

ANALISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS E SUAS APLICAÇÕES NA FABRICAÇÃO DE UM PROTÓTIPO AERODESIGN

Pedro Celestino Neto, pedrosniper14@gmail.com¹

Ramsés Otto Cunha Lima, ramses.cunhalima@ufersa.edu.br¹

Stefany Kariny dos Santos de Souza Queiroz, stefanykariny94@gmail.com¹

Isac Barbosa de Almeida, isac.barbosa@ifrn.edu.br²

¹ Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFERSA, RN, Brasil

² Instituto Federal de ciência, educação e tecnologia do Rio Grande do Norte - IFRN, RN, Brasil

Resumo: A competição SAE AeroDesign acontece com o objetivo de selecionar as melhores aeronaves, para que os seus modelos possam servir como inovação no setor aeronáutico. Sendo assim, este trabalho se propõe a verificar as propriedades mecânicas dos materiais que são utilizados na fabricação dos protótipos. É necessário estudar a aplicação dos materiais, para conhecer suas propriedades mecânicas, conhecendo as solicitações de carga atuante nos componentes do protótipo e obter, através de ensaios, as propriedades dos materiais. Foi feito um levantamento bibliográfico sobre as propriedades mecânicas dos materiais utilizados na fabricação dos AeroDesign, como também foram pesquisados nos relatórios de algumas equipes participantes sobre as cargas nos componentes estruturais, logo após foram ensaiados os materiais utilizados na fabricação do protótipo, para o confronto das propriedades dos materiais encontradas na revisão bibliográfica e com as cargas dos componentes estruturais, para verificar se estes se adequam.

Palavras-chave: AeroDesign; materiais; componentes estruturais; propriedades mecânicas.

1. INTRODUÇÃO

Aplicar materiais de propriedades mecânicas semelhantes aos usados nas aeronaves para ter um avião estruturalmente eficiente é um dos principais objetivos da competição SAE AeroDesign. Esta é uma competição em que os participantes são estudantes de engenharia e que tem como objetivo construir novos modelos de aviões cargueiros. Para construir esse protótipo é necessário que a aeronave possua uma boa relação entre eficiência aerodinâmica e eficiência estrutural.

Dessa forma, esta pesquisa se propõe a conhecer e ensaiar os materiais utilizados na fabricação de protótipos AeroDesign, estes dão a resistência mecânica necessária para que o protótipo consiga transportar a carga. De acordo com o regulamento SAE AeroDesign (2016), um dos principais pontos analisados no protótipo é a relação entre a carga paga e peso vazio. Carga paga é a quantidade de carga que a aeronave consegue transportar durante o voo e o peso vazio é o quanto pesa o AeroDesign (protótipo) com o tanque vazio e sem estar transportando nenhuma carga, isto dá ao avião um menor peso próprio e uma maior capacidade de transporte. Sendo esta a relação para uma melhor eficiência estrutural.

O peso vazio do protótipo é calculado pelos componentes estruturais da aeronave, são esses: Asa, fuselagem, trem de pouso e empenagens horizontal e vertical. Cada componente irá apresentar uma carga em alguma direção. Na fuselagem, pode-se destacar tração, cisalhamento e flexão de 182,63MPa, 6,83MPa e 90,07MPa, respectivamente (MARINHO *et. al.* 2007; CUNHA *et. al.* 2008;). Na asa ou mais especificamente na longarina, o cisalhamento e a flexão são de 2,185MPa e 181,79MPa, respectivamente (TORRES *et. al.* 2014; SENA *et. al.* 2007). No trem de pouso, cisalhamento e flexão de 7,63MPa e 101MPa, respectivamente (TORRES *et. al.* 2015; MENDES *et. al.* 2012). Nas empenagens horizontal e vertical, cisalhamento e flexão de 0,27MPa e 9,09MPa e 0,25MPa e 10,95MPa, respectivamente (MARINHO *et. al.* 2007; CUNHA 2008). Todas estas solicitações são valores médios obtidos através de todos os relatórios avaliados.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A fibra de carbono utilizada para a fabricação dos corpos de prova é de tramas bidirecionais, 12k de filamentos e estilo plain weave. Esta foi laminada com a resina Araldite LY 5052 e catalisador Aradur 5052CH e a proporção de

50% de resina e 50% de catalisador. Este apresenta ainda uma densidade de $1,6\text{g/cm}^3$ (DEPARTMENT OF DEFENSE, 2002).

A liga de alumínio 2011, que de acordo com Alcoa (2010) e Hypsex (2015) possui uma densidade de média de $2,7\text{g/cm}^3$, foi a liga utilizada na fabricação dos corpos de prova. Na fabricação dos corpos de prova madeira, foi utilizada a balsa. Esta possui uma densidade média de $0,4\text{g/cm}^3$ (BORREGA e GIBSON, 2015). Por fim, os corpos de prova de Nylon, foi utilizado o Technyl®, este é fabricado a partir do Nylon 6.6, que de acordo com Kiziltas *et al.* (2011) e Spencer e Paul (2011), apresenta uma densidade média de $1,13\text{g/cm}^3$.

Os ensaios tanto de tração quanto de flexão foram feitos na UFERSA na máquina de ensaios universal, fabricada pela EMIC.

Para usinagem do tarugo de alumínio foi utilizado um torno CNC Centur 30D. A Fresadora Universal Clark 4VSEa foi utilizada para fabricação dos corpos de prova de Nylon. Nos ensaios de tração foram utilizados 3 corpos de prova para cada material. Dos 4 materiais ensaiados, o alumínio foi o único utilizado com seção transversal circular, por facilidades encontradas no ensaio na máquina. Os demais foram ensaiados com seção transversal retangular. No caso da fibra de carbono foram fixados pequenos pedaços de madeira nas extremidades para facilitar a fixação no ensaio.

A máquina da marca EMIC, modelo DL10000, foi utilizada para realização dos ensaios de tração e flexão nos corpos de prova. Algumas características da máquina são:

- Curso útil: 1200 mm;
- Distância entre colunas: 400 mm;
- Altura: 1920 mm;
- Largura: 920 mm;
- Profundidade: 500 mm;
- Faixa de velocidade de 0,01 a 500 mm/min;
- Possui capacidade de 10000 kgf ou 100 KN.

As Figuras 1 e 2 seguem abaixo com as dimensões dos corpos de provas fabricação para ensaio de tração dos materiais citados acima.

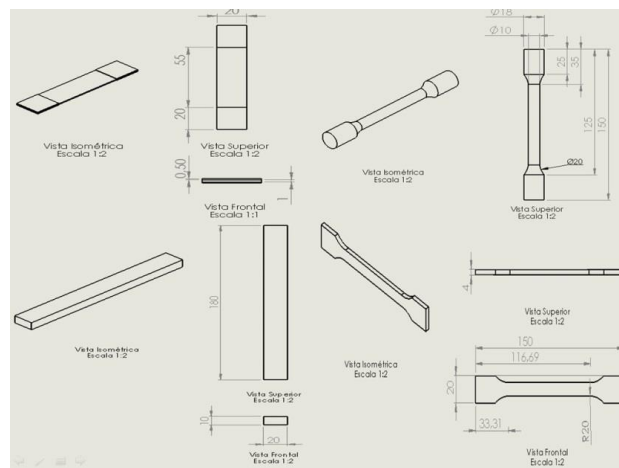


Figura 1. Dimensões dos corpos de prova para ensaio de tração

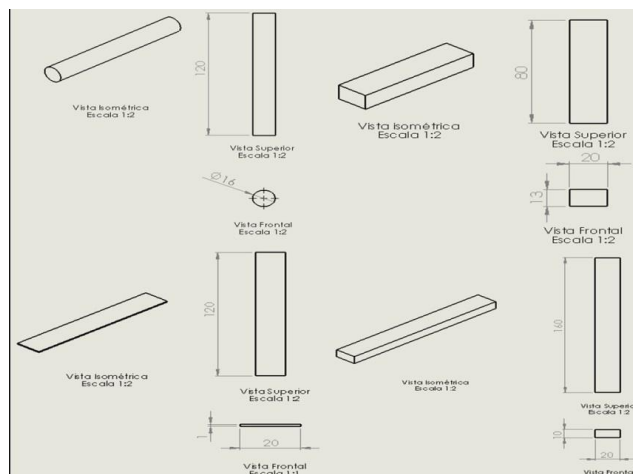


Figura 2. corpos de prova para ensaio de flexão

Da esquerda para direita e de cima para baixo, são: dimensões dos corpos de prova de alumínio, balsa, fibra de carbono e Nylon 6.6.

2.1. Ensaio de tração

Ao todo foram realizados 20 ensaios com todos os corpos de prova fabricados. Estes corpos de prova foram fabricados de acordo com as normas encontradas, foram estas: NBR 6152 - Materiais metálicos - Ensaio de tração a temperatura ambiente, EN ISO 527-2 – Determination of tensile properties of plastics para o Nylon 6.6, ASTM D3039 para a fibra de carbono e a CEN 408 para os corpos de prova de madeira balsa (1995 apud Martines, 2002). Estes ensaios foram realizados utilizando as garras planas e células de 100kN.

Os corpos de prova da madeira balsa foram fabricados com 90mm de comprimento útil e velocidade de ensaio de 2mm/min. Os corpos de prova de alumínio, foram realizados a uma velocidade de deslocamento de 7mm/min e um comprimento útil de 80mm. Nos ensaios da fibra de carbono, os corpos de prova tinham um comprimento útil de 47mm, estes foram ensaiados em uma velocidade de deslocamento de 2mm/min. Nos ensaios do Nylon 6.6, os corpos de prova possuíam um comprimento útil de 80mm, foram ensaiados com velocidade de deslocamento 7mm/min.

2.2. Ensaio de Flexão

Do mesmo modo que nos ensaios de tração, nos ensaios de flexão foram utilizados seguindo as normas encontradas sobre cada material, foram estas: ASTM E290-09 para o alumínio, COPANT R-555 para a madeira balsa (1973 apud MARTINES, 2002), ASTM D7264 para fibra de carbono e EN ISO 178 para o Nylon 6.6.

Os corpos de prova de alumínio foram confeccionados no formato cilíndrico, devido à dificuldade encontrar chapas, que seriam mais adequadas para serem utilizadas na máquina. A velocidade do ensaio foi realizada em 5mm/min. Os corpos de prova da balsa que foram fabricados com comprimento útil de 190mm e velocidade de ensaio 2.5mm/min. Os corpos de prova da fibra de carbono foram ensaiados com velocidade de 2mm/min e comprimento útil de 140mm. Os corpos de prova de flexão do Nylon 6.6, que houve a necessidade de desbaste para retirada do material bruto, foram ensaiados a 13mm/min. Os corpos de prova de alumínio foram ensaiados a 11mm/min.

3. RESULTADO E DISCUSSÃO

3.1. Ensaio de tração

Liga de alumínio 2011

A Figura 3 mostra o comportamento de tensão x deformação para os ensaios feitos nos corpos de prova da liga de alumínio 2011. As tabelas que seguem sendo mostradas após as figuras, mostram os principais pontos avaliados nos ensaios feitos.

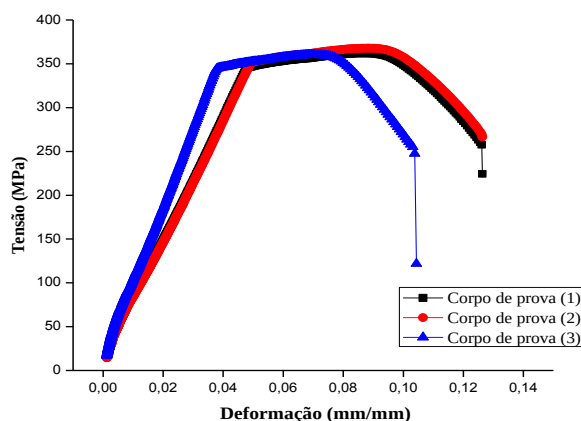


Figura 3. Diagrama tensão x deformação

Tabela 1. Resultados para o ensaio de tração do resumo dos dados dos corpos de prova de alumínio

Limite de resistência a tração (MPa)	363,31
Limite de ruptura (MPa)	173,55

Na Figura 3 são apresentados os dados dos ensaios e a tabela mostra os principais pontos avaliados, se segue da mesma maneira nas análises seguintes.

Segundo ALCOA (2010) e Hypsex (2015), o alumínio possui ótimas propriedades mecânicas, estas são confirmadas através dos ensaios e quanto comparadas a dos outros materiais analisados, se destacam. Vale ainda ressaltar, que pelo material ser homogêneo, facilita o uso para processos de usinagem.

Nylon 6.6

A Figura 4 mostra o comportamento de tensão x deformação para os ensaios feitos nos corpos de prova de Nylon 6.6.

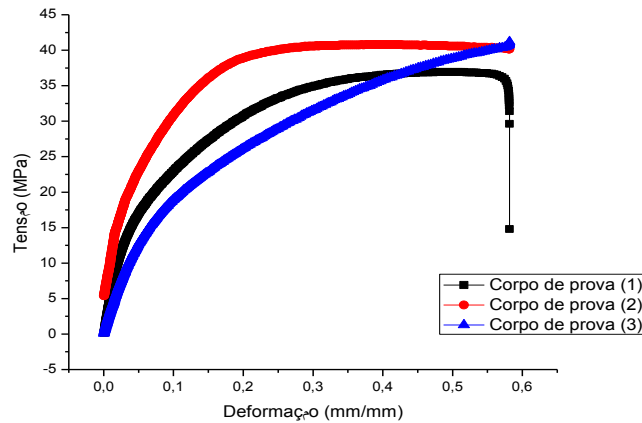


Figura 4. Diagrama tensão x deformação

Tabela 2. Resultados para o ensaio de tração do resumo dos dados dos corpos de prova de Nylon 6.6

Limite de resistência a tração (MPa)	38,568
Limite de ruptura (MPa)	12,8

Apesar de algumas dificuldades encontradas na fabricação dos corpos de prova de Nylon 6.6, foi possível obter as propriedades que se adequam as suas característica de material dúctil, da mesma maneira que é apresentado por Araújo *et. al.* (2004).

Fibra de carbono

A Figura 5 mostra o comportamento de tensão x deformação para os ensaios feitos nos corpos de prova da fibra de carbono.

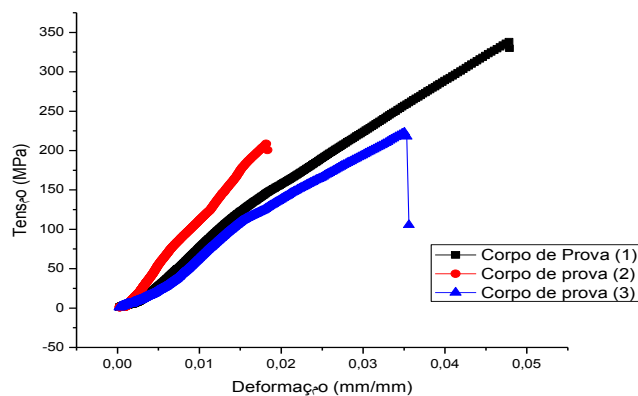


Figura 5. Diagrama tensão x deformação

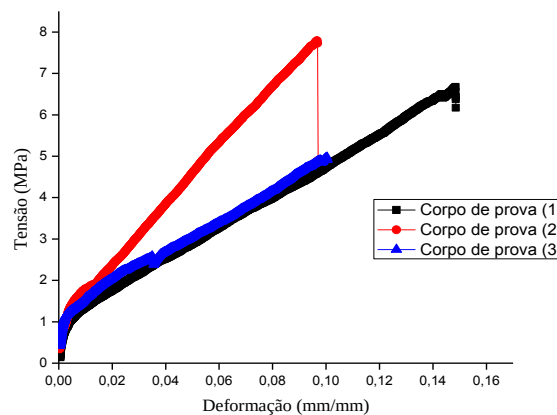
Tabela 3. Resultados para o ensaio de tração do resumo dos dados dos corpos de prova da fibra de carbono

Limite de resistência a tração (MPa)	255,43
Limite de ruptura (MPa)	114,3

A partir dos dados é possível perceber que, como é apresentado por Departamento of Defense (2002), a fibra de carbono apresenta baixo índice de deformação. Um dos processos pelo qual a fibra de carbono passa é a laminação que, de acordo com quantidade de resina e catalisador utilizado na fabricação dos corpos de prova irá influenciar nas prova, este e outros motivos tornam difícil a obtenção de parâmetros uniformes para os corpos de prova deste material ensaiados.

Balsa

A Figura 6 mostra o comportamento de tensão x deformação para os ensaios feitos nos corpos de prova da madeira balsa.

**Figura 6. Diagrama tensão x deformação****Tabela 4. Resultados para o ensaio de tração do resumo dos dados dos corpos de prova da balsa**

Limite de resistência a tração (MPa)	5,76
Limite de ruptura (MPa)	3,9

Apesar de algumas dificuldades encontradas em fixar os corpos de prova na máquina, foi possível verificar os seus baixos índices de propriedades mecânicas, quando comparada aos outros materiais analisados, da mesma forma que é apresentado por Toson, Viot e Pesqué (2014).

3.2. Ensaios de flexão

Liga de alumínio 2011

A Figura 7 mostra o comportamento de tensão x deformação para os ensaios feitos nos corpos de prova da liga de alumínio 2011.

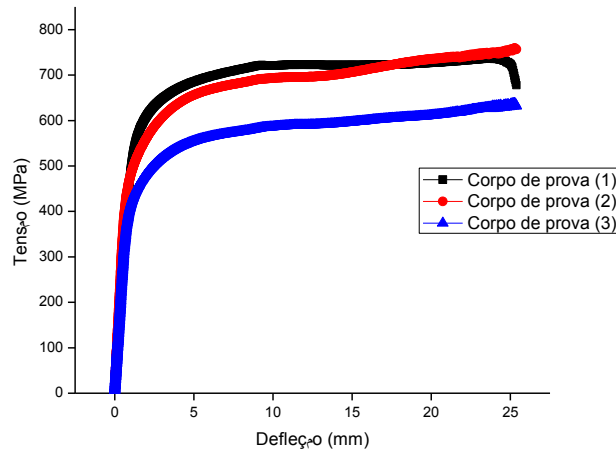


Figura 7. Diagrama tensão x deformação

Tabela 5. Resultados para o ensaio de flexão do resumo dos dados dos corpos de prova da liga de alumínio 2011

Tensão de flexão máxima (MPa)	797
Deflexão máxima (mm)	26,519
Tensão de cisalhamento máxima (MPa)	22,82

As propriedades obtidas mais uma vez se destacam dentre os materiais analisados, como é apresentado por Hypsex (2015). Como também quando comparado à fibra de carbono, possui bons índices tanto de deflexão como de tensão de cisalhamento.

Nylon 6.6

A Figura 8 mostra o comportamento de tensão x deformação para os ensaios feitos nos corpos de prova de Nylon 6.6.

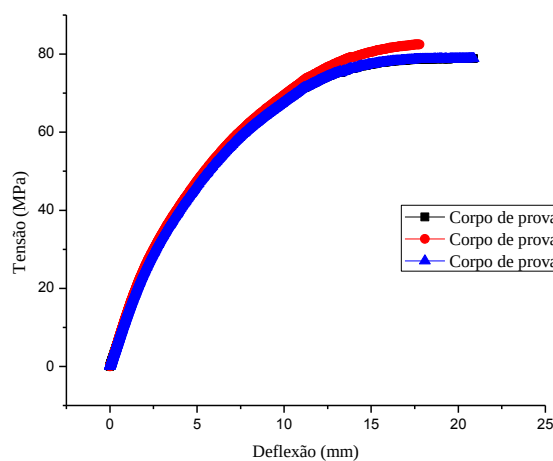


Figura 8. Diagrama tensão x deformação

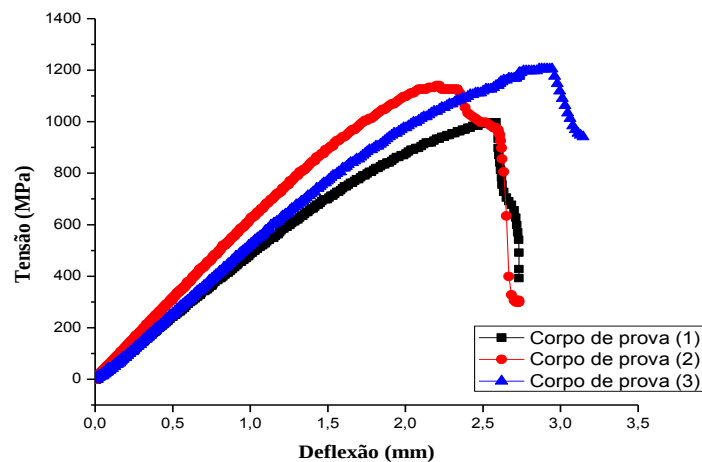
Tabela 6. Resultados para o ensaio de flexão do resumo dos dados dos corpos de prova do Nylon 6.6

Tensão de flexão máxima (MPa)	101,878
Deflexão máxima (mm)	23,39
Tensão de cisalhamento máxima (MPa)	11

Através da figura 8 e da tabela resumo é possível observar que o Nylon 6.6 possui baixa resistência mecânica e alta ductilidade, quando comparado ao alumínio, da mesma maneira que é demonstrado em Araújo *et. al.* (2004).

Fibra de carbono

A Figura 9 mostra o comportamento de tensão x deformação para os ensaios feitos nos corpos de prova da fibra de carbono.

**Figura 9. Diagrama tensão x deformação****Tabela 7. Resultados para o ensaio de flexão do resumo dos dados dos corpos de prova da**

Tensão de flexão máxima (MPa)	1137
Deflexão máxima (mm)	3,69
Tensão de cisalhamento máxima (MPa)	5,69

Como também foi analisado por Park e Heo (2015), este material possui uma baixa tensão de cisalhamento por ser feito a partir de fibras alinhadas em um sentido, como também baixa deflexão e apresenta altos índices em outras propriedades mecânicas.

Balsa

A Figura 10 mostra o comportamento de tensão x deformação para os ensaios feitos nos corpos de prova da madeira balsa.

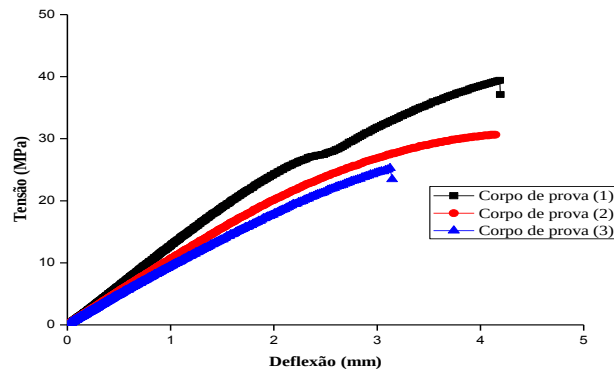


Figura 10. Diagrama tensão x deformação

Tabela 8 Resultados para o ensaio de flexão do resumo dos dados dos corpos de prova de balsa

Tensão de flexão máxima (MPa)	31,33
Deflexão máxima (mm)	4,46
Tensão de cisalhamento máxima (MPa)	1,13

É possível observar mais uma vez os baixos índices em suas propriedades. Entretanto, como também é apresentado por Tranvan, Legrand e Jacquenin (2014), seu baixíssimo peso é o que o torna um material atrativo e singular, quando comparado aos outros avaliados.

A Figura 11 a baixo demonstra as diferenças entre os materiais analisados nos ensaios, ressaltando assim os seus principais pontos que levam a sua aplicação em áreas específicas do protótipo.

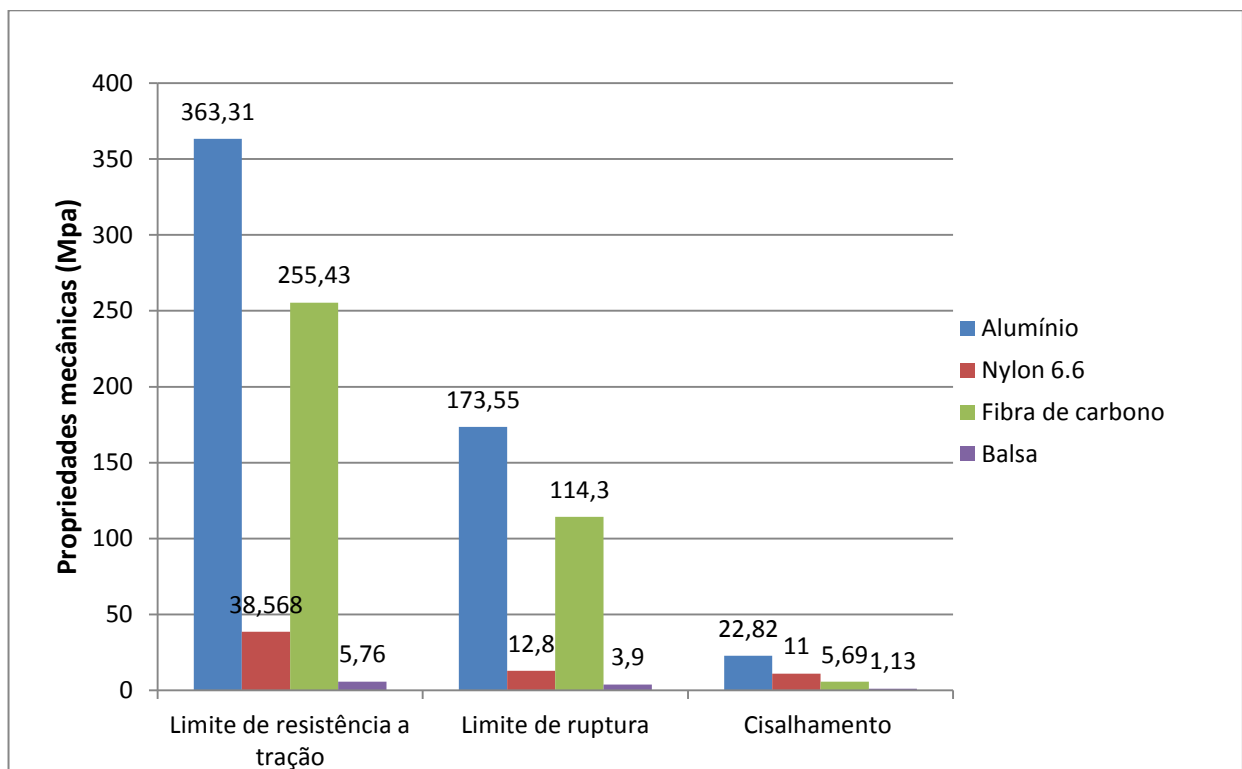


Figura 11. Comparação entre os materiais nos ensaios de tração e flexão dos LRT - limite de resistência à tração, LR - limite de ruptura e o cisalhamento

Além dos dados obtidos na figura 11, vale ressaltar que a fibra de carbono e o alumínio conseguiram atingir um limite de resistência em flexão de 1137MPa e 797MPa, respectivamente. Através desta figura 11, é possível perceber que o alumínio conseguiu atingir as melhores propriedades mecânicas dentre os materiais analisados, podendo assim ser

aplicado em qualquer componente estrutural, entretanto por ser um material pesado, acaba não tendo tão ampla aplicação no protótipo. Apesar disso, este pode ser utilizado em locais onde são requeridos fixações complexas que irão solicitar um material com maior homogeneidade e também bons índices de propriedades mecânicas, como no tail boom.

Tendo em vista um menor peso vazio possível para a aeronave e uma melhor eficiência estrutural, a fibra de carbono, que possui uma menor densidade e da mesma forma, suporta as solicitações de carga, acaba sendo mais viável do que o alumínio na asa (longarina) e na fuselagem. Vale ressaltar que foram encontradas dificuldades na fixação dos corpos de prova de fibra utilizados no ensaio de tração, pois as garras não conseguiam fixar corretamente os corpos de prova e isto acabou gerando escorregamentos ou mesmo por ser dado um aperto maior para fixação, acabou por danificar as amostras. Isto pode ter levado a algumas divergências em suas propriedades mecânicas e assim o material acabar apresentando propriedades inferiores, quando comparado ao alumínio. Mesmo assim, este foi o que apresentou o melhor balanceamento de propriedades aliadas a uma menor densidade.

O Technyl®, apesar de possuir uma das piores propriedades mecânicas analisadas, possui um alto índice de deflexão, como também razoável resistência ao cisalhamento e uma tensão de flexão máxima adequada para ser usado nas rodas do trem pouso, pelo fato de solicitarem uma maior absorção de impacto no momento do pouso.

A balsa possui propriedades mecânicas inferiores a todos os materiais analisados, entretanto, esta possui a menor densidade dentre todos. Assim sendo, pode ser utilizada para a redução do peso da aeronave, nos perfis da asa, por exemplo. Pois, os perfis, por serem componentes não estruturais sofrem muito pouco com as solicitações mecânicas, são utilizados apenas para dar forma a asa. Desta forma, utilizando a balsa nos perfis, é possível reduzir bastante o peso em vazio do avião.

4. CONCLUSÃO

- Os materiais estudados são aplicáveis ao protótipo, entretanto cada um com sua especificidade sendo aplicada a um componente estrutural do avião;
- A fibra de carbono é o material com propriedades mecânicas mais balanceadas, podendo ser aplicada em qualquer área do avião;
- A Balsa é o material com propriedades mais inferiores dentre os estudados, entretanto por possuir o menor peso, reduz o peso em vazio e melhora a eficiência estrutural;
- O Technyl® por possuir alta flexibilidade e capacidade de absorver os impactos incididos nele, consegue encaixar-se também no AeroDesign, como por exemplo no trem de pouso;
- O Alumínio é aplicado por possuir homogeneidade e boas propriedades mecânicas e assim poder ser mais facilmente trabalhado em alguns componentes;
- Apesar do uso de um pequeno número de amostras, é possível comprovar os dados encontrados em pesquisas.

5. AGRADECIMENTOS

Agradeço UFERSA e a todos que me apoiaram e participaram no projeto.

6. REFERÊNCIAS

- [1] ALCOA TECNOLOGIA E SOLUÇÕES EM ALUMÍNIO. São Paulo, 2010. 29 p. Catalog.
- [2] ARAÚJO, E.m. *et al.* The influence of organo-bentonite clay on the processing and mechanical properties of nylon 6 and polystyrene composites. *Materials Science And Engineering: B*, [s.l.], v. 112, n. 2-3, p.175-178, set. 2004
- [3] BORREGA, M.; GIBSON, L. J.. Mechanics of balsa (Ochroma pyramidale) wood. *Mechanics Of Materials*, [s.l.], v. 84, p.75-90, maio 2015.
- [4] COUTO, A. A. *et al.* ESTUDO DO COMPORTAMENTO EM FADIGA DE LIGAS DE ALUMÍNIO ENDURECIDAS POR PRECIPITAÇÃO. In: congresso brasileiro de engenharia e ciência dos materiais, 18., 2008, São Paulo. Anais . Porto de Galinhas: Cbecimat, 2008. p. 8973 – 8984
- [5] CUNHA, R. de *et al.* Relatório de projeto: Equipe Car-kará. Natal: Comissão Técnica da Competição, 2008. 45 p.
- [6] DEFENSE, D.. COMPOSITE MATERIALS HANDBOOK: VOLUME 3. POLYMER MATRIX COMPOSITES MATERIALS USAGE, DESIGN, AND ANALYSIS. 2002. 693 p.
- [7] HYPSEX TECNOLOGIA EM ALUMÍNIO. Guarulhos, 2015. 240 p. Catalog.
- [8] KIZILTAS, A. *et al.* Dynamic mechanical behavior and thermal properties of microcrystalline cellulose (MCC)-filled nylon 6 composites. *Thermochimica Acta*, [s.l.], v. 519, n. 1-2, p.38-43, maio 2011.
- [9] MARINHO, A. *et al.* Relatório de projeto: Equipe Car-kará new. Natal: Comissão Técnica da Competição, 2007. 43 p.
- [10] MENDES, B. *et al.* Relatório de projeto: Equipe 12 Bis AeroDesign. Ouro Preto: Comissão Técnica da Competição, 2012. 37 p.
- [11] MORALES, Elan Aparecida Martines. DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DA MADEIRA: PROPOSTA PARA UMA SIMPLIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTOS METOLÓGICOS. 2002. 112 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.
- [12] PARK, Soo-jin; HEO, Gun-young. Precursors and Manufacturing of Carbon Fibers. *Carbon Fibers*, [s.l.], p.31-66, 9 out. 2014. Springer Science + Business Media.
- [13] SAE, AeroDesign Brasil. Regulamento SAE. 18. ed. São José dos Campos: Comissão Técnica, 2016. 111 p.

- [14] SENA, B. de *et. al.* Relatório de projeto: Equipe Car-kará. Natal: Comissão Técnica da Competição, 2007. 43 p.
- [15] YOO, Y.; SPENCER, M.w.; PAUL, D.r.. Morphology and mechanical properties of glass fiber reinforced Nylon 6 nanocomposites. *Polymer*, [s.l.], v. 52, n. 1, p.180-190, jan. 2011.
- [16] TRANVAN, L.; LEGRAND, V.; JACQUEMIN, F.. Thermal decomposition kinetics of balsa wood: Kinetics and degradation mechanisms comparison between dry and moisturized materials. *Polymer Degradation And Stability*, [s.l.], v. 110, p.208-215, dez. 2014.
- [17] TORRES, A. *et. al.* Relatório de projeto: Equipe PegAzuls AeroDesign. Mossoró: Comissão Técnica da Competição, 2014. 53 p.
- [18] TORRES, A. *et. al.* Relatório de projeto: Equipe PegAzuls AeroDesign. Mossoró: Comissão Técnica da Competição, 2015. 83 p.
- [19] TOSON, B.; VIOT, P.; PESQUÉ, J. Finite element modeling of Balsa wood structures under severe loadings. *Engineering Structures*, [s.l.], v. 70, p.36-52, jul. 2014.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

ANALYSIS OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF THE MATERIALS AND ITS APPLICATIONS IN THE MANUFACTURE OF AN AERODESIGN PROTOTYPE

Pedro Celestino Neto Name, pedrosniper14@gmail.com¹

Ramsés Otto Cunha Lima, ramses.cunhalima@ufersa.edu.br¹

Stefany Kariny dos Santos de Souza Queiroz, stefanykariny94@gmail.com¹

Isac Barbosa de Almeida, isac.barbosa@ifrn.edu.br²

¹Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFERSA, RN, Brasil

² Instituto Federal de ciência, educação e tecnologia do Rio Grande do Norte - IFRN, RN, Brasil

Abstract. *The SAE AeroDesign competition happens with the objective of selecting the best aircraft, so that its models can serve as innovation in the aeronautical sector. Therefore, this work proposes to verify the mechanical properties of the materials that are used in the manufacture of prototypes. It is necessary to study the application of the materials, to know their mechanical properties, knowing the loading loads of the components of the prototype and to obtain, through tests, the properties of the materials. A bibliographical survey was made on the mechanical properties of the materials used in the AeroDesign fabrication, as well as on the reports of some participating teams on the loads in the structural components, after which the materials used in the prototype were tested. properties of the materials found in the bibliographic review and with the loads of the structural components, to verify if they fit.*

Keywords: *AeroDesign; materials; structural components; mechanical properties.*