

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

L267p Laner, Jean Nunes

Produção de compósitos polímero madeira / Jean Nunes Laner;
orientadora Érika da Silva Ferreira. Pelotas, 2012.
54 f.; il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia
Industrial Madeireira) – Centro de Engenharias, Universidade Federal
de Pelotas, 2012.

1. Engenharia industrial madeireira. 2. Agentes de acoplamento.
3. Extrusora. 4. WPC. I. Ferreira, Érika da Silva, orient. II. Título.

CDD: 674

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
CENTRO DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL MADEIREIRA



Trabalho de Conclusão de Curso

Produção de Compósitos Polímero-Madeira

Jean Nunes Laner

Pelotas, 2012

Jean Nunes Laner

Produção de Compósitos Polímero-Madeira

Trabalho Acadêmico apresentado ao
Curso de Engenharia Industrial Madeireira
da Universidade Federal de Pelotas,
como requisito parcial à obtenção do título
de Engenheiro Industrial Madeireiro.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Érika da Silva Ferreira

Pelotas, 2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
CURSO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL MADEIREIRA

A comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a monografia de conclusão

Produção de Compósitos Polímero-Madeira

Elaborado por

Jean Nunes Laner

como requisito parcial para a obtenção do título de
Engenheiro Industrial Madeireiro

COMISSÃO EXAMINADORA:

Érika da Silva Ferreira, Dr^a. (Presidente/Orientadora)

Cristiane Pedrazzi, Dr^a. (1^o Examinadora)

Rafael Beltrame, Msc. (2^o Examinador)

Pelotas, 05 de março de 2012.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – (A) partícula de madeira, (B) polímero granulado, (C) composto granulado, (D) WPC fabricado por meio de extrusão, (E) WPC fabricado por meio de injeção.....	15
Figura 2 - Principais mercados para compósitos termoplásticos com madeira por aplicação final do produto.	16
Figura 3 - Estrutura molecular do polietileno.....	17
Figura 4 - Reação de esterificação entre o anidrido maleico do polipropileno modificado com anidrido maleico e as hidroxilas da celulose	25
Figura 5 - Diagrama esquemático do processo produtivo dos WPC's.....	27
Figura 6 – (a) Misturador termocinético (b) câmara de mistura.....	28
Figura 7 - Extrusora mono rosca	31
Figura 8 - Representação esquemática de duplas roscas com eixos paralelos...	32
Figura 9 - Extrusora de dupla rosca.	33
Figura 10 - Representação esquemática de uma extrusora rosca dupla cônica com as respectivas zonas de processo.....	34
Figura 11 - Representação esquemática da extrusora Palltruder®.....	35
Figura 12 - Esquematização do processo de moldagem por injeção de um termoplástico em três etapas.	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização dos resíduos de acordo com as máquinas empregadas nos processos de beneficiamento.	22
---	----

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 COMPÓSITO POLÍMERO-MADEIRA (WPC).....	14
2.1 Características da matéria-prima e aditivos empregados para a produção dos compósitos polímero-madeira	16
2.1.1 Polímeros	17
2.1.1.1 Polietileno (PE).....	17
2.1.1.2 Polipropileno (PP)	18
2.1.1.3 Cloreto de Polivinila (PVC)	19
2.1.2 Madeira	20
2.1.3 Aditivos.....	22
2.1.3.1 Agentes acoplantes	24
2.2 Processos de fabricação do compósito polímero-madeira	25
2.3 Parâmetros que influenciam na qualidade dos compósitos polímero-madeira.....	36
2.4 Propriedades dos compósitos polímero-madeira	38
3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	41
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42

Nota do Autor

A reprodução e divulgação, parcial ou total, por meio digital ou impressa é permitida, desde que a fonte seja citada.

DEDICO

Aos meus queridos e amados:

Pais, José e Eva;

Irmãs, Josiane e Michele;

AGRADECIMENTOS

A Universidade Federal de Pelotas, primeiramente pela criação do curso de Engenharia Industrial Madeireira, e também pela oportunidade de realização da graduação.

A Prof.^a Érika, minha orientadora. Por me auxiliar no trabalho de conclusão de curso, com seus valiosos conselhos e ensinamentos.

Aos meus pais José e Eva, pelo apoio em todos os momentos da minha vida, sempre respeitando as minhas decisões.

A Josiane e o Luís Augusto, irmã e cunhado, respectivamente. Por todo entusiasmo e incentivo que sempre me deram para que continuasse os estudos.

A Michele e ao Wagner, irmã e cunhado, respectivamente. Por toda a ajuda que me deram.

Ao Prof. Luís Ernesto, meu co-orientador. Por sugerir o tema abordado no trabalho de conclusão de curso e auxiliar com seus ensinamentos.

A todos os professores e funcionários do curso de engenharia, por permitirem adquirir o conhecimento.

A todos os amigos e colegas que contribuíram a minha conclusão do curso.

RESUMO

LANER, J. N. **Produção de Compósitos Polímero-Madeira**. 2012. 45f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Industrial Madeireira. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

Atualmente, pesquisadores e empresários estão com as atenções voltadas para o melhor aproveitamento dos recursos naturais, diminuindo assim os desperdícios e valorizando a matéria-prima. Assim, este trabalho buscou realizar um levantamento bibliográfico sobre a produção dos compósitos polímero-madeira (WPC), dando ênfase: aos processos produtivos, parâmetros que influenciam na qualidade dos compósitos e as propriedades alcançadas com esse material. Referente ao processo produtivo verificou-se que o tipo de extrusora é essencial para o processo. Extrusoras de dupla-rosca geram uma mistura homogênea, entretanto, podem degradar a madeira através do alto índice de cisalhamento produzido pelas mesmas. Também se observou que as dosagens das matérias primas e secundárias, umidade, granulometria, temperatura e comprimento das fibras influenciam nas propriedades do material obtido. De acordo com alguns autores, encontrou-se que o acréscimo da quantidade de reforço ocasiona o aumento da resistência à flexão até a um máximo de 40% em peso de partículas de madeira, decrescendo a partir desta proporção. Verificou-se que a adição de 5% em peso do agente de acoplamento, anidrido maleico, levou a um aumento de 65% na resistência a tensão e de 50% na resistência a flexão. Além disso, também se averiguou que a adição de 5% desse agente de acoplamento diminuiu em até 75% a higroscopicidade do compósito.

Palavras-chave: WPC, extrusora, agente de acoplamento.

ABSTRACT

LANER, J. **Production of Wood-Polymer Composites**. 2012. 43f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Industrial Madeireira. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

Nowadays, researchers and business men turn their attention on better utilization of natural resources, thus lowering waste and adding value to raw materials. Thus, this study sought to conduct a bibliographic review on the production of wood-polymer composites (WPC), with emphasis on: the production processes, parameters which influence the quality and properties of the composites achieved with this material. In regards to the production process it was found that the type of extruder is essential to the process. Twin-screw extruders generate a homogeneous mixture, but may degrade the wood through the high rate of shear produced by them. It was also observed that the dosages of secondary and raw materials, moisture, grain size, temperature and length of the fiber affect the material properties obtained. According to some authors it was found that the increase of the amount of reinforcement increases the flexural strength to up to 40% by weight of wood particles, decreasing from this ratio. It was found that the addition of 5% by weight of the coupling agent, maleic anhydride, resulted in a 65% increase in resistance to tension and 50% in the resistance to flexion. Furthermore, it was also examined that the addition of 5% of this coupling agent reduces by 75% the hygroscopicity of the composite.

Keywords: WPC, extruder, coupling agent.

1 INTRODUÇÃO

O setor madeireiro, inevitavelmente, é considerado um gerador em potencial de resíduos e ao mesmo tempo de problemas para si mesmo no âmbito de sua gestão ambiental. Dentre os resíduos, destaca-se a serragem, material de baixa densidade que necessita de grandes espaços para ser estocado. Embora a serragem possa ser utilizada como combustível em caldeiras para a produção de energia existe uma crescente tendência mundial pela busca em agregar valor aos materiais considerados resíduos.

Pesquisadores e empresários estão com as atenções voltadas para o melhor aproveitamento dos recursos naturais, diminuindo assim os desperdícios e valorizando a matéria-prima. Uma das maneiras de tornar a serragem um produto com maior valor agregado é a produção de compósitos polímero-madeira. De acordo com Koenig e Sypkens (2002), o compósito polímero-madeira é uma mistura de madeira com resina plástica.

Diversos processos de produção podem ser utilizados para compósitos lignocelulósicos com materiais termoplásticos. Além disso, as formulações variam consideravelmente, desde relações de proporcionalidade dos materiais componentes até os tipos de polímeros e as características da madeira (espécie, tamanho da partícula, conteúdo de extrativos, teor de umidade entre outras). Essas variáveis em conjunto aos agentes acoplantes determinam a qualidade do produto final. A qualidade destes produtos é verificada através de ensaios laboratoriais que buscam avaliar as propriedades do compósito originado.

O mercado de compósito polímero - madeira está em ascensão. Isso se deve às vantagens desse produto em relação à madeira sólida, como não rachar, não empenar, exigir pouca ou nenhuma manutenção e ser facilmente moldado em formas complexas (BRANDT e FRIDLEY, 2003).

Através dessas características o *Wood Plastic Composite* – WPC (Compósito Polímero-Madeira) torna-se uma solução economicamente viável e ambientalmente correta, seja por incorporar resíduos como parte da matéria-prima e ainda por fazer uma substituição de material puramente plástico por madeira, um material renovável.

Tendo em vista a importância apontada do compósito polímero-madeira, o presente trabalho teve por objetivo realizar um levantamento bibliográfico a fim de elucidar os diferentes processos produtivos, parâmetros que influenciam a produção dos compósitos, além de apresentar resultados de desempenho do WPC perante ensaios realizados.

2 COMPÓSITO POLÍMERO-MADEIRA (WPC)

Os compósitos polímero-madeira ou *Wood Plastic Composites* - WPC começaram a ser produzidos na Europa e estão sendo fabricados nos Estados Unidos há décadas. Entretanto, o maior crescimento vem ocorrendo a partir da última década (CLEMONS, 2002).

No mesmo sentido, vem ocorrendo uma substituição na indústria de madeira, dos produtos de madeira sólida pelos produtos de madeira reconstituída, oriundos de árvores de manejo florestal e também de resíduos gerados em outras indústrias de processamento mecânico, possibilitando a ampliação na utilização dos resíduos de madeira e aproveitando as características de tamanho, forma, densidades, e até cores das suas fibras (RAZERA, 2006).

Compósitos são materiais formados por uma fase contínua polimérica (matriz) e reforçada por uma fase descontínua (fibras). As duas fases proporcionam ao material final, propriedades especiais que definem sua moderna e ampla aplicabilidade e que fazem com que engenheiros e técnicos procurem cada vez mais os compósitos como solução para seus projetos (ABMACO, 2011).

Segundo Canevarolo Jr. (2002), a distribuição de esforços ou tensões em uma matriz polimérica deve ser uniforme. Por exemplo, se a resistência à tração da segunda fase (partículas de madeira) for maior que a matriz, o resultado será um aumento nas propriedades mecânicas do compósito.

Uma das características dos produtos à base de compósito polímero - madeira é que eles podem ser trabalhados nas mesmas máquinas utilizadas para trabalhar a madeira. O material pode ser serrado, parafusado, pregado, furado e aplainado como uma peça de madeira (KOENIG e SYPKENS, 2002).

De acordo com Stark e Scheneider (1996), os estudos mercadológicos realizados nos EUA e na Europa sobre o uso de fibras celulósicas como carga e reforço em termoplásticos revelam que a substituição da madeira convencional por compósitos termoplásticos apresentam-se como alternativa viável ao reaproveitamento de resíduos, com inúmeras vantagens, tais como:

- Maior resistência à umidade e deterioração ambiental;
- Resistência a pragas e insetos;

- Podem ser extrusados em perfis com formatos diversificados;
- Apresentam melhor estabilidade dimensional;
- Resistência ao empenamento e trincas;
- Possuem menor custo de manutenção de rotina;
- Maior durabilidade em ambientes agressivos como marinas e piscinas;
- São recicláveis e imitam em aspecto a madeira;
- Dispensam o uso de proteção superficial como tintas e vernizes.

A Figura 1 apresenta o granulado obtido a partir da mistura de polímero e madeira (PALLMANN, 2011).

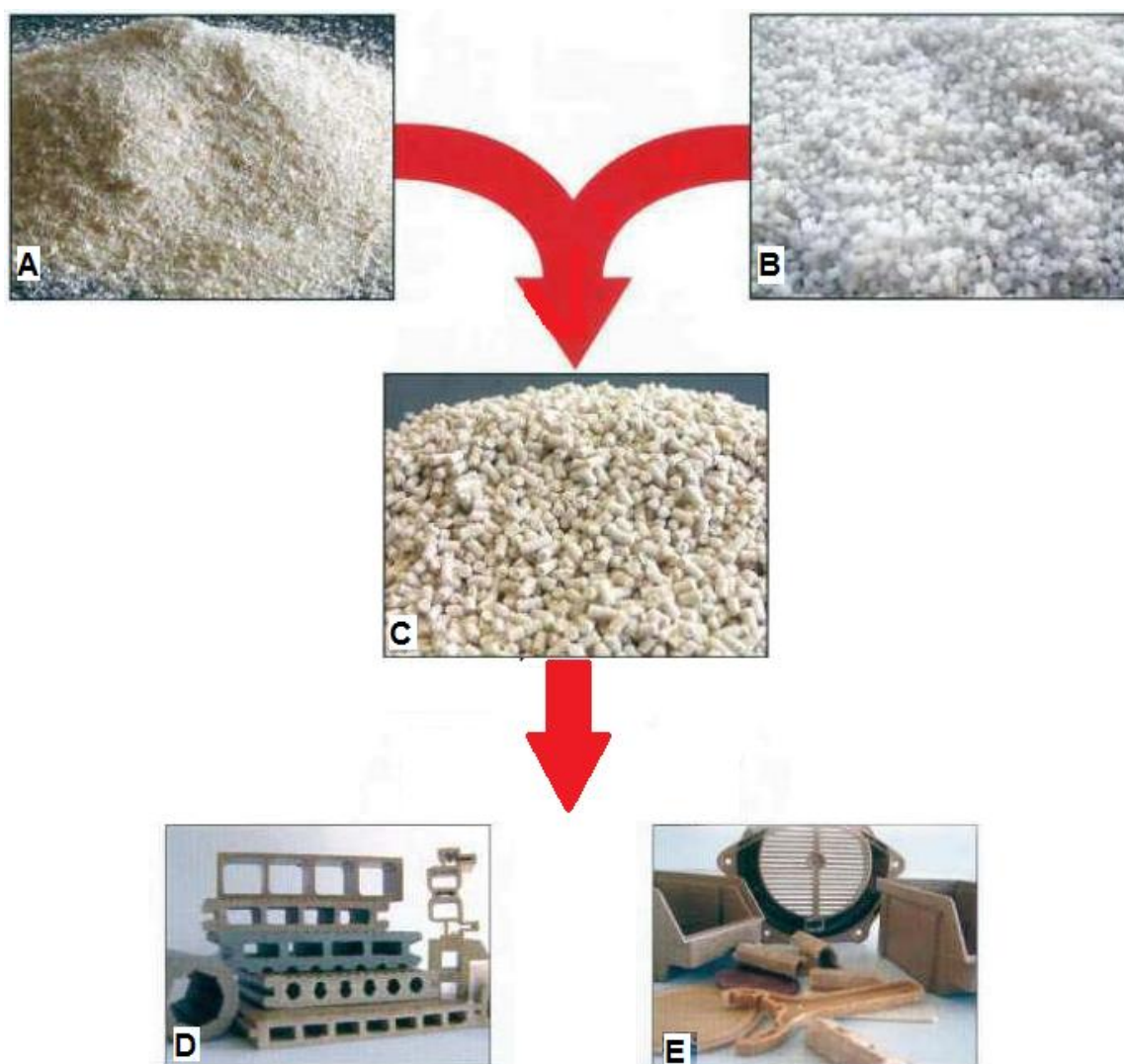


Figura 1 – (A) partícula de madeira, (B) polímero granulado, (C) composto granulado, (D) WPC fabricado por meio de extrusão, (E) WPC fabricado por meio de injeção.

Fonte: PALLMANN (2011).

A Figura 2 apresenta os segmentos de mercado onde o compósito polímero-madeira é utilizado.

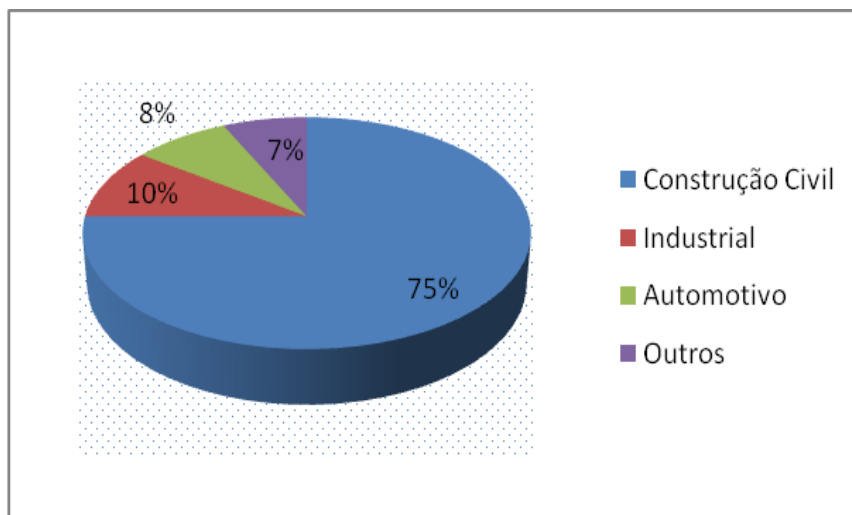


Figura 2 - Principais mercados para compósitos termoplásticos com madeira por aplicação final do produto.

Fonte: ECKERT (2000).

De acordo com Eckert (2000), a maior parte do mercado de WPC's está na construção civil com materiais do tipo polietilenos, polipropilenos e PVC extrusados com resíduo de madeira na forma de perfis para pisos e assoalhos, batentes de janelas e portas, revestimentos dentre muitas outras aplicações.

2.1 Características da matéria-prima e aditivos empregados para a produção dos compósitos polímero-madeira

A grande variedade de produtos finais de WPC, cada qual com suas propriedades mecânicas e químicas específicas, impõem aos formuladores de WPC uma enorme responsabilidade na escolha das matérias primas envolvidas na manufatura deste compósito. Além das proporções dos ingredientes, deve-se levar em conta tipo e tamanho da fibra vegetal, base química e morfologia do polímero termoplástico e sua respectiva origem, reciclado ou virgem (OPTIMAT, 2003).

2.1.1 Polímeros

Para Clemons (2002) a escolha do polímero a ser utilizado como matriz do compósito está dependente do fato da celulose degradar-se a temperaturas superiores aos 200°C, limitando a escolha destes aos termoplásticos que podem ser processados abaixo dessa temperatura sendo utilizados: o polietileno (PE), o polipropileno (PP) e o cloreto de polivinila (PVC).

2.1.1.1 Polietileno (PE)

A estrutura do polietileno é a mais simples dentre os hidrocarbonetos poliméricos. Sua estrutura planar obedece a conformação zig-zag, sendo constituído pela repetição do monômero $-(CH_2)_n-$ e finalizado com grupos CH_3 . O comprimento das ligações de carbono é cerca de $1,54 \times 10^{-7} \mu m$, e o ângulo de ligação entre os mesmos é de $109,5^\circ$ (LEGUENZA, 1999).

A Figura 3 representa a estrutura molecular do polietileno, onde as esferas escuras são os átomos de carbono e as esferas claras são os átomos de hidrogênio.

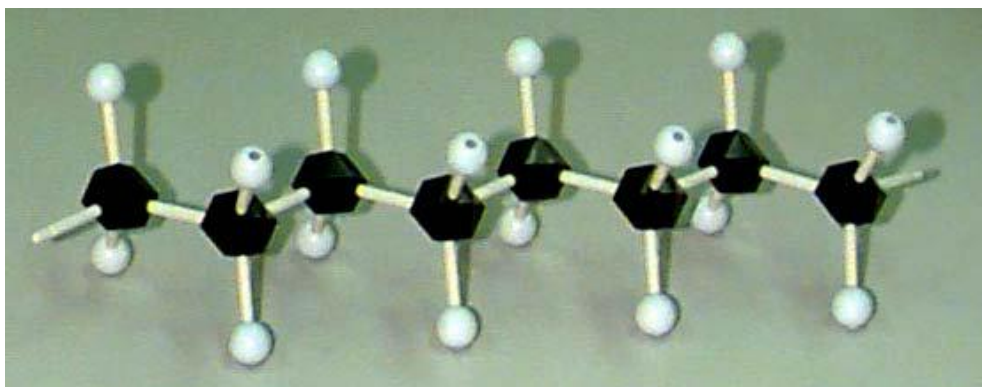


Figura 3 - Estrutura molecular do polietileno.

Fonte: LEGUENZA (1999).

Este polímero é largamente utilizado devido às suas características estruturais e suas propriedades. O que diferencia os principais tipos de polietileno é a presença de ramificações na cadeia polimérica. Essas ramificações podem ser geradas por diferentes mecanismos. Um fator importante é a escolha do catalisador, a partir do qual se pode controlar o teor de comonômeros

incorporados na cadeia polimérica, o tipo e a distribuição de ramificações, características essas que influenciam diretamente a densidade, a cristalinidade, as propriedades e assim as aplicações desses polímeros (COUTINHO et al., 2003).

O polietileno é o polímero mais utilizado como matriz dos compósitos polímero-madeira. Tem a vantagem de ser muito estável durante a fase de processamento. Porém, o polietileno possui baixa tensão superficial, a qual dificulta a pintura e pós-tratamento do produto acabado. São utilizados na fabricação dos compósitos de plástico-madeira os três tipos de polietileno, os polietilenos de baixa, média, e alta densidade (JIANG e KAMDEM, 2004).

2.1.1.2 Polipropileno (PP)

O polipropileno é um termoplástico que é originado pelo monômero chamado propileno (C_3H_6) e é polimerizado por um processo de reação de poliadição e sua massa molar geralmente está entre 80.000 e 500.000. É um polímero semicristalino que possui uma densidade aproximadamente de 0.90-0.91 g/cm³ e índice de refração de 1.45. A sua temperatura de transição vítrea e a temperatura de fusão estão em torno de -18°C e 165°C, respectivamente (CALISTER, 1997).

Este polímero requer maiores teores de aditivos durante o processamento para evitar a sua degradação, quando comparado com o polietileno. Apresenta uma tenacidade superior à do polietileno de alta densidade, e é mais quebradiço a baixa temperatura, dificultando a utilização de parafusos ou grampos (OPTIMAT, 2003).

Sendo extensivamente empregado em embalagem, sacaria, piso tipo carpete, seringa de injeções descartáveis, peças automotivas, carcaças de eletrodomésticos e brinquedos. Entretanto, sua aplicação como termoplástico de engenharia é limitada devido a sua fraca resistência ao impacto. Modificadores de impacto como copolímeros de etilenopropileno (EPR) e etileno-propileno dieno (EPDM) são geralmente adicionados no polipropileno para melhorar sua tenacidade (TAM et al, 1996).

2.1.1.3 Cloreto de Polivinila (PVC)

O PVC é um polímero obtido a partir do cloreto de vinila, um monômero formado pela reação do eteno (43% em peso) e por cloro (57% em peso do polímero). Tendo sua origem em duas matérias-primas de origem natural, o sal comum, cloreto de sódio (NaCl), e o petróleo (eteno). O eteno, em contato com o cloro, por meio da reação conhecida como cloração, origina um novo gás, o dicloroetano. Este gás, ao sofrer pirólise, produz o monômero cloreto de vinila de estrutura CH_2CHCl , e libera ácido clorídrico, HCl, como subproduto. A macromolécula, ou polímero formado de monômeros de cloreto de vinila é chamado de poli (cloreto de vinila) ou PVC e sua estrutura básica consiste de $(\text{CH}_2\text{CHCl})_n$, onde "n" é o número de vezes que esta unidade básica se repete, em geral entre 300 e 1700 vezes (WIEBECK, 2011).

No caso específico do cloreto de polivinila, seus compósitos lignocelulósicos exibem atributos bastante favoráveis como a facilidade de processamento em equipamentos disponíveis no parque industrial brasileiro, além de características interessantes para aplicações na construção civil, pois são resistentes à umidade, a insetos, ao intemperismo, baixa absorção de umidade, possibilidade de soldagem de perfis nos cantos (processo semelhante ao utilizado na montagem de esquadrias de PVC), além da possibilidade de sofrer processos tipicamente utilizados na madeira como colagem, montagem por pregos ou parafusos auto-atarraxantes, pintura, dentre outras (PRITCHARD, 2004).

Compósitos de PE ou PP, normalmente reciclados pós-consumo, podem apresentar menores custos de produção que similares em PVC, polímero para o qual a disponibilidade de material reciclado pós-consumo é menor em função de sua aplicação em produtos de longo ciclo de vida (RODOLFO JR. e JOHN, 2004).

De acordo com Callister Jr. (2002), o PVC, por sua vez, apresenta vantagens sobre os polímeros PE e PP em três aspectos principais e relevantes:

- (a) Maior módulo de elasticidade (maior rigidez) da matriz polimérica: enquanto o PVC apresenta módulo de elasticidade da ordem de 2,0 a 3,5 GPa, tanto o PE quanto o PP são menos rígidos, com módulos de elasticidade entre 1,0 e 1,5 GPa;

- (b) Baixa inflamabilidade inerente do PVC: as resinas de PVC são compostas por 57% de cloro e 43% de etileno, o que as tornam inerentemente pouco inflamáveis, aspecto importante na seleção de materiais para uso na construção civil;
- (c) Possibilidade de pintura: a presença do cloro na estrutura química do PVC torna-o superficialmente bastante polar, principalmente quando comparado com o PE e o PP, polímeros de baixa polaridade superficial e pouca interação química. Desta forma, produtos em compósito lignocelulósicos de PVC podem ser pintados sem a necessidade de tratamento superficial prévio.

2.1.2 Madeira

Os reforços tipicamente usados nos plásticos, como a fibra de vidro, são materiais caros e pesados. Já as fibras de madeira, que são mais baratas, não abrasivas e mais leves, também podem ser utilizadas como reforço para os plásticos. Tratando-se de compósitos polímero-madeira, tanto o plástico quanto a madeira podem ser obtidos a partir de reciclados (ENGLISH, 2000).

As fibras vegetais estão se tornando uma alternativa econômica e ecológica para uso como cargas de reforços e enchimento em compósitos com plásticos. Há quem preveja a gradual substituição de reforços sintéticos tradicionais, particularmente fibras de vidro, por esses materiais (NOTHENBERG, 1996).



A madeira é constituída basicamente por celulose, hemicelulose e lignina. A temperatura de degradação dos materiais lignocelulósicos, situada entre 200 a 220°C, irá restringir a escolha dos polímeros a serem utilizados como matriz do compósito. Os materiais lignocelulósicos apresentam vantagens quando utilizados como reforços dos termoplásticos, por serem recursos renováveis, e de baixo custo, porém, e devido à sua característica polar, os materiais lignocelulósicos não dispersam facilmente no meio da matriz polimérica apolar. A interação entre as partículas/fibras de madeira e a matriz de polímero é

melhorada com a utilização de tratamentos superficiais da primeira, com agentes de acoplamento (WOLCOTT e ENGLUND, 1999).

Segundo Yamaji e Bonduelle (2004), o resíduo de madeira de granulometria mais fina apresenta densidade mais baixa. E de acordo com Koenig e Sypkens (2002), a baixa densidade dos resíduos da madeira é um dos fatores para que ocorram inconsistências no produto, como a separação de materiais, acarretando na produção de um compósito polímero-madeira de baixa qualidade.

A Tabela 1 discrimina os resíduos de madeira quanto a sua geração pela respectiva máquina de beneficiamento. É importante notar as diferentes características da serragem coletada tal como a cor que é referente à do tronco, cor da espécie de árvore ou mesmo a forma como a serragem é feita, podendo escurecer o resíduo pelo atrito com a lâmina. Diferentes, também, são os aspectos físicos, sendo que há fases de farinha, pó fibroso, maravalhas finas e grossas, lisas ou espiraladas. Por fim, há diferença na granulometria dentro de um mesmo resíduo, podendo ser vistas fases de partículas grosseiras, fases de partículas médias e de partículas finas (TEIXEIRA, 2005).

Tabela 1 - Caracterização dos resíduos de acordo com as máquinas empregadas nos processos de beneficiamento.

SERRA FITA	SERRA CIRCULAR	SERRA INDUSTRIAL	FURADEIRA MÚLTIPLA
<p>FUNÇÃO: Desdobro e serragem em geral</p> <p>RESÍDUO: Pó de serra, apresentando-se como uma farinha granulosa de cor escura;</p>	<p>FUNÇÃO: Serragem em geral;</p> <p>RESÍDUO: Pó-de-serra, apresentando-se como um pó fibroso;</p>	<p>FUNÇÃO: Serragem de maior precisão</p> <p>RESÍDUO: Apresentando-se como uma mistura de pó e fibras;</p>	<p>FUNÇÃO: Furar</p> <p>RESÍDUO: Material fibroso e macio ao toque apresentando-se como uma mistura de pó, fibras e maravalha de pequenas dimensões;</p>
			
DESTOPADEIRA	DESEMPENADEIRA	PLAINA	
<p>FUNÇÃO: Destopo</p> <p>RESÍDUO 1: Material fibroso muito fino, apresentando-se como uma mistura de pó e de fibras curtas;</p> <p>RESÍDUO 2: Tocos e pontas de toras e de tábuas;</p>	<p>FUNÇÃO: Desempeno e desbaste</p> <p>RESÍDUO: Maravalha reta fina, média, grossa e lascas;</p>	<p>FUNÇÃO: Aparelhamento</p> <p>RESÍDUO: Maravalha espiralada média e fina</p>	
			

Fonte: TEIXEIRA (2005).

2.1.3 Aditivos

Devido a grande diversidade de aplicações finais, com inúmeras propriedades químicas e mecânicas requeridas, foram desenvolvidas várias blendas¹ poliméricas, utilizando-se muitos aditivos químicos para melhora das propriedades desejadas em aplicações específicas (OPTIMAT, 2003).

¹ Mistura física de dois ou mais polímeros.

De acordo com Optimat (2003), os aditivos, em geral, são utilizados com objetivos claros e específicos, destacando-se aqueles para:

- Melhorar a processabilidade dos compósitos: agentes lubrificantes e aditivos do processo;
- Promover ao sistema durabilidade durante o processo ou no tempo de vida do produto final: antioxidantes e estabilizantes UV;
- Aumentar as propriedades mecânicas do WPC: agentes compatibilizantes e modificadores de impacto.

Resumidamente, os aditivos podem ser classificados segundo seus mecanismos de atuação listados a seguir:

- a) Lubrificantes internos: caracterizam-se por atuarem na fase polimérica, reduzindo a viscosidade com o aumento do índice de fluidez, melhorando a dissipação de calor prevenindo a degradação pelo cisalhamento e reduzindo a fratura do fundido com a redução da viscosidade a altas taxas de cisalhamento.
- b) Lubrificantes externos: atuam nas interfaces entre as resinas e outros equipamentos, reduzindo a adesão entre resinas e o metal das paredes e rosca da extrusora, reduzem a fricção e melhoram a incorporação e dispersão das cargas.
- c) Estabilizadores primários: atuam na captação de radicais livres gerados no sistema;
- d) Estabilizadores secundários: auxiliam na decomposição de hidroperóxidos, os quais promovem a degradação;
- e) Agentes de acoplantes: são compostos químicos os quais possuem uma parte polar que podem interagir com os grupos de hidroxilas de celulose e uma parte apolar mais compatível com os hidrocarbonetos das cadeias poliméricas das poliolefinas. Comercialmente, agentes compatibilizantes contendo grupamentos como anidridos, organosilanos, isocianatos, ao lado de poliolefinas enxertadas com compostos fenólicos são os mais utilizados.

2.1.3.1 Agentes acoplantes

O efeito da incorporação de fibras naturais lignocelulósicas, como kenaf, sisal, juta, algodão e madeira nas propriedades do polipropileno tem sido objeto de estudos extensivos. Considerações sobre processo, compatibilização e propriedades têm sido abordadas por inúmeros autores. Esse amplo interesse baseia-se no fato de que a incorporação de fibras naturais em termoplásticos poliolefinicos apolares, o caráter polar da celulose requer a compatibilização do sistema através da incorporação dos chamados agentes de acoplamento ou de adesão interfacial (COUTINHO e COSTA, 1999).

A escolha de agentes compatibilizantes para promover uma melhor adesão interfacial entre o reforço celulósico e a matriz polimérica deve seguir alguns critérios básicos: Inicialmente o compatibilizante ou agente de acoplamento, em contato com a superfície do reforço deve interagir fortemente com as fibras através de ligações covalentes fortes ou interações secundárias do tipo ácido-base ou pontes de hidrogênio. Isto implica que uma quantidade suficiente de grupos funcionais deve estar presente no compatibilizante que possibilite a reação com as hidroxilas da celulose. Outro aspecto considerado é o comprimento das cadeias do compatibilizante que deve possuir cadeias suficientemente longas de alta massa molecular que permita a formação de emaranhamentos moleculares com a matriz polimérica na interfase através de ancoramento mecânico. Alguns autores relacionam o tratamento superficial da fibra como forma de otimização do processo de compatibilização (COUTINHO e COSTA, 1999).

De acordo com Gardner (2011), os agentes de acoplamento ou compatibilizantes promovem interações ou ligação química entre a matriz e o reforço, evitando o processo de delaminação da fibra na matriz polimérica que ocorre por incompatibilidade química e comprometendo o reforço do compósito devido à transferência ineficiente de esforços na interface fibra-matriz.

Do ponto de vista mecânico, os agentes acoplantes atuam no sentido de evitar o processo de delaminação da fibra na matriz polimérica que ocorre por incompatibilidade química e acaba comprometendo o reforço do compósito devido à transferência ineficiente de esforços na interface fibra-matriz. A formação de ligações covalentes através de reações de esterificação por pontes de hidrogênio

entre o anidrido maleico do polipropileno modificado com anidrido maleico (PPAM) e as hidroxilas da celulose tornam-se essenciais ao processo. A figura 4 ilustra a reação (FROLLINI et al., 2000).

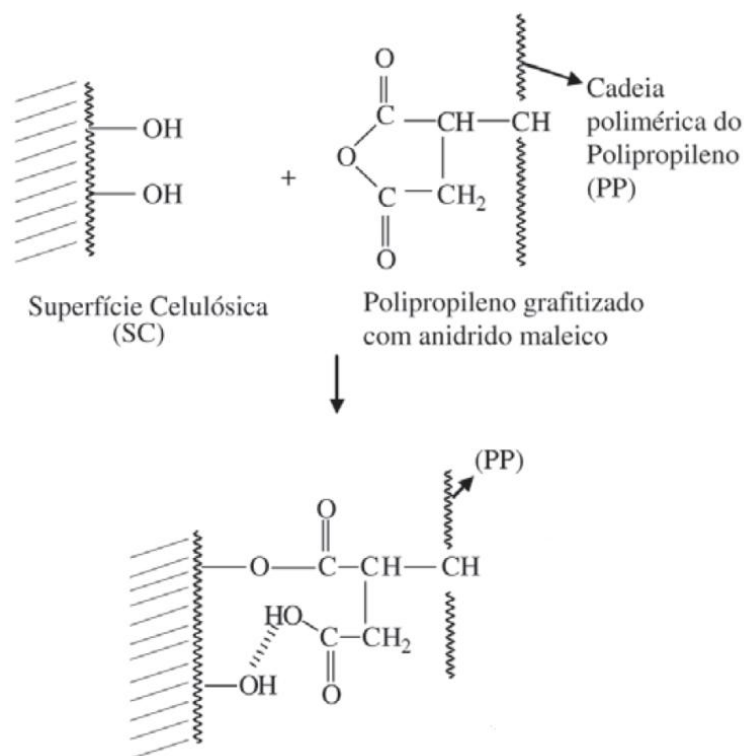


Figura 4 - Reação de esterificação entre o anidrido maleico do polipropileno modificado com anidrido maleico e as hidroxilas da celulose

Fonte: FROLLINI et al. (2000).

O anidrido maleico tem sido o agente de acoplamento mais empregado em compósitos de polipropileno com materiais lignocelulósicos e de acordo com diversos autores, os agentes de acoplamento mais utilizados são à base de anidrido maleico e ácido acrílico (CORREA et al., 2003).

2.2 Processos de fabricação do compósito polímero-madeira

A fabricação do compósito polímero-madeira consiste normalmente em duas etapas distintas. Sendo elas a mistura dos componentes e moldagem do produto final. As matérias-primas são inicialmente submetidas a um processo chamado de mistura, produzindo um produto intermediário. Basicamente, o processo de mistura é caracterizado pela dispersão das fibras vegetais no

polímero fundido, seja via processo de batelada como em misturadores contínuos. O compósito pode ser imediatamente injetado no molde na forma do produto final ou ser transformado em grãos para posteriores processamentos. Esta opção de um processo único e contínuo de mistura e moldagem final é normalmente chamada de processo em linha (CLEMONS, 2002).

Embora a extrusão seja o processo mais utilizado pelos fabricantes de WPC's, várias são as possibilidades de configurações industriais para a fabricação dos mesmos, incluindo-se extrusoras e estratégias diferenciadas de produção. Alguns utilizam a mistura como matéria-prima para a formação do produto final em uma extrusora de mono rosca, outros utilizam extrusora de rosca dupla para mistura e geração do produto acabado em apenas uma etapa e alguns utilizam duas extrusoras em sequência, uma para a mistura e outra para a extrusão do perfil (MAPLESTON, 2001).

Normalmente, os processos de mistura exigem uma etapa de pré-secagem para controle da umidade residual das fibras vegetais, entretanto, alguns processos tecnologicamente mais avançados, dispensam esta etapa preparatória, por possuírem uma zona específica para desgaseificação da mistura fundida. Estas alternativas são comuns em extrusoras de dupla rosca (MONDARDO, 2006).

A Figura 5 apresenta o fluxograma básico dos processos de fabricação de WPC's:

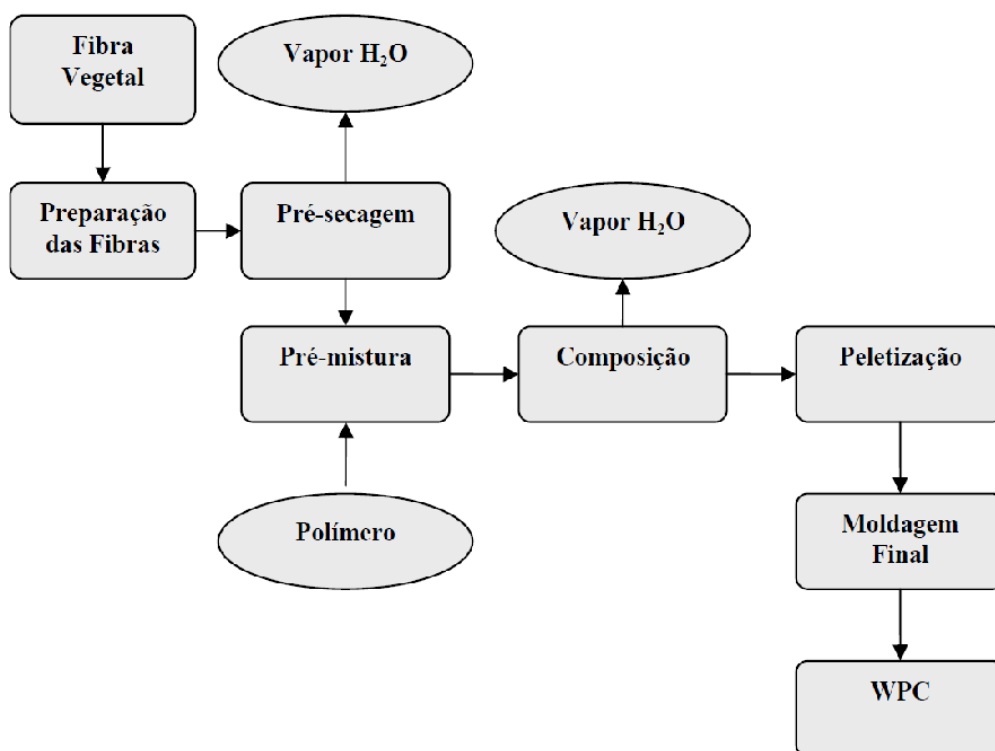


Figura 5 - Diagrama esquemático do processo produtivo dos WPC's.

Fonte: ENGLISH et al. (1996).

De modo geral, podem-se caracterizar as diversas alternativas de etapas nos processos industriais de manufatura de WPC como: mistura das matérias-primas, extrusão e moldagem do produto.

a) Mistura das matérias-primas

Esta é a primeira etapa na fabricação do WPC. As cargas vegetais e de aditivos são incorporadas e dispersas no polímero fundido para produzir um sistema heterogêneo de dispersão homogênea. O processo pode ocorrer em misturadores em batelada (misturadores termo cinéticos) ou em equipamento de fluxo contínuos (extrusoras e amassadores). As extrusoras de mistura são os equipamentos mais comuns entre os fabricantes de WPC. As matérias-primas são alimentadas simultaneamente no início da extrusora ou a carga vegetal pode ser introduzida diretamente no polímero fundido através de um alimentador lateral com o intuito de reduzir a degradação térmica da fibra vegetal. Os misturadores

(Fig.6) produzem o WPC em forma de grãos para a moldagem final na forma de produto acabado (OPTIMAT, 2003).

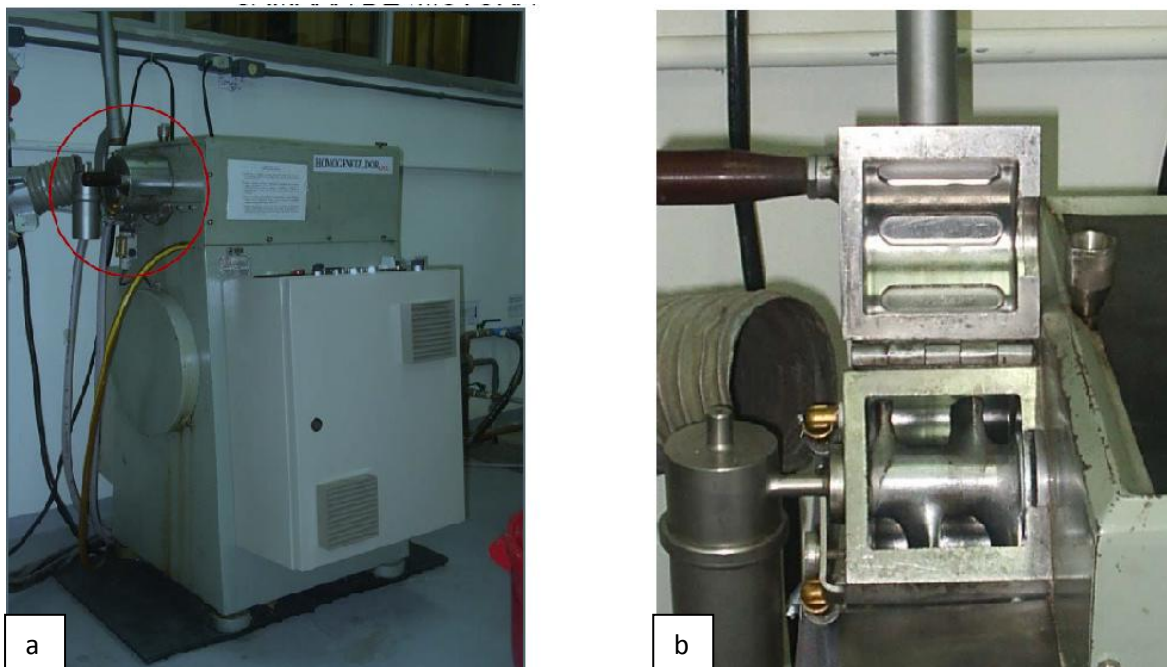


Figura 6 – (a) Misturador termocinético (b) câmara de mistura.

Fonte: HILLIG (2006).

b) Extrusão

A extrusão de materiais poliméricos para a produção de produtos finais para aplicações industriais ou de consumo é um processo integrado, com a extrusora constituindo um componente de toda a linha (GILES JR. et al., 2004).

Em algumas aplicações, as linhas de produção são muito longas, com numerosas operações, exigindo dos operadores que se comuniquem e trabalhem juntos para produzir um produto final aceitável. Cada etapa do processo agrega valor e, conseqüentemente, o produto atinge seu valor máximo no final da linha. Uma configuração incorreta no início do processo pode fazer com que o produto torne-se inaceitável no final da linha. O material polimérico é recebido, inspecionado e armazenado. Antes da extrusão, o polímero pode ser combinado com aditivos (estabilizadores de calor, estabilidade oxidativa, estabilidade UV, etc.), pigmentos de cor ou concentrados, retardadores de fogo, enchimentos,

lubrificantes, reforços, etc., para produzir o perfil desejado de propriedade do produto (GILES JR. et al., 2004).

De acordo com Machado e Stuart (2000), as extrusoras podem ser classificadas em quatro categorias distintas:

- a) Madeira pré-secada; mistura pré-homogeneizada (*Pre-dry, Pre-mix*): neste processo são utilizados equipamentos no qual a fibra de madeira é submetida a pré-secagem em níveis de umidade inferiores a 1% e alimentada em uma extrusora rosca-dupla contra-rotacional juntamente com o polímero, normalmente na forma de pó. A mistura polímero-madeira e aditivos é preparada em misturadores intensivos antes de ser alimentada na extrusora. Esse sistema é muito utilizado para processamento de termoplásticos com baixa estabilidade térmica como o PVC;
- b) Madeira pré-secada; alimentação polímero-madeira em separado (*Pre-dry, Split Feed*): neste processo a resina e a fibra são alimentadas em separado propiciando um melhor controle do tempo de residência da carga celulósica durante o processamento. São normalmente utilizadas extrusoras de rosca-dupla de grande capacidade, com portos laterais de alimentação, onde a fibra é misturada ao polímero fundido, passando por zonas de mistura distributiva e desgaseificação da umidade residual;
- c) Madeira úmida primeiro; alimentação do polímero fundido (*Wood First, Melt Feed*): neste processo são necessárias duas extrusoras que operam simultaneamente; uma extrusora primária secando as partículas de madeira e uma outra menor plastificando o polímero e os aditivos. A empresa Davis-Standard dos EUA patenteou um equipamento dedicado para o processamento de compósitos termoplásticos com essas características, denominado *Woodtruder*® com capacidade de até 1000 lbs/h;

d) Madeira úmida primeiro; alimentação em separado (*Wood First, Split Feed*): Neste processo a partícula de madeira pode ser alimentada ainda úmida na zona de alimentação e a mistura de resina e aditivos introduzida posteriormente no barril através de um alimentador lateral. Todavia esse processo requer normalmente equipamentos com barris muito longos (comprimento/diâmetro - L/D 44 ou 48:1) e com zonas de desgaseificação próximas a zona de alimentação para remoção da umidade da madeira, o que nem sempre é possível.

Alguns sistemas de resina devem ser secados antes da extrusão para eliminar polímero degradado devido à umidade. Uma vez que o polímero ou mistura está devidamente seco e com os ingredientes misturados, a formulação é alimentada na extrusora, onde é derretida, misturada e entregue ao molde para moldar o extrudado. Depois de sair do molde, o produto é resfriado e solidificado na forma desejada e se afasta da extrusora em velocidade constante para atingir a seção transversal apropriada. Operações secundárias, ou seja, impressão, corte, recozimento, etc., pode ser feito em linha, após o extrator. Finalmente, o produto é inspecionado, embalado (GILES JR. et al., 2004).

Tipos de extrusoras

- **Extrusora mono rosca de perfis**

Caracteriza-se por ser um processo de extrusão apenas composto de uma rosca com, basicamente, elementos de transporte e alguns pontos de amassamento. É um processo de baixo custo, porém apresenta diversas desvantagens técnicas. Dentre elas pode-se citar: a baixa capacidade de mistura em função da reduzida taxa de cisalhamento do equipamento, alto custo de materiais, baixa produtividade, necessidade de um sistema de pré-secagem da fibra vegetal, alto risco de queima uma vez que o polímero e fibra são alimentados simultaneamente em forma de grãos já carregados e altas velocidades angulares da rosca (OPTIMAT, 2003).

A Figura 7 apresenta uma extrusora mono rosca utilizada para mistura de compósitos.



Figura 7 - Extrusora mono rosca

Fonte: HILLIG, 2006.

- **Extrusora de dupla rosca co-rotante (mistura e perfis)**

Este processo é composto por um equipamento de extrusão com duas roscas com o mesmo sentido de rotação. São indicados para mistura e produção de perfis em que elevados índices de produtividade são necessários. A desvantagem deste processo é apenas a dificuldade de controle das altas taxas de cisalhamento pertinentes a este tipo de processo (OPTIMAT, 2003).

Os processos de extrusão permitem operações livres de solventes, com baixos tempos de residência do material e continuidade do processo (MACHADO e VAN DUIN, 2004).

Extrusora de dupla rosca contra-rotante (mistura e perfis)

O processo de extrusão de dupla rosca contra-rotante caracteriza-se por um par de roscas sem fim e com sentido de rotação contrário. Tecnicamente é indicada para extrusão de perfis porque é capaz de gerar altas pressões durante o processamento. As suas principais vantagens são baixa velocidade angular e geração de baixas forças de cisalhamento. Entre as desvantagens pode-se destacar a necessidade de um sistema de secagem e mistura. Um grande espaço físico é necessário e o polímero é alimentado com fibras, aumentando o risco de ocorrer queima das fibras durante o processamento (OPTIMAT, 2003).

Extrusoras de dupla-rosca contra rotativas podem proporcionar a incorporação de até 80% de serragem nos compostos (GILES JR. et al., 2004).

A Figura 8 apresenta um esquema de duplas roscas com eixos paralelos e descreve as diferentes zonas ao longo do eixo longitudinal das peças.

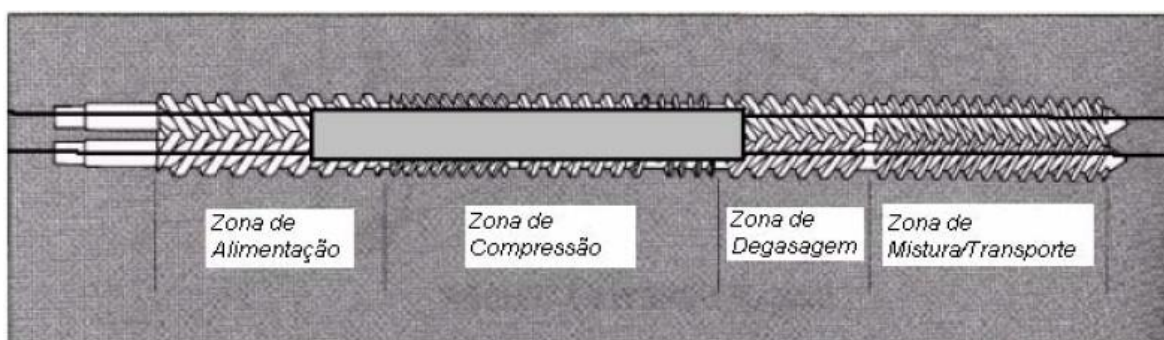


Figura 8 - Representação esquemática de duplas roscas com eixos paralelos.

Fonte: OPTIMAT e MERL (2003).

Conforme já mencionado nos itens anteriores, as extrusoras de dupla rosca, contra-rotante ou co-rotante possuem duas roscas paralelas. A possibilidade de adicionar à sua configuração mais ou menos elementos de mistura ou amassamento, permite um controle da taxa de cisalhamento do sistema, ou seja, quanto mais elementos de amassamento, melhores serão as taxas de cisalhamento, melhor será a capacidade de mistura e reatividade do equipamento (UTRACKI; FAVIS, 1989).

A Figura 9 apresenta uma extrusora de dupla rosca com dosador gravimétrico.



Figura 9 - Extrusora de dupla rosca.

Fonte: HILLIG, 2006.

- **Extrusora de dupla rosca cônica**

De acordo com Optimat (2003), a extrusora é uma máquina composta por dois parafusos cônicos sem fim. Este processo tem desempenho superior para processamento do WPC pelas seguintes razões:

- a) Espaço físico minimizado para grandes capacidades de produção;
- b) Proporcionam elevadas pressões no processamento;
- c) Possuem maior flexibilidade de processo em trabalhar com diferentes
- d) Necessidades de produção e variações das propriedades das matérias-primas;

- e) O largo diâmetro da rosca na zona de alimentação e o aumento da compressão ao longo da rosca tornam as máquinas cônicas apropriadas para materiais com baixa densidade aparente;
- f) O baixo diâmetro da rosca reduz as tensões de cisalhamento, deixando as fibras vegetais mais intactas;
- g) O menor comprimento da rosca significa um menor tempo de residência no equipamento. Isto permite que o material fundido atravesse a zona de alta temperatura mais rapidamente, evitando o escurecimento das fibras de madeira quando submetidas às temperaturas ideais para fusão do polímero.

A figura 10 apresenta um conjunto de roscas cônicas e as zonas de processo.

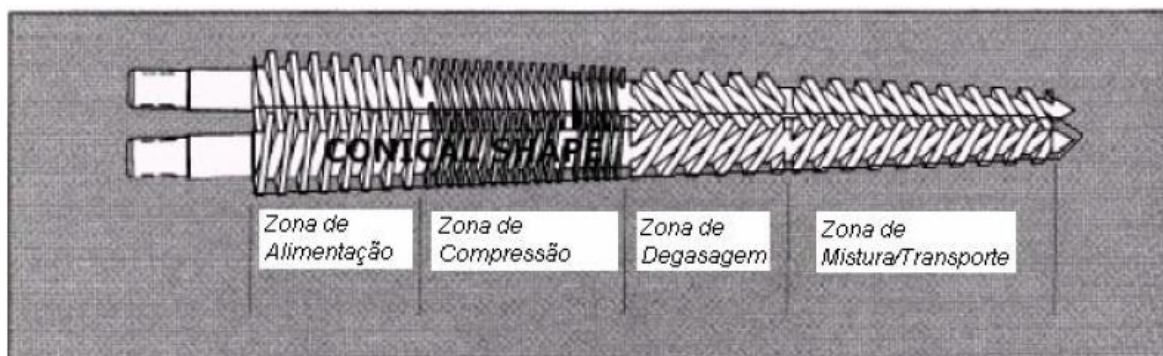


Figura 10 - Representação esquemática de uma extrusora rosca dupla cônica com as respectivas zonas de processo.

Fonte: OPTIMAT (2003).

- **Extrusora Palltruder®**

De acordo com a Pallmann (2011), quatro etapas distintas caracterizam a tecnologia Palltrusion™ (produção de compósito polímero-madeira com o sistema Palltruder®).

Dosagem dos componentes (fibra natural, material plástico e acoplante), aglomeração, resfriamento do granulado e separação de finos. O sistema se caracteriza pelo projeto modular e compacto. Altas tecnologias de controle e comando garantem uma produção contínua e automática. O sistema Palltruder® processa preferencialmente materiais com teor de umidade de até 8%. O vapor gerado na câmara de aglomeração, proveniente da umidade inicial da fibra

natural, é transferido à atmosfera por meio de uma unidade filtrante. Eventuais partículas finas de material, aspiradas pela sucção do vapor, são retidas pelo filtro, descarregadas na rosca de alimentação, retornando assim ao processo de aglomeração. A umidade residual, do material aglomerado produzido, ficará abaixo de 1% (PALLMANN, 2011).

A figura 11 apresenta a extrusora Palltruder® e aponta as principais partes do equipamento.

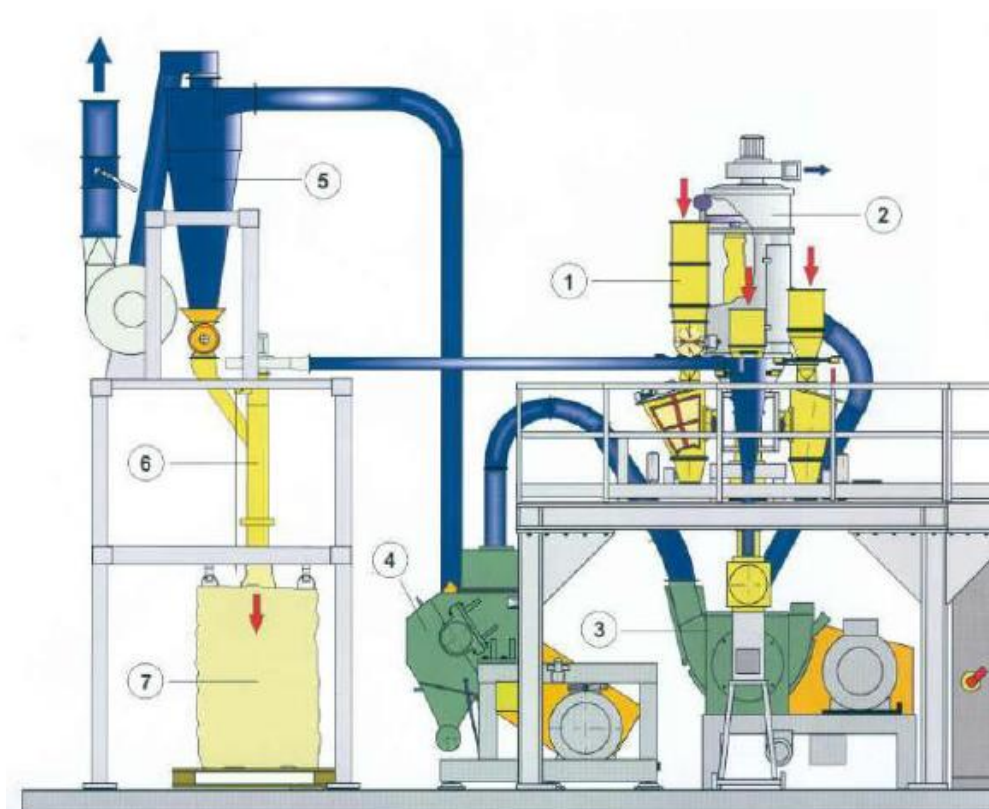


Figura 11 - Representação esquemática da extrusora Palltruder®.

Fonte: PALLMANN, 2011.

, onde:

- 1) **Dosador gravimétrico:** proporcionar a dosagem correta dos materiais.
- 2) **Filtro:** filtrar as partículas à granulometria desejada, descartando os finos.
- 3) **Palltruder®:** extrusão dos materiais.
- 4) **Moinho granulador:** transformação do material em granulados.

5) Transporte pneumático: sucção dos granulados para o classificador.

6) Classificador tipo cascata: classificar os granulados de wpc por meio de telas com diferentes orifícios.

7) Sistema de ensaque: embalagem do wpc.

c) Moldagem por injeção

No processo de injeção de termoplásticos, a matéria-prima é alimentada em uma rosca sem fim, onde é fundida e, posteriormente, bombeada a uma cavidade fechada (molde). Após o preenchimento do molde, o sistema é refrigerado e as peças são extraídas do equipamento (OPTIMAT, 2003).

Na Figura 12 pode-se observar o processo de moldagem por injeção nas suas três etapas fundamentais: fusão na rosca sem fim, injeção do sistema fluido na cavidade fechada e abertura do molde seguida de extração da peça (OPTIMAT, 2003).

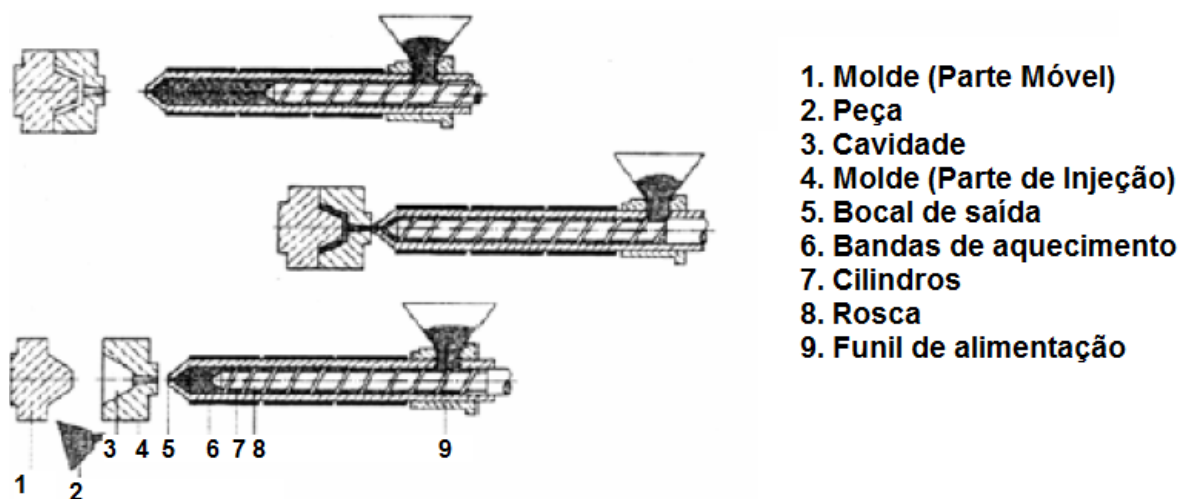


Figura 12 - Esquemática do processo de moldagem por injeção de um termoplástico em três etapas.

Fonte: OPTIMAT (2003).

2.3 Parâmetros que influenciam na qualidade dos compósitos polímero-madeira

Inúmeros aspectos devem ser observados no processamento de termoplásticos com resíduos de madeira. A umidade e a granulometria devem ser rigidamente controladas, uma vez que estas produzem descontinuidades de processo e peças com características inaceitáveis devido à presença de bolhas ou manchas superficiais causadas por processos termo-oxidativos (MASSON, 1998).

Assim, como principal requisito, o resíduo celulósico deve ser pré-secado e zonas de degasagem² devem ser utilizadas para remoção da umidade residual durante o processamento. A baixa temperatura de degradação da celulose na faixa de 200 a 220°C constitui um fator limitante do processo, exceto quando os tempos de residência são minimizados. A exposição do resíduo de madeira a temperaturas acima dessa faixa libera voláteis, provoca descoloração, aparecimento de odor e a fragilização do compósito (STARK e SCHENEIDER, 1996).

Segundo Clemons (2002), as características dos compósitos também são influenciadas pelo método de processamento. Já Bledzki et al. (1998) descreve que os principais problemas no processamento de compósito polímero-madeira são:

- a) variação na qualidade da matéria-prima plástica (especialmente se for reciclada);
- b) limitações na compatibilidade devido às características hidrofílicas da madeira e hidrofóbicas do polímero;
- c) baixa estabilidade térmica durante o processamento;
- d) as rigorosas condições de processamento (cisalhamento e temperaturas altas).

Koenig e Sypkens (2002) apresentam alguns pontos básicos para o processamento dos compósitos polímero-madeira:

² Aberturas ou saídas de ar em alguns pontos ao longo da rosca, para extração de voláteis do polímero fundido.

- a) sempre manter as temperaturas do processo o mais baixo possível. Temperaturas abaixo de 200° C são recomendadas para evitar a queima da madeira. Sempre permitir adequada saída de gases. A umidade resultante do processo de extrusão precisa ter uma saída da extrusora (sistema de degasagem);
- b) o aumento do índice de fluidez da resina diminuirá a temperatura dentro da rosca. Ainda, permite duas ou três zonas de mistura na configuração da rosca. Quanto mais uniforme a mistura, menor poderá ser a temperatura do processo;
- c) extrusoras com rosca dupla parecem ser melhores do que extrusoras com rosca simples para o processamento dos compósitos plástico-madeira.

De acordo com Colom et al. (2003), as propriedades dos compósitos polímero-madeira dependem do conteúdo de madeira e da presença de aditivos.

Joseph et al. (2002) também concluíram que o aumento do conteúdo de fibras aumenta a absorção de umidade no compósito polímero-madeira. Entretanto, o uso de aditivos pode reduzir a taxa de absorção.

Fibras curtas também reduzem os problemas relacionados à dificuldade de alimentação e à ação cisalhante do equipamento, pois quanto menor é o comprimento das fibras, menores são os efeitos da redução de tamanho causados por sua quebra durante o processamento (DOAN et al., 2006).

2.4 Propriedades dos compósitos polímero-madeira

Stark e Berger (1997) num estudo sobre a influência da quantidade, tipo, e tamanho de partícula de madeira nas propriedades de compósitos de matriz de polipropileno, determinaram que o acréscimo da quantidade de reforço ocasiona o aumento da resistência à flexão até a um máximo de 40% em peso de partículas de madeira, decrescendo a partir desta proporção.

Slaughter (2004) comparou as propriedades físicas e mecânicas de 22 composições extrudadas de polipropileno reforçado com fibras de madeira, *Pinus* sp., madeira macia, ou *Acer* sp., madeira dura, em quantidades que variaram entre os 50 e os 69,5% da massa do compósito, e com quantidades diferentes de

agentes de acoplamento. O autor verificou que, de uma maneira geral, os compósitos reforçados com fibras de ácer exibiam melhores propriedades mecânicas (resistência à flexão e à torção), e que, por sua vez, os compósitos contendo pinho revelavam uma melhor qualidade de extrusão e uma menor absorção de água. O autor também constatou que na ausência dos agentes de acoplamento se obtiveram compósitos com propriedades mecânicas inferiores.

Najafi et al. (2006), estudaram o comportamento mecânico de misturas de polipropileno (PP), polietileno de alta densidade, virgem e reciclado, com 50% em peso de partículas de madeira, prensadas a 170°C e a 190°C. Os compósitos contendo polipropileno apresentavam um maior módulo e resistência à flexão, independentemente de ser utilizado material virgem ou reciclado, o que foi atribuído ao melhor desempenho do polipropileno isoladamente. Foram também preparadas misturas contendo ambos os polímeros em frações de peso iguais (25% + 25%), virgem ou reciclado, as quais deram origem a materiais com características muito semelhantes às dos compósitos fabricados com apenas um dos polímeros. Verificou-se, contudo, no caso dos compósitos com mistura dos dois polímeros, uma diferença entre a utilização de materiais virgens ou reciclados – os compósitos contendo materiais reciclados apresentaram um maior módulo à flexão, fenômeno que foi atribuído ao aumento da cristalinidade da matriz.

Bledzki e Faruk (2003) estudaram a influência do agente de acoplamento (um copolímero de polipropileno modificado com anidrido maleico – PPAM) e do tipo de reforço nas propriedades mecânicas de compósitos de polipropileno, preparados por moldagem por injeção, contendo as seguintes opções de reforço (50% em peso): madeira dura, madeira macia, fibras longas, ou aparas de madeira. Verificaram que a adição de 5% em peso do agente de acoplamento levou a um aumento de 65% na resistência a tensão e de 50% na resistência a flexão; que os compósitos com aparas de madeira, e com 5% de PPAM, apresentavam melhores propriedades à flexão e à tensão; que os compósitos com fibras de madeira dura, e com 5% PPAM, apresentavam uma melhor resistência ao impacto; e que os compósitos com fibras longas eram menos higroscópicos. Além disso, também constataram que a adição de 5% de PPAM diminuía em até 75% a higroscopicidade do compósito.

Hillig (2006) analisou a viabilidade técnica de produção de compósitos de polietileno de alta densidade (HDPE) reforçados com resíduos de madeira e derivados da indústria moveleira. Os resíduos utilizados foram: serragem de pinus (*Pinus Taeda*), Garapeira (*Apuleia leiocarpa*) e eucalipto (*Eucalyptus grandis*), serragem de chapas de fibra de média densidade (MDF), e também serragem de chapas aglomeradas. As proporções de serragem utilizadas foram 20%, 40% e 60%. Os resíduos foram processados com o HDPE para conformação dos compósitos em um misturador tipo Drais, em uma extrusora mono rosca e em uma extrusora dupla rosca co-rotante. Numa análise geral, os melhores resultados foram obtidos com processo de dupla rosca e para maiores proporções de serragem usadas. A serragem de MDF proporcionou as maiores médias e a de pinus as menores médias de propriedades mecânicas dos compósitos.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nos dias atuais, o conceito de desenvolvimento sustentável, ou seja, crescimento econômico aliado ao desenvolvimento social e a preservação ambiental, apresenta-se como a forma mais racional para a manutenção da vida na Terra. Porém, a dificuldade em alinhar esses vetores é tamanha, muitas vezes pela carência de pesquisa no desenvolvimento de materiais mais eficientes que melhor aproveitem os recursos naturais disponíveis.

Assim, buscaram-se apresentar as características fundamentais do processo produtivo dos compósitos poliméricos reforçados com fibras de madeira, os parâmetros que influenciam o processo e as propriedades desse material com a intenção de verificar a relevância desse material como uma alternativa de aproveitamento máximo da madeira.

Por meio da presente revisão de literatura notou-se que existem muitos parâmetros que influenciam na qualidade do material produzido, constatando-se que o agente de acoplamento anidrido maleico incorpora acréscimo às propriedades físicas e mecânicas dos compósitos polímero-madeira. Além disso, a dosagem dos materiais primários e secundários interfere nas propriedades dos WPC's.

Também se verificou que o tipo de extrusora é fundamental para o processo. Extrusoras de dupla-rosca geram uma mistura homogênea, entretanto, podem degradar a madeira através do alto índice de cisalhamento produzido pelas mesmas.

Sobretudo os compósitos poliméricos reforçados com madeira demonstram características superiores aos compósitos convencionais como os reforçados com fibras de vidro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MATERIAIS PLÁSTICOS COMPOSTOS – **ABMACO** – Disponível em: <<http://www.abmaco.org.br>> Acesso em: 10/11/2011.

BLEDZKI, A.K.; REIHMANE, S.; GASSAN, J. Thermoplastics reinforce with wood fillers: a literature review. **Polymer-plastic Technology Engineering**, v.37, n.4, p.451-68, 1998.

BLEDZKI, A.K. & O. FARUK. Wood Fibre Reinforced Polypropylene Composites: Effect of Fibre Geometry and Coupling Agent on Physico- Mechanical Properties. **Applied Composite Materials**, p. 365-379, 2003.

BRANDT, C. W.; FRIDLEY, K. J. Effect of load rate on flexural properties of wood-plastic composites. **Wood and Fiber Science**, v. 35, n. 1, p. 135-147, 2003.

CALISTER, W.D. **Materials Science and Engineering: An Introduction**, 4 ed. John Wiley e Sons, USA, 1997.

CALLISTER JR., W. D. - “**Ciência e engenharia de materiais. Uma introdução**”, 5.ed., LTC, Rio de Janeiro, 2002.

CANEVAROLO JR., S. V. **Ciência dos Polímeros**. São Paulo: Artliber Editora, 2002.

CLEMONS, G. Wood-Plastic Composites in the United States – The Interfacing of Two Industries. **Forest Products Journal**, v. 52, n. 6, p. 10-18, 2002.

COLOM, X.; CARRASCO, F.; PAGÈS, P.; CAÑAVATE, J. Effects of different treatments on the interface of HDPE/lignocellulosic fiber composites. **Composites Science and Technology**, v.63, p.161-69, 2003.

CORREA, C. A.; FONSECA, C. N. P.; NEVES, S.; RAZZINO, C. A.; HAGE JR., E. **Polímeros**, 13, p.154, 2003.

COUTINHO, F.M.B.; COSTA, T.H.S. “**Performance of polypropylene-wood fiber composites**”, *Polymer Testing* 18, p. 581, 1999.

COUTINHO, F. M. B., MELLO, I. L.; SANTA MARIA, L. C. Polietileno: principais tipos, propriedades e aplicações. **Polímeros**. v.13, n.1, p. 01-13, 2003.

ECKERT, C.H. “**Market Opportunities for natural fibres in plastics composites**”, in: Proceedings of the Wood-Plastic Conference, p. 87-106, Baltimore, USA, 2000.

DOAN, T. T. L.; GAO, S. L. e MÄDER, E. *Comp. Sci. Tech.*, 66, p.952, 2006.

ENGLISH, B. Wood filled plastics: an introduction. Em: Annual meeting of Window and Door Manufactures Association, 2000, EUA. **Summaries...** Arizona, 2000.

ENGLISH, B.; CLEMONS, C.M.; STARK, N.;SCHNEIDER, J.P.; **Waste-wood-derived Filer for Plastics**. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-91. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1996.

FROLLINI, E.; LEÃO, A.L.; MATTOSO, L.H.C. (Eds) - “Natural Polymers and Agrofiber Based Composites”, **Embrapa Instrumentação Agropecuária**, S.Carlos, SP, 2000.

GARDNER, D.J. **Wood plastic composite extrusion overview**. Disponível em: <http://umaine.edu/adhesion/gardner/5502002/wpc%20ext%20over%203-11-02.pdf>. Acesso em: 14/09/2011.

GILES JR. JR., H.F.; WAGNER JR.,J.R.; MOUNT III,E. M. “Extrusion: The Definitive Processing Guide and Handbook”, 2004.

HILLIG, E. “**Viabilidade técnica de produção de compósitos de polietileno (HDPE) reforçados com resíduos de madeira derivados das indústrias moveleiras**”. Universidade Federal do Paraná: Curitiba, p. 53-57, 2006.

JIANG, H.; KAMDEM, D. P. Development of poly (vinyl chloride)/ wood composites. A literature review. **Journal of Vinyl e Additive Technology**, v. 10, n. 2, p. 59-69, 2004.

JOSEPH, P.V.; RABELLO, M.S.; MATTOSO, L.H.C.; JOSEPH, K.; THOMAS, S. Environmental effects on the degradation behaviour of sisal fibre reinforced polypropylene composites. **Composites Science and Technology**, v.62, p.1357-72, 2002.

KOENIG, K. M.; SYPKENS, C. W. Wood-plastic composites vie for market share. **Wood and Wood Products**, v. 107, n.5, p. 49-58, 2002.

LEGUENZA, E. L. **Influência do negro de carbono (carbon black) nas propriedades dielétricas do polietileno envelhecido sob radiação UV**, Curitiba, 1999. Dissertação (Mestrado em física), Universidade Federal do Paraná.

MACHADO, A.; STUART, K. "A comparison of process configuration for compounding wood-plastics composites", in: **Proceeding of the Wood-Plastic Conference**, p. 73-85, Baltimore, USA, 2000.

MACHADO, A.V.; VAN DUIN, M.; A Study of Grafting Reactions during Processing of Polyolefin. **Advances in Polymer Technology**, v. 23, n. 3, p. 196-210, 2004.

MAPLESTON, P.; Wood Composites in Decking, the View from Principia. **Modern Plastics**, June, p. 62-65, 2001.

MASSON, T.J. "Desenvolvimento e reciclagem do polipropileno modificado pela presença de cargas híbridas", Tese de Doutorado, Universidade Mackenzie, São Paulo, SP, 1998.

MONDARDO, F. H. **Compósitos de Polipropileno e Farinha de Madeira**. Porto Alegre, 2006.

NAJAFI, S.K., E. HAMIDINIA, AND M. TAJVIDI. Mechanical Properties of Composites from Sawdust and Recycled Plastics. **Journal of Applied Polymer Science**, p. 3641-3645, 2006.

NOTHEMBERG, M. Cresce o interesse pelo uso de fibras naturais. **Anuário Brasileiro do Plástico**, p. 6-15, 1996.

OPTIMAT; MERL **Wood plastic composites study – Technologies and UK market opportunities**. UK: The Waste and Resources Action Programme, 2003. Technical Report.

PALLMANN. Palltruder®. **Produção de granulado composto plástico-madeira**. Disponível em: <<http://www.pallmann.com.br>> Acesso em: 10/09/2011.

PRITCHARD, G. - **Plast. Addit.** Compound., 6, p.18, 2004.

RAZERA, Dalton Luiz. **Estudo sobre as interações entre as variáveis do processo de produção painéis aglomerados e produtos moldados de madeira**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

RODOLFO JR., A.; JOHN, V. M. - "**Obtenção de compósitos de PVC e resíduo de Pinus: avaliação da viabilidade da substituição da madeira em perfis de acabamento na construção civil**", in: I Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável e X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, São Paulo, 2002.

SLAUGHTER, A.E., **Design and fatigue of a structural wood-plastic composite, in Department of Civil and Environmental Engineering**. Washington State University, 2004.

STARK, N.; SCHENEIDER, J.P. "**Waste-Wood-Derived Fille for Plastics**", in: General Technical Report FPL-GTR 91, Forest Product Laboratory/USDA, USA, 1996.

STARK, N.M.; BERGER, M.J. "**Effect of Species and Particle Size on Properties of Wood-Flour-Filled Polypropylene Composites**". San Diego, CA, 1997.

TAM, W.Y.; CHEUNG, T.; Li, R.K.Y. **An investigation on the impact fracture characteristics of EPR toughened polypropylene**, Elsevier Science, Hong Kong, 1996.

TEIXEIRA, M.G. **Compósitos biônicos: misturando pó residual de madeira com plástico**. Artigo, 2005.

UTRACKI L.A.; FAVIS, B.D. **Polymer Alloys and Blends; Handbook of Polymer Science and Technology**: Composites and Specialty Applications, New York, v. 4, p.183; Marcel Dekker, 1989.

YAMAJI, F. M.; BONDUELLE, A., **Utilização da Serragem na Produção de Compósitos Plástico-Madeira**, Revista Floresta Jan/Abr 2004, Curitiba-PR.

WIEBECK, H.; PIVA M.A. **Reciclagem Mecânica do PVC**. Instituto do PVC, 2001.

WOLCOTT, M.P.; ENGLUND, K. **A Technology Review of Wood-Plastic Composites**, in 33rd International particleboard/composite materials symposium, 1999.