

**FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO - FATEC-SP**  
**Tecnologia em Materiais**

**Mariana Souza Vicente**

**UTILIZAÇÃO DE FIBRAS NATURAIS DE BANANEIRA COMO  
REFORÇOS EM MATRIZES DE POLIESTIRENO RECICLADO**

**São Paulo**

**2014**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO**  
**Tecnologia em Materiais**

**Mariana Souza Vicente**

**UTILIZAÇÃO DE FIBRAS NATURAIS DE BANANEIRA COMO  
REFORÇOS EM MATRIZES DE POLIESTIRENO RECICLADO**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Tecnologia de Materiais da Faculdade de Tecnologia de São Paulo, como Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção do grau de Tecnóloga de Materiais.

Orientador: Prof<sup>o</sup>. Dr. Davinson Mariano da Silva

**São Paulo**  
**2014**

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, que me deram a vida e me ensinaram a vivê-la com dignidade e me apoiaram em todos os momentos. Por serem motivo de inspiração para eu sempre buscar ser uma pessoa melhor. Por serem o meu orgulho e me fazer desejar ser sempre o orgulho deles. Um agradecimento seria muito pouco pra expressar tamanha gratidão por todo o incentivo, conselhos e apoio. Admiro cada gesto e atitude e espero um dia retribuir à altura todo o amor e carinho que me foi cedido. Ainda falando em família, quero agradecer aos meus irmãos, que além de tudo são meus amigos, que com muito amor, me ajudam todos os dias a ser mais feliz. Espero que sejam muito felizes e bem sucedidos em qualquer escolha que fizerem, e estarei presente para ajudá-los e apoiá-los a cada passo que derem. Aos meus avós, que servem de inspiração para que eu continue sempre estudando e crescendo. E a todo restante de minha família que sei que posso contar a qualquer momento.

Quero agradecer também imensamente aos meus amigos da FATEC, em especial a Gleicy, Aline, Rafael, Víctor e Felipe, que me ajudaram a trilhar esse caminho de maneira mais leve e feliz. Por me aguentarem em momentos de estresse e por estarem sempre me incentivando.

Aos professores da FATEC um obrigada muito especial, por estarem sempre dispostos a ajudar e ensinar com muita dedicação, formando pessoas cada vez mais preparadas para encararem o mundo. Em especial ao professor Davinson, por me orientar e por ser um professor excelente, com total dedicação ao seu trabalho, fazendo com que todos seus alunos se tornem pessoas mais interessadas no aprender. Também aos auxiliares de laboratório, Silvano e Abrão, por sempre estarem dispostos a ajudar.

À todos meus amigos, pois sem eles a vida não teria graça. Por estarem presentes em todos os momentos, sempre tentando fazer deles os mais agradáveis e felizes possíveis. Obrigada por todas as muitas risadas, por todos os pouquíssimos choros e por todo o amor que me dedicam e que felizmente tenho o prazer de dedicar à vocês.

À todos vocês, um muito obrigada do fundo do meu coração.

## RESUMO

Atualmente há muitos estudos relacionados ao reaproveitamento e reciclagem de materiais poliméricos, devido a sua grande acumulação na biosfera e ao grande consumo dos mesmos. Este trabalho tem como finalidade estudar a obtenção e caracterizar compósitos de matriz de poliestireno (PS) reciclado reforçado com fibra de bananeira. Os compósitos foram obtidos na proporção em massa de 5% e 10% de fibra de bananeira no PS. Para cada concentração foram realizadas duas misturas por meio de extrusão: uma com a fibra de bananeira de diâmetro 50 ABNT e outra com 25 ABNT. Também foram obtidos compósitos com as mesmas variadas concentrações e diâmetros de fibra, porém com a adição em massa de 3% um agente compatibilizante, anidrido maleico (AM). Após realizada a extrusão se deu a injeção dos corpos de prova (CP) para que então fosse realizado o ensaio de tração. Os resultados indicaram que a deformação máxima observada para os compósitos apresentaram uma diminuição de até 85% em relação ao CP PS e o Módulo de Young apresentou um aumento de 41,5%. Posteriormente foi realizado o ensaio de absorção de água, que nos permitiu observar a natureza hidrofílica da fibra. Foi também realizada a microscopia eletrônica de varredura (MEV) para todas as composições, mostrando a influência do AM na adesão da interface entre a matriz e a fibra. Para caracterizá-los termicamente foi realizada uma análise termogravimétrica (TGA) e para caracterizá-los quanto a composição química da matriz de PS foram utilizados testes de fluorescência e difração de raios X.

## **ABSTRACT**

There are currently many studies related to the reuse and recycling of polymeric materials, due to their large accumulation in the biosphere and the large consumption of them. This work aims to study the obtaining and characterization of composites of polystyrene (PS) matrix reinforced with recycled banana fiber. The composites were obtained in the mass ratio of 5% and 10% of banana fiber in PS. For each concentration two mixtures were made by extrusion: with banana fiber diameter of 50 ABNT and another with 25 ABNT. Were also obtained composites in same concentrations and varying fiber diameters, however with the addition of 3% mass of compatibilizer agent, maleic anhydride (MA). After making the extrusion occurred the injection of the specimens (CP) to enable us to perform the tensile test. The results indicated that the maximum deformation observed for the composites showed a reduction of up to 85% compared to CP PS and Young's Modulus showed an increase of 41.5%. Thereafter the water absorption test was made which allowed us to observe the hydrophilic nature of the fiber. Was also performed electron microscopy (MEV) for all compositions, showing the influence of AM in the membership of the interface between the matrix and the fiber. To characterize them thermally we made a thermogravimetric analysis (TGA) and to characterize them as the chemical composition of PS matrix, X ray diffraction and fluorescence tests were used.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representação estrutural da estereorregularidade do PS.....	16
Figura 2. Estrutura do poliestireno.....	16
Figura 3. Estrutura da celulose.....	21
Figura 4. (a) Difusão Fickiana à temperatura ambiente e (b) difusão não-Fickiana a temperaturas elevadas.....	23
Figura 5. Efeito da água na interface fibra/matriz. ....	24
Figura 6. Morfologia da bananeira. ....	26
Figura 7. Lâminas com reforço tipo: (a) unidirecional; (b) tecido bidirecional balanceado; (c) fibras picadas; e (d) manta contínua, submetida a esforços de tração uniaxial longitudinais.....	28
Figura 8. Diagrama esquemático ilustrando conceitos de interface e interfase .....	29
Figura 9. Interface entre a fibra e a matriz. a) Interface ideal. b) interface real.....	29
Figura 10. Curva de tensão/posição quando o comprimento da fibra é menor do que o $L_c$ .....	31
Figura 11. Curva de tensão/posição quando o comprimento da fibra é igual ao $L_c$ .....	31
Figura 12. Curva de tensão/posição quando o comprimento da fibra é maior do que o $L_c$ .....	31
Figura 13. Estrutura química do AM.....	33
Figura 14. Modelo hipotético da interface entre o PS e a fibras de bananeira .....	33
Figura 15. Importância relativa dos materiais.....	34
Figura 16. Copos de poliestireno moídos. ....	37
Figura 17. Pseudocale da bananeira logo após ter sido retirado e lavado. ....	38
Figura 18. Fibra de bananeira processada. Onde A) passou pela malha de 50 ABNT e B) pela malha de 25 ABNT. ....	38
Figura 19. Modelo de uma rosca utilizada em extrusoras. ....	40
Figura 20. Micro-extrusora de monorroscas. ....	40
Figura 21. “Pellets” obtidos após a extrusão. ....	40
Figura 22. Mini-injetora Haake .....	43
Figura 23. CPs dos compósitos injetados. ....	44
Figura 24. Desenho detalhado de um equipamento de termogravimetria. ....	45
Figura 25. Equipamento TGA.....	45
Figura 26. Corpos de prova para realização do estudo de absorção de água.....	48
Figura 27. Geometria típica de um corpo de prova para ensaio de tração .....	49
Figura 28. Máquina universal de ensaios modelo DL10.000, marca EMIC. ....	50
Figura 29. Diagrama esquemático do MEV. ....	51
Figura 30. Diagrama das amostras retiradas do CP de tração para as análise de MEV. ....	52
Figura 31. MEV de bancada da Marca Jeol Modelo J6000. ....	52
Figura 32. Fluxograma esquematizando o processo. ....	53
Figura 33. Análise Termogravimétrica da fibra de bananeira. ....	54

Figura 34. Análise Termogravimétrica do PS.....	55
Figura 35. Sobreposição de curvas na análise de TGA. ....	56
Figura 36. Difrátograma obtido para a amostra de PS puro. ....	57
Figura 37. Concentração das cargas na amostra de PS. ....	58
Figura 38. Gráfico do Aumento de Massa/Dias das amostras. ....	59
Figura 39. Gráficos Tensão/Deformação. Onde A) CP 10/25; B) CP 10/50; C) CP 5/25; e D) CP 5/50.....	61
Figura 40. Gráfico Tensão/Deformação das amostras de CP PS. ....	62
Figura 41. Gráfico Tensão/Deformação médio das amostras.....	62

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Alguns polímeros termoplásticos comuns.....	14
Tabela 2. Vantagens das fibras naturais comparadas às fibras de vidro .....	19
Tabela 3. Vantagens e desvantagens das fibras vegetais.....	19
Tabela 4. Composição química típica de diferentes fibras naturais .....	22
Tabela 5. Valores típicos de propriedades mecânicas de fibra de bananeira.....	26
Tabela 6. Diâmetro, porcentagem de fibra bananeira e porcentagem de Anidrido Maleico em relação à matriz. ....	41
Tabela 7. Descrição das siglas das principais medidas do corpo de prova exposto na figura 27.....	49
Tabela 8. Elementos químicos e respectivas concentrações prováveis na amostra de PS. ....	59
Tabela 9. Valores médios de algumas propriedades das amostras. ....	63
Tabela 10. MEV das amostras com e sem AM. ....	65



## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	10
1.1 Considerações iniciais .....	10
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	12
2.1 Polímeros .....	12
2.1.1 Poliestireno .....	16
2.2 Fibra Natural .....	18
2.2.1 Absorção de água .....	22
2.2.2 Fibra de bananeira .....	25
2.3 Compósito .....	26
2.3.1 Região de interface .....	28
2.3.2 Comprimento crítico .....	30
2.3.4 Compósito matriz polimérica.....	34
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	36
3.1 Materiais .....	36
3.2 Métodos.....	37
3.2.1 Obtenção das matérias-primas .....	37
3.2.2 Extrusão.....	39
3.2.3 Injeção .....	41
3.2.4 Análise Termogravimétrica (TGA) .....	44
3.2.5 Fluorescência e difração de raios X.....	46
3.2.6 Ensaio de absorção de água .....	47
3.2.7 Ensaio de tração .....	48
3.2.8 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) .....	50
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	54
4.1 Resultados da Análise Termogravimétrica .....	54
4.2 Resultados da fluorescência e difração de raios X.....	57
4.3 Resultados do ensaio de absorção de água .....	59
4.4 Resultados do ensaio de tração .....	61
4.5 Resultados da microscopia eletrônica de varredura .....	64
5 CONCLUSÃO .....	67
6 ETAPAS FUTURAS.....	69
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	70

## **1 INTRODUÇÃO**

### **1.1 Considerações iniciais**

Atualmente tem-se observado a tendência na modificação das propriedades dos materiais plásticos, sendo uma delas a utilização de reforços de fibras naturais em compósitos, que envolve aspectos ambientais, sociais e econômicos. A população mundial em 1950 era de aproximadamente 2,5 bilhões de pessoas, hoje o planeta é habitado por mais de 7 bilhões de pessoas. Aliado a esses fatos, caminhamos para uma escassez progressiva de recursos energéticos e minerais em geral. Nesse cenário, a busca por matérias primas renováveis e de baixo custo tem sido um fator de significativa importância no direcionamento das pesquisas que envolvem o uso de fibras naturais em compósitos.[1]

Uma das soluções é a utilização de fibras naturais em compósitos poliméricos, que têm como objetivo ser aplicada como uma forma de substituir ou mesmo diminuir o consumo de materiais derivados do petróleo, devido ao alto custo dos mesmos, impacto ambiental e poluição gerada.

Existe ainda a necessidade de se buscar alternativas para suprir as expectativas do mercado, que exige cada vez mais produtos leves, resistentes, com boa aparência e ecologicamente corretos. Para atender as exigências desse mercado, iniciaram-se estudos para o aproveitamento de resíduos dos mais diferentes setores em compósitos com materiais diversos, trazendo produtos inovadores com características melhoradas e ainda com a consciência de que o meio ambiente está sendo poupado de degradações desnecessárias.

As fibras naturais, que podem ser classificadas com base em sua origem (vegetal, animal ou mineral) e vêm apresentando um grande potencial para aplicação em diversos setores industriais que podem satisfazer tais exigências de mercado. As aplicações das fibras naturais são amplas, desde aplicações de baixo valor agregado, até como reforço em materiais complexos para aplicações de alto desempenho.

Os materiais mais utilizados como reforços são: fibras sintéticas, tais como as fibras de vidro, carbono e aramida. Entretanto, fibras sintéticas apresentam uma série de desvantagens: não são materiais obtidos de fontes renováveis, não são

biodegradáveis, entre outros. Um dos fatores mais atrativos para o uso de fibras naturais como reforços em compósitos de matrizes poliméricas é a sua neutralidade de emissão de dióxido de carbono, baixo custo das fibras, biodegradabilidade, menor densidade e boas propriedades mecânicas. Além disso, as fibras naturais são pouco abrasivas e diminuem a irritação da pele e problemas respiratórios associadas às fibras de vidro.

Este trabalho tem como objetivos principais a preparação e caracterização dos compósitos de matriz de poliestireno (PS) reciclado, reforçado com fibras de bananeira. Serão avaliados os mais diversos comportamentos, sejam eles mecânicos e térmicos, que o reforço de fibra causa ao ser misturado com o PS reciclado. Serão obtidos compósitos com diferentes concentrações de reforços na matriz.

O poliestireno e a fibra de bananeira foram escolhidos, pois ambos são uma alternativa viável economicamente, são materiais de fácil obtenção e o desenvolvimento com esses materiais também tem grande importância ambiental. Além disso, o estudo desse tipo de compósito vem apresentando um grande potencial na aplicação em diversos setores industriais que podem satisfazer as exigências do mercado mundial.

Na seção 2 serão apresentados conceitos sobre os compósitos, abordando mais profundamente as fases em estudo (fibra de bananeira e PS). A seção 3, por sua vez, abordará os métodos utilizados para a obtenção e caracterização deste compósito, assim como os conceitos destes métodos. Os resultados obtidos com as caracterizações serão apresentados na seção 4, que também trará discussões para estes. Na seção 5 será apresentada uma conclusão e a seção 6 trará sugestões para a continuidade e aprimoramento deste trabalho.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo abordará os principais conceitos e definições sobre as duas fases do compósito estudado neste presente trabalho, que são as fibras naturais, com ênfase em fibras de bananeira e o polímero, poliestireno (PS), além de também apresentar conceitos sobre compósitos em geral, abordando aspectos como a interface, compatibilizantes, etc.

### 2.1 Polímeros

Um impacto importante da tecnologia de engenharia moderna sobre a vida cotidiana tem sido causado por uma classe de materiais conhecidas como polímeros. Outros termos utilizados são plásticos e resinas. No entanto, o termo plástico é atualmente a designação comumente usada, que descreve a grande facilidade de modelagem de muitos polímeros durante a fabricação. Estes estão disponíveis em uma grande variedade de formas comerciais: fibras, filmes, folhas finas, espumas e em corpos volumosos.

Etimologicamente, a palavra polímero significa “muitas partes”, onde o “mero” representa a unidade repetitiva, como o etileno ( $C_2H_4$ ). Os polímeros são moléculas de cadeia longa compostos de muitos meros juntos, ligados covalentemente entre si de modo a formar um sólido. O primeiro plástico comercial, o celuloide, foi desenvolvido em 1868 para substituir o marfim para bolas de bilhar, porém, atualmente o polímero comercial mais comum é o polietileno  $(C_2H_4)_n$ , onde  $n$  pode variar desde aproximadamente 100 até 1000. Muitos polímeros importantes, incluindo o polietileno, são simplesmente compostos de hidrogênio e carbono. Outros contêm oxigênio (por exemplo, acrílico), nitrogênio (náíllons), flúor (fluoroplásticos) e silício (silicones).

Os polímeros são materiais orgânicos, diferentemente dos metais, cerâmicas e vidros que são materiais inorgânicos e normalmente compartilham com os metais a propriedade mecânica desejável da ductilidade. Diferentemente das cerâmicas frágeis, os polímeros normalmente são alternativas leves e de baixo custo aos metais nas

aplicações de desenho estrutural. Propriedades importantes relacionadas à ligação química incluem resistência à deformação mais baixa em comparação com os metais e ponto de fusão mais baixo e reatividade química mais alta em comparação com cerâmicas e vidros. Apesar de suas limitações, os polímeros são materiais altamente viáveis e úteis. Tem havido um progresso substancial na última década no desenvolvimento de polímeros projetados com resistência e rigidez suficientemente altas para permitir seu uso como substitutos dos metais estruturais tradicionais.[2]

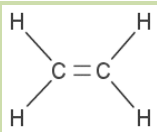
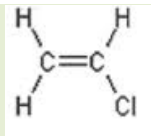
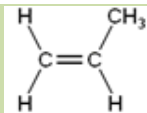
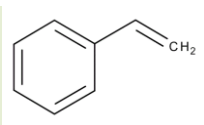
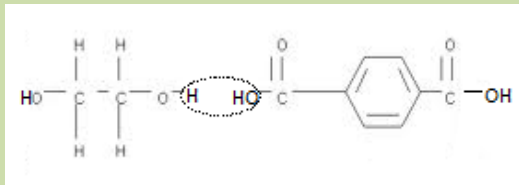
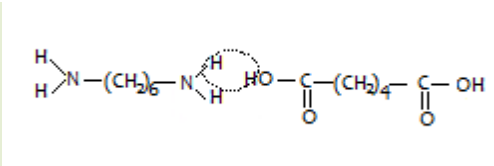
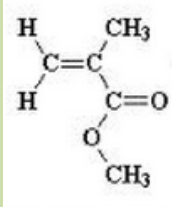
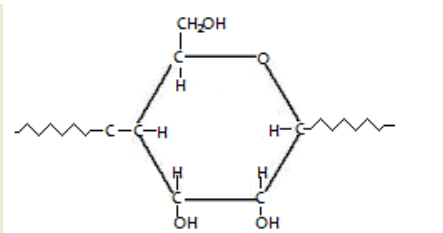
Uma tendência importante em projetos de engenharia é a crescente concentração nos chamados polímeros de engenharia, que podem substituir os metais estruturais tradicionais. Talvez os exemplos mais importantes sejam encontrados na indústria automotiva.[2]

Dependendo do modo como estão ligados química e estruturalmente, os plásticos podem ser divididos em duas classes: termoplásticos e termofixos.

Os termoplásticos necessitam de calor para serem conformados e, após o arrefecimento, mantêm a forma que adquiriram durante a conformação. Estes materiais podem ser várias vezes reaquecidos e reconformados em novas formas, sem que ocorra alteração significativa das suas propriedades. A maior parte dos termoplásticos é constituída por cadeias principais, muito longas, de átomos de carbono ligados covalentemente. Por vezes, há também, na cadeia molecular principal, átomos de nitrogênio, oxigênio ou enxofre ligados covalentemente. Pode haver, ainda, átomos ou grupos de átomos pendentos ligados covalentemente aos átomos da cadeia principal. As cadeias moleculares longas dos termoplásticos estão ligadas umas às outras através de ligações secundárias.[3]

A Tabela 1 apresenta os polímeros termoplásticos mais comuns, mostrando também suas principais aplicações.

Tabela 1. Alguns polímeros termoplásticos comuns. [adapt. de 2]

Nome	Monômero	Aplicações típicas	Porcentagem do mercado (baseada em peso) <sup>a</sup>
Polietileno		Lâmina transparente, garrafas	29
Policloreto de vinila		Pisos, tecidos, filmes	14
Polipropileno		Lâmina, cano, invólucros	13
Poliestireno		Recipientes, espumas	6
Poliéster, tipo termoplástico [p. ex., polietileno de tereftalato (PET), Dacron <sup>b</sup> (fibra)]		Fita magnética, fibras, filmes	5
Náilons		Tecido, corda, engrenagens, peças de máquina	1
Acrílicos (por exemplo, polimetil metacrilato, Lucite <sup>b</sup> )		Janelas	1
Celulósticos		Fibras, filmes, revestimentos, explosivos	<1

<sup>a</sup>Vendas nos Estados Unidos e Canadá, da listagem em *ModernPlastic*, janeiro de 1998.

<sup>b</sup>Marca comercial, Du Pont.

Os plásticos termofixos são conformados para uma determinada forma permanente e depois curados (ou endurecidos) através de uma reação química; não podem ser refundidos e reconformados noutra forma, uma vez que se degradam ou se decompõem quando aquecidos a temperaturas demasiado altas. Os plásticos termofixos não podem ser reciclados. O termo termofixo significa que é necessário calor para obter o plástico na sua forma permanente. Há, no entanto, muitos plásticos designados por termofixos, cuja cura ocorre à temperatura ambiente, através de uma simples reação química. A maior parte dos plásticos termofixos é constituída por moléculas poliméricas com ligações cruzadas entre si, formando uma rede tridimensional. Por vezes, há átomos de nitrogênio, oxigênio, enxofre ou outros, ligados covalentemente na estrutura reticular dos termofixos.[3]

Dentro destas classes principais, os plásticos podem normalmente receber uma classificação fundamentada nos monômeros de base. Há mais de duas dúzias de tais famílias ou grupos de monômeros. Plásticos também são por vezes classificados em outras três categorias de rigidez: rígido, flexível e elástico. Outro método de classificação é pelo "nível" de desempenho ou a área geral de aplicação, utilizando categorias como engenharia, de propósito geral e especialidade plástica.[4]

De um modo geral, os plásticos são leves, são dielétricos, fornecem uma baixa condutividade térmica, são resistentes a muitos ambientes e têm temperaturas de fusão baixas. Eles também são viscos elásticos, isto é, depois que uma carga aplicada é removida, os plásticos tendem a continuar a exibir deformação com o tempo.

Os plásticos podem ser constituídos de um, dois ou mesmo três monômeros diferentes, sendo designados por homopolímeros, copolímeros e terpolímeros, respectivamente. A sua forma geométrica pode ser linear ou ramificada. Polímeros lineares ou não ramificados são compostos de monômeros ligados ponta a ponta para formar uma cadeia molecular que é como um simples cordão de contas ou um pedaço de espaguete. Os polímeros ramificados têm cadeias laterais de moléculas ligadas ao polímero principal linear. Estes ramos podem ser compostos quer seja do monômero linear de base ou de um diferente. De acordo com a estereorregularidade: se os grupos laterais estão dispostos aleatoriamente ao longo do plano da cadeia, o polímero é atático; se os grupos laterais estão do mesmo lado do plano da cadeia, o polímero é isotático, e se estão dispostas de maneira alternativa de um lado ao outro,

o polímero é sindiotático.[4] A Figura 1 apresenta uma representação estrutural da estereorregularidade do PS.

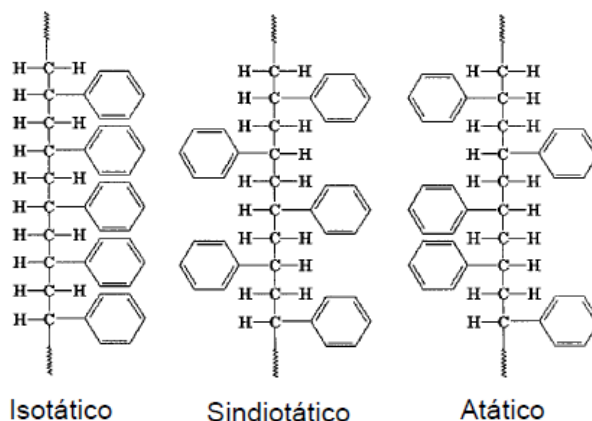


Figura 1. Representação estrutural da estereorregularidade do PS. [12]

### 2.1.1 Poliestireno

O poliestireno é uma resina termoplástica utilizada para a moldagem, em vernizes e revestimentos. Conhecidas desde 1845, as resinas de poliestireno tiveram grande importância industrial no início da segunda guerra mundial (1939), graças aos estudos realizados por Ostro Mislensky e Staudinger, na Alemanha. Nos anos 1990 foi um dos termoplásticos mais consumidos, devido ao baixo custo, menor peso e boas propriedades elétricas (como baixa condutibilidade elétrica), transparência. Alto brilho e boa resistência a alguns ácidos fortes. [5]

Este é formado pela polimerização de estireno monomérico, o qual é um líquido incolor de fórmula molecular  $C_6H_5CH:CH_2$ , com ponto de ebulição de  $145^\circ C$ , conforme mostra a Figura 2. É obtido a partir do monômero de etileno, sendo etileno com um dos átomos de hidrogênio substituídos por um grupo fenil (também chamado de feniletileno e vinil benzeno).[4]

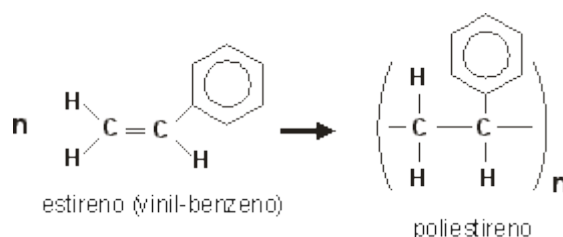


Figura 2. Estrutura do poliestireno.



O número de unidades repetitivas é indicado pelo índice  $n$ . No caso de graus comerciais do poliestireno, o valor médio de  $n$  pode ser 1000 ou mais. A resina polimerizada é sólida, transparente, muito leve e com um peso específico de 1054-1070. A resistência à tração é de 28 a 69 MPa, a resistência à compressão é de 83 a 117 MPa e rigidez dielétrica é de  $18 \times 10^6$  a  $24 \times 10^6$  V/m. O poliestireno é notável por sua resistência à água, elevada estabilidade dimensional e também mais resistente e mais forte a baixas temperaturas do que a maioria dos outros plásticos. É valorizado como um material isolante elétrico, e os filmes são utilizados para o acondicionamento de cabos.[4]

Quando produzido a partir de metil-estireno, as peças têm uma dureza Rockwell M de 83, com resistências à tração a 61 MPa, e tem uma rigidez que os torna adequados para produtos tais como armários e caixas. A rigidez dielétrica também é elevada, acima de  $36 \times 10^6$  V/m, e por este motivo, a resina pode ser utilizada em componentes eletrônicos. A temperatura de distorção pelo calor é de 101°C.[4]

Estirenos estão sujeitos à fluência. Por conseguinte, a capacidade de carga em longo prazo (mais de 2 semanas), é apenas cerca de um terço da resistência à tração de curta duração. Sua temperatura máxima de serviço útil é de cerca de 70°C, portanto a sua utilização é restrita principalmente a aplicações de temperatura ambiente. Devido ao seu baixo custo e facilidade de processamento, os poliestirenos são largamente utilizados para produtos de consumo e produzidos numa grande variedade de formas, pois podem ser extrudados, injetados, comprimidos, moldados por sopro, e termo moldados. Eles também estão disponíveis como a folhas de filme e espuma.[4]

O Poliestireno é o pioneiro entre os termoplásticos e apresenta-se sob várias formas, os quatro tipos principais são:

- PS cristal: Homopolímero amorfo, duro, com brilho e elevado índice de refração. Pode receber aditivos lubrificantes para facilitar o processamento. Os maiores usos são em artigos de baixo custo, como peças descartáveis tais como copos, pratos, embalagens, etc.

- PS resistente ao calor: O seu processamento é mais difícil. Variante ideal para confecção de peças de máquinas ou automóveis, gabinetes de rádios e TV, grades de

ar condicionado, peças internas e externas de eletrodomésticos e aparelhos eletrônicos, circuladores de ar, ventiladores e exaustores.

- PS de alto impacto: é um PS modificado com elastômeros, contendo de 5 a 10 % destes, que é incorporado através de mistura mecânica ou diretamente no processo de polimerização através de enxerto na cadeia polimérica de polibutadieno. Algumas “grades” desta resina podem competir com alguns plásticos de engenharia, como o ABS (acrilonitrilabutadieno estireno), por exemplo, no segmento de componentes de refrigeradores e televisores.

- PS expandido: (mais conhecido no Brasil pela marca comercial Isopor®, da Basf), é um plástico polimerizado na presença do agente expansor ou então o mesmo pode ser absorvido posteriormente. Durante o processamento do material aquecido ele volatiliza-se, gerando as células no material. Apresenta baixa densidade e bom isolamento térmico. É utilizado, basicamente, em embalagens protetoras e isolantes térmicos.

## **2.2 Fibra Natural**

Atualmente há uma busca por novos materiais, pois existe a preocupação com a escassez de recursos naturais, sustentabilidade e impactos sobre a economia, sobre a vida das pessoas e sobre o meio ambiente. Um dos veios de pesquisa e desenvolvimento para suprir tais necessidades é a substituição ou incorporação de novos materiais. Entre eles, destacam-se os compósitos, sendo um deles o polímero reforçado com fibras naturais.

Para compósitos obtidos a partir de matrizes poliméricas, constata-se que as fibras de reforço mais utilizadas comercialmente são as fibras de carbono, fibra de vidro e fibras de aramida. Em contrapartida as fibras naturais, além de reforçar o polímero, são biodegradáveis, apresentam baixo custo, baixa massa específica, proporcionam a obtenção de compósitos recicláveis e não possuem características abrasivas (causam menos desgaste nos equipamentos de processamento e facilitam o processo de moldagem), quando comparado às fibras tradicionalmente utilizadas. [6]

A Tabela 2 mostra as principais vantagens das fibras naturais quando comparadas às fibras de vidro.

Tabela 2. Vantagens das fibras naturais comparadas às fibras de vidro. [7]

Propriedades	Fibras Naturais	Fibras de Vidro
Densidade	Baixa	Alta
Reciclabilidade	Sim	Não
Fonte renovável	Sim	Não
Consumo de energia para a produção	Baixo	Alto
Abrasividade aos equipamentos	Não	Sim
Risco à saúde quando inalada	Não	Sim
Descarte ambiental	Biodegradável	Não- Biodegradável

De forma sucinta, podemos enumerar as vantagens e desvantagens das fibras vegetais de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3. Vantagens e desvantagens das fibras vegetais.

Fibras vegetais	
Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> <li>Baixa massa específica;</li> <li>Maciez e abrasividade reduzida;</li> <li>Recicláveis, não tóxicas e biodegradáveis;</li> <li>Baixo custo;</li> <li>Estimulam empregos na zona rural;</li> <li>Baixo consumo de energia na produção.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Baixas temperaturas de processamento, isto é, não toleram mais que 200 °C durante a consolidação no interior da matriz de um compósito;</li> <li>Alta sensibilidade a efeitos ambientais, tais como variações na temperatura de umidade;</li> <li>Apresentam seções transversais de geometria complexa e não uniforme.</li> </ul>

As fibras naturais podem ser classificadas em três tipos diferentes, dependendo da sua origem: vegetal, animal ou mineral. As fibras vegetais, ou fibras lignocelulósicas, por sua vez, podem ser classificadas de acordo com a origem de extração: folhas,

frutos, talo/caule e semente. Entre as fibras naturais mais utilizadas destacam-se as fibras de sisal, coco, curauá, bambu, madeira, fibras de bananeira, entre outras.[7]

As fibras naturais são obtidas em todo o mundo, sendo algumas bastante abundantes nos trópicos. O Brasil apresenta várias fontes, principalmente após a colheita em grandes lavouras, onde uma grande variedade de plantas já foram utilizadas em pesquisas de novos materiais, tais como o coco, sisal, bagaço de cana-de-açúcar e bananeira.

Existem diferentes métodos de extração para fibras das plantas e estes dependem do tipo da planta e da porção de onde são retiradas (folhas, frutos, talo). Normalmente, os métodos manuais são os mais utilizados. Existem ainda os métodos mecânicos de extração através de máquinas chamadas de “decorticadores” que são utilizados para fibras como bananeira, sisal, linho ou juta. Para a extração da fibra de curauá, emprega-se uma máquina chamada de “Periquita”. [7]

Fibras naturais derivadas de plantas consistem basicamente em fibrilas de celulose embebidas em uma matriz de lignina. Cada fibra tem camadas estruturais complexas contendo uma parede celular primária e três paredes celulares secundárias. Cada parede celular é formada por três componentes principais que são a celulose, hemicelulose e lignina. A lignina e a hemicelulose agem como matriz enquanto as microfibrilas (feitas de moléculas de celulose) agem como fibras.[35]

A celulose é um dos componentes principais das fibras e determina as suas propriedades mecânicas. A celulose  $(C_6H_{10}O_5)_n$ , é um polímero de cadeia longa composto de um só monômero (glicose), em que cada unidade repetitiva contém três grupos hidroxila. Pode ser classificado como polissacarídeo ou carboidrato. Nas plantas, a celulose é encontrada na forma de haste delgada como se fossem microfibrilas cristalinas, alinhadas ao longo da extensão da fibra. [7-35] A estrutura da celulose está ilustrada na Figura 3.

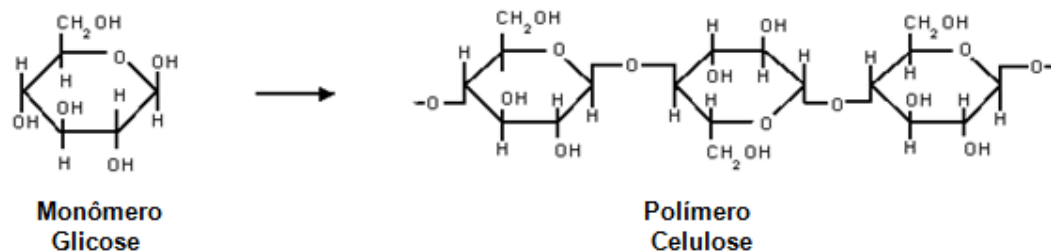


Figura 3. Estrutura da celulose.

Este polissacarídeo é um dos principais constituintes das paredes celulares das plantas, (cerca de 33% do peso da planta), responsável por dar a rigidez e firmeza às plantas, em combinação com a lignina e com hemicelulose. Durante a síntese da celulose, as ligações poliméricas formam longas cadeias de maneira que as moléculas ficam muito próximas através de longos segmentos, dando origem a fortes ligações químicas secundárias intermoleculares (ligações de hidrogênio) que são responsáveis pela grande resistência de materiais celulósicos.[7]

A hemicelulose, por sua vez, também é um polissacarídeo, porém possui cadeias mais complexas e até mesmo ramificadas, além de ter um peso molecular inferior ao da celulose. Ela funciona como uma matriz de cimentação entre as microfibrilas de celulose. Suas unidades monoméricas podem ser glucose, arabinose, xilose, manose e existem também grupamentos radicais em ramificações como grupos acetil e uronil, que ao se hidrolisar a madeira geram ácido acético e urônico.

A lignina é resultante do metabolismo da planta, pois quando o processo de lignificação é completado, geralmente ocorre a morte da célula, formando o chamado tecido de resistência. A mesma apresenta uma estrutura amorfa, não solúvel em água, encontrada nas paredes celulares, pois ela também tem a função de manter as fibras de celulose unidas. Auxilia no transporte de soluções aquosas, pois protege os componentes vasculares da planta, promovendo a impermeabilização e proteção contra ataque de micróbios.

Ao se diminuir a quantidade de lignina e hemicelulose, há um aumento na resistência da fibra a um valor limite e também se observa uma redução na tenacidade, propriedade das fibras de absorver energia até a ruptura.

A remoção de lignina nas fibras naturais permite a produção de fibras mais rígidas, já a remoção de hemicelulose deixa a fibra menos densa e permite que a região interfibrilar entre as fibrilas se reorganizem através do eixo principal da fibra.[7]

As composições químicas de diferentes fibras naturais estão mostradas na Tabela 4.

Tabela 4. Composição química típica de diferentes fibras naturais.[29]

Fibra	$\alpha$ -celulose	Hemi-celulose	Lignina	Cinzas	Extrativos
Abacaxi	80 – 83	–	12	0,1 – 1	4
Bagaço de cana	54,3 – 55,2	16,8 – 28,7	24 – 25	1,1	0,7 – 3,5
Bambu	33 – 45	30	20 – 25	–	–
Banana	60 – 65	6 – 8	5 – 10	1,2	–
Coco	43,4 – 53	14,7	38 – 40	–	3,5
Curauá	70,7 – 73,6	21,1	8 – 11	0,8 – 0,9	2,5 – 2,8
Rami	80 – 85	3,0 – 4,0	0,5	–	6,4
Sisal	60 – 75,2	10 – 15	7 – 12	0,14 – 0,87	1,7 – 6,0

### 2.2.1 Absorção de água

Compósitos poliméricos são capazes de absorver umidade da atmosfera e/ou quando imersos em água, especialmente compósitos de fibra natural. Isso acarreta em efeitos na interface fibra/matriz levando a uma baixa eficiência nas transferências de tensão, afetando as propriedades mecânicas. Além disso, a absorção de umidade pelas fibras naturais afetam as propriedades físicas e térmicas.[35]

Esse comportamento é atribuído à composição química dessas fibras, pois apresentam grupos hidrofílicos. O componente principal da fibra responsável por essa absorção de umidade é a hemicelulose.[35]

É observado que a absorção na temperatura ambiente segue o comportamento Fickiano, onde o processo de absorção da água é linear no início, e lentamente alcança

a saturação após um tempo prolongado. A difusão Fickiana refere-se a transferência de água de uma área com mais concentração para uma de menor concentração. Nas temperaturas mais altas de imersão, o comportamento de absorção da umidade é acelerado e o tempo de saturação é diminuído. Esse comportamento não-Fickiano pode ser atribuído ao fato de as moléculas terem uma habilidade maior de se mover através dos segmentos do polímero, quando em maiores temperaturas.[35]

Além disso, com a elevação de temperatura em um ambiente úmido, microfissuras na superfície e no volume do material se desenvolvem levando a descamação e a dissolução da superfície do compósito. Isso resulta no aumento do coeficiente de permeabilidade. As Figuras 4 (a) e (b) mostram curvas típicas de comportamentos da difusão Fickiana e não-Fickiana, respectivamente.[35]

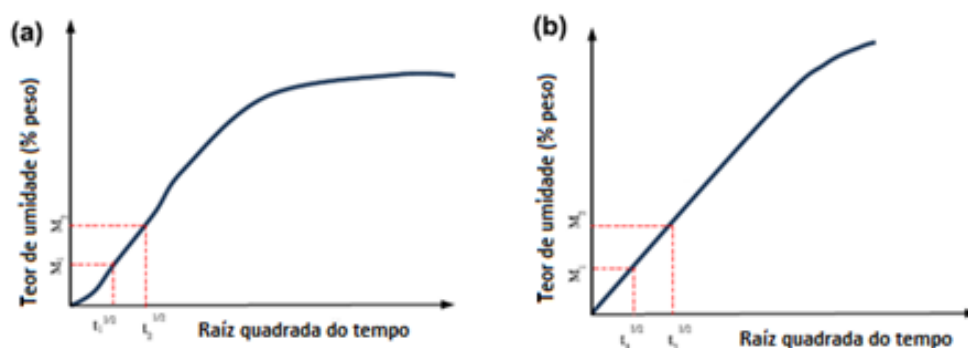


Figura 4. (a) Difusão Fickiana à temperatura ambiente e (b) difusão não-Fickiana a temperaturas elevadas [adapt. de 35]

Num compósito polimérico, o transporte de água pode se facilitado por três mecanismos que são: por difusão dentro da matriz, por imperfeições na matriz (microespaço, poros ou rachaduras) ou por capilaridade ao longo da interface entre fibra/matriz.[35]

Quando um compósito polimérico com fibra natural é exposto à umidade, a água penetra e se anexa em grupos hidrofílicos da fibra, estabelecendo uma ligação de hidrogênio, reduzindo a adesão interfacial desta com a matriz. O processo de degradação ocorre quando há o inchamento das fibras de celulose, devido a essa ligação, criando tensões nas regiões de interface, que levam ao desenvolvimento de microfissuras na matriz, promovendo a capilaridade e transporte de água.[35]

Substâncias solúveis em água começam a lixiviação a partir das fibras e, eventualmente, levam a descolagem final entre fibra e matriz. A descolagem entre fibra e matriz é iniciada pelo desenvolvimento de “bolsos” de pressão osmótica na superfície das fibras, devido à lixiviação de substâncias solúveis em água a partir da superfície da fibra. Este processo está ilustrado na Figura 5. Após um período longo, as atividades biológicas, tais como o crescimento de fungos degradam as fibras naturais.[35]

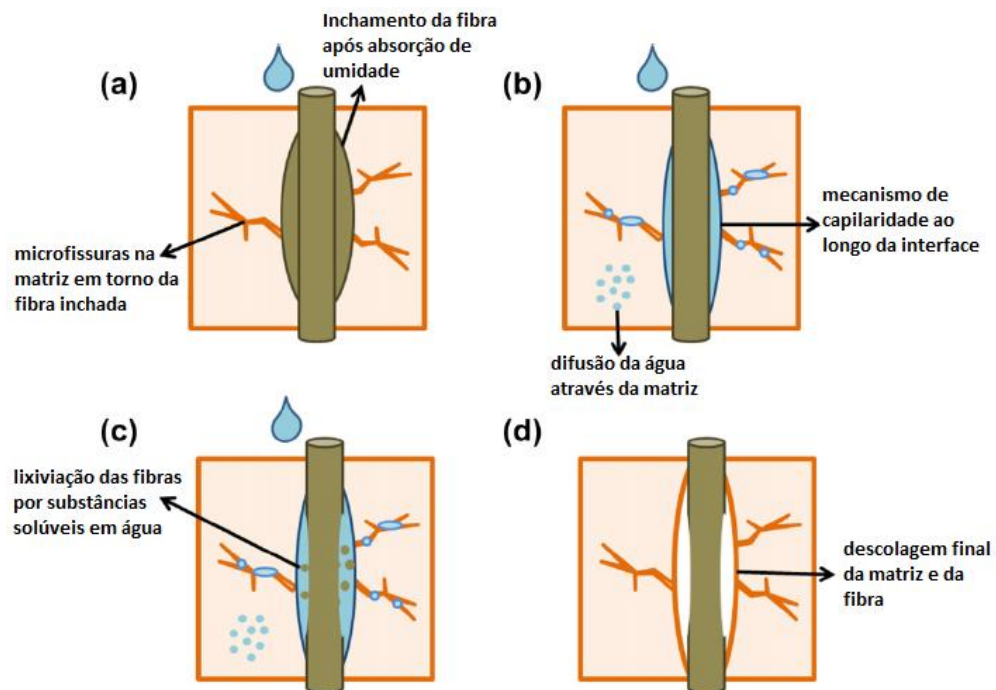


Figura 5. Efeito da água na interface fibra/matriz. [adapt. de 35]

A maneira pela qual os materiais compósitos absorvem água depende de vários fatores, tais como temperatura, fração em volume de fibras, a orientação de reforço, a natureza de permeabilidade da fibra, a área das superfícies expostas, difusividade, a reação entre água e matriz e proteção da superfície.[35]

Pode-se resumir que compósitos de fibras naturais/polímero são sensíveis à umidade e com o tempo, a exposição a umidade vai fazer com que percam a sua funcionalidade. Este aspecto deve ser considerado na produção de um compósito que pode ser utilizado em um ambiente de umidade elevada. Para estes é necessária a seleção da fibra adequada, que possua as características desejadas e alta resistência à umidade. [35]



### **2.2.2 Fibra de bananeira**

A banana, uma das frutas mais consumidas no mundo, é cultivada na maioria dos países tropicais. No Brasil, a bananeira encontra-se distribuída por todo o território nacional, situando-se entre os principais cultivos, em área plantada, volume produzido e valor da produção. Constitui-se numa das principais alternativas de diversificação agrícola da Região Sudeste da Bahia, por adaptar-se às condições edafoclimáticas e possuir excelentes perspectivas de mercado como fruta fresca ou industrializada. Além disso, é um cultivo de produção rápida (aproximadamente um ano). [9]

Em 2006 foram exportadas 16,8 milhões de toneladas. Em 2007, 130 países produziram a fruta, sendo que 10 países foram responsáveis por mais de 75% da produção.[8] O Brasil é o segundo maior produtor, perdendo apenas para a Índia, detendo cerca de 10 % do total mundial. Por sua vez a Índia detém 21% da produção mundial.

No cultivo e colheita de banana, há uma grande geração de resíduos devido ao próprio ciclo de vida da planta, onde ocorre uma degradação do caule e das folhas após a retirada dos frutos. Segundo Soffner (2001), são gerados 200 t/ha/ano. Caso não haja um controle ou manejo correto, tais resíduos provocam o desenvolvimento de organismos biodeterioradores e/ou atraindo animais peçonhentos. O pseudocaule, por exemplo, após oferecer o fruto, pode proliferar fungos com difícil controle de tratamento, devido à alta umidade incidente nas plantações.

Para contornar estes problemas e ao mesmo tempo agregar valor ao resíduo, encontrou-se uma forma para que a extração do pseudocaule se tornasse uma alternativa de renda interessante para a população rural, como na fabricação de cordas, chapéus, tapetes e até de papel. Este foi um meio simples e barato que a população encontrou para lucrar sem muitos gastos.[8]

Além dessas utilidades se tornou uma alternativa viável para reforço de polímeros (enriquecendo suas propriedades), pelo fato dela vir de uma fonte renovável, ser abundante no mundo todo e principalmente, ser encontrada facilmente no Brasil. O percentual, as dimensões, a dispersão e a forma de orientação da fibra adicionada ao polímero devem ser os que possibilitem maiores ganhos nas

propriedades deste, tais como mecânicas. A Tabela 5 mostra algumas propriedades mecânicas características da fibra de bananeira.

Tabela 5. Valores típicos de propriedades mecânicas de fibra de bananeira. [adapt. 7]

Fibra	Diâmetro ( $\mu\text{m}$ )	Densidade ( $\text{kg.m}^{-3}$ )	Módulo de Young (Gpa)	Tensão máxima (MPa)	Alongamento na ruptura (%)
Banana	80 - 250	1350	7,7 – 20,0	54 - 754	1,9 – 13,0

A bananeira é um vegetal que apresenta raiz, caule, folhas, flores, frutos e sementes. A Figura 6 apresenta a morfologia de uma bananeira, com a finalidade de elucidar sua composição e onde está localizado o pseudocaule, que é de onde advém a fibra.



Figura 6. Morfologia da bananeira. [8]

## 2.3 Compósito

O conceito de materiais compósitos não é novo e tem sua origem da própria natureza, como é o caso da madeira, que constitui um compósito vegetal. A manufatura dos compósitos baseia-se em uma ideia simples de combinar e colocar em serviço dois ou mais materiais macroconstituintes com características físicas e químicas nitidamente díspares, tendo como objetivo obter propriedades específicas,

diferentes daquelas que cada constituinte apresenta separadamente, apresentando uma interface reconhecível entre os componentes. Cada um dos constituintes mantém suas propriedades superiores às dos constituintes individuais.[10]

Atualmente, os compósitos são considerados materiais de engenharia heterogêneos e multifásicos, em que pelo menos um dos componentes fornece a resistência ao esforço. Porém muitos materiais compósitos são constituídos por apenas duas fases: uma denominada componente estrutural ou reforço, enquanto o outro é o meio de transferência do esforço, sendo chamado de componente matricial ou matriz.

Na tecnologia dos compósitos, uma vez definido o tipo de matriz a ser utilizado, podem ocorrer duas possibilidades distintas quanto à definição da macrofase para a consolidação do produto final. Pode-se incorporar à matriz: (i) uma ou mais fases que efetivamente tenham finalidade reforçante, provocando aumento na rigidez e resistência mecânica (tração, compressão, etc.); ou (ii) o material incorporado tenha atuação mais acentuada como uma carga. Na situação (i), a incorporação do reforço resulta em um compósito com propriedades estruturais significativamente superiores às apresentadas pela matriz propriamente dita. Na situação (ii), entretanto, a adição à matriz de um material, normalmente de baixa massa específica e de custo reduzido, atua como carga, aumentando o volume do compósito, ocorrendo conseqüentemente reduções de peso e do custo do componente.[1]

Os reforços para compósitos podem se apresentar na forma de fibras, podendo estas se apresentarem na forma de fibras contínuas, picadas e na forma de partículas. A fibra por si só não representa uso. Porém, ao ser trançada como cordas, arranjada em diferentes tipos de tecidos ou embebidas em diferentes tipos de matrizes, este tipo de reforço passa a conferir ao material final melhores propriedades e, usualmente, uma menor massa específica final [10-1].

O desempenho estrutural do compósito depende do tipo e da disposição das fibras em uma ou mais direções, a fim de se obter produtos com valores desejáveis de resistência [10].

Os compósitos com camadas isoladas podem ser subdivididos em compósitos com fibras contínuas ou fibras curtas. Já os compósitos multicamadas podem ser subdivididos em: (i) compósitos laminados, onde um único tipo de fibra é utilizado na

manufatura do compósito, mas que podem apresentar orientações definidas e distintas entre as lâminas; e (ii) os compósitos híbridos, onde dois ou mais tipos de fibras de reforço são utilizados, ou o compósito é constituído de lâminas metálicas intercaladas com lâminas de compósito. Casos particulares de lâminas compósitas são ilustradas esquematicamente na Figura 7 [1].

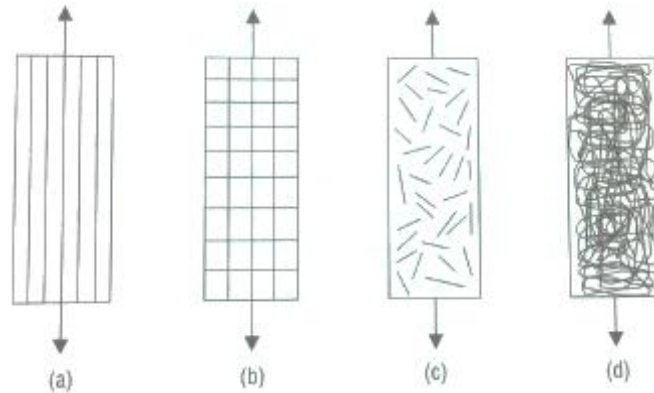


Figura 7. Lâminas com reforço tipo: (a) unidirecional; (b) tecido bidirecional balanceado; (c) fibras picadas; e (d) manta contínua, submetida a esforços de tração uniaxial longitudinais. [1]

### 2.3.1 Região de interface

Outra questão a ser observada para a obtenção dos compósitos é a interface entre o reforço e a matriz. O comportamento de um compósito não é explicado somente pelas propriedades específicas de seus componentes principais, reforço e matriz. A interface entre o reforço e a matriz também é importante, sendo considerada o terceiro componente de um compósito.[10-11]

A interface é a região onde ocorre o contato entre os componentes do compósito. A região interfacial é responsável pela transferência da solicitação mecânica da matriz para o reforço. O papel da interface ocorre em um plano de espessura infinitesimal, que separa o reforço da matriz de tal forma que, ao longo de sua extensão, a carga pode ser transferida da matriz para a fibra.[10-11]

O principal desafio da tecnologia de processamento de materiais compósitos é a obtenção de uma adequada interfase entre o reforço e a matriz. A interface entre a fibra e a matriz pode ser definida como a superfície limite entre elas, por meio da qual ocorre a descontinuidade de alguns parâmetros. Na prática, uma região interfacial possui uma espessura limitada. A interfase é uma região de espessura finita, que se inicia na interface da fibra/matriz e se prolonga para dentro da matriz. Essa região tem

gradientes nas propriedades físicas, que influenciam significativamente o desempenho do compósito final [10]. A Figura 8 ilustra os conceitos de interface e interfase.

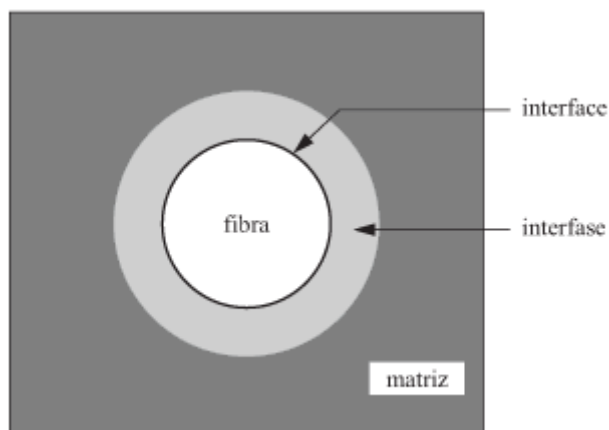


Figura 8. Diagrama esquemático ilustrando conceitos de interface e interfase.[25]

Uma interface forte aumenta a integridade do compósito e transfere a carga eficientemente às fibras, através da matriz, resultando em compósitos mais resistentes sob esforços mecânicos, como por exemplo tração ou flexão. Entretanto, a adesão inadequada entre as fases envolvidas na interface poderá provocar o início das falhas, comprometendo o desempenho dos compósitos.[10-11]

Para se obter uma interface próxima da ideal, a mesma pode ser alterada por meio de modificações físico-químicas da matriz e das características do reforço. A Figura 9 ilustra interface ideal e real entre a fibra e a matriz.

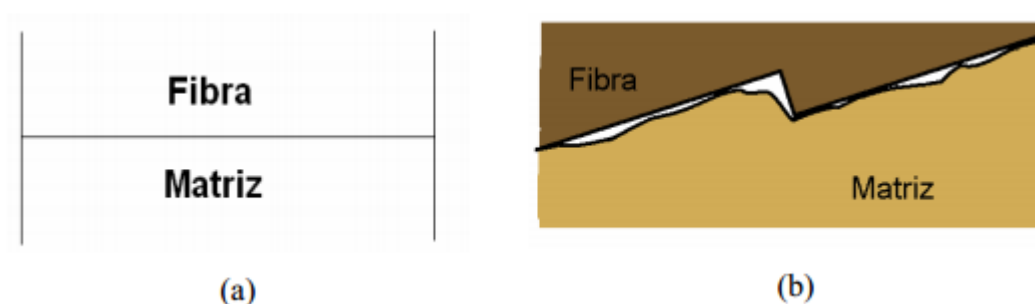


Figura 9. Interface entre a fibra e a matriz. a) Interface ideal. b) interface real. [26]

Os principais fatores que influenciam a interação entre reforço/matriz polimérica são as propriedades de cada constituinte e a natureza dos mecanismos de adesão (químico, físico e/ou mecânico) do compósito. A adesão química ocorre se entre os componentes existir ligações químicas na interface, enquanto a adesão física

se dá pela redução da energia livre de um sistema, quando duas superfícies com energias superficiais da fibra e matriz ( $\gamma_f$  e  $\gamma_m$ , respectivamente) se juntam para formar uma interface com uma nova energia interfacial  $\gamma_{fm}$ , de valor menos que a dos componentes iniciais.[10]

A adesão mecânica por sua vez, ocorre quando a matriz se ancora mecanicamente no reforço. Nesse caso, a rugosidade da fibra e a molhabilidade do reforço têm papéis importantes nas propriedades da interface.[10]

### 2.3.2 Comprimento crítico

O comprimento das fibras pode alterar significativamente o desempenho mecânico, bem como outras propriedades do compósito. O comprimento crítico da fibra ( $L_c$ ) é definido como sendo o comprimento mínimo que a fibra deve possuir, por um dado diâmetro, para que esta atue como carga de reforço. O  $L_c$ , depende do diâmetro da fibra ( $d$ ) e do limite de resistência da fibra à tração ( $\sigma_f$ ), bem como da força da ligação entre a fibra e a matriz ( $\tau$ )[27]:

$$L_c = \frac{d \cdot \sigma_f}{2\tau},$$

As fibras contínuas apresentam comprimentos muitos maiores do que o  $L_c$ , (normalmente  $L > 15 \cdot L_c$ ). Para várias combinações de matrizes com fibras de carbono ou vidro, o comprimento crítico é da ordem de 1 mm, que varia entre 20 e 150 vezes o diâmetro da fibra[27].

Quando o comprimento da fibra for menor, igual ou maior que o comprimento crítico podem ocorrer as seguintes situações: [28]

- Se  $L < L_c$ : A tensão não atinge um valor suficiente para quebrar a fibra e outros mecanismos como a ruptura da matriz e o arrancamento da fibra poderão ocorrer.[28]

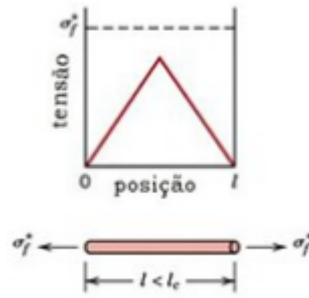


Figura 10. Curva de tensão/posição quando o comprimento da fibra é menor do que o  $L_c$  [27].

- Se  $L = L_c$ : Neste caso o pico de tensão pode atingir a tensão de fratura da fibra no centro desta.[28]

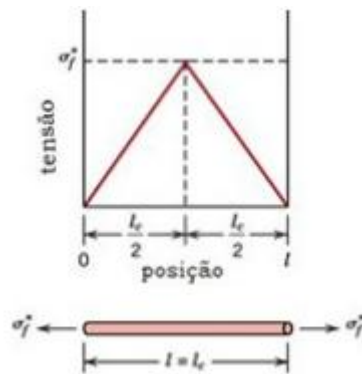


Figura 11. Curva de tensão/posição quando o comprimento da fibra é igual ao  $L_c$ . [27]

- Se  $L > L_c$ : O pico de tensão é aplicado na parte central da fibra, podendo ocorrer fratura da mesma.[28]

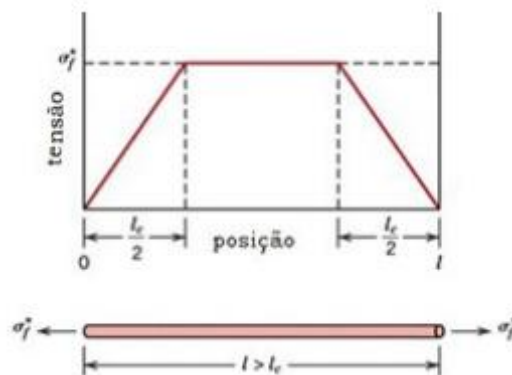


Figura 12. Curva de tensão/posição quando o comprimento da fibra é maior do que o  $L_c$ . [27]

Adicionalmente, o comprimento crítico do material de reforço também é uma função da matriz e do reforço, pois o valor de comprimento ideal para uma determinada matriz e fibra pode não se adequar para outra matriz e fibra. Devido à

descontinuidade de fibras vegetais, faz-se necessário considerar que a resistência à tração dos compósitos é fortemente influenciada pelo comprimento e orientação das fibras que o reforçam.

### **2.3.3 Agentes compatibilizantes**

No caso dos compósitos em questão, sabe-se que a fibra natural da bananeira é feita de material lignocelulósico e que possui muitos grupos hidroxilas ao longo de suas cadeias, o que confere uma grande hidrofiliabilidade à fibra. Ao contrário das fibras, a matriz polimérica termoplástica, o poliestireno, possui caráter hidrofóbico. Portanto sendo a matriz hidrofóbica e a fibra hidrofílica, os compósitos obtidos com esses dois materiais podem apresentar problemas estruturais causados pela incompatibilidade dos mesmos, dificultando também a transferência de esforço da matriz para a fibra e podendo resultar na redução de resistência à tração. Deste modo, tem sido aplicado o uso de agentes compatibilizantes e processos de modificação química tanto na fibra quanto na matriz para melhorar as propriedades do compósito final, pois estas ações alteram a adesão e a natureza da interface reforço-matriz.

Os agentes compatibilizantes agem na interface, reduzindo as tensões interfaciais entre a fibra e o polímero, proporcionando um maior molhamento, bem como uma adesão mais adequada, facilitando a transferência de esforços entre os componentes [13].

Esse agente compatibilizante ou agente de acoplamento deve interagir fortemente com as fibras através de ligações covalentes ou fortes interações secundárias do tipo ácido-base ou ligações de hidrogênio. Isso implica que uma quantidade suficiente de grupos funcionais deve estar presente no compatibilizante, possibilitando 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 emaranhados moleculares com a matriz polimérica, na interface, através de ancoramento mecânico [32].

Os agentes de acoplamento podem ser aditivos químicos ou polímeros, quimicamente modificados por materiais reativos. Quando adicionados aos compostos



poliméricos, produzem grande força adesiva entre as partículas de carga e as moléculas poliméricas, funcionando como elemento de interface. Logo teremos um conjunto polimérico + agente de acoplamento + carga inorgânica. [40]

O agente compatibilizante mais comumente usado é o de poliolefinas graftizadas com anidrido maleico (AM), utilizado na mistura de polímeros e fibras para a obtenção do compósito. [33]

O AM é um composto orgânico com a fórmula  $C_4H_2O_3$  ( $C=OCH=CHC=O_2$ ). No seu estado puro é um sólido incolor ou branco com um odor acre. A Figura 13 mostra a estrutura química do AM.

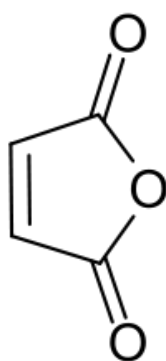


Figura 13. Estrutura química do AM.

A Figura 14 apresenta como se daria hipoteticamente a ligação do AM com a cadeia polimérica e com a fibra de bananeira.

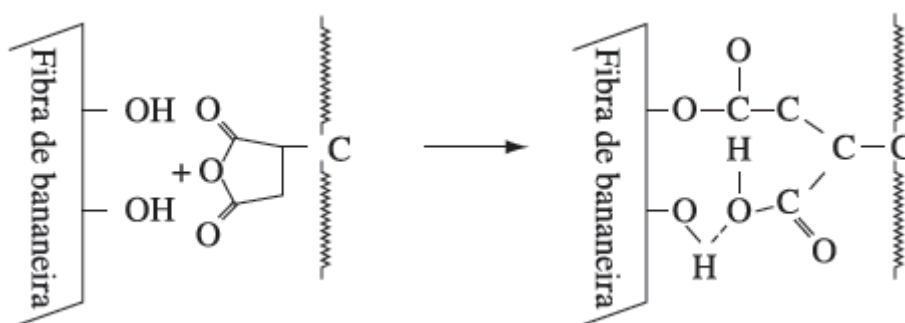


Figura 14. Modelo hipotético da interface entre o PS e a fibras de bananeira. [37]

### 2.3.4 Compósito matriz polimérica

O desenvolvimento da tecnologia de materiais compósitos de matrizes poliméricas avançadas tem como uma de suas finalidades formar um conjunto de materiais que combine resistência e rigidez elevadas e baixa massa específica. Essa combinação de propriedades é resultante da união de reforços de fibras com polímeros. Isto torna os compósitos particularmente atrativos como substituintes das ligas metálicas em aplicações automotivas, aeronáuticas, espaciais, de equipamentos esportivos, ou seja, de engenharia de maneira geral.[10]

Os compósitos de matriz polimérica são resultantes de uma evolução que teve início em torno de 1960, como pode ser observado na Figura 15.

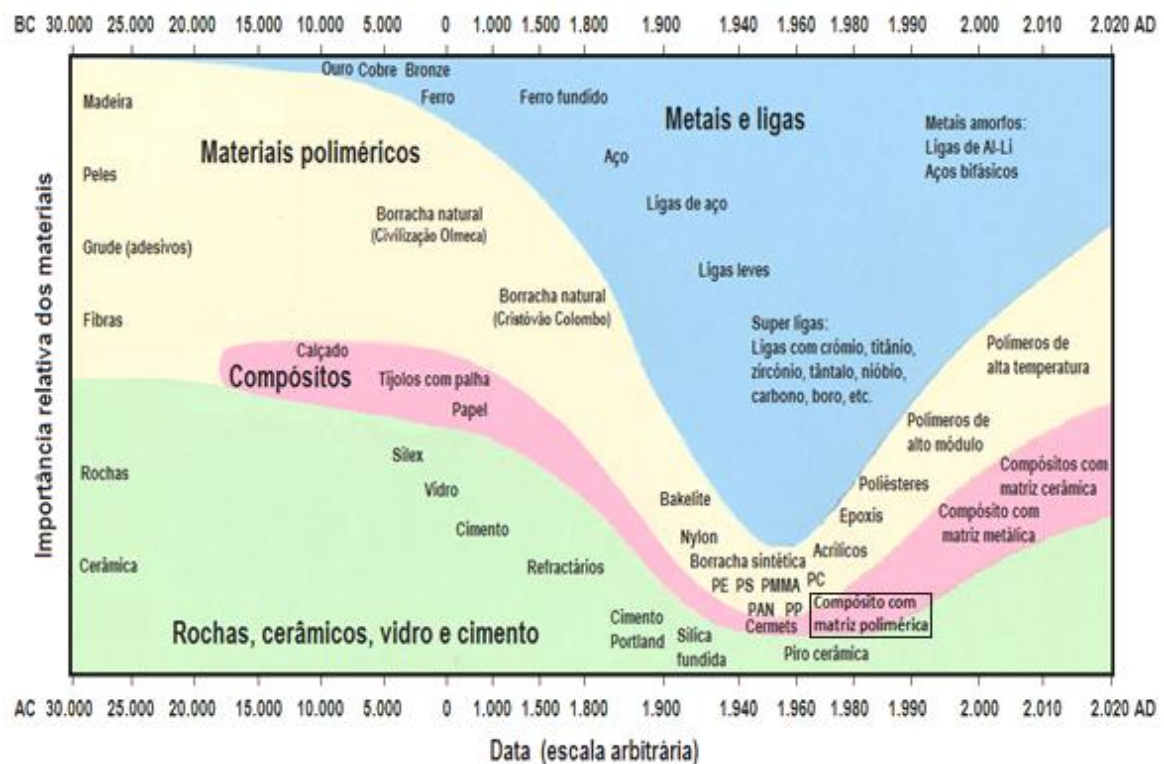


Figura 15. Importância relativa dos materiais. [adapt. de 10]

As indústrias aeronáutica e espacial são as grandes impulsionadoras do desenvolvimento destes materiais, pois necessitam de componentes de baixa densidade e que atendam aos requisitos de elevada resistência mecânica em serviço. Assim, esse setor da indústria nucleou o surgimento dos compósitos de plásticos reforçados com fibras de alta resistência, também denominados compósitos estruturais. [10]

No compósito polimérico, a fibra fornece reforço à matriz, enquanto esta mantém o reforço unido, distribui a carga aplicada no material e protege a fibra de danos físicos e químicos. A matriz polimérica também é o fator dominante da resistência ao impacto, da tenacidade à fratura, à fluência ao longo do tempo e da temperatura de serviço do compósito.

A incorporação do reforço (fibra) aos termoplásticos pode ser processada por praticamente todos os métodos convencionais de processamento de plásticos (extrusão, injeção, calandragem e prensagem).[10]

Para a escolha da matriz se observou que os termoplásticos oferecem muitas vantagens em relação aos polímeros termofixos. Uma das principais vantagens é o baixo custo de processamento. Outra é que oferecem a possibilidade de modelagem de peças complexas. Além disso, devido à limitada estabilidade térmica das fibras naturais, somente termoplásticos que amolecem a temperaturas abaixo de 200 °C são usados como matrizes nestes compósitos, como polietileno, polipropileno, poliestireno, etc.

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

Este capítulo abordará quais materiais foram utilizados, como que se deu a obtenção destes e os procedimentos e equipamentos empregados para efetuar a obtenção, injeção e ensaio dos compósitos.

#### **3.1 Materiais**

O poliestireno foi escolhido neste trabalho devido a sua produção e utilização em grande escala industrial nacional e mundial, como em barbeadores, brinquedos, chapas extrudadas em geral, componentes para a indústria eletrônica, copos e talheres descartáveis, peças para a indústria automobilística, objetos de utilidade doméstica, embalagens em geral, entre outros. É um homopolímero resultante da polimerização do monômero de estireno, apresentando características como: baixa densidade, semelhança com vidro, elevada resistência a ácidos, possuir baixo custo e ser facilmente moldável em processos a quente. Trata-se de uma resina do grupo dos termoplásticos, cuja característica reside na sua fácil flexibilidade ou moldabilidade sob a ação do calor, que a deixa em forma líquida ou pastosa.

Os copos recicláveis de poliestireno utilizados foram obtidos na FATEC-SP, depois de já terem sido usados pelos frequentadores da faculdade.

A matéria-prima que está sendo utilizada como reforço da matriz de poliestireno, é a fibra de bananeira, extraída do pseudocaule da banana tipo nanica e fora escolhida por ser de fácil obtenção, uma alternativa viável economicamente e também uma alternativa sustentável do ponto de vista ecológico. Sua obtenção e tratamento foram efetuados em trabalhos anteriores.[21] A forma como fora conseguida e preparada estará melhor esclarecida nos Métodos para a obtenção dos compósitos.

## 3.2 Métodos

### 3.2.1 Obtenção das matérias-primas

O primeiro procedimento foi o recolhimento dos copos recicláveis de poliestireno utilizados por frequentadores (alunos, professores, etc.) da própria FATEC-SP, sofrendo posteriormente um processo de higienização. Os copos então foram inseridos no moinho de facas, da Prismex Indústria e Comércio de Plásticos Ltda. A Figura 16 mostra os copos moídos.



Figura 16. Copos de poliestireno moídos.

A fibras foram obtidas e processadas em trabalhos anteriores, a partir da extração do pseudocaule, retirando camada por camada do mesmo[21]. A Figura 17 mostra o pseudocaulo da bananeira após extraído e lavado.

Após a coleta, o pseudocaule da bananeira foi cortado e um líquido que se encontra no interior do mesmo foi extraído, utilizando um engenho manual da marca Camargo.



Figura 17. Pseudocaulis da bananeira logo após ter sido retirado e lavado.

A próxima etapa foi o processo de “mercerização” que tem como finalidade eliminar parte da lignina da fibra, melhorando a adesão e homogeneização com o poliestireno no momento da extrusão. Esse tratamento também contribui para a prevenção de fungos no material. O processo consistiu em mergulhar as fibras em solução de peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ) durante 3 horas. . Em seguida é realizada a lavagem em água corrente para se remover o excesso de  $H_2O_2$ . Por fim as fibras foram colocadas em uma estufa com circulação de ar por 24 horas à  $60^\circ C$ .

Após o processo de secagem, as amostras foram moídas num moinho de facas da marca Marconi, disponível no Laboratório de Processamento e Reologia de Materiais Poliméricos da Escola Politécnica da USP (EPUSP) e peneiradas na empresa Pneumotronic, localizada em Mairiporã.

Foram utilizadas duas malhas para o peneiramento das fibras, utilizando as malhas 50 e 25 ABNT, cujas aberturas são de 300 e 710  $\mu m$ , respectivamente. A Figura 18 A) ilustra as fibras de bananeira após passarem pela malha de 50 ABNT e a Figura 9 B) após passarem pela malha de 25 ABNT.

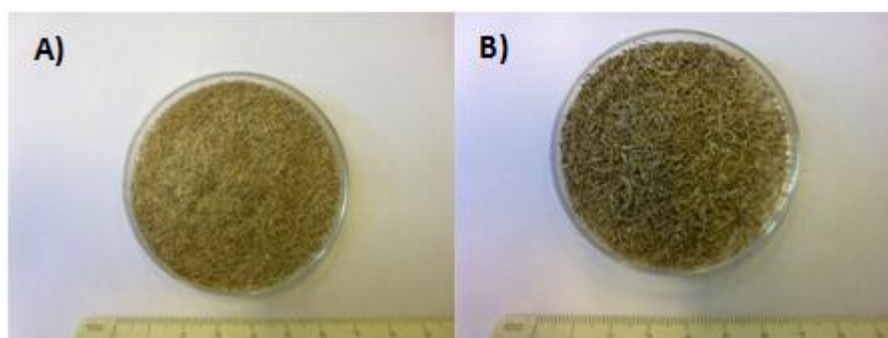


Figura 18. Fibra de bananeira processada. Onde A) passou pela malha de 50 ABNT e B) pela malha de 25 ABNT.

O anidrido maleico, que foi utilizado para melhorar a interface entre a fibra e a matriz, foi doado pela empresa Brisco do Brasil - Indústria Química e Comércio Ltda. O teor em AM é de 99,6%.

### **3.2.2 Extrusão**

O processo de extrusão consiste em alimentar o funil da extrusora com o material moído ou granulado, o qual cairá sobre uma rosca que o transportará dentro de um cilindro. Dentre todos os componentes de uma extrusora, a rosca é um dos mais importantes pelo fato de transportar, fundir ou amolecer, homogeneizar e plastificar o polímero. É devido ao movimento, e consequente cisalhamento sobre o material, que a rosca única gera cerca de 80% da energia térmica e mecânica para transformar os polímeros. Outra parte da energia térmica é obtida de aquecedores externos [30].

Dentro dos canais da rosca, o polímero passa por diversos estágios, começando o transporte a partir do funil onde se encontra no estado sólido, chegando ao final da rosca, onde vai estar líquido ou mole. A transição do estado sólido para líquido se dá gradativamente, começando pelo material que está atritando contra as paredes do barril e do canal [30]. Esses estágios são divididos em 3 zonas ao longo da rosca:

1) Zona de Alimentação: Para pré-aquecer o polímero e transportá-lo às zonas subsequentes.

2) Zona de Compressão (ou Transição): Nesse segundo estágio da rosca, o polímero acelera a passagem do estado sólido para o fundido. Portanto a função da zona é comprimir e fundir o material, continuar o bombeamento e, principalmente, homogeneizar ou misturar bem [30].

3) Zona de Controle de Vazão (ou Dosagem): Nesta zona é efetivada a mistura dos elementos do sistema polimérico, e a temperatura é homogeneizada. Ocorre alto grau de cisalhamento sobre o material [30].

A Figura 19 ilustra uma rosca, mostrando onde estão localizadas as zonas descritas acima.

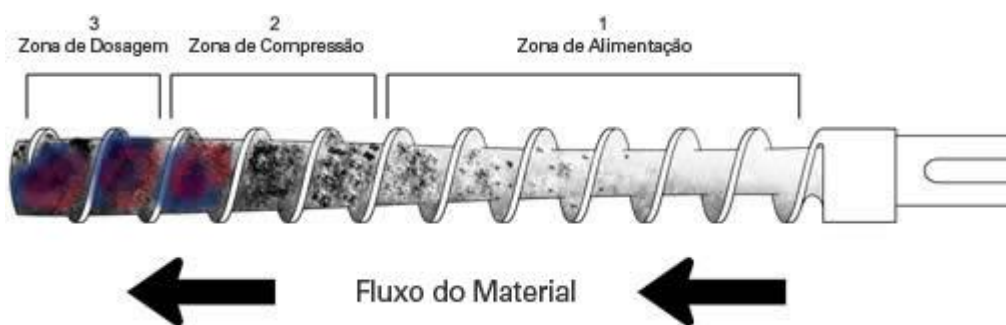


Figura 19. Modelo de uma rosca utilizada em extrusoras.

A produção dos compósitos de matriz polimérica com reforço de fibra de banana foi realizada utilizando a micro-extrusora de monorrosca da marca AX Plásticos, que se encontra no Laboratório de Processamento e Caracterização de Materiais da FATEC- SP. A micro-extrusora pode ser vista na Figura 20.



Figura 20. Micro-extrusora de monorrosca.

Foram obtidos os compósitos de PS com fibra de bananeira com massa de 60g de PS cada, com diferentes concentrações e diâmetros de fibra de bananeira. A Figura 21 mostra os “pellets” após extrusão e posterior trituração na própria micro-extrusora.



Figura 21. “Pellets” obtidos após a extrusão.



A Tabela 6 mostra a concentração de fibras de bananeira em relação à matriz e o diâmetro da mesma.

Tabela 6. Diâmetro, porcentagem de fibra bananeira e porcentagem de Anidrido Maleico em relação à matriz.

Amostra	Quantidade de fibras (% peso)	Diâmetro das fibras (ABNT)	Anidrido Maleico (% peso)
CP PS	0	--	0
CP 10/25	10	25	0
CP 10/50	10	50	0
CP 5/25	5	25	0
CP 5/50	5	50	0
CPA 10/25	10	25	3
CPA 10/50	10	50	3
CPA 5/25	5	25	3
CPA 5/50	5	50	3

A Temperatura utilizada no processo de extrusão foi a mesma para todas as amostras, 190°C, e a velocidade rotação da rosca foi de 90 RPM.

### 3.2.3 Injeção

O processo de moldagem por injeção é uma técnica de moldagem que consiste basicamente em forçar a entrada de material fundido para o interior da cavidade de um molde.

Geralmente, a injetora é composta por a) um sistema capaz de homogeneizar e injetar o polímero fundido: rosca recíproca acionada por sistemas mecânicos, elétricos, pneumáticos e/ou hidráulicos; canhão, que contém em seu interior a rosca recíproca; mantas elétricas capazes de aquecer o canhão e por seguinte, transmitir calor ao polímero; b) molde: capaz de dar forma à massa polimérica, sendo essa injetada no interior do molde sob alta pressão e com velocidade controlada; o mesmo molde é capaz de gerar resfriamento do produto de forma adequada através de fluidos que

circulam no seu interior e, finalmente, este possui um mecanismo capaz de executar a ejeção da peça acabada ao se abrir [30].

Ciclo de injeção:

a) O polímero é alimentado na injetora através de um funil de alimentação. A rosca carrega o polímero do funil para a parte frontal desta, girando e atuando como um parafuso sem fim (como se fosse uma extrusora). Enquanto a rosca gira, ela se locomove para trás, pois precisa criar espaço à sua frente para depositar o polímero que ela mesma homogeneizou e fundiu. Portanto, a rosca deposita uma quantidade de polímero pronto para ser injetado em sua parte dianteira. Essa massa fundida não entra no molde ainda, pois o bico de injeção está normalmente fechado por uma válvula durante esse tempo [30].

b) Assim que a rosca homogeneiza a quantidade necessária de polímero, pode existir um tempo de espera (para acabar o ciclo anterior do molde), até que o molde esteja vazio e fechado para receber a injeção da próxima quantidade da massa fundida. Nesse momento, então, a rosca ao invés de atuar como parafuso sem fim, age como se fosse um pistão, fazendo movimento pra frente, injetando propriamente a massa fundida para dentro do molde. Para isso, a válvula do bico de injeção se abre através de um dispositivo adequado. Por outro lado, para que o polímero não volte para trás, pelos canais da própria rosca, uma outra válvula existente na ponta desta se fecha. Devido à rosca atuar ora como parafuso sem fim, ora como pistão é que recebe o nome de rosca recíproca [30].

c) A rosca, após terminar de injetar o material para dentro do molde, tem um tempo chamado de tempo de empacotamento, onde ela continua a exercer pressão sobre o injetado [30].

d) Terminado o tempo de empacotamento ou de pressurização e recalque, como também é conhecido, a rosca volta para o evento descrito em (a), isto é, gira e volta para a direção do funil, produzindo a próxima dosagem[30].

Neste trabalho, após a obtenção dos compósitos em forma de “pellets”, se deu a injeção dos mesmos utilizando a Mini-injetora Haake do LPCM - Fatec-SP. A Figura 22 mostra este equipamento.

O funcionamento dessa injetora se dá de uma forma um pouco diferente da descrita acima, pois ao invés de uma rosca, têm-se um pistão pneumático. Nesse caso específico, o material é colocado diretamente em um cilindro onde é aquecido, e então empurrado por esse pistão de forma a preencher a cavidade do molde. Ocorre também a etapa de recalque.

Assim sendo, os “pellets” foram então inseridos no cilindro de aquecimento da injetora e aquecidos até 200°C durante 7 minutos. O molde foi mantido à 25°C. O processo de injeção foi realizado sob pressão de 350 bar por 40 s e logo em seguida a pressão foi mantida em 210 bar durante 10 s para o recalque.



Figura 22. Mini-injetora Haake

Para cada composição, foram obtidos aproximadamente 14 corpos de prova (CPs) para os ensaios de tração, parametrizados de acordo com as especificações definidas pela norma ASTM D638-08. Os CPs obtidos depois da injeção podem ser observados na Figura 23.



Figura 23. CPs dos compósitos injetados.

#### **3.2.4 Análise Termogravimétrica (TGA)**

A análise termogravimétrica (TGA) é uma técnica de análise térmica na qual a variação da massa da amostra (perda ou ganho) é determinada em função da temperatura e/ou tempo, enquanto a amostra é submetida a uma programação controlada de temperatura[1]. Esta técnica possibilita conhecer as alterações que o aquecimento pode provocar na massa das substâncias, permitindo estabelecer a faixa de temperatura em que elas adquirem composição química, fixa, definida e constante, a temperatura em que começam a se decompor, acompanhar o andamento de reações de desidratação, oxidação, combustão, decomposição, etc.[10]

Os experimentos para se avaliar as variações de massa de um dado material em função da temperatura são executados mediante uma termobalança (associação forno-balança), que deve permitir o trabalho sob as mais variadas condições experimentais (diferentes atmosferas gasosas e massa de amostras, variadas razões de aquecimento e/ou condições isotérmicas em temperaturas específicas, etc. As curvas geradas fornecem informações quanto à estabilidade térmica da amostra, à composição e à estabilidade dos compostos intermediários e do produto final [10]. A Figura 24 mostra um desenho esquemático de um TGA.

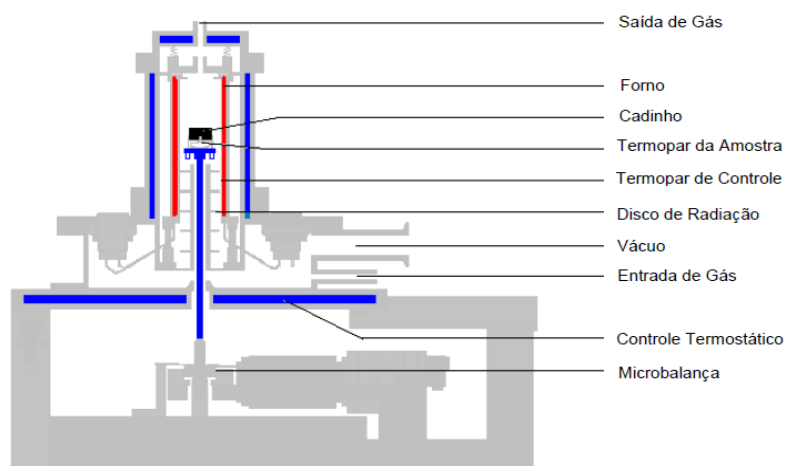


Figura 24. Desenho detalhado de um equipamento de termogravimetria.

Foi utilizado nesse ensaio, para a fibra de bananeira, uma massa de 8,3 mg colocada em um cadinho de  $Al_2O_3$ , a taxa de aquecimento foi de  $10^\circ C/min$  aquecendo até  $800^\circ C$ . Para o CP PS a massa utilizada foi de 58 mg em cadinho também de  $Al_2O_3$ , a taxa de aquecimento foi de  $10^\circ C/min$  até  $700^\circ C$ .

O equipamento utilizado para esse ensaio foi o TGA da marca Setaram, modelo LabSys-evo, disponível no LPCM da FATEC-SP. A Figura 25 mostra o equipamento utilizado.



Figura 25. Equipamento TGA.

### 3.2.5 Fluorescência e difração de raios X

A fluorescência de raios X trata-se de uma técnica utilizada para a determinação da constituição química em amostras cerâmicas, metálicas, mas também em polímeros. Um espectro de fluorescência de raios X permite detectar a presença de átomos que participam de moléculas de aditivos, catalisadores, cargas minerais, etc., permitindo sua determinação qualitativa e quantitativa, como análise de rotina. [31]

A difração de raios X por sua vez trata de uma técnica que utiliza o espalhamento coerente da radiação de raios X, por estruturas organizadas (cristais), permitindo realizar estudos morfológicos em materiais, determinando sua estrutura cristalina e sua fração (percentual) cristalina. [31]

Em equipamentos analíticos, tanto de fluorescência quanto de difração, a geração de raios X ocorre pelo bombardeamento de um alvo (fonte) com elétrons de alta energia. Ao incidir sobre o alvo, estes elétrons provocam a emissão de fótons de radiação X, com características (intensidade e comprimento de onda) dependentes do alvo que está sendo bombardeado. Como o feixe de elétrons que atinge o alvo emissor de raios X é de alta energia, elétrons próximos ao núcleo (camada K) são ejetados para regiões afastadas do mesmo, seguindo-se um reordenamento eletrônico a partir do espaço gerado pela ejeção daquele elétron. Assim um elétron da camada L passa a ocupar a posição anteriormente pelo elétron da camada K, e ao fazer isso libera energia na forma de um fóton de radiação X.[31]

Para ambos ensaios foram obtidas amostras do CP PS e então analisados no espectrometro de fluorescência de raio X da marca Bruker, modelo S2 Ranger e no difratômetro de raio X da marca Rigaku, modelo Mini Flex II, utilizando a radiação Cu-K $\alpha$ , tensão de aceleração de 15kV e corrente de 15 mA. Ambos equipamentos estão disponíveis no LPCM da FATEC-SP.

### 3.2.6 Ensaio de absorção de água

A absorção de água em polímeros é avaliada pela absorção de umidade, resultando no aumento das dimensões da peça, o que prejudica sua aplicação em trabalhos de precisão. Além disso, a variação do teor de umidade pode provocar uma rede de microfraturas na superfície dos compósitos que pode alterar suas propriedades elétricas e mecânicas. A absorção é mais fácil quando a molécula do polímero apresenta grupamentos capazes de formar ligações de hidrogênio. Por exemplo, peças de nylon, de celulose, ou de madeira podem absorver umidade, mudando de dimensões. Por outro lado, a absorção de água pode aumentar muito o peso do material polimérico.[11]

Para o estudo de absorção de água nos materiais foram aplicados os testes gravimétricos, por meio de um acompanhamento das evoluções das massas das amostras imergidas. Ao longo das realizações dos testes, o aumento da massa de cada amostra é calculado a partir da massa inicial da amostra ( $m_{inicial}$ ), com relação à massa da amostra medida no tempo  $t$  ( $m_t$ )[22]:

$$\text{Aumento de massa (\%)} = 100 \times \frac{m_t - m_{inicial}}{m_{inicial}}$$

Para realização deste ensaio, foram realizados cortes nos CPs, que haviam sido submetidos ao ensaio de tração, de forma a ficarem retangulares (9,0 x 9,6 x 3,0 mm). Posteriormente foi feito o estudo de absorção de água a partir de testes gravimétricos. Os cortes foram realizados na máquina Serra de Fita Vertical do LCMP (Laboratório de Construção em Mecânica de Precisão) – Fatec-SP.

Os CPs cortados para a realização do ensaio de absorção de água estão representados pela Figura 26.



Figura 26. Corpos de prova para realização do estudo de absorção de água.

Os CPs foram então imergidos em água destilada à temperatura ambiente (aproximadamente 25°C) para que fosse aplicado o teste gravimétrico.

A evolução das massas foi medida ao longo de 15 dias com o auxílio da balança analítica da marca Shimadzu, disponível no LPCM da FATEC-SP.

### **3.2.7 Ensaio de tração**

O Ensaio de tração é amplamente utilizado para o levantamento de informações fundamentais sobre a resistência e comportamento mecânico dos polímeros, em especial flexíveis e semirrígidos. O ensaio consiste na aplicação de uma carga uniaxial crescente à amostra, ao mesmo tempo em que são medidas as variações na sua dimensão. As especificações quanto à forma e dimensões dos corpos de prova, velocidade de tração, condições de condicionamento são determinadas em geral por normas técnicas como, por exemplo, a ASTM D638-10.

Este ensaio é realizado num aparelho chamado de máquina universal de ensaios. Os corpos de prova são afixados em dispositivos chamados garras. As garras são acopladas à travessa fixa e à travessa móvel da Máquina Universal de Ensaio [31].

Os CPs para ensaios de resistência à tração são preparados sob forma de halteres com a superfície de seção cruzada plana. Na Figura 27, é mostrada a geometria típica de um corpo de prova para ensaios de tração e a Tabela 7 apresenta uma legenda para as siglas utilizadas para destacar as dimensões mais importantes.



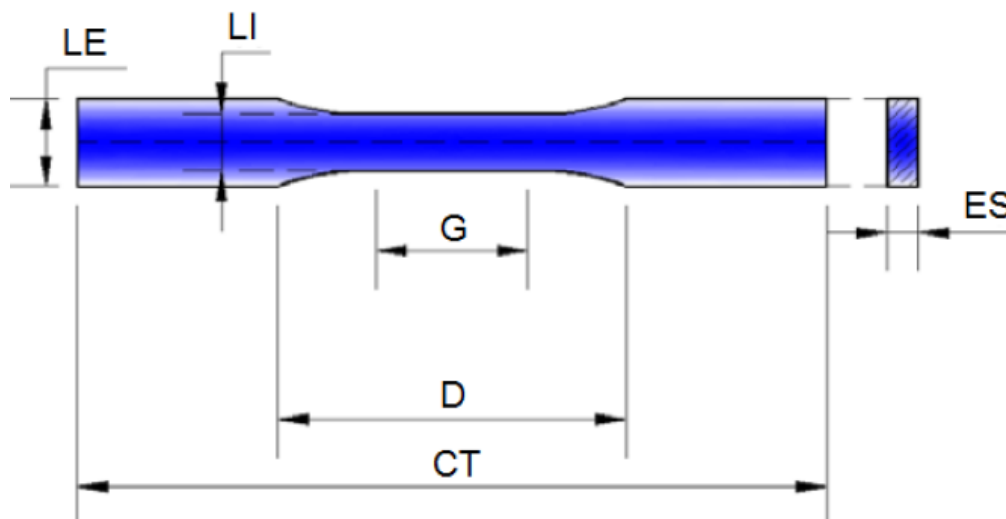


Figura 27. Geometria típica de um corpo de prova para ensaio de tração. [38]

Tabela 7. Descrição das siglas das principais medidas do corpo de prova exposto na figura 27.

Descrição	Sigla
Comprimento Total	CT
Distância entre Cargas	D
Espessura	ES
Comprimento para Instrumentação	G
Largura Externa	LE
Largura Interna	LI

Depois de obtidos os CPs pelo processo de injeção, foi realizado o ensaio utilizando a máquina universal de ensaios modelo DL10.000, marca EMIC, cuja capacidade máxima é de 100KN do LPCM, sendo que a célula de carga utilizada nos ensaios para materiais poliméricos apresenta uma capacidade máxima de 500N. A velocidade de tração foi de 3mm/min para todas as amostras. A Figura 28 mostra a máquina universal de ensaios utilizada neste trabalho. Entretanto, durante a realização deste trabalho, houve a quebra da máquina antes que fosse possível completar os ensaios. O ensaio foi realizado somente para os CPs que não continham AM. Os resultados serão apresentados na próxima seção e uma proposta para os resultados para os corpos de prova com AM também será fornecida.



Figura 28. Máquina universal de ensaios modelo DL10.000, marca EMIC.

### 3.2.8 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As diferentes técnicas de microscopia eletrônica estão baseadas nos diferentes sinais produzidos pela interação dos elétrons com a amostra. Em todos os tipos de microscópios os elétrons primários, emitidos pela fonte, atingem a amostra e os mesmos elétrons, ou diferentes, escapam para formar a imagem. O MEV é sem dúvida, o microscópio eletrônico mais versátil, devido às suas várias características [31].

Na Figura 29 é apresentado um diagrama esquemático mostrando os componentes de um MEV.

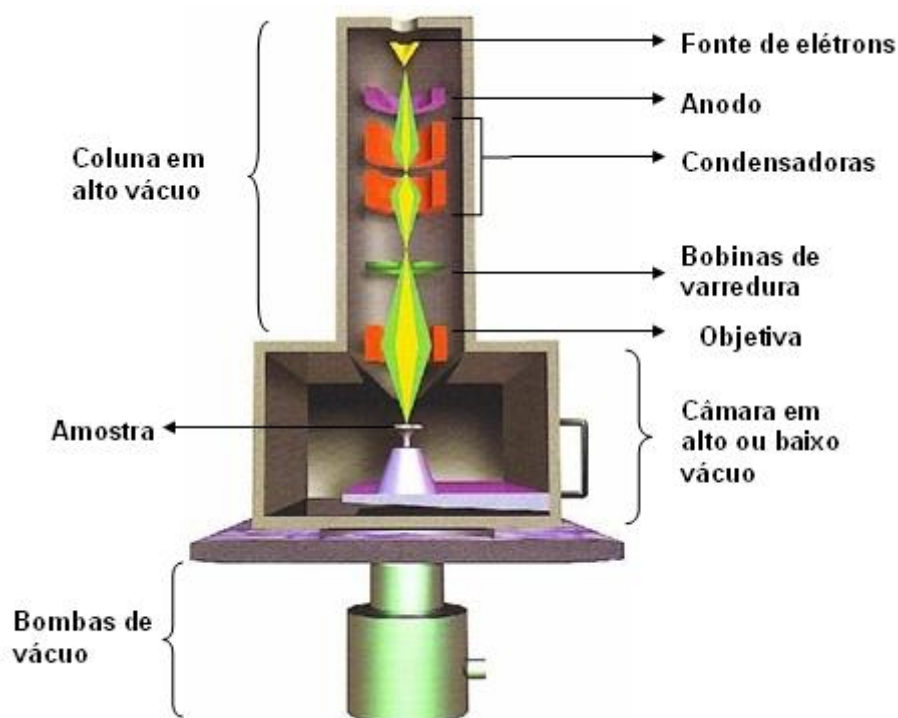


Figura 29. Diagrama esquemático do MEV. [39]

A coluna do microscópico consiste de uma fonte de elétrons, lentes eletromagnéticas e bobinas de varredura, operando sob vácuo. A fonte de elétrons, normalmente um tipo de filamento de tungstênio, produz elétrons que são acelerados a uma energia na faixa de 1 a 140 keV, com correntes entre  $10^{-6}$  e  $10^{-12}$  A. O diâmetro do feixe produzido diretamente pela fonte de elétrons convencional é muito grande para gerar uma imagem definida em alta ampliação. As lentes eletromagnéticas, em conjunto com os diafragmas, são usados para reduzir o diâmetro do feixe e focalizá-lo sobre a superfície da amostra. [31]

As imagens fornecidas pelo MEV possuem um caráter virtual, pois o que é visualizado no monitor do aparelho é a transcodificação da energia emitida pelos elétrons, ao contrário da radiação de luz a qual estamos habitualmente acostumados.

As imagens de MEV dos compósitos das variadas composições foram obtidas utilizando um MEV de bancada da marca Jeol - modelo J6000, localizado no LPCM da FATEC-SP. Os CPs utilizados no MEV foram os mesmos obtidos para a realização do ensaio de tração, entretanto os CPs foram quebrados de forma que a região onde ocorreu a fratura fosse analisada, conforme pode ser visto na Figura 30. Para realizar essa quebra, sem que houvesse um arrancamento das fibras, foi realizada uma fratura

criogênica. Essa fratura consiste em mergulhar o material em nitrogênio líquido, retirá-lo depois de alguns minutos e então fraturar o material. O nitrogênio líquido foi cedido pelo centro de CCTM (Centro de Ciências e Tecnologia dos Materiais) - localizado no IPEN (Instituto de Pesquisa Nuclear) – USP.

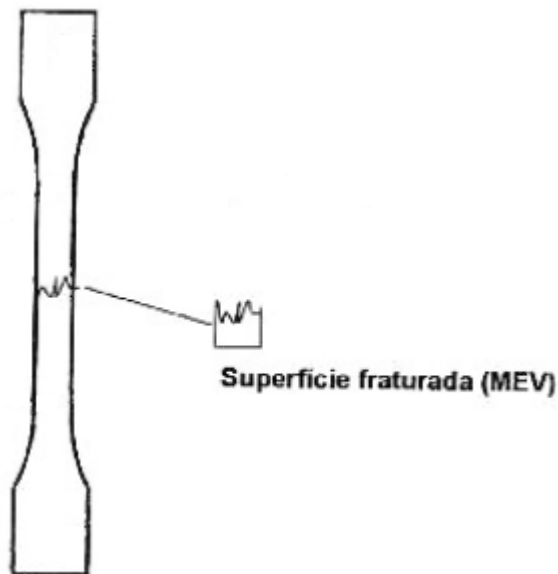


Figura 30. Diagrama das amostras retiradas do CP de tração para as análise de MEV.  
[adapt. de 11]

Um outro procedimento que foi realizado para possibilitar a visualização das amostras no MEV, foi uma deposição de ouro superficial, utilizando um equipamento de deposição por *sputtering*-RF, também disponível no LPCM da FATEC-SP. A Figura 31 mostra o MEV de bancada utilizado neste trabalho.



Figura 31. MEV de bancada da Marca Jeol Modelo J6000.

A Figura 32 mostra um fluxograma exemplificando todo o processo até o momento.

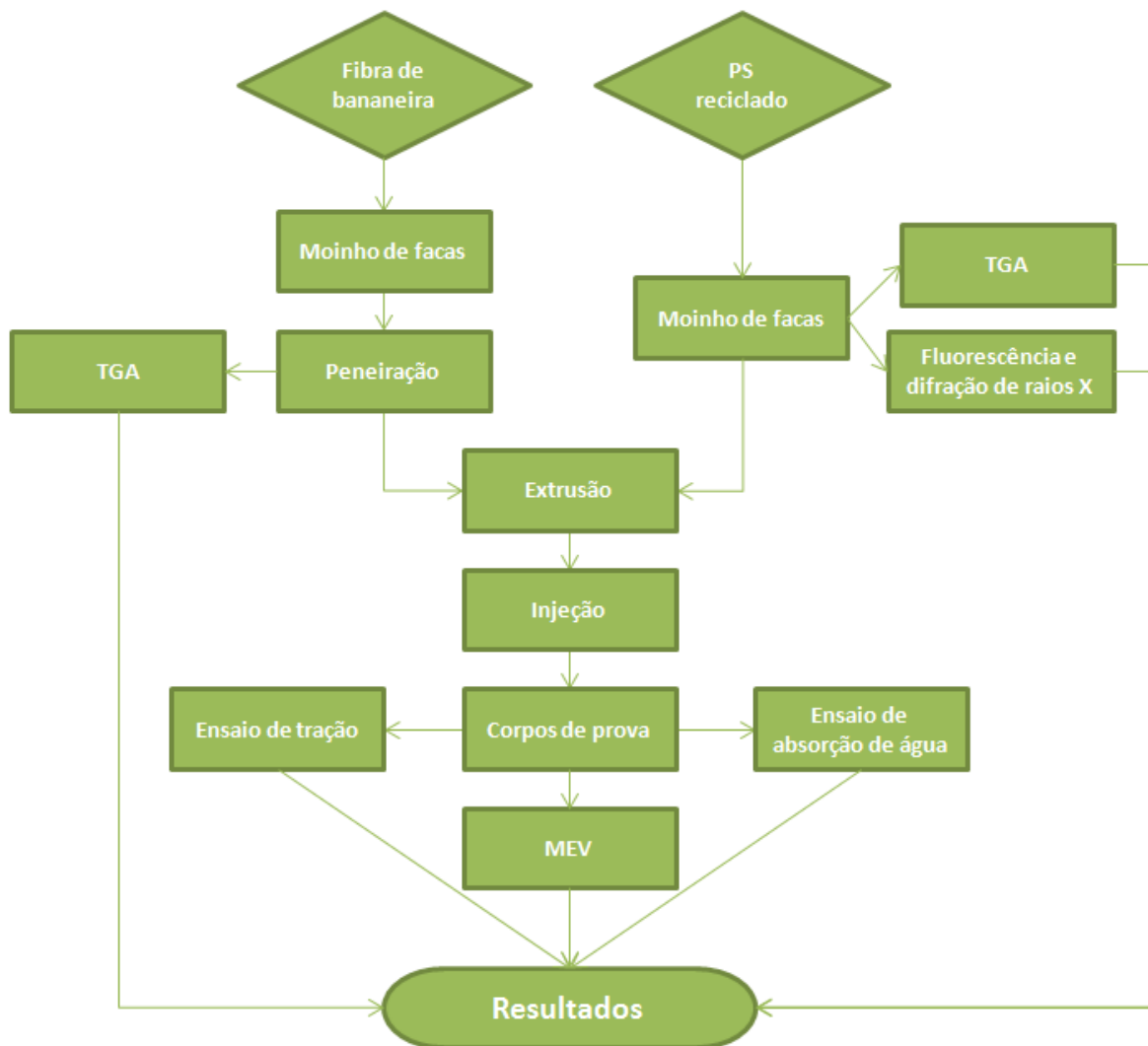


Figura 32. Fluxograma esquematizando o processo.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresentará resultados obtidos após a realização dos ensaios propostos e também será abordada uma discussão propondo explicações e hipóteses para os diversos resultados observados.

### 4.1 Resultados da Análise Termogravimétrica

Com a realização da TGA foi possível obter as curvas abaixo, apresentadas na Figura 33, que mostram a perda de massa com o aumento da temperatura da fibra de bananeira.

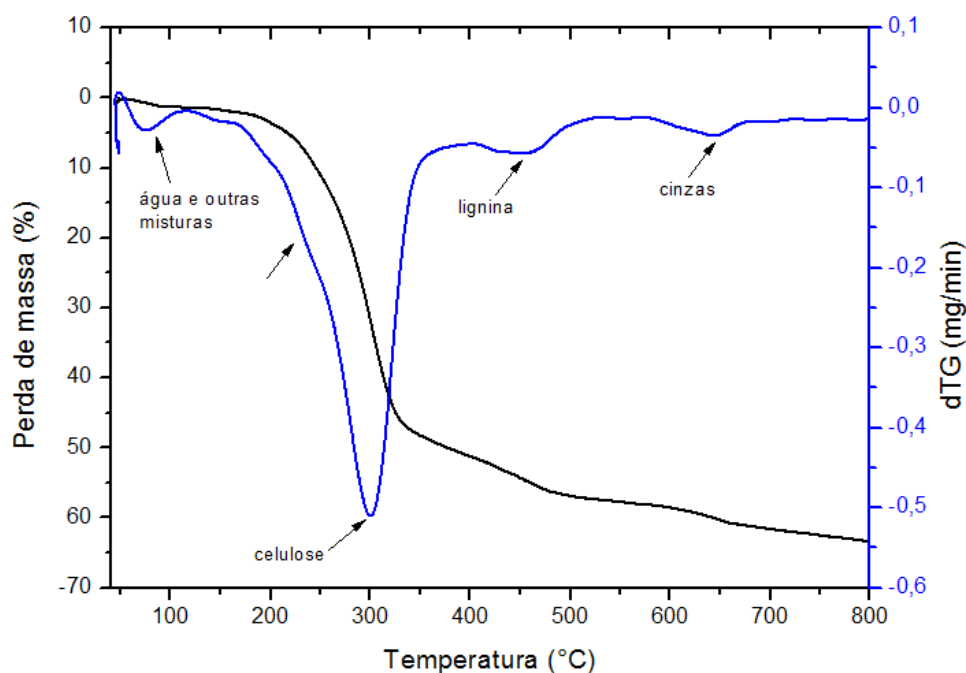


Figura 33. Análise Termogravimétrica da fibra de bananeira.

As perdas apresentadas em torno de 100 °C podem estar relacionadas com a perda de massa de água associada com compostos voláteis presentes na fibra. Mesmo que as fibras tenham sido secas antes das análises, a total eliminação de água é difícil devido à natureza hidrofílica da fibra. Entre 100 °C e 200 °C as fibras apresentam estabilidade térmica. Portanto a temperatura máxima em que a fibra pode ser utilizada sem que a mesma sofra muitas perdas é até ~200 °C, após essa temperatura a perda de massa é elevada.

Acima de 200 °C , a amostra apresenta considerável perda de massa devido à decomposição de primeiramente da hemicelulose (em torno de 230°C) e da celulose (em torno de 300 °C) e a perda de massa no pico da degradação foi de 30,5%. A decomposição da lignina ocorre na etapa seguinte, apresentando um pico de degradação em aproximadamente 450 °C. A perda de massa nesse ponto atingiu 54,24%. Em ambas as etapas, a perda de massa é atribuída à oxidação (queima) dos fragmentos em presença de ar. Após 550 °C apenas cinzas podem ser vistas. No pico de 640 °C, que corresponde às cinzas, a perda de massa foi de 60,26%. [35-36]

A Figura 34 apresenta as curvas que representam a perda de massa com a temperatura do PS.

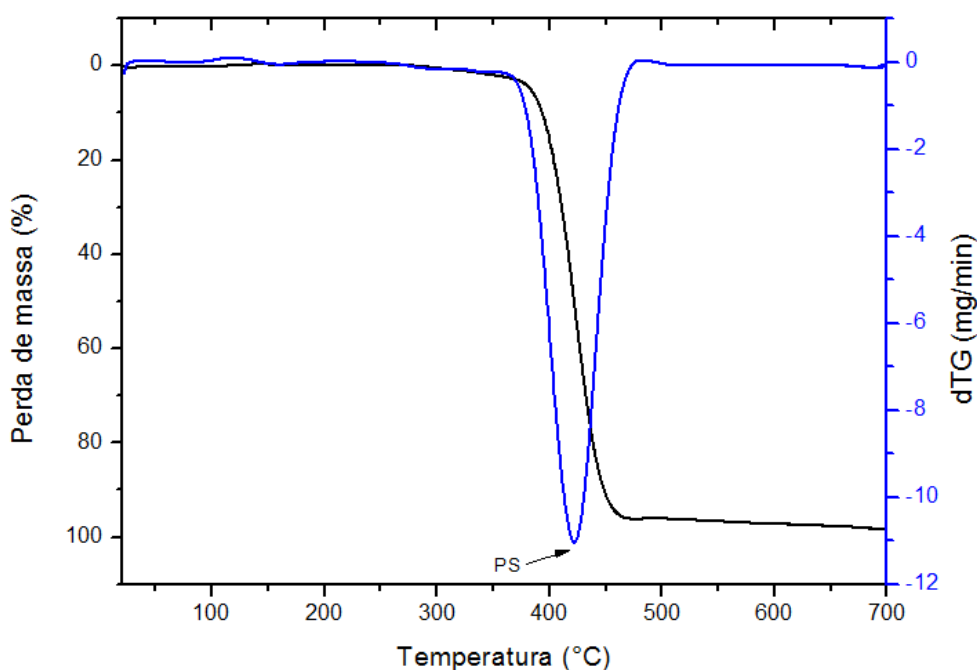


Figura 34. Análise Termogravimétrica do PS.

Observa-se que até a temperatura de aproximadamente 350°C a perda de massa do PS não é expressiva, mas acima desse ponto essa perda começa a aparecer, sendo essa a temperatura máxima de utilização para que todas as propriedades sejam garantidas.

Em aproximadamente 420 °C o polímero apresenta seu pico de degradação devido a quebra das ligações. Ao final da degradação a perda de massa alcançou 96,08%. O restante de massa que não sofreu degradação pode se tratar da massa de cargas presentes no polímero.

Um dos principais problemas para a análise quantitativa em experiências de TGA é a sobreposição de picos, que ocorre particularmente no caso de materiais compósitos, de curvas de DTG, como mostrado na Figura 35.

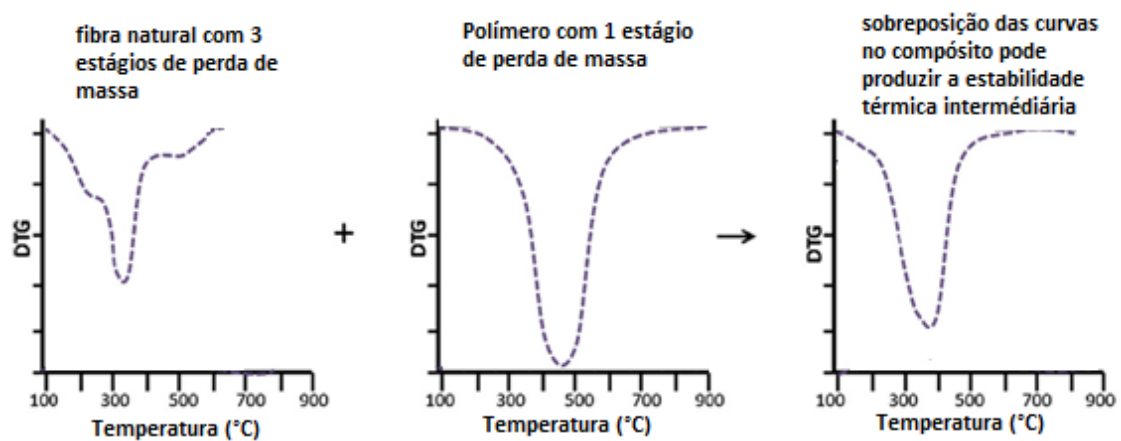


Figura 35. Sobreposição de curvas na análise de TGA. [adapt. de 43]

Essa Figura acaba servindo como um modelo teórico para as curvas de DTG da fibra de bananeira e do PS. Ao se fazer uma comparação com os resultados obtidos, têm-se que os valores experimentais estão de acordo com o proposto pela literatura.



## 4.2 Resultados da fluorescência e difração de raios X

A Figura 36 apresenta o difratograma do PS puro. Foi possível observar diversos picos correspondentes às cargas presentes. Também notou-se a presença de halos amorfos, indicando a natureza amorfa da matriz de PS. Com o auxílio da fluorescência de raios X foi possível identificar algumas dessas cargas.

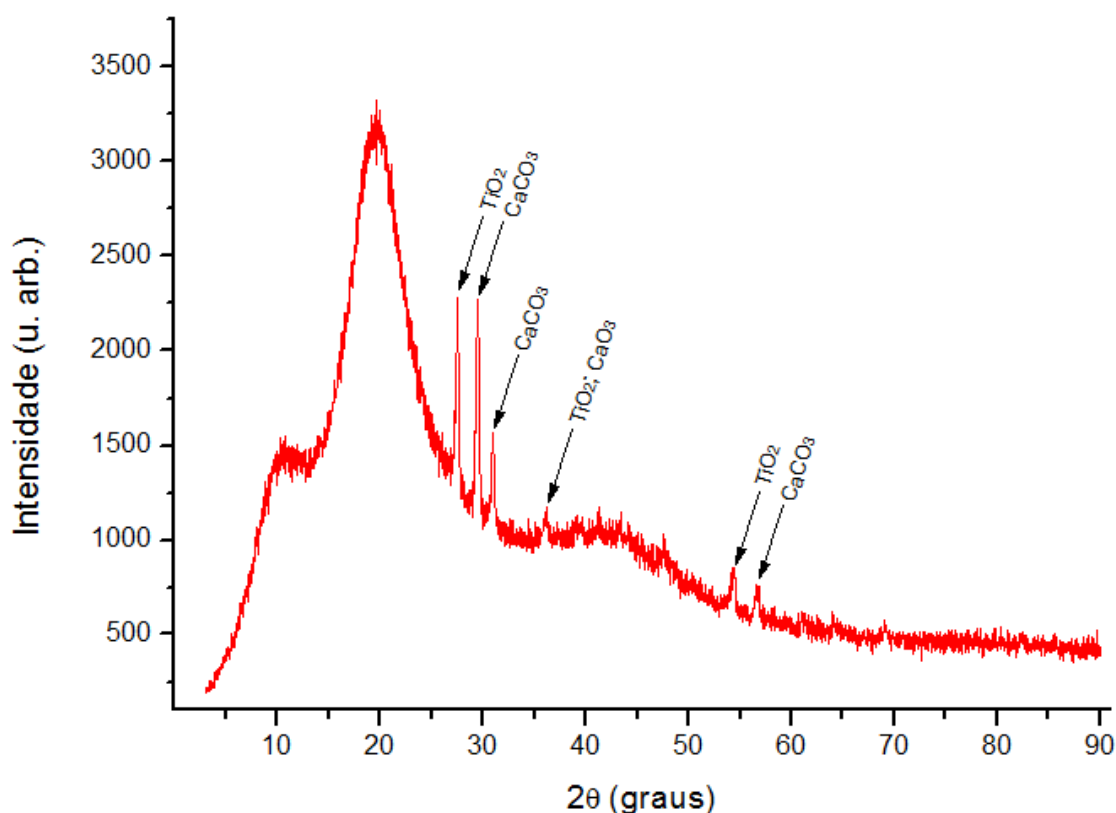


Figura 36. Difratograma obtido para a amostra de PS puro.

De acordo com a ASTM, uma carga corresponde a um material relativamente inerte adicionado a um plástico, a fim de modificar sua resistência, durabilidade, propriedades de manuseio ou outras características ou, ainda, reduzir os custos [24].

A carga de dióxido de Titânio (TiO<sub>2</sub>) observada no gráfico é utilizada como um pigmento, sendo um dos mais importantes pigmentos brancos produzidos. Apresenta ampla faixa de aplicação incluindo tintas arquitetônicas, industriais e de impressão, plásticos, borrachas, papel, produtos têxteis, alimentícios e fármacos. Existe em três formas cristalinas fundamentais: rutilo tetragonal, prisma tetragonal ou anatásio e bruquita ortorrômbica, sendo que apenas as duas primeiras são comercialmente produzidas e o pigmento de forma rutilo, o mais importante em termos de volume. Os

cristais de rutilo apresentam uma estrutura mais compacta que a forma anatásio, o que explica as importantes diferenças entre as duas formas, particularmente o seu alto índice de refração, maior estabilidade e alta densidade. O  $\text{TiO}_2$  rutilo apresenta maior índice de refração que qualquer pigmento branco disponível [34].

A mais importante propriedade de qualquer pigmento branco é a sua habilidade de opacificar e branquear o meio no qual é disperso. O potencial opacificante é essencialmente controlado por duas propriedades: índice de refração e tamanho de partícula [34].

O Carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) é utilizado como forma de melhorar a processabilidade e a resistência térmica e também para fornecer rigidez e dureza aos plásticos [24].

A Figura 37 mostra o gráfico obtido a partir da fluorescência de raios X, que indica a concentração das cargas presentes no PS.

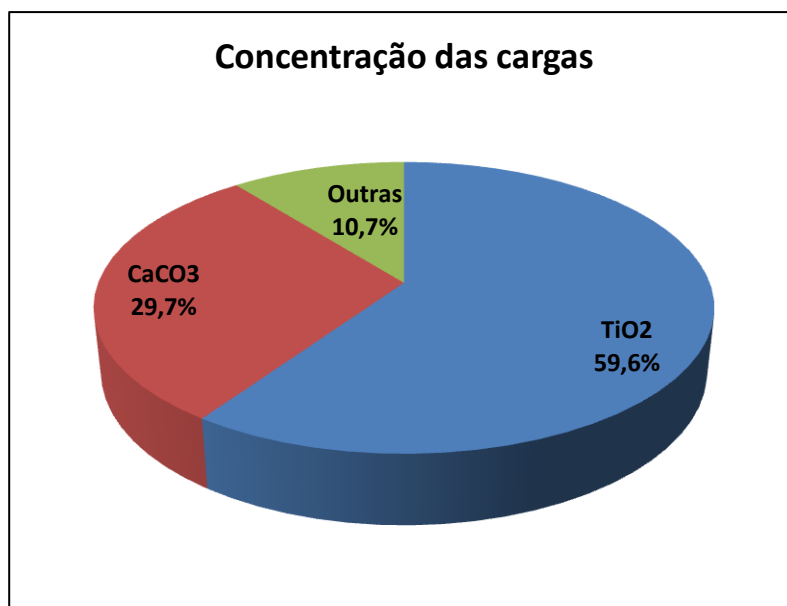


Figura 37. Concentração das cargas na amostra de PS.

A parcela descrita como 'outras' no gráfico pode ser representada pelos elementos descritos na Tabela 8.

Tabela 8. Elementos químicos e respectivas concentrações prováveis na amostra de PS.

Elemento químico	Concentração (%)
Si	4,21
Mg	3,84
Zn	1,98
Al	0,53
K	0,103
S	0,045

#### 4.3 Resultados do ensaio de absorção de água

Este ensaio originou o gráfico a seguir, representado pela Figura 38. Alguns pontos foram retirados por estarem muito fora da linha de tendência.

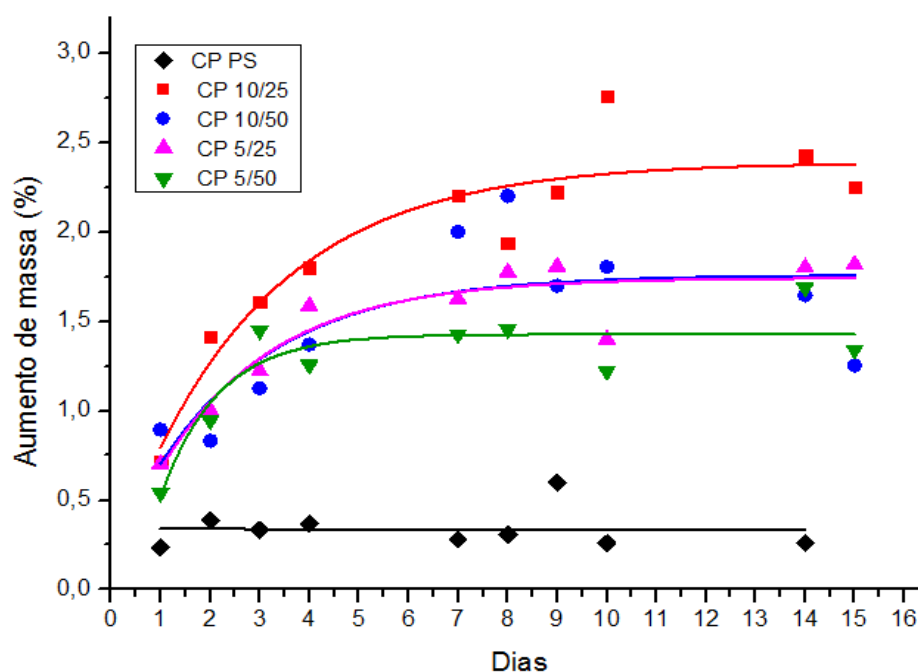


Figura 38. Gráfico do Aumento de Massa/Dias das amostras.

Observa-se que o CP 10/25 foi o que apresentou os maiores valores. Provavelmente isto ocorreu, pois as fibras de maior diâmetro facilitam a entrada de água no interior do material através de efeito capilar.

Os CPs 10/50 e 5/25 apresentaram um comportamento bem semelhante. O primeiro tem concentração maior de fibras, porém um menor diâmetro, o que pode

dificultar a entrada de água e o segundo tem uma menor concentração, mas o diâmetro da fibra é maior. Por esses motivos o gráfico obtido acaba apresentando curvas parecidas.

O CP 5/50 por sua vez foi o que apresentou os menores valores de absorção de água, provavelmente porque as fibras estão em menor quantidade e tem menor diâmetro.

O CP PS quase não apresentou ganho de massa, apresentando um comportamento próximo ao linear. Esse resultado comprova a natureza hidrofóbica do polímero.

#### 4.4 Resultados do ensaio de tração

A Figura 39 apresenta as curvas Tensão/Deformação dos compósitos, geradas após a realização do ensaio.

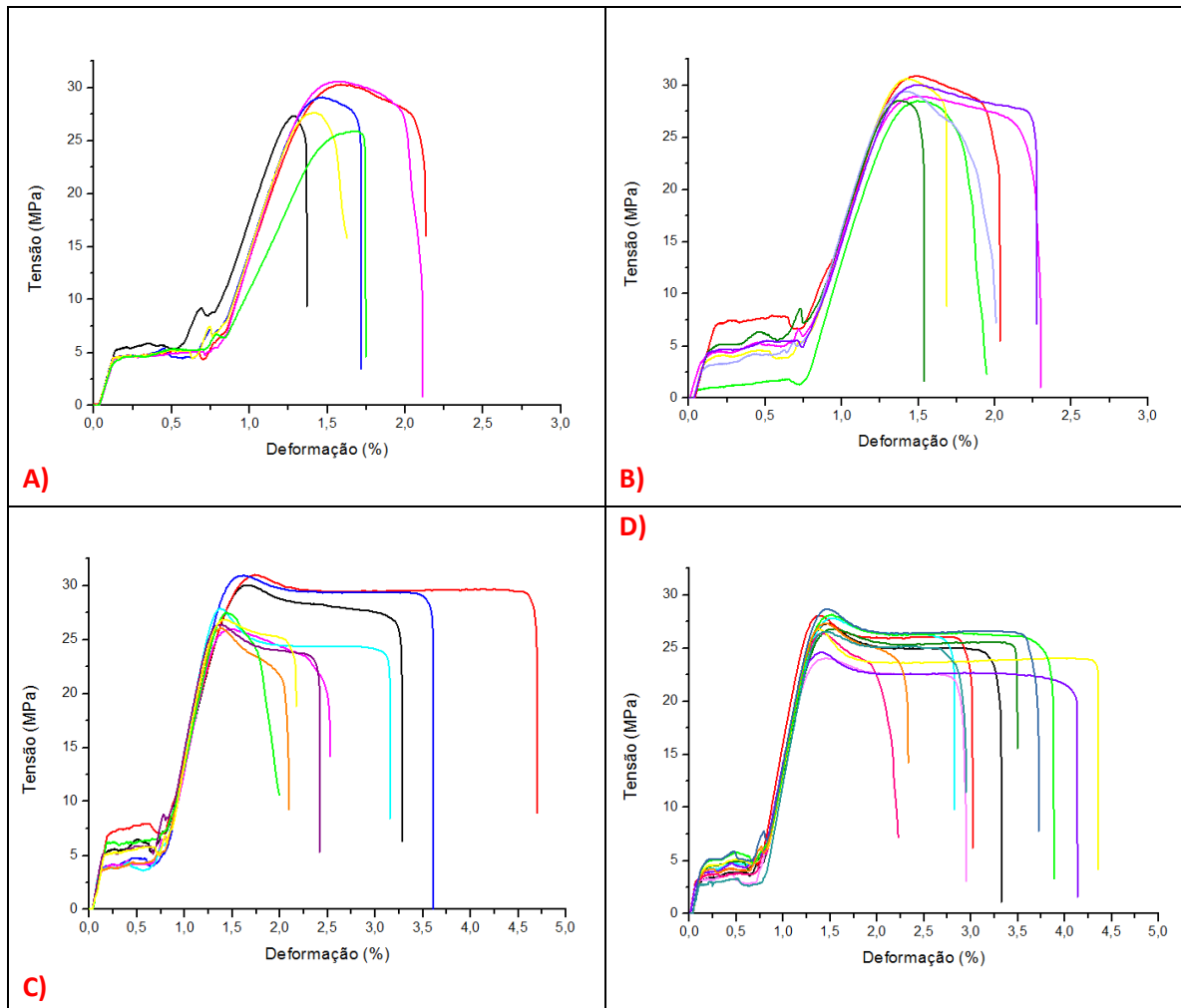


Figura 39. Gráficos Tensão/Deformação. Onde A) CP 10/25; B) CP 10/50; C) CP 5/25; e D) CP 5/50.

Também foi realizado o ensaio de tração para o CP PS e a curva Tensão/Deformação do mesmo é apresentada na Figura 40.

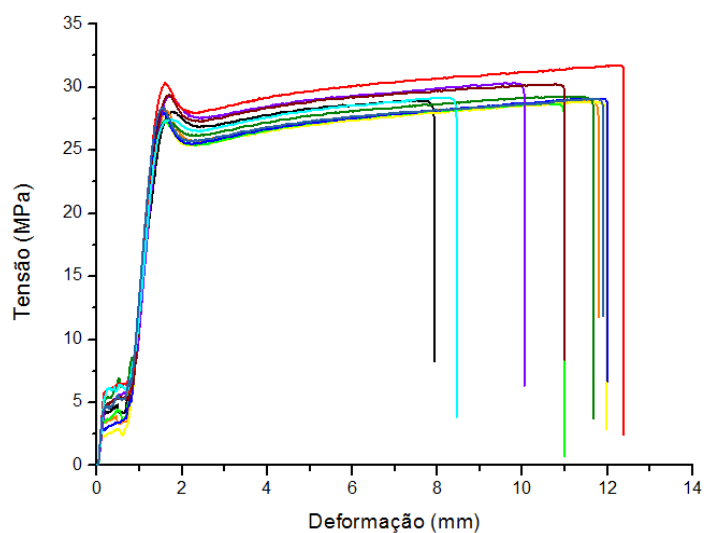


Figura 40. Gráfico Tensão/Deformação das amostras de CP PS.

A Figura 41 corresponde ao comportamento médio de cada uma das composições, de forma a expor os diferentes comportamentos mecânicos obtidos de forma mais clara.

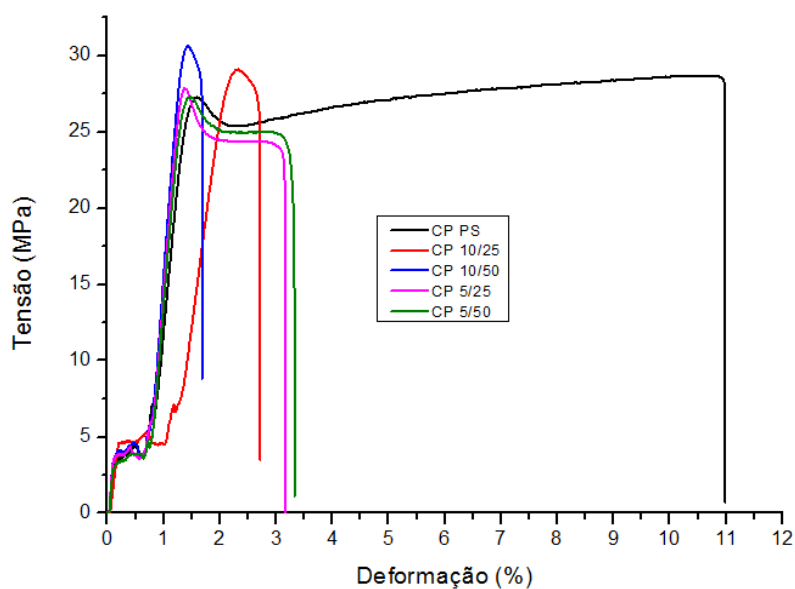


Figura 41. Gráfico Tensão/Deformação médio das amostras.

As propriedades observadas no gráfico acima foram quantificadas e os valores são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9. Valores médios de algumas propriedades das amostras.

	CP PS	CP 10/25	CP 10/50	CP 5/25	CP 5/50
Limite de escoamento (MPa)	3,03 ± 0,86	4,52 ± 0,38	3,42 ± 1,68	4,36 ± 1,28	3,18 ± 0,55
Deformação na ruptura (%)	10,83 ± 1,52	1,69 ± 0,29	1,78 ± 0,28	2,71 ± 0,91	3,17 ± 0,71
Tensão na ruptura (MPa)	29,43 ± 0,94	27,32 ± 0,78	27,99 ± 0,96	25,58 ± 2,57	24,69 ± 1,46
Tensão máxima (MPa)	29,46 ± 0,94	28,46 ± 1,80	29,53 ± 0,97	28,04 ± 2,07	26,86 ± 1,42
Módulo de Young (GPa)	4,1 ± 0,6	5,5 ± 0,6	5,8 ± 0,8	4,6 ± 0,8	4,9 ± 0,4

Observa-se que o CP PS apresentou uma deformação máxima muito superior às outras composições, o que já era esperado, por se tratar do polímero puro.

Já entre as outras composições vê-se que as com maiores concentrações de fibra apresentaram a menor deformação, havendo uma diminuição de até 85% em relação ao CP PS, uma vez que a fibra não tem como propriedade uma alta deformação até a ruptura, fazendo com que todo o compósito também diminua tal propriedade.[1] Além disso, observa-se também uma leve influência do diâmetro das fibras, onde as de 25 ABNT (maior diâmetro) apresentaram menores deformações do que as de 50 ABNT (menor diâmetro) se compararmos nas mesmas concentrações. Entretanto, essa diferença de comportamento em função do diâmetro da fibra não foi tão grande, estando dentro do desvio padrão, portanto para que se possa verificar com precisão se realmente há essa influência seriam necessários maiores estudos.

Outra propriedade que se mostrou bastante diferente entre o CP PS e os compósitos foi o Módulo de Young, onde os compósitos se mostraram superiores, apresentando um aumento de até 41,5%. Isso se deve ao fato de que a fibra é mais rígida do que o PS, ou seja, para um mesmo grau de deformação necessita de uma tensão maior.

Entre os compósitos, o Módulo de Young se mostrou mais elevado para as maiores concentrações de fibras. Já quando comparamos as mesmas concentrações, os compósitos com menores diâmetros de fibras apresentaram valores ligeiramente maiores. Isso pode ser explicado pelo fato de que com menores diâmetros se garante

uma maior área de superfície específica, havendo uma interação maior entre a matriz e o reforço. Para otimizar essa interação, melhorando a força de ligação interfacial, é necessária a aplicação de um agente compatibilizante. Espera-se que com a adição do mesmo se alcance resultados ainda melhores.[1]

O limite de escoamento foi menor para o CP PS se comparado a todos os outros compósito que apresentaram um aumento de até 49%. Além disso observou-se que entre compósitos, para diferentes diâmetros da fibra houve uma ligeira diferença. As fibras com maiores diâmetros apresentaram resultados superiores do que as com menores diâmetros.

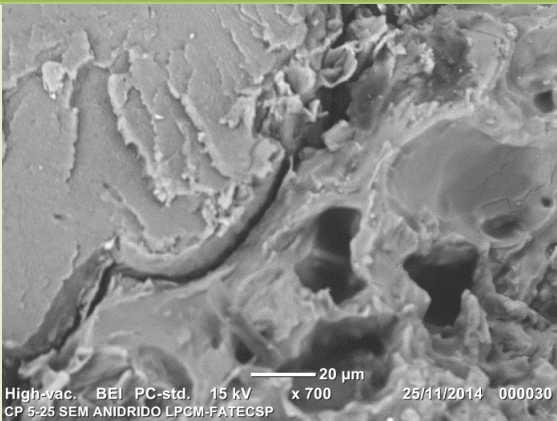
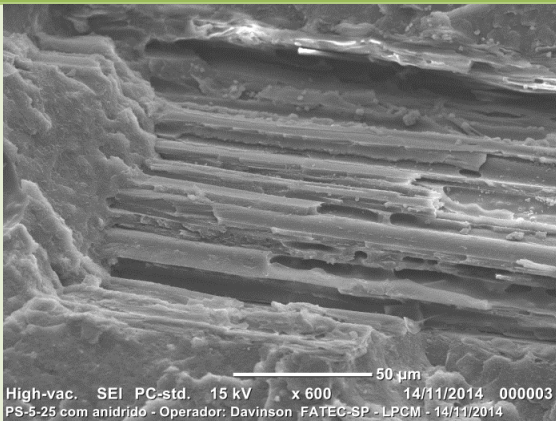
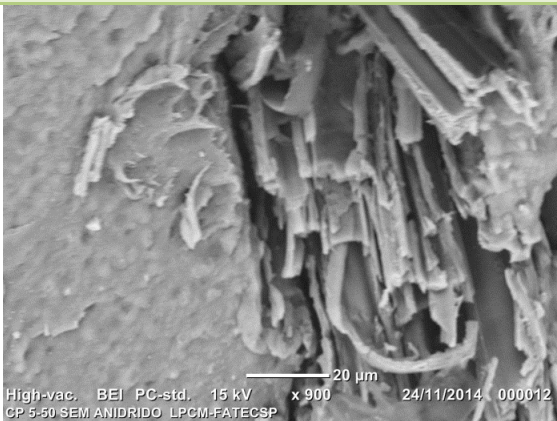

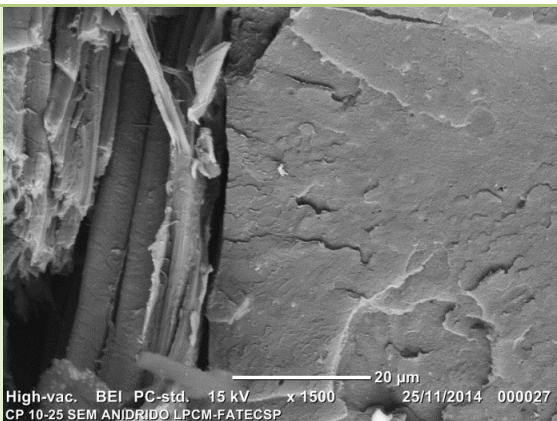
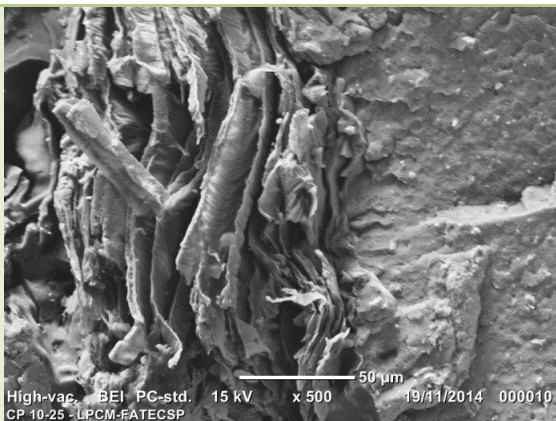

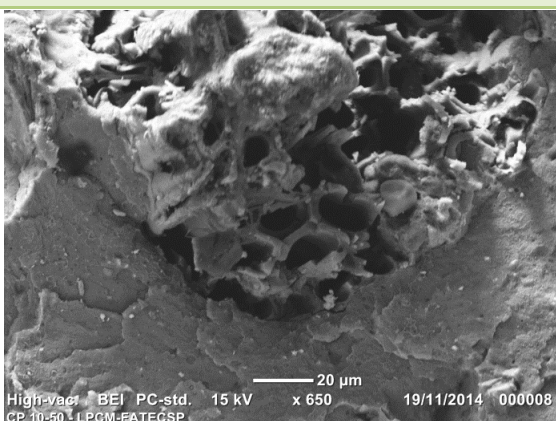
Os valores de tensão máxima se mostraram bem semelhantes entre todas as amostras. Os valores se mostraram proporcionais à fração em volume de fibras no compósito. Considerando os valores de tensão máxima para as fibras de bananeira, que estão na tabela 5, os resultados estão dentro do esperado.

#### **4.5 Resultados da microscopia eletrônica de varredura**

Com a realização do MEV foi possível obter imagens das amostras de forma a identificar como está a interface entre a fibra e a matriz de PS. A Tabela 10 apresenta essas imagens.



Tabela 10. MEV das amostras com e sem AM.

	SEM ANIDRIDO	COM ANIDRIDO
5/25		
5/50		
10/25		
10/50		

Com a análise das imagens é possível observar por meio de uma comparação visual que as amostras que contém AM tem uma região de interface mais próxima da ideal do que as que não o tem. Isso permite dizer que o anidrido melhorou a adesão entre a fibra e a matriz, funcionando como um bom agente de acoplamento para o compósito em estudo.

Como já mencionado anteriormente, a região interfacial é responsável por facilitar a transferência da solicitação mecânica da matriz para o reforço, o que nos leva a crer que ao ser efetuado o ensaio de tração com as amostras contendo o anidrido, teremos resultados superiores aos obtidos nas amostras sem anidrido, pois provavelmente eles serão mais resistentes a esse tipo de esforço.

Além disso, podemos prever que os resultados do ensaio de absorção de água para as amostras com anidrido também serão superiores, apresentando um menor percentual de aumento de massa ao longo do tempo.

## 5 CONCLUSÃO

A realização deste trabalho permitiu elaborar uma forma de reciclar o PS utilizado para confecção de copos plásticos descartáveis. Essa reciclagem se deu através da obtenção dos compósitos matriz desse PS, reforçado com fibra de bananeira. Os compósitos foram obtidos na proporção em massa de 5% e 10% de fibra de bananeira no PS. Para cada concentração foram realizadas duas misturas por meio de extrusão: uma com a fibra de bananeira de diâmetro 50 ABNT e outra com 25 ABNT. Também foram realizadas misturas com as mesmas variadas concentrações e diâmetros de fibras, porém com adição de 3% de AM.

Com os ensaios realizados pudemos chegar a algumas conclusões relacionadas a cada um deles. Com o TGA pudemos avaliar até que temperatura o compósito pode ser processado sem que haja perdas nas propriedades devido à degradação de alguma das fases. Os resultados experimentais se mostraram bem próximos dos observados na literatura. Além disso, com essa análise, foi possível observar que na amostra de PS haviam também, em sua composição, cargas. Essas cargas foram analisadas pela fluorescência e difração de raios X, resultados nos mostraram quais são as prováveis cargas, assim como suas concentrações. As cargas observadas são cargas comumente utilizadas em polímeros.

O ensaio de absorção de água, comprovou a natureza hidrofílica das fibras e a hidrofóbica do polímero em estudo. Com o ensaio de tração pudemos avaliar que os compósitos apresentaram modificações de algumas características do PS. Houve uma diminuição da deformação máxima na ruptura em relação ao CP PS, o aumento do Módulo de Young e um aumento no limite de escoamento. Observou-se também que pode haver uma influência do diâmetro da fibra nessas propriedades, entretanto a diferença entre os valores obtidos não se mostrou significativa, estando dentro do desvio padrão. Para verificar com precisão se realmente o diâmetro das fibras causou impactos em tais propriedades será necessária a realização de ensaios com uma maior quantidade de CPs.

Entretanto, os ensaios de tração e absorção de água só foram realizados com os compósitos que não continham AM, mas uma suposição pode ser feita sobre tais

resultados depois de se analisar as imagens fornecidas pelo MEV. Essas imagens mostraram que houve uma melhora na adesão da interface entre a fibra e a matriz, fazendo com que se possa supor que os ensaios de tração e absorção de água apresentem resultados melhores.

Os resultados apresentaram dados promissores, mostrando que o compósito feito a partir da fibra de bananeira e do PS reciclado é uma opção interessante, uma vez que sua obtenção se dá de maneira muito simples, além de as matérias-primas serem baratas.

## 6 ETAPAS FUTURAS

Para a continuidade deste trabalho, realizar os ensaios de tração para as composições com AM e o ensaio de absorção de água.

Outras caracterizações podem ser conduzidas como:

- ensaios de impacto;
- calorimetria diferencial exploratória (DSC);
- análise dinâmico-mecânica (DMA);
- espectroscopia de infravermelho (FTIR); etc

Como forma de estudar mais a fundo a influência das fibras como reforço em polímeros, pode-se realizar um tratamento químico das fibras, além de também ser possível obter compósitos com outras concentrações em massa de fibra e com diâmetros diferentes.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 LEVY NETO, F.; PARDINI, L. C. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. São Paulo: Edgard Blücher, 2006.
- 2 SHACKELFORD, J. F. **Ciência dos materiais**. 6. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.
- 3 SMITH, W. F. **Princípios de ciência e engenharia dos materiais**. 3. ed. Lisboa: McGraw-Hill, 1998.
- 4 BRADY, G. S. *et al.* **Materials Handbook**. 14. ed. New York: McGraw-Hill, 1997.
- 5 BORELLY, D. **Estudo comparativo da degradação de poliestireno e de poliestireno de alto impacto por envelhecimento natural e artificial**. 2002.
- 6 BECKER, D. *et al.* **Influência da sequência de mistura do PP-MA nas propriedades dos compósitos de PP e fibra de bananeira**. *Polímeros*, 21(1), 7-12, 2011.
- 7 TOMKZAC, F. **Estudos sobre a estrutura e propriedades de fibras de coco e curauá do Brasil**. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.
- 8 PEREIRA, A. L. S. **Extração de nanocelulose de fibras vegetais**. 2010. Monografia (Graduação em Engenharia Química) –Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.
- 9 LEITE, J. B. V. **Banana**. Disponível em: <<http://www.ceplac.gov.br/radar/banana.htm>>. Acesso em: 10 julho 2013.
- 10 REZENDE, M. C. *et al.* **Compósitos estruturais: tecnologia e prática**. São Paulo: Artliber, 2011.
- 11 MULLINARI, D. R. **Comportamento térmico, mecânico e morfológico dos compósitos de polietileno de alta densidade reforçados com fibras de celulos do bagaço de cana de açúcar**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2009.
- 12 VERONESE, V. **Desenvolvimento e avaliação de propriedades de mistura de poliestireno (PS) e copolímeros em bloco estireno-butadieno-estireno (SBS)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.
- 13 CAPECCHI, G. **Efeito do reprocessamento nas propriedades mecânicas e térmicas de compósitos de polipropileno e fibra de bambu compatibilizados com**

**polipropileno graftizado com anidrido maleico.** 2011. Projeto de pesquisa de iniciação científica – Faculdade de Engenharia Industrial (FEI), São Paulo, 2011.

14 GUIMARÃES, J. L. *et al.* **Preparo de compósitos biodegradáveis a partir de fibras de bananeira plastificadas com amido e glicerina bruta derivada da alcoólise de óleos vegetais.** Portal do Biodiesel, Governo Federal, 28-33, 2006.

15 SILVA, J. R. **Análise de viabilidade econômica do emprego de compósitos de PVC reforçado com fibra de bananeira.** 2008. Monografia (Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2008.

16 PADILHA JR., E. J.; ZARD, C. L. **Comportamento mecânico e reológico de compósitos de polipropileno e fibras de bananeira: Influência do teor de fibra.** Revista Eletrônica de Materiais e Processos, 5(1), 10-16, 2010.

17 HYER, M. W. **Stress analysis of fiber-reinforced composite materials.** Boston: McGraw-Hill, 1997.

18 CANEVAROLO JR., S. V. **Ciência dos polímeros.** 2. ed. São Paulo: Artiber, 2010.

19 ASKELAND, D. R.; PHULÉ, P. P. **Ciência e engenharia dos materiais.** São Paulo: Cengage Learning, 2008.

20 HUMMEL, R. E. **Understanding materials science.** New York: Springer, 1998.

21 SOUZA, L. M. N. **Incoporação de fibras naturais de bananeira em matrizes de poliestireno reciclado.** Monografia (Graduação em Tecnologia de Materiais) – Faculdade de Tecnologia de São Paulo, São Paulo, 2012.

22 BOUCHONNEAU, N. *et al.* **Análise da absorção de água em dois polímeros expandidos: desenvolvimento do módulo de flutuabilidade de um mini-robô submarino.** Revista Polímeros, 20 (3), 181-187, 2010.

23 MISHRA, S.; NAIK, J. B. **Absorption of water at ambient temperature and steam in wood–polymer composites prepared from agrowaste and polystyrene.** Journal of Applied Polymer Science, 68, 681-686, 1998.

24 LOKENSGARD, E. **Plásticos industriais: teoria e aplicações.** 5. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2013.

25 BURAKOWSKI, L.; REZENDE, M. C. **Modificação da Rugosidade de Fibras de Carbono por Método Químico para Aplicação em Compósitos Poliméricos.** Polímeros, 11 (2), 2001.

- 26 RAZERA, I. A. T. **Fibras lignocelulósicas como agente de reforço de compósitos de matriz fenólica e lignofenólica.** Tese (Doutorado em Ciências (Físico-química)) – Universidade de São Paulo – Instituto de química de São Carlos, São Carlos, 2006.
- 27 SHIGUE, C. Y. **Materiais compósitos.** Disponível em: <[http://www.demar.eel.usp.br/compositos/Notas\\_aula/introducao.pdf](http://www.demar.eel.usp.br/compositos/Notas_aula/introducao.pdf)>. Acesso em: 11 novembro 2014.
- 28 OTA, W.N. **Análise de compósitos de polipropileno e fibras de vidro utilizados pela indústria automotiva nacional.** Dissertação (Mestrado em engenharia) – Universidade Federal do Paraná, 2004.
- 29 SATYANARAYANA, K. G. *et al.* **Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part I: Source, production, morphology, properties and applications.** Composites. 38 (7), 1694-1709, 2007.
- 30 MANRICH, S. **Processamento de termoplásticos: rosca única, extrusão e matrizes, injeção e moldes.** São Paulo: Artiber, 2005.
- 31 CANEVAROLO JR., S. V. **Técnicas de caracterização de polímeros.** 2. ed. São Paulo: Artiber, 2004.
- 32 REDIGHIERI, K.I.; COSTA, D. A. **Compósitos de Polietileno Reciclado e Partículas de Madeira de Reflorestamento Tratadas com Polietileno Modificado.** Polímeros, 18 (1), 5-11, 2008.
- 33 ZATTERA, A. J. *et al.* **Obtenção e caracterização de compósitos utilizando poliestireno como matriz e resíduos de fibras de algodão da indústria têxtil como reforço.** Polímeros, 21 (4), 271-279, 2011.
- 34 FAZENDA, J. M. R. *et al.* **Tintas e vernizes: ciência e tecnologia.** v. 1, 2.ed. São Paulo: Abrafati, 1995.
- 35 AZWA, Z. N. *et al.* **A review on the degradability of polymeric composites based on natural fibres.** Materials and Design, 47, 424–442, 2013.
- 36 GUIMARÃES, J. L. *et al.* **Characterization of banana, sugarcane bagasse and sponge gourd fibers of Brazil.** Industrial Crops and Products, 30, 407–415, 2009.
- 37 BECKER, D. *et al.* **Influência da sequência de mistura do pp-ma nas propriedades Dos compósitos de pp e fibra de bananeira.** Polímeros, 21 (1), 7-12, 2011.
- 38 TANAKA, E. A. **Estudo da reciclagem de copos plásticos de polipropileno reforçados com fibra de banana.** Monografia (Graduação em Tecnologia de Materiais) – Faculdade de Tecnologia de São Paulo, São Paulo, 2013.



39 SALVADORI, M. C. **Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)**. Disponível em: <<http://fap.if.usp.br/~lff/mev.html>>. Acesso em: 1 dezembro 2014.

40 GARBIM, V. J. **Aditivos de compatibilidade e agentes de acoplamento**. Disponível em: <<http://pt.slideshare.net/Borrachas/aditivos-compatibilizacao-acoplamento>>. Acesso em: 7 dezembro 2014.