

PRODUÇÃO POR MOLDAGEM ROTACIONAL E CARACTERIZAÇÃO DE POLIETILENO REFORÇADO COM FARINHA DE MADEIRA

Rodrigo E. Harsteln*, Sandro C. Amico

Departamento de Engenharia de Materiais –DEMAT/Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS –

*rodrigo.ebert@yahoo.com.br

Este trabalho tem como objetivo analisar a viabilidade da fabricação de peças moldadas rotacionalmente em polietileno reforçado com farinha de madeira de *Pinus* originária de processos de marcenaria e comumente descartada. A escolha do processo de moldagem rotacional para a fabricação das peças está na vantagem que o processo oferece por ter sua matéria-prima abastecida na forma de pó, facilitando a mistura da carga e evitando etapas prévias de extrusão. Foram testadas três granulometrias de pó e três teores de carga de reforço, averiguando-se a necessidade de secagem prévia do pó da farinha de madeira. Das peças produzidas, foram retiradas amostras que foram avaliadas quanto à resistência mecânica, densidade final, absorção de água, aspecto visual e comportamento térmico. Foram definidos como parâmetros ótimos para a produção de peças, a utilização de farinha de madeira de *pinus* seca, com uma granulometria de mesh 80 e com teor de carga de 10% em massa, tendo esta configuração apresentado um bom aspecto visual e os melhores resultados nos ensaios de tração, com uma e baixa absorção de água.

Palavras-chave: *Moldagem Rotacional, Termoplástico Reforçado, Farinha de Madeira.*

Production and characterization of wood flour reinforced polyethylene through rotational molding.

This study aims to examine the feasibility of manufacturing parts via rotational molding of polyethylene reinforced with *Pinus* wood flour from carpentry and commonly discarded. The choice of the rotational molding process resided in the fact that this process uses powders as raw materials, facilitating the mixture of the filler and avoiding prior steps like extrusion. Three particle sizes and three powder contents were tested and the need for pre-drying of wood flour powder was assessed. From the parts, samples were produced for the evaluation of mechanical strength, final density, water absorption, visual appearance and thermal behavior. The optimum parameters for the production of rotomolded parts with pine wood flour included the use of dried powder, with a mesh size of 80 and with a filler weight content of 10%, reaching the highest strength, low water absorption and good visual appearance.

Keywords: *Rotational molding, Reinforced Thermoplastic, Wood Flour.*

Introdução

O processo de moldagem rotacional para produção de artigos em materiais poliméricos pode ser definido como um processo de alta temperatura, baixa pressão e de molde aberto. A moldagem rotacional consiste basicamente de quatro etapas^{1,2,3}: (i) carregamento (o molde oco bipartido é carregado com resina plástica na forma de líquido ou pó é fechado), (ii) aquecimento, (o molde é aquecido e rotacionado em um programa pré-determinado), (iii) resfriamento (a resina solidifica no interior do molde tomando sua forma), e (iv) desmoldagem (a peça é retirada).

Apesar de não apresentarem as vantagens de integração em nível tão elevado como os compósitos de matriz termofixa, os termoplásticos reforçados apresentam várias vantagens, como uma maior facilidade de soldar e reparar, pois podem ser refundidos e dispensam o uso de colas e adesivos que exigem um alto grau de preparação⁴. Por isso, termoplásticos reforçados com madeira vêm sendo usados na indústria automotiva e de construção sendo amplamente utilizados nas

construções externas pela sua elevada resistência a intempéries, tendo como exemplo o mercado de decks de piscina onde já representam aproximadamente 25% do mercado⁵. Além de fatores econômicos, a necessidade de desenvolvimento de termoplásticos reforçados com madeira (madeiras plásticas) se justifica pela necessidade de se encontrar bons substitutos para a madeira que tem uma elevada demanda e reduzida produção em razão de fatores ambientais. De fato, o uso de termoplásticos combinados a resíduos da produção de madeira tem ganhado força, especialmente pelo crescente custo de plásticos virgem e pela limitada disponibilidade de madeira⁶.

Dentre as vantagens dos termoplásticos reforçados com fibras vegetais se comparados as reforçados com fibra de vidro, carbonato de cálcio ou talco, pode-se citar: temperaturas menores de processamento, redução de ciclos de moldagem, maior resistência à tração e à flexão, menor peso específico (reduzindo custos de transporte e quantidade de resina usada) e menor desgastes de ferramentas pela baixa abrasividade das fibras se comparadas às sintéticas^{7,8}. Além disso, o uso de fibras vegetais de elevado teor de lignina pode aumentar a cristalinidade do PELBD usado como matriz⁹.

Entre os aspectos que devem ser considerados ao se processar termoplásticos com resíduos de madeira encontram-se a umidade da farinha de madeira, a sua granulometria e a temperatura de processamento. Elevada umidade e granulometria geram bolhas no material, descontinuidades e manchas causadas por processos termo-oxidativos. O controle da temperatura é necessário também pela baixa temperatura de degradação da celulose (entre 200 e 220°C), com liberação de voláteis acima dessa faixa de temperatura, provocando descoloração, aparecimento de odor e fragilização do compósito^{7,8}.

Para um bom acoplamento, as características do reforço tais como: distribuição granulométrica, razão de aspecto, distribuição (preferencialmente homogênea), tamanho de partículas, área superficial e natureza química, da superfície e a fração volumétrica máxima de empacotamento da carga são fundamentais na fabricação de um termoplástico reforçado⁷. Outros fatores que devem ser observados ao tentar se produzir um termoplástico reforçado com farinha de madeira, incluem: revestimento completo do reforço pela matriz (encapsulamento), preenchimento da maioria dos vazios presentes na madeira pela estrutura de suas células (preenchimento dos *lumens*), bom acoplamento matriz e reforço, minimização do atrito entre partículas de reforço e evitar a presença de orientações preferências de partículas indesejadas⁸.

Este trabalho tem como objetivo analisar a viabilidade da fabricação de peças moldadas rotacionalmente em polietileno linear de média densidade, reforçando-o com farinha de madeira de *Pinus originária* de processos de marcenaria e comumente descartada.

Experimental

As amostras de PE carregado com farinha de madeira foram produzidas em uma máquina rotacional do tipo carrossel de fabricação nacional. A farinha de madeira de Pinus, fornecida pela empresa Pinhopó já em granulometria controlada, foi misturada manualmente (em saco) com o pó de Polietileno Linear de Média Densidade (PELMD) virgem da empresa Brasken, grade RD 34U3, um copolímero de buteno-1, com aditivos de estabilização à intempérie UV8 e antioxidantes.

Um fluxograma com as etapas do processo utilizado pode ser visto na Figura 1.

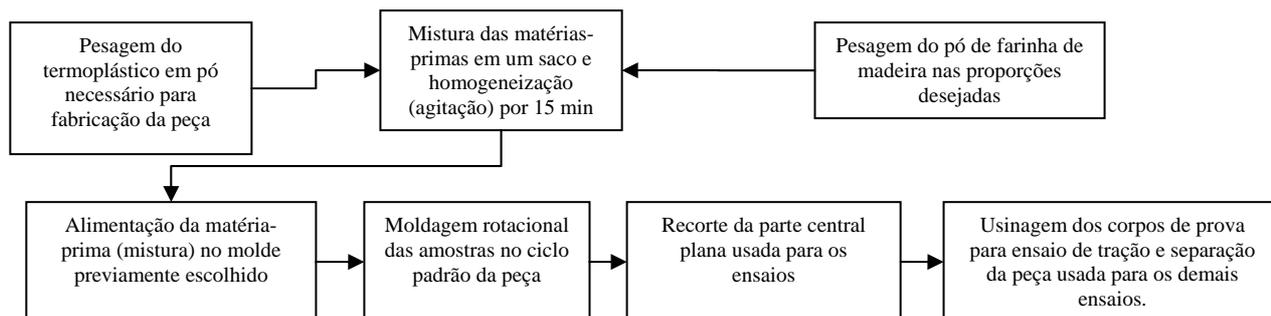


Figura 1: Fluxograma do processamento das amostras.

O molde escolhido foi o usado para a fabricação de uma tampa de reservatório de sementes que necessita de aproximadamente 3700 g de matéria-prima em pó e mede aproximadamente 0,5 m × 1,25 m × 0,1 m. Este molde gera uma peça com uma grande seção plana superior de onde foram tirados os corpos de prova para todas as análises realizadas. O ciclo de processamento para esta peça foi: 16 min de forno, 13 min no pré-resfriamento e 14 min no resfriamento. As temperaturas de forno foram de 380, 360, 350 e 330°C, para os estágios 1, 2, 3 e 4, respectivamente. A rotação usada foi de 0,7 na horizontal e 0,5 na vertical (máquina com eixos independentes). Assim, foram utilizadas três faixas granulométricas e três teores de carga. das amostras de farinha de madeira foi usada como recebida e parte foi seca junto ao forno do processo de moldagem rotacional, em temperatura próxima a 100°C por 2 h, antes de ser misturada ao pó de PELMD para processamento.

A Tabela 1 mostra a nomenclatura utilizada para as amostras produzidas, que foram caracterizadas em ensaios de absorção de água e de tração, além de termogravimetria e calorimetria diferencial de varredura (DSC).

Resultados e Discussão

A absorção de água das amostras ensaiadas foi baixa, como mostra a Tabela 2. Tomando como referência o polímero puro, que apresentou uma absorção de 0,11%, a absorção média foi

cinco vezes maior. Cabe, no entanto, lembrar que a permissividade à água do PE é baixa e que há poros nessa amostra, e assim mesmo estes valores não comprometem o desempenho do material.

Tabela1: Composição das amostras produzidas.

| Amostra | % em massa de Carga | Tipo de Pó | Processamento |
|---------------|---------------------|------------|---------------|
| PE_W7_M80_U | 7% | Mesh 80 | Úmido |
| PE_W7_M80_S | 7% | Mesh 80 | Seco |
| PE_W7_M100_U | 7% | Mesh 100 | Úmido |
| PE_W7_M100_S | 7% | Mesh 100 | Seco |
| PE_W7_M150_U | 7% | Mesh 150 | Úmido |
| PE_W7_150_S | 7% | Mesh 150 | Seco |
| PE_W10_M80_U | 10% | Mesh 80 | Úmido |
| PE_W10_M80_S | 10% | Mesh 80 | Seco |
| PE_W10_M100_U | 10% | Mesh 100 | Úmido |
| PE_W10_M100_S | 10% | Mesh 100 | Seco |
| PE_W10_M150_U | 10% | Mesh 150 | Úmido |
| PE_W10_M150_S | 10% | Mesh 150 | Seco |
| PE_W13_M80_U | 13% | Mesh 80 | Úmido |
| PE_W13_M80_S | 13% | Mesh 80 | Seco |
| PE_W13_M100_U | 13% | Mesh 100 | Úmido |
| PE_W13_M100_S | 13% | Mesh 100 | Seco |
| PE_W13_M150_U | 13% | Mesh 150 | Úmido |
| PE_W13_M150_S | 13% | Mesh 150 | Seco |
| PE_P | 0% | - | - |

A maior parte das composições apresentou absorção de água em torno de 0,50%, com desvios de 0,1%, notou-se, no entanto, alguns valores de absorção maiores que 1%, chegando a até 14% nas composições de partículas menores (mesh 150 principalmente) e mais carregadas. Isto pode ser explicado, pois as amostras com maior teor de partículas e com partículas menores apresentaram uma dispersão ruim do reforço e, em virtude disso, o encapsulamento do reforço pela matriz não foi eficiente, deixando partículas de farinha de madeira disponíveis para um fácil contato com a água. Vê-se assim, que o encapsulamento completo é importante para um bom desempenho do termoplástico reforçado com fibra natural no que diz respeito à absorção de água⁸.

Tabela 2: Absorção de água média para cada composição.

| Granulometria (Mesh) | Carga Seca (% em massa) | | | Carga Úmida (% em massa) | | |
|-------------------------|-------------------------|-----------|------------|--------------------------|-----------|-----------|
| | 7% | 10% | 13% | 7% | 10% | 13% |
| 80 | 0,54±0,1% | 0,48±0,1% | 0,39±0,1% | 0,36±0,1% | 0,77±0,1% | 0,44±0,1% |
| 100 | 0,58±0,1% | 0,51±0,1% | 0,51±0,1% | 0,49±0,1% | 0,59±0,1% | 3,38±0,1% |
| 150 | 0,52±0,1% | 0,69±0,1% | 14,09±0,3% | 0,56±0,1% | 1,44±0,2% | 8,88±0,7% |

As curvas tensão × deformação obtidas nos ensaios de tração (Figura 2) mostraram para as composições das amostras secas, principalmente para composições com maior teor de reforço, um aumento na zona de deformação plástica, além de tensões máximas mais próximas das tensões

suportadas pela amostra referência de PE puro. As amostras com maior quantidade de carga seca (10% e 13%) apresentaram os melhores resultados no ensaio de tração, atingindo além de um perfil próximo ao material de referência, PE.

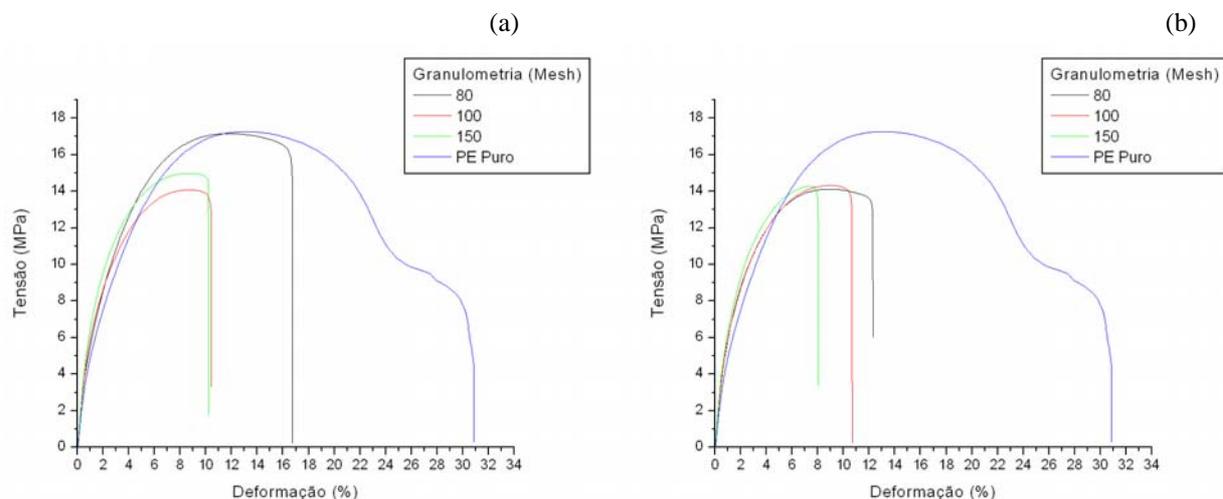


Figura 2: Ensaio de tração para a amostra com carga (10% em massa) seca (a) e úmida (b).

Observando a Tabela 3 vê-se que apenas as amostras com 10% e 13% de carga em massa e feitas com pó de granulometria mesh 80 apresentaram valores mais altos de tensão na força máxima que a amostra de referência. Estas amostras apresentaram também valores de tensão de ruptura mais próximos aos da referência. Outro fator esperado e importante é o aumento no módulo de elasticidade ocorrido em todas as amostras feitas, que era esperado pela inclusão de uma carga mais rígida que a matriz de PE.

Tabela 3: Dados médios obtidos no ensaio de tração

| Carga | | Tensão na Força Máxima (MPa) | Tensão na Ruptura (MPa) | Módulo de Elasticidade (MPa) | Deformação na Ruptura |
|-------|----------------|------------------------------|-------------------------|------------------------------|-----------------------|
| PE | Puro | 16,4±1,1 | 15,0±1,6 | 650±37 | 35,0±7,2% |
| 7% | Mesh 80 Úmido | 15,5±0,3 | 13,5±0,4 | 804±10 | 13,9±1,6% |
| 7% | Mesh 80 Seco | 16,0±1,7 | 13,8±1,7 | 836±78 | 15,0±2,6% |
| 7% | Mesh 100 Úmido | 14,9±0,7 | 13,2±1,0 | 771±39 | 15,0±1,7% |
| 7% | Mesh 100 Seco | 15,0±0,6 | 13,1±0,6 | 747±36 | 14,5±1,1% |
| 7% | Mesh 150 Úmido | 14,8±0,7 | 13,9±0,6 | 854±29 | 11,9±1,6% |
| 7% | Mesh 150 Seco | 12,9±0,6 | 12,1±0,6 | 748±39 | 11,3±0,7% |
| 10% | Mesh 80 Úmido | 14,0±0,5 | 12,9±0,6 | 856±28 | 10,7±1,2% |
| 10% | Mesh 80 Seco | 16,5±0,9 | 14,6±0,8 | 800±54 | 16,4±2,4% |
| 10% | Mesh 100 Úmido | 14,5±0,3 | 13,2±0,4 | 827±10 | 11,2±0,8% |
| 10% | Mesh 100 Seco | 14,2±0,3 | 13,1±0,2 | 827±32 | 10,8±1,3% |
| 10% | Mesh 150 Úmido | 13,1±1,2 | 12,6±1,1 | 867±42 | 8,1±0,8% |
| 10% | Mesh 150 Seco | 14,0±0,8 | 13,4±1,0 | 895±20 | 9,5±1,3% |
| 13% | Mesh 80 Úmido | 13,6±0,4 | 12,6±0,3 | 861±45 | 9,1±0,5% |
| 13% | Mesh 80 Seco | 16,6±0,9 | 14,6±0,8 | 837±63 | 14,5±1,7% |
| 13% | Mesh 100 Úmido | 12,0±0,6 | 11,4±0,6 | 799±51 | 9,2±1,1% |
| 13% | Mesh 100 Seco | 13,4±0,9 | 12,7±0,8 | 896±24 | 9,3±1,2% |
| 13% | Mesh 150 Úmido | 10,1±1,7 | 9,7±1,8 | 839±103 | 5,5±0,8% |
| 13% | Mesh 150 Seco | 8,3±0,7 | 7,8±0,6 | 701±55 | 4,7±0,5% |

Análise de DSC foi realizada nas amostras que apresentaram os mais altos módulos no ensaio de tração (10% de carga de farinha de madeira seca) e os resultados estão apresentados na Tabela 4. Pode-se ver que as temperaturas de fusão são muito próximas em todas as amostras e similares ao tabelado pelo fabricante indicando que a adição de carga não alterou significativamente esta característica do material. A temperatura da segunda corrida esteve mais próxima da tabelada, pois nela os efeitos do histórico térmico foram removidos. A temperatura de cristalização também não sofreu alteração permanecendo em 107°C para todas as amostras, o que indica que a presença dos reforços não altera o ponto de início de cristalização da matriz.

Tabela 4: Resultado da análise por DSC.

| Composição | PE Puro | 10% Mesh 80 | 10% Mesh 100 | 10% Mesh 150 |
|--|---------|-------------|--------------|--------------|
| T_m 1ª Corrida (°C) | 126 | 126 | 126 | 127 |
| % Cristalinidade 1ª Corrida | 39,6 | 43,8 | 34,6 | 34,8 |
| T_c 1ª Corrida (°C) | 107 | 107 | 107 | 107 |
| Entalpia de Cristalização (J/g) | 93,7 | 104,1 | 84,0 | 94,6 |
| T_m 2ª Corrida (°C) | 123 | 124 | 123 | 124 |
| % Cristalinidade 2ª Corrida | 42,4 | 43,9 | 35,5 | 38,4 |

A maior entalpia de cristalização ocorreu para a amostra com reforço de maior diâmetro (mesh 80), sendo também onde foi notado o maior grau de cristalização⁹. Por outro lado, as amostras de mesh 100 e 150 mostraram uma cristalinidade até menor que a do PE puro, para ambas as corridas. Lembra-se aqui que como o teor de carga foi estabelecido em relação à massa, é necessário um número maior de partículas de diâmetro menor para compor a mesma massa em relação a partículas de diâmetro maior. Sendo assim, a presença de um grande número de partículas criam um número maior de barreiras dificultando o crescimento dos grãos e levando a um menor grau de cristalinidade.

A análise termogravimétrica foi realizada na amostra de PE puro (referência), na farinha de madeira pura e na amostra com 10% em carga de partículas de mesh 100 de madeira de farinha seca. Pelos resultados obtidos (Figura 3), a temperatura de degradação térmica do PE puro foi de 493°C. A amostra de farinha de madeira apresentou perda de água a uma temperatura a partir de 60,5°C até 105°C já que a amostra analisada não foi pré-seca e se trata de um material hidrofílico, e a degradação dos componentes da farinha de madeira, como a lignina ocorreu a 365,3°C. A amostra do material reforçado produziu as mesmas temperaturas características da farinha de madeira, como pode ser visto na Figura 4, ou seja, um pequeno pico na temperatura de 368°C,

equivalente ao pico obtido a degradação da farinha de madeira. A perda de água observada para o PE reforçado não foi observada por esta se tratar de uma amostra previamente seca.

Então, como visto por Li e He (2004), a adição de farinha de madeira no PE mostra um início de degradação térmica antes do que se comparado ao polímero puro, pois a degradação da farinha de madeira começa em mais baixas temperaturas. No entanto, em temperaturas superiores a 200°C o PE já se encontra fundido, e há muito ultrapassou a temperatura de trabalho máxima esperada para esta peça, de até 50°C.

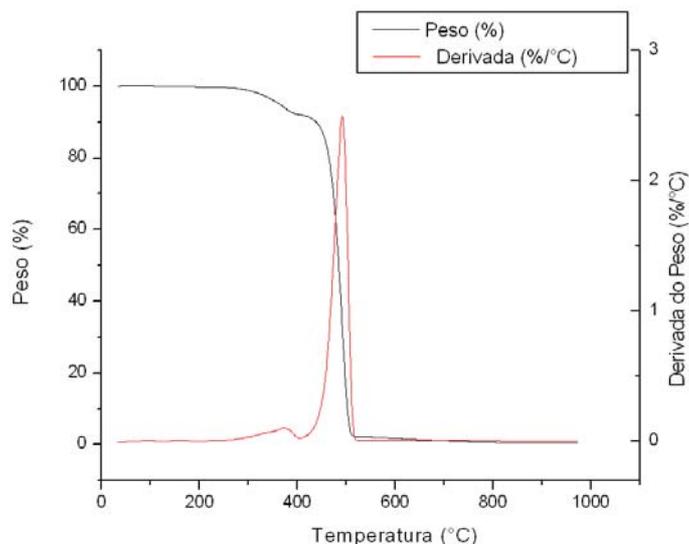


Figura 3: Análise termogravimétrica do PE carregado com 10% de farinha de madeira (mesh 100 - amostra seca).

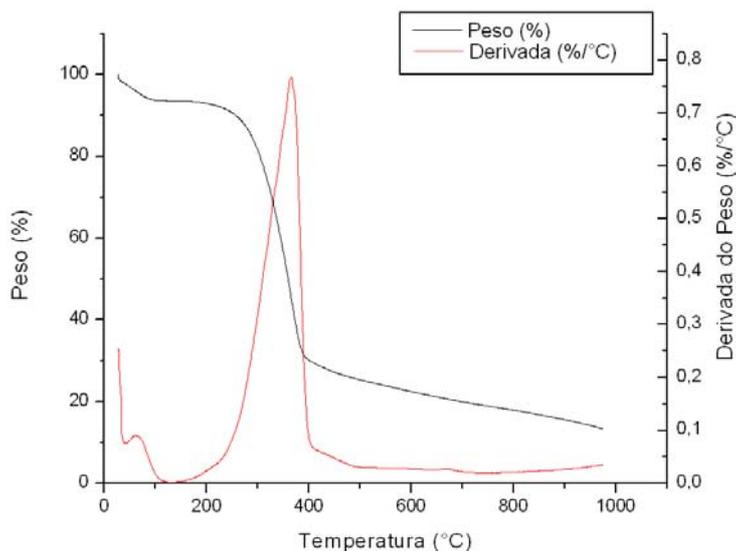


Figura 4: Análise termogravimétrica da farinha de madeira.

Conclusões

O material produzido e analisado apresentou-se viável em algumas das composições testadas. O ensaio de tração indicou que o perfil da curva para todos segue o do material puro usado

de referência - PELBD, tendo a composição com 10% em massa de carga de farinha de madeira previamente seca e com partículas maiores (mesh 80) apresentado a maior deformação na ruptura, sendo no conjunto mais similar ao material puro usado de referência. A etapa de secagem da farinha de madeira se mostrou imprescindível para a obtenção de uma maior resistência mecânica. Do ponto de vista mecânico, considerando só as tensões analisadas, a composição mais indicada é aquela com farinha de madeira seca, em carregamentos que podem ir de 10% a 13%, com alguma redução na deformação plástica.

As análises térmicas confirmaram as referências consultadas e mostraram o aumento da cristalização para os materiais reforçados, sem alteração significativa dos pontos de fusão e cristalização. O perfil térmico mostra uma perda maior em temperaturas menores (correspondente à temperatura de degradação do reforço), porém acima da temperatura de trabalho do material.

Agradecimentos

À empresa Pinhopó pelas amostras de farinha de madeira usadas e à empresa Xalingo S.A. onde foram processadas as amostras.

Referências Bibliográficas

1. G. L. Beall, *Introducción al Moldeo Rotacional* Association of Rotational Molders, 1997.
2. N. Corrigan; E. Harkin-Jones; E. Brown; P. D. Coates; R. J. Crawford *Plastics, Rubbers and Composites* 2004, 33,37.
3. S. Liu; K. Fu *Polymer Testing* 2008,27, 209.
4. S. K. Mazumdar *Composites manufacturing: materials, product, and process* CRC Press LLC, New York, 2002.
5. N.M. Stark; L.M. Matuana *Polymer Degradation and Stability* 2007, 92, 1883
6. Y. Cui; S. Lee; B. Noruziaan; M. Cheung; J. Tao *Composites: Part A* 2008, doi:10.1016/j.compositesa.2007.10.017.
7. C.A. Correa; C.N.P. Fonseca; S. Neves; C.A. Razzino; E. Hage Jr *Polímeros: Ciência e Tecnologia* 2003,13,154.
8. A.K. Mohanty; M. Misra; L.T. Drzal *Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites* Taylor & Francis Group, 2005.
9. Y. Habibi; W. K. El-Zawawy; M. M. Ibrahim; A. Dufresne *Composites Science and Technology* 2008, 68, 1877.