



2º CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO & GÁS

FRATURA DE MATERIAIS COMPÓSITOS UTILIZADOS NO REPARO DE DUTOS

José Maurício Rodrigues Touça¹, Fernando Luiz Bastian²

¹ Laboratório de Materiais Compósitos, PEMM/COPPE/UFRJ, Av. Brigadeiro Trompovski, s/n, Cidade Universitária, Ilha do Fundão, Caixa Postal: 68505, CEP: 21941-972, Rio de Janeiro, ze@metalmat.ufrj.edu.br

² Laboratório de Materiais Compósitos, PEMM/COPPE/UFRJ, Av. Brigadeiro Trompovski, s/n, Cidade Universitária, Ilha do Fundão, Caixa Postal: 68505, CEP: 21941-972, Rio de Janeiro, fbastian@metalmat.ufrj.edu.br

Resumo – Recentemente estudos têm sido feitos para o desenvolvimento de materiais compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras de vidro utilizados no reparo de dutos contendo defeitos. Entretanto, praticamente pouco tem sido feito para caracterizar a resistência à fratura desses compósitos. As informações sobre o comportamento em fratura desses materiais são de grande interesse científico, uma vez que não há muitos estudos sobre a influência dos arranjos e frações volumétricas de fibras na resistência à fratura dos mesmos, dificultando, inclusive, o projeto de sistemas compósitos para estes reparos. O objetivo deste trabalho é, então, fazer um estudo do comportamento em fratura de quatro tipos de materiais compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras de vidro, aplicados em reparos de dutos, utilizando a metodologia da mecânica da fratura, visando caracterizar a resistência à fratura desses compósitos com diferentes arranjos e frações volumétricas de fibras de vidro. Ensaio preliminares de tração foram realizados utilizando a norma de ensaios ASTM D-3039, obtendo-se as propriedades mecânicas em carregamento monotônico e gráficos característicos do comportamento tensão *versus* deformação desses materiais. Com a finalidade de caracterizar a fratura dos mesmos, foram realizados ensaios de tenacidade à fratura utilizando a norma de ensaios ASTM E-1922.

Palavras-Chave: tenacidade à fratura; compósitos; reparo de dutos

Abstract – Recently researches have been made for the development of glass fiber reinforced polymer matrix composite materials used in damaged pipelines repair. Otherwise, little have been done to characterize the fracture resistance of these materials. Informations about fracture behaviour of these materials are of great scientific interest as there are not much studies about the influence of the layout and volume fraction of fibers on the fracture resistance of them, making difficult the project of composite systems for the repairs. The aim of this work is to study the fracture behaviour of four types of glass fiber reinforced composite materials for pipeline repair using the fracture mechanics methodology to characterize the fracture resistance of these materials with different layout and volume fraction of glass fibers. Preliminary tensile tests have been made using the ASTM D-3039 standard obtaining the monotonic mechanical properties and stress-strain characteristic graphics of these materials. In order to obtain fracture characteristics of these composites fracture toughness tests have been done according to the ASTM E-1922 standard.

Keywords: fracture toughness, composites, pipelines repair

1. Introdução

Com o passar do tempo, torna-se quase inevitável a perda de espessura causada por corrosão em dutos de aço usados no transporte terrestre de petróleo e seus derivados. A corrosão externa é em geral decorrente de falhas na proteção catódica ou de danos no revestimento de proteção. Por sua vez, a corrosão interna é uma consequência da presença de umidade ou água no produto transportado. Para grandes empresas do setor petrolífero, o domínio de tecnologia de reparo de dutos corroídos é de grande importância para a redução de custos no transporte de hidrocarbonetos (Hassui 1999). Por isso, algumas técnicas para reparo de dutos foram propostas ao longo dos anos, dentre elas podemos citar: a técnica de corte e substituição, que é mais indicada na recuperação de segmentos de duto com corrosão severa ou que perderam sua estanqueidade e que consiste em trocar o trecho corroído por um segmento de duto novo; a técnica de dupla calha soldada que consiste em envolver o duto com duas meias-calhas cuja fixação ao duto é feita por meio de soldas longitudinais de modo a não deixar nenhum espaço anular; a técnica de dupla calha com enchimento que consiste em envolver o trecho corroído com uma luva de diâmetro bem maior que o diâmetro externo do duto, de forma que fique um espaço anular entre o duto e a calha onde se faz a injeção sob pressão de epóxi ou outro material similar.

As técnicas convencionais de reparo de dutos corroídos citadas anteriormente apresentam algumas desvantagens. O corte e substituição é uma técnica de reparo de custo elevado, principalmente porque implica em parada operacional. A técnica de dupla calha com soldagem direta apresenta risco de acidentes e a técnica de dupla calha com enchimento não é suficientemente rápida, uma vez que exige a construção de um molde com dimensões precisas. Além disso, duas dificuldades independem da técnica utilizada: o difícil acesso a um trecho situado em um local ermo e a remoção do solo retirado pela escavação. Por isso é de suma importância a aplicação de técnicas de reparo que associem eficiência a baixos custos.

O avanço tecnológico proporcionou o desenvolvimento de novos materiais como os compósitos que são formados pela combinação de dois ou mais materiais dissimilares cujas propriedades finais são superiores às dos materiais constituintes isolados (Chawla 1998).

Os materiais compósitos utilizados no reparo de dutos geralmente são constituídos de fibras agregadas e uma matriz polimérica. Recentemente estudos têm sido feitos para o desenvolvimento de materiais compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras de vidro para serem utilizados no reparo de dutos contendo defeitos. Entretanto, praticamente pouco tem sido feito para caracterizar a resistência à fratura desses compósitos. As informações sobre o comportamento em fratura desses materiais são de grande interesse científico, uma vez que não há muitos estudos sobre a influência dos arranjos e frações volumétricas de fibras na resistência à fratura dos mesmos, dificultando, inclusive, o projeto de sistemas compósitos para estes reparos.

O objetivo deste trabalho é estudar o comportamento em fratura de quatro tipos de materiais compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras de vidro, que são usados como reparos de dutos, utilizando a metodologia da mecânica da fratura, visando caracterizar a resistência à fratura desses compósitos com diferentes arranjos e frações volumétricas de fibras de vidro. Ensaios preliminares de tração foram realizados por Fujiyama (2002) utilizando a norma de ensaio ASTM D-3039 (ASTM 2001), obtendo-se as propriedades mecânicas em carregamento monotônico e os gráficos característicos do comportamento tensão *versus* deformação desses materiais. Com a finalidade de caracterizar a fratura desses materiais, foram realizados ensaios de tenacidade à fratura utilizando, para isso, a norma de ensaio ASTM E-1922 (ASTM 1999) cuja finalidade é determinar a tenacidade à fratura translaminar de materiais compósitos laminados de matriz polimérica.

2. Materiais e Métodos

2.1. Materiais

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizados e testados quatro tipos de materiais compósitos de matriz polimérica reforçados por fibras de vidro, diferindo tanto no tipo de matriz quanto no arranjo e na fração volumétrica dessas fibras. A Tabela 1 mostra as características dos materiais estudados.

Tabela 1. Características dos materiais estudados

Material	Matriz	Reforço
Compósito 1 (MC1)	Polimérica	Manta de fibra de vidro mais fibras de vidro unidirecionais
Compósito 2 (MC2)	Polimérica	Fibras de vidro unidirecionais
Compósito 3 (MC3)	Polimérica	Tecido de fibra de vidro
Compósito 4 (MC4)	Polimérica	Tecido de fibra de vidro

Os materiais MC1, MC2 e MC3 são comerciais e fabricados, respectivamente, pelas empresas Rust Engenharia Ltda., Clock Spring Company e StrongBack Corporation. O material MC4 foi produzido pelo Laboratório de Materiais Compósitos da COPPE/UFRJ e consiste de uma matriz epóxi reforçada por tecido de fibra de vidro do tipo E.

A Tabela 2 mostra os resultados das propriedades mecânicas obtidas por Fujiyama (2002) a partir do ensaio de tração de 6 corpos de prova de cada material e características dos mesmos.

Tabela 2. Propriedades mecânicas e características dos materiais estudados

	Material	Carga Máxima [N]	Tensão Máxima [MPa]	Fração Volumétrica de fibras [%]	Método de Fabricação
MC1	Média	31.806,11	399,02	28,33	Laminação manual
	Desvio Padrão	2211,93	53,96		
MC2	Média	24.202,54	379,58	65,48	Pultrusão
	Desvio Padrão	692,46	8,99		
MC3	Média	25.586,67	310,60	48,36	Laminação manual
	Desvio Padrão	2316,41	26,25		
MC4	Média	27.373,14	372,80	42,98	Laminação manual
	Desvio Padrão	890,38	14,86		

Para o estudo do comportamento em fratura foram testados 11 corpos de prova, sendo 3 do material MC1, 2 do material MC2, 3 do material MC3 e 3 do material MC4. A espessura dos corpos de prova é a própria espessura dos materiais (3,0mm), o que está previsto na norma de ensaio ASTM E-1922. Os ensaios foram realizados a uma taxa de deslocamento constante com uma velocidade do travessão de 0,6mm/min.

2.2. Metodologia

Os ensaios foram realizados baseados em uma metodologia desenvolvida para materiais que apresentam comportamento linear elástico, determinando-se, neste caso, a tenacidade à fratura translaminar K_{TL} que é uma medida da resistência do compósito laminado de matriz polimérica ao dano na ponta do entalhe e ao crescimento efetivo de trinca translaminar sob o modo I de carregamento. Neste caso, os resultados só são válidos para as condições nas quais a região danificada na ponta do entalhe é pequena comparada com o comprimento do entalhe e com as dimensões dos corpos de prova.

2.2.1. Corpos de Prova

Os corpos de prova utilizados foram do tipo ESE(T) com as dimensões mostradas na Figura 1.

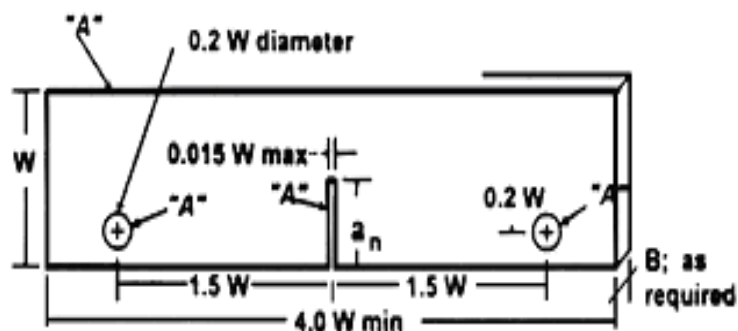


Figura 1. Dimensões dos corpos de prova

O valor de W adotado foi de 30,0mm e as demais dimensões estão em função desta primeira, como mostrado na Tabela 3. Os entalhes foram produzidos por corte com serra de joalheiro, obtendo-se uma geometria das raízes das trincas do tipo U com raio de raiz de, aproximadamente, 0,2 mm.

Tabela 3. Dimensões dos corpos de prova de acordo com a norma ASTM E-1922

Largura W [mm]	Comprimento L [mm]	Diâmetro dos furos ϕ [mm]	Espessura B [mm]	Comprimento do entalhe a_n [mm]	Largura do entalhe [mm]
30,0	120,0	6,0	3,0	15,0 a 18,0	Até 0,45

A Figura 2 ilustra os corpos de prova preparados para os ensaios.

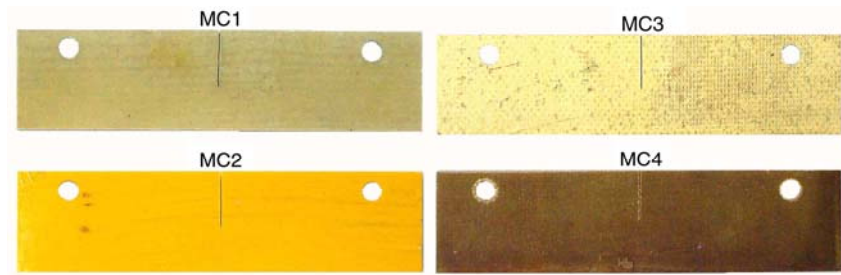


Figura 2. Corpos de prova para ensaio de tenacidade à fratura

Nos materiais MC1 e MC2 que apresentam as fibras unidirecionais, os entalhes foram feitos transversalmente à direção das mesmas, uma vez que esta é a direção de maior resistência do compósito. Os materiais MC3 e MC4 não precisaram desta atenção uma vez que ambos apresentam as fibras nas duas direções, na forma de tecido.

2.2.2. Equipamentos e ensaio

Para a realização dos ensaios de tenacidade à fratura dos compósitos laminados de matriz polimérica reforçados por fibras de vidro foram utilizados uma máquina de ensaios mecânicos MTS, modelo 810, e um extensômetro MTS, modelo 632.02F-20 para medida do deslocamento da boca do entalhe. O extensômetro foi fixado nos corpos de prova mediante uma faca porta clip sugerida pela norma.

Os dados foram adquiridos e processados em microcomputador acoplado à máquina de ensaios mediante o uso de *software* também da MTS.

3. Resultados

As Figuras 3 a 6 mostram as curvas carga *versus* deslocamento obtidas de um corpo de prova de cada material ensaiado. Estes registros são representativos dos obtidos dos outros corpos de prova desses materiais.

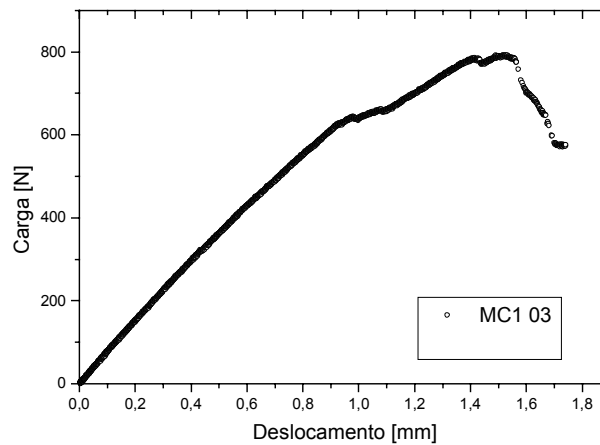


Figura 3. Curva carga *versus* deslocamento do material MC1 corpo de prova 3

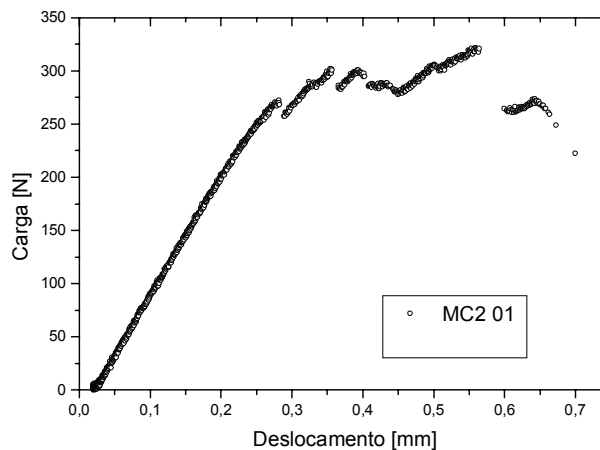
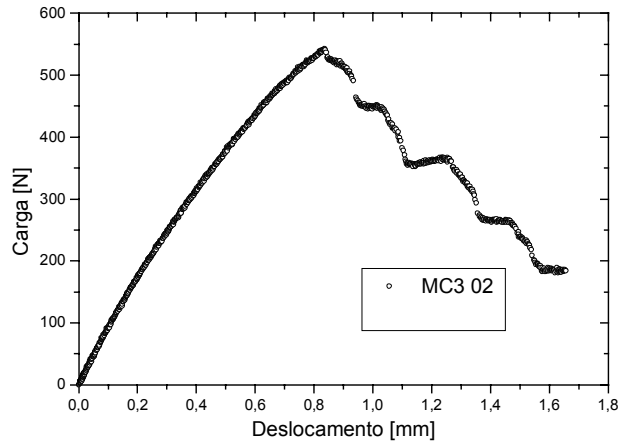
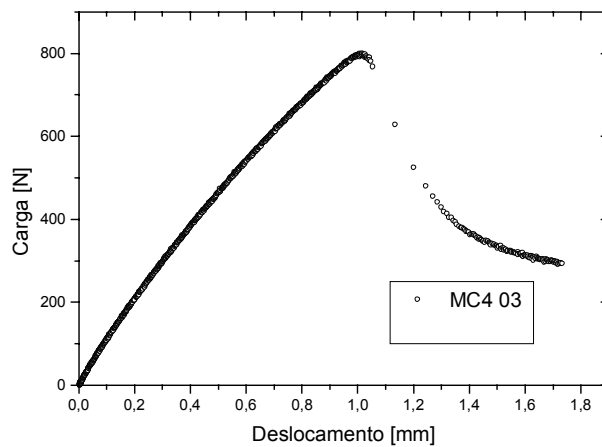


Figura 4. Curva carga *versus* deslocamento do material MC2 corpo de prova 1

Figura 5. Curva carga *versus* deslocamento do material MC3 corpo de prova 2Figura 6. Curva carga *versus* deslocamento do material MC4 corpo de prova 3

De posse dos gráficos mostrados anteriormente foi possível analisar a validade dos ensaios e determinar os valores da tenacidade à fratura translaminar dos materiais estudados. Esses valores estão mostrados na Tabela 4.

Tabela 4. Resultados obtidos do ensaio de tenacidade à fratura translaminar.

Material	CP	$P_{m\acute{a}x.}$ [N]	$V_{m\acute{a}x.}$ [mm]	$\Delta V_n/V_{n-0}$	K_Q [MPa.m ^{1/2}]	Média K_Q [MPa.m ^{1/2}]	Desv. Padrão K_Q [MPa.m ^{1/2}]
MC1	01	940,77	2,04	0,58	15,22	14,07	1,40
	02	801,03	1,76	0,39	14,49		
	03	791,61	1,52	0,43	12,51		
MC2	01	321,22	0,56	0,81	5,08	5,03	0,07
	02	376,11	1,32	1,51	4,98		
MC3	01	410,11	0,85	0,40	7,78	8,22	0,44
	02	542,10	0,84	0,35	8,66		
	03	556,25	0,85	0,46	8,23		
MC4	01	873,76	1,02	0,41	13,36	11,92	1,94
	02	620,56	0,98	0,54	9,72		
	03	799,69	1,02	0,37	12,68		

4. Discussão

De acordo com a norma de ensaio ASTM E-1922 se a relação $\Delta V_n/V_{n-0}$ for maior que 0,3 a extensão do dano ao redor da ponta do entalhe seria muito grande e, com isso, não é possível obter uma medida para K_{TL} . De acordo com a Tabela 4 é possível observar que nenhum ensaio pode ser validado e, dessa forma, o valor de K_Q determinado não corresponde ao K_{TL} sugerido pela norma.

Analisando também os gráficos obtidos a partir dos ensaios (Figuras 3 a 6), é possível observar que os materiais não apresentam um comportamento linear, o que era esperado pela norma. Por outro lado, é importante chamar a atenção de que o comportamento apresentado pelos materiais estudados no ensaio de tração, curva σ - ϵ , é linear até a fratura, o que não ocorre no ensaio de tenacidade à fratura.

Durante os ensaios dos materiais MC2 foi possível constatar que a trinca abriu na direção longitudinal, ou seja, paralelamente à direção das fibras. Isso sugere que esta configuração de corpo de prova não é adequada para ensaiar este tipo de material. Estudos efetuados com compósitos laminados fibra-metal [Castrodeza et al.] mostraram que esse problema ocorria também em corpos de prova de geometria compacta de tração (C(T)) quando o reforço do compósito era efetuado por fibras de vidro unidirecionais com o entalhe perpendicular às fibras (compósito GLARE), não ocorrendo para os compósitos reforçados por fibras de aramida (compósitos ARALL). Naquele estudo, o problema da propagação de trincas paralelamente à direção das fibras foi sanado pela utilização de corpos de prova de flexão em três pontos (SE(B)), onde a trinca deixou de propagar-se segundo a direção das fibras e o fez perpendicularmente às mesmas. Dessa forma, para os compósitos GLARE, foi possível a obtenção de valores válidos de tenacidade (J_C e δ_{5C}). No caso do compósito MC2 do presente estudo, ensaios futuros serão também efetuados com a geometria SE(B). No que tange aos compósitos MC1, MC3 e MC4, ensaios serão efetuados com a geometria C(T), que funcionou muito bem para os compósitos ARALL, para verificar se a mesma produz resultados válidos de tenacidade (K_C).

6. Conclusões

- A configuração de corpo de prova sugerida pela norma ASTM E-1922 não é adequada ao material MC2;
- Todos os materiais apresentam um comportamento não linear, o que invalida a utilização da norma ASTM E-1922;
- Os estudos continuarão com o intuito de propor uma nova metodologia de ensaio para esses materiais. Esses estudos envolverão a utilização de corpos de prova C(T) para os compósitos MC1, MC3 e MC4 e corpos de prova SE(B) para o compósito MC2.

7. Agradecimentos

À ANP pela bolsa de estudos para J. M. R. Touça e pelo apoio financeiro. Ao CNPq, CNPq/CT PETRO e FINEP/CT PETRO pelo apoio financeiro.

8. Referências

- ASTM D-3039, Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. In: *2001 Annual Book of ASTM Standards*, vol. 15.03, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, p. 163-168, 2001.
- ASTM E-1922, Standard Test Method for Translaminar Fracture Toughness of Laminated Polymer Matrix Composite Materials. In: *1999 Annual Book of ASTM Standards*, vol. 3.01, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, p. 1077-1081, 1999.
- CASTRODEZA, E. M., PEREZ IPIÑA, J. E., BASTIAN, F. L., Experimental Techniques for Fracture Instability Toughness Determination of Unidirectional Fibre-Reinforced Metal Laminates. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 25(11), p. 999-1008, 2002.
- CHAWLA, K. K., *Composite materials: Science and Engineering*, 2nd Ed. New York, Springer-Verlag, 1998.
- FUJIYAMA, R. T., *Materiais Compósitos para Reparos de Dutos em Ambiente Terrestre com Defeitos Internos, Exame de Qualificação PEMM/COPPE/UFRJ*, 2002.
- HASSUI, L. H., *Análise Estrutural de Dutos Reparados por Material Compósito, Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil*, 1999.