda minha família e amigos que sempre foram minha fonte de incentivo e perseverança para alcançar meus objetivos.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por todas as bênçãos concedidas em minha vida.

Aos meus pais, Ademir Benedito Sezefredo e Ducilene Moreira Sezefredo, pelo total apoio e incentivo para que os meus sonhos fossem realizados.

Ao meu irmão, Vinícius Moreira Sezefredo, que sempre me estimulou em os meus desafios.

À minha namorada, Anielle Correa Alves do Valle, por sempre acreditar no meu potencial e me incentivar a crescer cada vez mais pessoal e profissionalmente.

Ao meu orientador Prof. Dr. Romeu Roni Cavalcante da Costa, pela sabedoria com que me guiou nesta trajetória.

Aos meus professores que durante a minha graduação sempre me passaram todo conhecimento necessário e me guiaram da melhor forma possível para o meu desenvolvimento.

Aos meus companheiros de estudo e de laboratório, em especial Carlos Gonçalo Manso da Costa Junior.

Gostaria de deixar registrado também, o meu reconhecimento à minha família, pois acredito que sem o apoio deles seria difícil a superação deste desafio e realização de um sonho.

Enfim, a todos os que por algum motivo e de algum modo contribuíram para a realização desta pesquisa.

"Viva como se fosse morrer amanhã,  
aprenda como se fosse viver para sempre".

(Gandhi)

## RESUMO

SEZEFREDO, Ritiery Moreira. **Ensaio de tração em compósitos com matriz biopolimérica**. 2015. 49 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2015.

Atualmente o uso de materiais compósitos têm sido alvo de estudos graças às suas propriedades, características e versatilidade, sendo detentor de grandes vantagens em relação aos materiais já utilizados na engenharia. Os compósitos são empregados em diversas áreas devido à sua vasta aplicabilidade, sendo assim, capaz de suprir necessidades desde o setor industrial abrangendo até áreas como a medicina; como é o caso do poliuretano derivado do óleo de mamona (*Ricinus Communis*), foco do presente estudo, por se tratar de um biopolímero com grande potencial de aplicação em próteses ósseas. Em meio a tantas vantagens, o material em questão, possui a difícil conciliação entre produtividade e bom desempenho como uma problemática, já que é dependente da cura da resina, elevando assim o custo do processo de fabricação. Diante dessas informações apoiadoras e atraentes quanto ao uso de compósitos viu-se a necessidade da comprovação de suas propriedades mecânicas, para que assim possa haver uma conclusão positiva ou não quanto ao seu uso como matriz. Desta forma realizou-se testes experimentais em amostras padronizadas sob ensaio de tração, para levantar suas propriedades frente a esse tipo de solicitação, bem como a comparação dessas propriedades com valores teóricos.

**Palavras-chave:** Materiais compósitos. Propriedades mecânicas. Ensaio de tração. Matriz biopolimérica.

## ABSTRACT

SEZEFREDO, Ritiery Moreira. **Tensile tests on composites biopolymer matrix.** 2015. 49f. Work of conclusion course (Graduation) – Mechanical Engineering. Technological University Federal of Paraná. Cornélio Procópio, 2015.

Currently the use of composite materials have been subject of many studies thanks to them properties, characteristics and versatility, being holder of many advantages compared to materials already used in engineering; this kind of material is widely used in many areas due its wide applicability, and thus able to supply the needs from the industrial sector covering up areas like medicine, such as the case of the polyurethane derived from mamona (*Ricinus Communis*) oil, focus of this estudy, because it is a biopolymer with a great potential applicability in bone prosthesesthis. Amidst all these advantages the material in question has the difficult balance between productivity and high performance as a problem, since it is dependent on the resin cure raising the costs of manufacturing process.

Given these supportive and attractive information about the use of composite materials identify the need of proof on the mechanicals properties so that it can be possible to have a positive or not conclusion about the use of this type of material. Thus experimental tensile tests on standard samples were realized to acquire material properties for this type of solicitation, and compare this properties obtained theoretically.

**Keywords:** Composite material. Mechanical properties. Tensile tests. Biopolymer matrix.



## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS POLÍMEROS EM RELAÇÃO AOS METAIS E OUTROS.....	18
TABELA 2 - COMPOSIÇÃO BÁSICA DO ÓLEO DE MAMONA.....	24

## LISTA DE SIGLAS

ALMACO	Associação Latino-Americana de materiais compósitos
ASTM	American Society for Testing and Materials
CDP	Corpo de prova
FDA	<i>Food and Drug Administration</i>
GQATP	Grupo de Química Analítica e Tecnologia de Polímeros
RTM	<i>Resin Transfer Molding</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

GPa	Unidade de tensão elevada a nona potência
MPa	Unidade de tensão elevada a sexta potência
A	Área
t	Espessura
w	Largura
l	Comprimento
m	Metro
mc	Massa do compósito
mf	Massa da fibra
mm	Massa da matriz
Mf	Fração mássica de fibra
Mm	Fração mássica de matriz
pc	Densidade do compósito
pm	Densidade da matriz
vc	Volume do compósito
vv	Volume do vazio
vf	Volume de fibra
Vf	Fração volumétrica de fibra
Vv	Fração volumétrica de vazio
Vm	Fração volumétrica de matriz
E	Módulo de elasticidade
Ec	Módulo de elasticidade do compósito
Ef	Módulo de elasticidade da fibra
Em	Módulo de elasticidade da matriz
Kg	Quilograma
g	Gramas
KN	Quilo Newton

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>11</b>
1.1 MATERIAIS COMPÓSITOS.....	11
1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS.....	13
1.3 OBJETIVOS.....	13
1.3.1 Objetivo geral.....	13
1.3.2 Objetivos específicos.....	14
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>15</b>
2.1 A IMPORTÂNCIA DA BUSCA DE NOVOS MATERIAIS.....	15
2.2 MATERIAIS COMPÓSITOS.....	15
2.2.1 Classificação.....	17
2.2.2 Estruturação dos materiais compósitos reforçados por fibras.....	17
2.3 POLIURETANO DERIVADO DO ÓLEO DE MAMONA.....	21
2.3.1 Polioli, Pré-polímero e óleo de mamona.....	23
2.3.2 Aplicações dos compósitos poliméricos.....	25
2.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS POLIMÉRICOS.....	26
2.4.1 Ensaio de tração.....	27
2.4.2 Embasamento matemático para a realização do estudo.....	27
2.4.3 Conclusões a respeito dos compósitos poliméricos.....	30
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>31</b>
3.1 MATERIAIS.....	31
3.2 MÉTODOS.....	32
3.2.1 Catalogação dos corpos de prova.....	35
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>38</b>
4.1 RESULTADOS.....	38
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>45</b>
5.1 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	46
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>47</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Estudos referentes a materiais compósitos têm sido desenvolvidos graças a necessidade de atender segmentos variados da indústria, sendo uma das maiores áreas de pesquisa os compósitos de matrizes poliméricas reforçados por fibras. O objetivo da realização de estudos acerca desses materiais é de se obter vantagens em relação aos já utilizados na engenharia convencional, sendo elas, facilidade de processamento; combinação de propriedades a partir da necessidade de projeto; forma geométrica e estrutural do componente; sempre associadas ao baixo custo de fabricação quando comparado com métodos e materiais convencionais. Segundo a Associação Latino-Americana de Materiais Compósitos, com cerca de 180 empresas associadas a este segmento, o setor brasileiro de materiais compósitos faturou 733 milhões de reais no primeiro trimestre de 2012 com um aumento de 1,6% em comparação ao último trimestre de 2011 e uma alta de 2,5% se comparado ao mesmo período do ano anterior (ALMACO, 2012).

Os materiais compósitos, além das vantagens já mencionadas, são alvos de estudos pelo fato de possuírem alta resistência mecânica com boa ductilidade (permitindo melhor estabilidade dimensional) e em alguns casos maior tenacidade com a incorporação de cargas.

### 1.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

Um material compósito pode ser definido, quando analisado macroscopicamente, como um material homogêneo; no entanto possui fibras (contínuas ou não). Sendo assim, trata-se da combinação de dois ou mais materiais imiscíveis.

De acordo com a norma ASTM D3878-95, entende-se como compósito um “material formado pela mistura física de dois ou mais materiais, imiscíveis entre si, combinados para formar um novo material útil de engenharia que possui algumas propriedades diferentes em relação aos mesmos analisados isoladamente”.

Segundo Ferrante (2002), uma definição satisfatória de compósitos deve abordar seus componentes, arranjo e “funcionamento” quando em conjunto. Esses requisitos são razoavelmente preenchidos pela seguinte definição: “Um material compósito é formado por dois ou mais componentes, com identidade química e formas diferentes, que se conservam distintos após o processamento e que são separados por uma interface definida. A adesão entre esses componentes é tal que as cargas são transferidas para os elementos de maior resistência mecânica, fibras, que estão geralmente arranjadas no componente que atua como matriz”.

Esses materiais imiscíveis, chamados de matriz e reforço; sendo que as matrizes podem ser cerâmicas, metálicas ou poliméricas e os reforços podem ser de fibras naturais, sintéticas e até mesmo partículas. A junção desses materiais é justificada pelo fato de se alcançar propriedades mecânicas relevantes que não são encontradas com cada um dos materiais quando estudados separadamente.

Os materiais compósitos obtidos de matrizes poliméricas são uma das associações mais comuns, os quais são formados por uma fase polimérica (matriz) e reforçada por uma fase contínua, a qual é composta por reforços ou fibras (proporcionando boa rigidez, resistência mecânica e baixo peso específico), podendo também conter aditivos para fins específicos, como agentes catalisadores para aceleração da reação de cura, entre outros tipos de aditivos que são definidos de acordo com a necessidade de uso do produto final.

As fibras, principal agente de reforço de materiais compósitos, apresentam boas propriedades de tração longitudinal, mas apresentam-se ruins para suportar cargas compressivas, forças transversais ao eixo ou cargas cisalhantes, sendo assim, faz-se necessário que as mesmas sejam embebidas em uma matriz, tendo como resultado os materiais compósitos, para a obtenção de uma boa combinação das propriedades mecânicas. Dessa forma tem-se um composto de fibras suportadas por uma matriz. Com relação às propriedades mecânicas do compósito, que são dependentes da porcentagem de fibra utilizada, observa-se uma espécie de compensação da parte deficitária de cada componente, ou seja, a matriz auxilia a fibra em relação às tensões transversais enquanto que a fibra se mostra solidária com a matriz em relação às tensões longitudinais; sendo assim, o composto apresenta características mecânicas intermediárias em relação às apresentadas por cada elemento quando observado separadamente.

Em meio a diversas vantagens os materiais compósitos possuem a problemática da difícil conciliação entre produtividade e bom desempenho, sendo que a obtenção desse tipo de material é dependente da cura da resina, ou seja, depende da reação de polimerização da resina junto ao reforço utilizado; resultando em um elevado custo do processo de produção.

## 1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

Os materiais compósitos têm conquistado o interesse de pesquisadores graças à sua capacidade de atuar como material alternativo em diversas áreas, como indústria automobilística, aeronáutica e até mesmo na área médica com o intuito de substituir e/ou ser um material protagonista na fabricação de próteses ósseas. Ainda no contexto de aplicabilidade na medicina, desde 1984 o Grupo de Química Analítica e Tecnologia de Polímeros (GQATP) do Instituto de Química de São Carlos da USP vem desenvolvendo estudos acerca do poliuretano derivado do óleo de mamona pelo fato do mesmo se destacar como um regenerador ósseo, tratando-se de um biopolímero. Como já é de domínio público o vasto campo de aplicações do poliuretano, neste projeto pretende-se verificar o potencial desta servir como matriz para compósito reforçado por fibra, que neste caso trata-se da fibra de vidro bidirecional.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo Geral

Diante da problemática encontrada, o presente projeto de estudo tem por objetivo realizar ensaios de tração em amostras padronizadas (de acordo com a norma ASTM D3039) utilizando máquina de ensaio universal (figura 1) e posterior análise dos dados obtidos para que seja possível a comprovação das propriedades mecânicas do compósito, poliuretano derivado do óleo de

mamona (*Ricinus Communis*) com reforço de fibra de vidro), fornecendo embasamento para posteriores estudos sobre a aplicabilidade do mesmo em diversos fins.

### 1.3.2 Objetivo Específico

O presente estudo, partindo da fabricação dos CDP's, foco de estudo realizado por COSTA JUNIOR (2015), e embasado por normativas vigentes e toda a teoria a respeito do assunto tem por objetivos específicos:

- Verificar os aspectos geométricos dos corpos de prova;
- Comparar os resultados experimentais (propriedades mecânicas) com a regra da mistura (teórico).



**Figura 1- Máquina de ensaio universal.**

**Fonte: Autoria Própria (2015).**



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 A IMPORTÂNCIA DA BUSCA DE NOVOS MATERIAIS

O crescente e acelerado avanço da tecnologia faz com que todas as áreas da engenharia sejam afetadas, seguindo uma incessante busca por soluções e meios de facilitar, de alguma forma, a vida do homem. Paralelamente a essa busca incansável por soluções e facilidades há uma grande preocupação com o meio ambiente, guiando de certa forma pela diretriz da utilização de materiais renováveis e que agridam cada vez menos a natureza. De acordo com os intuítos do avanço tecnológico e as necessidades da engenharia, faz-se necessário o desenvolvimento de novos materiais para suprir as necessidades observadas. A engenharia, por ser a grande responsável pela criação de novos produtos, sente o grande nível de exigência sobre os mesmos, para que possam atender os requisitos de projetos, que são cada vez mais criteriosos. Dessa forma a busca incessante pelo desenvolvimento de novos materiais e/ou o desenvolvimento de novas configurações (outros constituintes de matriz e reforço) de materiais compósitos que apresentem baixo custo, aplicabilidade, facilidade de processamento, atrativas propriedades mecânicas, baixo peso específico, baixo impacto ambiental entre outras vantagens são investigados.

### 2.2 MATERIAIS COMPÓSITOS

Os Materiais compósitos são originados a partir da junção de dois ou mais componentes distintos, insolúveis, química e morfológicamente diversos, com o intuito de formar um material resultante com propriedades que não são encontradas quando os mesmos são analisados separadamente. Segundo SANTOS (2009), “na maioria dos casos, estas duas partes unidas apresentam melhores características do que quando analisados separadamente”. Desta forma, quando o material é solicitado na direção da fibra, a mesma será a protagonista para resistir ao esforço, enquanto que

para o caso em que o compósito é exigido transversalmente será a matriz responsável por oferecer a resistência, também é válido ressaltar que para esta situação a presença da fibra servirá para enfraquecer o compósito.

De acordo com HERAKOVICH (1998), compósito é um material composto por duas ou mais fases distintas, sendo assim, trata-se de um material heterogêneo, esta análise é dependente da escala de interesse utilizada, se a mesma é suficientemente pequena. Assim, compósitos fibrosos são materiais em que uma fase age como reforço para a segunda, a qual é chamada de matriz. O objetivo da combinação entre fibra e matriz é formar um material mais eficiente para a aplicação desejada.

De acordo com HULL (1998), as matrizes, elemento integrante do material compósito, na maior parte dos casos são de três tipos: cerâmica, metálica ou polimérica; as mesmas quando são incorporadas com algum tipo de reforço mostram como resposta uma grande melhoria nos valores de resistência mecânica, salvando a importância de que seja feita uma análise a respeito da fração volumétrica com que a matriz é reforçada, ou seja, o volume de reforço que será introduzido na receita da matriz. Por outro lado, os reforços, quando o material compósito está destinado a aplicações estruturais, geralmente são fibras, que podem ser contínuas ou não, alinhadas ou com distribuição aleatória, podendo ser utilizadas como mantas e diferentes arquiteturas têxteis.

Os materiais compósitos reforçados por fibras contínuas são os que apresentam melhor resposta mecânica, diferentemente de materiais reforçados por fibras descontínuas, que apresentam um comportamento isotrópico quando analisados em uma escala macroscópica. O reforço por fibras contínuas é responsável por causar uma melhoria da resistência mecânica na direção da fibra, mas com um desempenho não tão animador quando submetidos a esforços transversais à disposição do reforço, esse déficit da fibra é compensado e controlado pelas propriedades da matriz. No entanto, os compósitos reforçados por fibras descontínuas oferecem menor custo de processamento, neste caso a distribuição da carga no reforço está em função do comprimento da fibra, e também do processo de fabricação que é responsável por sua disposição, que possuem em seus extremos pontos concentradores de tensão.

Em meio a diversas características atrativas dos materiais compósitos ainda não é possível a associação entre bom desempenho e produção em larga

escala. Ainda não são muitos os processos envolvendo esses materiais e isto impede a sua difusão; de acordo com MARTINEZ (2011), compósitos utilizados para fins estruturais são produzidos através de meios pouco produtivos, são eles: autoclave, enrolamento, pultrusão e RTM (*Resin Transfer Molding*).

### 2.2.1 CLASSIFICAÇÃO

Visto que os materiais compósitos possuem diversas possibilidades de classificação levando em consideração, substancialmente, a distribuição dos elementos de reforço, já que suas propriedades mecânicas dependem principalmente da forma, dimensões e da fração volumétrica destes elementos atuantes. Atualmente são utilizadas classificações básicas para estudar os reforços, uma delas é acerca do reforço particulado que possui dimensões equivalentes em todas as direções, podendo assim ser arranjado de forma aleatória ou ordenada. Em muitos casos os compósitos reforçados por partículas possuem sua distribuição aleatória devido à sua facilidade de disposição, além de ser extremamente difícil garantir que o reforço continue orientado depois que o mesmo é imerso na matriz, visto que sua viscosidade moveria facilmente as partículas introduzidas. Como segunda classificação estão presente os reforços fibrosos, sendo caracterizados pelo fato de seu comprimento ser muito maior que sua principal dimensão de seção transversal, esta razão entre comprimento e diâmetro, ou largura, é conhecida como *aspect ratio*, e pode sofrer considerável variação.

### 2.2.2 ESTRUTURAÇÃO DOS MATERIAIS COMPÓSITOS REFORÇADOS POR FIBRAS

Sabe-se que quando um profissional da área de engenharia está elaborando um projeto, o mesmo dedica grande atenção às características e propriedades dos materiais convencionais que serão utilizados; com materiais compósitos o procedimento não é diferente e além de considerar os dados já especulados, o profissional deve estar atento ao tipo, distribuição, processo de

fabricação, geometria e requisitos de produção. Desta forma, é de grande valia que seja feita a análise dos constituintes do compósito (matriz, reforço e interface comum), no entanto, como existem diversos tipos de matrizes e reforços, o presente estudo será desenvolvido analisando matrizes poliméricas com reforços fibrosos contínuos.

A escolha de qual matriz utilizar depende da aplicação da mesma, ou seja, das propriedades mecânicas, físicas e térmicas que serão exigidas no momento da solicitação, lembrando que as matrizes são responsáveis por transmitir as cargas para os reforços e proteger os mesmos das adversidades ambientais. Na grande maioria dos casos, as matrizes poliméricas são as escolhidas por apresentar baixo custo, fácil modelagem, boa resistência aos ataques químicos e baixo peso específico; porém, os valores de resistência mecânica, módulo de elasticidade e baixa temperatura de serviço são desvantagens quando comparada às matrizes cerâmicas e metálicas.

Outras vantagens importantes das matrizes são: manutenção da orientação e direção das fibras, distribuição quase que uniforme das cargas entre as fibras, servindo como barreira à propagação de trincas e falhas. De acordo com CALLISTER (1994), é muito importante que as forças aglutinantes da interface comum sejam suficientes para garantir a funcionalidade do compósito, garantindo assim que o esforço seja totalmente transmitido para as fibras, e que a ruptura ocorra quando os limites dos elementos de reforço sejam alcançados. A partir disto, a escolha da combinação fibra-matriz a ser utilizada no projeto também passa a ser merecedora de grande atenção, para que o seu comportamento seja conhecido quando submetido à situação de projeto. A tabela 1 mostra vantagens e desvantagens dos polímeros.

---

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens dos polímeros em relação aos metais e outros materiais.

---

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Facilidade de fabricação	Baixa resistência
Baixo peso, baixa densidade	Rigidez inferior à dos metais
Resistência a ataques químicos	Dureza baixa, risca com facilidade
Isolamento térmico e elétrico	Mais inflamáveis que os metais
Autolubrificação	Temperatura máxima de serviço baixa
Aparência decorativa	Baixa resistência a produtos químicos orgânicos
Transparência	
Amortecimento mecânico.	

---

**Fonte: Adaptado MENDONÇA (2005).**

Segundo MENDONÇA (2005), as matrizes poliméricas ainda podem ser classificadas em termoplásticos e termofixos; onde os termoplásticos são polímeros que se fundem quando aquecidos, constituídos de moléculas lineares com ou sem ramificação. Uma característica importante dos termoplásticos é o fato de possuírem fortes ligações intramoleculares, mas fracas intermoleculares, fazendo com que o material quando aquecido tenha as suas ligações enfraquecidas, tornando possível a movimentação relativa das moléculas e, portanto, ocorrendo a sua deformação. No entanto, o resfriamento do material restitui suas forças de ligações, fazendo da deformação um processo reversível, esse fator é muito importante por fazer com que esse material seja reprocessável e com isso auxiliando na conservação do meio ambiente e o equilíbrio ecológico. Alguns dos principais tipos de termoplásticos são:

- Polietileno;
- Poliestireno;
- Náilon;
- Policarbonato;
- Poliacetal,
- Fluocarbonos;
- Celuloses;
- Poliéter-éter;
- Acrílicos;
- *Polifenilene sulfide* (PPS);
- *Polivinil chloride* (PVC).

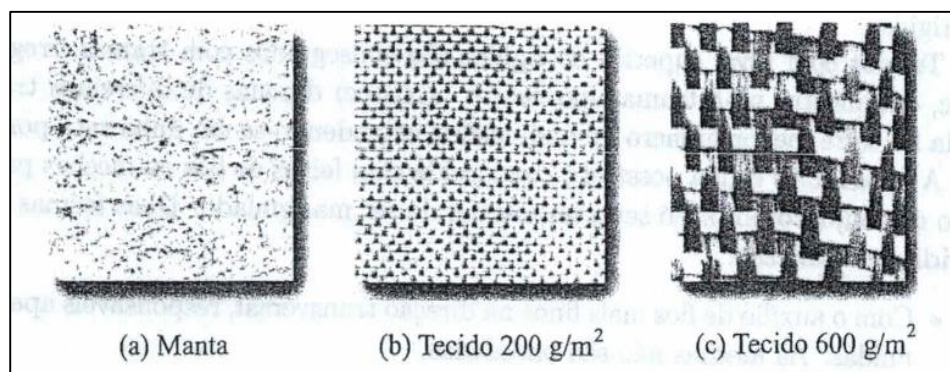
Já os termofixos apresentam um comportamento diferente dos termoplásticos pelo fato de uma vez curado ele não pode ser amolecido ou fundido pelo calor. Se aquecidos acima do seu limite ele simplesmente se decompõe. Esse tipo de resina possui maior índice de utilização em elementos estruturais devido ao fato de suas características finais se aproximarem das desejadas; além disso, um outro fator colaborador, é de possuir um custo relativamente baixo em relação às termoplásticas. Algumas das vantagens da utilização das resinas termofixas:

- Estabilidade térmica,
- Elevada rigidez;
- Estabilidade dimensional;

- Excelentes propriedades de isolamento térmico e elétrico.

O segundo elemento constituinte dos compósitos são as fibras, que conforme descrito anteriormente, podem ser contínuas ou descontínuas, sintéticas ou vegetais. As fibras, como componente estrutural, possuem a função de suportar a carga solicitada, mas com características mecânicas distintas que determinam o desempenho do compósito. Deste modo faz-se necessário um estudo a respeito do comprimento da fibra para que seja estimado o seu comprimento mínimo, sendo possível garantir a resistência mecânica e rigidez do compósito; outros fatores importantes que devem ser considerados são: a orientação e a fração volumétrica, que possuem elevada influência sobre as propriedades mecânicas do material.

A fibra de vidro, reforço do caso estudado, de acordo com MENDONÇA (2005), teve sua aparição pouco antes de 1930, com o desenvolvimento de técnicas de produção, porém seu uso foi difundido a partir da Segunda Guerra Mundial, em conjunção com as resinas de poliéster. Este tipo de fibra possui como vantagens o baixo custo em relação às demais fibras, alta relação resistência/densidade; porém possui como desvantagens baixa resistência à abrasão e baixa relação módulo de elasticidade/densidade. A Figura 2 mostra formas comercialmente disponíveis de fibra de vidro.



**Figura 2- Formas disponíveis para fibra de vidro: (a) manta de fibras aleatoriamente orientadas; (b) e (c) tecidos com iguais propriedades a 0° e 90° (*woven roving*).**

**Fonte: MENDONÇA (2005).**

Outro elemento, e não menos importante, da estruturação de materiais compósitos é a interface fibra-matriz, ou seja, a interface comum entre os elementos

físicos que são partes constituintes do material. Desta maneira, tão importante quanto a análise das matrizes e reforços é a avaliação da interface comum onde acontece o contato direto entre os elementos do material compósito; isto se dá pelo fato de que as tensões que atuam na matriz são transmitidas para o reforço (fibra de vidro, como no caso estudado) através da interface e com isso são relevantes algumas hipóteses em relação a essa interface:

- (i) matriz e fibra se comportam elasticamente;
- (ii) interface infinitamente delgada;
- (iii) não são consideradas descontinuidades na interface, ou seja, a junção fibra e matriz é considerada perfeita;
- (iv) a interface que se forma ao redor da fibra possui propriedades de material sólido;
- (v) a geometria de empacotamento é tida como regular;
- (vi) as hipóteses (ii) e (v) são consideradas teóricas, visto que inúmeras falhas estão presentes na superfície das fibras.

Em alguns casos tem-se a necessidade de realização de alguns processos de tratamento superficial da fibra para garantir uma melhor adesão com a matriz, gerando assim um composto com interface confiável.

### 2.3 POLIURETANO DERIVADO DO ÓLEO DE MAMONA

Alvo de muitos estudos, o termo poliuretano se aplica à uma classe de polímeros que possuem a ligação uretana, mesmo que outras ligações estejam presentes; os poliuretanos não possuem unidades uretanas de modo regular e não têm uma fórmula representativa de um todo. Um típico poliuretano, além dos grupos uretanos, possui hidrocarbonetos alifáticos e aromáticos, grupos éster, uréia, amida, etc. Nesse tipo de resina pode-se diferenciar dois tipos básicos de estruturas: segmentos poliéster ou poliéter longos e moderadamente flexíveis e segmentos curtos moderadamente rígidos que compreendem os grupos uretanos e aromáticos; sendo que a razão entre esses dois segmentos pode variar dentro de amplos limites, alterando as propriedades dos poliuretanos obtidos. Segundo SILVESTRE FILHO (2001), as primeiras reações de formação dos uretanos foram propostas por WURTZ,

em 1849, porém, somente em 1930 foi encontrado, por BAYER, aplicação comercial da reação de grupos hidroxila e isocianatos. Após a descoberta deste tipo de polimerização muitos materiais foram desenvolvidos com o intuito de abranger diferentes aplicações; durante a Segunda Guerra Mundial, os poliuretanos (assim como a fibra de vidro) foram amplamente utilizados e auxiliaram no desenvolvimento de aplicações com fibras, cerdas, revestimentos, adesivos, espumas e elastômeros.

Ainda, de acordo com SILVESTRE FILHO (2001), muitos dos trabalhos pioneiros no estudo da síntese de poliuretanos usaram o óleo de mamona como polioli; entretanto, com o aparecimento de polióis poliésteres, tendo como principal característica o baixo custo por se tratar de um subproduto do petróleo, os poliuretanos derivados do óleo de mamona foram deixados em segundo plano, ficando este tipo de resina restrita ao desenvolvimento de materiais nobres.

No entanto, atualmente o mercado busca e incentiva cada vez mais o desenvolvimento de materiais biodegradáveis, não poluentes e derivados de biomassa, fazendo com que pesquisas com poliuretano derivado do óleo de mamona, caracterizado como biopolímero, se tornem mais frequentes promovendo novas perspectivas com relação às suas utilizações. Com o cenário voltado para a busca e desenvolvimento de novos materiais cada vez menos poluentes, fez com que fosse melhor difundido o uso do óleo de mamona como polioli.

Segundo Ereno (2003), o biopolímero derivado do óleo de mamona foi tanto aprovado pelo Ministério da Saúde do Brasil em 1999, como pelo FDA (*Food and Drug Administration* – a agência do governo norte-americano responsável pela liberação de novos alimentos e medicamentos nos Estados Unidos) em 2003.

De acordo com Willians (1999), biocompósito é definido como um dos materiais que assumem a função de tecidos vivos ou organismos, como fibra de carbono/resina epoxy atuando como membros artificiais.

Biomaterial pode ser definido como uma substância ou combinação de duas ou mais substâncias farmacológicas inerte, de natureza natural ou sintética, utilizadas para melhorar, aumentar ou substituir, parcial ou integralmente, tecido e órgãos do corpo humano (Willians, 1987).

Partindo das definições de biopolímero e biocompósito, ainda assim há necessidade de uma explanação a respeito da aceitação deste tipo de material por parte do corpo humano, que de acordo com Manzolli e Ramalho (2015), o grande potencial da poliuretana derivada do óleo de mamona seria: a aplicação em próteses



ósseas e cirurgias plásticas é explicitado pelo fato de conter em sua composição ácidos graxos cuja estrutura molecular está presente na gordura existente no corpo humano, desta forma o organismo não entende este material como um corpo estranho e não o repele.

Dentre tantos fatores atrativos para o seu uso, é bastante válido ressaltar mais uma vez as vantagens do poliuretano derivado do óleo de mamona, são elas: processabilidade, baixo peso específico, alta rigidez, biocompatibilidade, baixa expansão térmica, resistência a corrosão, flexibilidade de formulação (podendo ser customizado de acordo com as necessidades de projeto), fabricação de geometrias complexas, possibilidade de alrear a temperatura de cura da resina e controlar seu pico exotérmico na transição líquido-gel, presença de propriedades mecânicas estruturais atrativas, ausência de emissão de vapores irritantes ou tóxicos, baixo custo, entre outras vantagens.

### 2.3.1 POLIOL, PRÉ- POLÍMERO E ÓLEO DE MAMONA

#### **a) Polioli**

Para a síntese dos poliuretanos temos como componentes importantes os compostos hidroxilados (polióis) juntamente com os isocianatos; na manufatura de poliuretanos são utilizadas uma grande variedade de polióis, desde de compostos naturais como o óleo de mamona, com três grupos hidroxila em sua composição, até polióis sintéticos preparados especialmente para a produção de polímeros com características específicas. Os polióis são desenvolvidos com fatores de estrutura molecular e funcionalidade necessária para que seja possível a reação com o pré-polímeros, e assim gerando poliuretanos com determinadas especificações. De acordo com PLEPLIS (1991), a escolha do polioli controla o grau de entrecruzamento obtido no polímero, devido ao seu tamanho e flexibilidade de estrutura molecular. Para a realização deste trabalho, o polioli utilizado foi do tipo poliéster derivado do ácido recinléico (COSTA, 2007), denominado polioli 471.

## b) Pré-polímero

Para que a pré-polimerização do polioliol seja feita é necessária a adição de um pré-polímero, isso faz com que a massa molecular da mistura seja aumentada, deixando assim uma porcentagem de isocianatos livre para que possa haver a reação com o polioliol final. No estudo em questão, o pré-polímero utilizado foi o sintetizado a partir do difenilmetano diisocianato (MDI) e de um polioliol derivado do óleo de mamona (CLARO NETO, 1997), denominado polímero 329L.

## c) Óleo derivado de mamona

O óleo usado no polímero em estudo é obtido da mamona, o mesmo é extraído diretamente da semente da planta *Ricinus Communis* que é encontrada em regiões tropicais. Na composição deste óleo está presente, aproximadamente, noventa por cento de ácido ricinoléico, enquanto que dez por cento são ácidos graxos não hidroxilados, isto faz deste óleo uma das poucas fontes naturais que podem ser consideradas como compostos puros. A tabela 2 mostra a composição básica do óleo de mamona.

Tabela 2 – Composição básica do óleo de mamona.

<b>Componente</b>	<b>Porcentagem</b>
Ácido ricinoléico	89,5
Ácido palmítico	1,0
Ácido linoleico	4,2
Ácido linolênico	0,3
Ácido dihidroxiesteárico	0,7
Ácido estereático	1,0
Ácido oleico	3,0
Ácido eicosanóico	0,3

Fonte: Adaptado de PEPLIS (1991).

### 2.3.2 APLICAÇÕES DOS COMPÓSITOS POLIMÉRICOS

Os materiais compósitos têm sido alvo de grande aplicação devido a sua versatilidade e ao seu grande potencial de formação de estruturas mais leves. As primeiras aplicações estruturais ocorrem na indústria aeroespacial, no começo da década de 60, onde o peso tem grande influência no consumo de combustível, desempenho e limite de carga útil.

Fazendo parte da maioria das escolhas de projetistas, os compósitos poliméricos possuem diversas propriedades atrativas. De acordo com SILVA (2003), os compósitos poliméricos estão presente em diversos setores produtivos, tais como:

- Aeronáutico;
- Aeroespacial;
- Marítimo;
- Automotivo;
- Infraestrutura de edifícios, entre outros.

Nos setores aeronáutico, aeroespacial e marítimo por conta de sua rigidez específica, customização de projeto, resistência a fadiga, estabilidade dimensional, facilidade de moldagem de geometrias complexas, resistência à corrosão e à fadiga. Sua presença no ramo automotivo segue as mesmas razões dos setores anteriores e ainda a durabilidade, segurança, redução de manutenção. Já no setor da construção civil os compósitos poliméricos são empregados em infraestrutura de edifício, construção de pontes e viadutos, bem como em restauração para reforço estrutural de edificações.

Para a aplicação em estruturas estáticas o peso não é um dos requisitos mais importantes, mas possui benefícios como redução de custos de instalação e manutenção; também é vantajoso pelo fato de que em situações onde a corrosão é um fator predominante na escolha do material a ser empregado no projeto.

Os compósitos poliméricos também estão presentes no setor médico, onde possui um grande potencial e variedade de aplicações, tendo como finalidade a redução de peso e o prolongamento da durabilidade. Aplicado em produtos como cadeiras de roda, muletas e dispositivos de implantes médicos leves, resistentes, duráveis e biocompatível como é o caso do grande potencial do poliuretano derivado

do óleo de mamona, por se tratar de um biopolímero. Ainda no cenário médico, é destacado um interesse considerável na Artroplastia ou Prótese Total do Quadril, nos quais os compósitos poliméricos, com preferência para os biocompósitos, são estudados por diversos pesquisadores, como o caso de SILVESTRE FILHO (2001), em prol de uma solução definitiva para aplicação em cirurgias ortopédicas da articulação do quadril.

## 2.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS POLIMÉRICOS

Todo material a ser aplicado em projeto deve ter suas propriedades conhecidas, para que seja avaliada a sua possibilidade de utilização. Com materiais compósitos não é diferente. No entanto, este tipo de material possui uma microestrutura complexa dificultando a sua caracterização, desta maneira, deve-se levar em conta a complexidade de interação mecânica na interface comum (matriz-reforço).

O desempenho estrutural de um material compósito polimérico reforçado sob a ação de carregamentos determinados explicita o seu comportamento mecânico. De acordo com TITA (2003), em algumas condições, este comportamento mecânico pode se desenvolver de forma linear com ruptura frágil ou não-linear com perda gradativa de rigidez e resistência mecânica. Existem fenômenos físicos que definem esses comportamentos e estão associados aos diferentes tipos de respostas estruturais, esses fenômenos são observados em três diferentes níveis: micromecânico; mesomecânico e macromecânico. Onde o primeiro nível possui uma abordagem com o intuito de avaliar os fenômenos que podem ocorrer na microestrutura dos materiais constituintes (fibra e matriz). No segundo, são avaliados os fenômenos que podem ocorrer no interior das lâminas (intralaminares) e entres as lâminas adjacentes (interlaminares). Finalmente, no terceiro nível, ficam analisados os fenômenos que ocorrem na estrutura laminada em sua totalidade. Vale enfatizar que o estudo realizado no presente trabalho se concentra no nível macromecânico.

Segundo MATTHEWS e RAWLINGS (1999), a falha de um componente ocorre quando o mesmo não pode mais satisfazer a função para o qual foi projetado. Desta forma, na fase de desenvolvimento de um projeto, se faz necessário a aplicação de um critério de falha com capacidade de identificar a região de plastificação ou dano

do material. Isto deve ser feito para que o projeto tenha solicitações dentro dessa faixa.

#### 2.4.1 ENSAIO DE TRAÇÃO

Com a aplicação do ensaio de tração são determinadas propriedades de resistência uniaxial, módulo de elasticidade, alongamento e coeficiente de Poisson. A avaliação da resistência à tração é analisada pela carga aplicada ao material por unidade de área, no instante de ruptura. O alongamento exibe o aumento percentual do comprimento da peça sob tração, no momento de ruptura. O módulo de elasticidade é medido pela razão entre a tensão e a deformação, dentro do regime elástico, no qual a deformação é totalmente reversível e proporcional à tensão. O coeficiente de Poisson é definido como a razão negativa entre a deformação transversal e a deformação correspondente no sentido longitudinal de um corpo de prova sob tensão uniaxial, abaixo do limite de proporcionalidade do material. Para ensaios em materiais compósitos reforçados por fibras a determinação do coeficiente de Poisson varia de acordo com a orientação com que o reforço foi inserido na matriz. No desenvolvimento do presente estudo foram determinadas, a partir do ensaio de tração, as seguintes propriedades: módulo de elasticidade, tensão de escoamento e tensão de ruptura.

Esse tipo de ensaio possui embasamento nas normas ASTM D638 e D3039, onde a primeira é mais abrangente e a segunda é indicada para compósitos laminados reforçados com fibras de alto módulo.

#### 2.4.2 EMBASAMENTO MATEMÁTICO PARA A REALIZAÇÃO DO ESTUDO

Para um bom desenvolvimento do estudo em questão serão necessárias algumas equações que serão apresentadas a seguir; de modo semelhante serão utilizadas algumas informações que foram obtidas em estudos desenvolvidos por CARNEIRO (2004), COSTA (2007) e TEIXEIRA (2007); são eles: Densidade da matriz

(1110,3 Kg/m<sup>3</sup>); Módulo de Elasticidade da matriz (1,45 GPa); Densidade da fibra (2600 Kg/m<sup>3</sup>) e Módulo de Elasticidade da fibra (16,25 GPa). A partir destas informações são expostas as equações necessárias para a realização deste estudo:

**a) Área da seção transversal do CDP:**

$$A = t * w \quad (1)$$

Em que, A é a área, t a espessura e w a largura do CDP.

**b) Equações com relação à massa:**

Como a massa do compósito e da fibra são medidas na balança, para o cálculo da massa da matriz tem-se:

$$mm = mc - mf \quad (2)$$

Em que, mm é a massa de matriz; mc, a massa de compósito e mf a massa de fibra.

Cálculo da fração mássica de fibra e de matriz:

$$Mf = \frac{mf}{mc} \quad \text{e} \quad Mm = \frac{mm}{mc} \quad (3) \text{ e } (4)$$

Em que, Mf é a fração mássica de fibra e Mm, a fração mássica de matriz.

Cálculo da densidade do compósito em Kg/m<sup>3</sup>:

$$\rho_c = 10^{-3} * \frac{mc}{\frac{A * l}{10^9}} \quad (5)$$

Em que  $\rho_c$  é a densidade do compósito, e l o comprimento do CDP.

**c) Equações com relação ao volume:**

Cálculo do volume do compósito em m<sup>3</sup>:

$$v_c = t * w * l * 10^9 \quad (6)$$

Em que  $v_c$  é o volume do compósito.

Cálculo da fração volumétrica de fibra, de matriz e do vazio gerado por bolhas de ar presentes na placa oriundas do processo de fabricação:

$$V_f = \frac{\rho_c}{\rho_f} * \frac{M_f}{100} \quad (7)$$

Em que  $V_f$  é a fração volumétrica de fibra, e  $\rho_f$  é a densidade da fibra.

$$V_m = \frac{\rho_c}{\rho_m} * \frac{M_m}{100} \quad (8)$$

Em que  $V_m$  é a fração volumétrica de matriz e  $\rho_m$  a densidade da matriz.

$$V_v = 1 - (V_f + V_m) \quad (9)$$

Em que  $V_v$  é a fração volumétrica de vazio.

Cálculo do volume de fibra, matriz e vazio:

$$v_f = V_f * v_c \quad (10)$$

$$v_m = V_m * v_c \quad (11)$$

$$v_v = v_c - (v_f + v_m) \quad (12)$$

**d) Equação referente ao cálculo do módulo de elasticidade do compósito:**

$$E_c = E_f * V_f + E_m * V_m \quad (13)$$

Em que  $E_c$  é o módulo de elasticidade do compósito;  $E_f$ , o módulo de elasticidade da fibra e  $E_m$  o da matriz.

### 2.4.3 CONCLUSÕES A RESPEITO DOS COMPÓSITOS POLIMÉRICOS

Os Materiais compósitos poliméricos são detentores de inúmeras vantagens muito atrativas em prol de sua aplicação; no entanto, mesmo com este cenário muito favorável sente-se a necessidade de um estudo detalhado, na fase de desenvolvimento de projeto, para a caracterização de suas propriedades mecânicas.

Deste modo, torna-se válido enfatizar que o intuito do presente estudo é de calcular experimentalmente as propriedades mecânicas do poliuretano derivado do óleo de mamona com reforço de fibra de vidro e posterior comparação com as mesmas calculadas teoricamente.

Assim, faz-se necessário um estudo adequado, de acordo com a aplicação almejada, para que seja possível prever o comportamento mecânico deste material.



### 3 MATERIAIS E METODOS

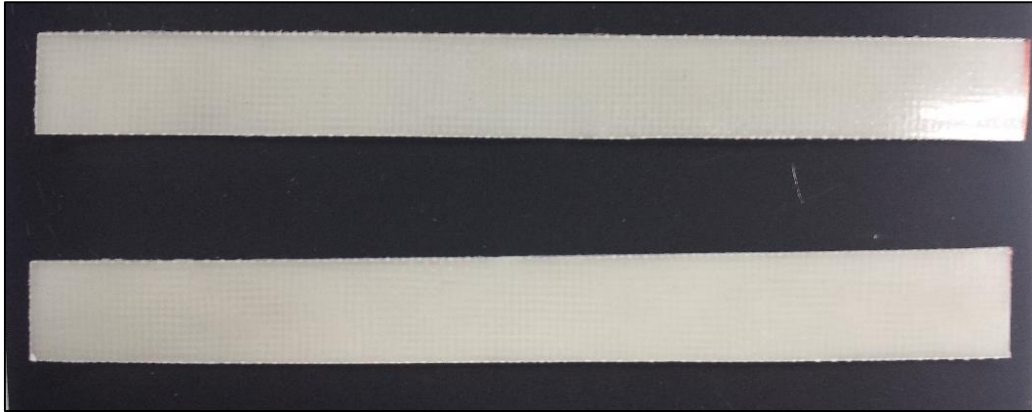
A realização de ensaios para o levantamento das propriedades mecânicas de um material, diz respeito a um trabalho com alto grau de responsabilidade, para que o mesmo seja realizado com sucesso existem normas a serem seguidas e equipamentos com os devidos certificados de calibração a serem utilizados, para que assim o teste tenha um bom resultado e um elevado nível de confiança.

O trabalho começa desde o ponto de realização de uma boa análise visual dos CDP's, para a verificação quanto à sua homogeneidade (por se tratar de um material compósito), seguida de verificação dimensional dos mesmos e levando em consideração as limitações do processo de fabricação utilizado, para que então seja possível a fase de testes assistido por um equipamento de ensaio universal, adquirindo os dados necessários para posterior análise.

#### 3.1 MATERIAIS

Para a realização do presente trabalho utilizou-se da poliuretana derivada do óleo de mamona, ocupando o papel de matriz do compósito estudado, e fibra de vidro bidirecional, zero e noventa graus, como elemento de reforço. A elaboração das placas de compósito, para que fossem extraídos os CDP's, foi realizada com fração mássica de 60% de matriz e 40% de reforço.

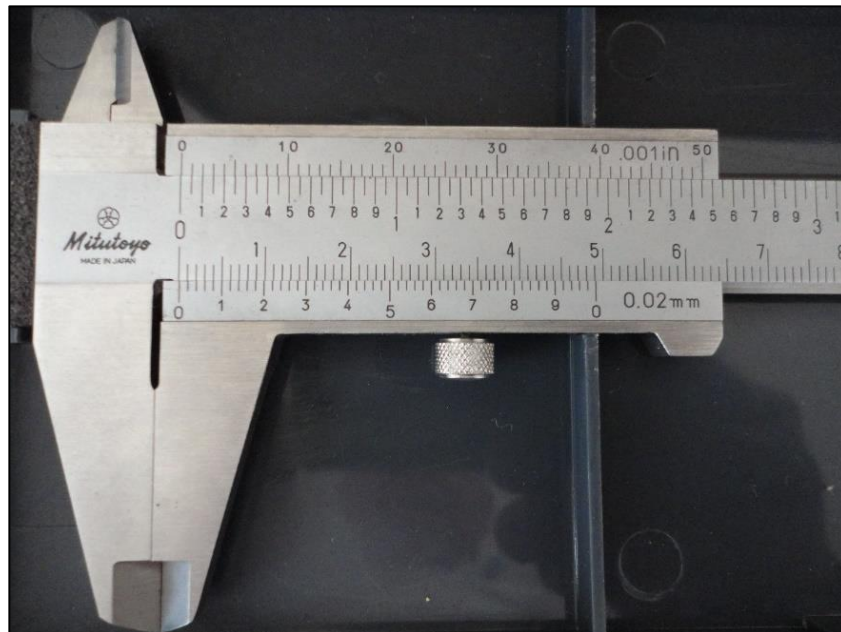
Ainda com o interesse de suprir os requisitos para o desenvolvimento deste trabalho, houve a necessidade da utilização de alguns materiais, como: CDP's normalizados (Figura 3), cuja fabricação e garantia dimensional foi responsabilidade do trabalho de conclusão de curso de COSTA JUNIOR (2015), que também explicita de forma clara todos os materiais e métodos utilizados com as suas devidas justificativas.



**Figura 3 – Corpos de prova para ensaio de tração.**

**Fonte: Aatoria Própria (2015).**

Previamente a execução dos ensaios foi realizada uma aferição dimensional dos CDP's com o auxílio de um paquímetro convencional da marca Mitutoyo de 200mm com precisão de 0.02mm, o mesmo é representado na figura 4.



**Figura 4 – Paquímetro de 200mm da marca Mitutoyo.**

**Fonte: Aatoria Própria.**

Para a medição de massa dos CDP's utilizou-se uma balança digital SHIMADZU, modelo BL3200H (figura 5), que opera entre 0,5g e apresenta erro de 0,1g.



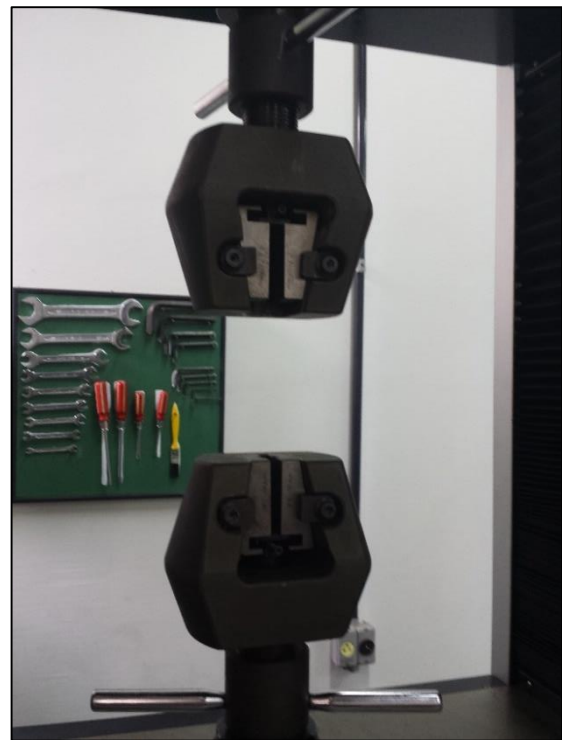
**Figura 5 – Balança digital.**

**Fonte: Autoria Própria.**

Também foi utilizada uma máquina de ensaio universal Time Group, como capacidade de 10 toneladas, que está presente na Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Cornélio Procópio, que é representada na Figura 6.



**(a)**



**(b)**

**Figura 6 - Máquina de ensaio universal: (a) vista frontal e (b) detalhamento das garras de fixação do corpo de prova.**

**Fonte: Autoria Própria (2015).**

Após a realização dos ensaios de acordo com as normas vigentes e devida aquisição de dados foram utilizados meios matemáticos e gráficos para a realização da devida análise dos mesmos.

### 3.2 MÉTODOS

Pelo fato do estudo ser desenvolvido embasado por normas, os métodos a serem utilizados devem seguir as instruções nelas contidas; para a realização do presente trabalho a norma empregada será a ASTM D3039, que trata dos métodos normalizados para ensaios de tração em materiais compósitos de matriz polimérica; na qual estão contidas todas as informações necessárias para que os testes sejam desenvolvidos de forma eficaz e confiável, desde dimensões dos CDP's à velocidade de ensaio (2 mm/min).

Desta forma, para verificação da sua qualidade física dos corpos de prova, quanto à falta de matriz devido a formação de bolhas ou falta de preenchimento graças ao processo. Esta análise é necessária pelo fato de a fração mássica e volumétrica entre os componentes do material compósito ser um fator influenciador nos resultados de suas propriedades mecânicas.

Sendo assim, de acordo com os equipamentos disponíveis no laboratório de mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, o método escolhido para a produção dos CDP's utilizados neste estudo foi o *Hand Lay-UP* com uma fração mássica de 40% de fibra e 60% de matriz, além de outras peculiaridades como umidade relativa em torno de 77% e temperatura ambiente de 24,5 °C durante o processo de laminação.

Para a fabricação da placa de compósito, de onde foram obtidos os corpos de prova, utilizou-se 185g de Pré-polímero, 130g de Polioliol e 190g de Fibra de vidro; assim, após todo o processo de laminação e cura da placa obteve-se 7 CDP's.

Em seguida, passa-se para a análise dimensional dos CDPs, verificando as três dimensões dos mesmos (largura, espessura e comprimento), para isso, utiliza-se régua e paquímetro. A terceira fase é a catalogação dos corpos de prova em planilha excel, com todas as informações dos mesmos, ou seja, comprimento útil 150 mm, largura, espessura e a massa. A quarta fase são os ensaios propriamente dito

para aquisição da força e do deslocamento sofrido pelo CDP. Para com esses parâmetros partir para análise dos dados e cálculos das propriedades já mencionadas.

### 3.2.1 CATALOGAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Após a obtenção dos CDP's, os mesmos precisam ser catalogados para que possa ser feita a análise dimensional, mássica e volumétrica que formam um instrumento de apoio e base para a determinação do módulo de elasticidade e devida caracterização dos mesmos. São apresentados a seguir, os dados obtidos a partir da análise precedente à realização dos ensaios, sendo elas: análise dimensional, análise mássica e volumétrica.

A figura 7 representa as dimensões dos CDP's, onde  $t$  é a espessura,  $w$  a largura e  $l$  o comprimento dos mesmos.

CDP	$t$ (mm)	$w$ (mm)	$l$ (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )
1	4,18	24,22	248,5	101,31
2	4,17	25,25	249,2	105,21
3	4,02	24,98	251,7	100,35
4	3,72	23,56	250,9	87,59
5	3,77	23,65	248,8	89,08
6	3,87	23,55	251,4	91,06
7	3,92	24,77	249,6	97

**Figura 7 – Dimensões dos Corpos de Prova.**

**Fonte: Autoria Própria.**

A figura 8 representa os dados relativos à massa dos CDP's, também fazendo referência à massa de sua composição e devida fração mássica de seus componentes e a densidade do corpo de prova.

	mc	mf	mm	Mf	Mm	$\rho$
CDP	massa do compósito (g)	massa da fibra (g)	massa da matriz (g)	Fração mássica de fibra (%)	Fração mássica de matriz (%)	Densidade Compósito (Kg/m <sup>3</sup> )
1	34,83	13,79	21,04	39,59	60,41	1375,23
2	36,32	13,43	22,89	36,98	63,02	1380,88
3	35,57	14,03	21,54	39,44	60,56	1417,84
4	31,67	12,98	18,69	40,99	59,01	1446,29
5	31,94	12,98	18,96	40,65	59,35	1434,19
6	31,8	12,98	18,82	40,83	59,17	1396,88
7	35,45	12,98	22,47	36,62	63,38	1461,81

Figura 8 – Dados relativos a massa dos Corpos de Prova.

Fonte: Autoria própria.

Já a figura 9, vem representando os dados relativos ao volume dos CDP's, também fazendo referência ao volume de sua composição, e devida fração volumétrica de seus componentes; além de já apresentar uma coluna onde mostra o valor do módulo de elasticidade calculado teoricamente para cada corpo de prova.

	vc	vf	vm	Vf	Vm	Vv	E
CDP	Volume compósito (m <sup>3</sup> )	Volume fibra (m <sup>3</sup> )	Volume matriz (m <sup>3</sup> )	Fração volumétrica de fibra (%)	Fração volumétrica matriz (%)	Fração volumétrica vazio (%)	Módulo Elastic Composito [GPa]
1	2,53E-05	5,3E-06	1,89E-05	0,2094	0,7482	0,0424	4,4879
2	2,63E-05	5,17E-06	2,06E-05	0,1964	0,7838	0,0198	4,3278
3	2,51E-05	5,4E-06	1,94E-05	0,2151	0,7733	0,01163	4,6165
4	2,19E-05	4,99E-06	1,68E-05	0,2281	0,7686	0,00338	4,8202
5	2,23E-05	4,99E-06	1,71E-05	0,2242	0,7666	0,00916	4,7553
6	2,28E-05	4,99E-06	1,69E-05	0,2194	0,7444	0,03622	4,6439
7	2,43E-05	4,99E-06	2,02E-05	0,2059	0,8344	0,04028	4,5559

Figura 9 – Dados relativos ao volume dos Corpos de Prova e Módulo de Elasticidade.

Fonte: Autoria Própria.

Terminada a catalogação dos CDP's tornou-se possível a realização do cálculo teórico do módulo de elasticidade de cada corpo de prova estudado; após a realização deste estudo prévio foi possível a execução da análise quanto a obtenção de um valor médio para o módulo de elasticidade com o seu devido desvio padrão; que está representado na figura 10.

<b>Média</b>	<b>4,601073618</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>0,152770767</b>

**Figura 10 – Módulo de Elasticidade médio teórico com desvio padrão.**

**Fonte: Autoria própria.**

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 RESULTADOS

Posteriormente à apropriada catalogação dos CDP's e cálculo do módulo de elasticidade teórico o presente estudo passa para a fase de execução do ensaio de tração de acordo com a normativa vigente para o mesmo e com a aplicação de uma pré-carga de 1 KN para que assim fosse dado início ao ensaio; sendo assim, partindo dos dados adquiridos no ensaio e devido tratamento dos mesmos são obtidos os gráficos Tensão x Deformação, (que são representados nas figuras 11, 12, 13, 14, 15, 16 e 17) que foram utilizados para catalogação e cálculo experimental do módulo de elasticidade, tensão de escoamento e tensão de ruptura dos CDP's, que serão apresentados na figura 19.

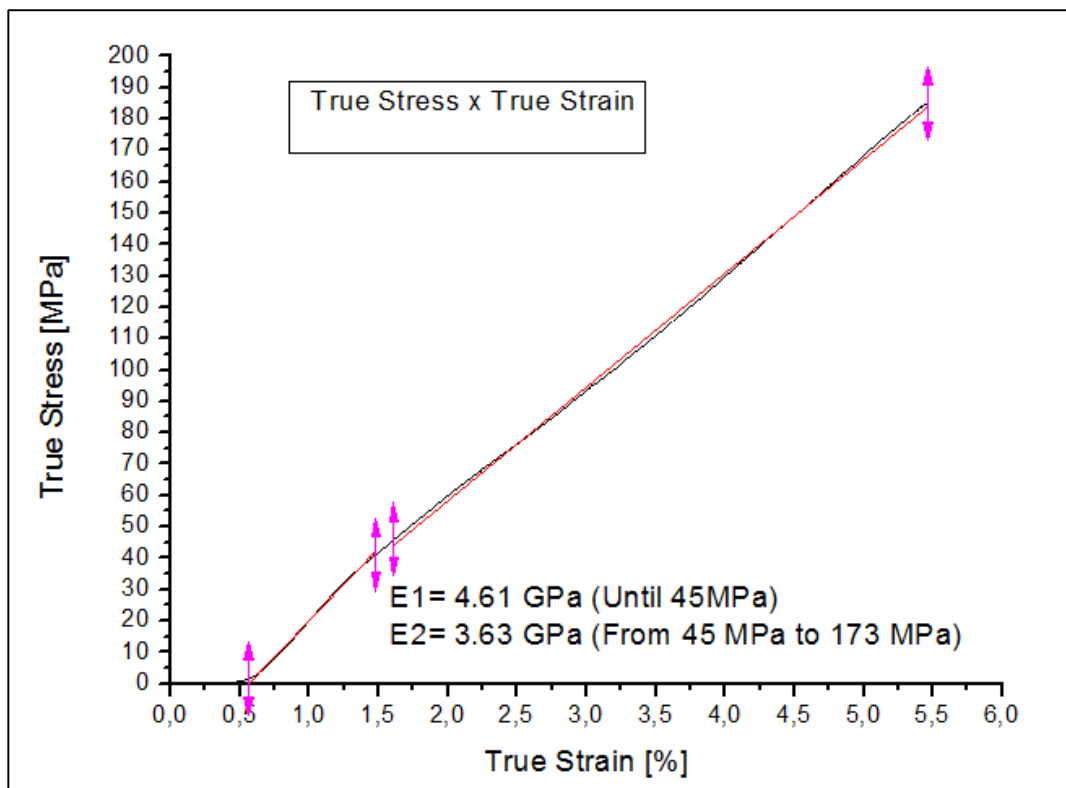


Figura 11– Diagrama Tensão x Deformação: CDP 1.

Fonte: Autoria Própria.



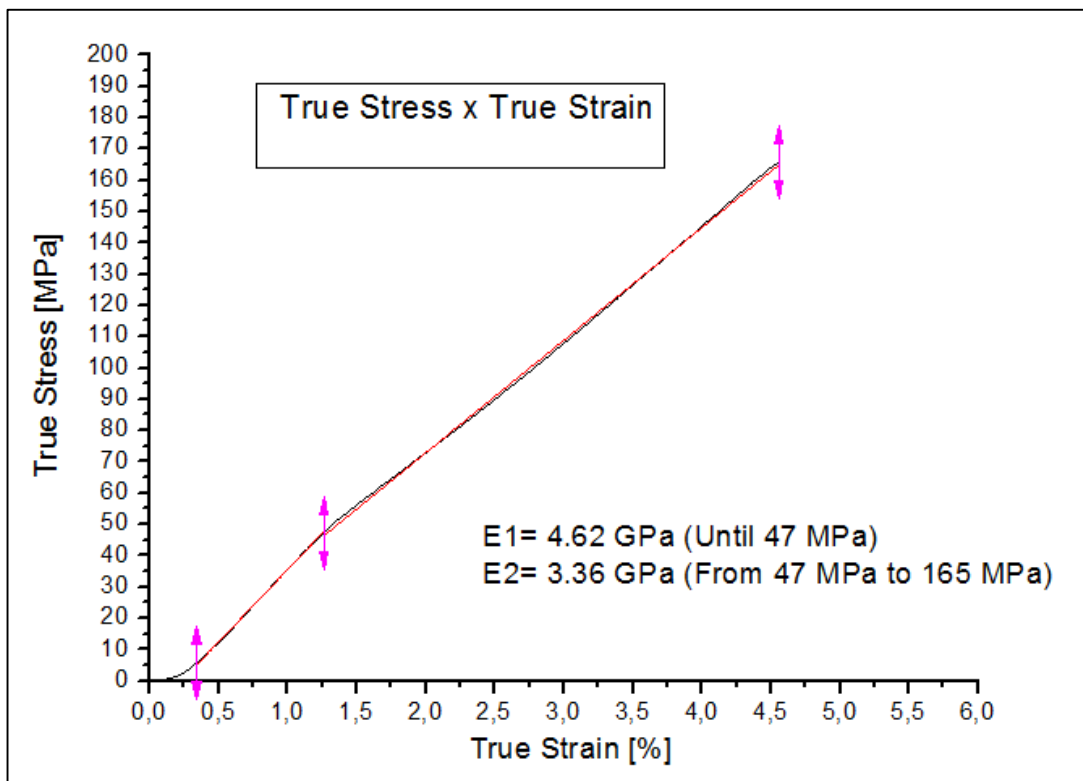


Figura 12– Diagrama Tensão x Deformação: CDP 2.

Fonte: Autoria Própria.

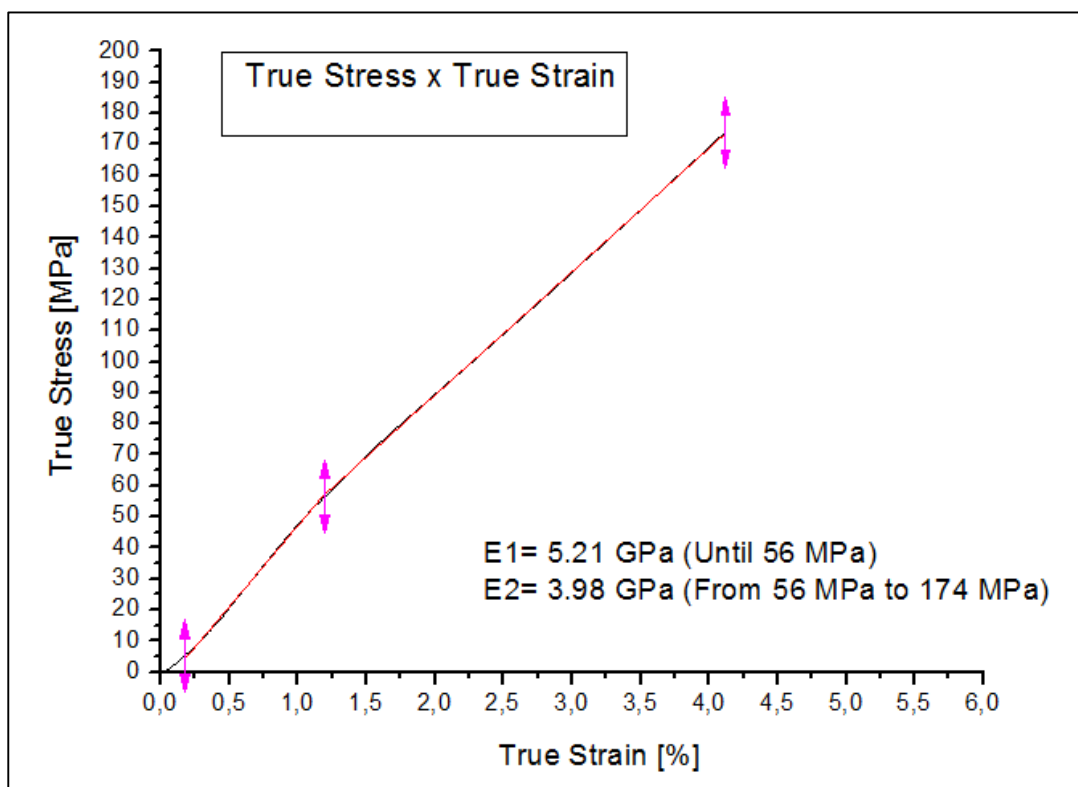


Figura 13– Diagrama Tensão x Deformação: CDP 3.

Fonte: Autoria Própria.

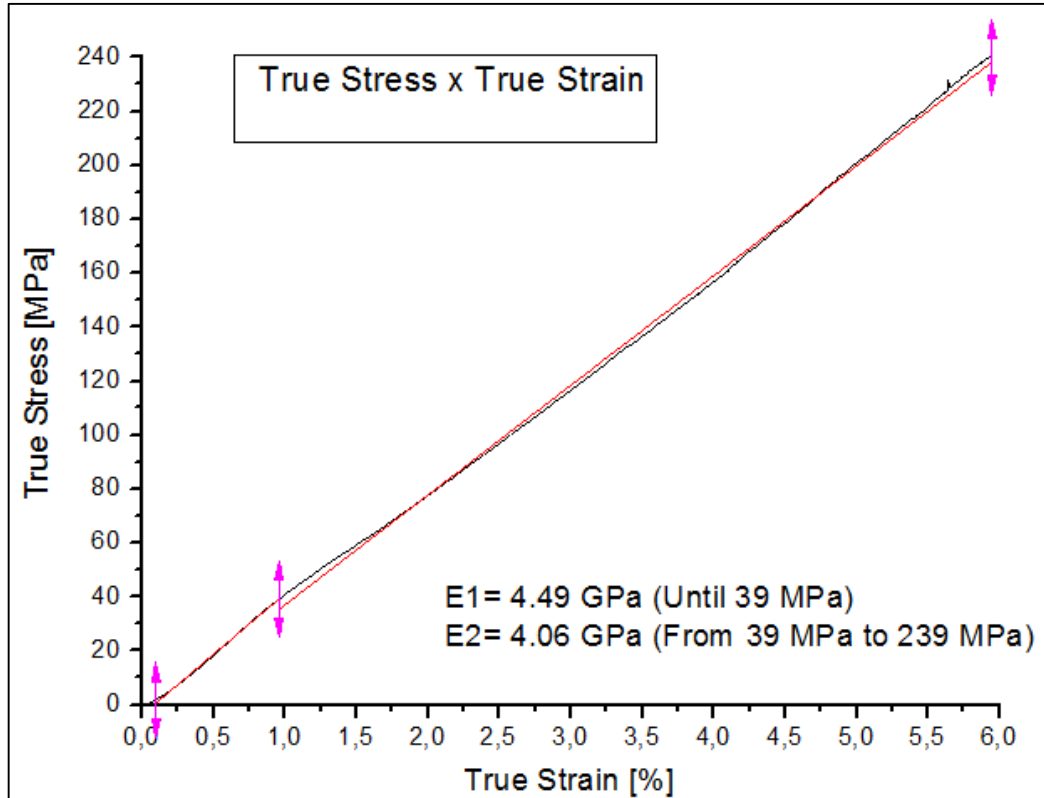


Figura 14– Diagrama Tensão x Deformação: CDP 4.

Fonte: Autoria Própria.

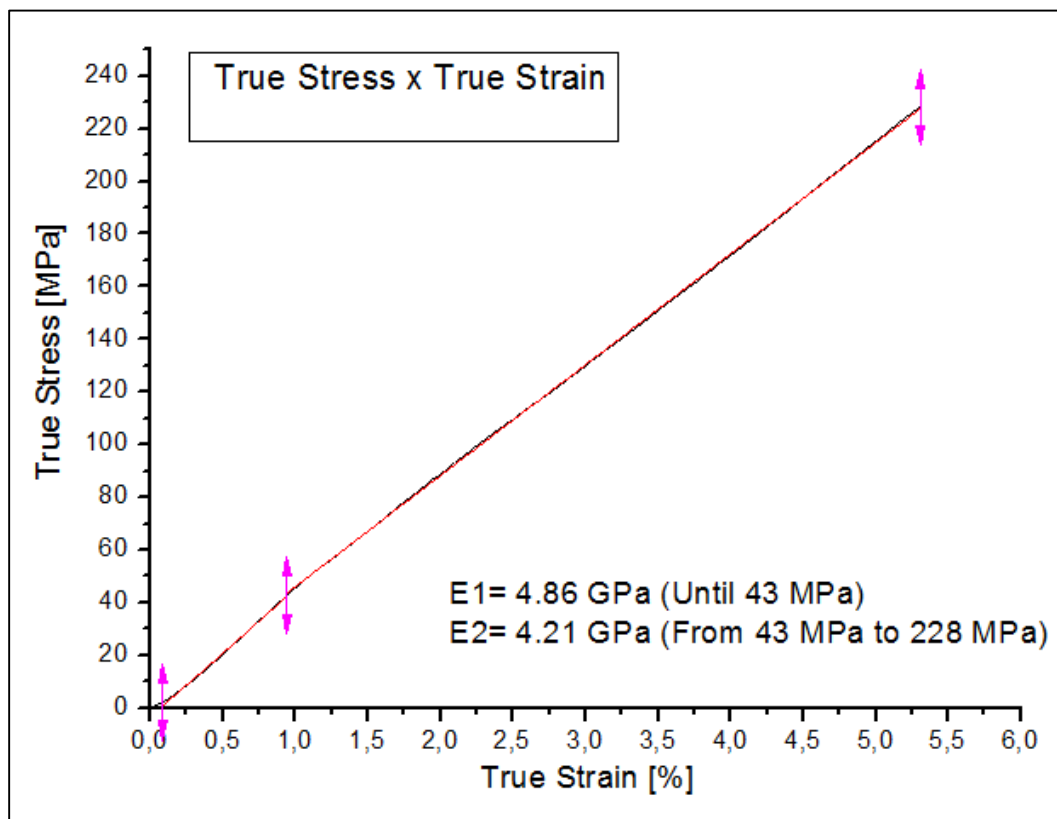


Figura 15– Diagrama Tensão x Deformação: CDP 5.

Fonte: Autoria Própria.

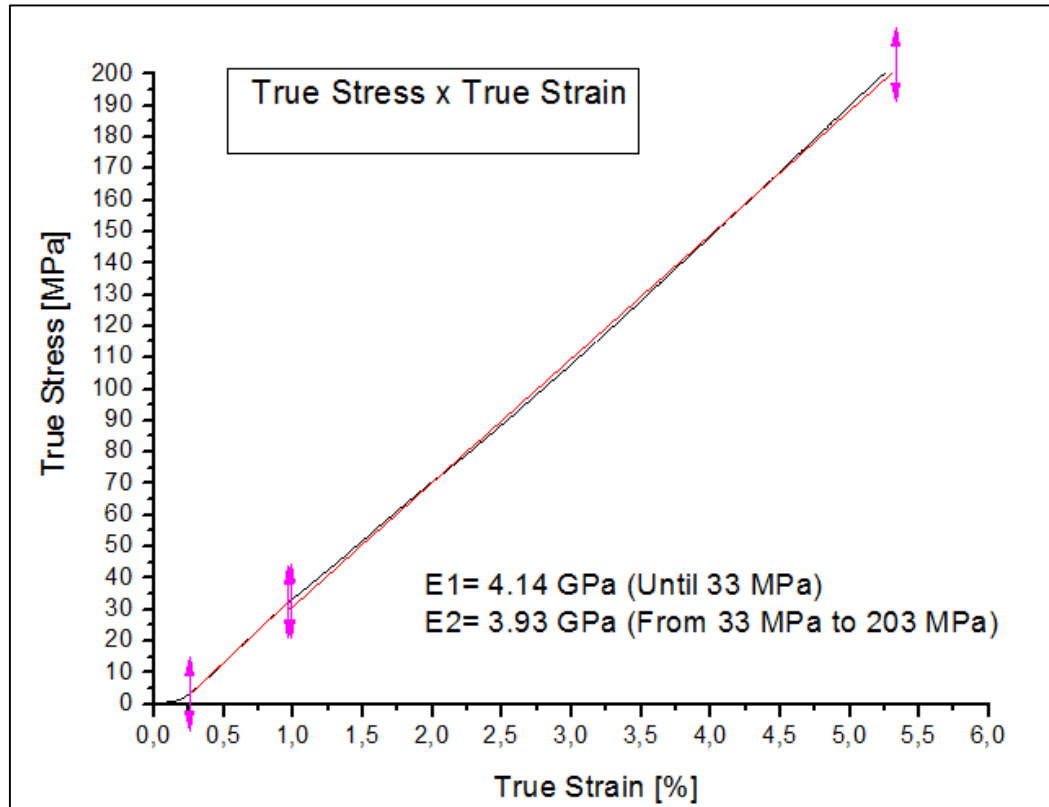


Figura 16– Diagrama Tensão x Deformação: CDP 6.

Fonte: Autoria Própria.

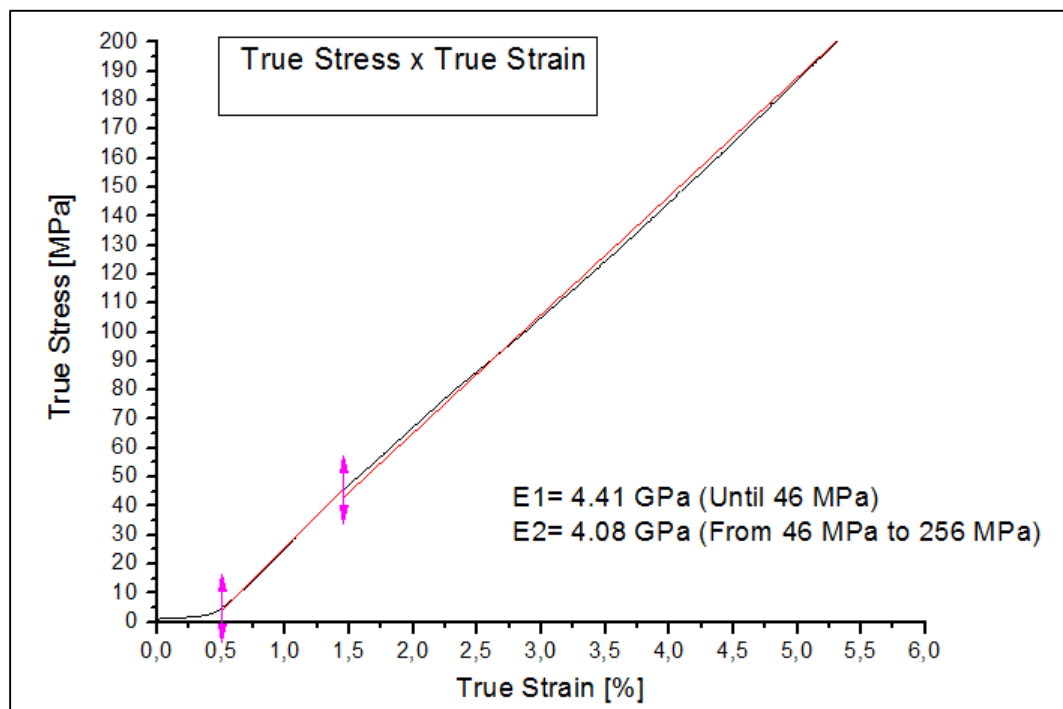
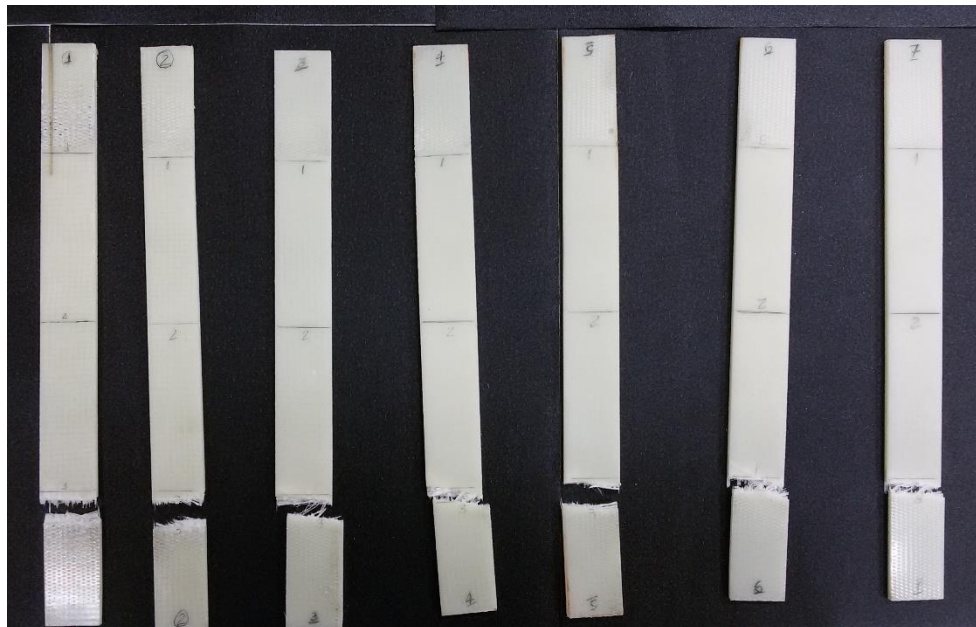


Figura 17 – Diagrama Tensão x Deformação: CDP 7.

Fonte: Autoria Própria.

Sucessivamente à execução do ensaio de tração e tratamento dos dados com ele adquiridos tem-se a possibilidade de realização da análise dos mesmos; sendo assim, partindo da verificação dos diagramas Tensão x Deformação nota-se que o material em estudo sofreu uma ligeira mudança na inclinação da curva apresentada no diagrama, em outras palavras, foi observada a presença de um ponto de inflexão; partindo deste fato realiza-se uma aproximação linear da curva para uma melhor análise. Deste modo, verifica-se a presença de dois segmentos de reta, com dois coeficientes angulares diferentes, apresentando assim, dois módulos de elasticidade; para a conclusão do objetivo do estudo, de realizar a comparação do módulo de elasticidade calculado teórico e experimentalmente, será utilizado o coeficiente angular do primeiro segmento de reta, isto se dá pelo fato de o segundo coeficiente angular estar presente graças a três hipóteses, onde a primeira relaciona a presença de um escorregamento do corpo de prova na garra, quando se atinge por volta de 50Mpa; a segunda hipótese faz referência a um problema na sequência de empilhamento e alinhamento das fibras, de modo que quando estas fibras são tracionadas sofrem alinhamento na direção da carga, com isso ocorre uma mudança na inclinação da curva; já a terceira hipótese trata de um possível problema na interface comum (fibra-matriz), mas esta pode ser considerada como pouco provável pelo fato de os corpos de prova terem apresentado fratura frágil, conforme mostra a figura 18.



**Figura 18 – Corpos de prova após a realização do ensaio.**

**Fonte: Autoria própria.**

Ainda em relação à análise dos diagramas Tensão x Deformação dos CDP's tem-se o cálculo dos módulos de elasticidade facilitado pela realização de uma aproximação linear da curva presente no diagrama; além disso observa-se uma boa representação e identificação da Tensão de Escoamento, definida pela posição onde está presente o ponto de inflexão da curva, ou pelo ponto onde é observada a alteração de inclinação das retas, e também a definição do ponto onde se encontra a Tensão de Ruptura do material, representada pela localização do diagrama onde são observados os últimos valores de tensão e deformação.

Partindo de todo tratamento de dados e da observação dos diagramas, torna-se o possível o cálculo do módulo de elasticidade teórico, tensão de escoamento e tensão de ruptura com os seus respectivos desvios padrão; todos esses cálculos e detalhamentos podem ser observados na figura 19.

CDP	E1 (GPa)	E2 (GPa)	Tensão de Escoamento (MPa)	Tensão de Ruptura (MPa)
1	4,61	3,63	45	173
2	4,62	3,36	47	165
3	5,21	3,98	56	174
4	4,49	4,06	39	239
5	4,86	4,21	43	228
6	4,14	3,93	33	203
7	4,41	4,08	46	256
Média	4,62	3,89	44,14	205,42
Desvio Padrão	0,316	0,274	6,6	33,54

**Figura 19 – Cálculos experimentais**

**Fonte: Autoria Própria.**

De posse de todas essas informações torna-se possível a comparação do módulo de elasticidade teórico com o experimental sendo representado na Figura 20 juntamente com o cálculo do erro absoluto entre os dois métodos.

Comparação		
	E (GPa) Teórico	E (GPa) Experimental
Médio	4,6	4,62
Desvio Padrão	0,1528	0,316
Erro Absoluto	0,433 (%)	

**Figura 20 – Comparação entre Módulo de Elasticidade teórico e experimental.**

**Fonte: Autoria Própria.**

Deste modo, conclui-se que o estudo foi desenvolvido de forma condizente com o esperado (embasamento teórico), onde os resultados obtidos permaneceram com valores em torno dos dados adquiridos teoricamente.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O engenheiro, no exercício de sua função, continua uma busca incessante por soluções que possam facilitar, de alguma forma, a vida do homem; isto tem como consequência o desenvolvimento de novos materiais que possam suprir as necessidades das dificuldades encontradas e as exigências de um mercado muito competitivo.

Seguindo esta vertente, tem-se desenvolvido diversos estudos a respeito dos materiais compósitos poliméricos reforçados, graças às suas atrativas vantagens e propriedades mecânicas em prol de sua aplicação; satisfazendo também exigências de materiais não poluentes e biocompatíveis, como é o caso dos biopolímeros. Desta forma, foi observada a necessidade da realização de estudos mais aprofundados quanto à comprovação das propriedades mecânicas do material, de acordo com a sua composição (tipo de matriz e reforço), para que assim, fosse possível a conclusão a respeito da viabilidade do uso do mesmo para os fins almejados.

Paralelamente a esta necessidade observada, o presente estudo foi realizado com enfoque em compósito com matriz biopolimérica, especificamente, o poliuretano derivado do óleo de mamona com reforço de fibra de vidro. Assim, o objetivo do estudo foi comparar o módulo de elasticidade obtido teoricamente com o adquirido experimentalmente. Com a realização do estudo, sendo o mesmo embasado por outros trabalhos desenvolvidos sobre materiais compósitos e pelas normas vigentes para o ensaio utilizado, pode-se concluir positivamente quanto à coerência entre o módulo de elasticidade calculado teoricamente e o obtido experimentalmente, com a apresentação de um erro absoluto muito baixo.

No entanto, mesmo com os resultados positivos do estudo, conclui-se que somente o ensaio de tração não é suficiente para a determinação de todas as propriedades e características mecânicas para que o material seja considerado satisfatório e viável para a aplicação almejada.

Outro fato observado a partir da realização do estudo, foi a complexa interação da interface comum do material e difícil antevista do seu comportamento mecânico.

Desta forma, faz-se necessário uma análise detalhada, durante a fase de desenvolvimento de projeto, de acordo com a sua aplicação, sobre a sua característica comportamental quando solicitado.

## 5.1 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

São propostas para trabalhos futuros:

- Realizar um estudo comparativo entre tensões de escoamento e ruptura obtidos teórica e experimentalmente.
- Efetuar o cálculo do coeficiente de Poisson do material, utilizando extensômetro e/ou correlação de imagens.
- Desenvolver estudos de análise do comportamento do material, incorporando conceitos de mecânica da fratura.
- Investigar o comportamento da interface fibra-matriz.
- Com base no presente estudo vem sendo desenvolvida a dissertação do aluno Fellipe Biagi, na Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Cornélio Procópio, que aborda a aplicação do material aqui estudado em hastes de próteses para quadril humano.



## REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Terminology for Composite Materials1**. American Society for Testing And Materials. West Conshohocken. 2007. (D3878-07).

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials1**. American Society for Testing And Materials. 2006. (D3039).

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test for Tensile Properties of Plastics1**. American Society for Testing And Materials. 2002. (D638).

ASSOCIAÇÃO LATINO-AMERICANA DE MATERIAIS COMPÓSITOS (ALMACO). **Quem somos**. Disponível em: <<http://www.almaco.org.br/quemsomos.cfm>> Acesso em: 7 de jun. 2014.

CALLISTER, W.D. **Materials Science and engineering: an introduction**. Third edition. P.521-531. New York, John Wiley & Sons, Inc, 1994.

CARNEIRO, Luiz Antônio Vieira. **Reforço de vigas e pilares de concreto com materiais compósitos de resina e fibras**. 2004. 405p. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação de Engenharia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

CLARO NETO, S. **Caracterizações físico-química de um poliuretano derivado de óleo de mamona utilizado para implantes ósseos**. 1997. 127f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.

COSTA, Romeu Rony Cavalcante. **Aplicabilidade de modelos constitutivos para analisar o comportamento mecânico de um biopolímero**. 2007. 171f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

COSTA JUNIOR, Carlos Gonçalo Manso da Costa da. **Fabricação de corpos de prova de tração em compósito com matriz biopolimérica**. 2015. 73f. Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Mecânica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio-PR, 2015.

ERENO, D. **Polímero derivado de óleo vegetal, sintetizado por químico de São Carlos, ganha mercado internacional.** Pesquisa Fapesp. Edição 91. Setembro 2003.

FERNEDA, Amauri Bravo. **Estudo teórico-experimental do comportamento elastoplástico de poliuretano derivado do óleo de mamona (*Ricinus communis*).** 2006. 135f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

FERRANTE, M. **Seleção de Materiais.** 2 ed, EDUFSCAR, São Carlos - SP, Brasil, 2002.

HERAKOVICH, Carl T. **Mechanics of fibrous composites.** Charlottesville, Virginia: Jhon Wiley & Sons. 1998.

HULL, D. **Introduction to composite materials.** 1988. Cambridge University Press, Cambridge, Inglaterra, 1988.

LEVY NETO, Flaminio; PARDINI, Luiz Claudio. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia.** 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2006.

MANZOLLI Leite, Fabio Renato; RAMALHO, Lizeti Toledo de Oliveira. **Bone regeneration after demineralized bone matrix and castor oil (*Ricinus communis*) polyurethane implantation.** Journal of Applied Oral Science, Bauru-SP, 3 jan. 2008. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S1678-77572008000200008>>. Acesso em: 29 abr. 2015.

MATTHEWS, F.L.; RAWLINGS, R.D. **Composite materials: engineering and science.** London, Chapman & Hall. 1999.

MARTINEZ, Caetano Belda. **Estudo da influência do ciclo de cura nas propriedades mecânicas de compósitos fabricados pelo processo de infusão de resina.** 2011. 104 f. Dissertações (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

MENDONÇA, Paulo de Tarso R. **Materiais compostos e estruturas-sanduíche.** Barueri, SP: Manole, 2005.

PAGANO, Rogério Luz. **Modelagem, simulação e otimização de processos contínuos de produção de materiais compósitos**. 2009. 192 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

PLEPLIS, A.M.G. **Caracterização térmica e viscoelástica de resinas poliuretanas derivadas de óleo de mamona**. 1991. 155f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1991.

SANTIAGO, R.C. **Comportamento Mecânico do Compósito de Resina Ortoftálica Reforçado com Fibra de Juta e Tratado Quimicamente com Hidróxido de Sódio**. CEFET-RN, Natal-RN, p.44-54, 2007.

SANTOS, Lizandro de Sousa. **Simulação e otimização do processo de pultrusão**. 2009. 132 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

SILVA, Rosana Vilarim da. **Compósito de resina poliuretano derivada do óleo de mamona e fibras vegetais**. 2003. 157f. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2003.

SILVESTRE FILHO, Geraldo Dantas. **Comportamento mecânico do poliuretano derivado do óleo de mamona reforçado com fibra de carbono: contribuição para o projeto de hastes de implante de quadril**. 2001. 192f. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

TEIXEIRA, Ana Maria Abreu Jorge. **Ponte desmontável em material compósito de fibra de vidro**. 2007. 224p. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação de Engenharia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

TITA, V. **Contribuição ao estudo de danos e falhas progressivas em estruturas de material compósito polimérico**. 2003. 196f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

WILLIAMS, D.F. **Definitions in biomaterials**. Elsevier, New York, 1987.

WILLIAMS, D.F. **The Williams dictionary of biomaterials**. 1. ed. Liverpool: Liverpool university press, 1999.