

UTILIZAÇÃO DA FIBRA DE BASALTO EM APLICAÇÕES ESTRUTURAIS – REVISÃO E PROPOSTAS DE APLICAÇÃO

M. H. Lapena (1), G. Marinucci (2), O. de Carvalho (1)

Estr. Iperó-Sorocaba, km 12,5, Iperó-SP, CEP 18560-000,
maurolapena@gmail.com

(1) Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo, (2) Instituto de Pesquisas
Energéticas e Nucleares.

As fibras de basalto (FB) apresentam desenvolvimento mais recente se comparadas às tradicionais fibras utilizadas na fabricação de compósitos poliméricos, tais como fibra de vidro, aramida e carbono. Suas propriedades de resistência e módulo estão situadas entre aquelas oferecidas pelas fibras de vidro-E, e as de vidro-S. Apresentam também maior temperatura de trabalho, boa resistência química e ao impacto, e menor liberação de gases na queima. Além disso, seu baixo preço – pode ser inferior ao da fibra de vidro-E – também justifica o aumento da utilização desta fibra. Por essas razões, as FB estão tendo uso crescente na fabricação de vasos de pressão, cilindros, perfis, peças para automóveis, pás eólicas, em reforço de estruturas de concreto, em aplicações marítimas e diversos outros produtos. O objetivo do presente trabalho é mostrar o estado da arte das FB, baseando-se em estudos de caracterização e comportamento das FB e seus compósitos.

Palavras-chave: fibra de basalto, caracterização, matriz polimérica, aplicações estruturais, estado da arte.

1 INTRODUÇÃO

Materiais compósitos são produzidos para otimizar as propriedades dos materiais, incluindo as mecânicas, químicas e físicas, assim como propriedades térmicas, elétricas, óticas e acústicas ⁽⁶⁾.

O basalto é um mineral de origem vulcânica, escuro ou negro. Suas rochas são pesadas, tenazes e resistentes. Sua densidade é aproximadamente 5% maior que o vidro, É a rocha mais abundante da superfície terrestre e a superfície dos oceanos é predominantemente composta de basalto. A composição do basalto é variável e nem sempre útil para a produção de fibras, devido à presença ou ausência de elementos.

A utilização de fibra de basalto (FB) como reforço em materiais compósitos de matriz polimérica é relativamente nova, quando comparada às populares fibras de vidro (FV) e de carbono. As primeiras tentativas de se produzir FB remetem ao ano de 1923, quando o francês Paul Dhé registrou, nos EUA, a primeira patente de filamentos contínuos de basalto. Após a Segunda Guerra Mundial, desenvolveram-se pesquisas nos EUA, Europa e União Soviética para obter-se fibras extrudadas e estudar as primeiras aplicações nas áreas militar e aeroespacial. Apenas após 1990/92, com a Perestroika, sua tecnologia produtiva passou a ser de domínio público, e assim deu-se início às pesquisas civis ^(2, 7).

A produção de fibras foi, no entanto, apenas desenvolvida nas últimas décadas. A tecnologia atual para se produzir FB é muito semelhante à usada na produção de fibra de vidro-E (FV-E), mas requer menos energia para ser produzida ⁽²²⁾. Este fato, somado à grande disponibilidade de matéria-prima ao redor do mundo, justifica o baixo preço das FB comparado às FV. A principal diferença entre as FB e as FV encontra-se nas matérias-primas utilizadas. A FV é produzida a partir de vários componentes, enquanto que a FB é feita com a fusão da rocha de basalto, sem outros aditivos. Os valores de densidade das FB disponíveis comercialmente variam, em geral, entre 2,7 e 2,8 g/cm³; e seus diâmetros médios entre 9 a 17 µm

(as FV-E têm diâmetro médio de 7 μm). O fato de serem ecologicamente corretas torna a utilização das FB muito atraente ⁽¹⁾. Ao contrário das FV, as FB não requerem aditivos em sua fabricação. A substituição de FV por FB pode reduzir o risco de poluição ambiental com metais e óxidos altamente tóxicos, os quais são gerados na produção das FV ⁽⁶⁾. Ainda, as FB de basalto são uma alternativa às fibras de asbestos, banidas por serem carcinogênicas.

A aplicação das FB é possível em diversas áreas, graças a suas múltiplas boas propriedades. Apresentam excelente resistência à álcalis, propriedades semelhantes às FV, a um custo muito menor que as fibras de carbono e aramídicas. Suas propriedades térmicas as tornam excelentes substitutas de fibras resistentes a altas temperaturas (fibras de carbono), sendo comumente usadas em escudos de calor, em barreiras isolantes térmicas e como proteção ao fogo – sua faixa temperatura de trabalho é de -260°C a 700°C , contra -60°C a 250°C das FV. A resistência à vibrações das FB é muito maior que a das FV, o que as torna adequadas para aplicações sob altas vibração e cargas acústicas, como em construções sob tais condições, na indústria aeronáutica, indústria naval, etc. Devido à alta resistência a água marinha e radiação UV, as FB também encontram aplicações marítimas, como na produção de cascos de embarcações. Por suas boas propriedades de isolamento elétrico (10 vezes maior que o vidro), as FB são usadas em placas de circuitos impressos, e em isolamento extra-fino para cabos elétricos e em dutos subterrâneos.

Além disso, as FB possuem boa resistência a ácidos e solventes, superando as FV-E e muitas outras fibras minerais e sintéticas, embora apresente menor resistência a ácidos que as FV-E. Sua absorção de umidade é menor que 0,2% sob temperatura ambiente e umidade relativa do ar de 65%. Possuem excelente molhabilidade para variados ligantes, revestimentos e matrizes.

O objetivo do presente trabalho é mostrar o estado da arte das FB, principalmente em aplicações estruturais, baseando-se em estudos realizados com as FB e seus compósitos.

2 INTERFACE POLÍMERO-FIBRA

A incorporação de fibras de reforço em matriz polimérica visa o aumento das propriedades mecânicas e, principalmente, da rigidez do polímero ⁽¹⁰⁾. A eficiência do reforço pode ser definida como a capacidade de um compósito em transferir a tensão aplicada ao próprio compósito para as fibras. E esta eficiência depende, entre outros fatores, principalmente da otimização das interações interfaciais polímero-reforço ⁽¹¹⁾. Com isso, diversos trabalhos foram realizados com o objetivo de melhorar-se as características desta interface.

Tempo e umidade ambiente podem afetar de forma considerável o desempenho de peças de polímeros reforçados com fibras, especialmente em aplicações onde cargas mecânicas são suportadas. Este efeito, para compósitos de matriz termoplástica e com fibras longas, é atribuído principalmente à deterioração hidrolítica dos componentes e da interface, assim como ao caráter viscoelástico da matriz que resulta em efeitos de plastificação ⁽⁹⁾.

Jancar 2005 investigou a resistência da interface em compósitos de policarbonato (PC), polipropileno (PP) e PP graftizado com ácido itacônico (PPGAI) (ithaconic acid grafted polypropylene) reforçados com FB (e FB graftizada com oligômero de PC, para a matriz PC). A FB foi utilizada em estado seco e após imersão em água quente. Foi encontrada excelente retenção de propriedades para o compósito de PC/FB pura recozido a 245°C por 10 min e no PC com FB graftizada com oligômero de PC, para imersão de longo período em água quente (100h a 85°C). Resultados semelhantes foram encontrados para o compósito PPGAI/FB pura. Tal resultado é atribuído à formação de uma interfase de PC de alto módulo relativamente impermeável à água e pela formação de ligações químicas estáveis entre as hidroxilas da superfície da FB e os grupos carboxílicos do PPGAI.

Déak et al. (2010) avaliou o efeito da aplicação de agentes silanos de acoplamento aplicados na superfície das FB em compósitos de matriz de nylon 6. Através de análises dinâmico-mecânicas, comprovou-se que a adesão interfacial

entre as FB e a poliamida pode ser largamente ampliada pela adição dos agentes de acoplagem silanos em toda faixa de temperatura de uso do compósito.

Kim et al. (2011) investigou o efeito da modificação de nanotubos de carbono (NTC) com agentes silanos no comportamento de flexão e fratura de compósitos NTC/epóxi/FB. Amostras com NTC que recebeu tratamento ácido e tratamento silano foram confeccionadas. O compósito NTC/epóxi/FB tratado com silano apresentou módulo e resistência à flexão 10% e 14% maiores, respectivamente, do que o compósito NTC/epóxi/FB tratado com ácido, além de uma tenacidade à fratura G_{IC} 40% maior. Inspeção por MEV mostrou que os aumentos nas propriedades de flexão e fratura dos compósitos NTC/epóxi/FB tratados com silano ocorreram devido a melhores dispersão e interação interfacial entre os NTC modificados por silanos e a resina epóxi. Lee et al. (2010), investigando o mesmo compósito, encontrou um aumento de 21 e 17%, do módulo e resistência à tração, respectivamente, para o tratamento silano, em relação ao tratamento ácido, e 60 e 34%, para o tratamento silano, em relação ao NTC sem tratamento. Este último trabalho utilizou métodos de tratamento ácido e silano bastante semelhantes ao anterior.

A modificação e caracterização de FB com tratamentos superficiais (sizing) híbridos foi realizada por Wei et al. (2011). A matriz híbrida epóxi/SiO₂ foi sintetizada por método sol-gel e a macromolécula de resina epóxi foi graftizada com sucesso em nano-partículas de SiO₂. As FB foram modificadas pelo material híbrido sintetizado SiO₂. Confirmou-se a formação da cobertura híbrida na superfície das FB após o tratamento híbrido, havendo grande aumento da rugosidade superficial. A modificação da FB com a cobertura aplicada aumentou a resistência mecânica do filamento de FB. Dentre as concentrações de SiO₂ na coberturas aplicadas nas FB – entre 2,5 e 10% em peso da cobertura – a de 5% foi a qual apresentou melhor desempenho. Para esta concentração, houve aumento da resistência do filamento de 15% e aumento da resistência ao cisalhamento interlaminar (*interlaminar shear strength* – ILSS) do compósito de FB de 10%. Finalmente, foi percebido a formação de uma fase interfacial na cobertura híbrida da superfície da FB – originado do recobrimento híbrido – durante o processo de moldagem do compósito, o que pode oferecer melhor desempenho, especialmente quanto à resistência ao impacto.

3 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS DE BASALTO (PRFB)

A grande semelhança entre as FV-E e FB faz com que as investigações das propriedades mecânicas dos polímeros reforçados com fibras de basalto (PRFB) visem principalmente a substituição das FV-E pelas FB. Estas apresentam uma série de vantagens sobre as FV-E, largamente utilizadas como reforço em matrizes poliméricas. PRFB exibem maior resistência mecânica e módulo de elasticidade, além de um custo semelhante, maior estabilidade química e maior faixa de temperatura de aplicação ^(1, 8).

Ensaio mecânicos foram realizados por Lopresto et al. (2011) para comparar-se o comportamento de laminados epóxi/FB e epóxi/FV-E. O compósito de FB apresentou maior módulo de elasticidade (entre 35 e 42%), assim como maiores resistência à compressão e à flexão, e uma maior resistência à tração foi encontrada para o compósito de FV-E. A rigidez aparentou não ser influenciada pelo tipo de ensaio (tração, flexão e compressão), uma vez que o módulo de elasticidade não variou significativamente entre os diferentes tipos de ensaios. A energia de impacto por queda de dardo (configurado para penetração total da amostra e energia de 100J) registrada neste ensaio revelou leve diferença de valores entre os dois compósitos, justificando-se pela diferença entre as frações volumétricas de fibra (51% de FB e 46% de FV-E) dos laminados. Mecanismos de fratura diferentes foram encontrados para os ensaios de flexão: compressivo para FV e de tração para FB, o que explica o valor bem menor de resistência à flexão para a FV-E. O ensaio de resistência para viga curta evidenciou uma adesão interfacial entre a FB e o epóxi muito próxima da adesão entre FV e o epóxi.

Propriedades de flexão e elétricas dos compósitos de FB e FV-E (ambos em forma de tecido) com matriz viniléster foram investigados por Carmisciano et al. (2011). Os tecidos possuíam o mesmo padrão de tecelagem e os laminados apresentavam a mesma fração volumétrica de fibra. Os resultados de propriedades sob flexão apresentados são bem semelhantes aos encontrados no trabalho de Lopresto et al. (2011), onde ao invés de poliéster, utilizou-se epóxi como matriz – o

compósito de FB apresentou maiores módulo de elasticidade e resistência ao cisalhamento interlaminar (ILSS) do que o de FV-E, mas menor resistência à flexão. Nos ensaios elétricos, mediu-se a dependência da constante dielétrica e da condutividade AC, com a frequência (variando de 10^4 a 10^6 Hz), para ambos compósitos, encontrando-se propriedades elétricas semelhantes.

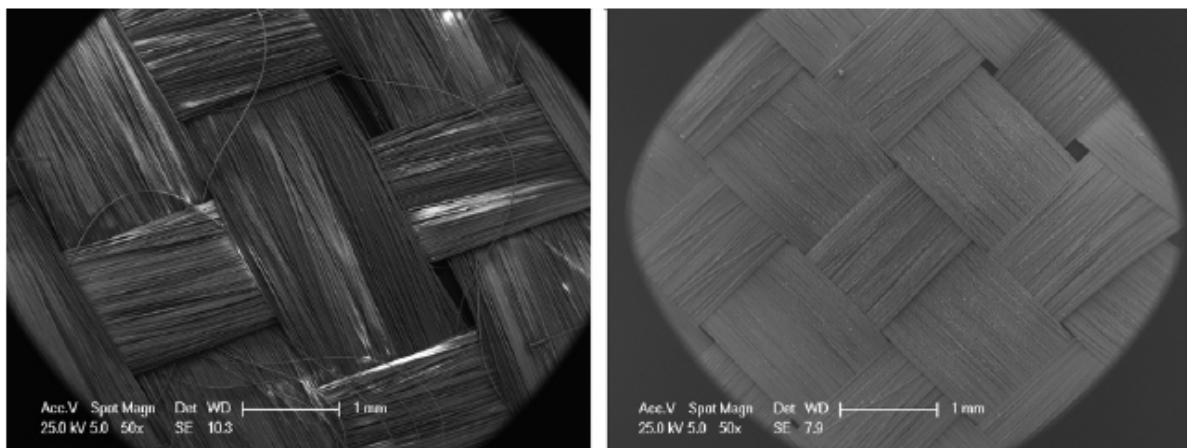


Figura 1: imagens de MEV do tecido de FV-E (esquerda) e FB (direita) (Carmasciano, 2011).

A comparação entre compósitos de FB com matrizes epóxi (FBME) e viniléster (FBMV) foi realizada por Colombo et al. 2012. Ensaio mecânicos estáticos e de fadiga foram realizados para os dois compósitos. Os compósitos FBME apresentaram propriedades mecânicas melhores que os FBMV, em ambos os comportamentos de tensão e compressão, além de o modo de fratura ser compacto, uma vez que as fibras não tendem a explodir. Sobre os ensaios de fadiga, há uma tendência semelhante nas curvas de fadiga das amostras de FBME e FBMV. A Fig. 2 mostra a curva para a regressão linear feita com todos os dados experimentais de fadiga coletados. O baixo valor do parâmetro R^2 (0,92) da regressão linear revelou uma dispersão bem pequena dos valores em relação a tal curva. Ainda nesta figura, foram incluídas curvas de dois compósitos muito difundidos atualmente, o reforçado com fibra de vidro (FV) e com fibra de carbono (FC). Observa-se que a inclinação para o compósito de FB é 60% menor que para o de FC e 20% que para o de FV.

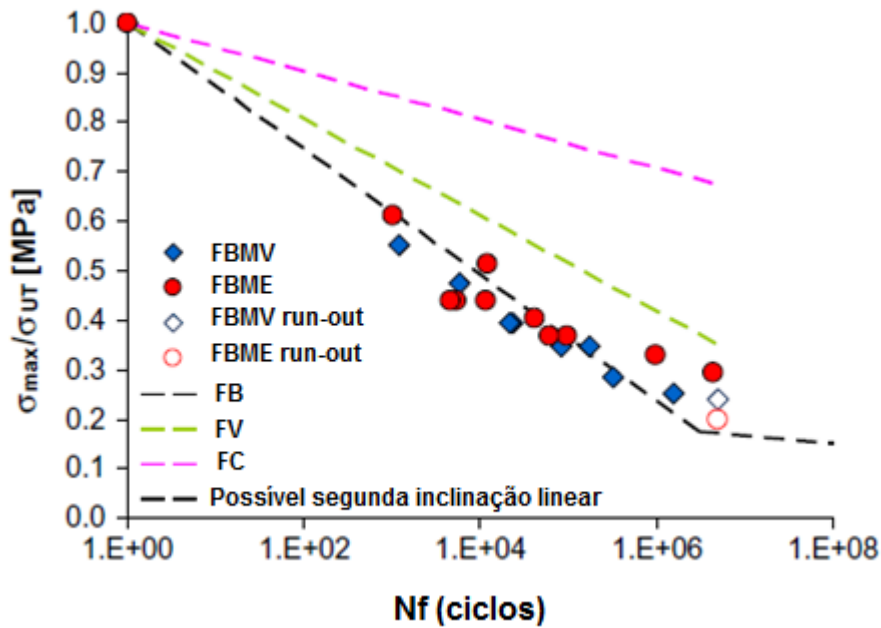


Figura 2: diagrama de $\sigma - N_f$ para compósitos de FB (Colombo, 2012).

Parnas et al. (2007) investigou PRFB aplicando uma série de ensaios mecânicos, inclusive ensaios sob condições de envelhecimento, para avaliar a aplicabilidade dos PRFB no setor de transportes. Os ensaios foram realizados usando-se amostras com a mesma matriz polimérica (epóxi) para permitir uma comparação direta entre os dois reforços (FB e FV-E). Os tecidos de fibras usados na confecção das amostras foram submetidos a tratamento térmico prévio para a remoção das coberturas superficiais – aplicadas pelos fabricantes para promover a interação interfacial matriz-fibra – de modo a obter a mais direta comparação entre os reforços de FB e FV-E. O resultado mais notável foi encontrado no ensaio de fadiga tração-tração, onde o compósito FB/epóxi apresentou resistência à fadiga significativamente maior que o compósito FV/epóxi. Ainda, foi verificado que as amostras fabricadas por deposição manual dos filamentos apresentaram resistência à fadiga maior que as fabricadas por RTM (*resin transfer molding*). Sobre o comportamento após condições de envelhecimento, as zonas interfaciais do compósito FB/epóxi mostraram-se mais sensíveis às condições de envelhecimento do que do compósito FV/epóxi – contrapondo-se ao melhor desempenho em fadiga encontrado para este compósito – o que requer atenção especial em aplicações do compósito. Comportamento semelhante da interface FB/epóxi foi verificado por Liu et al. (2006).

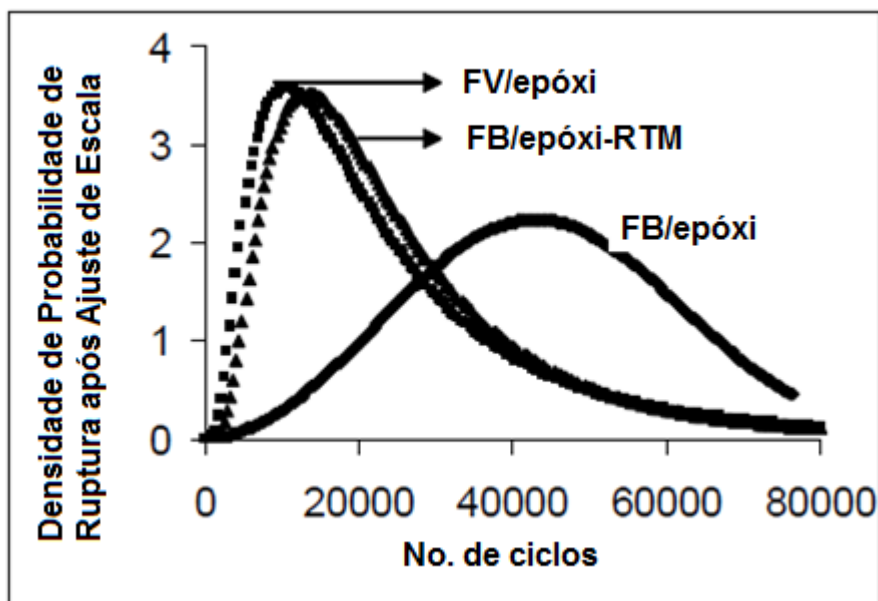


Figura 3: Comparação da vida em fadiga quando a tensão máxima é 50% da tensão de ruptura (Parnas, 2007).

A durabilidade química de PRFB com matriz epóxi foram investigadas por Wang et al. (2008). Primeiramente, as FB sozinhas foram submetidas à ebulição por 3h em água destilada, solução de hidróxido de sódio a 2 mol/L e solução de ácido clorídrico a 2 mol/L. Verificou-se que a diminuição da massa da FB é mais severa na solução ácida do que na básica, provando que a FB apresentam maior resistência em meios alcalinos – a Fig. 4 mostra as propriedades do PRFB versus o tempo de imersão. As amostras do PRFB foram confeccionadas com FB unidirecionais; além de amostras reforçadas com fibra de vidro S-2 (PRFV S-2), a fim de comparação. Estas foram imersas em oito diferentes tipos de soluções a temperatura ambiente. Após determinados períodos de imersão, realizou-se ensaios de flexão. Em meios alcalinos, o módulo de flexão permanece constante e a resistência à flexão decai, enquanto que em meios ácidos, o módulo e a resistência decaem. Apesar de os valores de desempenho mecânico do PRFB serem menores que o de PRFV S-2, a resistência ao cisalhamento interlaminar (ILSS) do PRFB é maior que a do PRFV S-2; com isso, conclui-se que no PRFB foi obtida uma melhor interface entre a FB e a resina epóxi, em comparação à interface da FV e resina epóxi.

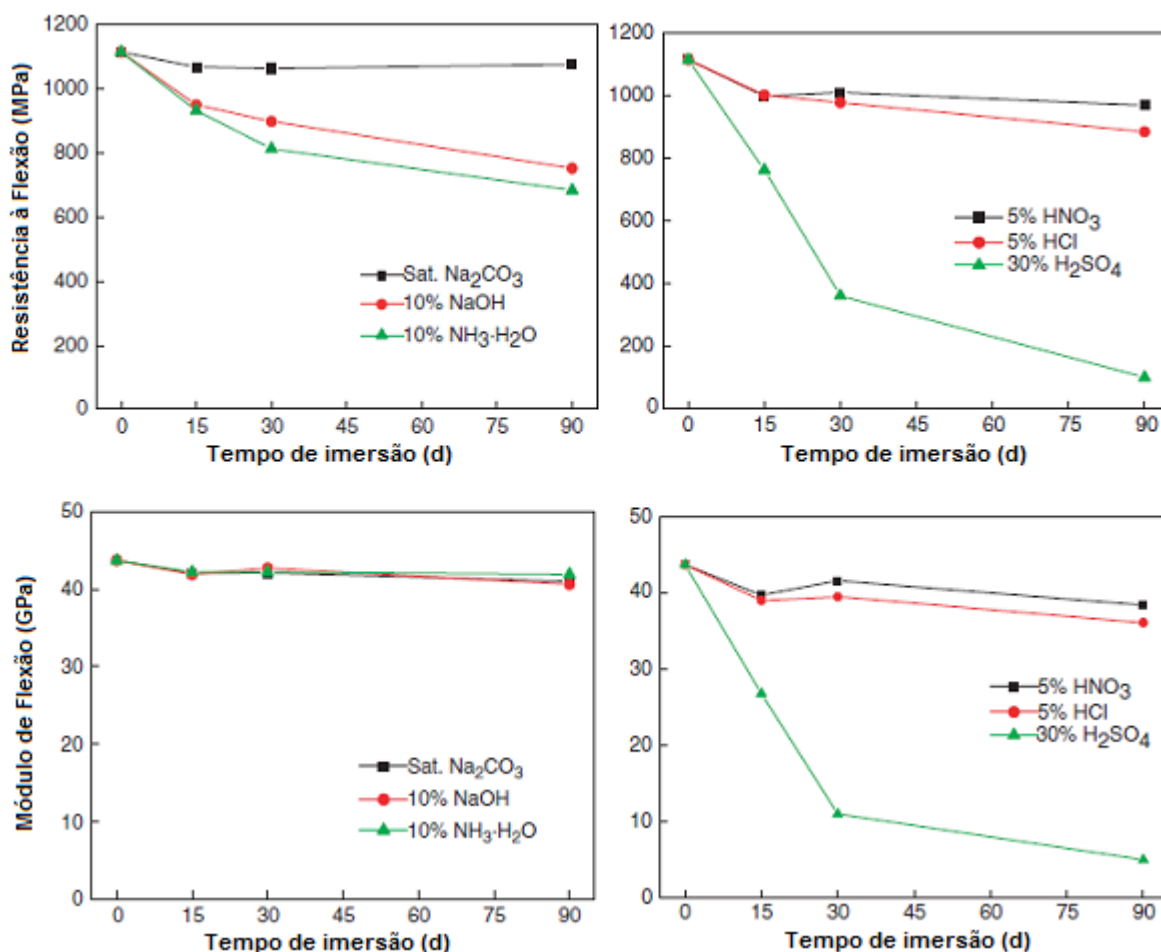


Figura 4: Propriedades do PRFB após imerso em soluções alcalinas (à esquerda): resistência e módulo de flexão; e imerso em soluções ácidas (à direita): resistência e módulo de flexão (Wang, 2008).

A fim de investigar-se a fabricação de cilindros de armazenamento de gás natural, a fabricante de FB Kamenny Vek^(20, 21) realizou uma série de ensaios, com o objetivo de comparar-se as propriedades mecânicas de cilindros de compósito de matriz epóxi reforçado com FB, FV e fibra de carbono, usando-se o processo de bobinagem filamentar. Amostras unidirecionais cilíndricas do compósito epóxi/FB foram produzidas com 65% de volume de FB. O compósito epóxi/FB apresentou resistência à tração e módulo de elasticidade de pelo menos 13% e 35%, respectivamente, maiores que o epóxi/FV-E. Além disso, seria possível fabricar cilindros de epóxi/FB com a mesma resistência à tração com peso 15% menor que o epóxi/FV-E e custo estimado em 5% menor.

Uma nova tecnologia para polímeros reforçados com FB manufaturadas com preenchimento por policondensação foi estudada por Artemenko et al. (2003). A tecnologia é baseada na incorporação de um mistura de monômeros – fenol com formaldeído e catalizador NaOH – nos poros dentro e na superfície das fibras. Amostras de compósito com uma razão em peso de 50% por 50% de fibra e polímero termofixo de fenol-formaldeído. Foram confeccionadas amostras com FB, fibra de vidro (FV) e fibra de carbono (FC). Encontrou-se diminuição da absorção de água das amostras com fibras manufaturadas com a nova tecnologia, em relação à tradicional (impregnação de resina na fibra) de 40, 37 e 30%, respectivamente. Houve aumento da dureza de 12 % para as FB e FV, e de 6% para FC, e aumento de resistência ao cisalhamento à flexão. Num segundo momento, realizou-se adição de modificantes laprol, caprolactama e polivinilbutiral na confecção de amostras reforçadas com FB e manufaturadas com a nova tecnologia. Os valores de dureza encontrados foram bem próximos, aproximadamente 5% maiores, assim como os valores de resistência ao cisalhamento e à flexão, 15 e 10% maiores, respectivamente.

Em aplicações estruturais de compósitos, há geralmente a necessidade de suficiente resistência ao impacto. Propriedades de resistência ao impacto de baixa velocidade são importantes em vários tipos de aplicações. Este tipo de carregamento pode ocorrer quando ferramentas são derrubadas na superfície do compósito, ou quando o material é atingido por detritos, fragmentos ou projéteis. Rosa et al. (2012) realizou a caracterização mecânica pós-impacto de dois tipos de compósitos de matriz vinilester: um reforçado com tecido de FB, e outro reforçado com tecido de FV-E. Primeiramente, corpos de prova não submetidos ao ensaio de impacto foram submetidos aos ensaios de resistência ao cisalhamento interlaminar (ILSS) e de flexão. Após isso, realizaram-se ensaios de flexão nos laminados previamente impactados por uma torre de queda de peso sob três energias de impacto (7,5, 15 e 22,5J). Foi percebido que ambos materiais possuem tolerância ao impacto semelhantes, e as propriedades residuais pós-impacto não são muito diferentes, com ligeira superioridade dos laminados reforçados com FB. No geral, a máxima energia de impacto aplicada (22,5 J) não resulta na degradação da resistência à flexão e do módulo, que não excedem 15%. A principal diferença

encontra-se na extensa área de delaminação nos laminados reforçados com FV-E, enquanto o dano se encontra mais concentrado nos laminados reforçados com FB.

Dependendo do padrão geométrico do arranjo das fibras, compósitos híbridos são classificados como intercamadas (interply) ou intracamadas (intraply). Nos compósitos híbridos intercamadas, duas ou mais camadas de compósito homogêneo são empilhadas, enquanto que em compósitos híbridos intracamadas, dois ou mais componentes de fibras são misturados em uma mesma camada. Compósitos intercamadas têm sido investigados por muitos pesquisadores, ao contrário dos intracamadas.

As propriedades de impacto de PRFB híbridos constituídos de tecidos intracamadas de FB / fibra de nylon foram investigados experimentalmente por Dehkordi et al. (2010). A matriz polimérica utilizada foi epóxi, e o motivo dos materiais escolhidos para o híbrido foi as boas propriedades mecânicas da FB e a excelente resistência ao impacto das fibras de nylon. Foram utilizados cinco diferentes frações volumétricas de fibra de nylon (0%, 25%, 33.3%, 50% e 100%). Baixos valores nominais de energia de impacto foram utilizados (16, 30 e 40 J). Foi verificado que a razão FB/nylon tem efeitos significativos no comportamento de impacto de compósitos híbridos intracamadas reforçados com essas fibras. Para energia de impacto de 16 J, a quantidade de energia elástica e de energia total absorvida foi quase constante e independente da composição FB/nylon. Para energias de 30 e 40 J, o compósito híbrido tem maior energia elástica do que o homogêneo. Inspeções visuais e o método ultrassônico C-scan das amostras danificadas por impacto revelaram que a razão FB/nylon alteram o tipo e o tamanho do dano. Aumentando-se a razão nylon/FB, o modo de fratura é mudado, de quebra das fibras para delaminação estendida.

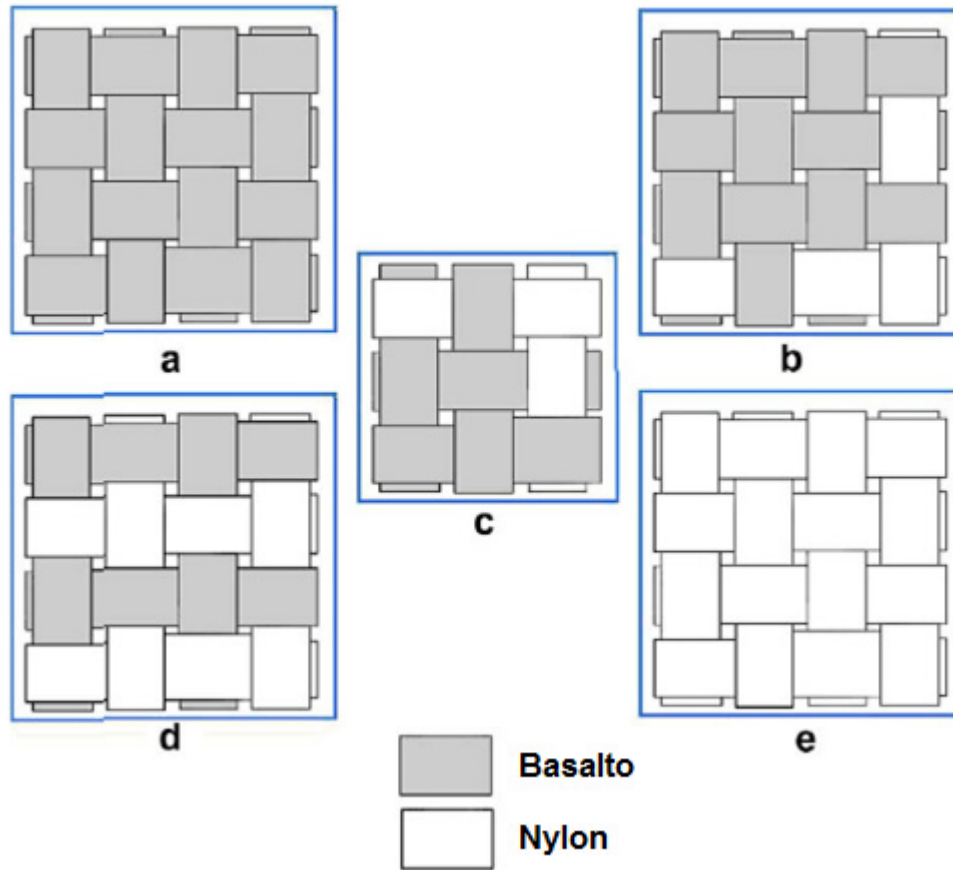


Figura 5: estrutura dos tecidos com diferentes quantidades de fibras de basalto e nylon: (a) 100B, (b) 75B25N, (c) 66B33N, (d) 50B50N, (e) 100N (Dehkordi, 2010).

Ultimamente, tem sido provado que compósitos de tecidos 3D possuem propriedades mecânicas e físicas únicas quando comparados com os 2D. Wang et al. (2008) investigou as propriedades de impacto de baixa velocidade do compósito híbrido de tecido de FB/ fibra aramídica. O compósito foi projetado e fabricado com fração volumétrica de fibra e dimensões semelhantes, chamados de compósito híbrido intercamada e intracamada. Ensaio de impacto de baixa velocidade foram realizados. O compósito híbrido intercamada apresentou maiores índices de ductilidade, menor pico de carga, e maior absorção específica de energia em ambas as direções do urdume e da trama da teia (warp and weft), em comparação ao compósito intracamada. Análises fotográficas post mortem indicaram que o compósito híbrido intercamadas sofreu fratura do modo camada-por-camada, levando a muito maior absorção de energia, enquanto que o intracamadas apresentou modo frágil, resultando em absorção de energia significativamente

menor.

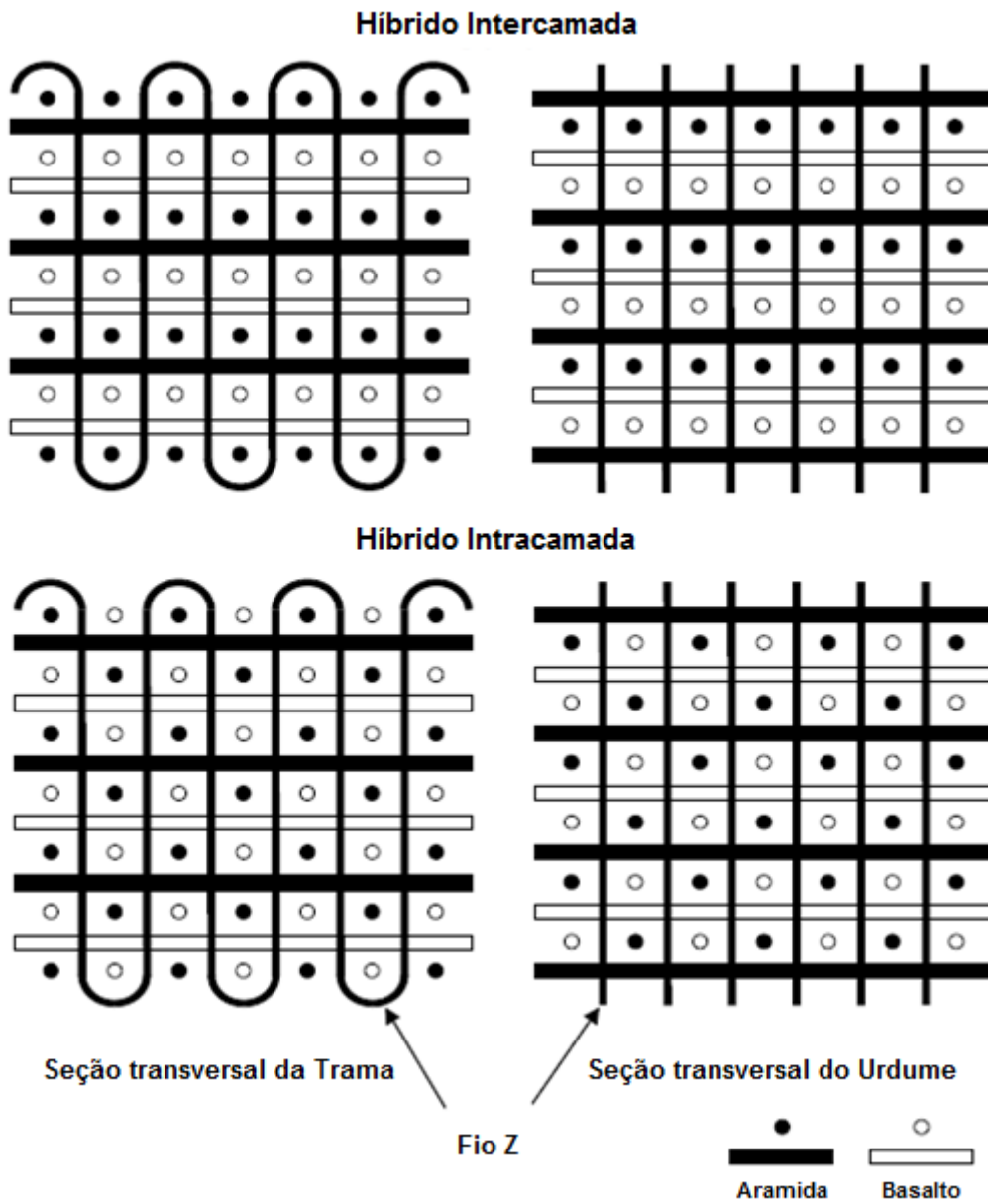


Figura 6: esquema dos dois tipos de compósitos híbridos: interlaminar e intralaminar (Wang, 2008).

4 CONCLUSÕES

As últimas pesquisas sobre as recentes FB têm permitido expandir suas possíveis aplicações, na medida em que há maior conhecimento sobre suas propriedades. Percebe-se que existe grande semelhança entre as propriedades das FB e das FV. Haja vista que muitos dos estudos envolvendo as FB utilizam também FV com os mesmos procedimentos experimentais, a fim de comparação de resultados. Os trabalhos relacionados nesta revisão permitem observar que, geralmente, o PRFB de matriz epóxi, em relação ao PRFV, possui propriedades elétricas, de impacto e adesão interfacial semelhantes; módulo maior, resistência menor e pior comportamento sob fadiga. Com isso, sugere-se a aplicação das FB nas diversas áreas onde as FV já estão bem estabelecidas. Principalmente em casos onde haja maior exigência de propriedades que a FB tem vantagem sobre a FV (maior resistência a álcalis, maior faixa de temperatura de trabalho).

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. LOPRESTO, V.; LEONE, C.; DE IORIO, I. **Mechanical characterisation of basalt fibre reinforced plastic**. Composites: Part B v.42, p.717-723, 2011.
2. COLOMBO, C.; VERGANI, L.; BURMAN, M. **Static and fatigue characterisation of new basalt fibre reinforced composites**. Composite Structures, v.94, p. 1165-1174, 2012.
3. SWINK, M. **Continuous Filament Basalt – A Unique Fiber Capable of Leadership in High Temperature Applications**. Techtextil North America Symposium. Atlanta, abril de 2002.
4. ROSS, A. **Basalt Fibers: Alternative To Glass? Composites Technology**. Agosto de 2007.

5. CZIGÁNY, T. **Trends in fiber reinforcements – the future belongs to basalt fiber.** Express Polymer Letters v.1, No.2, 2007.
6. PARNAS, R.; SHAW, M.; LIU, Q. **Basalt Fiber Reinforced Polymer Composites.** The New England Transportation Consortium, 2007.
7. <http://www.basaltnet.it/>
8. WU, Z.; WANG, X.; WU, G. Basalt FRP composite as reinforcements in infrastructure. **17th annual international conference on composites nano engineering (ICCE-17)**, 2009.
9. JANCAR, J. **Effect of interfacial shear strength on the mechanical response of polycarbonate and PP reinforced with basalt fibers.** Composite Interfaces, v.13, nº.8-9, p.853-864, 2006.
10. FELTAN, M. B. **Compósitos de PVC reforçados com fibra de vidro: uso de técnicas de processamento convencionais da indústria brasileira.** Dissertação de mestrado, São Paulo, p.39, 2008.
11. LOPES, P. E.; SOUSA, J. A. Modificação nas Características da Interface/Interfase em Compósitos de Polipropileno/Fibras de Vidro com Compatibilizante PP-g-MAH e sua Influência nas Propriedades Mecânicas. **Polímeros**, v.9, nº.4, São Carlos, 1999.
12. DÉAK, T.; CZIGÁNY, T.; TAMÁS, P.; NÉMETH, CS. **Enhancement of interfacial properties of basalt fiberreinforced nylon 6 matrix composites with silane coupling agents.** Express Polymer Letters v.4, nº.10, p.590-598, 2010.
13. KAMENNY VEK – PUBLICAÇÃO DE ESTUDO. **Advanced basalt fibers for high-performance filament windings.** 2012.

<http://www.basfiber.com/publikations>

14. PAVLOVSKI, D.; MISLAVSKY, B.; ANTONOV, A. **CNG cylinder manufacturers test basalt fibre**. Reinforced Plastics, abril de 2007.

15. FAZIO, P. **Basalt fibra: from earth an ancient material for innovative and modern application**. Energia, Ambiente e Innovazione, 3/2011.

16. MILITKÝ, J.; KOVAČIČ, V.; BAJŽÍK, V. **Mechanical Properties of Basalt Filaments**. Fibres & Textiles in Eastern Europe, v.15, n°.5 - 6 (64 – 65), Jan/Dez 2007.

17. WEI, B.; CAO, H.; SONG, S. **Tensile behavior contrast of basalt and glass fibers after chemical treatment**. Materials and Design v.31, p.4244-4250, 2010.

18. CALLISTER JR., W. D. **Fundamentals of materials science and engineering**. John Wiley & Sons, Inc. Fifth Edition, 2001.

19. WEI, B.; CAO, H.; SONG, S. **Surface modification and characterization of basalt fibers with hybrid sizings**. Composites: Part A, v.42, p.22-29, 2011.

20. WEI, B.; CAO, H.; SONG, S. **Degradation of basalt fibre and glass fibre/epoxy resin composites in seawater**. Corrosion Science, v.53, p.426-431, 2011.

21. WEI, B.; CAO, H.; SONG, S. **Strengthening of basalt fibers with nano-SiO₂-epoxy composite coating**. Materials and Design, v.32, p.4180-4186, 2011.

22. CHAWLA, K., K. **Ceramic Matrix Composites**. Springer, 2003.

23. KIM, M. T.; RHEE, K. Y.; PARK, S. J.; HUI, D. **Effects of silane-modified carbon**

nanotubes on flexural and fracture behaviors of carbon nanotube-modified epoxy/basalt composites. *Composites Part B: Engineering*, v.43, Issue 5, p.2298-2302, July 2012.

24. ABRATE, S.; **Impact on composite structures.** Cambridge University Press, 1998.

25. WANG, X.; HU, B.; FENG, Y.; LIANG, F.; MO, J.; XIONG, J.; QIU, Y. Low velocity impact properties of 3D woven basalt/aramid hybrid composites. **Composites Science and Technology**, v.68, p.444–450, 2008.

26. DEHKORDI, M. T.; NOSRATY, H.; SHOKRIEH, M. M.; MINAK, G.; GHELLI, D. Low velocity impact properties of intra-ply hybrid composites based on basalt and nylon woven fabrics. **Materials and Design**, v.31, p.3835–3844, 2010.

27. DE ROSA, I. M.; MARRA, F.; PULCI, G.; SANTULLI, C.; SARASINI, F.; TIRILLÒ, J.; VALENTE, M. Post-impact mechanical characterisation of glass and basalt woven fabric laminates. **Applied Composite Materials**, v.19, p.475-490, 2012.

28. ARTEMENKO, S. E. Polymer composite materials made from carbon, basalt and glass fibres. Structure and properties. **Fibre Chemistry**, v.35, nº.3, 2003.

29. LIU, Q.; SHAW, M.; PARNAS, R.; MCDONNELL, A. M. Investigation of Basalt Fiber Composite Aging Behavior for Applications in Transportation. **Polymer Composites**, v.27, p.41-48, 2006.

30. LEE, J. H.; RHEEB, K. Y.; PARK, S. J. The tensile and thermal properties of modified CNT-reinforced basalt/epoxy composites. **Materials Science and Engineering**. A 527, p.6838–6843.

USE OF BASALT FIBER IN STRUCTURAL APPLICATIONS – REVIEW AND APPLICATION PROPOSALS

ABSTRACT

Basalt fibers (BF) present more recent development compared to traditional fibers used in the manufacture of polymer composites, such as fiberglass, aramid and carbon. Their properties of strength and modulus are located between those offered by E-glass and S-glass fibers. Also show higher working temperature, good chemical and impact resistance, and low outgassing in burning. In addition, their low price – may be lower than that of E-glass fibers – also justifies the increasing use of this fiber. For these reasons, the BF are increasingly used in the manufacture of pressure vessels, cylinders, profiles, auto parts, wind blades, in reinforcement of concrete structures, in marine applications and many other products. The goal of this work is to show the BF state of the art, based on studies of characterization and behavior of BF and their composites.

Keywords: basalt fiber, characterization, polymer matrix, structural applications, state of art.