



PROPRIEDADES MECÂNICAS E MECANISMO DE DANO EM COMPÓSITOS FIBROSO TIPO SANDWICH

Roosevelt J.B.G. Andrade

Eve M.F. Aquino

Universidade Federal do Rio Grande do Norte – Centro de Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Campus Universitário, S/N- Lagoa Nova – Natal/RN-CEP: 59072-970

E-mail: eve@ct.ufrn.br - Fax: 0++(84)215-3886

Resumo. *O presente trabalho de investigação trata do estudo das propriedades mecânicas e do mecanismo de dano em compósitos fibrosos do tipo sandwich, constituídos de Plástico Reforçado com Fibra de Vidro (PRFV). Os compósitos foram submetidos a uma variedade de ensaios mecânicos como: impacto, tração axial e flexão-em-três-pontos. Para cada tipo de ensaio estudou-se a influência, nas propriedades e fratura, de vários parâmetros relacionados com a configuração e/ou composição dos laminados. Os parâmetros relacionados com a composição dizem respeito à presença ou não nos laminados compósitos, da “camada de recheio” (**coremat Firet - xx**). No caso da presença do **coremat**, foi analisada a influência de sua orientação (0° e 90°), caracterizando, dessa forma, diferentes configurações do **sandwich**. Essas orientações dizem respeito à direção de aplicação da carga, nos ensaios de flexão-em-três-pontos. Para que fosse possível o acompanhamento do mecanismo de dano nos ensaios de impacto, se fez necessário o desenvolvimento de um mecanismo, utilizando-se um martelo sensor do tipo 8202 (BRÜEL & KJAER) ligado a um analisador de vibrações 2515 (BRÜEL & KJAER). O monitoramento do mecanismo de dano foi feito utilizando-se a microscopia óptica para todos os ensaios realizados.*

Palavras-chave: *Compósito sandwich, Propriedades mecânicas, Mecanismo de dano.*

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de novos compósitos e conseqüentemente novas aplicações tem-se acelerado nos últimos anos, de forma a atender as demandas do mercado atual. Neste sentido, o completo conhecimento de suas propriedades em geral (Spragg, 1998), mecanismo de dano (Allen, 1994) e desempenho estrutural (Kalamkarov, 1998), tornou-se fundamental para a maioria dos engenheiros projetistas.

A literatura atual tem mostrado importantes contribuições sobre a influência de diversos parâmetros no comportamento desses materiais frente às mais variadas formas de carregamentos (Kim & Yu, 1998; Lee & Fan, 1996).

O objetivo deste trabalho consiste na busca de adequadas composições e configurações de laminados compostos, visando uma futura aplicação em reservatórios e tubulações industriais. Para tanto, estudos foram realizados em compósitos com diferentes composições e configurações, de forma a se determinar suas propriedades mecânicas e identificação do modo de fratura desses materiais.

2. MATERIAIS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1 Materiais usados

Os compósitos do tipo sandwich **CS** de plástico reforçado com fibra de vidro, são fabricados na forma de placas através do processo de fabricação de laminação à pistola (Spray up). Os mesmos são constituídos de 04 (quatro) camadas de manta picada (5cm), de fibra de vidro/E (450 g/m²), impregnadas em resina tereftálica e uma camada de recheio tipo **Firet Coremat XX** (2mm), estando esta última localizada simetricamente entre as camadas de manta. Este tipo de **coremat** possui direção preferencial em sua resposta à capacidade de deformação. Desta forma define-se os compósitos sandwich com direção preferencial paralela (0°) à carga aplicada como sendo **CSV** e perpendicular (90°) à mesma como sendo **CSH**.

Os compósitos do tipo Mantas **CM** são constituídos de 06 (seis) camadas de mantas do mesmo tipo utilizado no compósito sandwich. As mesmas são confeccionadas na forma de placas impregnadas também com resina tereftálica. O processo de fabricação utilizado é o de laminação manual (Hand lay-up). A diferença básica entre as duas composições é que nos compósitos **CS** a camada de recheio substitui 02 (duas) camadas de manta.

Todas as placas foram fabricadas pela HEMFIBRA Indústria e Comércio Ltda.

Procedimento experimental

Todos os CPs para os ensaios mecânicos foram cortados utilizando-se disco de corte com fio de diamante e ajustados dimensionalmente com lixas d'água de 180 e 220, e polidos posteriormente numa politriz com pasta de alumina. Os ensaios foram realizados à temperatura ambiente (300 K) e umidade relativa de 50%.

As normas utilizadas para os ensaios de tração axial e flexão-em-três-pontos foram as ASTM D 638-90 e ASTM D 790-90, respectivamente. Os CPs para o ensaio de tração axial foram definidos em função da espessura da placa. Para o ensaio de flexão-em-três-pontos, as dimensões em mm foram de : (129,60 x 13,24 x 5,90) e (126,96 x 13,08 x 5,99) , sob a forma (comprimento x largura x espessura) para as placas sandwich e de mantas, respectivamente. Ambos os ensaios foram realizados na máquina MTS (modelo 810) servo-assistida hidraulicamente, equipada com uma célula de carga de 01 (uma) tonelada. Os ensaios foram executados sob controle de deslocamento, a uma taxa de 1,3mm/min. Foram utilizados em média 05 (cinco) CPs para cada ensaio.

Para o carregamento de flexão-em-três-pontos foram testadas duas configurações do compósito sandwich **CSH** e **CSV**, com o objetivo de se determinar o grau de influência da direção preferencial do **coremat**, nas propriedades mecânicas do material.

Os carregamentos de impactos foram realizados por meio de um martelo impactador do tipo 8202 (BRÜEL & KJAER), cuja massa efetiva pode ser variada. As massas utilizadas neste mecanismo de impacto foram de 490,3 e 790,3 g. Esse martelo possui um transdutor de força tipo 8200 (BRÜEL & KJAER) em sua extremidade, o qual é ligado por um cabo ao

analisador de vibrações 2515 (BRÜEL & KJAER) que fornece a aceleração do impacto aplicado no corpo de prova. A força real de impacto é sempre maior do que a força medida pelo transdutor devido a inércia da extremidade. Logo, o carregamento real aplicado é obtido utilizando-se a Equação (1):

$$F_a = M_{cp} \times A \times \frac{M}{(M - M_t)} \quad (1)$$

onde **F_a** é a carga real aplicada ao corpo de prova (N), **M_{cp}** é a massa do corpo de prova (Kg), **M** é a massa efetiva do martelo mais a da extremidade (Kg), **M_t** é a massa efetiva da extremidade (Kg) e **A** a aceleração medida pelo analisador de vibrações (m/s²).

Devido a geometria da extremidade do martelo, o impacto aplicado é do tipo pontual. Com a finalidade de adaptar o martelo impactador às condições adequadas de ensaio, ou seja, para que existisse um controle efetivo sobre a carga de impacto aplicada, uma forma eficiente encontrada foi o controle sobre o incremento angular ($\Delta\theta$) aplicado ao corpo de prova. Para tanto um mecanismo de impacto foi desenvolvido, onde os carregamentos de impacto foram aplicados segundo um incremento angular ($\Delta\theta$) constante de 20° para todos os corpos-de-prova até a troca da massa do martelo. A partir daí, o incremento angular passou a ser de 10° de maneira a se obter um resultado mais exato do dano causado nos mesmos. Os CPs foram ensaiados em condição de apoio bi-apoiada, enquanto definiu-se suas dimensões como sendo 70 x 30 x 7,5 (comprimento x largura x espessura)mm para os casos das placas de manta e sandwich.

3. RESULTADOS

As distintas composições e configurações apresentadas, foram submetidas a ensaios mecânicos de impacto de baixa velocidade, tração axial e flexão-em-três-pontos. Para cada composição analisou-se o comportamento mecânico (resistência e rigidez) e o respectivo mecanismo de dano, de forma a identificar sua influência nas propriedades mecânicas do material.

Em primeiro plano serão apresentados os resultados referentes ao mecanismo de fratura para cada tipo de ensaio realizado, identificando o tipos de tensões interlaminares responsáveis pela fratura final do material. Em segundo plano serão discutidos os parâmetros envolvidos como: tensão de ruptura, intensidade da deformação na fratura e os módulos elásticos, para os ensaios de tração axial e flexão-em-três-pontos. Para os ensaios de impacto serão apresentados os resultados da energia de ruptura para as placas em estudo.

Em última análise um breve estudo comparativo é realizado de forma a aglutinar os resultados obtidos, na comprovação da influência do tipo de configuração e composição dos laminados no seu desempenho mecânico.

3.1 Mecanismo de dano

A fratura mecânica observada nos ensaios de tração axial, apresentou características comuns como microfissuras transversais e desaderência fibra/matriz, porém com modos de propagação distintos, dependendo do tipo de composição das placas sendo que para o caso dos ensaios de tração foi testada apenas a configuração CSV, conforme exposto a seguir.

Os compósitos constituídos por manta CM e sandwich CS apresentaram semelhança no comportamento à fratura. Em ambos foram observadas microfissuras transversais à direção de aplicação da carga, distribuídas ao longo de todo o comprimento do corpo de prova. Surgidas

inicialmente de forma superficial, com o progressivo aumento da carga verificou-se a propagação das mesmas pela espessura do corpo de prova, figura 1. Para as placas sandwich estas fissuras localizaram-se apenas nas camadas de manta (externas), comprovando-se a presença de tensões interlaminares nos bordos livres, devido a diferença de propriedades entre as camadas constituintes (Herakovich, C. T. –1998). Nesse caso, não foi possível observar se todas as microfissuras surgiram inicialmente nos bordos livres.

As microfissuras transversais apresentaram-se bastante espaçadas, em média de 2 cm a distância entre elas, reduzindo esta distância para 2 mm na região de fratura final. Em ambas as configurações registrou-se a ruptura total dos corpos de prova com a presença de desaderência fibra/matriz nesta região, ver Figura 2.

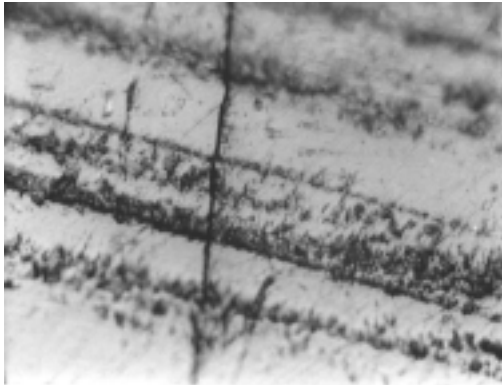


Figura 1- Microfissuras transversais - placa sandwich **CS**

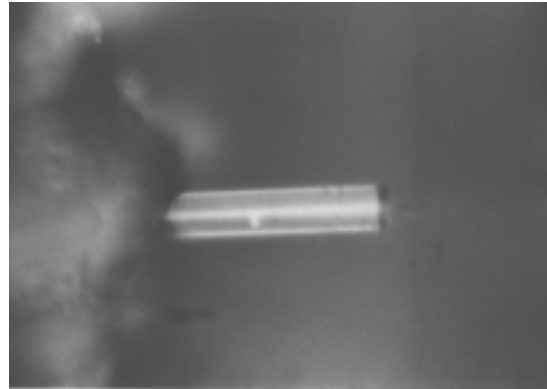


Figura 2 - Desaderência fibra/matriz na região de ruptura- placa Sandwich **CS**

Ainda dentro da análise do mecanismo de dano obtido para os ensaios de tração axial, observou-se que as composições **CM** e **CS** não apresentaram o fenômeno da delaminação.

Para todas as placas, a superfície de fratura final apresenta um aspecto bastante irregular, semelhante ao da fratura de um material frágil.

Diferente dos resultados obtidos para os ensaios de tração axial e descritos anteriormente, o mecanismo de dano para os ensaios de flexão-em-três-pontos mostrou-se distinto e conseqüentemente dependente dos tipos de configurações e composições estudadas.

Para o caso das placas sandwich de configurações **CSH** e **CSV** o mecanismo de fratura observado mostrou-se extremamente localizado (restrito à região de aplicação da carga) e distribuído nas camadas tracionadas (manta) e do **coremat**. O mesmo caracterizou-se pelo surgimento de microfissuras transversais ao comprimento do corpo de prova, as quais atravessam toda a camada tracionada e do **coremat**.

Com o aumento progressivo da carga aplicada as microfissuras se transformam em fendas propagando-se longitudinalmente na interface manta/**coremat**, originando a delaminação, ver figura 3.

Para a configuração **CSV** foi registrada uma delaminação mais intensa que a **CSH**. Foram observadas ruptura de fibras e desaderência fibra/matriz na região de fratura final dos corpos de prova. Nenhum dano foi registrado nas camadas comprimidas, sendo desta forma as tensões de tração e cisalhamento (delaminação) responsáveis pela fratura das placas sandwich.

O mecanismo de dano observado nos compósitos constituídos de mantas **CM** foi bastante simples, limitando-se ao surgimento de microfissuras transversais localizadas na região tracionada e propagando-se longitudinalmente na linha neutra. Não foi observado nenhum dano na região comprimida dos corpos de prova.



Figura 3- Delaminação na interface manta/coremat - placa sandwich CSH

Todo o processo de fratura se restringe à região de aplicação da carga. O dano mais intenso registrou-se na região tracionada caracterizado pelo “rasgamento” da mesma, resultando assim, nas tensões de tração como responsáveis pela ruptura final do material.

De um modo geral, para o ensaio de flexão-em-três-pontos não houve ruptura total dos corpos de prova.

O mecanismo de dano observado nas placas sandwich CS para o caso do impacto pontual, caracterizou-se inicialmente pelo surgimento de microfissuras transversais em relação ao comprimento do corpo de prova. Estas microfissuras localizaram-se na camada tracionada (manta), as quais se encontram uniformemente espaçadas uma das outras, conforme pode ser observado através da Figura 4. Com o aumento do número de impactos verificou-se em alguns corpos de prova, o aumento do número de microfissuras transversais na camada tracionada.

Tais microfissuras originaram-se na região pontual do impacto e se propagaram até as extremidades. Além destas microfissuras transversais, algumas outras isoladas surgem na camada do **coremat**, inclinadas um ângulo de 45° com relação ao eixo longitudinal, conforme a figura 5. Estas inclinações são devido ao cisalhamento nesta região. A simetria do laminado e a relação do carregamento de impacto de baixa velocidade com o ensaio de flexão-em-três-pontos, faz com que a camada do **coremat** coincida com a linha neutra no corpo de prova.

Com o aumento do número de impactos, as microfissuras a 45° transformaram-se em fendas avançando até a região da manta, as quais propagando-se na interface manta/**coremat** originam a delaminação.

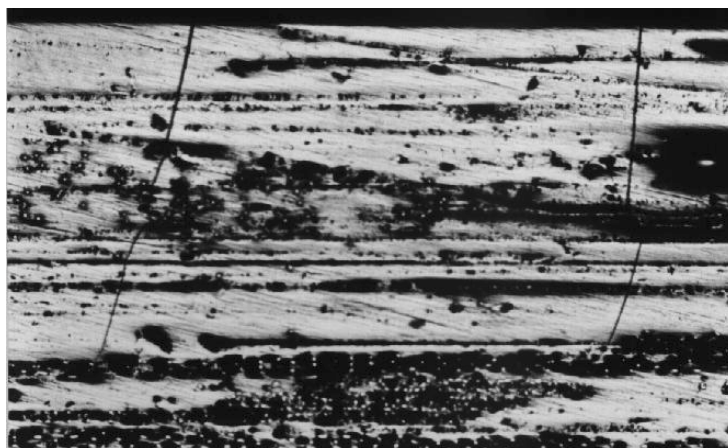


Figura 4 – Microfissuras transversais na região tracionada – Impacto pontual - CS

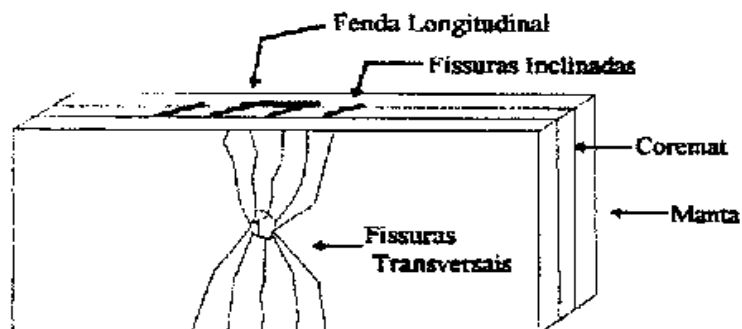


Figura 5- Microfissuras transversais – Impacto Pontual - CS

Ressalta-se aqui que devido as peculiaridades do mecanismo de impacto, não houve fratura total da amostra, sendo necessário a utilização do ensaio Charpy para a obtenção da energia de ruptura do material.

Para o caso da manta **CM** a formação do dano se dá de maneira bastante simples e estável. A aplicação do primeiro impacto provoca nos CPs um dano caracterizado por microfissuras transversais em relação ao eixo longitudinal, localizadas na face tracionada, as quais encontram-se uniformemente espaçadas uma das outras. A partir do segundo impacto ocorre um aumento do número de microfissuras transversais na face tracionada, sem no entanto, para o caso da manta, se observar a transformação das mesmas em fendas. Isso ocorre até a ruptura total das amostras. A identificação do modo de fratura para a manta ocorreu na região tracionada, enquanto que no sandwich a delaminação na interface manta/coremat foi o agente responsável pela identificação do modo de fratura destes elementos estruturais. Em uma análise dos resultados obtidos nos ensaios de impacto, observou-se uma nítida influência da composição dos materiais.

3.2 Comportamento mecânico / tração axial

Na análise do comportamento mecânico das compósitos **CM** e **CS**, ficou constatado a influência da composição nos resultados obtidos, já que os mecanismos de dano apresentaram-se semelhantes para esse tipo de ensaio mecânico.

Para os carregamentos de tração axial todas as configurações apresentaram características comuns como o comportamento elástico até a fratura e a recuperação do módulo elástico durante o carregamento. Esta recuperação foi de 25,5% para **CS** e 12% para **CM**, conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Variação nas propriedades mecânicas à tração axial

Composição	Tensão de Ruptura (MPa)	Módulo de elasticidade inicial (GPa)	Módulo de elasticidade final (GPa)	Deformação de Ruptura (%)
Manta	84,78	0,798	0,912	9,33
Sandwich CS	51,39	1,021	1,281	4,01

Os demais parâmetros como tensão de ruptura, módulos elásticos e deformação na ruptura, apresentaram intensidades diferentes. As figuras 6 e 7 mostram a resposta destes materiais frente ao ensaio de tração axial.

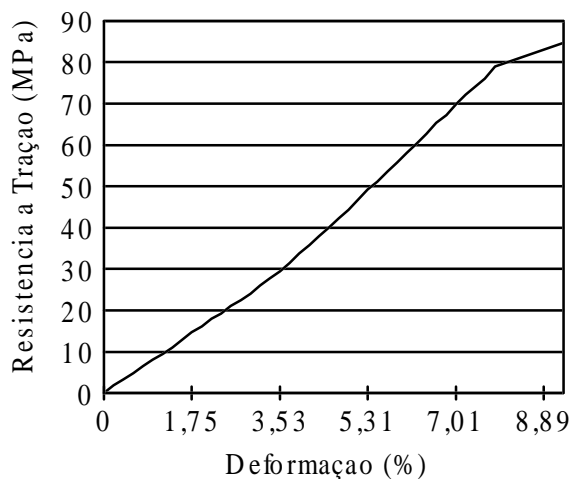


Figura 6 – Diagrama σ_{ϵ} - tração/ CM

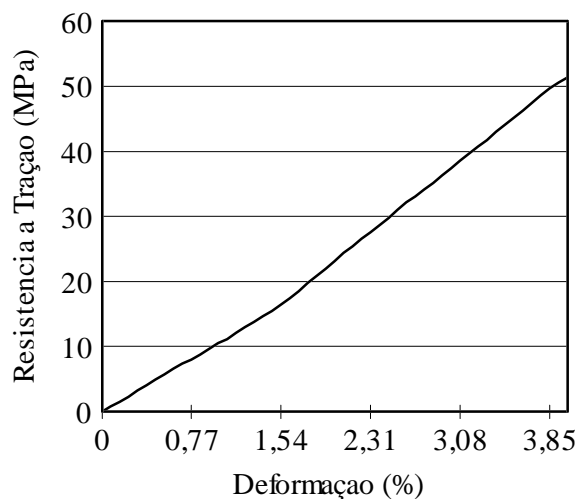


Figura 7 – Diagrama σ_{ϵ} - tração/ CS

Efetando um estudo comparativo dos dados apresentados na Tabela 1, verifica-se que as amostras de **CM**, apresentam maiores intensidades no valores da tensão última e deformação de ruptura, 39,3 % e 55,5 %, Respectivamente, quando comparados aos valores da amostra de **CS**. Entretanto, foi constatado um aumento nos valores dos módulos elásticos axiais do **CS** em comparação às amostras de **CM**. Os aumentos registrados nos valores dos módulos foram em média de 22 % para o módulo inicial e de 29 % para o módulo final. A presença do recheio (**coremat**) resultou no aumento da rigidez dos compósitos sandwich.

3.3 Comportamento mecânico / flexão-em-três-pontos

As respostas das configurações / composições **CM**, **CSV** e **CSH** aos ensaios de flexão-em-três-pontos apresentaram uma característica semelhante ao que se refere ao comportamento elástico até a fratura final, ver Figuras 8, 9, e 10. Para as amostras estudadas o módulo elástico na flexão permanece praticamente constante durante o carregamento.

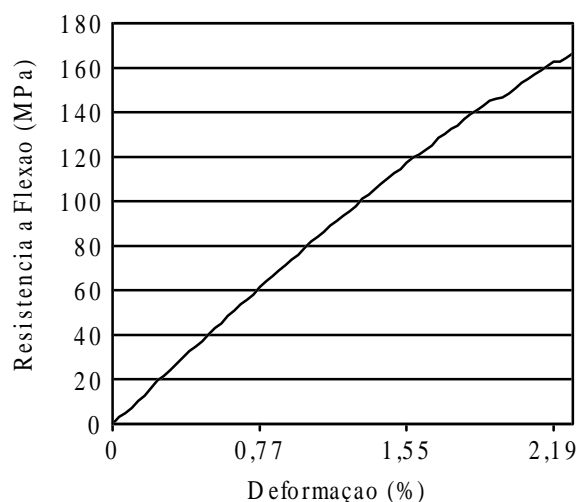


Figura 8 - Diagrama σ_{ϵ} - flexão / CM

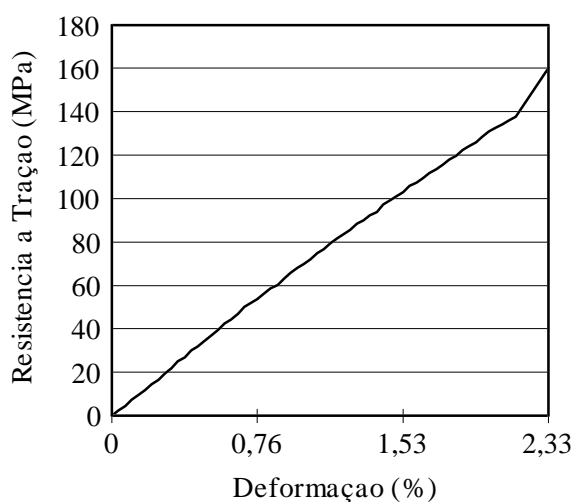


Figura 9 - Diagrama σ_{ϵ} - flexão / CSV

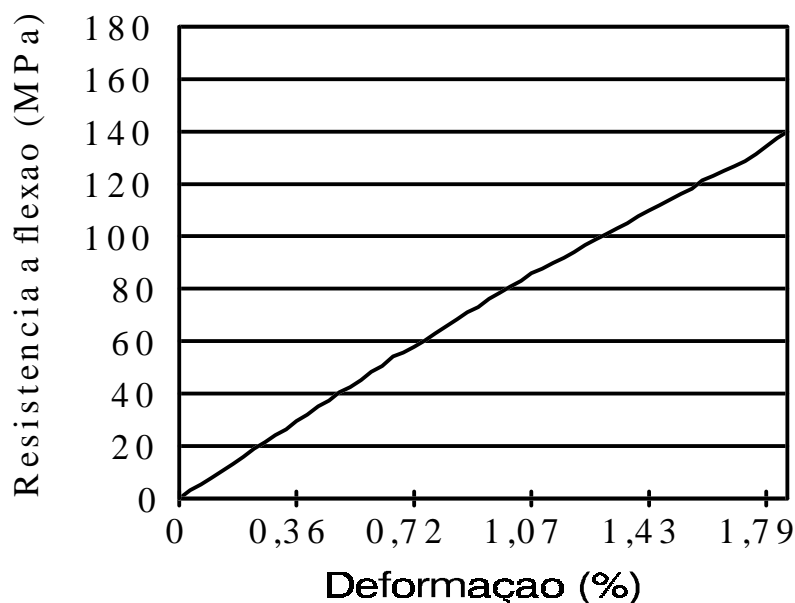


Figura 10 - Diagrama $\sigma \times \epsilon$ - flexão/ CSH

A tabela 2 mostra a influência da composição e da configuração nas intensidades dos valores da tensão de ruptura, deflexão na ruptura e módulo elástico das amostras ensaiadas. Aqui a influência da configuração se resume no estudo comparativo entre **CSV** e **CSH**.

As placas constituídas de mantas **CM**, apresentaram pequena superioridade na tensão de ruptura, da ordem de 3,8 % quando comparada à do **CSV** e 17,8 % à do **CSH**. No entanto, a presença do **coremat** nas placas sandwich resultou em um aumento na rigidez à flexão para a configuração sandwich **CSH**.

A maior deflexão ocorrida ficou com a configuração **CSV** que conseqüentemente possui o menor módulo elástico na flexão. Observa-se que a presença do recheio/**coremat** só favorece a rigidez do laminado se o mesmo é colocado perpendicularmente à direção de aplicação da carga.

Tabela 2 –Variação nas propriedades mecânicas à flexão-em-três-pontos

Material	Tensão de Ruptura (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Deformação de Ruptura (%)
CM	166,43	7,46	2,29
CSH	136,74	7,78	1,85
CSV	160,06	6,31	2,33

Na análise dos resultados obtidos nos ensaios de tração e flexão-em-três-pontos, foi observada uma pequena dispersão (de 2 a 3%) nos valores finais, referente à tensão de ruptura, não sendo necessário a realização de um levantamento estatístico .

3.4 Resistência ao impacto

O mecanismo de impacto desenvolvido para o monitoramento do mecanismo de dano, ver maiores detalhes em (Andrade et al., 1998 e Margaria et al., 1998), foi insuficiente para a determinação da energia de ruptura das configurações em estudo. Para tanto utilizou-se o ensaio CHARPY.

Durante os ensaios de impacto observou-se que para os compósitos sandwich **CSH** ocorria uma certa desaceleração do impacto aplicado já próximo à ruptura final das amostras, ver Figura 11. Provavelmente, isso se deve à perda de rigidez dos corpos de prova, provocada pelo desenvolvimento da delaminação, as quais funcionam como um elemento amortecedor de choques aplicados no transdutor de forças.

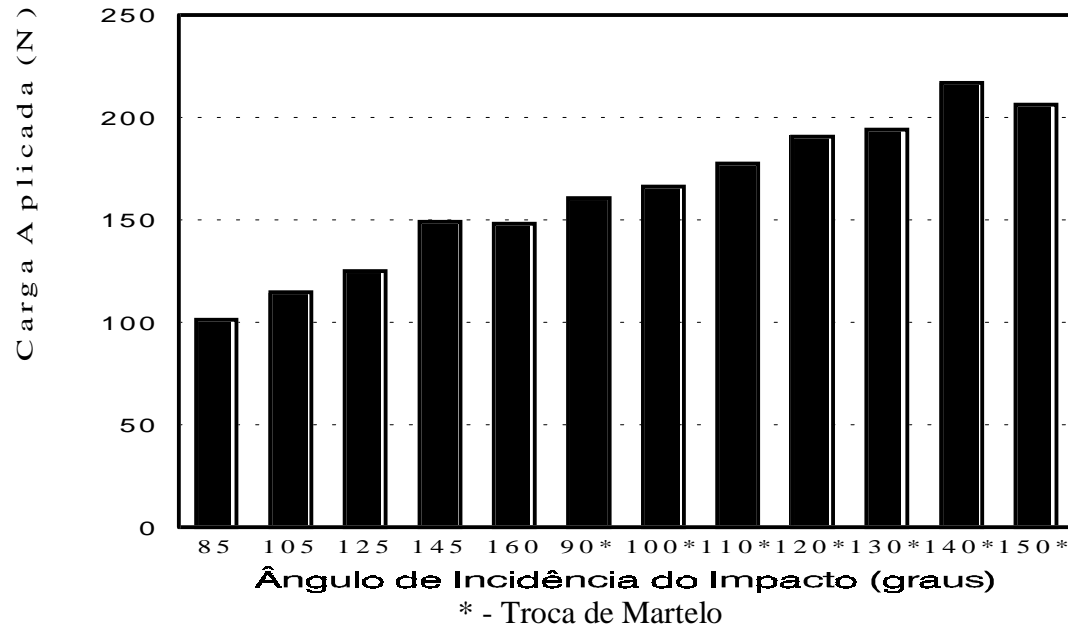


Figura 11 – Desaceleração da carga de impacto – compósito sandwich CS

A Tabela 3 mostra os resultados obtidos para a energia de ruptura das composições **CM** e **CS** ensaiadas. É nítida a superioridade em torno de 86 %, das placas constituídas de mantas sobre as placas sandwich. O fenômeno da delaminação presente nas placas sandwich enfraquecem o material frente ao carregamento de impacto.

Tabela 3 – Energia de ruptura – Ensaio Charpy

Configuração	Carga Inicial (N)	Energia de Ruptura (J)
Manta	107,69	18,78
Sandwich	101,23	10,09

Conclusão :

1. Nos ensaios de tração axial, o parâmetro referente à composição do material, influenciou apenas nas propriedades de resistência e rigidez dos compósitos estudados. Observou-se uma maior resistência para o **CM**, entretanto houve um aumento do módulo elástico para as placas sandwich. O mecanismo de dano apresentou características semelhantes.
2. Para os ensaios de flexão-em-três-pontos, os parâmetros referentes à composição e configuração, influenciaram tanto no comportamento mecânico dos materiais envolvidos, quanto em seus mecanismos de dano. A presença do **coremat** aumentou a rigidez (módulo elástico) apenas para a configuração **CSH**. A configuração **CSV** apresentou uma delaminação mais intensa que a **CSH**, e conseqüentemente um menor desempenho mecânico.

3. Nos resultados obtidos para o ensaio de impacto de baixa velocidade, o parâmetro da composição influi tanto no mecanismo de dano quanto na energia de ruptura. A presença da delaminação nas placas sandwich, originou um considerável decréscimo (86 %), na energia de ruptura destes materiais.

Agradecimentos

À HENFIBRA Indústria comércio Ltda. que nos forneceu o material necessário à pesquisa. A CAPES pelo apoio financeiro como bolsista.

REFERÊNCIAS

- Allen, D.H., 1994, Damage evolution in laminates- Damage mechanics for composite materials, vol. 9.
- Andrade, R. J. B. G., Aquino, E.M.F., 1998, Estudo do impacto de baixa velocidade em placas sandwich de plástico reforçado, V CEM-N/NE.
- Herakovich, C.T., 1998, Mechanics for fibrous composites, John Willey & Sons Inc., N. York.
- Kalankarov, A.L., 1992, Composites and reinforced elements of construction, John Willey & Sons Publisher, N. York.
- Kim, J.K. & Yu, T.X., 1998, Impact response and Dinamic Failure of composite and laminate materials, Ed. Key Engineering Materials, vol. 141 -143.
- Lee, L.I. & Fan, Y.I., 1996, Bending and vibration analysis of composite sandwich plates, computer & structures, pp. 103-112.
- Margaria, G., Aquino, E.M.F., 1998, Identificação do modo de fratura de compósitos poliéster / vidro-E, 13º CBCIMAT.
- Spragg, C. J. & Drzal, T.L., 1996, Fiber, matrix, and interface properties, ASTM-STP/290.

MECHANICAL PROPERTIES AND THE DAMAGE MECHANISM IN FIBROUS COMPOSITE MATERIALS

Abstract. *This paper presents an investigation on the mechanical properties and the damage mechanism of fibrous composite materials of sandwich type, which are made by reinforced plastic and glass fiber (PRFV). The composites were submitted to several mechanical tests, such as: capacity to resist impact, ultimate tensile strength and 3 points-based bending strength. Each test allowed the authors to understanding how the parameters of the configuration (layout) and the composition of the laminate material influences its properties and the fracture mechanism. The composition parameters concern with the possibility of an intermediate “core layer” (Coremat Firet-xx) to be present in the composite based laminate material. Taking into account the Coremat layer, its orientation angle was analysed (0° and 90°), characterizing different configurations of sandwich plates. This orientation refers to the load direction for the 3 points-based bending strength test. In order to make it possible to keep track of the damage mechanism during the impact test, a particular equipment, consisted of a sensitive hammer type 8202 (BRÜEL & KJAER) linked with a vibration appliance 2515 (BRÜEL & KJAER), was built. During all the tests, the damage mechanism was monitored by using an optic microscopy.*

Key-words: Composite sandwich, Mechanical properties, Damage mechanism.