

# Caracterização mecânica do compósito PVC/fibra de coco pelos métodos de emissão acústica e de correlação digital de imagem

## *Mechanical characterization of composite PVC/coconut fiber by methods of acoustic emission and digital image correlation*

L. C. G. Pennafort Jr.<sup>a,\*</sup>, W. L. R. de Queiroz<sup>a</sup>, R. N. de Codes<sup>b</sup>, E. P. de Deus<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 60455-760 Fortaleza, CE, Brasil

<sup>b</sup>Universidade Federal Rural do Semi-Árido. Departamento de Ciências Ambientais e Tecnológicas 59625-900 - Mossoro, RN, Brasil

### Resumo

Com os crescentes movimentos ecológicos em todo o mundo com o objetivo de poupar os recursos naturais, as novas classes de materiais foram surgindo, tais como compósitos de fibra natural. No entanto, quando estes polímeros são usados, novas propriedades são agregadas. Este trabalho apresenta o uso de técnicas de emissão acústica e correlação digital de imagem, a caracterização mecânica de um compósito preparado a partir de materiais totalmente reciclados em que a matriz é o poli(cloreto de vinilo), reforçado de fibra reciclada extraída da casca do coco. De acordo com a metodologia proposta foram obtidas as principais propriedades mecânicas do novo material: o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson.

© 2014 Sociedade Portuguesa de Materiais (SPM). Publicado por Elsevier España, S.L. Todos os direitos reservados.

*Palavras chave:* CDI; Emissão Acústica; Compósito Polimérico; Fibra de Coco; Caracterização Mecânica.

### Abstract

With the growing worldwide ecologic movements aiming at saving natural resources, new classes of materials have been coming up, such as natural-fiber composites. However, when these polymers are used, new properties are aggregated. This work presents the use of techniques of acoustic emission and digital image correlation in the mechanical characterization of a composite prepared from fully recycled materials where the matrix is thermoplastic polyvinyl chloride recycled fiber reinforced extracted coconut shell. According to the proposed method were obtained from the principal mechanical properties of the new material: Young's modulus and Poisson's ratio.

© 2014 Sociedade Portuguesa de Materiais (SPM). Published by Elsevier España, S.L. All rights reserved.

*Keywords:* DIC; Acoustic Emission; Polymeric Composite; Coconut fiber; Mechanical Characterization.

## 1. Introdução

A proposta ecológica mundial de poupar e preservar os recursos naturais do planeta está sendo um incentivo ao desenvolvimento de novas classes de materiais, dentro deste cenário surgem os compósitos totalmente recicláveis reforçados com fibras naturais.

Os compósitos reforçados com fibras naturais apresentam propriedades de grande relevância, como elevada resistência mecânica e assinalável leveza [1]. Diversos termoplásticos estão sendo usados como matrizes em compósitos reforçados com fibras naturais, entre os mais comuns estão o polietileno e o polipropileno [2]. Estudos mais recentes destacam também o poli(cloreto de vinilo) (PVC) [2-4] e entre as fibras naturais mais usadas sobressaem-se as fibras de sisal, curauá, bambu, pinus, bananeira, coco entre outras [3].

\* Corresponding author

E-mail address: [luizpennafortjr@gmail.com](mailto:luizpennafortjr@gmail.com) (L. C. G. Pennafort Jr.)

Compósitos feitos a partir do PVC reforçado com fibras de coco surgem como uma proposta inovadora de materiais reciclados, sendo as fibras de coco oriundas de resíduos de cocos vazios gerados pelo consumo de água de coco verde, encontrados em grandes quantidades nas regiões costeiras [4,5]. Destacando-se a utilização do PVC por apresentar diversas vantagens quando comparadas a alguns materiais sintéticos, como, altas propriedades mecânicas específicas, biodegradabilidade, reciclabilidade, baixa densidade, não-abrasividade e baixo custo [6,7]; além de sua resina ser atóxica e inerte e ser totalmente reciclável [8].

Diante deste contexto, surge a proposta de um estudo utilizando duas técnicas relativamente simples e distintas para auxiliar a caracterização mecânica de um novo compósito totalmente reciclado, onde a matriz termoplástica é de PVC reciclado reforçado com fibra de coco extraída da casca do coco. Onde uma das técnicas é a Emissão Acústica e a outra a correlação de imagem digital 2D.

### 1.1. Correlação Digital de Imagens

Correlação Digital de Imagens (CDI) é um método óptico que emprega técnicas de rastreamento e registro de mudanças em imagens para medições precisas em domínios 2D e 3D. Esta é uma técnica muito utilizada em uma série de aplicações da ciência e engenharia para medir campos cinemáticos (deslocamentos e deformações) a partir da comparação de imagens em instantes diferentes de um processo [9].

A utilização da técnica de CDI compreende basicamente três etapas consecutivas:

- Preparação do corpo de prova, onde o mesmo precisa ser limpo para melhor aderência da tinta que será aplicada de forma a obter uma textura, ou seja, um campo onde existirá uma espécie de malha;
- Registro de imagens através de uma máquina fotográfica, da superfície do corpo de prova, em diferentes instantes ao longo do carregamento;
- Processamento das imagens obtidas, utilizando um programa de computador com os algoritmos de correlação de imagens implementados, obtendo-se os campos cinemáticos (deslocamento e deformação) desejados.

Na figura 1 é possível visualizar o esquema típico de uma configuração experimental para utilização da técnica de correlação de imagens digitais.

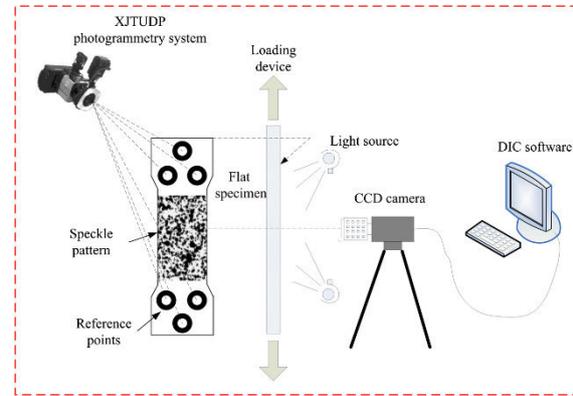


Fig. 1. Exemplo da configuração de um dispositivo de aquisição de imagens para o uso da técnica de correlação digital de imagens [10].

#### 1.1.1. Processamento de imagem

O processamento de imagem pode ser definido como sendo a área que abrange as operações realizadas sobre imagens que resultam em informações destas imagens [11].

No processo de digitalização de uma imagem ocorre uma operação chamada de discretização da imagem, ou seja, ela passa de uma imagem contínua representada por uma função real, onde  $f(x, y): R^+ \rightarrow R^+$ , para uma imagem discreta, ou seja,  $x$  e  $y$  passam a assumir valores inteiros, dessa maneira  $f(x, y): Z^+ \rightarrow R^+$ . As operações realizadas sobre este tipo de imagem são conhecidas como processamentos digitais de imagem (PDI).

No PDI trabalha-se basicamente com dois tipos de informações: visual e descritiva. A informação visual corresponde a imagem como ela é vista. Enquanto que a informação descritiva refere-se ao modelo matemático que representa a imagem [11].

Qualquer imagem digital pode ser representada por sua matriz de luminosidade. Esta pode ser considerada a informação descritiva desta imagem. A matriz de luminosidade pode ser representada através de uma função bidimensional discreta  $f(x, y)$ , sendo que cada combinação das variáveis  $x$  e  $y$  determina a posição de um pixel específico e o valor da função  $f(x, y)$  a intensidade luminosa deste pixel. A Figura 2 mostra o exemplo de uma matriz de luminosidade de imagem monocromática.

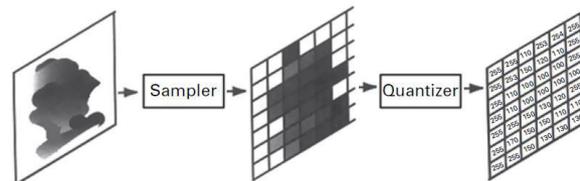


Fig. 2. Imagem monocromática e sua respectiva matriz de luminosidade.[12]

As operações que caracterizam um PDI são realizadas sobre a informação descritiva da imagem, ou seja, são realizadas sobre a matriz de luminosidade desta imagem.

No caso da deformação a determinação do campo de deslocamentos é realizada através da correlação entre duas imagens da mesma região: a imagem de referência, que corresponde à imagem do corpo não deformado, e a imagem alvo, que corresponde à imagem do corpo deformado. A correlação é feita em uma área específica ao redor de cada ponto de controle, como mostrado na Figura 3. Os pontos de controles são definidos a partir de uma grade gerada na superfície do corpo onde os deslocamentos serão determinados. Cada área ao redor dos pontos de controles serão definidas como funções bidimensionais que serão utilizadas na correlação.

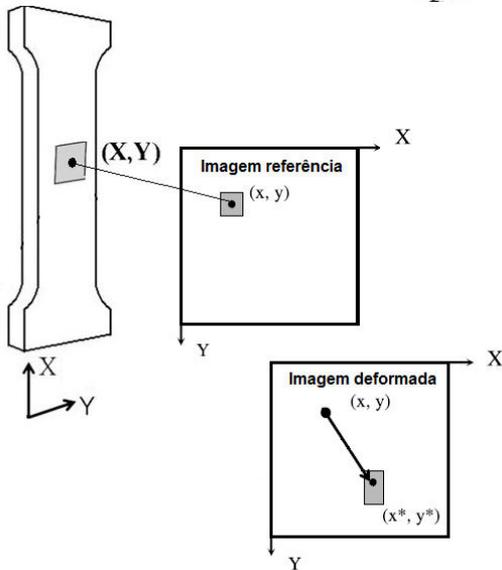


Fig. 3. Correlação entre as imagens.

A função que corresponde à área de correlação em um ponto de controle na imagem de referência pode ser representada por  $I_0(x, y)$ , enquanto que  $I_n(x^*, y^*)$  corresponde à função da área de correlação em um ponto de controle na imagem alvo. Assume então a seguinte relação entre as imagens:

$$I_0(x, y) = I_n(x + u_1, y + u_2) \quad (1)$$

Os deslocamentos  $u_1$  e  $u_2$  são então determinados a partir do coeficiente de correlação cruzada normalizado  $C$ , que pode ser determinado pelas seguintes equação:

$$C = \frac{\sum_{u_1, u_2} [I_0(x, y) I_n(x + u_1, y + u_2)]}{\left[ \sum_{u_1, u_2} I_0(x, y)^2 \cdot \sum_{u_1, u_2} I_n(x + u_1, y + u_2)^2 \right]^{1/2}} \quad (2)$$

Considerando a equação acima, os deslocamentos  $u_1$  e  $u_2$  são obtidos pela posição na qual o coeficiente de correlação apresenta seu valor máximo, ou seja:

$$C(u_1, u_2) = \max[C] \quad (3)$$

Assim, a correlação é realizada em função das componentes de deslocamento  $(u_1, u_2)$  e seus gradientes.

### 1.2. Análise por Emissão Acústica

A técnica de Emissão Acústica (EA) consiste em um ensaio não destrutivo, usado nos mais variados campos, desde a indústria à saúde. O ensaio de EA permite analisar um grande número de informações, devido à elevada sensibilidade da técnica. O principal objetivo da presente investigação foi caracterizar o material compósito através da medição da velocidade extensional,  $C_e$  [13]. A velocidade foi medida, Eq. 4, a partir da diferença de tempo ( $\Delta t_x$ ) de chegada do sinal, gerado pela quebra de grafite da lapiseira, entre dois sensores sucessivos, em distância fixa ( $x$ ), no corpo de prova do compósito, conforme figura 4.

$$C_e = \frac{x}{\Delta t_x} \quad (4)$$

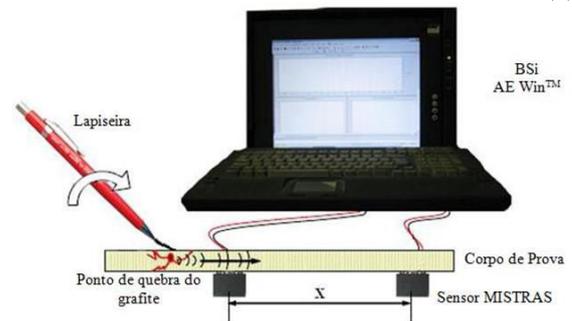


Fig. 4. Configuração do sistema de aquisição de dados para o uso da técnica de Emissão Acústica.

## 2. Parte experimental

### 2.1. Compósito

O PVC oriundo de diversas fontes (aterro, construção civil, etc.) adquirido de cooperativas de reciclagem (Figura 5a), foi reprocessado por reciclagem mecânica, seguindo as etapas de lavagem, secagem e moagem, originando a matéria-prima figura 5b.



Fig. 5. Reciclagem mecânica. a) Fardos com resíduos de PVC separados; b) resíduo de PVC micronizado.

As fibras do coco de cor avermelhada, figura 6, sofreram processo físico de moagem, atingindo dimensões entre 20 – 25mm de comprimento.



Fig. 6. Fibras de coco trituradas doadas pela Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária).

Primeiramente o PVC reciclado e micronizado (matéria-prima) sofreu a incorporação de aditivos (lubrificante Baerolub®, estabilizante térmico Baeropan® e pigmento Transcor®) no misturador 50cv de baixa rotação 1750rpm, formando o composto, que em seguida foi inserido na extrusora LGMT dupla rosca 75mm, juntamente com a fibra de coco, na proporção de 25pcr, aproximadamente 20%, com perfil de temperaturas nas zonas da extrusora de 135 a 170°C, onde foi realizada a conformação do material na forma de tubo com diâmetro externo de 38mm e espessura da parede de 3mm.

## 2.2. Análise do Compósito

### 2.2.1. Ensaio de densidade relativa

A determinação da densidade relativa do compósito ( $\rho_{cp}$ ) seguiu os procedimentos da norma ASTM D 792 - *Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement*. Onde a determinação da densidade de plásticos sólidos baseia-se na determinação da mudança no peso do Corpo de Prova (CP) medido no

ar e imerso em um líquido, calculado de acordo com a Eq. 5.

$$\rho_{cp} = \frac{m_{cp} \rho_l}{m_{cp} - m_{cpl}} \quad (5)$$

onde:  $m_{cp}$  = massa do CP no ar, em kg;

$m_{cpl}$  = massa do CP imerso no líquido, em kg;

$\rho_l$  = densidade do líquido, em kg/m<sup>3</sup>.

Para a realização do ensaio foram utilizados uma balança analítica e álcool etílico absoluto com densidade de 789 kg/m<sup>3</sup>.

### 2.2.2. Ensaio de Emissão Acústica

Para o ensaio de EA foi utilizado um corpo de prova do compósito com dimensões de 200mm x 20mm x 3mm, retirado do tubo, onde a velocidade foi medida a partir do sinal gerado pela quebra de grafite da lapiseira com o auxílio do equipamento BSi AE Win<sup>TM</sup> acoplado a sensores MISTRAS posicionados sucessivamente a uma distância de 15mm entre eles conforme, figura 7.



Fig. 7. Disposição dos sensores para captação do sinal, Emissão Acústica.

### 2.2.3. Ensaio de Tração com a utilização da Correlação de Imagem Digital.

Foram produzidos 05 corpos de prova na forma de “halteres”, com base na norma D638 - *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*, todos obtidos por corte diretamente do material extrudido, suas dimensões encontram-se de acordo com o especificado na referida norma para amostras do Tipo I. O ensaio de tração foi realizado de maneira totalmente computadorizada, utilizando-se a máquina de ensaio modelo EMIC, com velocidade de deslocamento de 5 mm/min, célula de carga com capacidade máxima de até 300 kN.

A utilização da técnica de correlação de imagens necessitou de uma preparação da superfície do corpo

de prova, pois há a necessidade de existir um padrão bem estabelecido e não totalmente uniforme. A maneira mais comum para criar estes padrões é adotando-se a aplicação de uma tinta por spray na superfície a ser analisada (Figura 8a), de modo a gerar uma textura, ou seja, um campo onde existirá uma espécie de malha.

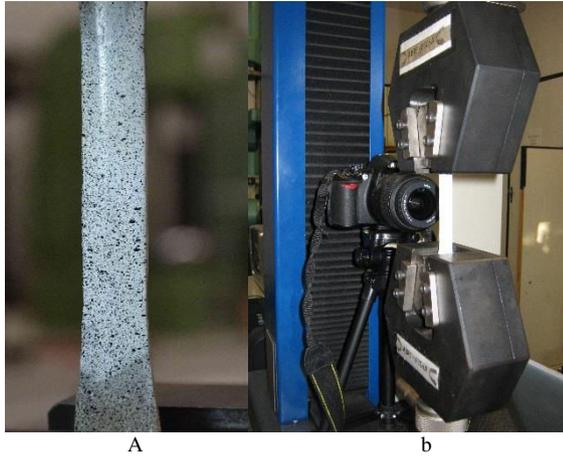


Fig. 8 - Ensaio Mecânico com Correlação de Imagem Digital: a) Corpos de prova, com superfície pintada, utilizados para medição e b) disposição dos equipamentos para registro das imagens.

Existem certos cuidados que devem ser tomados para a aplicação de tal jato de tinta, pois o controle do tamanho das gotas de tinta é um parâmetro importante para a qualidade dos resultados obtidos pela análise utilizando a técnica de correlação de imagens. A câmara digital utilizada foi do tipo profissional (NIKON-D3100) com uma grande resolução para permitir um melhor aproveitamento da técnica CDI (Figura 8b). Ela foi fixada a um tripé que permitiu o posicionamento perpendicular à superfície que foi analisada. Foi utilizado o software *Camera Control 5.2* da *Diyphotobits* no computador ligado à câmara, que controlava os intervalos de tempo de captura das fotos, pré definidos pelo usuário no programa.

Uma grande variedade de funções de formas pode ser adotada para fazer um mapeamento dos deslocamentos. Entre elas, as funções de forma utilizadas nos métodos dos elementos finitos são particularmente atraentes devido à relação que elas proporcionam entre a medição do campo de deslocamento e uma modelagem numérica. Como a imagem é normalmente dividida em pixels, é conveniente escolher uma forma quadrada ou retangular para cada elemento. Por esse motivo os pesquisadores de Cachan, desenvolvedores do CORRELI<sup>Q4</sup> [14], escolherem a função linear de quatro nós (Q4) utilizada nos elementos finitos para definir este mapeamento.

### 3. Resultados e Discussão

Os resultados dos ensaios de tração para o compósito são apresentados na Tabela 1, onde o programa *Mtest*, software conectado a máquina de ensaio, forneceu a curva tensão-deformação, figura 9, bem como os valores das tensões máxima ( $\sigma_{max}$ ), de escoamento ( $\sigma_{esc}$ ) e de rutura ( $\sigma_{rut}$ ), além da deformação na tensão de rutura.

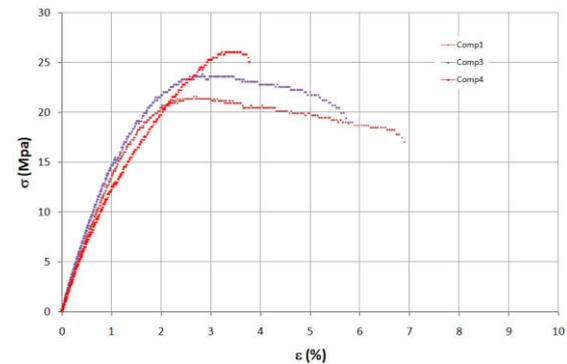


Fig. 9. Gráfico tensão x deformação para corpos de prova do compósito.

Contudo para o cálculo do módulo de elasticidade ( $E$ ), foi utilizado a seguinte equação:[15]

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1} \quad (6)$$

Onde:

$\sigma_1$  = tensão em tração para o valor de deformação ( $\epsilon_1$ ) igual a 0,0005 (ou 0,05%)

$\sigma_2$  = tensão em tração para o valor de deformação ( $\epsilon_2$ ) igual a 0,0025 (ou 0,25%)

Tabela 1. Propriedades mecânicas do compósito obtidas pelo ensaio de tração

| Propriedades                              | Valor médio* |
|---|--------------|
| Tensão Máxima $\sigma_{max}$ (MPa)        | 23,8         |
| Tensão de Escoamento $\sigma_{esc}$ (MPa) | 23,8         |
| Tensão de Rutura $\sigma_{rut}$ (MPa)     | 20,3         |
| Deformação na $\sigma_{rut}$ (mm)         | 5,0          |
| Módulo de Elasticidade $E$ (MPa)          | 1634,5       |

\*valor médio de três ensaios.

A figura 9 mostra que o compósito de PVC reciclado reforçado com a fibra de coco apresenta um comportamento típico de materiais frágeis, ou seja, logo que foi iniciado o escoamento, ocorreu rutura do corpo de prova sem uma deformação considerável diferentemente do termoplástico 100% PVC reciclado, de comportamento dúctil, figura 10.

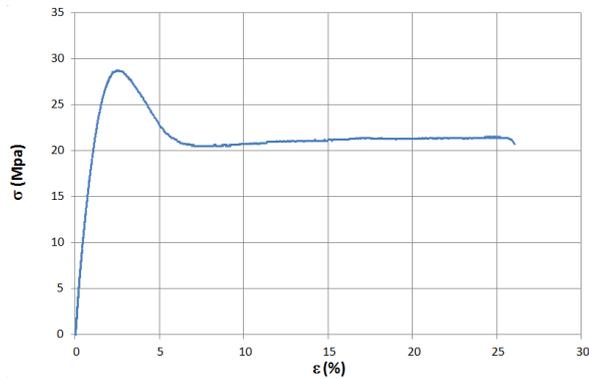


Fig. 10. Gráfico tensão x deformação para termoplástico 100% PVC reciclado.

No entanto, quando comparado a outros compósitos de PVC com fibras naturais na mesma proporção (25 $pcr$ ), foram obtidos alguns resultados semelhantes, aos apresentados pelo compósito com Cumbarú conforme demonstrado na Tabela 2.

Tabela 2. Propriedades mecânicas de compósitos de PVC com fibras naturais

| Compósito (25 $pcr$ $\approx$ 20% de fibra) | Tensão Máxima $\sigma_{max}$ (MPa) | Tensão de Rutura $\sigma_{rut}$ (MPa) | Deformação na $\sigma_{rut}$ (%) | Módulo de Elasticidade $E$ (MPa) |
|---|------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| PVC + Fibra de coco                         | 23,8                               | 20,3                                  | 5,5                              | 1634,5                           |
| PVC + Fibra de bananeira [3]                | 51,6                               | -                                     | 17                               | -                                |
| PVC + Fibra de Cumbarú [16]                 | 28                                 | -                                     | 2,8                              | 1615                             |
| PVC + Fibra de Sisal [2]                    | -                                  | 11                                    | 50                               | 90*                              |

\*Módulo de Elasticidade a 10% de elongação

Com os valores da velocidade extensional ( $C_e$ ) obtida no Ensaio de Emissão Acústica e a densidade ( $\rho$ ) do compósito calculada de acordo com o ensaio proposto anteriormente, aliados a teoria das ondas de Lamb, onde a velocidade extensional é uma função do Módulo de Elasticidade ( $E$ ) do material, expressos conforme equação: [13]

$$c_e = \left[ \frac{E}{\rho(1-\nu^2)} \right]^{1/2} \quad (7)$$

Onde  $\nu$  é o coeficiente de Poisson, propriedade obtida após substituição dos termos demonstrados na Tabela 3.

Tabela 3. Propriedades mecânicas utilizadas no cálculo do coeficiente de Poisson do compósito

| Propriedades                     | Valor médio |
|----------------------------------|-------------|
| Velocidade Ext. (m/s)            | 1146,1      |
| Módulo de Elasticidade $E$ (MPa) | 1634,5      |
| Densidade (kg/m <sup>3</sup> )   | 1337        |
| Coeficiente de Poisson           | 0,263       |

A densidade encontrada foi semelhante a do compósito de PVC/Fibra de bananeira que é de 1353 kg/m<sup>3</sup> [3]. De acordo com a literatura os valores apresentados para o coeficiente de Poisson estão em conformidade, pois para os compósitos o coeficiente de Poisson varia de aproximadamente -0,6 a 2 e para os plásticos de 0,25 a 0,6, conforme disposto na figura 11 [17].

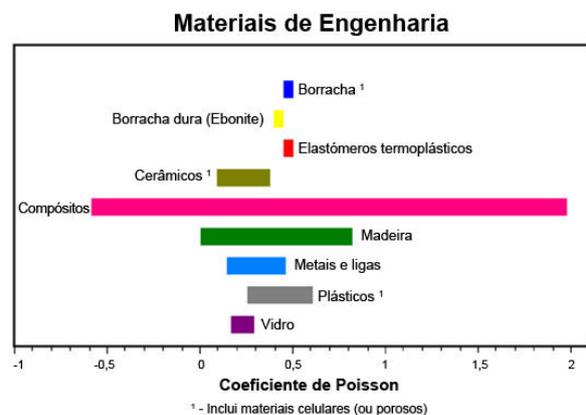
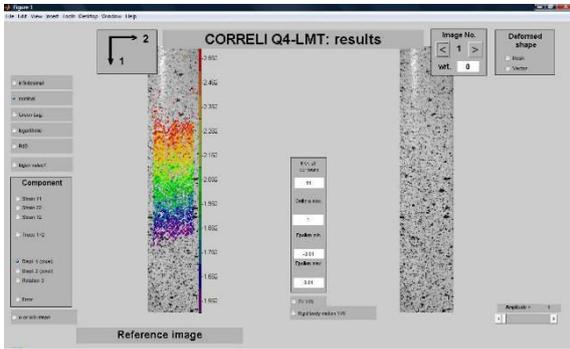


Fig. 11. Gama de variação do coeficiente de Poisson dos diferentes tipos de materiais [17].

Para uma tensão normal de tração está associado um alongamento na direção da tensão (deformação positiva), e respectivas contrações (deformação negativa) nas direções ortogonais, que são proporcionais ao alongamento, tais valores foram obtidos utilizando a técnica da correlação de imagem digital 2D, implementada na forma de um programa em plataforma MATLAB chamado CORRELI<sup>Q4</sup>[14]. Nas figuras 12 e 13, os resultados das deformações via técnica DIC para o ensaio de tração nas direções longitudinal (1) e transversal (2) respectivamente, são apresentados através da interface do programa CORRELI<sup>Q4</sup>.



$$\nu = - \frac{\epsilon_{22}}{\epsilon_{11}} \tag{3.3}$$

Temos, conforme tabela 4, os seguintes valores de Poisson para os diferentes instantes da deformação:

Tabela 4. Coeficiente de Poisson ao longo da deformação, segundo a técnica DIC

|             | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | Valor Médio |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|
| Poisson (v) | 0,182 | 0,159 | 0,159 | 0,271 | 0,331 | 0,221       |

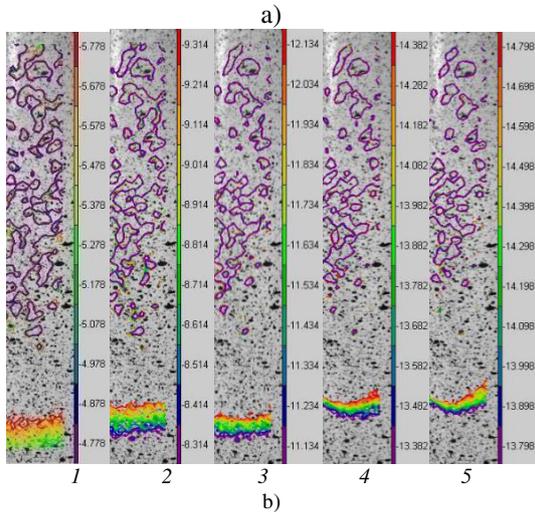


Fig. 12. Imagens do programa CORRELI<sup>Q4</sup> para o ensaio de tração na direção longitudinal: a) interface do CORRELI<sup>Q4</sup> no instante 0 e b) evolução da deformação longitudinal ( $\epsilon_{11}$ ) nos instantes de 1-5 com intervalo de 15s entre as imagens.

O decréscimo de aproximadamente 80% observado na deformação média do compósito até a rutura quando comparado com o material da matriz, figuras 9 e 10, ocorreu devido à restrição ao movimento das cadeias poliméricas da matriz imposta pelo reforço fibroso.

Segundo os resultados obtidos pela técnica da Correlação de Imagem Digital 2D, nota-se que para baixas deformações (região elástica, instantes 1 a 4) o coeficiente de Poisson médio encontrado foi de  $\nu \cong 0.17$ , no entanto sob maiores deformações,  $\nu$  aumenta, como esperado, devido à plastificação na direção de aplicação da carga. A partir do escoamento, o coeficiente de Poisson aumenta até se estabilizar em seu valor plástico  $\nu = 0.33$ , instante 5.

A variação do coeficiente de Poisson ao longo do processo de deformação tem relação direta com o efeito viscoelástico, característica de compósitos com matriz polimérica, exibindo, portanto, os fenômenos de fluência e relaxação [20]. O efeito do coeficiente de Poisson em materiais viscoelástico é em geral determinado por funções complexas do tempo e indicam que a deformação longitudinal e a deformação transversal nem sempre têm a mesma proporção para todo o tempo [21, 22].

#### 4. Conclusões

O composto de PVC reciclado extrudido apresenta comportamento dúctil sob ensaios de tração [23], entretanto com a adição da fibra de coco os compósitos passaram a ter comportamento predominantemente frágil, resultado já esperado, tendo em vista que a adição do reforço fibroso dificulta os movimentos das cadeias poliméricas da matriz.

O coeficiente de Poisson médio encontrado na Correlação Digital de Imagem foi de  $\nu = 0.22$ , estando próximo do valor encontrado com o ensaio de Emissão Acústica, no entanto a variação encontrada

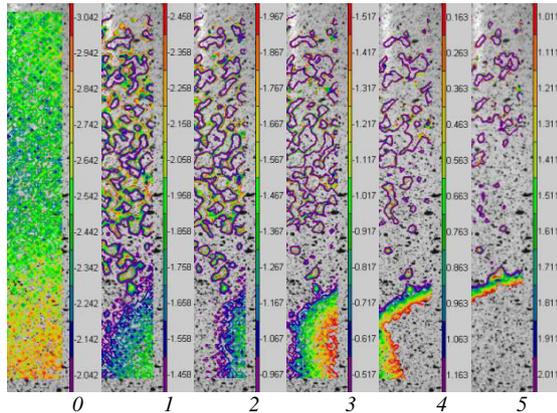


Fig. 13. Imagens do programa CORRELI<sup>Q4</sup> para a evolução da deformação transversal ( $\epsilon_{22}$ ) durante o ensaio de tração com intervalos de 15s entre as imagens.

Considerando que o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) pode ser descrito como sendo o quociente entre a contração transversal ( $\epsilon_{22}$ ) e a extensão longitudinal ( $\epsilon_{11}$ ), portanto adimensional [18,19].

pelo DIC deveu-se a propriedade viscoelástica do compósito, tendo em vista que materiais com esta característica apresentam uma deformação não homogênea.

A utilização da EA para obtenção do coeficiente de Poisson médio mostrou-se um método extremamente dinâmico e rápido quando comparado com a Correlação de Imagem Digital 2D, porém apresenta uma maior capacidade de acumulação de erro experimental por apresentar grande sensibilidade do sinal a orientação das fibras e a porosidade do compósito.

### Agradecimentos

Agradecimentos especiais à empresa Tuboleve Ind. & Com. Ltda pelo apoio dado no desenvolvimento desta pesquisa e a CAPES e CNPq pelas bolsas de estudo.

### Referências

- [1] J.A.G. Chousal, M.F.S.F. de Moura, *Rev. Iberoamericana Ing. Mec.* **2**, 23 (2007).
- [2] G.S. Martins, M.A. Iozzi, M.A. Martins, L.H.C. Mattoso, F.C. Ferreira, *Polímeros: Ciência e Tecnologia* **5**, 326 (2004).
- [3] S.P. Balzer, L.L. Vicente, R. Briesemeister, D. Becker, V. Soldi, A. Rodolfo Jr., M.B. Feltran, *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, **1**, 1 (2007).
- [4] J.L. Leblanc *J. Appl. Polym. Sci.* **101**, 3638 (2006).
- [5] D.M. do Nascimento, Flávio, A.E.C. Junior, P.B.A. Fechine, M.S.M.S. Filho, M.C.B. Figueiredo, M.F. Rosa, VI Workshop da rede de nanotecnologia aplicada ao agronegócio. Embrapa Agroindustrial Tropical, Fortaleza, 2012, pp. 201-203.
- [6] P.V. Pannirselvam, F.A.M. Lima, B.S. Dantas, B.H.S. Santiago, Ladhumananadasivam, M.R.P. Fernandes, *Ver. Analytica* **15**, 56 (2005).
- [7] B.H. Santiago, P.V.P. Selvam, *Rev. Analytica* **26**, 42 (2007).
- [8] F.R. da Silva, K.S. Nogueira, L.C.G. Pennafort Jr., E.P. de Deus, Anais do 67º Congresso ABM Internacional, Rio de Janeiro, 2012.
- [9] H. Schreier, J.-J. Orfeu, M.A. Sutton, *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements*, Springer, 2009.
- [10] Z.-Z. Tang, J. Liang, C. Guo, Y.-X. Wang, *Opt. Eng.* **51**, 2 (2012).
- [11] A.E. Scuri, *Fundamentos da Imagem Digital*, Tecgraf/PUC-Rio, 2002.
- [12] L. Rittner; R. Lotufo, *Processamento e análise de imagens digitais*, FEEC/Unicamp, 2011.
- [13] V. Lopresto, C. Leone, G. Caprino, I. de Iorio, Proc of 17th Int. Conference on Composite Materials – ICCM-17, Edinburgh – UK, 2009, pp. 1-10.
- [14] F. Hild, S. Roux, CORRELIQ4: A software for “finite-element” displacement field measurements by digital image correlation. Internal Report n. 269, Paris: Université Paris/LMT-Cachan, 2008.
- [15] Manual Shimadzu – Determinação de propriedades mecânicas de plásticos. Acesso em 03 fev 2011. Disponível em: [http://www.shimadzu.com.br/analitica/aplicacoes/utm/estaticas/servo-eletricas/NA-AG-001-AG-X-Det\\_prop\\_mec\\_plasticos.pdf](http://www.shimadzu.com.br/analitica/aplicacoes/utm/estaticas/servo-eletricas/NA-AG-001-AG-X-Det_prop_mec_plasticos.pdf)
- [16] G.C.V. Iulianelli; P.M.C. Maciel; M.I.B. Tavares, *Macromol. Symp.* **299/300**, 227 (2011).
- [17] M.J.L. Caetano, *Ciê. e Tecnologia da Borracha*. Acesso em 03 jan 2014. Disponível em: [http://www.ctb.com.pt/?page\\_id=1834](http://www.ctb.com.pt/?page_id=1834).
- [18] P.I.O. do Carmo, Estudo das propriedades estruturais, mecânicas e eletrônicas de nanotubos de carbono de uma, duas e três camadas sob deformação estrutural, Centro Universitário Franciscano de Santa Maria – RS, 2010.
- [19] S. Wijnands, Volumetric behavior of polymer foams during compression and tension, Technische Universiteit Eindhoven University of Technology, 2010.
- [20] R. S. E. Filho, Análise de estruturas de materiais compósitos viscoelásticos lineares através de teoria de volumes finitos. UFAL Maceió, AL 2010.
- [21] I. H. Shames and F. A. Cozzarelli, *Elastic and Inelastic Stress Analysis*, Prentice-Hall, 1997.
- [22] R. H. Pritchard, P. Lava, D. Debruyne, E. M. Terentjev, *Soft Matter* **9**, 6037 (2013).
- [23] L. C. G. Pennafort Jr., F. R. da Silva, DE DEUS, E. P. de Deus, *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, **4**, 547 (2013).