

# DISTRIBUIÇÃO ESTATÍSTICA DE WEIBULL APLICADA A COMPÓSITOS DE POLIETILENO RECICLADO/FIBRA VEGETAL DE SISAL \*

Leonardo Carneiro Andrade<sup>1</sup>  
Santino Loruan Silvestre de Melo<sup>2</sup>  
Laudenor Amorim<sup>3</sup>  
Enio Pontes de Deus<sup>4</sup>

## Resumo

O desenvolvimento de materiais renováveis e biodegradáveis é uma vertente que almeja a diminuição dos custos e dos impactos ambientais. Nesse âmbito, o presente trabalho visa o desenvolvimento de novos materiais, fabricados com fibras vegetais e que possam substituir outros que são derivados do petróleo. Fibras vegetais foram utilizadas e devidamente modificadas por mercerização e acetilação com o intuito de produzir materiais com compatibilidade química. Foram obtidos, nesse trabalho, compósitos de polietileno reciclado reforçados com fibras de sisal[1]. Utilizamos a ferramenta estatística denominada distribuição de Weibull, para prever as falhas mecânicas dos sistemas estudados. Foi possível observarmos que o compósito resultante teve uma melhora relativa em suas propriedades mecânicas, o que pôde ser comprovado por meio dos ensaios de tração. A distribuição de Weibull foi uma ferramenta que produziu resultados de acordo com os esperados, comprovando a melhoria de propriedades mecânicas do material.

**Palavras-chave:** Compósitos; Fibra de Sisal; Distribuição de Weibull.

## WEIBULL STATISTICAL DISTRIBUTION APPLIED TO COMPOSITES OF RECYCLED POLYETHYLENE AND SISAL FIBER.

## Abstract

The development of renewable and biodegradable materials is a trend that seeks to reduce costs and environmental impacts. In this context, the present work aims at the development of new materials, made with vegetable fibers and that can replace others that are derived from petroleum. Plant fibers were used and duly modified by mercerization and acetylation in order to produce materials with chemical compatibility. In this work, recycled polyethylene composites reinforced with sisal fibers were obtained. We used the statistical tool called the Weibull distribution, to predict the mechanical failures of the studied systems. It was possible to observe that the resulting composite had a relative improvement in its mechanical properties which could be proved by the tensile tests. The Weibull distribution was a tool that produced results as expected, improving the mechanical properties of the material.

**Keywords:** Composites; Sisal fiber; Weibull distribution.

<sup>1</sup> Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Graduando, LAMEFF/Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Ceará, Ceará e Brasil.

<sup>2</sup> Física, Mestre, Professor, FAFIDAM, Universidade Estadual do Ceará, Limoeiro do Norte, Ceará e Brasil.

<sup>3</sup> Química, Graduado, Mestrando, LAMEFF/Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, Brasil.

<sup>4</sup> Engenharia Civil, Doutor, Professor, LAMEFF/Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

Ao manufaturar compósitos, devemos observar e analisar os tipos de reforços que poderão ser introduzidos na matriz, levando em consideração as propriedades do reforço e da matriz, assim como a compatibilidade química entre as fases. As propriedades do material dependem das características das fibras a serem inseridas, como comprimento, espessura e módulo de elasticidade, que irão adicionar vantagens e desvantagens no material [2].

As fibras naturais de origem vegetal são encontradas entre as mais diversas plantas disponíveis na biodiversidade e são também uma fonte de recurso renovável. Diversas fibras naturais vegetais são produzidas em praticamente todos os países e usualmente são designadas por materiais lignocelulósicos. No Brasil, existe uma grande variedade de fibras vegetais com diferentes propriedades químicas, físicas e mecânicas. [3]

Dada à alta variedade de fibras naturais e as suas propriedades que são bem definidas em diversos casos, podemos fazer uso de tais materiais em sua forma natural e, dessa maneira, ampliar as vantagens econômicas e de baixo impacto ambiental. A maioria das plantas são compósitos naturais lignocelulósicos, que possuem boas propriedades mecânicas devido a orientação fibrilar e sua fração de celulose cristalina, contribuindo para que as fibras extraídas dessas plantas possam ser utilizadas como fase dispersa em compósitos sintéticos estruturais. [4]

Nesse trabalho, utilizou-se a distribuição de Weibull, adequada para a análise de falhas, resistência a fratura frágil e comportamentos em fadiga, sendo sua utilização observada em muitas áreas das ciências, como por exemplo, na falha de compósitos de fibra de carbono [5]. Como esta distribuição é comprovadamente eficiente para análise de resistência a fratura frágil, tipo de fratura que ocorreu durante os ensaios, tal mecanismo será utilizado para o levantamento das propriedades mecânicas médias dos compósitos de matriz termoplástica. Essa análise estatística de resultados é aplicada em diversos sistemas em que se destaca uma ou mais variáveis aleatórias. Proposta por Ernest Weibull em 1951, tal distribuição pode ser aplicada em várias áreas das ciências.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Materiais usados

A principal matéria-prima utilizada neste trabalho foram às fibras de sisal da espécie *Agave Sisalana*, o sisal foi obtido na Leroy Merlin. A corda de sisal foi descascada, desfibrada e cortada (em partes de 20cm de comprimento) no Laboratório de Mecânica da Fratura e Fadiga (LAMEFF-UFC). Os materiais poliméricos foram compostos de polietileno que foram utilizados como a matriz polimérica. Os polietilenos são inertes face à maior parte dos produtos químicos comuns, o que se deve à sua natureza parafínica, ao seu alto peso molecular e a sua estrutura (parcialmente cristalina). Em temperaturas abaixo de 60 °C, são parcialmente solúveis em todos os solventes. Os compósitos foram ensaiados em uma máquina de testes de tração universal localizada no Laboratório de Ensaios Mecânicos do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE). Nesse contexto, para uma posterior comparação também foram ensaiados os

materiais poliméricos (sem a adição do reforço de fibras de sisal) para um caráter comparativo com o material compósito.

## 2.2 Tratamento das fibras

O procedimento utilizado para tratamento das fibras de sisal foi disposto da seguinte forma:

Na primeira etapa do tratamento as fibras foram lavadas com água destilada, à temperatura de 80° por 1 hora. Este processo foi realizado 4 vezes. Após serem lavadas, as fibras foram secas em estufa durante 1 hora à temperatura aproximada de 100°. As fibras de Sisal foram tratadas com solução de NaOH na concentração de 2% na temperatura de 60° em um período de uma hora. Foi usado o volume de 1 litro de solução para tal tratamento. Neste volume as fibras ficam completamente imersas. Esse processo foi realizado 2 vezes e, antes e depois de cada um desses processos, houve uma etapa de Lavagem. Após 2 etapas de Mercerização e 3 de lavagem às fibras de Sisal foram imersas em uma solução de Anidrido Acético e de Ácido Acético (proporção de um para um), para a realização dos tratamentos de acetilação a metodologia adotada foi adaptada de D'Almeida et al [6], foram adicionadas 5 gotas de ácido sulfúrico para 250 ml da solução, por 1 hora, à temperatura de 80°. Após esta etapa de Acetilação as fibras passaram novamente por uma etapa de lavagem e secagem.

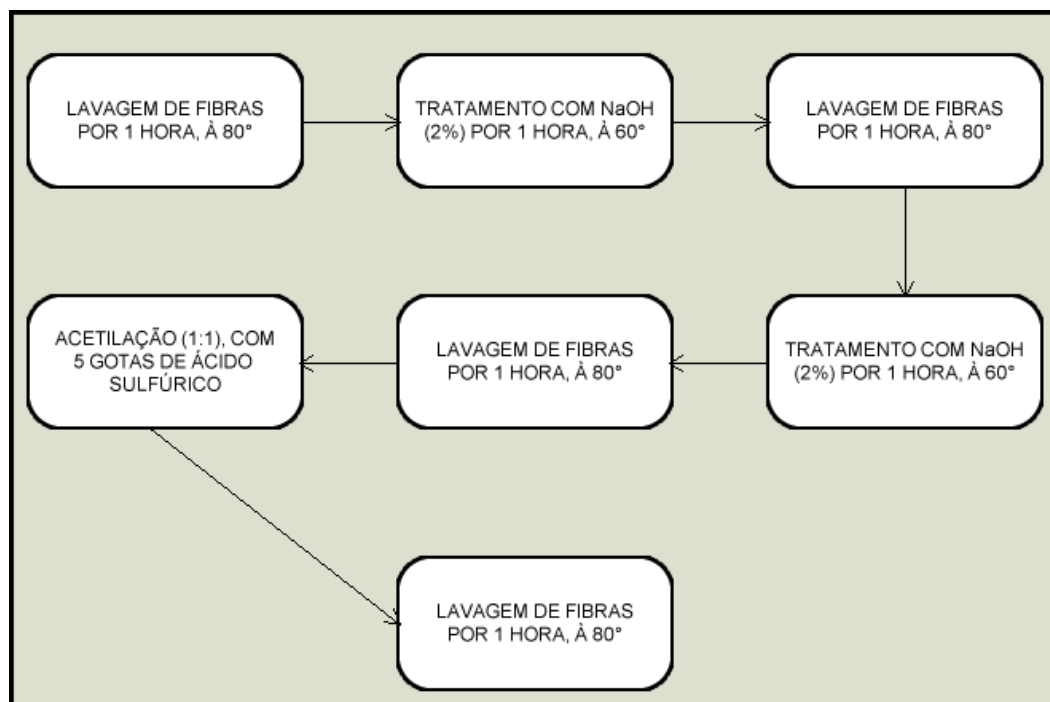


Figura 1. Fluxograma das etapas.

## 2.3 Corpos de prova

Todos os corpos de prova foram fabricados em um molde próprio para a fabricação de pequenas chapas do polímero que posteriormente foram usinadas

para chegar à forma necessária para atender as normas. Os corpos de prova seguem a norma D3039 de forma adaptada.

## 2.4 Testes de tração

Os testes de tração foram realizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) na máquina de ensaio de tração Sling/hidráulico universal testador de tensão. Os ensaios foram realizados com velocidade de ensaio de 5 mm/minuto (com exceção do primeiro que foi realizado a 1 mm/minuto) e a tensão aplicada foi normal a direção de maior resistência da fibra (direção axial).

## 2.5. Distribuição de Weibull

A análise estatística de dados é aplicada nos mais variados sistemas em que se destaca uma variável aleatória. Os dados obtidos com os ensaios podem ser considerados como uma variável aleatória não negativa, assim, a distribuição de Weibull é uma eficiente ferramenta na modelagem de resistência a fratura para materiais com comportamento frágil. O modelamento da distribuição de Weibull será relatada da seguinte forma: Temos a função de distribuição acumulada da equação de Weibull.

$$F(X; m, \sigma_0) = 1 - e^{-\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_0}\right)^m}$$

Temos que  $F(X; m, \sigma_0)$  é a probabilidade de o evento analisado acontecer, no nosso caso a fratura,  $\sigma$  a variável aleatória, sendo estendida, nesse caso para a tensão máxima na ruptura,  $\sigma_0$  a constante de normalização e  $m$  o parâmetro de Weibull, que determina a forma da função de distribuição. Linearizando a expressão 1 obtemos:

$$\ln \left( \ln \left( \frac{1}{1-F_j} \right) \right) = m \cdot \ln(\sigma_j) - m \cdot \ln(\sigma_0)$$

Sendo  $j = 1 \rightarrow N$ , até a  $j$ -ésima tensão ordenadas em ordem crescente, neste caso 5 tensões de ruptura, sendo  $F_j = (j - 0,5)/N$  [3]. Após a expressão linearizada temos que a mesma obedece, aproximadamente, a seguinte forma  $Y=AX+B$  onde  $Y$  é a parte esquerda da Eq.2 e  $X$  sendo  $\ln(\sigma)$ , a partir daí podemos plotar um gráfico  $Y \times X$ , do qual podemos extrair os valores de  $m$  e  $\sigma_0$ . Após obtido os valores das constantes da equação de Weibull podemos utilizar estes parâmetros nas equações da média e variância para a distribuição de Weibull. As equações estão apresentadas abaixo:

$$\sigma_5 = \sigma_0 \cdot \Gamma \left( 1 + \frac{1}{m} \right)$$

$$Var_5 = \sigma_0^2 \left( \Gamma \left( 1 + \frac{2}{m} \right) - \Gamma \left( 1 + \frac{1}{m} \right)^2 \right)$$

Onde  $\sigma_5$  representa o valor médio da variável aleatória e  $Var_5$  representa a variância da mesma.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

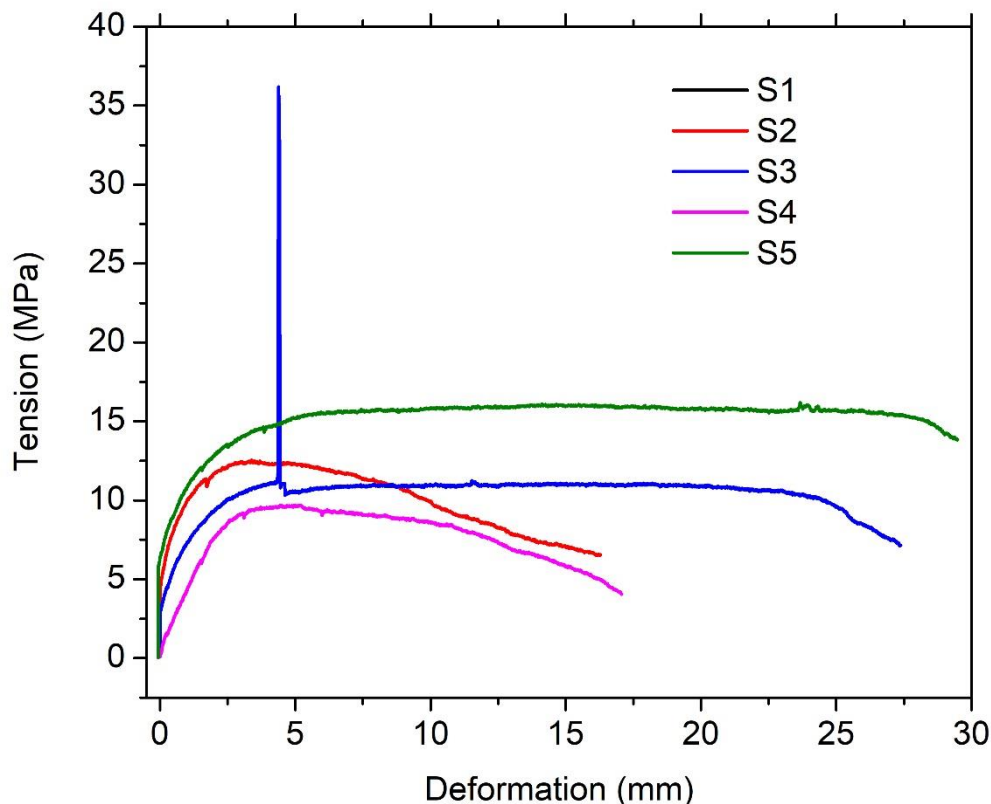
Com a realização dos ensaios de tração e com a posterior observação da distribuição de Weibull, foi constatado que, como se pensava, o compósito teve uma melhora das suas propriedades mecânicas. Os corpos de provas do compósito ensaiados e os dados de tensão máxima de ruptura podem ser observados a seguir na Tabela 1 e na Figura 2. A resistência a tração das fibras e seu módulo de Young estão sendo calculados por meio de ensaios de tração em fibras sob a norma ASTM 3039-75 de 1998 (Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus for High-Modulus Single-Filament Materials).

#### 3.1 Resultados dos ensaios de tração

Os resultados dos ensaios podem ser vistos na tabela abaixo, sendo que o resultado mais importante destes ensaios é o resultado da tensão de ruptura dos compósitos.



**Figura 2.** Corpos de prova do compósito resultante ensaiados.



**Figura 3.** Corpos de prova do compósito resultante ensaiados.

A figura 3 foi projetada com bases nos dados obtidos nos testes de tração. Os dados do teste da placa de sisal 01 foram iguais aos da placa de sisal 03 (S1 = S3). O pico foi ocasionado por um deslizamento da garra nos testes 01 e 03- na figura a linha de S3 está sobre a linha de S1 já que essas apresentam os mesmos dados.

**Tabela 1.** Resultados de tensão de ruptura proveniente dos ensaios de tração do compósito e do polietileno sozinho.

Corpos de prova	Tensão máxima de ruptura (MPa) do compósito	Tensão máxima de ruptura (Mpa) do Polietileno
01	10	5,9
02	11	5,1
03	11	5,9
04	13	6,1
05	16	5,2
Média	12,2	5,64

*De acordo com os ensaios de tração realizados podemos observar que o valor da tensão máxima de ruptura aumentou, o que implica na melhoria das propriedades mecânicas do material.*

Observando a tabela 1 podemos observar a melhora média da propriedade de tensão de ruptura nos compósitos com reforço de fibras longas de sisal [7,8,9,10].

Utilizando os dados obtidos do ensaio de tração (relatados na tabela 1), foi possível a realização da distribuição de Weibull e a determinação do parâmetro “m” antes relatado nas formulas e explicações a respeito dessa distribuição.

### 3.2 Resultados do método de Weibull

Foi modelado com os resultados de ensaio de tração, a partir da análise estatística de Weibull o valor médio da tensão de ruptura das fibras de sisal. Para encontrar tais valores devemos ordenar as tensões em ordem crescente de valor e determinar as probabilidades de fratura acumulada pelo fator  $F_j = (j - 0,5)/N$  sendo N o número de amostras e j variando de 1 até N. Após ter aplicado este fator podemos determinar os fatores m e  $\sigma_0$  que, conseqüentemente podemos determinar os valores das medias dos resultados.

**Tabela 2.** Resultados da análise de Weibull aplicados dos ensaios de tração para as fibras de bambu.

	Parâmetro m	Resistência Média (MPa)	Variância
Compósito	2,82	11,85	0,04

Observando a Tabela 2 e sabendo que quanto menor “m”, mais próxima da unidade estará a probabilidade, fazendo com que o material seja mais susceptível a falhas em uma grande faixa de tensões, desse modo, quanto maior o m, maior é a confiabilidade do material, pois a dispersão das tensões de ruptura medidas é menor. Quando os valores do parâmetro “m” aumentam temos que o valor da resistência média também aumenta. Nesse contexto é notado uma pequena variância da resistência média, ou seja, pode-se evidenciar o caráter homogêneo dos ensaios de tração.

Fazendo a comparação dos resultados aqui apresentados com os dados do artigo “AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA MÉDIA A FRATURA DE FIBRAS DE DIFERENTES REGIOES DO BAMBU PELA ANALISE DE DISTRIBUIÇÃO ESTATISTICA DE WEIBULL” onde se fabricou compósitos reforçados com fibra de bambu, podemos constatar que os resultados aqui obtidos foram satisfatórios e que com o compósito resultante(o qual teve os dados aqui apresentados), assim como os compósitos de bambu do artigo citado, foi possível atingir um bom parâmetro m.[11]

## 4 CONCLUSÃO

Com o desenvolvimento de novos materiais biodegradáveis, substituintes renováveis para muitos dos materiais atuais, um âmbito que tem avançado rapidamente é o da pesquisa de compósitos reforçados com fibras naturais. Neste contexto é notória a necessidade de um método que avalie as propriedades mecânicas de modo preciso. Utilizando a distribuição de Weibull foi possível observarmos a variação das propriedades mecânicas. As fibras de sisal reforçaram o polietileno de modo que as propriedades como a tensão máxima de ruptura aumentaram, o que constatou a hipótese inicial de que a fibra natural de sisal poderia melhorar algumas propriedades do polímero[12,13]. Com esse trabalho pode-se ver que a distribuição de Weibull garante uma boa precisão na previsão de comportamentos mecânicos deste material compósito, logo, ela é uma possível ferramenta matemática a ser usada na pesquisa destes compósitos reforçados com fibras de sisal.

## Agradecimentos

Agradecemos ao LEM (IFCE-Fortaleza), ao LAMEFF pelo apoio as atividades experimentais, ao Roberto Abreu Alencar, ao Santino Loruan Silvestre de Melo, ao Laudenor Amorim e ao professor-orientador Prof. Dr. Ênio Pontes de Deus.

## REFERÊNCIAS

- 1 Josepha PV, Rabello MS, Mattoso LHC, Josepha K, Thomas S. Compos. Sci. Technol. 2002;62:1357.
- 2 EP Calegari. Composites from renewable sources as an alternative for product development. Sustentabilidade em Debate - Brasília, v. 7.2016; 1:143-144.
- 3 AL Marinelli, MR Monteiro, JD Ambrósio. Development of polymeric composites with natural fibers: a contribution to the sustainability of Amazon. Polímeros vol.18 São Carlos. 2008; 2: 92-96.
- 4 Mallick PK. Fiber-reinforced composites : materials, manufacturing, and design. CRC Press. 2008 [acesso em 17 de jun. 2017];3: 19- 20. Disponível em: [http://svslibrary.pbworks.com/f/Fiber-Reinforced\\_Composites\\_Materials\\_\\_Manufacturing\\_\\_and\\_Design\\_\\_3rd\\_Ed.rar.pdf](http://svslibrary.pbworks.com/f/Fiber-Reinforced_Composites_Materials__Manufacturing__and_Design__3rd_Ed.rar.pdf).
- 5 SD Durham, WJ Padgett. Cumulative damage model for system failure with application to carbon fibers and composites. Technometrics. 1997; 39: 34-44.
- 6 D'Almeida ALFS, Calado V, Barreto DW, D'Almeida JRM. Acetilação da fibra de bucha (*Luffa cylindrica*). Polímeros: Ciência e Tecnologia. 2005[data de acesso em 16 de junho de 2017]; 15: 59-62.
- 7 Iozzi MA, Martins GS, Martins MA, Ferreira FC, Job AE, Mattoso LHC. Polímeros. 2010;20:25.
- 8 Carvalho LH, Cavalcanti WS. Polímeros. 2006;16:33
- 9 Martins GS, Iozzi MA, Martins MA, Mattoso LHC, Ferreira FC. Polímeros. 2004;14:326.
- 10 Iannace S, Ali R, Nicolais L. J. Appl. Polym. Sci. 2001;79:1084.
- 11 RA Alencar, SLS Melo, RPM Júnior, EP Deus. Avaliação da resistência média a fratura de fibras de diferentes regiões do bambu pela análise de distribuição estatística de Weibull. CONEM Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. 2016;1: 4- 5.
- 12 LeTHI TT, Gauthier B, Chabert B. J. of Mater. Sci. Pure and Appl. Chem. 1996;33(12): 1997- 2004.
- 13 Manikandan NKC, Diwan SM, Sabu T. J. of Appl. Polym. Sci. 1996;60: 1483-1497.