

Monografia de Graduação

Compósito de Poliuretano à Base de Óleo de Mamona e PET para Pás de Aerogerador de Pequeno Porte

Kelvin da Cruz Praxedes

Natal, fevereiro de 2014

Universidade Federal do Rio Grande do Norte
NUPEG – PRH-14
Engenharia de Processos em Plantas de Petróleo e Gás Natural

Compósito de Poliuretano à Base de óleo de Mamona e PET para Pás de
Aerogerador de Pequeno Porte

Kelvin da Cruz Praxedes

Orientador: José Ubiragi de Lima Mendes

Natal/RN
Fevereiro 2014

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo à Deus, por ter me dado condições de concluir este trabalho.

Ao meu orientador e colegas de laboratório, pela sua ajuda e orientação.

À minha família pelo apoio incondicional.

À PETROBRAS, pelo apoio financeiro.

Ao Programa de Recursos Humanos.

Ao professor Osvaldo Chiavone, à Maria Brunet, e demais funcionários do NUPEG.

RESUMO

Desde que o homem passou a dominar o fogo, o ser humano utiliza energia para seu próprio benefício. Dentre as diversas formas de energia existentes atualmente, a energia eólica se destaca por ser considerada uma fonte alternativa de energia, sendo ela utilizada pelo homem desde 3000 A.C na navegação em barcos a vela. O presente trabalho tem por objetivo desenvolver um compósito a partir de materiais biodegradáveis e reciclados que possam ser utilizados na fabricação de pás de aerogerador de pequeno porte para fins de utilização caseira, e na substituição do óleo diesel que é utilizado nas sondas de perfuração de petróleo. O trabalho foi dividido em duas partes, sendo uma delas a determinação do tipo de asa a ser utilizada e seus parâmetros, que foram determinados a partir das pesquisas bibliográficas e de um aerogerador fabricado na Alemanha. A outra parte se trata do estudo do compósito desenvolvido, composto de um poliuretano a base de óleo de mamona e PET reciclado. Para tal, comparou-se propriedades, tais como, densidade, absorção de água e resistência a tração, entre o poliuretano puro (C0) e os compósitos com adição de 15% em massa de PET (C1), e 30% em adição de massa de PET (C2). Os resultados mostraram que a adição do reforço PET melhora as propriedades de densidade e absorção de água, porém diminui a resistência mecânica do compósito.

Palavras-chave: energia, compósito, poliuretano, PET, aerogerador.

ABSTRACT

Since man began to control fire, the human use energy for their own benefit. Among the various forms of energy existing currently, wind energy stands out for being considered an alternative source of energy, being used by humans since 3000 BC in the navigating sailboats. This work has per objective to develop a composite from biodegradable and recycled materials that can be used in the manufacture of wind turbine blades small for use home, and the replacement of diesel oil that is used in oil drilling rigs. The work was divided into two parts, one being the determination of the wing to be used and yours parameters, which were determined from literature searches and a wind turbine manufactured in Germany. The other part of it is the study of the composite developed, consisting of a polyurethane based on castor oil and recycled PET. To this end, we compared properties, such as density, water absorption, and tensile strength, of pure polyurethane (C0) and composites with addition of 15% PET (C1), and 30% by addition of bulk PET (C2). The results show that the addition of PET reinforcement improves the properties of density, water absorption, but decreases the mechanical strength of the composite.

Key-words: energy, composite, polyurethane, PET, turbine.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
2.1. Sistema de Geração e Transmissão de Energia em Poços de Petróleo.....	2
2.2. Perfil Aerodinâmico.....	2
2.3. Ângulo de Ataque (α).....	3
2.4. Sustentação (L) e Arrasto (D).....	4
2.5. PET.....	5
2.6. Poliuretano.....	6
2.7. Material Compósito.....	6
2.8. Reciclagem.....	7
2.9. Porosidade, Densidade e Absorção.....	8
2.10. Resistência Mecânica e Ensaio de Tração.....	8
3. METODOLOGIA.....	9
3.1. Escolha do Perfil Aerodinâmico.....	9
3.2. Formulação do Compósito.....	10
3.3. Materiais.....	10
3.3.1. Poliuretano.....	10
3.3.2. PET.....	11
3.4. Procedimento Experimental.....	11
3.4.1. Corpos de Prova.....	11
3.4.2. Densidade.....	12
3.4.3. Absorção de Água.....	13
3.4.4. Ensaio de Tração.....	14
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	14
4.1. Geometria da pá.....	14
4.2. Densidade.....	17
4.3. Absorção.....	17
4.4. Ensaio de Tração.....	18
5. CONCLUSÃO.....	22
5.1. Pás.....	22
5.2. Densidade e Absorção.....	22
5.3. Ensaio de Tração.....	23
6. REFERÊNCIAS.....	23

1. INTRODUÇÃO

Desde o domínio do fogo (cerca de 4000 A.C.) o ser humano passou a utilizar a energia para benefício próprio, sendo sua principal utilidade a iluminação de espaços, conforto térmico e cozimento de alimentos. Ainda na antiguidade o vento já era utilizado como conversor energético através da navegação com barcos à vela (3000 A.C.), propiciando a descoberta de novas terras ao longo do tempo.

Avançando um pouco na história, através das ciências foram criados mecanismos, tais como alavancas e a hidrostática, para movimentar objetos muito pesados (287 – 212 A.C.). Por volta de 644 A.C. se tem registros da utilização da energia eólica empregada em moinhos de vento, objetivando tanto a moagem de grãos quanto a irrigação, através do bombeamento de água. Em 1350 D.C. os holandeses aprimoraram os moinhos de vento, possibilitando a drenagem de pântanos e lagos e a fabricação de papel.

A partir do século XIII as primeiras máquinas a vapor começaram a ser construídas, mas só por volta de 1700 o primeiro modelo de máquina a vapor aproveitável (que gerava trabalho útil), foi proposto por Thomas Newcomen. Com o início da era industrial se iniciou a utilização em massa dos combustíveis fósseis, sendo o carvão o primeiro desses combustíveis utilizado em grande escala para combustão nas máquinas a vapor aprimorada por James Watt. No fim do século XIX a energia elétrica foi descoberta, sendo até hoje uma das principais fontes de energia do mundo. Ela é responsável, atualmente, por um terço da energia consumida em todo o globo.

Por volta de 1860 o petróleo foi descoberto nos Estados Unidos, porém em 1961 passou a ser a principal fonte primária de energia. A partir do petróleo é possível se extrair os mais variados tipos de combustíveis, como a gasolina, gás natural, óleo diesel, querosene, etc. Contudo, as duas crises mundiais de petróleo, os conflitos entre países por áreas que o contém, e a enorme preocupação com o meio ambiente, fez-se com que houvesse buscas por novas alternativas de energia.

Como foi mencionado acima, a energia proveniente dos ventos (eólica) já era utilizada pelos povos antigos para diversas utilizações, porém, a abundância dos combustíveis fósseis associado com a competitividade entre usinas hidrelétricas e termelétricas até a década de 70, contribuíram para a estagnação das pesquisas do uso do vento para produção de energia elétrica. Desde então, o desenvolvimento de energia eólica vem crescendo com o desenvolvimento de parques eólicos onshore e offshore. Em 2009 cerca de 30.000 turbinas produziam energia a partir dos ventos em todo o mundo, e estima-se que em 2020 que em torno de 10% da energia elétrica mundial seja proveniente dos ventos. Cerca de 2% da energia solar absorvida pela Terra é convertida em energia cinética dos ventos, dando origem a um potencial bruto anual de aproximadamente 530.000 TWh (Terawatts – hora), das quais apenas 10% é aproveitável, o que vale 4 vezes o consumo de energia elétrica mundial (TERCIOTE, 2002). Na tecnologia atual, predominam as turbinas eólicas de três pás. Essas turbinas são classificadas quanto ao porte em pequenas (inferior a 500kW), média (500 a 1000 kW), e grandes (superior a 1MW). As pás apresentam rendimento quando os ventos possuem velocidades na faixa de 3 a 8 m/s. Este tipo de produção de energia é considerada limpa, por causar pequenos impactos

ambientais, o que o coloca em posição de destaque frente a outras maneiras de se obter energia.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Sistema de Geração e Transmissão de Energia em Poços de Petróleo

A energia necessária para acionamento de equipamentos de uma sonda de perfuração é normalmente fornecida por motores diesel. (THOMAS, 2001). Existem dois tipos básicos de transmissão dessa energia que é gerada pelos motores diesel, uma delas é o tipo sonda mecânica, e a outra a diesel-elétrica.

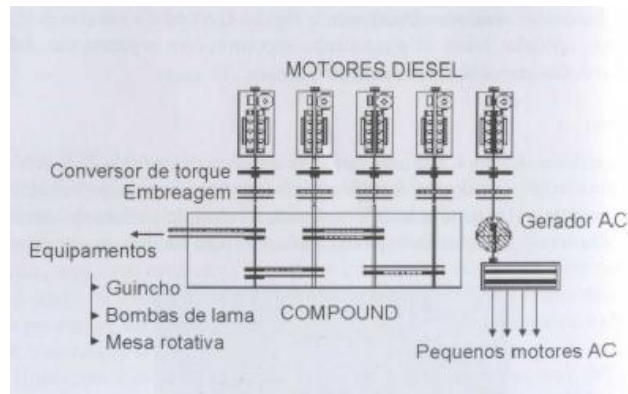


Figura 01 – Esquema de uma sonda mecânica com cinco motores diesel. (Thomas, 2001)

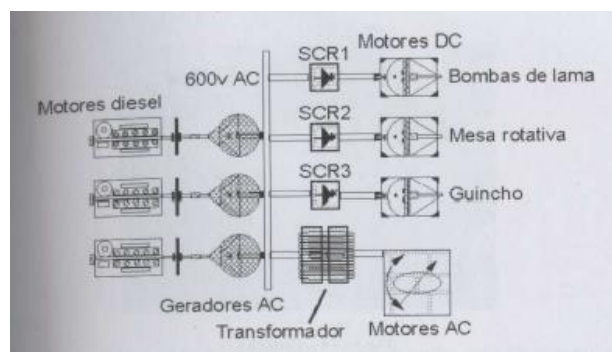


Figura 02 – Esquema de uma sonda AC/DC, típica de sondas marítimas. (Thomas, 2001)

2.2. Perfil Aerodinâmico

Perfil aerodinâmico é o nome dado à seção perpendicular ao eixo de uma asa, a qual é projetada para obter uma reação aerodinâmica a partir do escoamento do fluido ao seu redor, e converter a força e quantidade de movimento deste fluido em forças úteis para o movimento de um corpo.

A forma do aerofólio é um dos parâmetros de maior influência em sua eficiência, pois altera tanto a sustentação quanto o arrasto nele provocados. Atualmente existem várias formas de perfil aerodinâmico, porém, de modo geral, eles são classificados conforme figura 03.

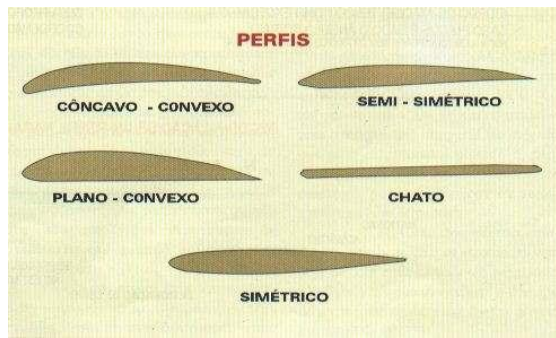


Figura 03: Tipos de perfis aerodinâmicos. (Fonte: <http://www.hobbys.com.br/caracteristicas%20projeto%201.htm>, junho de 2013).

Os perfis simétricos são caracterizados por não possuir sustentação quanto o ângulo de ataque é igual a 0° . Além disso, quando esse ângulo é menor que 0° cria-se uma sustentação negativa de módulo igual à quando o ângulo é maior que 0° , desde que o valor do ângulo de ataque seja o mesmo para os dois casos. Já o perfil chato é similar ao simétrico, porém, possui um arrasto bem mais considerável por não possuir regiões de descolamento.

Os demais perfis são similares entre si, ambos apresentando maior sustentação que os já citados anteriormente, e, quanto mais distante for do perfil totalmente simétrico (mais próximo do côncavo-convexo), maior será sua sustentação, porém, será maior também a sua instabilidade.

Existe também uma grande variedade de perfis aerodinâmicos que podem ser aplicados em projetos de pás de aerogerador, estando entre eles uma série de perfis utilizada em larga escala, denominados perfis NACA. Os aerofólios NACA são formas de asas de aviões desenvolvidos pela National Advisory Committee for Aeronautics (NACA). A forma dos aerofólios NACA é descrito usando uma série de dígitos após a palavra "NACA" (NACA 0018, NACA 63-209, NACA 653-418, etc.). Os parâmetros do código numérico podem ser inseridos em equações para gerar precisamente a seção transversal do aerofólio e calcular suas propriedades.

2.3. Ângulo de Ataque (α):

O ângulo de ataque é o ângulo formado entre a corda do aerofólio e a direção a qual escoar o fluido, sendo este ângulo um dos principais fatores que variam sustentação (L), arrasto e o momento produzido pelo aerofólio.

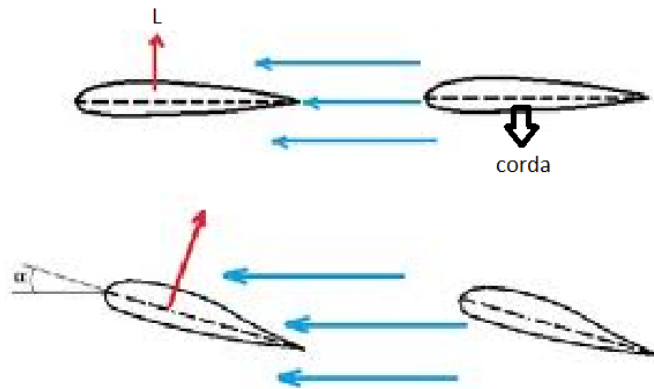


Figura 04: Ângulo de ataque em perfil aerodinâmico. (Fonte: <http://jonal300.no.comunidades.net/index.php?pagina=1830025309> , junho de 2013).

2.4. Sustentação (L) e Arrasto (D):

Sustentação aerodinâmica é a componente resultante perpendicular à direção de escoamento do fluido sobre o aerofólio, que permite, por exemplo, que um avião possa voar. Já o arrasto é a componente resultante paralela, e em mesmo sentido, à direção de escoamento do fluido sobre o aerofólio, e é a responsável por uma “desaceleração” do corpo. Ambas as forças podem ser calculadas utilizando uma equação muito similar, trocando apenas o coeficiente de sustentação (C_l) – razão entre pressão de sustentação e pressão dinâmica, sendo função do ângulo de ataque e do formato do perfil aerodinâmico - pelo de arrasto (C_d) – quantifica a força de resistência ao escoamento de um fluido - quando quiser calcular uma das forças. A equação que fornece as forças é dada abaixo:

$$F_l = C_l * \frac{\rho}{2} * A * V^2 \text{ (eq. 1)}$$

$$F_d = C_d * \frac{\rho}{2} * A * V^2 \text{ (eq. 2)}$$

Onde,

F_l : força de sustentação

F_d : força de arrasto

C_l : coeficiente de sustentação

C_d : coeficiente de arrasto

A : área da asa

V : velocidade do fluido

ρ : massa específica do fluido



Figura 05: Forças atuantes em um aerofólio. (Fonte: http://pt.wikipedia.org/wiki/Sustenta%C3%A7%C3%A3o_%28aerodin%C3%A2mica%29, junho de 2013).

2.5. PET:

A utilização do material Polietileno Tereftalado Grau, mais popularmente conhecido como material PET se dá devido à conscientização ambiental, a qual o projeto também se preocupa. Este material é consumido em larga escala, e, mesmo com um alto índice de reaproveitamento através da reciclagem, ainda resta uma quantidade de material considerável, o que faz com o que o trabalho em questão possa aproveitar esse material de reuso, sendo importante para a preservação ambiental.

O Poli (Etileno Tereftalato), conhecido pela sigla em inglês PET, é classificado quimicamente como um polímero poliéster termoplástico. O PET é produzido industrialmente por esterificação direta do ácido tereftálico purificado (PTA) com monoetileno glicol (MEG). Ou seja, esses dois elementos (PTA e MEG) são misturados, formando uma pasta que, durante o processo de fabricação, reagirão entre si, passando por cristalização e formando o PET como conhecemos: grãos brancos e opacos. A resina PET para embalagens rígidas é caracterizada por possuir uma viscosidade intrínseca (VI) maior do que a do PET para aplicações de filmes e fibras. A viscosidade intrínseca, comumente expressa em dl/g, é diretamente proporcional ao peso molecular. (ABIPET, 2012).

A resina PET é produzida em duas fases: O PET amorfo é obtido pela polimerização no estado líquido com VI em torno de 0,6. Nesta etapa é formado o bis-2-hidroxi-etil-tereftalato (BHET), também chamado monômero da polimerização. Nesta operação forma-se água, que é retirada continuamente do meio. O monômero é então transferido para a polimerização, onde, sob alto vácuo, ocorre a policondensação líquida. Nesta operação, o glicol é eliminado da reação com o aumento da VI do polímero. Neste ponto, o polímero amorfo é retirado do polimerizador, resfriado, solidificado, cortado e então armazenado. Na pós-condensação no estado sólido a resina PET amorfa - obtida na primeira fase de fabricação - é cristalizada e polimerizada continuamente. Nesse processo, a VI do polímero é aumentada tipicamente a 0,8dl/g. (ABIPET, 2012)

Os materiais básicos para produção do PET são o petróleo e gases naturais liquefeitos (etano, butano, propano). O para-xileno, derivado de óleo cru, é oxidado em TPA, que é então purificado ou esterificado em DMT. Etileno advindo tanto de óleo cru como de gases naturais liquefeitos é oxidado, em óxido de etileno, e então hidratado em etilenoglicol. O ácido tereftálico utilizado deve ser extremamente puro, pois pequenas quantidades dos isômeros meta ou para podem alterar

drasticamente a configuração do polímero. Porém, tais ácidos são difíceis de purificar devido a sua baixa solubilidade e elevado ponto de fusão.

As propriedades físicas e mecânicas do polímero dependem fundamentalmente do peso molecular médio das moléculas obtidas através do processo de polimerização. Devido às suas excelentes propriedades o Poli (tereftalato de etileno) - PET é colocado com um importante substituto de materiais como vidro, PVC, latas de aço e alumínio, sendo utilizado em diferentes setores na indústria de embalagens (alimentícias, químicas, cosméticas e farmacêuticas).

Sua alta resistência mecânica, pontualmente, pode assemelhar-me com alguns metais. Suas temperaturas de transição vítrea (T_g) de aproximadamente 75°C e de fusão cristalina (T_m) em torno de 265°C garantem razoável manutenção de suas propriedades mecânicas a altas temperaturas, por volta de 160°C . O PET possui boa resistência química, embora possa sofrer hidrólise na presença de água. Além disso, apresenta boa recuperação das deformações causadas pelo uso, o que é muito importante para aplicações na área de fibras. A excelente transparência no estado amorfo, aliada a propriedade de baixa permeabilidade a gases (principalmente O_2 e CO_2), tornou este plástico fundamental para o desenvolvimento da indústria de garrafas para refrigerantes no mundo todo.

2.6. Poliuretano:

O poliuretano é um polímero de cadeias orgânicas que apresenta grande versatilidade de aplicação, podendo ser utilizada em diferentes segmentos industriais como a indústria siderúrgica, metalúrgica, de papel e celuloses, petróleo e mineração. Estas resinas podem ser obtidas com densidades que variam de 6 a 1220 kg/m^3 , podendo se apresentar com um elastômero de alta flexibilidade ou de maior dureza, ou como um plástico de engenharia (WOODS, 1990).

As resinas poliuretano podem ser derivadas tanto do petróleo como de fontes naturais, e neste caso tem-se os chamados “biomonômeros”, que podem ser obtidos de fontes renováveis, como os óleos vegetais. Estes óleos derivam de um número de vegetais, tais como soja, milho, açafrão, girassol, canola, amendoim, oliva, mamona, entre outros (PETROVIC, 1999).

Quando comparada com outros materiais, apresenta diversas vantagens. Em relação aos metais, o Poliuretano apresenta menor peso, sendo mais fácil de ser manuseadas; menos ruído; menor custo de fabricação e melhor resistência à corrosão, possuindo uma vida útil maior que as peças de metal. Se comparadas aos plásticos, o poliuretano apresenta maior tenacidade e maior resistência a abrasão. Porém o poliuretano apresenta algumas desvantagens, como quando expostas a elevadas temperaturas, devido a ser um material termoplástico. Essas temperaturas, combinadas com aplicações de carga, não podem ultrapassar os 100°C . Outra limitação é quando usado em ambientes úmidos e quentes, pois, nessas condições, o poliuretano fica sujeito à hidrólise.

2.7. Material Compósito:

Geralmente falando, um compósito é considerado como sendo qualquer material multifásico que exhibe uma significativa proporção de propriedades de ambas as fases constituintes de tal maneira que uma melhor combinação de propriedades é

realizada. De acordo com este princípio de ação combinada, melhores combinações de propriedades são melhor amoldadas pela judiciosa combinação de dois ou mais distintos materiais. (CALLISTER, 2009).

Muitos dos materiais compósitos são formados por exatamente duas fases, as quais são denominadas matriz e o reforço. A matriz é a parte do compósito que confere estrutura ao material, preenchendo os espaços vazios que ficam entre a fibra e mantendo-os em suas posições relativas. Já o reforço é o responsável por melhorar as propriedades mecânicas, térmicas, eletromagnéticas e químicas da matriz.

Os compósitos podem ser classificados em três divisões principais, as quais estão relacionadas com a forma como o reforço está distribuído dentro da matriz. Estas principais formas são o reforço por partícula, reforço por fibra e compósitos estruturais – no presente trabalho será abordado apenas o reforço por partícula e por fibra -. Os compósitos reforçados por partícula podem ainda ser divididos quanto compósito fortalecido por dispersão e compósito partícula-grande, onde o termo “grande” refere-se ao fato de que as interações partícula-matriz não devem ser tratadas a nível atômico. Basicamente, esta organização é feita distribuindo as partículas em toda a fase matriz, impedindo que a fase matriz vizinha venha a deslocar, formando uma espécie de reforço mecânico. Já o reforço por fibra é feito num formato de fibra, como o próprio nome já diz. Esta disposição permite uma maior rigidez ao material assim como maior resistência mecânica dele.

Alguns parâmetros devem ser levados em conta no reforço por fibra, sendo eles o seu comprimento, assim como sua orientação e concentração. Alterações nessas propriedades causam diretamente alterações nas propriedades do material, por isso, deve-se fazer um estudo a respeito desses parâmetros a fim de proporcionar as melhores características ao material.

2.8. Reciclagem

Reciclagem refere-se ao processo de coleta de material usado que é geralmente considerado como lixo, e então reaproveita-lo para variados fins. Nesse processo, estes materiais usados são classificados e processados para serem utilizados como “matéria-prima” para novos produtos.

A importância da reciclagem pode ser observada de várias maneiras, sendo uma delas a economia de energia. Quando novos produtos são fabricados a partir das matérias-primas vindas da natureza a quantidade de energia consumida para sua fabricação é muito elevada. Além disso, a energia requerida para adquirir e transportar essa matéria-prima pode ser economizada quando se tem o material reciclado. Outra grande importância da reciclagem é quanto às melhorias das condições ambientais e na redução da poluição, pois minimiza o efeito estufa e as emissões de gases poluentes na atmosfera, além de diminuir a extração de recursos naturais para produção de bens de consumo. Por fim, também podem ser citados os benefícios econômicos, já que a reciclagem gera lucro aos catadores e/ou cooperativas que coletam este material, e uma vez que esses materiais são utilizados, os custos de produção de novos produtos se torna menor com relação à utilização da matéria-prima oriunda da natureza.

2.9. Porosidade, Absorção e Densidade

Assim como as rochas, há uma vasta quantidade de materiais que apresentam poros em suas estruturas. Esses poros nada mais são do que cavidades com formato irregular que estão distribuídos, aleatoriamente, por todo o material. A quantidade relativa entre o volume desses poros em uma determinada amostra, e o volume da amostra é denominada porosidade. Essa propriedade está diretamente relacionada a outras importantes propriedades do material de estudo, como por exemplo, a sua densidade, resistência mecânica, e quantidade de água absorvida pelo material.

A densidade é definida como a relação entre massa e volume de um objeto, ou seja, ela fornece a concentração de massa de um material num determinado volume. Claramente esse valor é afetado pela quantidade de poros que há nesse material, uma vez que quanto maior for essa porosidade, maior será a quantidade de vazios nele, o que consequentemente diminui a densidade e resistência mecânica do material.

Lettier *et al.* (1949) relacionaram a porosidade de um material e sua absorção com a densidade aparente, onde, verificou-se que quanto menor for a densidade aparente do material (maior quantidade de poros presentes), maior será a absorção de água, em escala linear. Portanto, a absorção de água como função da densidade está diretamente ligada à porosidade do material.

2.10. Resistência Mecânica e Ensaio de Tração

De forma geral, toda estrutura é solicitada mecanicamente, seja por torção, tração, flexão, etc. Essa solicitação mecânica acaba por gerar deformações no material, que pode vir a colapsar dependendo da intensidade e forma com a qual essa solicitação é realizada. Cada material “responde” de uma forma diferente a essas solicitações realizadas pelos esforços externos ao material, o que o diferencia dos outros materiais. É justamente essa “resposta” que define a resistência mecânica do material. Materiais com baixa resistência mecânica tendem a romper com pequenos esforços e geralmente apresentam baixo módulo de elasticidade (E), que é definido como a razão entre a tensão de escoamento do material (transição do regime elástico para o plástico, σ), e a sua deformação (ε), conforme equação abaixo.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \text{ (eq. 3)}$$

Materiais com elevada resistência mecânica geralmente apresentam elevado módulo de elasticidade. A figura 06 mostra graficamente o comportamento mecânico de materiais com baixa resistência mecânica (a) e alta resistência mecânica (b).

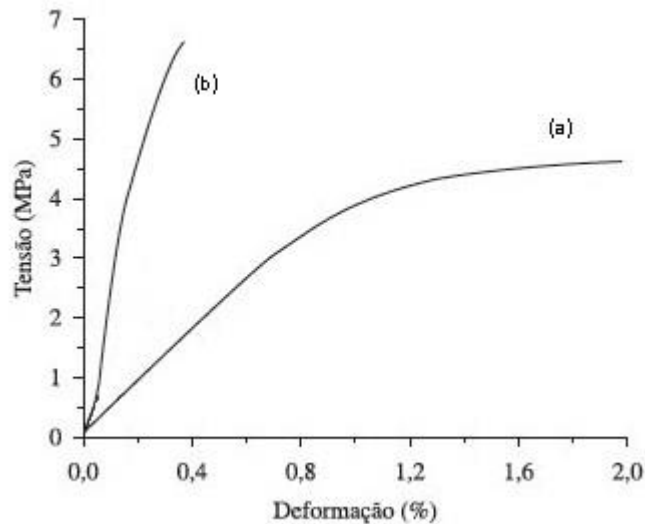


Figura 06 – Comportamento mecânico de materiais com baixa resistência mecânica (a) e alta resistência mecânica (b).

A resistência à tração é uma propriedade que, juntamente com outras, define a resistência mecânica de um material. Para determinar a resistência à tração de um material realiza-se o ensaio de tração, o qual se trata de um ensaio destrutivo, onde um corpo de prova é tracionado por duas pinças em uma máquina, até que haja a ruptura deste corpo de prova. A razão entre a força necessária para romper o corpo de prova e a área da seção transversal deste corpo de prova é denominado tensão de ruptura do material. Com este ensaio também é possível se obter outras características do material, tais como tensão de escoamento, deformação, porcentagem de alongamento e módulo de elasticidade.

3. METODOLOGIA

3.1. Escolha do Perfil Aerodinâmico

Para execução do projeto, inicialmente devia-se escolher o perfil aerodinâmico a ser utilizado no aerogerador de pequeno porte. Através de pesquisas e das referências utilizadas para a formulação do trabalho, viu-se que não há um perfil aerodinâmico comercial mais específico para se utilizar nas pás dos aerogeradores. Então, para que o perfil fosse escolhido da forma mais apropriada possível (que gerasse maior potência), observou-se o perfil de uma pá utilizada em aerogeradores de pequeno porte, que se encontrava no Laboratório de Manufatura da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), e que havia sido fabricada na Alemanha. Foi constatado que o tipo de perfil aerodinâmico se tratava de um perfil côncavo-convexo. A partir desse fato e de resultados observados por Ribeiro (2011), observou-se que perfis do tipo côncavo-convexo possuíam maior força de sustentação, que é a força que impulsiona a rotação das pás. Como Ribeiro (2011), trabalhou com o tipo de perfil (côncavo-convexo) aerodinâmico comercial NACA 6409, e não há outras referências a cerca desse tópico, escolheu-se trabalhar com este modelo a fim de comparações de resultados, no qual, busca-se encontrar um melhor ângulo de ataque, que gere maior força de sustentação, e por sua vez, maior potência gerada.

3.2 Formulação do Compósito

Outro ponto importante do projeto é a determinação da orientação do reforço PET na matriz poliuretano. Inicialmente pensou-se em fazer corpos de prova com diversas formas de disposição do PET a fim de comparação em ensaios mecânicos de tração para uma escolha mais adequada dessa disposição. Dessa forma, imaginou-se das mais diversas disposições: PET no sentido longitudinal ao corpo de prova e de tração do corpo de prova (1); PET no sentido longitudinal do corpo de prova e a 90° do sentido de tração do corpo de prova (2); PET granulado e distribuído ao longo do corpo de prova (3); manta do PET (4).

Montou-se em macro escala, a fim de conhecimento prático, as disposições citadas acima a fim de saber se havia real possibilidade delas virem a ser utilizadas, porém, eliminou-se de cara as disposições (1), (2) e (3), pelo fato do poliuretano, ao reagir, expandir de forma não controlada, e não permitir que a disposição do reforço PET ficasse conforme pensado (formato retilíneo). Dessa forma, a disposição a ser utilizada será apenas a (4).

3.3 Materiais

3.3.1 Poliuretano

A resina poliuretano utilizada foi adquirida na empresa PROQUINOR, e trata-se de uma resina a base de óleo de mamona, conhecida como Respan D-70. Esta resina é produzida à base de ácido ricinoleico e seus derivados, onde, sua obtenção é possível através do tratamento desses ácidos com alongadores de cadeia, modificadores da quantidade de hidroxila reativa na cadeia molecular e adição de reagentes químicos de expansão, além de catalisadores que controlam a reação. A formulação da resina garante uma elevada resistência a intempéries, e baixa absorção de água, o que é viável ao projeto, já que as pás ficaram expostas ao ambiente todo o tempo de funcionamento. Ela se apresenta na forma de dois componentes, sendo um polioli e um pré-polímero, identificados como componentes A e B, respectivamente. O fabricante diz ainda que para obtenção de uma mistura mais homogênea possível, deve ser usada a proporção em massa dos componentes de 1,63:1 (poliol:prepolímero).

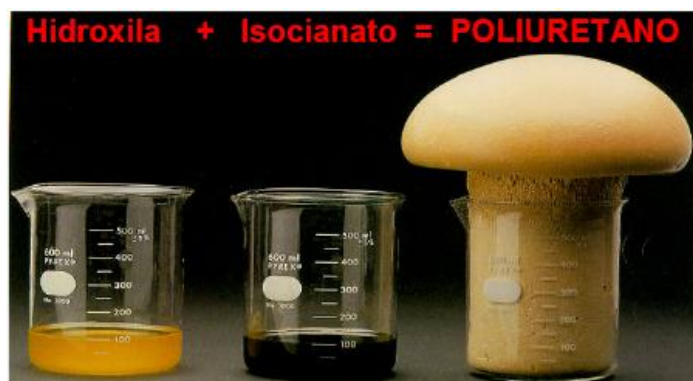


Figura 07 – Resina expansiva rígida (PROQUINOR, 2007)

As moléculas de hidroxila (poliol) reagem com o grupo isocianato (pré-polímero), e através da ação de agentes químicos e catalisadores promovem a expansão do poliuretano em um processo exotérmico.

3.3.2 PET

O PET foi obtido a partir de garrafas recicladas, onde estas foram, inicialmente, cortadas em filetes de espessura de aproximadamente 2 mm com ajuda de um fatiador de garrafas PET desenvolvido no laboratório. Após fatiado, as tiras de PET foram cortadas em pedaços e peneiradas para que se obtivesse as dimensões desejadas.



Figura 08 – PET utilizado na fabricação dos corpos de prova. À direita o PET fatiado e à esquerda picotado.

3.4 Procedimento Experimental

3.4.1. Corpos de Prova

Os corpos de prova foram fabricados utilizando a proporção de 1,63:1 de polioliol para prepolímero, conforme fabricante. O processo de fabricação consistiu em misturar o polioliol e o prepolímero junto com o PET em um recipiente com formato e dimensões bastante similares ao desejado para o corpo de prova. As quantidades utilizadas para essa fabricação foram de 62g de polioliol e 38g do pré-polímero, o que equivale a um sachê, de cada componente, fornecido pela PROQUINOR. Já a quantidade de PET é equivalente a 15% ou 30% em massa do poliuretano. Após isso, utilizou-se serra de fita e estilete para dar as dimensões finais aos corpos de prova, que tem as dimensões conforme figura abaixo.



Figura 09 – Poliuretano fabricado.

Para que houvesse uma maior uniformidade possível entre os corpos de prova, utilizou-se um paquímetro, onde corpos com variações acima de 2 mm foram descartados. Como na mistura dos componentes não havia segurança com relação à distribuição do PET, todos os corpos de prova foram pesados, e os que apresentaram variação superior a 1,5% da média foram descartados.



Figura 10 – Corpos de prova com as diferentes formulações. Sem PET acima, 15% em massa no meio, 30% em massa abaixo.

Na fabricação dos compósitos (resina + PET), adicionou-se ainda o PET em porcentagens de massa pré-estabelecidas de 15 e 30 por cento, onde os valores de massa utilizados, tanto dos reagentes, quanto do PET, foram calculados em cima da densidade de poliuretano sem PET.

3.4.2. Densidade

Para a realização dos ensaios de densidade foi utilizado o Densímetro Digital DSL910 da GEHAKA. Antes da realização do ensaio, os corpos de prova foram levados à estufa, onde permaneceram durante 4 horas a uma temperatura de 60°C. Os ensaios foram realizados com frações dos corpos de prova de cada formulação, já que as dimensões do densímetro não permitiam a utilização de um corpo de prova por inteiro. Estas frações foram retiradas das extremidades e do meio de três corpos de prova, totalizando um total de nove amostras para cada formulação.



Figura 11 – Frações dos corpos de prova utilizados no ensaio de densidade.

Estas frações foram inicialmente pesadas em seco, e logo após, pesadas molhadas, conforme figura 12. Após a realização dessas duas pesagens, o densímetro indicava o valor da densidade de cada corpo de prova. Realizou-se três medições para cada fração de corpo de prova, e o intervalo entre as medições foi de aproximadamente meia hora, tempo suficiente para que toda a água absorvida pelo corpo de prova fosse expelida.

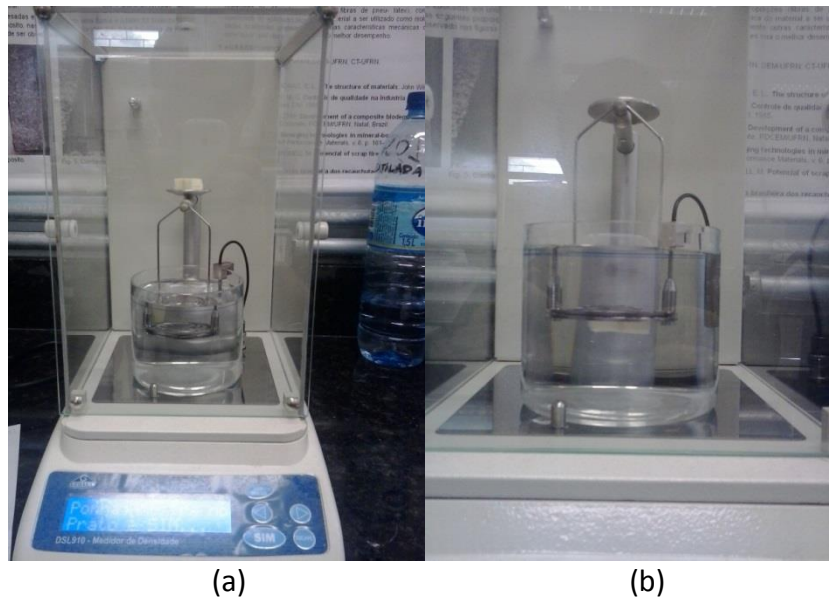


Figura 12 – Frações do corpo de prova sendo pesadas em seco (a) e molhado (b).

Após o término do ensaio, foram retirados os valores mais altos e mais baixos de densidade para cada compósito, onde a densidade foi determinada pela média dos sete valores intermediários.

3.4.3. Absorção de Água

No ensaio de absorção utilizou-se três corpos de prova de cada formulação, onde estes foram inicialmente pesados, e logo após, aquecidos em estufa a uma temperatura de 60°C, afim de retirar toda a humidade. A cada hora os corpos de prova eram retirados da estufa e pesados, até que a variação de massa entre uma pesagem e outra fosse inferior a 0,1%, onde o último valor de massa é denominado m_{seco} . Para todas as formulações, este tempo foi de 4 horas.

Após ter observado essa variação de massa, os corpos foram imersos em água destilada, onde eram pesados a cada 24 horas. Após 72 horas, a variação de massa entre uma pesagem e outra foi inferior a 0,1%, caracterizando a máxima quantidade de água absorvida. Em seguida os corpos de prova foram retirados do recipiente no qual se encontravam imersos e a água excedente em sua superfície foi enxuta com pano seco. Esse último valor de massa foi denominado $m_{molhada}$. Com os valores de m_{seco} e $m_{molhada}$ calcula-se a absorção dos corpos de prova.

3.4.4. Ensaio de tração

O ensaio mecânico de tração dos compósitos e da resina de poliuretano foram realizados segundo a norma ASTM D638-10, em uma máquina SHIMADZU, modelo Autograph AGX 300 kN, com uma velocidade de tração igual a 5 mm/min. O valor do comprimento do corpo de prova entre as garras da máquina foi de 70 mm. As dimensões dos corpos de prova utilizados para o ensaio estão apresentadas na figura 13. Utilizou-se um total de 4 corpos de prova para cada formulação estudada.



Figura 13 – Corpo de prova submetido à carga de tração.

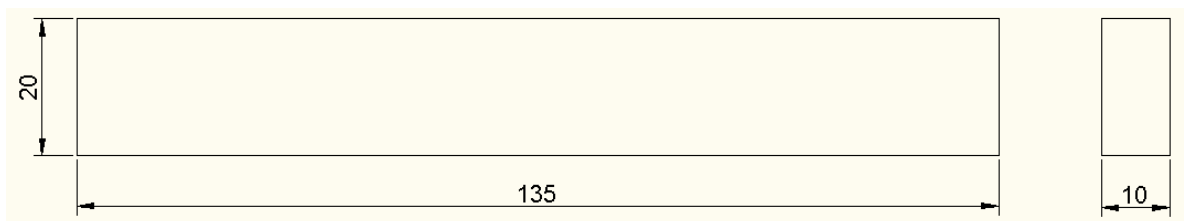


Figura 14 – Dimensões dos corpos de prova (mm) utilizados no ensaio de tração.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Geometria da pá:

Como discutido anteriormente, através de consultas bibliográficas o perfil escolhido para construção da pá é o NACA6409 (figura 15). Com relação às questões dimensionais, foi pré-determinado no projeto que o comprimento da pá seria de um metro. Usando a pá da figura 17 como parâmetro, fez-se medições de comprimento de corda (utilizando uma trena) e espessura da pá (utilizando um paquímetro) em 6 pontos ao longo desta. A partir destes valores, e de seu comprimento, é possível determinar de forma mais aproximada as dimensões das pás do material compósito. Os valores obtidos na medição encontram-se na tabela 01.

NACA 6409

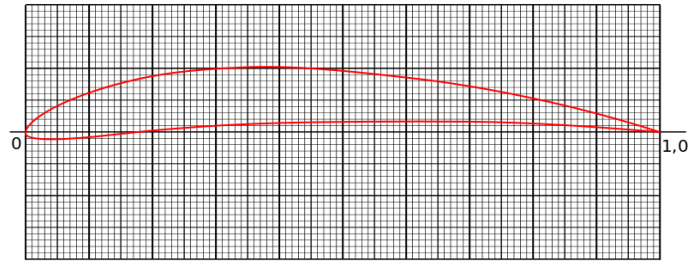


Figura 15: Imagem de perfil NACA6409. (Fonte: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:NACA_6409.svg)



(a)



(b)

Figura 16: Medição do comprimento da corda (a) e espessura da pá (b) em um ponto da pá.

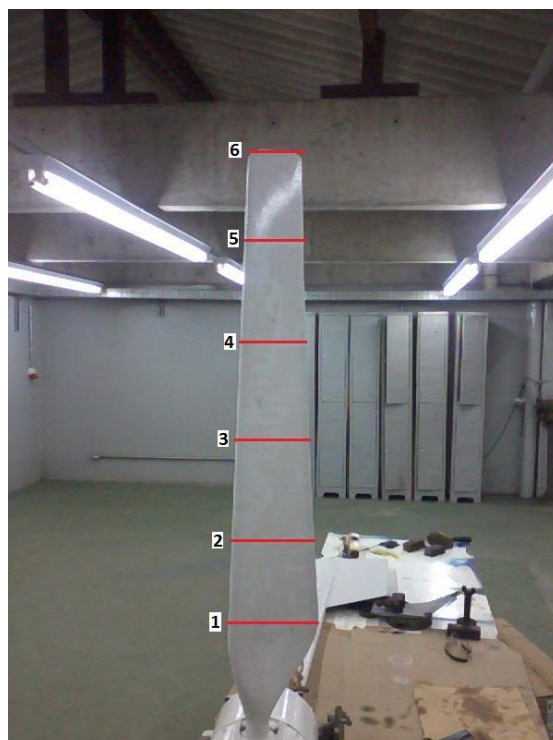


Figura 17: Locais indicados na pá onde as medições foram realizadas.

As medições iniciaram com o comprimento total da pá, partindo da base, e o valor encontrado foi de 109 cm. O ponto inicial escolhido para as medições de comprimento de corda e espessura foi o que apresenta maior comprimento de corda (1). Os demais pontos foram escolhidos tentando obter o melhor espaçamento possível entre o ponto de partida (1) e a extremidade da pá (6). A tabela abaixo mostra os valores de comprimento de corda (l), espessura (e), e distância a qual o ponto escolhido está a base (L).

Tabela 01: Valores dimensionais da pá utilizada como modelo.

Ponto	L (cm)	l (cm)	e (cm)
1	21	18	3,80
2	39	16	3,10
3	57	14	2,71
4	75	12	2,23
5	93	10,7	1,84
6	109	9,6	1,56

Com os valores presentes na tabela 01 foi possível determinar as dimensões da pá. Sua representação e valores são mostrados abaixo:

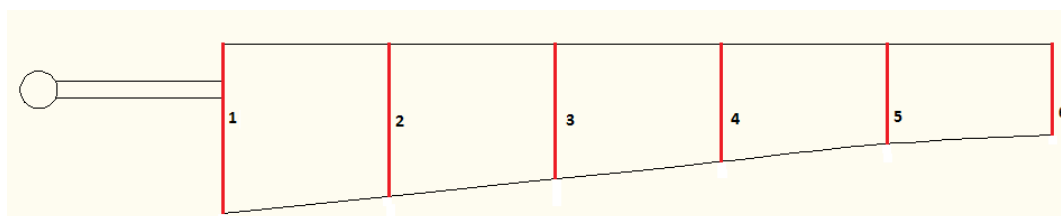


Figura 18: Desenho CAD da pá de compósito do aerogerador.

Para o comprimento de 1 metro entre os pontos 1 e 6 tem-se os valores tabelados abaixo, onde l equivale ao valor do comprimento de corda e à espessura da seção indicada. Cada ponto dista de 20 cm um do outro.

Tabela 02: Valores dimensionais da pá.

Ponto	l (cm)	e (cm)
1	20,4	4,31
2	18,3	3,55
3	16,2	3,14

4	14,1	2,62
5	12,0	2,06
6	10,9	1,77

4.2. Densidade

O resultado do ensaio de densidade dos materiais analisados encontra-se na tabela 1, abaixo. Nela, vê-se que o aumento do reforço PET preenche a quantidade de vazios presentes no material, aumentando assim a densidade do compósito à medida que se aumenta a quantidade de reforço usado, possibilitando uma maior resistência mecânica.

Tabela 03 – Densidade das formulações dos compósitos.

Material	Densidade ± Desvio padrão
Poliuretano	0,122 ± 0,002 g/cm ³
Compósito (15%)	0,139 ± 0,003 g/cm ³
Compósito (30%)	0,178 ± 0,009 g/cm ³

4.3. Absorção

Com os valores de m_{seco} e $m_{molhado}$ em mãos, utilizando a equação abaixo, é possível determinar a absorção de água de cada material. Os valores obtidos encontram-se na tabela abaixo.

$$A(\%) = \frac{Mm - Ms}{Ms} * 100 \text{ (eq. 4)}$$

Onde:

$Ms \rightarrow m_{seco}$

$Mm \rightarrow m_{molhado}$

$A(\%) \rightarrow$ absorção em porcentagem.

Tabela 04 – Absorção de água das formulações dos compósitos.

Material	m_{seco}	$m_{molhado}$	A ± Desvio padrão
Poliuretano	3,409	5,099	49,5 ± 1,3 %
Compósito (15%)	3,930	5,498	39,9 ± 1,5 %
Compósito (30%)	4,442	5,935	33,6 ± 2,1%

Pelos valores apresentados, nota-se que o nível de absorção dos materiais em estudo é consideravelmente elevada, o que é esperado para uma espuma, mesmo esta seja considerada rígida. Nota-se também que a presença do PET na matriz de poliuretano promove uma diminuição na quantidade de água absorvida pelo material, o que pode ser considerada como ponto positivo, já que a presença de humidade no material pode de certa forma, piorar as propriedades mecânicas do material.

4.4. Ensaio de tração

As curvas da tensão em função do deslocamento do poliuretano e dos compósitos com PET são apresentadas abaixo. Estas curvas são representativas do comportamento geral apresentado nos ensaios. Os valores de cargas de ruptura, tensão máxima, máximo deslocamento, máxima deformação e módulo de elasticidade são mostrados em tabelas.

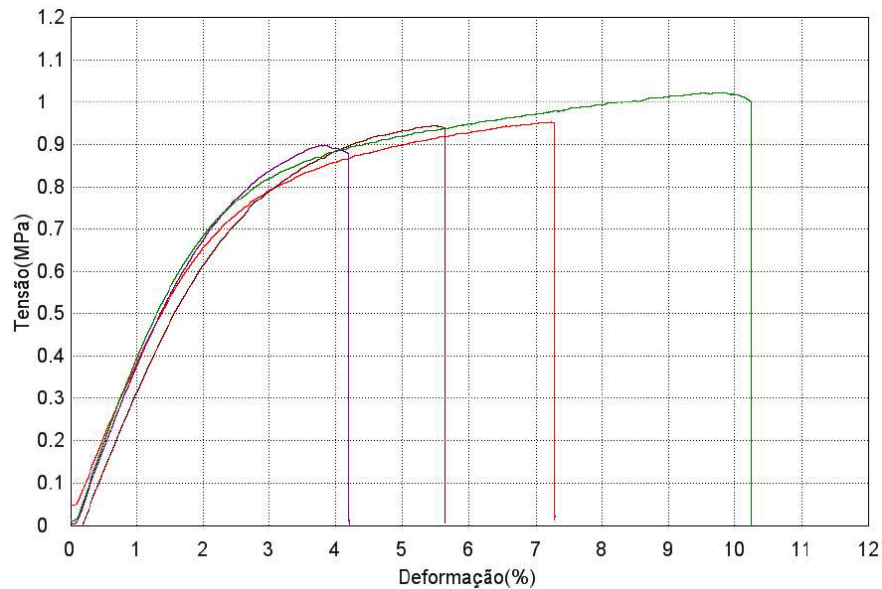


Figura 19 – Curvas tensão x deformação do poliuretano sem reforço, obtidas em ensaio de tração.

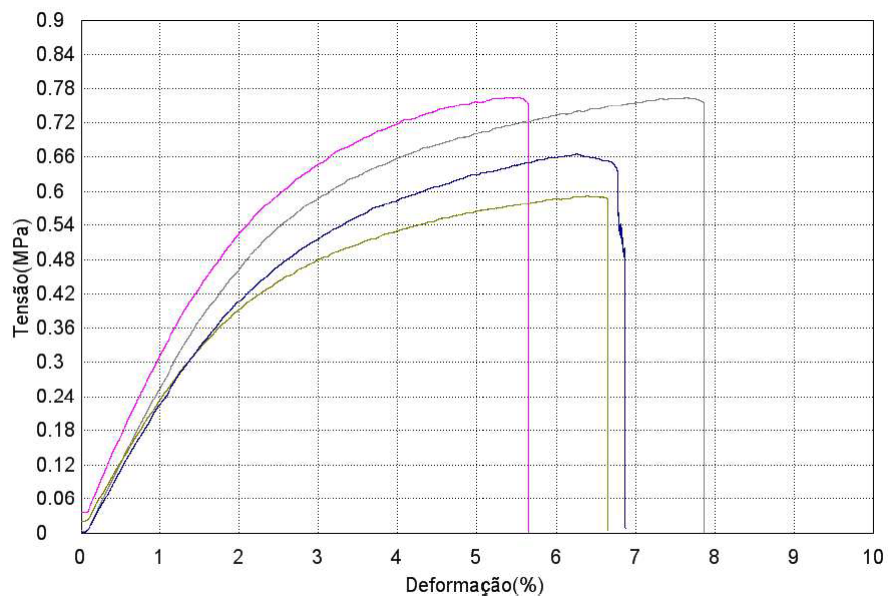


Figura 20 – Curvas tensão x deformação do compósito com 15% em massa de PET, obtidas em ensaio de tração.

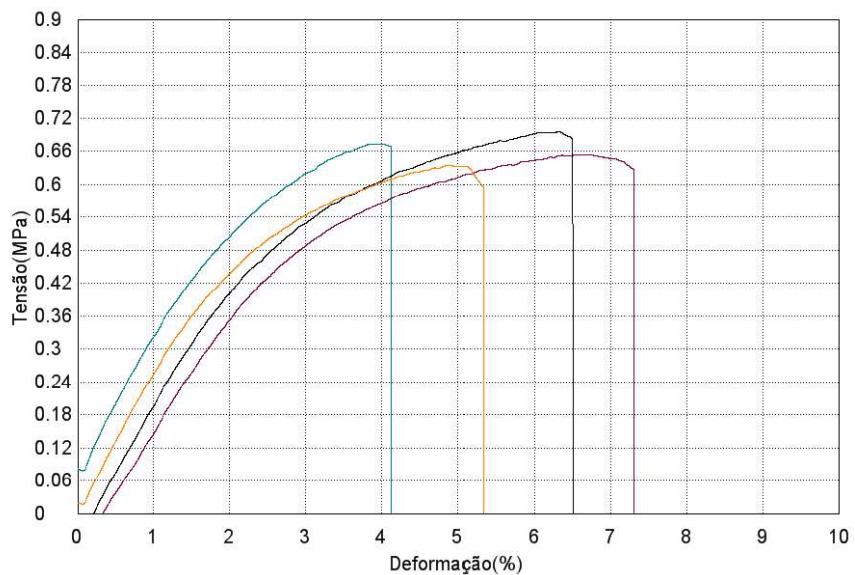
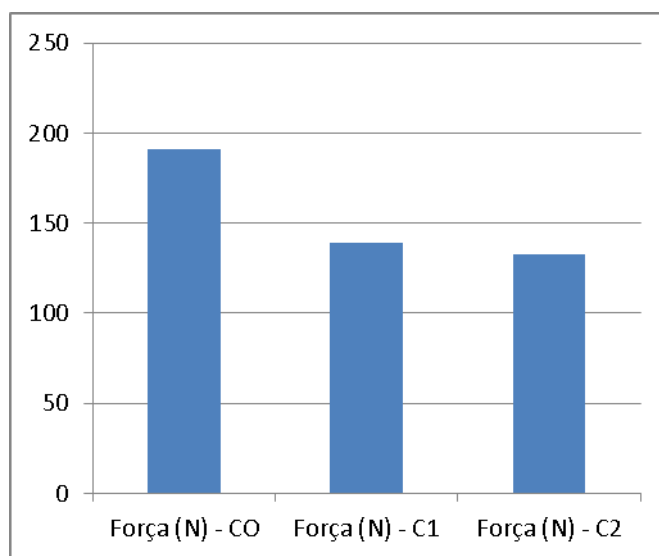
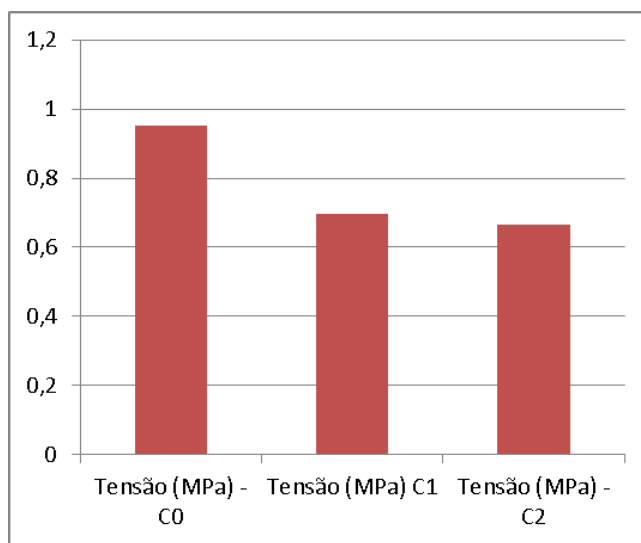


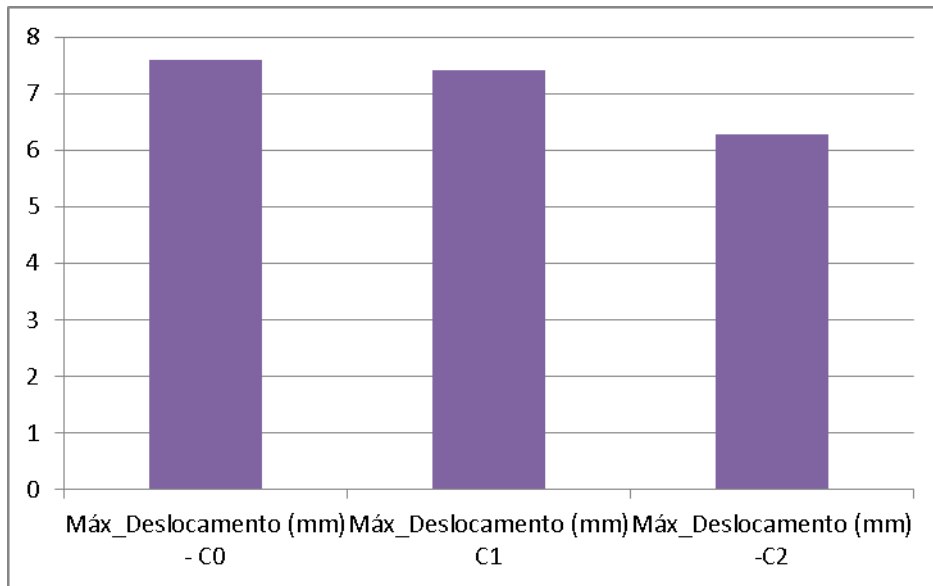
Figura 21 – Curvas tensão x deformação do compósito com 30% em massa de PET, obtidas em ensaio de tração.



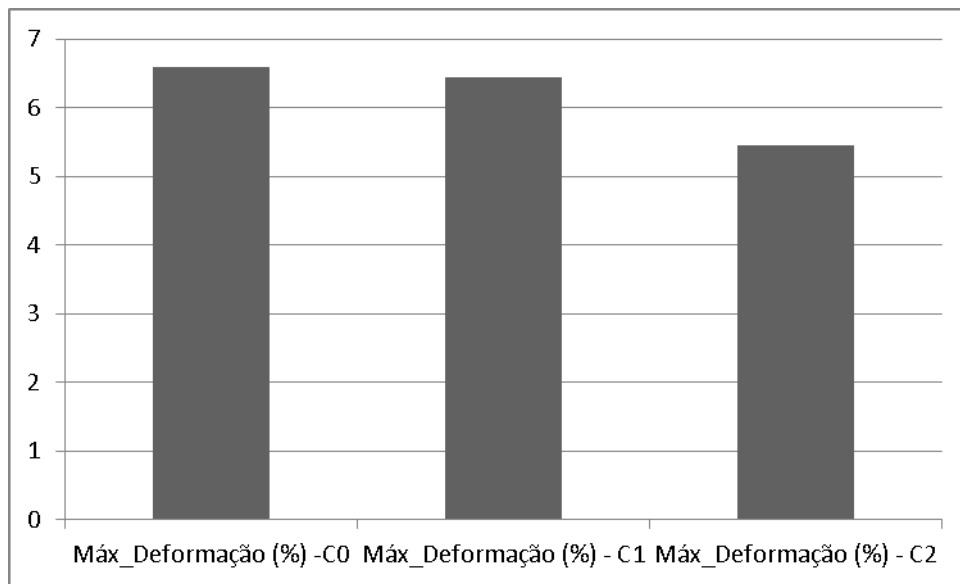
(a)



(b)



(c)



(d)

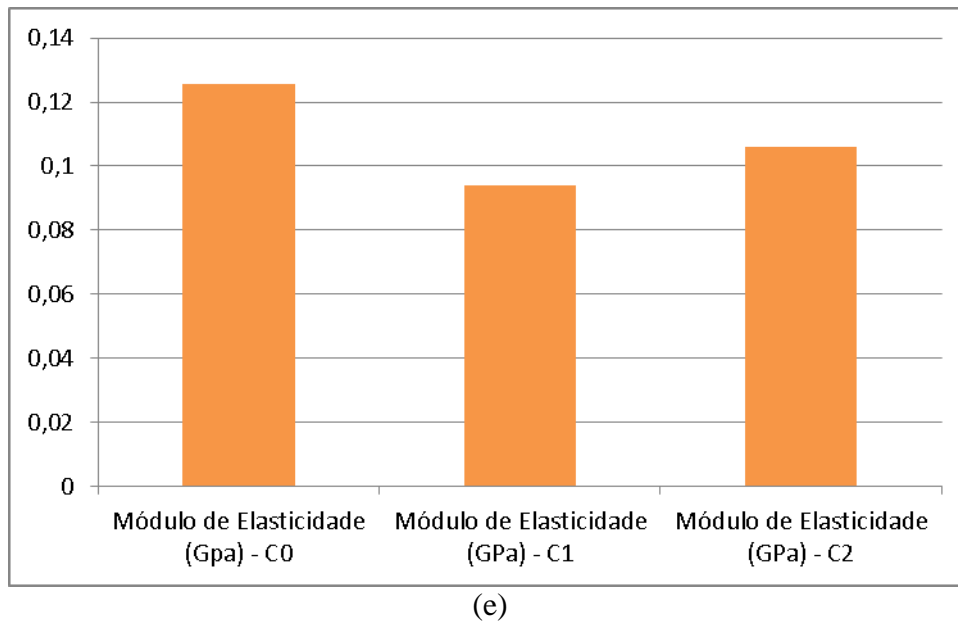


Figura 22 – Gráficos das médias das propriedades obtidas através dos ensaios de tração, sendo (a) força, (b) tensão, (c) máximo deslocamento, (d) máxima deformação e (e) módulo de elasticidade. Nos gráficos CO indica o poliuretano sem reforço, C1 com reforço de 15% de PET e C2 com 30%.

Tabela 05 – Valores obtidos no ensaio de tração para cada corpo de prova utilizado, onde CO0 indica o poliuretano sem reforço, C1 o compósito com 15% em massa, e C2 o compósito com 30% em massa.

	Força Média (N)	Força Máxima / Mínima (N)	Desvio Padrão (N)
C0	190,687	204,516 / 179,195	10,4525
C1	139,38	153,112 / 118,494	16,8038
C2	132,871	139,141 / 126,839	5,26003
	Tensão Média (MPa)	Tensão Máxima / Mínima (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
C0	0,95344	1,02258 / 0,89598	0,05226
C1	0,69690	0,76556 / 0,59247	0,08402
C2	0,66435	0,69571 / 0,63419	0,0263
	Máx_Deslocamento Médio (mm)	Máx_Deslocamento Máx/Mín (mm)	Desvio Padrão (mm)
C0	7,58659	11,2522 / 4,45389	2,90752
C1	7,41638	8,83723 / 6,23554	1,07292
C2	6,27868	7,58971 / 4,61554	1,40138
	Máx_Deformação - Média (%)	Máx_Deformação Máx/Mín (%)	Desvio Padrão (%)
C0	6,59703	9,78452 / 3,87294	2,52828
C1	6,44903	7,68455 / 5,42221	0,93298
C2	5,45972	6,59975 / 4,01351	1,21859

Como observado nas figuras 19, 20 e 21, tanto o poliuretano quanto os compósitos apresentaram uma curva característica dos polímeros dúcteis, que sofrem escoamento num determinado ponto, com estricção seguida de deformação plástica até a ruptura. De modo geral vê-se, a partir das figuras e tabelas acima, que o poliuretano sem reforço apresenta melhores propriedades mecânicas que o compósito com reforço, e que quanto maior a porcentagem do reforço, menos resistente ele se torna, embora essa diferença não seja tão discrepante se comparado com os resultados obtidos para o poliuretano sem reforço. Os valores de força média (carga aplicada) e tensão de ruptura média dos reforços são de 73%, para o C1, e 69%, para o C2, do valor do poliuretano sem reforço. Os resultados para deslocamento e deformação também são melhores para o poliuretano sem reforço, o que caracteriza melhores propriedades mecânicas que os compósitos. Ainda analisando as figuras 19, 20 e 21, também é possível observar que o poliuretano sem reforço possui uma tensão de escoamento cerca de 1,5 vezes maior que os compósitos com reforço PET, sendo 0,6 MPa a tensão de escoamento para o poliuretano sem PET, e em torno de 0,4 MPa a tensão de escoamento dos compósitos.

Após a determinação da densidade e absorção das formulações estudadas esperava-se que houvesse um aumento da resistência mecânica dos compósitos, e que esse aumento fosse proporcional à quantidade de reforço empregado, porém o que ocorreu foi justamente ao contrário. Acredita-se que esses resultados podem estar relacionados com o fato de uma possível falta de adesão entre estes elementos, onde, ao invés do reforço dividir a resistência à carga aplicada com a matriz, ele acabou funcionando como uma barreira, impedindo que houvesse um maior número de ligações interatômicas entre as fibras da matriz, diminuindo sua resistência. Outra possibilidade que possivelmente ocasionou este resultado pode estar ligada com o tamanho do reforço, que tem influência direta na condição de melhoria de resistência do compósito, porém, este não é o objetivo do estudo em questão. As dimensões do reforço são de aproximadamente 2x2 mm, e foram definidas assim devido ao fato de não haver uma máquina que pudesse transformar as tiras de PET em pó. Uma análise melhor desses resultados pode ser determinado pelo MEV.

5. CONCLUSÃO:

5.1. Pás

Com relação à aerodinâmica da pá, o perfil NACA 6409 possui as melhores características para utilização nos aerogeradores. Suas dimensões de comprimento de corda e espessura foram definidas a partir de uma pá utilizada para fins parecidos com o desejado. Os valores desses parâmetros estão na tabela 02.

5.2. Densidade e Absorção

O ensaio de densidade mostrou que essa propriedade aumenta a medida que se acrescenta mais reforço no material em estudo. Dessa forma, o reforço preenche uma quantidade de vazios presentes no poliuretano. O ensaio de absorção comprova este fato. Nele, percebeu-se que quanto maior a quantidade de reforço adicionado ao poliuretano, menor é a absorção feita pelo material, pois este se torna menos poroso. Com esses resultados iniciais, é esperado que o compósito com maior quantidade de reforço apresente uma resistência mecânica superior aos demais, mas na prática não foi o que ocorreu.

5.3 .Ensaio de Tração

O ensaio de tração mostrou resultados opostos ao que se esperava de início. Com ele, foi visto que o poliuretano puro possui melhores propriedades mecânicas que os compósitos com reforço de PET, e que quanto maior for a quantidade de reforço adicionado ao poliuretano, menos resistente ele se torna, embora a diferença entre os corpos de prova com 15% de reforço e 30% de reforço tenham tido uma diferença bem pequena entre eles.

Acredita-se que estes resultados podem ter ocorrido devido à relação entre reforço e matriz, na qual pode não ter havido uma ligação química entre eles. Assim, o PET ao invés de suportar o carregamento aplicado, acabou funcionando como barreira para ligações químicas entre o poliuretano, que se mostraram mais eficazes. Para este caso, seria necessário realizar algum tipo de tratamento no PET para que esta ligação com o poliuretano fornecesse uma maior resistência.

Outra possibilidade para a ocorrência desses resultados pode estar nas dimensões do reforço aplicado ao poliuretano. Sabe-se que as dimensões deste reforço são de fundamental importância para uma melhor interação entre reforço e matriz, dessa forma, seria necessário determinar diversas formas e dimensões para saber qual a melhor.

6. REFERÊNCIAS:

ABIPET – Associação Brasileira da Indústria do PET. Disponível em : www.abipet.org.br/index.html. Acesso em agosto de 2012.

ASTM D638: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. 2010.

CALLISTER, W.D. Materials Science and Engineer an Introduction 5th edition. New York, 1991.

FARIAS, L.M; SELLITTO, M. A. Uso da energia através da história: evolução e perspectivas futuras. 2011

LETTIER, J.A.; FINK, D. F.; WILSON, N. B.; FARLEY, F. F. (1949). Mechanism of absorption of bituminous materials by aggregate. Association of Asphalt Pavement Technologists. V.18, p.278 – 300.

OLIVEIRA, M. C. R. Compósito de poliuretano de mamona e resíduo industrial para isolamento térmica e absorção sonora. 2010. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

RIBEIRO, F. A. Desenvolvimento de Compósito de Matriz Polimérica e Fibras de PET Pós-consumo Para Construção de Pás de Aerogerador. 2011. Projeto de Doutorado.

SILVA, R.V. Compósito de resina poliuretano derivado de óleo de mamona e fibras vegetais. 2003. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade Federal de São Carlos.

THOMAS, J. E. Fundamentos de Engenharia de Petróleo. Editora Interciência. Rio de Janeiro, 2001.

VIANA, L. U.; NASCIMENTO, A. P. Análise de absorção de água em dois polímero expandidos. 2010.

WENZEL, G.M. Projeto Aerodinâmico de Pás de Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal. 2007. Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Engenharia Mecânica e Mecatrônica. Pontífice Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

WOODS, G. (1990). The ICI Polyurethanes book. New York: John Willey.