

# Confecção de Protótipos de Caixas de Medidores de Energia Elétrica utilizando Compósitos de Resinas Termoplásticas com Fibras Naturais

Jeannette C. M. Santos, Armando C. Rio, Mario Seixas Cabussu, Ricardo José Ferracin, Paulo C. Inone, Kleber F. Portella, Armando C. Ribas, Marilda Munaro, Guilherme Cunha da Silva.

**Resumo** – Neste trabalho estão mostrados os resultados de estudos visando o desenvolvimento de caixas para acondicionamento de medidores de energia elétrica, utilizando materiais compósitos à base de resina termoplástica reforçada com fibras naturais. Foram utilizadas fibras de sisal e de coco e polipropileno como matriz polimérica, com adição de aditivos diversos, visando principalmente obter um material com classe de inflamabilidade V-0. As formulações testadas foram preparadas em extrusora mono rosca e em extrusora dupla rosca para fins de comparação. As caixas foram injetadas e avaliadas a resistência a flexão e ao impacto. Com as formulações testadas foram obtidas caixas de medidores de energia elétrica que poderão ser utilizadas em processo de produção industrial, sendo que já foi feito o depósito de patente junto ao INPI. Foi observado que a preparação de formulações em extrusora dupla rosca resultou em compósitos com melhores propriedades mecânicas.

**Palavras-chave** – Caixa de medidor, Compósito, Fibra de Sisal, Fibra de Coco.

## I. INTRODUÇÃO

Neste trabalho estão mostrados os resultados de estudos visando o desenvolvimento de caixas para acondicionamento de medidores de energia elétrica, utilizando materiais compósitos à base de resina termoplástica reforçada com fibras naturais. Foram utilizadas fibras de sisal e de coco e polipropileno como matriz polimérica, com a adição de aditivos diversos, visando principalmente obter um material com classe de inflamabilidade V-0.

Atualmente, caixas para medidores de distribuição de

energia elétrica instaladas em residências de consumidores, têm sua base fabricada em Noryl ou Policarbonato. Neste trabalho estão mostrados os resultados de estudos visando o desenvolvimento de caixas utilizando materiais compósitos à base de resina termoplástica reforçada com fibras naturais.

Na preparação dos compósitos foi utilizado polipropileno (PP), muito empregado na fabricação de recipientes plásticos, e fibras de coco e de sisal. Para garantir um balanço adequado entre rigidez e resistência ao impacto, foi utilizada uma mistura de polipropileno homopolímero (PP hom) com polipropileno copolímero (PP cop). Além de propriedades mecânicas adequadas, as caixas para medidores de energia elétrica não devem propagar chama, de acordo com as normas técnicas vigentes. Seguindo-se a tendência de uso de materiais ecologicamente corretos, optou-se por utilizar-se retardante de chama não halogenado.

Nos últimos anos tem-se observado crescente interesse na pesquisa e desenvolvimento de materiais compósitos utilizando fibras naturais em substituição às fibras sintéticas. Entre as inúmeras razões, inclui-se o fato de serem as fibras naturais fonte de matéria-prima renovável e biodegradável, além de fonte de lucro para o setor agrícola. No que diz respeito às suas propriedades, destaca-se a baixa densidade (metade da densidade da fibra de vidro), a baixa abrasividade, que proporciona menor desgaste das máquinas processadoras e a baixa irritabilidade para a pele e para sistema respiratório.

A tecnologia de fabricação de materiais compósitos pelo processo de incorporação de fibras curtas em resinas termoplásticas tem como principal característica a praticidade, uma vez que a moldagem dos produtos finais pode ser efetuada por máquinas injetoras convencionais, garantindo alta produtividade. Porém, o processo de preparação do compósito efetuado pela mistura dos componentes em extrusora dupla rosca ainda deve ser aperfeiçoado a fim de evitar problemas de entupimento no funil da extrusora, devido à alta tenacidade das fibras naturais, as quais têm a tendência de se aglomerar durante o processo de mistura.

Deste modo, os principais objetivos deste trabalho são:

---

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do VI Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (VI CITENEL), realizado em Fortaleza/CE, no período de 17 a 19 de agosto de 2011.

J. C. M. Santos, A. C. Rio e M. S. Cabussu na Companhia de Eletricidade da Bahia – COELBA (e-mails: jmonteiro@coelba.com.br; acoutinho@coelba.com.br; mcabussu@coelba.com.br).

R. J. Ferracin, P. C. Inone, K. F. Portella, A. C. Ribas, M. Munaro e G. C. da Silva trabalham no Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento p LACTEC (e-mail: rferracin@lactec.org.br; inone@lactec.org.br; portella@lactec.org.br; ribas@lactec.org.br; cunha@lactec.org.br).

1. desenvolver novas aplicações para fibra de coco e fibra de sisal na fabricação de caixas para medidores de distribuição de energia, para substituir ou reduzir o consumo de noryl e policarbonato que são utilizados atualmente como matéria-prima;
2. identificar sistema adequado para a mistura da fibra de coco e fibra de sisal;
3. produzir materiais compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais e caracterizar suas propriedades elétricas, mecânicas e químicas;
4. fabricar protótipo da caixa utilizando os novos materiais compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais desenvolvidos;
5. capacitar novos fornecedores de acessórios utilizados em redes de distribuição de energia; e
6. disponibilizar laboratório para homologação do produto desenvolvido com base nas suas propriedades elétricas, mecânicas e químicas.

Este projeto tem como título “Desenvolvimento de novos materiais compósitos para serem utilizados em caixas para medidores de distribuição elétrica à base de fibras naturais (sisal e coco)” e foi encerrado em março de 2010 (código ANEEL P&D 0047-010/2007).

## II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### A. Materiais compósitos poliméricos

Originalmente desenvolvidos como materiais avançados, de alto desempenho, para aplicações militares, os materiais compósitos poliméricos foram se popularizando, recebendo crescente atenção por parte das indústrias. Desde então, tem-se observado o aumento na demanda dos compósitos no uso como materiais de engenharia, para a confecção de componentes na indústria automobilística, indústria de material esportivo, indústria aeronáutica e bens de uso geral. A popularização dos materiais compósitos é explicada em razão do seu alto desempenho frente a um peso relativamente baixo, justificando seu uso como substitutos dos materiais metálicos [1].

Tipicamente, um compósito é constituído por um material fibroso, de alta resistência mecânica, embebido em uma matriz polimérica, que funciona como ligante. A carga mecânica é suportada pelas fibras, sendo que a maior resistência é observada na direção do seu eixo. As fibras podem ser do tipo longa (Figura 1a) ou curta (Figura 1b) e o polímero pode ser termoplástico ou termorrígido [2].

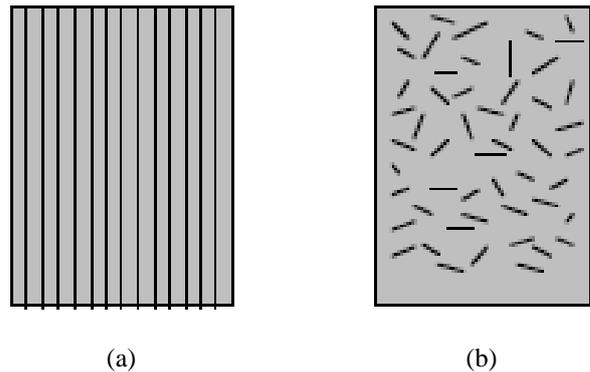


Figura 1 - Representação de compósitos contendo: (a) fibras longas e (b) fibras curtas.

As principais funções das fibras em um material compósito polimérico são:

1. suportar a carga mecânica aplicada; em compósitos estruturais 60% a 70% da carga imposta é suportada pelas fibras; e
2. fornecer rigidez, resistência mecânica e estabilidade térmica.

A matriz por sua vez desempenha várias funções, sem as quais não haveria vantagem em se incorporar as fibras:

1. funcionar como ligante entre as fibras, permitindo a moldagem do componente fabricado, ao mesmo tempo que propicia um adequado acabamento à peça;
2. transferir a carga mecânica aplicada para as fibras;
3. isolar as fibras entre si, impedindo que a fratura de uma fibra se propague para as outras;
4. encapsular as fibras, protegendo-as contra ataque químico, umidade e desgaste por atrito; e
5. propiciar a obtenção de compósitos com resistência ao impacto com a utilização de matrizes dúcteis.

### B. Fibras naturais

A fibra de vidro é o reforço mais utilizado atualmente na preparação de compósitos, em virtude do seu baixo custo (quando comparado às outras fibras sintéticas como a aramida e a fibra de carbono), aliado a um elevado desempenho mecânico [3]. Entretanto, quando comparada às fibras naturais, a fibra de vidro apresenta algumas desvantagens, como mostra a Tabela I. Estas vantagens das fibras naturais têm levado à tentativas de utilizá-las em substituição à fibra de vidro, em aplicações não estruturais, tal como na fabricação de certos componentes automotivos.

Tabela I. Comparação de características entre fibra natural e fibra de vidro.

Característica	Fibra natural	Fibra de vidro
Densidade	Baixa	Dobro da fibra natural
Custo	Baixo	Baixo, mas maior que o da fibra natural
Renovável	Sim	Não
Reciclável	Sim	Não
Consumo de energia no processamento	Baixo	Alto
Uso extensivo	Sim	Sim
Risco à saúde (pele e vias respiratórias)	Não	Sim

Muitos estudos têm sido efetuados no sentido de explorar as potencialidades das fibras naturais como agente de reforço em plásticos. Pesquisas envolvendo trabalhos com fibras naturais levam à constatação de que estes materiais, abundantes e renováveis na natureza, apresentam alguns inconvenientes, tais como baixa adesão fibra-matriz [4], incompatibilidade com algumas resinas poliméricas e elevada absorção de umidade [5].

As fibras naturais contém, a grosso modo, na sua composição, lignocelulose constituída por 85% ou mais de celulose, hemicelulose, lignina e componentes não lignocelulósicos [6]. Cada componente contribui com uma característica distinta para as propriedades das fibras. A celulose é um polímero natural cuja estrutura serve como reservatório de carbono para as plantas. Seu elevado módulo de elasticidade torna seu uso possível como reforço em compósitos, aumentando a rigidez de resinas termoplásticas. Ao mesmo tempo, o teor elevado de lignina presente nas fibras naturais, torna-as resistentes à deterioração sob condições úmidas ou secas e aumenta sua resistência mecânica.

### C. Fibra de coco

A casca do coco é composta por cerca de 30% em peso de fibras e 70% em peso de um componente resinoso. No aproveitamento das fibras do coco para fabricação de artigos tradicionais como tapetes, cordas, pincéis e esteiras, as fibras devem ser separadas por processos de esmagamento. O componente resinoso, por sua vez, possui um teor consideravelmente alto de lignina, a qual apresenta a propriedade de se fundir sob altas temperaturas, podendo funcionar como um adesivo natural para as próprias fibras do coco. Utilizando-se desta propriedade, tem sido fabricados artefatos a partir da prensagem à quente da casca

do coco, sem a necessidade de se utilizar ligantes adicionais [7-9]. Artigos como placas, vasos de flores, telhas corrugadas e bandejas são algumas das possibilidades de fabricação. No Brasil, existem vários projetos dedicados ao aproveitamento da fibra de coco [10, 11], existindo inclusive empresas que se dedicam a esta atividade [12].

Compósitos mais tradicionais como o poliéster reforçado com fibra de coco, também têm sido investigados [13]. Os resultados mostraram que as formulações contendo até 50% em peso de fibra de coco, apresentam consistência rígida, prestando-se para o uso como materiais estruturais. Entretanto, formulações contendo fibra de coco em proporção maior do que 50%, tornam-se muito flexíveis, perdendo estabilidade dimensional. A resistência à tração e à flexão dos compósitos com fibra de coco são inferiores aos compósitos com fibra de vidro [14]. Entretanto, os resultados mostram que o pré-tratamento superficial das fibras propicia uma melhora nestas propriedades.

Em compósitos de fibra de coco com polietileno de baixa densidade, a presença da cera natural que reveste as fibras, favorece a adesão fibra-matriz [15]. Para os compósitos testados, verificou-se que a resistência à tração e o módulo de rigidez aumentaram consideravelmente com o comprimento das fibras e com o aumento na proporção de fibra.

### D. Fibra de sisal

Extraída das folhas da planta de sisal (*Agave sisalana*), a fibra de sisal é uma das fibras naturais mais utilizadas na atualidade [16]. Aproximadamente 4,5 milhões de toneladas desta fibra são produzidas por ano no mundo. A Tanzânia e o Brasil são os dois principais produtores.

A planta de sisal produz cerca de 200-250 folhas contendo aproximadamente 3% em peso de fibras medindo de 1-1,5 m de comprimento e 100-300  $\mu\text{m}$  de diâmetro [16].

Cada fibra é composta por um aglomerado de sub-fibras constituídas por celulose e lignina. O módulo de elasticidade e a resistência à ruptura das fibras dependem da composição e da microestrutura das fibras, as quais podem variar conforme a origem da planta. Na Tabela II estão mostradas as propriedades da fibra de sisal compiladas de vários trabalhos por Li et al. [16].

Tabela II. Propriedades da fibra de sisal, compiladas por Li et al. [16].

Densidade ( $\text{g/cm}^3$ )	Limite de Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação máxima, (%)	Diâmetro ( $\mu\text{m}$ )
1,45	530-640	9,4-22	3-7	50-300
1,41	400-700	9-20	5-14	100-300
1,40	450-700	7-13	4-9	-

A fibra de sisal é utilizada principalmente para fabricação de cordas e fios de amarração, tapetes, reforço de forros de gesso, sacarias e artigos artesanais em geral. Nos últimos

anos tem-se observado crescente interesse no desenvolvimento de novas aplicações para a fibra de sisal, em particular como agente de reforço em materiais compósitos [20-24]. Oksman e colaboradores [20] prepararam compósitos de polipropileno/sisal (PP/sisal) contendo fibra em proporções de até 43% em peso. Eles observaram que o módulo de elasticidade, a resistência à tração e a resistência ao impacto aumentaram com a incorporação de fibras em crescentes proporções. Os autores também demonstraram a necessidade da utilização de agente compatibilizante para promover a adequada adesão entre a fibra e a matriz polimérica. A incorporação de compatibilizante ao compósito, além de melhorar significativamente suas propriedades mecânicas permite a redução na temperatura de injeção no processo de moldagem, minimizando a degradação térmica da fibra [21].

Joseph e colaboradores [22] estudaram o efeito de variáveis de processamento nas propriedades mecânicas de compósitos PP/sisal. Eles constataram que, sob determinadas condições de processo, a resistência à tração dos compósitos obtidos atingia um valor máximo. A preparação dos compósitos foi efetuada em misturador interno e as condições ótimas encontradas foram: temperatura de 170°C, rotor sob velocidade de 50 rpm e tempo de mistura de 10 minutos.

Bourmaud e Baley [23] investigaram o efeito do reproprocessamento nas propriedades mecânicas de compósitos PP/sisal e polipropileno/ fibra de vidro (PP/FV). Eles efetuaram a moldagem dos compósitos pelo processo de injeção e em seguida repetiram o processo de moldagem várias vezes com os mesmos materiais. No caso do compósito PP/sisal não foi observada redução significativa nas propriedades, ao contrário do que se observou para o compósito PP/FV, onde as propriedades sofreram redução de até 50% após 7 ciclos de moldagem. Foi verificado que o reproprocessamento produzia, a cada ciclo, uma redução no comprimento das fibras, tanto de sisal quanto de vidro, gerando, no caso do compósito PP/FV, a deterioração nas propriedades mecânicas. No caso da fibra de sisal a redução no comprimento foi também acompanhada da redução do seu diâmetro.

A absorção de água e seus efeitos indesejáveis sobre as propriedades dos compósitos polímero/fibra natural constitui uma das desvantagens destes materiais [5,24]. A porcentagem de água absorvida é diretamente proporcional à quantidade de fibra incorporada ao compósito, podendo atingir 6% em peso em compósitos contendo 30% de fibra. Sob estas condições de alta absorção de água, foi observada redução no módulo de elasticidade e na resistência à tração de até 50% [24]. Entretanto, a resistência ao impacto aumenta ligeiramente com a presença de água absorvida no compósito, devido ao efeito de plastificação.

### III. DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

#### A. Materiais utilizados

A fibra de coco foi adquirida na forma bruta, em fardo, diretamente de uma cooperativa localizada em Ilhéus - BA (Empório do Coco). A fibra de sisal foi adquirida no mercado varejista, sendo que seu uso original era destinado ao reforço de forros de gesso. Os outros componentes utilizados estão descritos na Tabela III.

Tabela III. Materiais utilizados na preparação dos compósitos.

Componente	Fornecedor	Especificação/Característica
Polipropileno	Brasken	H 201 (MFI = 20)
Polipropileno	Brasken	CP 284R (MFI = 14)
Talco	Comércio varejista	Tamanho médio de part. = 20 µm
Retardante de chama	Clariant	CESA-flam (não halogenado)
Negro-de-fumo	Cromex	Composto concentrado
Compatibilizante	QP-Químicos e Plásticos	PP-anidrido maleico
Antioxidante	Cromex	Composto concentrado

#### B. Preparação das fibras

As fibras de coco e de sisal, inicialmente na forma de fios longos, foram processadas em um moinho de facas, e em seguida peneiradas utilizando peneira de malha 20. As fibras assim obtidas, com 3 a 10 mm de comprimento, foram previamente secadas em estufa a 70°C por um período de pelo menos 24 horas antes de serem incorporadas à matriz polimérica.

#### C. Preparação dos compósitos

##### C.1 Mistura em extrusora mono rosca

Três formulações contendo fibra de sisal e três formulações contendo fibra de coco, descritas na Tabela IV, foram preparadas em extrusora mono rosca Hansen, modelo H60 (Figura 2), gentilmente cedida pela Faculdade de Tecnologia Tupy de Curitiba – FTT.



Figura 2 – Extrusora mono rosca utilizada na preparação dos materiais compósitos.

Tabela IV. Formulações dos materiais compósitos preparados utilizando extrusora mono rosca.

Componentes	Formulações (% em massa)					
	1	2	3	4	5	6
Polipropileno homopolímero	28,7	25,4	18,9	28,7	25,4	18,9
Polipropileno copolímero	15,3	13,6	10,1	15,3	13,6	10,1
Fibra de sisal	20,0	20,0	20,0	0	0	0
Fibra de coco	0	0	0	20,0	20,0	20,0
Retardante de chama	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
Compatibilizante	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Negro-de-fumo	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Antioxidante	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
Talco	0	5,0	15,0	0	5,0	15,0
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

As formulações mantiveram uma relação de Polipropileno homopolímero e Polipropileno copolímero igual a 1,9, aumentando-se o percentual em massa do talco.

As fibras, na forma de fios longos, foram previamente cortadas com um triturador de plásticos, sendo reduzido a comprimentos entre 5 a 10 mm.

Os componentes foram previamente misturados em uma betoneira, mas observou-se que a fibra de sisal apresentou tendência a se aglomerar em pequenas bolas, produzindo uma mistura heterogênea.

Os componentes, previamente misturados, foram adicionados pouco a pouco ao funil da extrusora. Em virtude da heterogeneidade da mistura constatou-se, logo no início do processo de extrusão, a dificuldade de se inserir-la no funil da extrusora, sendo necessário empurrá-la com o auxílio de um bastão de madeira.

Na saída da extrusora foi instalada uma matriz anular, com diâmetro externo de 1 polegada. À medida em que o material era extrudado, pedaços com aproximadamente 20 cm de comprimento eram coletados manualmente, sendo deixados sobre uma mesa para esfriar (Figura 3). Após a extrusão e esfriamento, o material produzido foi triturado, originando grânulos irregulares conforme mostrado na Figura 4.

Após a primeira trituração, parte do material foi submetido à moldagem por injeção para produzir os corpos-de-prova para testes mecânicos e de inflamabilidade (Figura 5). A porção restante do material foi novamente submetida ao processo de extrusão, seguido de homogeneização e trituração, na tentativa de se produzir mistura mais eficiente. O material resultante da segunda extrusão foi também submetido à moldagem por injeção para produzir os corpos-de-prova.



Figura 3 – Material extrudado em pedaços de aproximadamente 20 cm de comprimento.



Figura 4 – Grânulos obtidos após o processo de trituração.

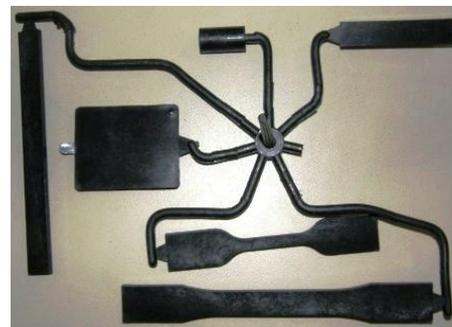


Figura 5 – Corpos-de-prova obtidos após injeção dos grânulos obtidos no processo de trituração.

### C.2 Mistura em extrusora dupla rosca

Uma formulação contendo fibra de sisal e uma formulação contendo fibra de coco, descritas na Tabela V, foram preparadas em extrusora dupla rosca Werner-Pfleiderer, modelo ZSK-30 (Figura 6), com 3 alimentadores automáticos, sistema de degasagem, semi-industrial, gentilmente cedida pelo Departamento de Engenharia de Materiais (DEMA) da Universidade Federal de São Carlos - UFSCar.

A fibra e o talco foram introduzidos por abertura na extrusora, localizada a cerca de 40 cm do cabeçote. A utilização de um dispositivo alimentador do tipo rosca sem fim possibilitou que as fibras fossem introduzidas de maneira contínua.

Tabela V. Formulações dos materiais compósitos preparados em extrusora dupla rosca.

Componentes	Formulações (% em peso)	
	7	8
Polipropileno homopolímero	28,7	28,7
Polipropileno copolímero	15,3	15,3
Fibra de sisal	20,0	0
Fibra de coco	0	20,0
Retardante de chama	25,0	25,0
Compatibilizante	5,0	5,0
Negro-de-fumo	2,0	2,0
Antioxidante	4,0	4,0
Talco	0	0
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>	<b>100</b>



Figura 6 – Extrusora dupla rosca utilizada na preparação dos materiais compósitos.

Para a fabricação do primeiro lote de caixas, os outros componentes, com exceção do retardante de chama, foram introduzidos pela abertura no início da extrusora. O retardante de chama não foi incluído na mistura nesta etapa, mas foi incorporado posteriormente, no momento da injeção das caixas. A mistura foi extrudada na forma de espaguete, sendo continuamente esfriada e granulada.

Na fabricação do segundo lote de caixas, o retardante de chama foi incorporado durante o processo de extrusão por um alimentador lateral da extrusora utilizada.

#### D. Injeção das caixas

As caixas foram confeccionadas pela METALPLASTICO, empresa fabricante de caixas plásticas para medidores, localizada em Aracaju-SE. Para a injeção das caixas foram utilizados a mesma máquina e o mesmo molde utilizados para fabricação de caixas de medidores em uso comercial (Figura 7).



Figura 7 – Injetora Jatson utilizada para a fabricação das caixas utilizando os materiais compósitos extrudados.

O primeiro lote de caixas foi fabricado a partir de formulações que não continham retardante de chama pré-incorporado na matriz. Os grânulos do compósito sem retardante foram misturados à frio com este aditivo e a mistura foi introduzida no funil de alimentação da máquina injetora.

As caixas produzidas apresentaram superfície fosca, com estrias esbranquiçadas. Estes defeitos são em parte decorrentes da má dispersão do retardante de chama no compósito.

No segundo lote, as caixas foram fabricadas a partir de compósitos contendo o retardante de chama pré-incorporado durante o processo de extrusão. As caixas assim produzidas mostraram que sua superfície, embora texturizada, não apresentou manchas brancas, mostrando que o retardante de chama foi adequadamente dispersado na matriz.

#### E. Ensaios realizados

##### E.1 Inflamabilidade

Nos ensaios de propagação de chamas, efetuados de acordo com a norma UL-94, foram utilizados corpos-de-prova com dimensões de 125 mm x 13 mm, cortados das caixas. O ensaio foi efetuado com os corpos-de-prova na posição vertical, aplicando-se chama de gás metano com 20 mm de altura, à extremidade inferior, durante 10 segundos, por duas vezes consecutivas.

##### E.2 Tração e Flexão

Os ensaios de tração e flexão foram realizados em máquina de ensaios universal Instron.

No ensaio de tração foram utilizados corpos-de-prova ISO 527-4, tipo 1B, moldados pelo processo de injeção ou cortados diretamente das caixas com o auxílio de uma serra tico-tico. A velocidade de deformação dos corpos-de-prova, imposta pela velocidade de afastamento das garras foi de 5 mm/min.

Ensaio no modo flexão foram efetuados de acordo com a norma ISO 178, utilizando corpos-de-prova recortados das caixas. Foram recortadas, das laterais da caixa, 5 corpos-de-prova na forma de lâminas com 80 mm de comprimento por

10 mm de largura. Os corpos-de-prova foram apoiados em dois suportes horizontais com distância de 65 mm. Uma carga mecânica foi aplicada no centro do corpo-de-prova, à velocidade constante de 2 mm/min, até a ruptura.

### E.3 Impacto Charpy

Testes de resistência ao impacto Charpy foram efetuados de acordo com a norma ASTM D 256, utilizando corpos-de-prova recortados das paredes laterais das caixas, na forma de lâminas com 127 mm de comprimento por 13 mm de largura. Para compor os corpos-de-prova, três destas lâminas foram empilhadas face a face e fixadas com fita adesiva, obtendo-se barras com espessuras em torno de 10 mm. No centro do corpo-de-prova foi feito, na direção da largura das lâminas, um entalhe em forma de “V”, com profundidade de aproximadamente 3 mm.

### E.4 Estabilidade Térmica

As caixas foram submetidas ao envelhecimento em estufa, à 100°C, pelo período de 168 horas, após o qual foram retiradas e deixadas em repouso à temperatura ambiente pelo período de 4 dias. Uma inspeção visual nos corpos-de-prova foi efetuada posteriormente, com o objetivo de verificar a ocorrência de alterações provocadas pela exposição prolongada ao calor.

### E.5 Resistência ao Intemperismo

Placas de 60 cm x 60 cm foram cortadas das caixas e submetidas ao intemperismo acelerado em câmara climática Atlas, sob a ação de calor, umidade e radiação UV.

## F. Resultados dos ensaios realizados

### F.1 Inflamabilidade

Em nenhum dos testes efetuados houve propagação de chamas nos corpos-de-prova utilizados. Todas as formulações preparadas foram classificadas como V-0.

### F.2 Tração e Flexão

Na Tabela VI estão mostrados os resultados do ensaio de tração efetuado nos corpos de prova injetados obtidos a partir do compósito PP/sisal, preparado em extrusora mono rosca, com a formulação 1 mostrada na Tabela IV. Observou-se melhora nas propriedades após o reprocessamento do material (1ª extrusão versus 2ª extrusão), tendo a resistência à tração aumentado de 20 MPa para 25 MPa e a elongação máxima aumentado de 1,8 % para 2,8 %, comprovando que houve melhora na homogeneidade da mistura.

Tabela VI. Resultados do ensaio de tração efetuado nos corpos-de-prova injetados obtidos a partir do compósito PP/sisal, preparado em extrusora mono rosca (formulação 1).

Propriedade mecânica	1ª extrusão	2ª extrusão
Resistência à tração (MPa)	20,0 ± 2	25,0 ± 2
Elongação máxima (%)	1,8 ± 0,2	2,8 ± 0,8
Módulo de elasticidade (GPa)	1,5 ± 0,6	1,7 ± 0,6

Na Tabela VII estão mostrados os resultados do ensaio de tração efetuado nos corpos de prova injetados obtidos a partir do compósito PP/coco, preparado em extrusora mono rosca, com a formulação 4 mostrada na Tabela IV. De uma forma geral, as propriedades dos compósitos com fibra de coco são inferiores aos dos compósitos contendo fibra de sisal. Não se observou melhora nas propriedades após a segunda extrusão.

Tabela VII. Resultados do ensaio de tração efetuado nos corpos-de-prova injetados obtidos a partir do compósito PP/coco preparado em extrusora mono rosca (formulação 4).

Propriedade mecânica	1ª extrusão	2ª extrusão
Resistência à tração (MPa)	18,0 ± 1	18,0 ± 2
Elongação máxima (%)	2,3 ± 0,3	0,9 ± 0,5
Módulo de elasticidade (GPa)	2,0 ± 0,5	2,0 ± 1

Na Tabela VIII estão mostrados os resultados do ensaio de flexão em compósitos PP/sisal e PP/coco (formulações de 1 a 6). Foi avaliado o efeito da adição de talco sobre o comportamento dos compósitos no modo flexão. Foi observado que a incorporação de talco provoca o aumento no módulo de elasticidade por flexão, tanto nos compósitos de sisal quanto nos de fibra de coco. Entretanto, quanto à tensão de ruptura sob flexão, observa-se que esta aumenta quando se adiciona 5% de talco, mas diminui quando se adiciona 15%.

Tabela VIII. Valores de tensão de ruptura sob flexão e módulo de elasticidade por flexão obtidos dos materiais compósitos preparados em extrusora mono rosca (formulações de 1 a 6).

% em massa de talco	Fibra de sisal		Fibra de coco	
	Tensão de ruptura sob flexão (MPa)	Módulo de elasticidade por flexão (GPa)	Tensão de ruptura sob flexão (MPa)	Módulo de elasticidade por flexão (GPa)
0	40 ± 1	1,9 ± 0,1	33 ± 1	1,6 ± 0,1
5	45 ± 2	2,0 ± 0,1	37 ± 1	2,0 ± 0,1
15	37 ± 2	2,7 ± 0,1	34 ± 2	2,2 ± 0,1

Na Tabela IX estão mostrados os resultados dos ensaios de tração efetuados nos corpos-de-prova retirados das caixas fabricadas com compósitos PP/sisal e PP/coco, preparados em extrusora dupla rosca, dos dois lotes fabricados (formulações 7 e 8). Não se observou diferenças significativas dos valores obtidos de resistência à tração,

elongação máxima e módulo de elasticidade para os corpos-de-prova retirados das caixas fabricadas no primeiro e segundo lotes.

Tabela IX. Resultados dos ensaios de tração efetuados nos corpos-de-prova retirados das caixas fabricadas com compósitos PP/sisal e PP/coco, preparados em extrusora dupla rosca (formulações 7 e 8).

Propriedade mecânica	Primeiro lote de caixas fabricadas		Segundo lote de caixas fabricadas	
	Fibra de sisal	Fibra de coco	Fibra de sisal	Fibra de coco
Resistência à tração (MPa)	16 ± 1	20 ± 3	17 ± 2	15 ± 6
Elongação máxima (%)	2 ± 1	2 ± 1	2 ± 1	2 ± 1
Módulo de elasticidade (GPa)	2,5 ± 0,7	1,1 ± 0,4	1,3 ± 0,5	1,0 ± 0,5

Na Tabela X estão mostrados os resultados do ensaio de flexão efetuado nos corpos-de-prova retirados das caixas fabricadas com compósitos PP/sisal e PP/coco, preparados em extrusora dupla rosca no primeiro lote (formulações 7 e 8).

Tabela X – Resultados do ensaio de flexão efetuado nos corpos-de-prova retirados das caixas fabricadas com compósitos PP/sisal e PP/fibra de coco, preparados em extrusora dupla rosca para fabricação do primeiro lote de caixas (formulações 7 e 8).

Fibra de sisal		Fibra de coco	
Tensão de ruptura sob flexão (MPa)	Módulo de elasticidade por flexão (GPa)	Tensão de ruptura sob flexão (MPa)	Módulo de elasticidade por flexão (GPa)
46 ± 1	1,9 ± 0,1	38 ± 1	1,5 ± 0,1

### F.3 Impacto Charpy

Na Tabela XI estão mostrados os resultados obtidos para o ensaio de Impacto Charpy os compósitos preparados na extrusora mono rosca (formulações de 1 a 6). Os compósitos contendo fibra de coco apresentaram mais baixa resistência ao impacto, independentemente da quantidade de talco adicionada. Na Tabela XII estão mostrados os resultados obtidos para os compósitos preparados na extrusora dupla rosca (formulações 7 e 8). Os valores de resistência ao impacto obtidos são significativamente maiores do que aqueles obtidos em extrusora de mono rosca.

Tabela XI. Valores de resistência ao impacto Charpy, medidos em J/m, para os compósitos preparados em extrusora mono rosca (formulações de 1 a 6).

% em massa de talco	Fibra de sisal (J/m)	Fibra de coco (J/m)
0	41 ± 3	36 ± 1
5	48 ± 4	38 ± 4
15	32 ± 1	39 ± 5

Tabela XII. Valores de resistência ao impacto Charpy, medidos em J/m, para os compósitos preparados em extrusora mono rosca (formulações 7 e 8).

Fibra de sisal (J/m)	Fibra de coco (J/m)
51 ± 3	67 ± 2

### F.4 Estabilidade Térmica

Não foi observado nenhum efeito visível na superfície das caixas, seja na forma de rachaduras seja na forma de migração de substâncias líquidas. Também não foi observada ocorrência de empenamento das caixas.

### F.5 Resistência ao Intemperismo

Ao final de 1000 horas de exposição ao intemperismo acelerado, os corpos-de-prova não apresentaram perda de brilho, esfacelamento ou qualquer outro sinal de degradação, demonstrando o bom desempenho dos aditivos anti-UV incorporados ao retardante de chama CESA-flam.

## IV. CONCLUSÕES

1. Foi produzida uma caixa de medidor e a respectiva tampa, além de uma caixa de disjuntor, a partir de compósitos PP/fibra de sisal e PP/fibra de coco, conforme mostrado na Figura 8.



Figura 8 – Protótipo da caixa manufatura com compósito de polipropileno e fibra de sisal.

2. A incorporação de retardante de chama não halogenado em proporção de 25% em massa produziu um material resistente à chama, com classificação V-0 segundo a norma UL-94.
3. Os melhores resultados são obtidos quando o compósito é preparado em extrusora dupla rosca.
4. As fibras devem ser alimentadas desde o início da extrusora, a fim de que sejam submetidas a cisalhamento intensivo, o que proporciona compatibilização com a matriz, além de promover a redução no diâmetro das fibras.

5. Durante o preparo dos compósitos, o transporte das fibras até o interior da extrusora consiste em uma operação complicada por causa da baixa fluidez do material, que tende a formar um leito compacto no funil de alimentação, bloqueando momentaneamente o fluxo, o que causa heterogeneidade na composição e oscilação na taxa de descarga do extrudado.
6. O aperfeiçoamento no processo de preparação de compósitos de fibras naturais com resinas termoplásticas, portanto, deve incluir o desenvolvimento de um sistema mais adequado para transportar as fibras até o interior da extrusora.
7. As temperaturas de extrusão e de injeção do compósito devem ser mantidas abaixo de 180°C, a fim de se evitar a deterioração na resistência mecânica das fibras causada por degradação térmica.

A utilização de materiais compósitos pode diminuir o custo de fabricação das caixas, pela utilização de fibras naturais abundantes e de baixo custo, aproveitando materiais que seriam descartados como subproduto. Outro fator é importante é a redução do consumo de materiais poliméricos sintéticos e potencialmente poluidores. No entanto, maiores estudos devem ser feitos para otimização do processo de obtenção das fibras e preparação dos compósitos.

## V. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S. K Mazumdar, *Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering*. New York: CRC Press, 2002, pp. 1-416.
- [2] B. T Aström, *Manufacturing of Polymer Composites*. Nelson Thornes Ltd., Cheltenham, UK, 2002, pp. 1 - 469.
- [3] P.. Wambua, J. Ivens and I. Verpoest, “Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics?” *Composite Science and Technology*, vol. 63, pp. 1259-1264, 2003.
- [4] H. D Rozman, K. W Tan, R. N Kumar, A. Abubakar; Z. A. M. Ishak and H. Ismail, “The effect of lignin as a compatibilizer on the physical properties of coconut fiber-polypropylene composites”, *European Polymer Journal*, vol. 36, pp. 1483 – 1494, 2000.
- [5] A. Espert, F. Vilaplan and S. Kalrsson, “Comparison of water absorption in natural cellulosic fibres from wood and one-year crops in polypropylene composites and its influence on their mechanical properties”, *Composites: Part A*, vol. 35, pp. 1267-1276, 2004.
- [6] N. G Jústiz-Smith, G. J. Virgo and V. E. Buchanan, “Potential of Jamaican banana, coconut coir and bagasse fibres as composite materials”, *Materials Characterization*, vol. 59, pp. 1273 – 1278, 2008.
- [7] J. E. G. van Dam, M. J. A van den Oever and E. R. P Keijsers, “Production process for high density high performance binderless boards from whole coconut husk”, *Industrial Crops and Products*, vol. 20, pp. 97 – 101, 2004.
- [8] J. E. G. van Dam, M. J. A. van den Oever, W. Teunissen, E. R. P. Keijsers and A. G. Peralta, “Process for production of high density/high performance binderless boards from whole coconut husk. Part 1: Lignin as intrinsic thermosetting binder resin”. *Industrial Crops and Products*, vol. 19, pp. 207 – 216, 2004.
- [9] J. E.G. van Dam, M. J.A. van den Oever, E. R.P. Keijsers, J. C. van der Putten, C. Anayron, F. Josol and A. Peralta, “Process for production of high density/high performance binderless boards from whole coconut husk. Part 2: Coconut husk morphology, composition and properties” *Industrial Crops and Products*, vol. 24, pp. 96-104, 2006.
- [10] SEBRAE. Oportunidade de negócio: Produção de fibras de coco. Disponível:<http://www.df.sebrae.com.br/downloads/oportunidade/coco.pdf>.
- [11] EMBRAPA. Beneficiamento da casca do coco verde. Disponível: <http://www.cnpat.embrapa.br/home/portfolio/tecnologia.php?id=10>.
- [12] COCO VERDE RECICLADO. Reciclagem do coco verde. Disponível: <http://www.cocoverderj.com.br/reciclagem.htm>.
- [13] S.N. Monteiro, L.A.H Terrones, and J.R.M D’Almeida, “Mechanical performance of coir fiber/polyester composites” *Polymer Testing*, vol. 27, pp. 591-595, 2008.
- [14] J. Rout, M. Misra, S. S. Tripatry S. K. Nayak and A. K. Monanty, “The influence of fibre treatment on the performance of coir-polyester composites”, *Composite Science and Technology*, vol. 61, pp. 1303-1310, 2001.
- [15] M. Brahmakumar, C. Pavithram and R. M. Pillai, “Coconut fibre reinforced polyethylene composites: effect of natural waxy surface layer of the fibre on fibre/matriz interfacial bonding and strength of composites”, *Composites Science and Technology*, vol. 65, pp. 563-569, 2005.
- [16] Y. Li, Y. Mai and Y. Lin, “Sisal fibres and its composites: a review of recent developments”, *Composites Sciences and Technology*, vol. 60, pp. 2037-2055, 2000.
- [17] N. Chand, R. K Tiwary and P. K Rohatgi, “Bibliography resource structure properties of natura cellulosic fibres - an annotated bibliography”, *Journal of Materials Science*, vol. 23, pp. 381-387, 1988.
- [18] G. Kalaprasad, K. Joseph. And S. Thomas, “Theoretical modeling of tensile properties of short sisal fibre-reinforced low-density polyethylene composites”, *Journal of Materials Science*, vol. 32 pp. 4261-4267, 1997.
- [19] K. C Manikanda and S. Thomas, “Tensile properties of short sisal fibre reinforced polystyrene composites”. *Journal of applied polymer science*, vol. 60, pp.1483-1497, 1996.
- [20] K. Oksman, A. P. Mathew, R. Långström, B. Nyström and K. Joseph, “The influence of fibre microstructure on fibre breakage and mechanical properties of natural fibre reinforced polypropylene”, *Composites Science and Technology*, vol. 69, pp. 1847-1853, 2009.
- [21] K. L. Fung, X. S. Xing, R. K. Y. Li, S. C. Tjong and Y. -W. Mai, “The investigation on the processing of sisal fibre reinforced polypropylene composites”, *Composites Science and Technology*, vol. 63, pp. 1255-1258, 2003.
- [22] P. V. Joseph, K. Joseph and S. THOMA, “Effect of processing variable on the mechanical properties of sisal-fiber-reinforced polypropylene composites”, *Composites Science and Technology*, vol.59, pp. 1625-1640, 1999.
- [23] A. Bourmaud and C. Baley, “Investigation on the recycling of hemp and sisal fibre reinforced polypropylene composites”, *Polymer Degradation and Stability*, vol. 92, pp. 1034-1045, 2007.
- [24] C. P. L. Chow, X. S. Xing and R. K. Y Li., “Moisture absorption studies of sisal fibre reinforced polypropylene composites” *Composites Science and Technology*, vol. 67, pp. 306-313, 2007.