

ANÁLISE DE MATERIAIS PARA PÁS DE HELICÓPTERO*

Letícia Quaglio Camargo¹
Gigliola Salerno²

Resumo

O objetivo do estudo se dá pela viabilidade de substituição da liga de alumínio ABNT 2224, material envoltório a pá do rotor principal do helicóptero Robinson R22 Beta II, por uma liga de alumínio ABNT 7075 ou compósito com matriz polimérica reforçado com fibra de carbono unidirecional, visando o aumento da vida útil, resistência mecânica e redução de custos. Foram realizadas análise metalográfica e dureza Vickers nas ligas 2224 e 7075, e confeccionados corpos de prova de tração, flexão e impacto para a liga 7075 e material compósito de 3mm e 4,5mm de espessura, obtendo-se suas características mecânicas. Para as ligas de alumínio houve semelhança nos valores de dureza e limite de resistência, mas não no limite de escoamento, considerando propriedades mecânicas e redução de custo há possibilidade de substituição da liga 2224 pela liga 7075. Os compósitos foram laminados e cortados os corpos de prova de tração, flexão e impacto para as espessuras de 3mm e 4,5mm. De acordo com os resultados foi possível observar valores de módulo elástico e limite de resistência superiores às ligas de alumínio, em relação ao impacto, o compósito de 3mm absorveu menor energia, mas o compósito de 4,5mm absorveu energia próxima da liga 7075, havendo possibilidade de substituição da liga 2224 pelo material compósito unidirecional.

Palavras-chave: Helicóptero; Alumínio; Compósito.

MATERIAL ANALYSIS FOR HELICOPTER BLADES

Abstract

The aim of this work is according to the feasibility of replacing the ABNT 2224 aluminum alloy in the main rotor blade material of the Robinson R22 Beta II helicopter for ABNT 7075 aluminum alloy or polymer matrix and carbon fiber reinforcement unidirectional composite, in order to evaluate the increasing life, mechanical resistances and costs reduction. In sections aluminum alloys, ABNT 2224 and 7075, were performed the metallographic analysis and Vickers hardness, test specimens for tensile, flexure and impact were made for alloy 7075 and composite material of 3mm and 4,5mm thickness, in order to obtain mechanical characteristics. For the aluminum alloy, there was similarity in the hardness values and resistance limit, but divergences in yield limit, in relation to mechanical properties and cost reduction there is the possibility of replacement of alloy 2224 for alloy 7075. The composites had been laminated and the specimens test for traction, flexure and impact for thickness of 3mm and 4,5mm were cut. According to the results was possible to observe values of elastic modulus and resistance limit higher than the aluminum alloys, in relation to the absorbed energy the 3mm composite was lower but the 4,5mm composite had the approximate value of the 7075 alloy, concluding there is a possibility of replacement of the 2224 alloy by this unidirectional composite material.

Keywords: Helicopter; Aluminum; Composite.

¹ Engenheira de Materiais, graduanda, estudante, Departamento de Engenharia de Materiais, Centro Universitário da FEI

² Engenheira Mecânica, Doutora, Professora, Departamento de Engenharia de Materiais, Centro Universitário da FEI

1 INTRODUÇÃO

Com o passar do tempo os helicópteros foram sendo empregados, tanto para transporte de pessoas, como para armas e alimentos, em seguida surgem no mercado uma variedade de modelos. O helicóptero é uma aeronave limitada, então havendo a possibilidade de redução de peso, haverá economia de combustível, redução do desgaste mecânico, assim proporcionando uma maior eficiência e economia na operação da aeronave [1,2]. Em vista da utilização de compósitos nas pás do rotor principal da aeronave [3,4,5], assim como estão presentes em diversos rotores das aeronaves pelo mundo, principalmente na Rússia, há considerável redução no peso e aumento da vida útil, ou seja, proporcionando uma economia a longo prazo [2]. No Brasil não existem fabricantes das pás do rotor de calda e principal, em grande maioria são feitos fora e trazidas para a substituição daquela pá que não pode estar mais em uso, por conta de trincas, micro trincas ou por ter ultrapassado o tempo de uso.

Este trabalho tem por objetivo o estudo da viabilidade de substituição da liga de alumínio ABNT 2224, material envoltório as pás do rotor principal do helicóptero Robinson R22 Beta II, pela liga de alumínio ABNT 7075 ou compósito com matriz polimérica e reforço de fibra de carbono unidirecional, orientação a 0°, afim de avaliar o aumento da vida útil, resistência mecânica e redução de custos. A ideia do trabalho também foi mostrar que é viável a montagem das pás dos rotores no Brasil, utilizando por exemplo a liga de alumínio ABNT 7075-T4, material encontrado com facilidade no mercado e com preço um terço menor quando comparado com a liga de alumínio ABNT 2224, já para a utilização de compósitos, o importante é ter a infraestrutura para a laminação desse material e aparatos de controle de qualidade, por serem feitos muitas vezes manualmente é necessário a inspeção das laminas montadas.

2 DESENVOLVIMENTO

Após a retirada de uso da pá do helicóptero pela presença de microtrincas, através do material envoltório a pá do rotor principal do helicóptero Robinson R22 Beta II, da liga de alumínio ABNT 7075 e do material compósito unidirecional foi possível realizar os seguintes experimentos.

2.1 Densidade e análise química do material envoltório a pá

Foram retiradas duas amostras do material envoltório a pá, uma para a medida de densidade e outra para a análise química. Foi possível observar que a densidade do material envoltório foi de 2,63 g/cm³ e através da análise química foi possível concluir que se tratava de uma liga de alumínio ABNT 2224. Para a caracterização do material foram realizados cortes longitudinais, transversais e superficiais na amostra do material envolto a pá (Figura 1) sendo embutidas em resina de cura a frio, para que fosse feito metalografia, dureza com o auxílio do durômetro Shimadzu HMV-2 e tamanho de grão através do método de interceptação de contornos com o auxílio do software Stream Essentials. Através do ataque químico foi possível observar contornos de grãos e partículas de segunda fase (Figura 2). Os valores de dureza ficaram próximos, para a secção transversal foi de 136 ± 5HV0,2, longitudinal foi de 137 ± 4HV0,2 e superfície foi de 138 ± 3HV0,2. O tamanho médio de grão identificado foi de 6,5 na secção transversal e para a secção longitudinal foi de 7,0 de acordo com a norma ASTM E112 [7].

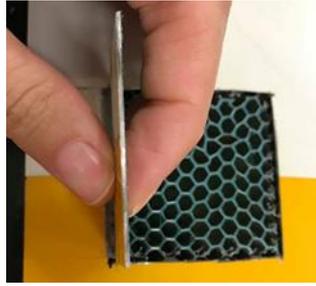
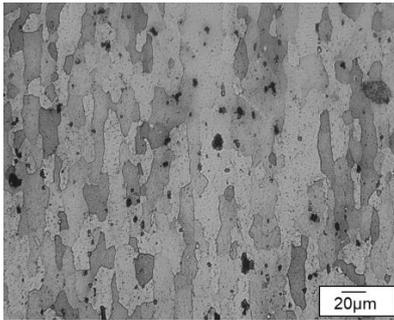
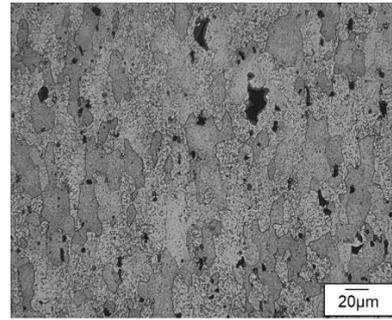


Figura 1. Amostra do material envoltório do Robinson R22 Beta II (Autor, 2019).



(a)



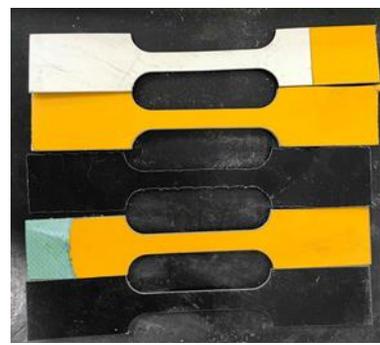
(b)

Figura 2. Análise metalográfica da liga de Alumínio ABNT 2224 a) Sessão transversal 200x b) Sessão longitudinal 200x (Autor, 2019).

Em seguida, foram feitos os corpos de prova de tração, para o ensaio foi utilizada a máquina de ensaio Instron 5567, com 500kg de célula de carga de acordo com a norma ASTM E8/E8M-16^a[8] (Figura 3). Foi possível obter as curvas de σ [MPa] x ϵ [mm/mm] (Figura 4), o Módulo elástico (E), Limite de escoamento (S_{LE}), limite de resistência (S_{LR}), Área total (A_T) e Redução de área (RA) (Tabela 1). Os módulos foram baixos, pois a espessura dos corpos de prova era extremamente pequena, ocorrendo o escorregamento nas garras, podendo levar a erros de leitura do extensômetro e os dados foram desconsiderados. Observando a Figura 4, as amostras 1 e 2 apresentaram menor deformação na fratura, esses corpos de prova foram retirados de uma pá que não estava mais em uso pela presença de micro trincas, segundo informação do mecânico (fato que não foi observado no microscópio ótico), talvez a ruptura antecipada tenha ocorrido pela presença destas micro trincas, o que não se pode afirmar, mas foram mantidos os valores, pois romperam no comprimento útil.



(a)



(b)

Figura 3. Ensaio de tração na a) Instron 5567 b) Corpos de prova de acordo com a norma ASTM E8/E8M-16^a[8] (Autor, 2019).

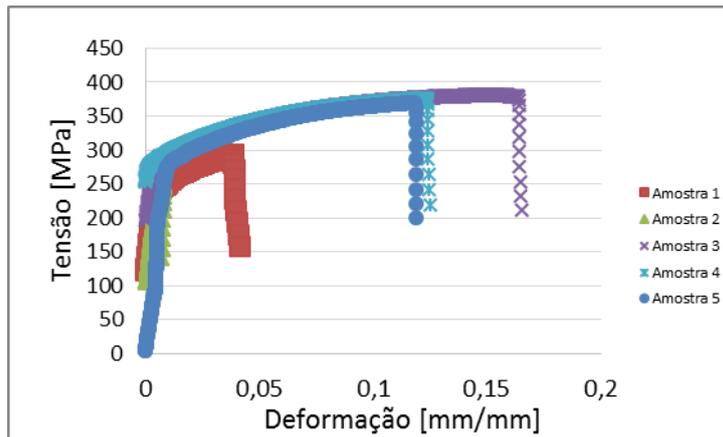


Figura 4. Curva de σ [MPa] x ϵ [mm/mm] do material envoltório da pá (Autor, 2019).

Tabela 1-Dados a partir do ensaio mecânico de tração para a liga de alumínio ABNT 2224

Limite de escoamento (S_{LE})	Limite de resistência (S_{LR})	Alongamento total (A_T)	Redução de área (RA)
333 ± 59 MPa	329 ± 58 MPa	7 ± 2 %	26 ± 9 %

Fonte: Autor, 2019.

2.2 Liga de alumínio ABNT 7075

Para a caracterização dos materiais foram realizados cortes no material recebido antes do tratamento térmico e após o tratamento térmico. Foi realizada metalografia (Figuras 5), dureza com microcarga e tamanho médio de grão. Foi possível observar diferença nos valores de dureza para as diferentes barras, para a secção circular a dureza longitudinal foi de $125 \pm 3HV0,2kg$, na transversal o valor foi de $105 \pm 1HV0,2kg$ e superfície $135 \pm 3HV0,2kg$ e para a barra quadrada a dureza na longitudinal foi de $157 \pm 6HV0,2kg$, na transversal o valor foi de $165 \pm 2HV0,2kg$ e superfície $171 \pm 5HV0,2kg$, sendo então realizado o tratamento térmico para a equalização da microestrutura e da propriedade mecânica. Não houve o aparecimento de grãos, consequentemente não foi possível realizar o tamanho médio de grão.

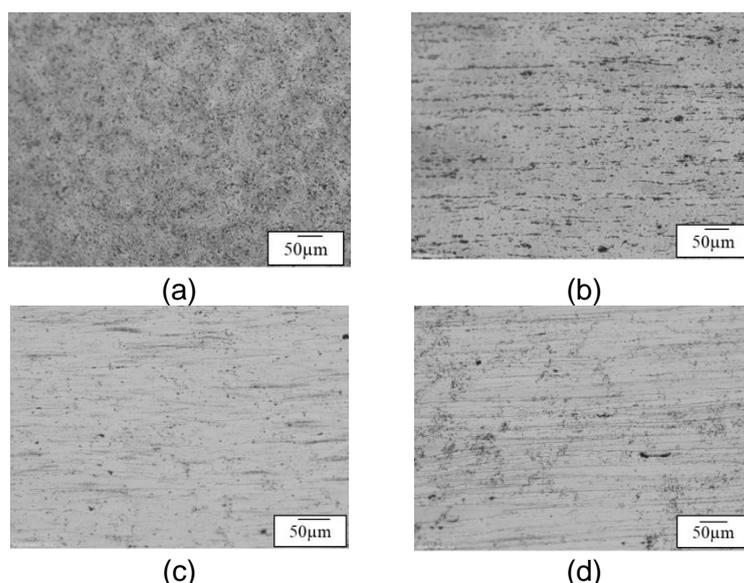


Figura 5. Análise metalográfica liga 7075 sem tratamento térmico a) Secção transversal da barra circular 100x b) Secção longitudinal da barra circular 100x c) Secção transversal da barra quadrada 100x d) Secção longitudinal da barra quadrada 100x (Autor, 2019).

Foi realizado o tratamento térmico T4, que consistiu em levar os materiais da liga de alumínio ABNT 7075 ao forno tubular à vácuo combustol a 480°C por 24h, realizando o resfriamento em água a temperatura ambiente, posteriormente o material foi deixado exposto ao ar calmo (25°C) para a realização do envelhecimento natural durante 72h [6]. Em seguida, as amostras foram cortadas e embutidas em resina fenólica de cura a frio. Foi realizado o processo de lixamento, polimento e ataque químico (Figura 6). Foi possível observar valores de dureza próximos para as barras após tratamento térmico e o material envoltório, para a barra de secção circular foi possível observar que na longitudinal o valor foi de $137 \pm 6\text{HV}_{0,2\text{kg}}$, na transversal o valor foi de $128 \pm 4\text{HV}_{0,2\text{kg}}$ e superfície $130 \pm 12\text{HV}_{0,2\text{kg}}$ e para a barra de secção quadrada foi possível observar que na longitudinal o valor foi de $131 \pm 4\text{HV}_{0,2\text{kg}}$, na transversal o valor foi de $138 \pm 4\text{HV}_{0,2\text{kg}}$ e superfície $162 \pm 4\text{HV}_{0,2\text{kg}}$. Foi possível a identificação do tamanho de grão para a barra de secção quadrada na secção transversal foi observado o tamanho de grão de 4,0, já para a secção longitudinal 7,0 de acordo com a norma ASTM E112 [7].

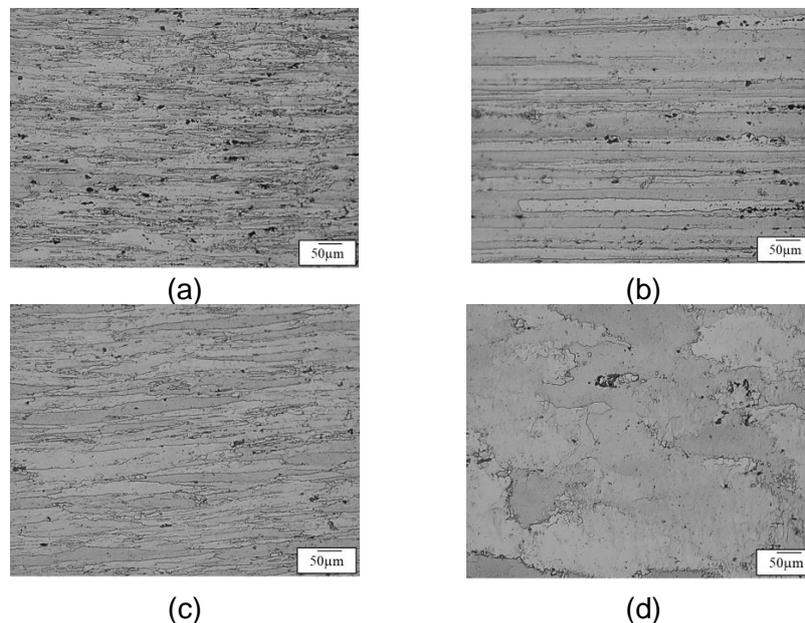


Figura 6. Análise metalográfica da liga de alumínio ABNT 7075 após tratamento térmico a) Secção transversal da barra circular 100x b) Secção longitudinal da barra quadrada 100x c) Secção transversal da barra quadrada 100x d) Secção longitudinal da barra quadrada 100x (Autor, 2019).

Após o tratamento térmico T4 e caracterização do material recebido (ABNT 7075) foi feita a usinagem dos corpos de prova de impacto Charpy de 10mm, 4,5mm e 3mm de espessura, foi utilizada a máquina LOSENHAUSENWERK (LOS) com pêndulo de 300J de acordo com a norma ASTM E23-16b [9] (Figura 7). Após a realização dos ensaios foi possível concluir que a energia absorvida dividida pela área é a mesma na liga de alumínio ABNT 7075-T4, não existe modificação com diferentes espessuras (Tabelas 2). Foi possível observar que as fraturas foram dúcteis.

Tabela 2. Energia absorvida pelo corpo de prova do ensaio de impacto Charpy da liga de alumínio ABNT 7075-T4 de 10mm, 4,5mm e 3mm de espessura

Energia absorvida 10mm [J]	Energia absorvida 4,5mm [J]	Energia absorvida 3mm [J]
24 ± 0	$8,5 \pm 0,93$	6 ± 0

Fonte: Autor, 2019.



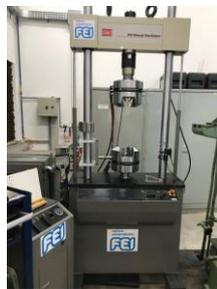
(a)



(b)

Figura 7. Impacto na a) LOSENHAUSENWERK (LOS) b) Corpos de prova de impacto (Autor, 2019).

Foram usinados corpos de prova de tração, foi utilizada a 810 Materials Test System-MTS (Figura 8) de acordo com a norma ASTM E8/E8M-16^a [8], com célula de carga de 25 toneladas e velocidade de 0,8 mm/min até 0,6% de deformação. Foi possível observar fratura dúctil (taça-cone) nos corpos de prova que romperam dentro do comprimento útil. Após a realização do ensaio foi obtido as seguintes curvas de σ [MPa] x ϵ [mm/mm] (Figura 9), o Módulo elástico (E), Limite de escoamento (S_{LE}), limite de resistência (S_{LR}), Área total (A_T) e Redução de área (RA) (Tabela 3). Através dos resultados foi possível observar semelhança dos valores de limite de resistência e divergência nos valores do limite de escoamento e módulo elástico nas ligas de alumínio ABNT 7075-T4 (Tabela 3) e 2224 (Tabela 1), foi possível observar que os valores de escoamento e resistência da Tabela 3 estão abaixo do esperado, pois para uma liga de alumínio ABNT 7075-T4 é possível obter valores superiores, muito provavelmente isso ocorreu por conta do tempo de envelhecimento utilizado.



(a)



(b)

Figura 8. Ensaio de tração na a) 810 Materials Test System-MTS b) Corpos de prova (Autor, 2018).

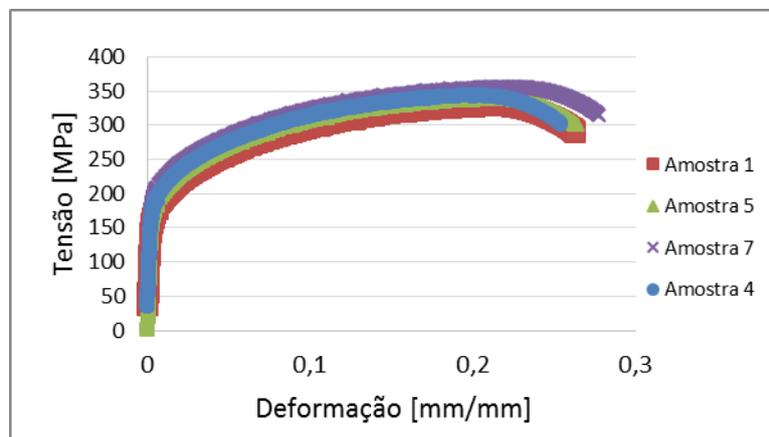


Figura 9. Curva de σ [MPa] x ϵ [%] da liga de alumínio ABNT 7075 T4 (Autor, 2019).

Tabela 3. Dados a partir do ensaio mecânico de tração para a liga de alumínio 7075-T4

Módulo elástico (E)	Limite de escoamento (S_{LE})	Limite de resistência (S_{LR})	Alongamento total (A_T)	Redução de área (RA)
65437 ± 3653 MPa	188 ± 9 MPa	342 ± 11 MPa	$23 \pm 0,9$ %	$42 \pm 4,5$ %

Fonte: Autor, 2019.

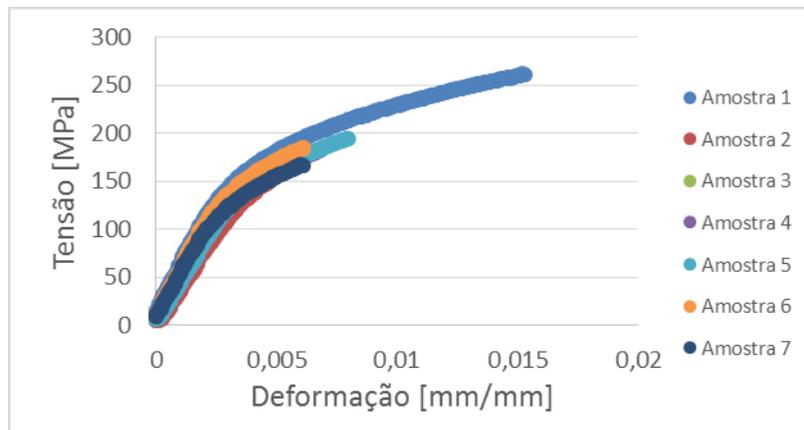
Foram usinados corpos de prova de flexão, foi utilizada a 810 Materials Test System-MTS com a utilização de três pontos (Figura 10) com célula de carga de 25 toneladas e velocidade de 10 mm/min até 0,6% de deformação de acordo com a norma ASTM E855-08 (2013) [10]. Foi possível observar pouca deformação macroscópica, isto ocorreu, pois, a intenção do ensaio era de obter a tensão limite de escoamento na flexão, então o material fletiu até 0,6% de deformação. Após a realização do ensaio foi possível obter as curvas de σ [MPa] x ε [mm/mm] (Figura 11), o Módulo elástico (E) e Limite de escoamento (S_{LE}) (Tabela 4).



(a)



(b)

Figura 10. Ensaio de flexão na a) 810 Materials Test System-MTS b) Corpos de prova (Autor, 2018).**Figura 11.** Curva de σ [MPa] x ε [mm/mm] para o ensaio de flexão da liga de alumínio 7075-T4 (Autor, 2019).**Tabela 4.** Dados a partir do ensaio mecânico de flexão para a liga de alumínio ABNT 7075-T4

Módulo elástico (E)	Limite de escoamento (S_{LE})
42010 ± 3155 MPa	188 ± 16 MPa

Fonte: Autor, 2019.

2.3 Compósito unidirecional com espessura de 3mm e 4,5mm

Para que fossem feitos os corpos de prova em fibra de carbono, foram cortados retângulos de aproximadamente 40 cm x 50 cm de um tecido de fibra de carbono unidirecional (todas as fibras orientadas a 0°), com espessura de 0,40 mm cada. O material foi impregnado com resina epóxi e levado a estufa a 80°C e vácuo durante 1 hora, para que ocorresse a cura do compósito, em seguida foi realizada a retirada do vácuo, sendo então encaminhado para o jato d'água para que fossem cortados os corpos de prova de flexão de três pontos, tração e impacto Charpy (Figura 12), adicionalmente foi retirado um pedaço dessa placa de compósito para a realização da densidade e porcentagem em massa de fibra e resina com o auxílio do forno a 500°C por 1h. Este procedimento foi realizado para duas placas de material compósito unidirecional, uma com espessura de 3mm e outra com espessura de 4,5mm. O ensaio de flexão de três pontos foi realizado na 810 Materials Test System-MTS com célula de carga de 25 toneladas e velocidade de 10 mm/min de acordo com a norma ASTM D790 [11]. Em seguida foi realizado o ensaio de tração utilizando a 810 Materials Test System-MTS de acordo com a norma ASTM D3039 [12] com célula de carga de 25 toneladas e velocidade de 0,8 mm/min até 0,6% de deformação. E, então, foi realizado o ensaio de impacto Charpy com o auxílio da LOSENHAUSENWERK (LOS), utilizando um pêndulo de 300J de acordo com a norma ASTM D6110– 18 [13].

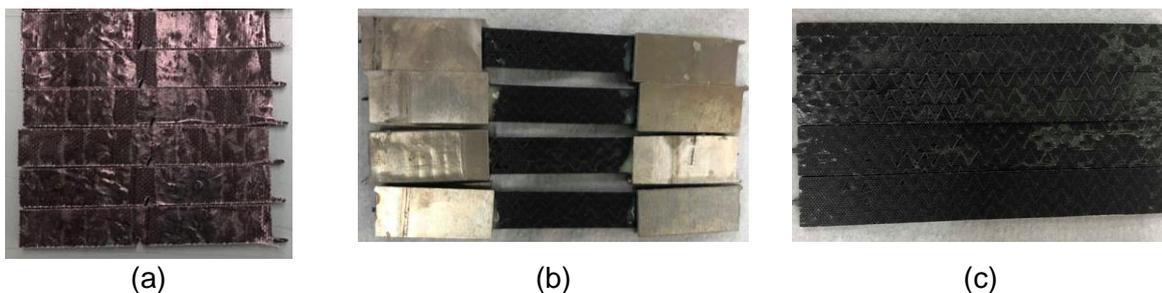


Figura 12. Corpos de prova a) Para o ensaio de impacto Charpy de 4,5mm e 3mm de espessura de acordo com a norma ASTM D6110- 18 b) Para ensaio de Tração de acordo com a norma ASTM D3039 e c) Para ensaio de Flexão em três pontos de acordo com a norma ASTM D790 (Autor: ASTM D6110 - 18; ASTM D3039; ASTM D790; Autor, 2019).

Para o material compósito de 3mm de espessura foi possível observar que a porcentagem de fibra em massa foi cerca de 57%, de resina epóxi foi cerca de 43% e a densidade do compósito foi cerca de 1,50 g/cm³, já para o material compósito de 4,5mm de espessura foi possível observar que a porcentagem de fibra em massa foi cerca de 62%, de resina epóxi foi cerca de 38% e sua densidade foi de 1,51g/cm³.

Após a realização do ensaio de flexão, foi possível observar que para os corpos de prova de 4,5mm de espessura houve sequência de pequenas trincas não chegando à ruptura, já para os de 3mm de espessura houve ruptura plana. Foram obtidos as curvas de σ [MPa] x ϵ [mm/mm] (Figuras 13 e 14), Módulos elásticos (E) e Limites de escoamento (S_{LE}) (Tabela 5) para ambas as espessuras.

Após a realização do ensaio de Tração para os corpos de prova de 4,5mm e 3mm de espessura foi possível observar delaminação de todos dos corpos de prova, para ambas as espessuras. Foram obtidos as curvas de σ [MPa] x ϵ [mm/mm] (Figura 15 e 16), os Módulos elásticos (E) e Limites de resistência (S_{LR}) (Tabela 6).

Através da tabela 7 é possível observar os valores de rigidez específica e resistência específica, dos compósitos de 3mm e 4,5mm de espessura e da liga de alumínio ABNT 7075-T4, ressaltando o altos valores para os compósitos estudados.

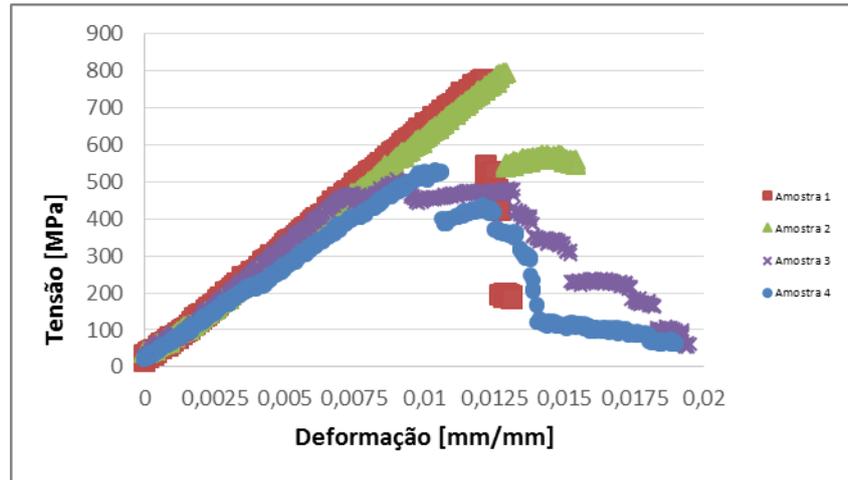


Figura 13. Curva de σ [MPa] x ϵ [mm/mm] do material composto de 3 mm de espessura após ensaio de flexão (Autor, 2019).

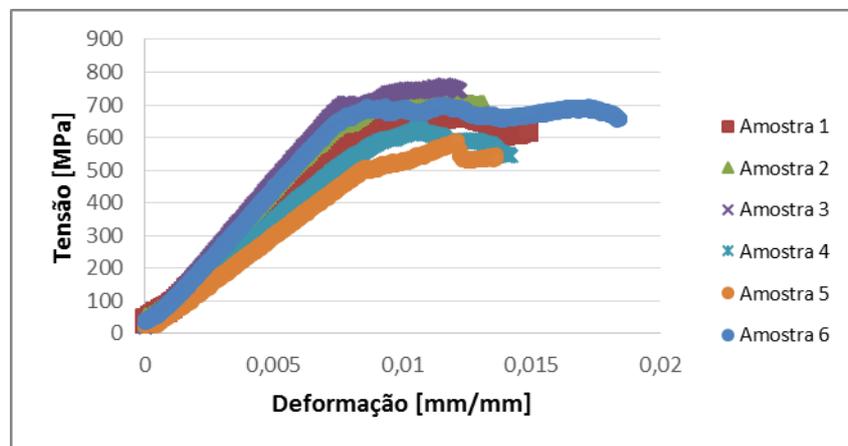


Figura 14. Curva de σ [MPa] x ϵ [mm/mm] do material composto de 3 mm de espessura após ensaio de flexão (Autor, 2019).

Tabela 5. Dados a partir do ensaio mecânico de flexão para material composto de 4,5mm e 3mm de espessura

Módulo elástico - 3mm (E) [MPa]	Limite de escoamento - 3mm (S_{LE}) [MPa]	Módulo elástico - 4,5mm (E) [MPa]	Limite de escoamento - 4,5mm (S_{LE}) [MPa]
58374 ± 5605	649 ± 156	79950 ± 13100	657 ± 72,3

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 6. Dados a partir do ensaio mecânico de tração para os compostos de 3 mm e 4,5mm de espessura

Módulo elástico (E) - 3mm [MPa]	Limite de resistência (S_{LR}) - 3mm [MPa]	Módulo elástico (E) - 4,5mm [MPa]	Limite de resistência (S_{LR}) - 4,5mm [MPa]
85328 ± 3070	504 ± 31	104941 ± 11910	677 ± 82

Fonte: Autor, 2019.

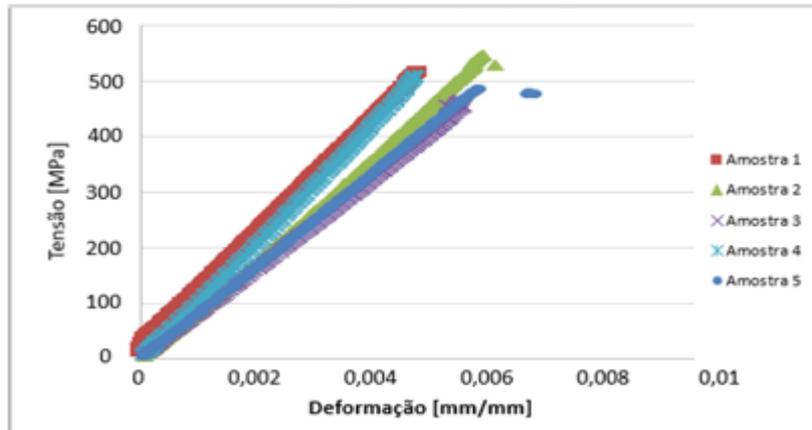


Figura 15. Curva de σ [MPa] x ϵ [mm/mm] tração para o material compósito de 3 mm de espessura.

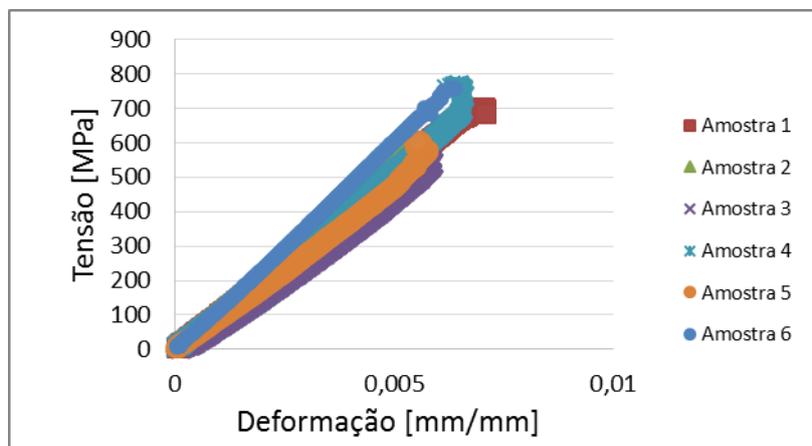


Figura 16. Curva de σ [MPa] x ϵ [mm/mm] tração para o material compósito de 4,5 mm de espessura.

Tabela 7. Valores de rigidez específica e resistência específica para os ensaios de flexão e tração

	Compósito de 3mm	Compósito de 4,5mm	Liga ABNT 7075-T4	Unidade de medida
Rigidez específica - tração	56885	69497	22960	[10 ³ Nmm/g]
Resistência específica - tração	336	448	120	[10 ³ Nmm/g]
Rigidez específica - flexão	38916	52947	14740	[10 ³ Nmm/g]
Resistência específica - flexão	432	435	66	[10 ³ Nmm/g]

Fonte: Autor, 2019.

Após a realização dos ensaios de impacto Charpy dos materiais compósitos de 3mm e 4,5mm de espessura (Tabela 8), foi possível observar que a energia absorvida do corpo de prova de 4,5mm de espessura ficou próxima da energia absorvida do corpo de prova de 4,5mm de espessura da liga de alumínio ABNT 7075-T4.

Tabela 8. Energia absorvida no impacto de material compósito.

Energia absorvida [J] de 3mm	Energia absorvida [J] de 4,5mm
4,5 ± 0,7	7,43 ± 0,98

Fonte: Autor, 2019.

Quando comparados os valores obtidos no ensaio de impacto da liga de alumínio ABNT 7075-T4 e dos materiais compósitos de 3mm e 4,5mm de espessura, foi possível observar valor de energia absorvida cerca de 25% menor para o compósito de 3mm de espessura (Tabelas 2 e 8), já para o compósito de 4,5mm de espessura foi observado a energia absorvida cerca de 13% menor. Para o ensaio de flexão foi possível observar valores de módulo elástico cerca de 28% maior para o material compósito de 3mm de espessura, 47% maior para o material compósito de 4,5mm de espessura quando comparados com a liga de alumínio ABNT 7075-T4 (Tabelas 4 e 5), comparando agora os valores para o ensaio de tração da liga de alumínio 7075-T4 e materiais compósitos de 3mm e 4,5mm de espessura, foi possível observar o módulo elástico e tensão limite de resistência cerca de 32% maior para o material compósito de 3mm de espessura, já para o material compósito de 4,5mm de espessura foi possível observar módulo elástico 37% maior que a liga de alumínio e tensão limite de resistência cerca de 49% maior quando comparado a liga de alumínio (Tabelas 3 e 6).

Foi realizada a fractografia da ruptura dos materiais compósitos de 3mm e 4,5mm de espessura com o auxílio do microscópio eletrônico de varredura, pode-se observar os mecanismos de fratura das fibras, fratura da matriz e arrancamento das fibras para ambas as espessuras (Figura 17).

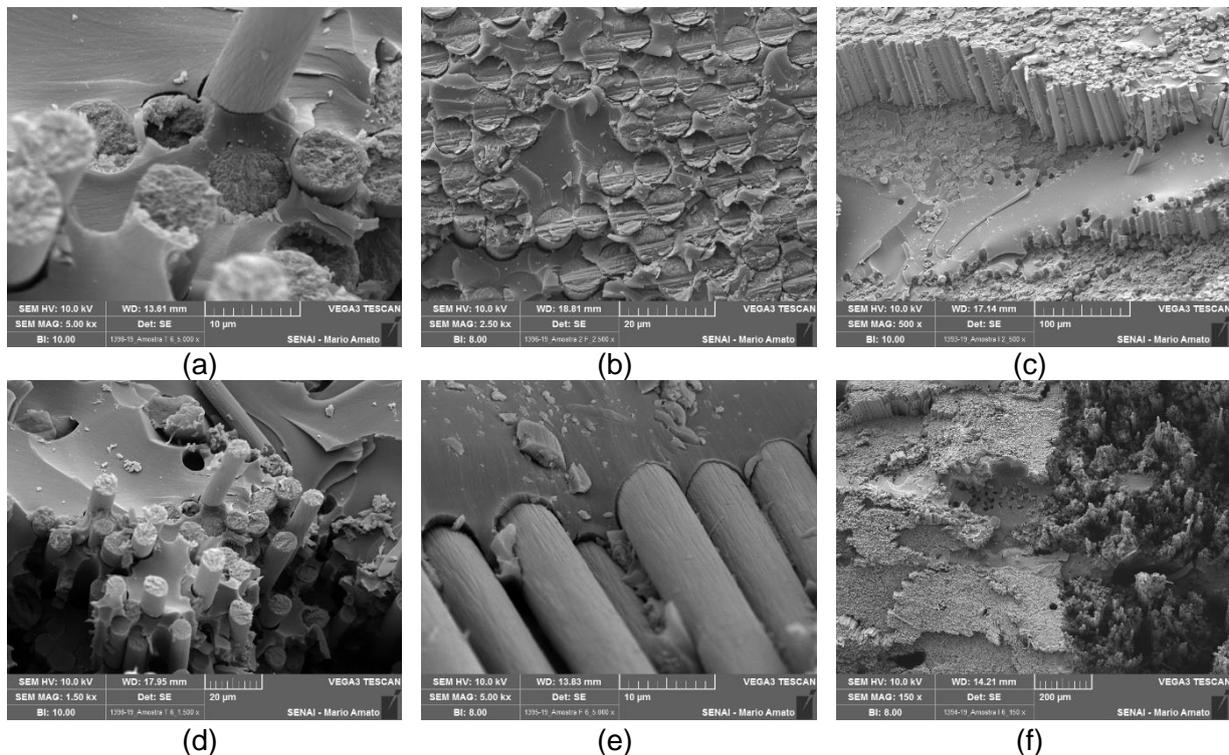


Figura 17. Fractografia dos corpos de prova após os ensaios de a) Tração 3mm de espessura b) Flexão 3mm de espessura c) Impacto 3mm de espessura d) Tração 4,5mm de espessura e) Flexão 4,5mm de espessura e f) Impacto de 4,5mm de espessura.

3 CONCLUSÃO

Conclui-se então que através do ensaio de densidade e análise química que o material envoltório a pá trata-se de uma liga de alumínio série 2XXX, ABNT 2224. Através do tratamento térmico de solubilização e envelhecimento (T4) a liga de alumínio série 7XXX, ABNT 7075 possui as propriedades mecânicas e dureza compatíveis a liga de alumínio ABNT 2224, como vistos nas tabelas 1, 2, 3 e 4. De acordo com o Mercado de Alumínio o custo do quilo do alumínio ABNT 7075 para chapas encontra-se a R\$8000,00 reais a tonelada, já o quilo do alumínio ABNT 2224 para chapas encontra-se a R\$12000,00 reais a tonelada, valores cotados no dia 07/11/2018. Portanto, em relação a dureza e redução de custo, a substituição da liga de alumínio ABNT 2224 pela liga de alumínio ABNT 7075-T4 é viável. Através dos resultados do ensaio de impacto do material compósito unidirecional de 3mm de espessura não é possível realizar a substituição, pois a energia absorvida ficou inferior ao da liga de alumínio ABNT 7075-T4. Através dos resultados do ensaio de impacto do material compósito unidirecional de 4,5mm de espessura, conclui-se que há possibilidade de substituição caso a pá sofra impacto inferior ao valor obtido, pois os valores do compósito e da liga de alumínio ABNT 7075-T4 ficaram muito próximos. Quanto aos valores de resistência e rigidez específica e propriedades mecânicas obtidos nos ensaios de flexão e tração para o material compósito 3mm de espessura e 4,5mm de espessura, foi possível observar viabilidade de substituição do material envoltório a pá do helicóptero Robinson R22 Beta II pelo material compósito unidirecional.

Agradecimentos

Agradeço ao Centro Universitário da FEI pelo apoio ao desenvolvimento do trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 ZAHARIA, S. M. The Modal Analysis of a carbono fiber helicopter blade. **Journal of Industrial Desing and Engineering Graphics**. v. 10, p. 23-26, 2015.
- 2 SÉRVULO, PROF., **Apostila de Conhecimentos Técnicos e Teoria de Voo**, Curso PPH, KYLAB, 2007.
- 3 BOISSE, P. Simulations of Woven Composite Reinforcement Forming. *Woven Fabric Engineering*, 387-414. Polona Dobnik Dubrovski, ISBN 978-953-307-194-7, 2010.
- 4 **MIRACLE, D., DONALDSON L, et al.** Introduction to Composites, Volume 21, Composites Handbook ASM Internacional, 2001.
- 5 BÄKER M, RÖSLER J, HARDERS H. Mechanical behaviour of engineering materials. Springer Science, Berlin, 2007.
- 6 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14227: Alumínio na liga 7075 - Produtos extrudados para fins aeroespaciais – Requisitos**, 2007.
- 7 American Society for Testing and Materials (ASTM). Adjunct to E112 **Methods for Determining the Average Grain Size**. E112, 2012
- 8 American Society for Testing and Materials (ASTM), **ASTM E8/E8M – 16a: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials-** citações em documentos- apresentação. Estados Unidos, 2018.
- 9 American Society for Testing and Materials (ASTM), **ASTM E23 – 16b: Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials¹-** citações em documentos- apresentação. Estados Unidos, 2017.

- 10 American Society for Testing and Materials (ASTM), **ASTM E855 – 08: Standard Test Methods for Bend Testing of Metallic Flat Materials for Spring Applications Involving Static Loading**. Estados Unidos, 2018.
- 11 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). Standard Test Method Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. Standard D, 790-10 edition, 2013.
- 12 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials**. D3039/D3039M – 08. 2008.
- 13 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Determining the Charpy Impact Resistance of Notched Specimens of Plastics**. D6110-18. 2018.