

VIABILIDADE TÉCNICA DA APLICAÇÃO DE MATERIAL COMPÓSITO PARA FABRICAÇÃO DA CINTA DE PROTEÇÃO DA CVT DE UM VEÍCULO BAJA.

Amanda Victoria Araújo Freire¹, Rômulo Pierre Batista dos Reis²

Resumo: Sabendo do avanço tecnológico no desenvolvimento de materiais compósitos com aplicação em estruturas o presente trabalho visou estudar o comportamento mecânico de materiais compósitos, verificando a influência da orientação da fibra no desempenho mecânico e avaliar a viabilidade da substituição do material de uma proteção da transmissão contínua de velocidade (*continuously variable transmission* -CVT) geralmente fabricada em aço por uma proteção fabricada em material compósito. Para isso, realizou-se uma pesquisa bibliográfica em sites de busca indexados por trabalhos já realizados com esta temática, visando obter parâmetros técnicos necessários para a realização de simulações em ambiente computacional. Com auxílio do software CAD 3D foram realizadas modelagens para avaliação de massa de componentes. Além disso, levantou-se custos envolvidos no processo de fabricação das peças. Portanto, pôde-se concluir a viabilidade da substituição ou não do aço por fibra de carbono dependendo da hipótese de projeto, para tal componente.

Palavras-chave: materiais; compósitos; cinta; massa; custo.

1. INTRODUÇÃO

Visando obter a melhor relação entre resistência mecânica e densidade, estudos têm sido intensificados com os materiais compósitos, buscando atingir alta performance com segurança, elevada resistência e uma boa durabilidade. Assim, se faz necessário uma avaliação criteriosa para definir a viabilidade ou não da substituição de materiais comuns na indústria como aço por um compósito, essa avaliação se dar primeiramente através de ensaios mecânicos como tração e impacto para se ter o grau de resistência e confiabilidade equivalente, após isso é verificado a diminuição da densidade para se ter uma conclusão da praticabilidade e/ou substituição de tal material, considerando os custos gerados.

Com isso, neste presente trabalho foi levantada a hipótese da substituição ou não de um material metálico (aço) por um material compósito. Essa análise foi feita para um componente chamado proteção de CVT, item de uso obrigatório no projeto de veículos *off-road Baja* SAE. Onde tal projeto tem por finalidade proporcionar aos estudantes de engenharia uma condição prática de toda a teoria vista em sala de aula. Para isso, deve-se seguir regulamentos determinados pela (*Society of Automotive Engineers*) SAE (organizadora do projeto e competições), o RATBSB [2].

Um dos desafios do projeto Baja é a redução de massa do protótipo, para isso muitas pesquisas visando a substituição de materiais clássicos, abordando parâmetros como resistência mecânica e custos envolvidos estão sendo desenvolvidas por outros grupos de pesquisa, pensando nisso, surgiu a ideia de reduzir a massa da proteção de CVT já que é um componente que tem uma massa considerada relevante. Para isso é apresentado um estudo crítico detalhado do trabalho realizado por [1].

2. DESENVOLVIMENTO

O regulamento BAJA SAE Brasil exige que todas as peças rotantes, tais como correntes, correias, polia CVT, entre outras, devem ser protegidas a fim de evitar acidentes contra o piloto e às pessoas presentes, caso haja falhas nos componentes, ou se soltem peças que podem ser arremessadas devido à força centrípeta gerada (Figura 1). Estas proteções devem se estender ao redor da periferia da peça rotante e devem ser mais largas que a mesma. Para sua fabricação o material exigido deve ser aço com resistência igual ou superior ao SAE 1010 e espessura mínima de 1,524 mm. No entanto, tal proteção pode ser fabricada com material alternativo, desde que sua energia absorvida na ruptura seja equivalente ao aço especificado, podendo assim validar a alteração do material através de ensaios

de impacto Charpy ou Izod, no qual o material alternativo deverá apresentar um desempenho igual ou superior. Além disso, devido a possíveis problemas de fabricação, os materiais compósitos, se utilizados, devem possuir o dobro da espessura com absorção de energia equivalente ao material padrão. Além disso, no sentido radial de giro deve conter apenas um involucro para não entrada de mãos e/ou dedos, onde seu material pode ser compósito com qualquer espessura desde que mantenha a robustez [2].

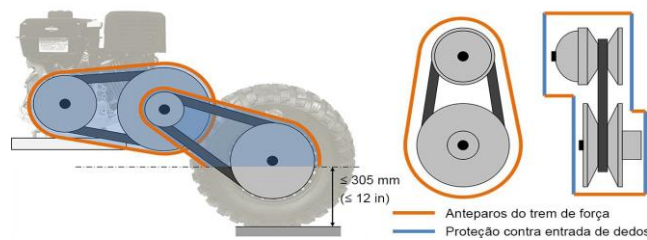


Figura 1. Anteparos trem de força (2).

O ensaio de impacto é usado para medir a tendência de um metal de se comportar de maneira frágil. O choque ou impacto representa um esforço de natureza dinâmica, porque a carga é aplicada repentina e bruscamente. No impacto, não é só a força aplicada que conta. Outro fator é a velocidade de aplicação da força. Força associada com velocidade traduz-se em energia. O ensaio de impacto consiste em medir a quantidade de energia absorvida por uma amostra do material, quando submetida à ação de um esforço de choque de valor conhecido. O método mais comum para ensaiar metais é o do golpe, desferido por um peso em oscilação. A máquina correspondente é o martelo pendular. O pêndulo é levado a uma certa posição, onde adquire uma energia potencial inicial. Ao cair, ele encontra no seu percurso o corpo de prova, que se rompe. A sua trajetória continua até certa altura, que corresponde à posição final, onde o pêndulo apresenta uma energia potencial final. A diferença entre as energias inicial e final corresponde à energia absorvida pelo material.

Os materiais compósitos podem ser definidos como misturas (ao nível macroscópico) não solúveis de dois ou mais constituintes com distintas composições, estruturas e propriedades que se combinam e em que um dos materiais garante a ligação - matriz - e o outro a resistência - reforço [3].

O principal objetivo de se produzir compósitos é combinar diversos materiais para produzir um único com propriedades superiores às dos componentes isolados, pelo que a combinação dos materiais constituintes é decidida a partir da aplicação específica que se pretende dar ao material compósito. A concepção deste tipo de materiais é milenar: existem referências escritas sobre a utilização de argila reforçada com palha em tijolos no Antigo Egito. No século XIX já se utilizavam barras de ferro para reforçar alvenarias [3].

Para materiais compósitos de matriz polimérica e reforço de fibra de carbono submetidos a ensaios de impacto de baixa velocidade concluiu-se que a energia necessária para a iniciação de defeitos no material, depende diretamente da rigidez e da espessura do mesmo. As falhas iniciadas em corpos de prova de menor espessura (com características mais flexíveis) ocorrem nas camadas inferiores do compósito, resultante dos componentes de tensão de flexão. No caso de corpos de prova com maior espessura (de características mais rígidas), as falhas iniciam-se nas camadas superiores devido as maiores tensões compressivas. A Figura 2 mostra os resultados obtidos por [4].

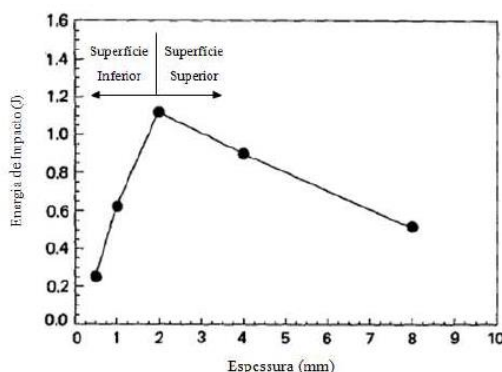


Figura 2. Energia de impacto em função da espessura do compósito de fibra de carbono (Adaptado 4).

2.1. Análises e Discussões do trabalho de [1]

Para o desenvolvimento do estudo e ser capaz de melhor analisar, foi realizada uma verificação dos corpos de prova utilizados por [1] a fim de obter os dados técnicos de ensaios. Para o ensaio de impacto Charpy ele utilizou

9 corpos de prova (CP) de aço 1010 com espessura mínima de 1,5 mm apresentados na Figura 4. Foi observado que os CPs estavam de acordo com a norma [5] que especifica as dimensões como ilustrado na Figura 3.

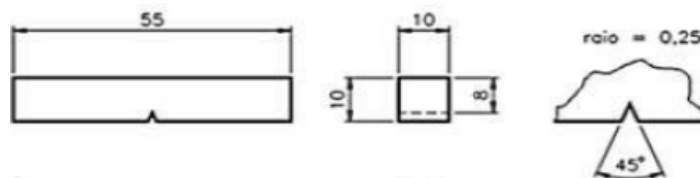


Figura 3. Dimensões corpo de prova de aço para ensaio Charpy (5).



Figura 4. Máquina de corte jato d'água; Chapa de aço SAE 1010; Corpos de prova obtidos (1).

Já para a fibra de carbono, utilizou-se a norma [6], onde pode ser observado as dimensões que a mesma determina para realizar o ensaio de impacto para esse tipo de material (Figura 5). A espessura utilizada foi de aproximadamente 3 mm, variando a orientação das fibras. Na Tabela 1 são detalhadas as diferentes configurações de ensaios realizados.

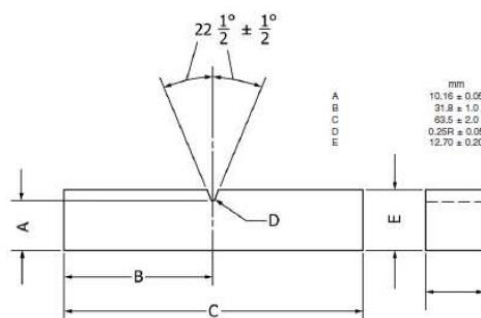


Figura 5. Dimensões corpo de prova de fibra de carbono para ensaio Charpy (6.)

Tabela 1. Detalhamento configurações de ensaios. (Adaptado de 1)

Material	Camadas	Configuração	Espessura média (mm)
SAE 1010	-	-	1,5
FCRE	12	0°/90°	3,53
FCRE	12	± 45°	3,40
FCRE	12	0°/90° ± 45°	3,43
FCRE	5	0°	3,05
FCRE	5	90°	3,16

Segundo [1], os CPs nas configurações de 0° e 90° foram confeccionados utilizando um menor número de lâminas de fibra de carbono para conseguir manter uma espessura média de aproximadamente 3 mm entre todas as configurações, pelo fato do tecido utilizado para a fabricação destes não possuir uma planicidade constante e ter costuras de náilon entre as fibras de carbono para mantê-las juntas, gerando regiões mais espessas entre as camadas do material, assim como em certas laminações.

Na Tabela 2 são mostrados os resultados do ensaio para o aço 1010, onde segundo [1] a fratura apresentada foi predominantemente dúctil, mostrando uma deformação plástica e contração lateral (Figura 6).

Tabela 2. Resultados ensaio de impacto com aço 1010. (Adaptado de 1)

Corpo de Prova	Energia Absorvida (J)
1	13,0
2	16,0
3	17,0
4	17,0
5	17,0
6	16,0
7	14,0
8	16,0
9	16,0
Média	15,8

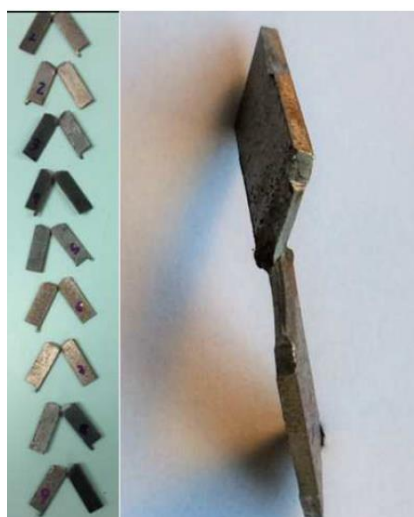


Figura 6. Corpos de prova de aço após ensaio Charpy. (1)

Na Tabela 3 são mostrados os resultados obtidos pelo material compósito no ensaio de impacto Charpy, separados pelo corpo de prova, configuração e espessura. Onde houve uma grande variância na energia absorvida.

Tabela 3. Resultados ensaio de impacto com fibra de carbono. (Adaptado de 1)

Corpo de Prova	[0°/90°]		[± 45°]		[0°/90° ± 45°]		[0°]		[90°]	
	Espessura (mm)	Energia Abs. (J)	Espessura (mm)	Energia Abs. (J)	Espessura (mm)	Energia Abs. (J)	Espessura (mm)	Energia Abs. (J)	Espessura (mm)	Energia Abs. (J)
1	3,45	6	3,55	10	3,50	27	3,01	5	3,24	10
2	3,55	-	3,35	14	3,45	15	3,00	5	3,17	6
3	3,42	12	3,30	20	3,35	12	3,24	5	3,17	6
4	3,60	6	3,40	22	3,40	25	3,08	4	3,12	6
5	3,43	10	3,55	14	3,55	28	3,05	4	3,13	7
6	3,50	12	3,40	16	3,35	14	3,00	3	3,35	6
7	3,52	14	3,25	15	3,35	13	3,03	6	3,01	6
8	3,70	18	3,40	22	3,40	7	3,03	4	3,05	6

9	3,57	10	3,45	12	3,50	22	3,10	4	3,23	10
10	3,52	6	3,35	22	3,45	16	3,00	6	3,13	6
Média	3,53	10,44	3,40	16,70	3,43	17,90	3,05	4,60	3,16	6,90

A Figura 7 mostra os resultados dos corpos de prova fraturados para todas as configurações mencionadas acima após o ensaio. Na configuração $0^\circ/90^\circ$, segundo [1] o resultado para o corpo de prova número 2 foi desconsiderado, pois houve uma interferência no movimento do pêndulo durante sua descida até o impacto.

Para [1] o ensaio foi validado, pois foram geradas em todos corpos de prova predominantemente as fraturas. Para as configurações $0^\circ/90^\circ$ e $\pm 45^\circ$, a fratura das fibras carbono foi na mesma direção da configuração de suas lâminas, porém as camadas a se romperam na orientação das fibras. Do mesmo modo os corpos de prova fraturados para a configuração mista ($0^\circ/90^\circ \pm 45^\circ$). As superfícies de fratura se apresentaram similares às fraturas dos corpos na configuração $0^\circ/90^\circ$. Já a configuração 0° observou-se o não rompimento das fibras, apresentando superfícies com um aspecto plano. Para a configuração 90° as superfícies de fratura apresentaram

um aspecto similar as demais configurações (com exceção da configuração 0°), mostrando o rompimento das fibras de carbono.



Figura 7. Corpos de prova de fibra de carbono após ensaio Charpy. (Adaptado de 1)

Portanto, a partir dessa análise e segundo [2] a configuração que poderá se adequar para o estudo será $\pm 45^\circ$, com espessura de 3,40 mm, pois sua energia média obtida foi maior do que a do aço 1010. Lembrando que tal espessura deverá ser somente obrigatoriamente na região periférica no sentido radial do sistema de transmissão do veículo Baja, a CVT, onde essa parte foi chamada de cinta.

Desta forma, foi realizada uma simulação da massa obtida em todo componente da proteção da CVT, foi realizado uma modelagem do sólido CAD 3D utilizando o software *Solidworks*, e através de suas ferramentas de análises foi mensurada a massa total do componente. Para isso, variou-se o material com sua respectiva espessura, podendo assim ter um comparativo percentual de peso final. Para a peça totalmente de compósito considerou-se a espessura da região da cinta de 3,40 mm e o restante com espessura de 2 mm. Já com a cinta de aço foi considerada a espessura de 1,50 mm e todo restante da proteção de CVT com fibra de carbono espessura de 2 mm. Ou seja, foi analisado somente a influência do material/espessura da cinta.

Com intuito de verificar e determinar a viabilidade ou não da substituição do material, fez-se uma pesquisa de custos de fabricação utilizando tanto aço 1010 quanto a fibra de carbono. Após isso, será capaz de verificar o custo-benefício do componente mais leve.

2.2. Resultados e Discussões

Para realizar a modelagem posicionou-se a CVT da maneira como se utiliza no veículo, a partir de então foi desenhado a cinta de forma a manter uma folga segura entre ela e a transmissão, folga esta necessária para evitar o contato durante o funcionamento do sistema. Com a cinta modelada, desenhou-se o involucro (proteções externa e interna) com design determinado pelo projeto, com espessura de 2 mm e material fibra de carbono. A Figura 8 mostra uma vista explodida de toda a montagem do sistema de transmissão e proteção de CVT

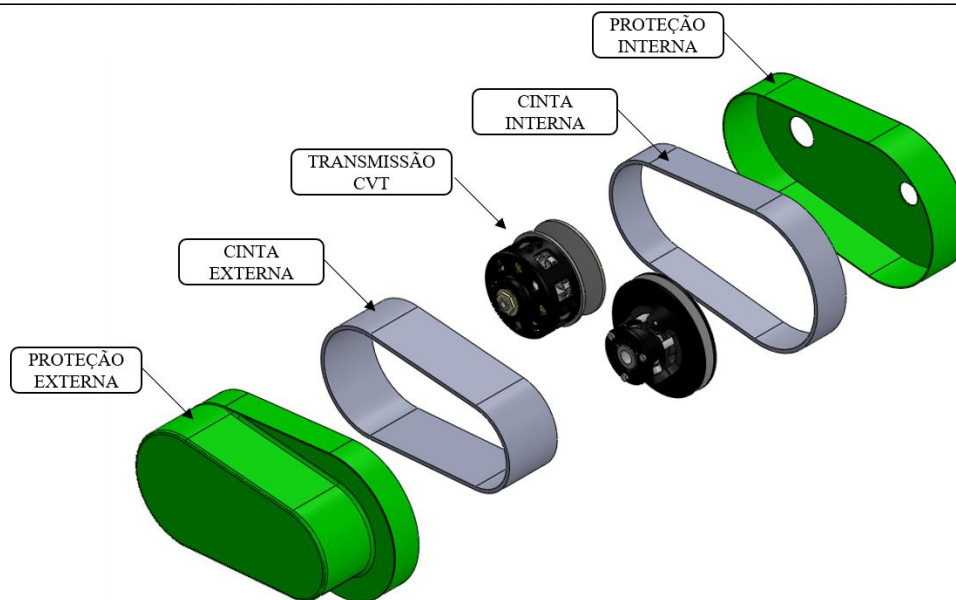


Figura 8. Vista explodida da montagem da proteção de CVT. (Autoria própria)

Foram realizadas duas montagens, uma com cinta de aço e outra de fibra de carbono. Para a primeira, considerou-se a espessura de 1,5 mm para o aço. Esta foi posicionada na periferia da CVT como requisitado. Já para a segunda considerou-se uma espessura de 3,40 mm obtida nos ensaios de [1]. Ou seja, a diferença entre as duas montagens está na espessura e no material correspondente. Tais materiais foram definidos numa ferramenta de adição de material do próprio software. A Figura 9 detalha como ficará a montagem final do sistema com e sem a CVT.

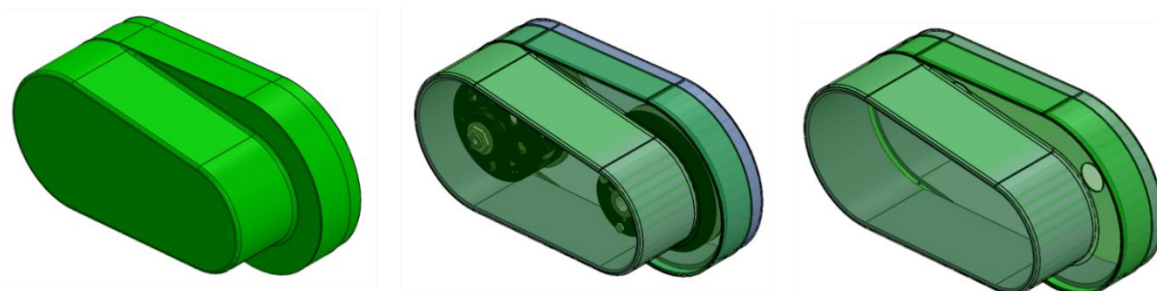


Figura 9. Detalhamento da modelagem da proteção de CVT. (Autoria própria)

Após a modelagem e montagem de todos os componentes, através da ferramenta de mensurar a massa foi realizada a simulação da influência material/espessura dos dois projetos citados. Na Figura 10 mostra a caixa de diálogo disponibilizada pelo software, onde para a montagem com a cinta de aço espessura de 1,5 mm a massa obtida foi de 3395,41 gramas e para montagem com a cinta de fibra de carbono espessura de 3,40 mm a massa foi de 2439,03 gramas. Ou seja, o compósito mesmo com maior espessura obteve uma massa 28,17% menor, o que para aplicação de veículos de competição é um valor expressivo.

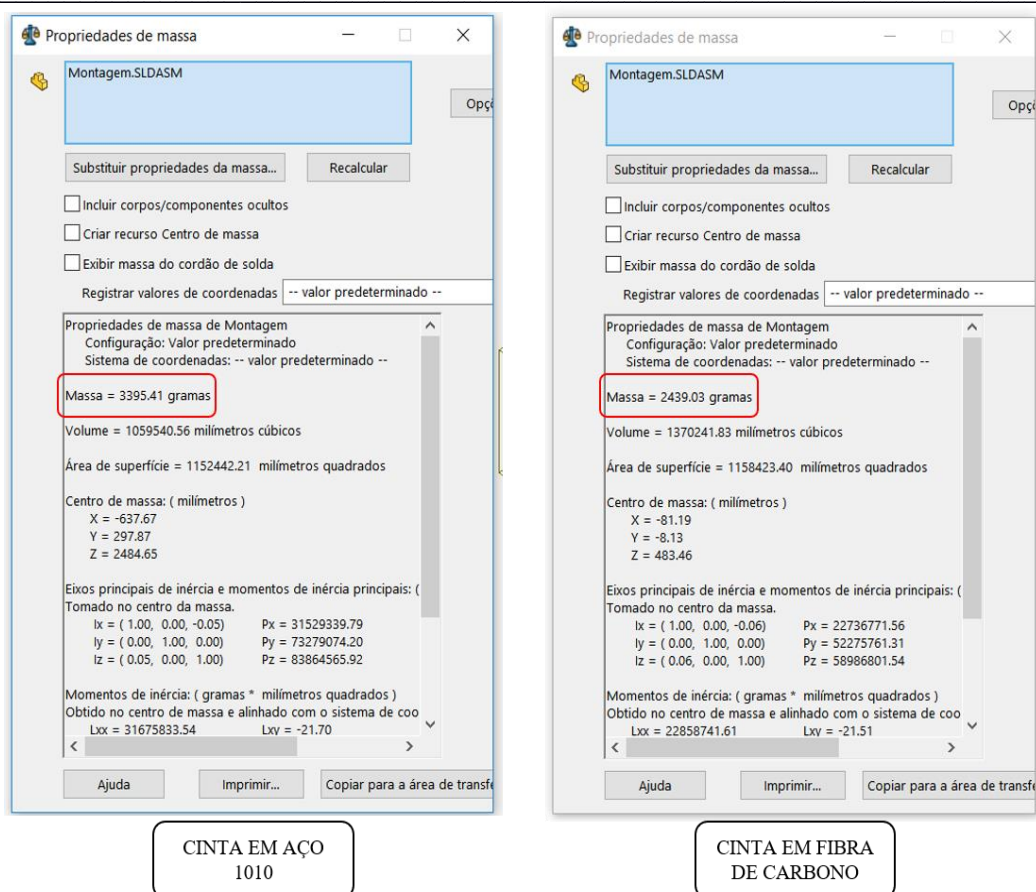


Figura 10. Simulação da massa da proteção de CVT obtida no *Solidworks*. (Autoria própria)

Levando em conta o custo benefício, foi realizado um levantamento de custos dos materiais necessários para fabricação da cinta da proteção de CVT, ou seja, não foi levado em consideração os valores do material para fabricação do invólucro, pois como tal componente é semelhante seja qual for o material utilizado na cinta e para fins comparativos, nesse caso, o comparativo se deu entre a cinta de aço 1010 e o compósito fibra de carbono. Para o aço 1010 a pesquisa se deu em um fornecedor local de metais. Chapa fornecida na dimensão mínima de 2 x 1 m, com espessura de 1,5 mm; esta por sua vez seria suficiente para envolver toda região periférica projetada em CAD, como mostra a Figura 9. O valor do processo de corte está incluso, totalizando o montante mostrado na Tabela 4.

Já para a fibra de carbono a pesquisa se deu através de site pela falta de fornecedor local. Através da experiência de fabricação estipulou-se uma quantidade necessária para conseguir construir toda área da cinta com espessura de 3,4 mm, sendo esta 2 m² de manta da fibra, 1 kg de resina + catalisador e 425 g de desmoldante. Onde o valor de transporte para o local está incluso, totalizando o valor mostrado na Tabela 4.

Tabela 4. Levantamento de custos comparativo para fabricação da proteção de CVT. (Autoria própria)

AÇO 1010	
Componentes	Custo (R\$)
Chapa de aço cortada	150,96
Total	150,96
FIBRA DE CARBONO	
Componentes	Custo (R\$)
Fibra	311,67
Resina + Catalisador	20,00
Desmoldante	15,00

Total	346,67
--------------	---------------

A cinta da proteção de CVT feita em fibra de carbono (28,17 % mais leve), portanto, possui um custo mais elevado, este por sua vez totaliza um aumento de 56,45 % com relação a fabricada em aço 1010.

A fim de decidir a viabilidade técnica/econômica pelo uso ou não do compósito em tal componente, o mesmo será de acordo com as premissas de projeto traçadas, ou seja, os objetivos gerais do projeto, se irá priorizar redução de massa e aumento do desempenho dinâmico longitudinal sem dar importância com aumento do valor envolvido, ou se a redução de custos será mais relevante. Pensando na primeira prioridade, toda redução de massa será significativa, pois irá impactar no desempenho nas provas dinâmicas e consequentemente na pontuação das competições Baja SAE, porém no que diz respeito a valor de projeto será enfraquecido pelo valor empregado na fabricação da peça. Já pensando na segunda prioridade, a fabricação em aço será mais viável, pois irá cumprir com os requisitos do regulamento, no entanto o veículo irá perder desempenho técnico pelo acréscimo de massa.

3. CONCLUSÕES

Após as análises realizadas no presente trabalho, através de pesquisas e embasamento de outro trabalho e referências, pode-se notar a suma importância do desenvolvimento tecnológico dos materiais compósitos, no que diz respeito a controle de geometria e mantendo a resistência mecânica. Porém ainda há um vasto campo a ser explorado nessa área, principalmente para as dificuldades de fabricação e manutenção das propriedades por todo material.

Foi observado a influência do arranjo construtivo da manta de fibra, bem como a variação da espessura controlada pela quantidade de camadas durante a fabricação. Com isso, observou-se que a energia absorvida durante o impacto pode variar bastante mudando poucos parâmetros, conferindo numa maior variância dos resultados.

Após obtenção e utilização dos resultados de trabalhos realizados, notou-se que a fibra com orientação $\pm 45^\circ$ e espessura média de 3,40 mm poderia substituir o aço 1010 para a cinta da proteção de CVT, pois se apresentou com maior desempenho no ensaio de impacto Charpy. De posse dessa informação, foi realizada uma modelagem CAD 3D para simular a diferença percentual da massa entre os materiais, onde para o compósito obteve melhor resultado como de se esperar, diminuição de 28,17% na massa do componente. Além disso, através de pesquisa de orçamentos levantou-se os custos, mostrando que a fibra de carbono possui um alto valor em relação ao aço 1010.

Portanto, para determinar a viabilidade técnica da aplicação de fibra de carbono para a cinta da proteção de CVT faz-se necessário determinar se as premissas de projeto do veículo priorizam redução e desempenho ou redução de custos. Ou seja, para a primeira hipótese a aplicação é viável já que a redução de massa é significativa; mas se considerar a redução de custos não irá compensar um alto valor envolvido. Com isso, para trabalhos futuros, sugere-se realizar uma verificação física e matemática da influência percentual da massa na dinâmica veicular e desenvolver formas de redução de custos para fabricação da cinta.

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MAZARIM, G. C.; SALERNO, G.. Resistência ao Impacto de Compósitos de Fibra de Carbono e Resina Epóxi em Comparação ao Aço SAE 1010. The Journal Of Engineering And Exact Sciences. São Bernardo do Campo, p. 12-26. fev. 2018.
- [2] BAJA SAE BRASIL – Regulamento Baja SAE Brasil – RATBSB, 2018.
- [3] ANABELE, M. M.. Materiais Compósitos. Departamento de Engenharia Civil. Fortaleza. 2009.
- [4] MORTON, J.; CANTWELL, W. J. The Impact Resistance of Composites Materials – A Review. USA (1991).
- [5] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E 23: Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. 2016.
- [6] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 256: Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics. 2010.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA
Centro de Ciências Exatas e Naturais – CCEN

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Às 09:00 horas do dia nove de agosto de dois mil e dezenove, na sala 17 do CE – Centro de Engenharias da UFERSA – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, reuniu-se a Banca Examinadora de defesa de trabalho de conclusão de curso de autoria da aluna **AMANDA VICTORIA ARAÚJO FREIRE**, aluna do curso de Bacharelado em Ciência e Tecnologia desta universidade, N° de matrícula **2015021012**, com o título **“VIABILIDADE TÉCNICA DA APLICAÇÃO DE MATERIAL COMPÓSITO PARA FABRICAÇÃO DA CINTA DE PROTEÇÃO DA CVT DE UM VEÍCULO BAJA”**. A Banca Examinadora ficou assim constituída por três membros: Prof. Dr. RÔMULO PIERRE BATISTA DOS REIS, presidente da banca e orientador do Trabalho de Conclusão de Curso; Prof. PRINCE AZSEMBERGH NOGUEIRA DE CARVALHO e Prof. FILIPE LIMA DOS SANTOS, como membros. Concluída a defesa, procedeu-se o julgamento pelos membros da banca examinadora, tendo a aluna obtido as seguintes notas: 10,0; 10,0; 10,0. Apuradas as notas verificou-se que a aluna foi aprovada com média geral 10,0. E para constar, eu, RÔMULO PIERRE BATISTA DOS REIS, lavrei a presente ata que, após lida e aprovada pelos membros da banca examinadora, será assinada por todos.

Mossoró, 09 de agosto de 2019.

Assinatura dos membros da Banca Examinadora.

Prof. Dr. RÔMULO PIERRE BATISTA DOS REIS – UFERSA
Presidente e orientador

Prof. PRINCE AZSEMBERGH NOGUEIRA DE CARVALHO – UFERSA
Primeiro Membro

Prof. FILIPE LIMA DOS SANTOS - UFERSA
Segundo Membro