

ESTUDO DO COMPORTAMENTO EM FRATURA DE MATERIAIS COMPÓSITOS PARA REPARO DE DUTOS DE AÇO

José Maurício Rodrigues Touça¹

Enrique Mariano Castrodeza²

Fernando Luiz Bastian³

Resumo

No desenvolvimento de materiais compósitos para reparo de dutos danificados de aço é de fundamental importância a avaliação da sua tenacidade à fratura. O objetivo do trabalho foi estudar a aplicabilidade de metodologias para a avaliação da tenacidade à fratura em quatro tipos de compósitos poliméricos reforçados por fibras de vidro utilizados no reparo de dutos. Realizaram-se testes preliminares segundo a norma ASTM D-3039 para se obter as propriedades mecânicas em tração destes materiais. A caracterização do seu comportamento em fratura foi inicialmente avaliada segundo a norma ASTM E-1922, baseada na determinação da tenacidade à fratura translaminar (K_{TL}). Foi adotada também uma metodologia baseada na avaliação do $CTOD$ tradicional () pela norma ASTM E-1820 (com modificações), e do $CTOD$ de Schwalbe (δ). Os resultados mostraram que a metodologia definida pela ASTM E-1922 não foi adequada para os materiais estudados, enquanto que a metodologia do δ foi interessante para a avaliação da tenacidade à fratura dos mesmos, sendo muito atrativa porque não depende de modelos matemáticos e pode ser facilmente aplicada em diferentes geometrias de corpos de prova.

Palavras-chave: Tenacidade à fratura; Materiais compósitos; Reparo de dutos.

FRACTURE BEHAVIOR STUDY OF COMPOSITE MATERIALS FOR PIPELINE REPAIR

Abstract

During the development of composite materials for damaged pipelines repair is very important their fracture toughness evaluation. The objective of this work was to study the applicability of methodologies for fracture toughness evaluation of four types of glass fiber reinforced polymer matrix composites for pipelines repair. Preliminary tensile tests have been made using the ASTM D-3039 standard obtaining the monotonic mechanical properties of these materials. Their fracture behavior characterization was initially made according to ASTM E-1922 standard based on translaminar fracture toughness (K_{TL}) evaluation. The results showed that this methodology was not appropriate for the studied materials. We also used a methodology based on the $CTOD$ () evaluation according to ASTM E-1820 standard (with some modifications), and a more recent one based on the Schwalbe's $CTOD$ (δ). The results indicated that the δ methodology was interesting for fracture toughness evaluation of the studied materials, being very attractive because it does not depend on mathematical models and it can be easily applied to different specimen geometries.

Key words: Fracture toughness; Composite Materials; Pipelines repair.

1 INTRODUÇÃO

Durante o serviço de dutos de aço usados no transporte terrestre de petróleo e seus derivados torna-se quase inevitável a perda de espessura causada por corrosão externa (em geral, decorrente de falhas na proteção catódica ou de danos no revestimento de proteção) ou interna (como consequência de umidade ou água no produto transportado). Assim, o domínio de tecnologia de reparo de

dutos corroídos é de grande importância para a redução de custos no transporte de hidrocarbonetos. Por isso, algumas técnicas clássicas para reparo de dutos foram propostas ao longo dos anos, dentre elas podemos citar: a técnica de corte e substituição; a técnica de dupla calha soldada e a técnica de dupla calha com enchimento.⁽¹⁾ Essas técnicas apresentam algumas desvantagens, tais como o custo elevado devido à parada operacional, risco de acidentes, demora para a realização do reparo, entre outras. Por isso, é de suma importância a adoção de novas técnicas de reparo que associem eficiência a baixos custos.

¹ M.Sc., Aluno do Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE/UFRJ

² D.Sc., Pesquisador do Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE/UFRJ

³ Ph.D., Professor do Programa de Eng. Metalúrgica e de Materiais, COPPE/UFRJ

Recentemente têm sido desenvolvidos reparos de materiais compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras de vidro. Entretanto, pouco tem sido feito para caracterizar a resistência à fratura desses compósitos. O objetivo deste trabalho foi estudar o comportamento em fratura de quatro materiais compósitos diferentes de matriz polimérica reforçados com fibras de vidro, usados como reparos de dutos. Anteriormente, Touça e Bastian⁽²⁾ utilizaram a metodologia indicada pela norma ASTM E-1922,⁽³⁾ proposta para a determinação da tenacidade à fratura translaminar de compósitos laminados de matriz polimérica, na tentativa de determinar os valores de tenacidade à fratura dos materiais estudados. Infelizmente esta metodologia não foi adequada para os materiais estudados.

Tabela 1. Características dos materiais estudados

| Material | Matriz | Reforço | Fabricação | Empilhamento |
|----------|-------------|---|------------------|--|
| MC1 | Epóxi | Manta mais fibras de vidro unidirecionais | Laminação manual | Multidirecional (manta) mais reforço unidirecional |
| MC2 | Poliéster | Fibras de vidro unidirecionais | Pultrusão | Unidirecional |
| MC3 | Ureica | Tecido de fibra de vidro | Laminação manual | Bi-direcional (0°/90°) |
| MC4 | Epóxi DGEBA | Tecido de fibra de vidro | Laminação manual | Bi-direcional (0°/90°) |

Tabela 2. Propriedades mecânicas e % de fibras em peso dos materiais⁽⁷⁾.

| Material | | max (MPa) | max (%) | E (GPa) | % de fibras em peso |
|----------|------------|-----------|---------|---------|---------------------|
| MC1 | Média | 383,75 | 2,40 | 21,11 | 58,98 |
| | Desv. Pad. | 10,95 | 0,10 | 0,59 | 0,81 |
| MC2 | Média | 378,48 | 1,20 | 31,89 | 54,32 |
| | Desv. Pad. | 7,85 | 0,10 | 3,90 | 4,90 |
| MC3 | Média | 369,05 | 1,30 | 28,66 | 51,14 |
| | Desv. Pad. | 6,48 | 0,08 | 2,15 | 1,66 |
| MC4 | Média | 376,83 | 2,60 | 20,53 | 44,53 |
| | Desv. Pad. | 12,56 | 0,05 | 1,85 | 1,39 |

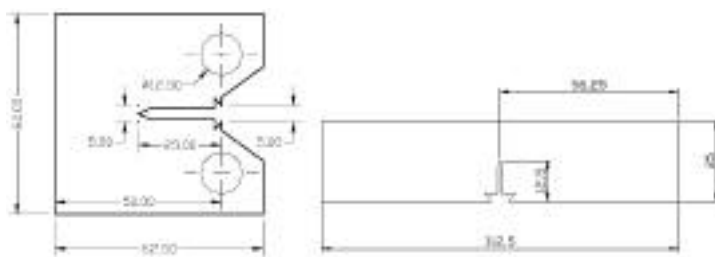


Figura 1. Dimensões dos corpos de prova C(T), ($W = 50,0$ mm) e SE(B), ($W = 25$ mm).

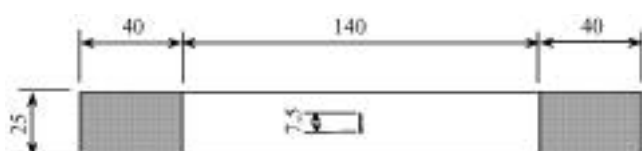


Figura 2. Dimensões dos corpos de prova M(T), ($W = 25,0$ mm).

Desta forma, a tenacidade à fratura desses materiais foi avaliada seguindo uma metodologia semelhante à desenvolvida por Castrodeza et al.⁽⁴⁻⁶⁾ para laminados fibra-metal, baseada na determinação e comparação entre os valores de *CTOD* (*Crack Tip Opening Displacement*) da ASTM e de Schwalbe através da utilização de corpos de prova do tipo compacto de tração (C(T)), de flexão em três pontos (SE(B)) e de tração com trinca central (M(T)).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Foram utilizados quatro compósitos de matriz polimérica reforçados por fibras de vidro.

Os mesmos diferem tanto no tipo de matriz quanto no arranjo e fração volumétrica de fibras utilizadas, como pode ser visto nas Tabelas 1 e 2, as quais apresentam características e propriedades mecânicas em tração dos materiais estudados, medidas por Fujiyama⁽⁷⁾ de acordo com a norma ASTM D-3039.⁽⁸⁾

Os materiais denominados neste trabalho de 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 no nosso laboratório.

2.1.1 Corpos de prova (cp`s)

Após testes preliminares para avaliar a aplicabilidade dos cp`s aos materiais estudados, foi possível perceber que alguns materiais não se adequaram aos tipos de cp`s propostos por problemas de propagação de trinca no plano do entalhe ou delaminação.

As Figuras 1 e 2 ilustram as dimensões dos 3 (três) tipos de cp`s utilizados. A espessura os cp`s foi a própria espessura dos materiais (aproximadamente 3,0 mm), o que é permitido pela norma. Foram confeccionados 5 (cinco) cp`s para cada material estudado.

2.2 Metodologia

A tenacidade à fratura dos compósitos estudados foi avaliada mediante a determinação dos valores de *CTOD* (δ) pela norma ASTM E-1820⁽⁹⁾ e pelo *CTOD* de Schwalbe (δ_s),⁽¹⁰⁾ segundo a metodologia recentemente desenvolvida por Castrodeza et al.,⁽⁴⁻⁶⁾ para a avaliação da tenacidade à fratura de compósitos laminados fibra-metal. Esta metodologia utiliza cp`s normalizados

com pequenas modificações e contorna problemas como flambagem, desvio de trinca e indentações, que aparecem quando os procedimentos da ASTM são aplicados.

Nos materiais MC1 e MC2 os entalhes foram efetuados perpendicularmente à direção de maior resistência do material, ou seja, na direção perpendicular às fibras unidirecionais, enquanto nos materiais MC3 e MC4, que apresentam o reforço na forma de tecido (fibras alinhadas a 0 e 90°), esta atenção não se torna necessária.

2.2.1 Determinação do ponto crítico

Quando os registros apresentaram instabilidades, os valores críticos de tenacidade dos materiais foram calculados na primeira instabilidade significativa (definida de acordo com a norma ASTM E-1820). Em registros sem instabilidades a tenacidade à fratura foi calculada no ponto de carga máxima.

2.2.2 Equipamentos e ensaios

Para a realização da parte experimental utilizou-se uma máquina de ensaios mecânicos MTS, modelo 810; um extensômetro Instron, modelo 2610-012 para medida de *CMOD* nos cp's C(T) e SE(B); um extensômetro Instron, modelo 2620-525 para medida do deslocamento nos cp's do tipo M(T); e um extensômetro Instron, modelo 2620-530, modificado, no qual as facas foram substituídas por pontas agudas para a medição do *CTOD* de Schwalbe (δ_s) nos 3 (três) tipos de cp's. Os testes foram realizados a uma taxa de deslocamento de 1,0 mm/min.

3 RESULTADOS

A Figura 3 ilustra um gráfico característico das curvas de carregamento *versus* deslocamento na boca do entalhe (*P vs. CMOD*) e carregamento *versus CTOD* de Schwalbe (*P vs. δ_s*) de um corpo de prova do material MC1 estudado. Os registros são representativos daqueles obtidos a partir dos outros corpos de prova dos materiais MC1 e MC3.

Uma vez que não é possível utilizar um *clip-gauge* para medida de *CMOD* nos corpos de prova do tipo M(T), o material MC4 foi avaliado mediante um extensômetro para medida do deslocamento do corpo de prova, como foi mostrado no item anterior. Sendo assim, para este material apresentamos os gráficos característicos das curvas de carregamento *versus* deslocamento do cp (*P vs.*

) e carregamento *versus CTOD* de Schwalbe (*P vs. δ_s*), de acordo com a Figura 4. Os registros são representativos dos obtidos a partir dos outros cp's do material MC4.

Foi possível perceber que, para o mesmo material, alguns cp's apresentaram tanto registros com instabilidades como registros com carregamento até o ponto de carga máxima e posterior queda suave. A partir da determinação do ponto crítico (instabilidade ou carga máxima) nas curvas *P vs. CMOD* dos materiais MC1 e MC3, foi possível calcular os valores críticos do *CTOD* utilizando as equações presentes na norma ASTM E-1820, de acordo com o tipo de cp utilizado. No caso do material MC4 não conseguimos obter os valores de *CTOD*, pois não é possível medir o *CMOD* no tipo de cp adotado para os ensaios com este material.

Como a norma ASTM E-1820 foi desenvolvida para materiais metálicos e de grande espessura, uma série de considerações e aproximações foi necessária para adequá-la aos materiais estudados. A Tabela 3 mostra a média e o desvio padrão dos valores críticos do *CTOD* ($m=2$ e $m=1$) e do δ_s dos cp's testados.

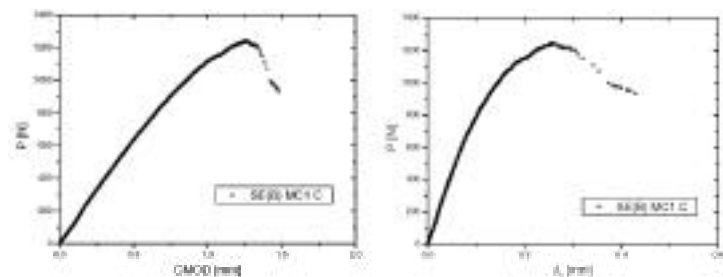


Figura 3. Curvas *P versus CMOD* e *P versus δ_s* representativas do material MC1, utilizando corpo de prova do tipo SE(B).

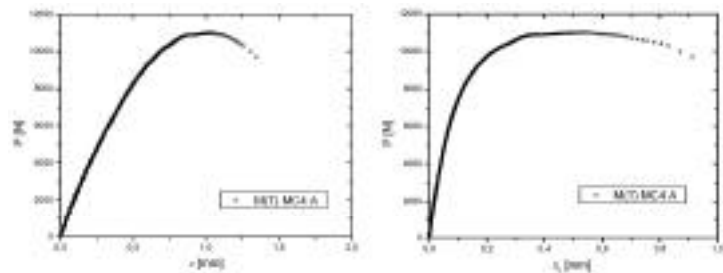


Figura 4. Curvas *P versus n* e *P versus δ_s* representativas do material MC4, utilizando corpo de prova do tipo M(T).

Tabela 3. Média dos valores críticos do *CTOD* (δ_c) e δ_s

| Material | K (MPa.m ^{1/2}) | δ_c (m=2) (mm) | δ_c (m=1) (mm) | δ_s (mm) |
|-----------|---------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------|
| MC1 SE(B) | 19,55 ± 0,88 | 0,11 ± 0,04 | 0,13 ± 0,04 | 0,23 ± 0,04 |
| MC3 SE(B) | 8,00 ± 0,35 | 0,09 ± 0,02 | 0,09 ± 0,02 | 0,19 ± 0,04 |
| MC3 C(T) | 8,35 ± 0,40 | 0,17 ± 0,02 | 0,17 ± 0,02 | 0,25 ± 0,03 |
| MC4 M(T) | 17,18 ± 0,38 | ***** | ***** | 0,60 ± 0,17 |

4 DISCUSSÃO

De acordo com a equação (1), o *CTOD* é determinado a partir da soma de uma componente elástica e uma plástica.

$$= \frac{K^2 (1 - \nu^2)}{2 s E} + \frac{r_p (W - a_o) p1}{[r_p (W - a_o) + a_o + z]} \quad (1)$$

Na componente elástica existem três considerações a fazer: o termo $(1 - \nu^2)$ foi descartado devido à pequena espessura dos materiais estudados e devido à dificuldade na determinação do módulo de Poisson (ν) dos mesmos; o valor da constante m do denominador é igual a 2 para materiais metálicos e de grande espessura uma vez que esses materiais se encontram em um estado plano de deformações. Entretanto, podemos adotá-lo igual a 1 se considerarmos que, devido à pequena espessura dos materiais estudados, estes podem encontrar-se em um estado plano de tensões; por último, o valor de σ_{LE} (tensão limite de escoamento), característico de materiais dúcteis, foi substituído pelo valor de σ_R (tensão limite de resistência), levando em consideração que os materiais estudados apresentaram comportamento frágil nos ensaios de tração. Essas considerações, necessárias para utilizar as equações da norma ASTM E-1820 nos materiais deste trabalho, acarretou uma queda significativa da parcela do *CTOD* elástico em relação a do *CTOD* plástico. Aparentemente o problema maior encontra-se na utilização de σ_R , que pode ter resultado em uma subestimação dos valores da componente elástica do *CTOD* no caso dos materiais MC1 e MC3.

Os valores críticos do δ_5 foram obtidos diretamente das curvas *P vs. δ_5* de cada cp ensaiado, já que este parâmetro é independente de modelos matemáticos.

Os valores de δ_5 com $m=1$ (Tabela 3) são ligeiramente superiores aos valores quando $m=2$, no caso do material MC1. No caso do material MC3 os valores de δ_5 , considerando $m=1$ e $m=2$, são basicamente iguais. Esta diferença não foi mais significativa porque os valores da componente elástica do *CTOD* para os materiais MC1 e MC3 foram muito pequenos. O valor de $m=1$ representaria melhor o estado de tensões na ponta do entalhe dos materiais estudados. Ainda sobre a Tabela 3, os valores de K_I e δ_5 são próximos para o material MC3, considerando os dois cp's utilizados. Por outro lado foi feita uma análise estatística baseada na distribuição *t* de Student considerando a média amostral e o desvio padrão dos valores de δ_5 e um nível de confiança de 95%. Pela distribuição estatística *F* de Snedecor foi possível identificar a diferença das variâncias, comprovando que os valores de δ_5 obtidos para este material, usando os dois cp's, são estatisticamente diferentes⁽¹¹⁾.

Alguns cp's apresentaram curvas com instabilidades que não chegaram a ser significativas segundo a ASTM E-1820 (queda inferior a 5 %). Em alguns o ponto de instabilidade coincidiu com o ponto de carga máxima. Foi possível comprovar que as curvas *P vs. CMOD* dos materiais MC1 e MC3 são lineares inicialmente, mas desviam dessa linearidade à medida que se aproximam do ponto crítico (carga máxima ou instabilidade) do material. Este comportamento também foi observado no trabalho realizado por Solar e Belzunce⁽¹²⁾ sobre tenacidade à fratura (K_{IC}) e curvas de resistência de compósito de resina poliéster reforçada por fibras de vidro. Neste estudo, os autores relacionam este desvio da

linearidade nas curvas *P vs. COD* com um pequeno crescimento de dano precedendo a fratura, uma vez que esse tipo de material não deforma plasticamente.

Foram traçadas curvas *P vs. δ_5* utilizando a equação (1) para comparar, ponto a ponto, os valores do δ_5 (ASTM) com os valores do δ_5 , para os materiais MC1 e MC3. Determinou-se os valores correspondentes de δ_5 ($m=2$ e $m=1$) e δ_5 para cada ponto de carregamento e, com isso, traçadas as curvas *P vs. δ_5* para todos os cp's destes materiais. Nestas curvas foi traçada, também, uma reta (Figura 5), indicando que não existe uma identidade entre os dois parâmetros de *CTOD* determinados.

Considerando como referência os valores de d_5 , os valores de d foram subestimados. Para o material MC3 praticamente não existe diferença nas curvas considerando os valores de $m=1$ e $m=2$. No caso do material MC1 essa diferença foi mais acentuada, comprovando o que já havia sido mostrado pela Tabela 3.

5 CONCLUSÃO

- Considerando os resultados obtidos, apresentados no item 3 e baseados nas discussões apresentadas no item 4, podemos concluir que:
- As curvas *P vs. CMOD* dos materiais MC1 e MC3 apresentaram-se inicialmente lineares, mas com desvio dessa linearidade próximo da carga máxima;
- As curvas *P vs. n* do material MC4 mostraram-se, também, lineares inicialmente com desvio próximo ao ponto crítico (carga máxima);
- As considerações e aproximações utilizadas para a determinação dos valores de *CTOD* (δ_5) a partir dos valores de *CMOD*, segundo a norma ASTM E-1820, resultaram na subestimação da componente elástica do *CTOD*, provavelmente pela substituição dos valores de σ_{LE} pelos valores de σ_R dos materiais;

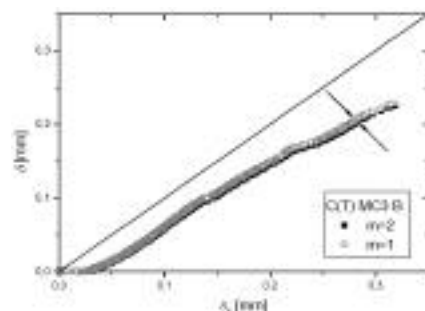


Figura 5. Curva δ_5 ($m=2$ e $m=1$) vs. δ_5 representativa do material MC3, corpo de prova C(T). O ponto crítico está indicado no gráfico com uma seta.

- Os valores de K_{max} dos materiais MC1 e MC4 são similares, apesar do valor médio de σ_C do material MC4 ser superior ao do material MC1. Os valores de K_{max} do material MC3 são inferiores aos dos outros materiais, mas os valores médios de σ_C são próximos do valor médio do material MC1. Apesar dos valores de K_{max} do material MC3, obtidos através dos dois tipos diferentes de cp's, serem similares, os valores de σ_C são estatisticamente diferentes;
- No caso dos materiais MC1 e MC3, e considerando cada material individualmente, os valores de σ_C são basicamente iguais, adotando valores de $m=1$ e $m=2$. Esta igualdade provavelmente pode ser explicada pela subestimação da componente elástica do $CTOD$, que abrange

o valor dessa constante. Os valores de σ_C são superiores aos valores de σ_C para todos os cp's dos materiais MC1 e MC3 e

- A metodologia do σ_C é interessante e útil para a avaliação da tenacidade à fratura nestes materiais, sendo muito atrativa porque não depende de modelos matemáticos e pode ser facilmente aplicada em diferentes geometrias de cp's.

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. Ao Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento (IPD) do Exército do Brasil pela liberação dos equipamentos para a realização da parte experimental deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 HASSUI, L. H., **Análise estrutural de dutos reparados por material compósito**. 1999. 75p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – Programa de Engenharia Oceânica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.
- 2 TOUÇA, J. M. R., BASTIAN, F. L., Fratura de materiais compósitos utilizados em reparo de dutos. **Petro & Química**, n. 253, p. 99-102, 2003.
- 3 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E-1922: Standard test method for translaminar fracture toughness of laminated polymer matrix composite materials. In: _____. **1999 Annual book of ASTM standards**. Philadelphia, 1999. v. 3.01, p. 1077-1081.
- 4 CASTRODEZA, E. M., **Desenvolvimento e avaliação de técnicas experimentais para os estudo da mecânica da fratura de laminados fibra-metal**. 2002. 158p. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.
- 5 CASTRODEZA, E. M., TOUÇA, J. M. R., IPIÑA, J. E. P., BASTIAN, F. L., Determination of $CTOD_C$ in fibre metal laminates by ASTM and Schwalbe methods. **Materials Research**, v. 5, n. 2, p. 119-124, 2002.
- 6 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**, v. 25, n.11, p. 999-1008, 2002.
- 7 FUJIYAMA, R. T. **Materiais compósitos para reparos de dutos em ambiente terrestre com defeitos internos**. 2004. 158p. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.
- 8 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D-3039: Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials. In: _____. **2001 Annual book of ASTM standards**., Philadelphia, 1993. v. 15.03, p. 163-168.
- 9 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E-1820: Standard test method for measurement of fracture toughness. In: _____. **1999 Annual book of ASTM standards**. Philadelphia, 1999. v. 3.01, p. 972-1005.
- 10 SCHWALBE, K.-H. Introduction of σ_5 as an operational definition of the CTOD and its practical use. **Fracture mechanics**., Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1995. ASTM STP 1256, v. 26
- 11 BUSSAB, W. O.; MORETTIN, P. A. **Estatística básica**. 4. ed. São Paulo: Atual, 1987.
- 12 SOLAR, M. A., BELZUNCE, F. J., Fracture toughness and R-curves of glass fibre reinforced polyester. **Composites**, v. 20, n. 2, p. 120-124, Mar.1989.

Recebido em: 26/03/2007

Aprovado em: 30/03/2007

Proveniente de: CONGRESSO ANUAL DAABM, 61., 2006, Rio de Janeiro. São Paulo: ABM, 2006.