

## Desenvolvimento de um Compósito Híbrido Alumínio-Borracha

Claudia Victoria Campos Rubio (Universidade FUMEC, Belo Horizonte) [claudia.campos.rubio@gmail.com](mailto:claudia.campos.rubio@gmail.com)

Luciano Machado Gomes Vieira (Universidade Federal de Minas Gerais) [lucianomgv@ufmg.br](mailto:lucianomgv@ufmg.br)

Juan Carlos Campos Rubio (Universidade Federal de Minas Gerais) [juan@ufmg.br](mailto:juan@ufmg.br)

### Resumo:

Dados governamentais indicam que são produzidos ao menos 35 milhões de carcaças de pneus por ano. Embora uma grande parte destes pneus sejam derivados para reciclagem e reaproveitamento, há mais de 100 milhões de pneus abandonados no país, aos quais podem ser dados algum destino apropriado. Este trabalho pretende desenvolver e caracterizar um compósito tipo sanduiche laminado borracha/metal (LBM) de alto desempenho mecânico e de caráter sustentável que possa ter utilização em áreas como construção civil, setor automotivo e naval. Ensaio mecânicos de tração, impacto e cisalhamento serão as variáveis de interesse. Os resultados obtidos poderão revelar o comportamento do compósito híbrido sustentável permitindo o uso do mesmo em diversas aplicações da engenharia.

**Palavras chave:** Reciclagem; Materiais Compósitos; Borracha e Laminados.

## Development of a Hybrid Aluminum-Rubber Composite

### Abstract

Government data indicates that are produced at least 35 million of tire casings per year. While a large part of these tires are destiny to recycling and reuse, there over 100 million tires and their components neglected all over the country, which can be given some appropriate destination. This work aims to develop and characterize a laminated composite, in a sandwich structure rubber/metal (LRM), of a high mechanical and sustainable performance that could be used in areas such as construction, automotive and marine sector. Tensile and impact tests will be the variables of interest. The results showed good performance providing a new material for application.

**Key-words:** Recycling; Composite Materials; Rubber and Laminates.

### 1. Introdução

Nos anos 70, a antiga empresa multinacional de alumínio Alcan (hoje Novelis) instalou no interior do estado de São Paulo, sua fábrica no município para produzir chapas para latas de bebidas. Nos anos 90 foi à vez da instalação de fabricas de reciclagem nas proximidades, o que fez a Novelis instalar seu próprio centro de reciclagem de alumínio ao fim desta década.

Dados da Associação Brasileira de Alumínio (ABAL) indicam que o percentual de alumínio utilizado no país proveniente de reciclagem foi em 2011 de 35,2%, que é um valor superior a média mundial de 29,9%.

Em seu trabalho FERREIRA et al. (2014) mostraram o impacto da reciclagem, por meio de coeficientes técnicos de consumo de energia na produção de alumínio, comparando os valores consumidos na produção a partir do minério (bauxita) e na reciclagem, os autores afirmam

que o montante de poupança pela reciclagem de alumínio alcançaria 20,665 TW/h de energia, muito superior ao valor de energia poupado nas ações governamentais de horário de verão, que reduziram o consumo de energia em 2010 em 7,443 TW/h.

Entre os vários materiais comumente utilizados na construção de edifícios, o alumínio se destaca pela alta demanda de energia em seu processo produtivo, principalmente de eletricidade, o que eleva consideravelmente seu impacto na demanda de energia primária e no potencial de aquecimento global. Na tabela 1 são apresentados valores nacionais e internacionais de energia consumida no ciclo de vida do produto (EC) para a produção do alumínio.

| El em MJ/Kg | Fonte      |
|-------------|------------|
| 236,8       | Índia      |
| 136,8       | Europa     |
| 270         | Inglaterra |
| 98,20       | Brasil     |

Fonte: Gouveia & Spoto (2015).

Tabela 1 – Valores de EC para a produção do alumínio no Brasil e em outros países

Por sua vez, segundo dados da Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIP), o Brasil se encontra da sétima posição do ranking de maiores produtores de pneus do mundo. Dados governamentais indicam que são produzidos ao menos 35 milhões de carcaças de pneus por ano. Embora uma grande parte destes pneus sejam derivados para reciclagem e reaproveitamento, há mais de 100 milhões de pneus abandonados no país, aos quais pode ser dado algum destino apropriado.

O descarte de pneumáticos de forma errada gera problemas a saúde pública, assoreamentos e enchentes. Por exemplo, após a chuva, água fica retida na parte interna do pneu, tornando-se foco de dengue. A queima de pneus é um descarte muito usual, porém a combustão libera compostos tóxicos ao homem, que podem levar ao câncer, infertilidade e debilitação do sistema imunológico. Entupimento de bueiros também é um exemplo de consequência do mau descarte.

Uma resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (416/9) obriga fabricantes e importadores de pneus novos a darem destinação adequada aos pneus inservíveis no Brasil. Assim, o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Renováveis (IBAMA), vem aumentando a fiscalização e o controle para evitar a disposição inadequada dos pneus inservíveis no meio ambiente, bem como para que tenham um destino ambientalmente adequado em instalações licenciadas para promoção da destinação final ambientalmente adequada (TORNELLI, 2014).

A reutilização ou reforma traz gastos devidos aos processos físico-químicos envolvidos, com objetivo de transformar pneus inservíveis em pneus novos. Além do que, uma carcaça de pneu não suportaria inúmeras reformas.

Vários são os processos realizados a fim de reutilizar o material, dentre eles o derretimento da borracha, que apresenta como característica negativa a geração de gases tóxicos. Dentre as alternativas mais difundidas para reciclagem de pneus estão a fabricação de muros de contenção de estradas, para absorção de impactos nas batidas de veículos, assim como na produção de Asfalto-borracha, que apresenta características técnicas interessantes.

O processo de reciclagem, após a coleta dos pneus que serão reutilizados, esses são

encaminhados para empresas que farão a separação da borracha, tecido e tiras de aço que compõe os pneus, definindo-se assim o Processo Mecânico. O Processo Criogênico se consiste em congelar a borracha com azoto líquido até o ponto desta se fragmentar, após isso o pneu sofre trituração mecânica e em seguida é passado em um túnel criogênico separando borracha de tecido e de metal.

Quando a borracha se destinada para as empresas que fabricam o Asfalto-borracha, essa borracha é moída e incorporada no asfalto, o que aumenta a aderência, a durabilidade e reduz ruídos. O valor de 5% aumentado no valor do produto devido a adição do pó de borracha moída é compensado pela durabilidade maior que o asfalto possui.

Os materiais como tecido e metais que sobraram do processo mecânico de reutilização dos pneumáticos, podem ser reaproveitados por outras empresas como de tecido e metalúrgicas.

Neste sentido, unir numa mesma solução estes dois materiais parece uma ideia econômica e ambientalmente de grande interesse para a sociedade. As características técnicas vantajosas do alumínio como, baixo peso específico, somado a uma boa resistência mecânica, sua natural resistência a corrosão e bom acabamento, aliadas ao isolamento térmico e acústico da borracha, proporcionariam características superiores a um material para revestimento, civil, industrial, automotivo, naval, entre outros.

Este trabalho propõe desenvolver e caracterizar um compósito tipo sanduiche laminado borracha/metal (LBM) de alto desempenho mecânico e de caráter sustentável que possa ter utilização em áreas como construção civil, setor automotivo e naval. Ensaio mecânicos de tração, impacto e cisalhamento serão as variáveis de interesse.

Os resultados obtidos revelam que o comportamento do compósito híbrido sustentável LBM permite seu uso em diversas aplicações da engenharia.

## **2. Compósitos Laminados**

Durante a Segunda Grande Guerra Mundial, a fabricação de compósitos com resina epóxi e fibra de vidro começou a ser realizada com o objetivo de se obter uma redução de custo associada à redução de peso em materiais (CALLISTER, 2007).

Os compósitos comparados com as ligas metálicas oferecem muitas vantagens, principalmente nos quesitos como alta resistência e rigidez quando o foco são os materiais com baixo peso. Em compensação, estes materiais podem apresentar algumas desvantagens como, por exemplo, a absorção de umidade (VOGELESANG e VLOT, 2000).

Durante as últimas décadas muitos esforços foram voltados para o desenvolvimento de compósitos resistentes à fadiga, mantendo o baixo peso e elevadas propriedades mecânicas. Atualmente o mesmo pensamento prevalece, embora com o foco na sustentabilidade (BOTELHO, et al., 2006).

Em 1982, o primeiro produto comercial denominado ARALL, laminado de aramida reforçado com alumínio foi lançado pela empresa Alcoa®. O ARALL 1 (alumínio 7075) e o ARALL 2 (alumínio 2024) foram produzidos sendo diferenciados pelas camadas de alumínio. Em seguida, a Universidade Técnica de Delft, localizada na Holanda, desenvolveu o Laminado Fibra/Metal (LFM) de aramida utilizando um alumínio 7475-T761 e resina epóxi obtendo resultados mais promissores. A patente sobre o GLARE, laminas de alumínio com fibras de vidro derivado do inglês GLASS REinforced, foi arquivado pela empresa Akzo® no ano de 1987. Após uma parceria entre Alcoa e Akzo® iniciou-se a produção e comercialização do GLARE, sendo este atualmente comercializado em diferentes combinações, mas todas

baseadas em fibras de vidro unidirecionais pré-impregnadas com resina epóxi com uma fração de volume de fibra de 60%. Durante a fabricação através de autoclave, as fibras de vidro são colocadas em diferentes orientações e número de camadas as quais denominam sua classificação (CATRODEZA, 2002; BOTELHO, et al., 2006).

Os compósitos laminados fibra-metal (Figura 1) estão cada vez mais utilizados por apresentarem, em geral, propriedades mecânicas superiores às de ligas metálicas e menor densidade (FARIAS et al., 2007). Estes materiais foram desenvolvidos exclusivamente para a indústria aeronáutica devido as suas características específicas e alto custo, entretanto, os mesmos podem ser empregados em outros setores industriais devido à liberdade e várias possibilidades de arranjos de componentes e orientações, podendo ser competitivo para muitas aplicações, (VLOT e GUNNINK, 2001),

Atualmente diversos pesquisadores vêm desenvolvendo materiais compósitos laminados, caracterizados por apresentarem uma estrutura na forma de sanduíche. Os compósitos sanduíches são constituídos por três partes, duas denominadas faces e uma núcleo (WENNBERG, 2011), conforme Figura 1.

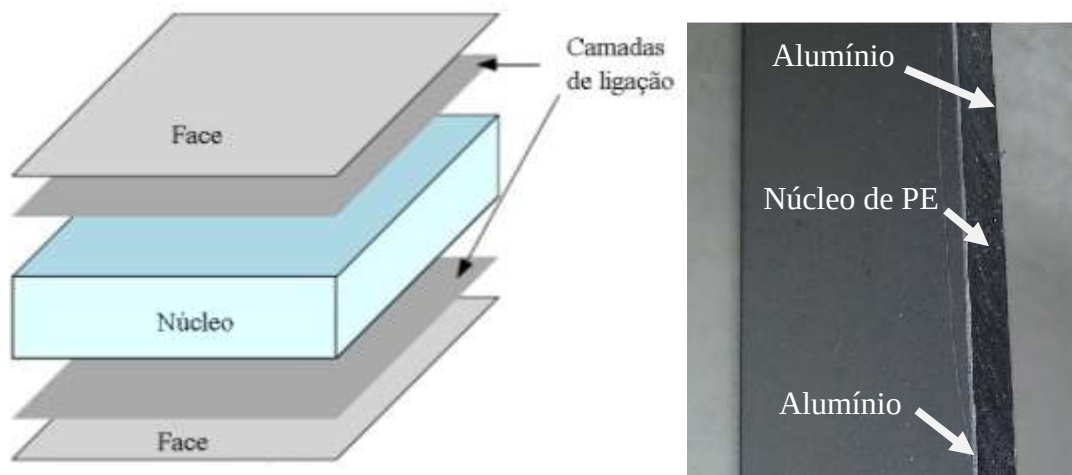


**Figura 1.** Painel sanduíche típico e exemplo de ACM.

Entre os materiais de revestimento mais presentes nas fachadas em edifícios comerciais e industriais em diversas partes do mundo, se encontram os Painéis de Alumínio Composto, conhecidos como Aluminium Composite Material (ACM). Devido principalmente à rapidez na instalação, possibilidade de moldagem, variedade de cores e relativa facilidade na manutenção, o ACM tem sido uma opção de revestimento bastante adotada em fachadas de edifícios comerciais, quer seja em obras novas ou reformas. Os painéis de alumínio composto, conhecidos como ACM são formados por duas chapas de alumínio unidas por um núcleo de material termoplástico extrudado. Os tipos mais utilizados em fachadas no Brasil têm o núcleo em polietileno de baixa densidade (PEBD) (Figura 2). Os painéis para aplicação externa são geralmente protegidos com filme adesivo de PVC ou polietileno resistentes aos raios ultravioleta (GOUVEIA & SPOSTO, 2015)

Como relatado anteriormente, este trabalho propõe desenvolver e caracterizar um compósito tipo sanduíche Laminados de Alumínio reforçado com Borracha (BoRAL e TiRAL) com desempenho mecânico comparável ao ACM, somado ao caráter sustentável por meio da utilização de borracha reciclada, e que possa ter utilização em áreas como construção civil, setor automotivo e naval. Ensaio mecânicos de tração, serão realizados para caracterização.

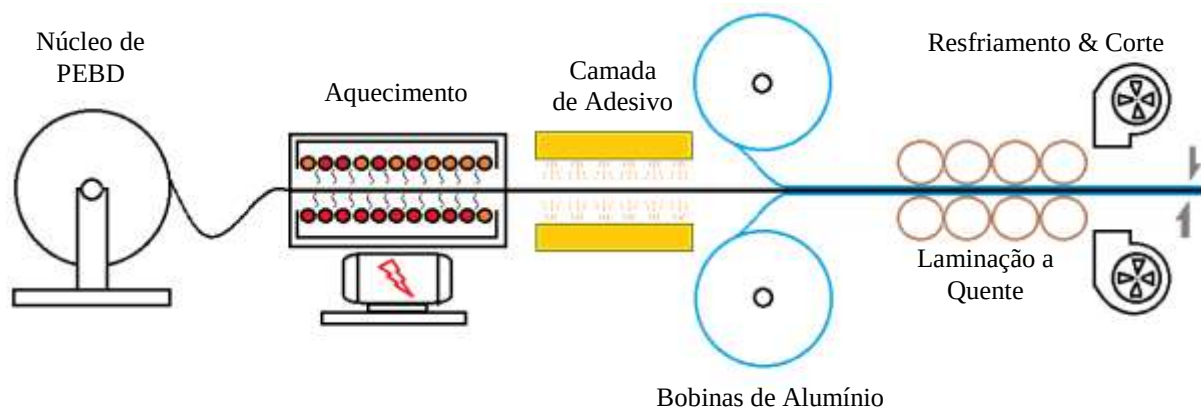


**Figura 2.** Fluxo esquemático para produção de ACM.



**Figura 3.** Compósito Laminado tipo Sanduiche Alumínio-Borracha (BoRAL)

### 3. Materiais e Métodos

O material utilizado para realizar os ensaios comparativos é um compósito laminado tipo sanduíche de polietileno-alumínio PEALL (Polietileno alumínio Laminado) conhecido na indústria brasileira como ACM (Aluminum Composite Materials). Este material consiste em duas (2) fases de alumínio é uma liga de Al Mg 1 H2 (EM AW-5005) e um núcleo de polietileno (PE) de baixa densidade com 0,92 g/cm<sup>3</sup> de densidade totalizando 4 mm de espessura. A Figura 4 apresenta o comportamento do material durante o ensaio de tração e o aspecto da fratura do material.

O BoRAL é constituído por laminas de alumínio com um núcleo de borracha vulcanizadas. Por sua vez, o TiRAL tem no seu núcleo borracha triturada em pequenas partículas que se encontram aglomeradas por meio do mesmo adesivo plástico utilizado para fixar o núcleo as chapas de alumínio. Na Figura 5 podemos observar uma curva de força por deslocamento obtida no teste de tração.

#### **Ensaio mecânico de Tração**

O BoRAL foi testado sobre esforços de tração com sorpos de prova de dimensões de 250mm de comprimento e 25mm de largura de acordo com as recomendações da norma ASTM D3039 (ASTM) para ensaios de tração em compósitos. Uma máquina universal de testes Shimadzu AG-X Plus (célula de carga de 100kN) foi utilizada para os testes mecânicos com

velocidade de 1mm/min em temperatura ambiente de 22°C e humidade do ar de 61%.

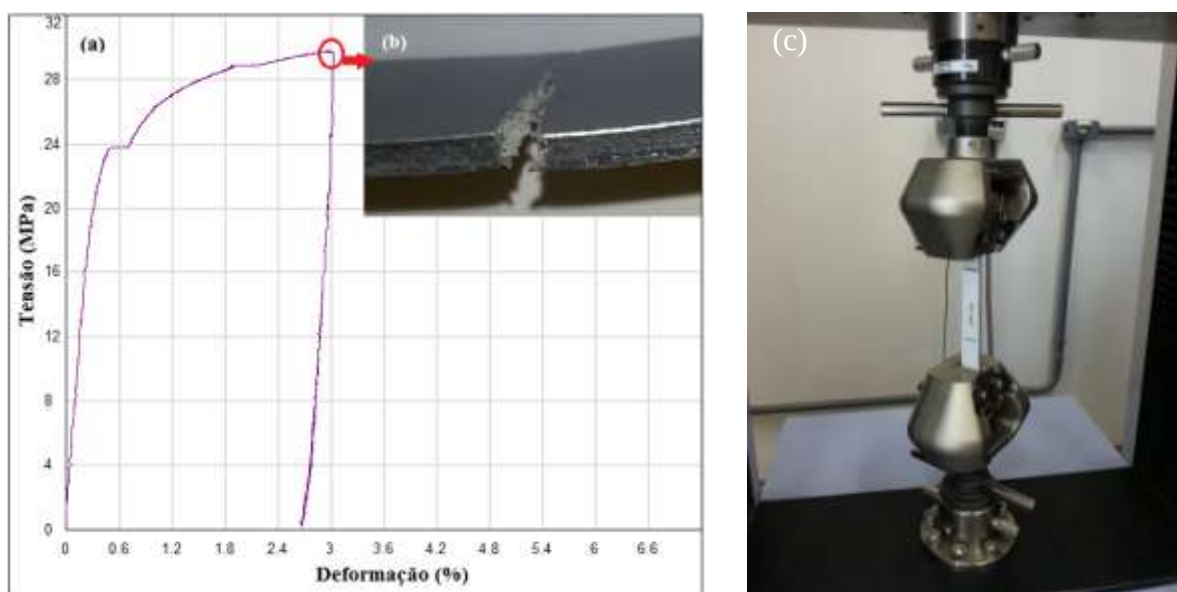


**Figura 4.** (a) Curva típica do comportamento tensão/deformação do ACM, (b) fratura, (c) ensaio de tração do material.

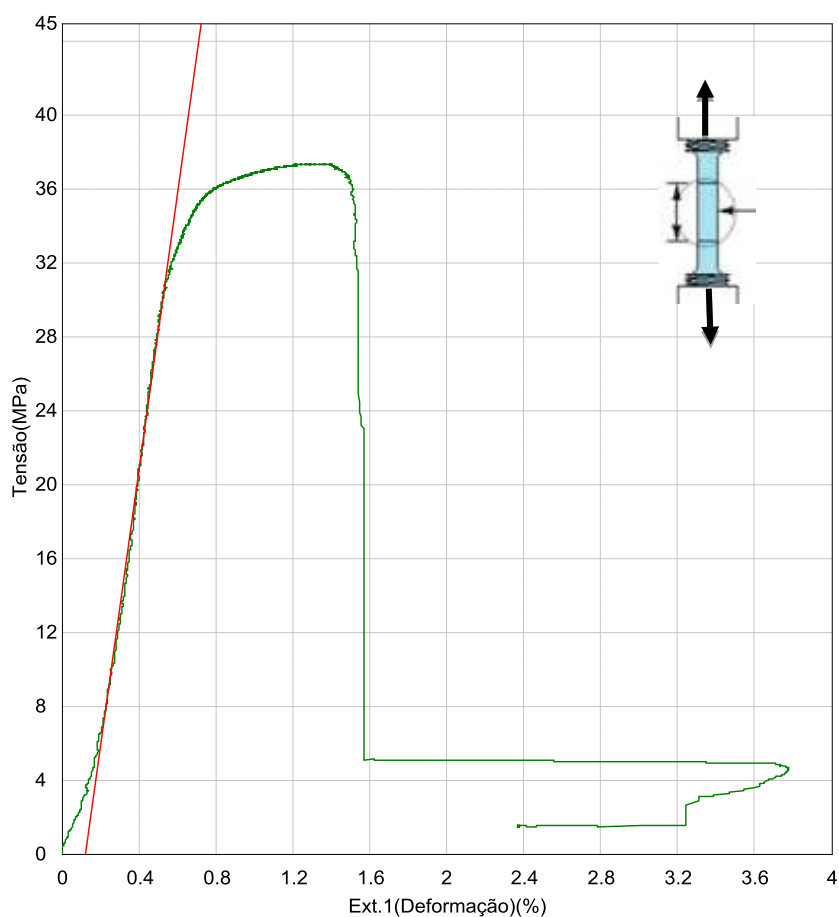


**Figura 5** – Gráfico de Tensão por Deformação para o BoRAL.

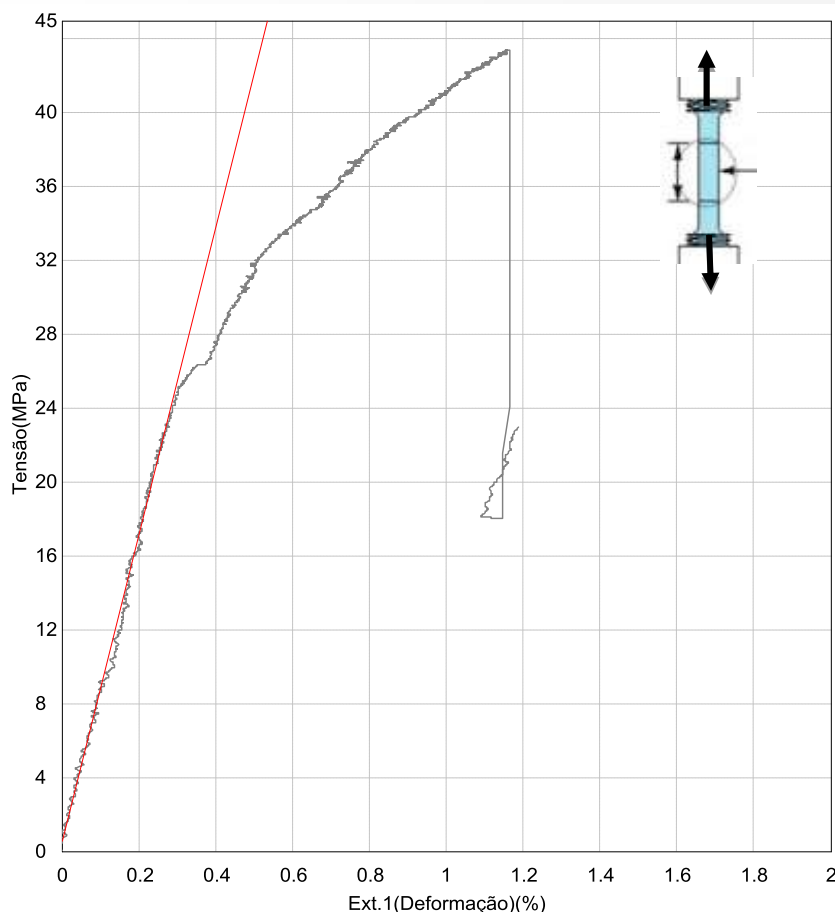


**Figura 6** – Gráfico de Tensão por deformação para o TiRAL.

#### 4. Resultados e Discussões

A Tabela 2 mostra os valores encontrados para os ensaios mecânicos de tração dos três (3) materiais ensaiados, a saber, do compósito sanduíche tipo ACM e dos dois (2) compósitos laminados que utilizam um tipo de borracha reciclada.

Os valores do módulo de elasticidade variaram de 10 GPa a 11,2 GPa obtiveram um média de 10,19 GPa e desvio padrão de 1,34GPa para o BoRAL. Os resultados de resistência a tração variaram de 33 MPa a 37 MPa obtiveram média 35,9 MPa e desvio padrão 1,9 MPa. A maior resistência (aprox. 20%) e módulo de elasticidade pode ser atribuída a maior resistência da borracha vulcanizada quando comparada ao PEBD presente no ACM.

Da mesma forma, foram avaliadas as propriedades mecânicas para o compósito laminado TiRAL. Pelas suas características de maior resistência do núcleo, formado por um compósito particulado de matriz polimérica (adesivo), este material laminado tipo sanduíche apresentou uma resistência a tração substancialmente maior que o BoRAL. Entretanto, o BoRAL apresentou Módulo de Elasticidade superior em virtude da borracha vulcanizada ter propriedades elásticas intrínsecas.

| Material | Modulo de Elasticidade (GPa) | Resistencia a tração (MPa) | Alongamento (%) |
|----------|------------------------------|----------------------------|-----------------|
| ACM      | 6.51±1.28                    | 30.31±1.78                 | 4±1.4           |
| BoRAL    | 10,19 ±1,34                  | 35,9±1,9                   | 3,7±0.8         |
| TiRAL    | 8,14 ±3,34                   | 45,58±1.4                  | 1 ±0.4          |

**Tabela 2** - Propriedades Mecânicas de Tração do ACM tipo ARALL e dos compósitos laminados com borracha reciclada: BoRAL e TiRAL.

#### 4. Considerações Finais

Este trabalho apresentou o desenvolvimento e a caracterização de um compósito tipo sanduiche laminado borracha/metal (LBM) de alto desempenho mecânico e de caráter sustentável que possa ter utilização em áreas como construção civil, setor automotivo e naval.

Neste sentido, estes materiais foram comparados com um material comercial disponível no mercado, a saber, PEALL ou comercialmente denominado de ACM. Os resultados mostram uma melhora substancial das propriedades mecânicas obtidas por meio de ensaios mecânicos. Obtendo valores entre 20% a 50% maiores tanto no Modulo de Elasticidade quanto na resistência à tração, do que o obtido pelo material comercial ACM

#### Referências

- ABAL**, Associação Brasileira de Alumínio. *Reciclagem no Brasil* Acesso: julho 2015. <http://abal.org.br/sustentabilidade/reciclagem/reciclagem-no-brasil/> -
- ANIP**, Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos. *Reciclagem de Pneus*. <http://www.anip.org.br/> - Acesso: julho 2015
- BOTELHO, EC.; SILVA, RA.; PARDINI, LC.; REZENDE, MC.** *A Review on the Development and Properties of Continuous Fiber / epoxy / aluminum Hybrid Composites for Aircraft Structures*. Materials Research, v. 9, n. 3, p. 247–256, 2006.
- CALLISTER, WD.** *Materials Science and Engineering: An Introduction*. 7th ed. New York: John Wiley & Sons, 2007.
- CATRODEZA EM.** *Desenvolvimento e Avaliação de Técnicas Experimentais para o Estudo da Mecânica da Fratura de Laminados Fibra-Metal*, PhD tese, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.
- DI GIULIO, G.** *Vantagens ambientais e econômicas no uso de borracha em asfalto*. Inovação Uniemp [online]. 2007, vol.3, n.3, pp. 12-15. ISSN 1808-2394
- FARIAS, CT.; SILVA, IC.; MOREIRA, R.; MACHADO, JC.; REBELLO, JM.** *Deteção de danos em compósitos laminados fibra-metal utilizando ondas de lamb*. 9a. COTEQ – Conferência Internacional sobre Tecnologia de Equipamentos. Anais... p.1–13, 2007.
- FERREIRA, A.; FARIA, A.; RIBEIRO, A.** *A reciclagem de alumínio e a estimativa de poupança de energia no Brasil*. Revista Eletrônica de Energia, 4 (1), p. 75 -88, jan./dez. 2014 <http://www.revistas.unifacs.br/index.php/ree>
- GOUVEIA GM. & SPOSTO RM.** *Análise energético-ambiental de fachadas com foco na reciclagem - Estudo de caso com painéis de alumínio composto “ACM” em Brasília*. Arquitectos, v 16, paper 181.06, 2015.
- TORNELLI, AF.** *Pneus inservíveis: como retirar do ambiente uns dos passivos ambientais mais preocupantes da atualidade*. Revista Pneus & Cia, v. 6 (40), p. 15- , 2014.

**VLOT A.; GUNNINK JW.** *Fibre Metal Laminates: An Introduction*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 2001.

**VOGELESANG LB.; VLOT A.** *Development of Fibre Metal Laminates for Advanced Aerospace Structures*. Journal of Materials Processing Technology, 103:1-8; 2000.

**WENBERG, D.** *Light-Weighting Methodology in Rail Vehicle Design through Introduction of Load Carrying Sandwich Panels*. Design Department of Aeronautical and Vehicle Engineering, Licentiate Thesis, Royal Institute of Technology (KTH) 2011.