



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA METALÚRGICA

**ESTUDO DA VIABILIDADE DO USO DE PVC RECICLADO REFORÇADO
COM FIBRA VEGETAL DA CASCA DO COCO PARA FINS ESTRUTURAIS E
DE ISOLAMENTO ACÚSTICO**

Bruno Mendes Nogueira

Fortaleza – CE

Janeiro de 2014



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA METALÚRGICA

**ESTUDO DA VIABILIDADE DO USO DE PVC RECICLADO REFORÇADO
COM FIBRA VEGETAL DA CASCA DO COCO PARA FINS ESTRUTURAIS E
DE ISOLAMENTO ACÚSTICO**

Bruno Mendes Nogueira

Monografia apresentada ao Departamento
de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
como parte dos requisitos para a obtenção
do título de Engenheiro Metalurgista.

Orientador: Prof. Dr. Enio Pontes de Deus

Fortaleza – CE

Janeiro de 2014

BRUNO MENDES NOGUEIRA

**ESTUDO DA VIABILIDADE DO USO DE PVC RECICLADO REFORÇADO
COM FIBRA VEGETAL DA CASCA DO COCO PARA FINS ESTRUTURAIS
E/OU DE ISOLAMENTO ACÚSTICO**

Monografia apresentada ao Departamento
de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
como parte dos requisitos para a obtenção
do título de Engenheiro Metalurgista.

Aprovada em: __/__/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Enio Pontes de Deus (Orientador)
Universidade Federal do Ceará

Prof. Dr. Francisco Ilson da Silva Junior
Universidade Federal do Ceará

Prof. Dr. Marcelo José Gomes da Silva
Universidade Federal do Ceará

*“Sonhar o sonho impossível,
Sofrer a angústia implacável,
Pisar onde os bravos não ousam,
Reparar o mal irreparável,
Amar um amor casto à distância,
Enfrentar o inimigo invencível,
Tentar quando as forças se esvaem,
Alcançar a estrela inatingível:
Essa é a minha busca.”
(Dom Quixote)*

AGRADECIMENTOS

A Deus por tudo que sou e tenho.

Ao meu pai, Paulo Nogueira pelo exemplo de homem que é e sempre foi pra mim.

Minha mãe, Ana Ruth pelos conselhos e paciência comigo.

À minha irmã, Karolina Nogueira pelo carinho e amizade.

À minha família inteira, em especial aos meus avós paternos, tias Suely e Sandra, e meu afilhado Rodrigo por me acolherem em sua residência.

Minha namorada, Márcia Mirla pela companhia em momentos bons e ruins e por me fazer querer ser um homem melhor.

A todos os professores do Centro de Tecnologia, em especial ao Prof Enio, por ter acreditado em meu potencial, ao Prof. Marcelo José, pelos ensinamentos e apoio e ao Prof. Ilson, pela oportunidade e paciência comigo.

A todos os colegas de curso e futuros engenheiros, dos quais aprendi bastantes coisas ao longo do curso. Em especial a Marcos Daniel, Ruy Alves, Rayanne Assunção, Hector Picarte.

Aos servidores do DEMM, em especial ao Junior, por todo apoio durante o curso e à Camila, grande profissional e amiga pessoal.

Meus amigos em geral, em especial aos amigos/colegas da música, minha outra paixão.

Ao Cnpq pelos recursos no projeto.

À empresa Tuboleve, pelo apoio em material e maquinário.

RESUMO

As aplicações de fibras vegetais combinadas com polímeros estão aumentando bastante nos últimos anos. Embora inicialmente tenha sido provocada por questões econômicas, atualmente envolve muitas outras questões, com ênfase para a questão ambiental e de sustentabilidade. Em muitos lugares já se pode ver dispositivos legais para substituição de materiais, como é o caso de vários países da Europa, onde há uma diretriz que orienta a implementação de materiais renováveis na indústria automobilística. O PVC, que está entre os termoplásticos mais consumidos no mundo, juntamente com a fibra do coco, que é encontrada em abundância nas regiões tropicais pode ser uma alternativa que visa tanto a questão ambiental, quanto econômica, pois é buscado um material com melhores propriedades e que custe mais barato. Atrelado a todo esse contexto, vem a questão do reaproveitamento, onde é possível fabricar PVC provenientes de materiais reciclados. A aplicação de fibras de coco no processo produtivo não se mostrou eficiente, visto que elas obstruíam a máquina de extrusão. Foi experimentado utilizar fibras micronizadas, mas sem resultados positivos, pois perde a qualidade de reforço ao material. Por fim, utilizando um processo alternativo de fabricação de PVC, foram comparadas duas amostras de compósito para absorção acústica, em que a placa com maior teor de fibra absorveu uma maior percentual de som. Em posse dos resultados, fica a sugestão de aumentar a proporção de fibra na resina e traçar um perfil em que se obtenha um resultado atraente tanto para a acústica, tanto para o estrutural.

Palavras-chave: PVC, fibra de coco, reciclagem, absorção acústica.

ABSTRACT

Applications of plant fibers mixed with polymers are increasing greatly in recent years . Although it was originally caused by economic issues, currently involves many other issues, with emphasis on environmental issues and sustainability. In many places already is possible to see legal provisions for substitution of materials, as is the case in many European countries, where there is a guideline that guides the implementation of renewable materials in the automobile industry. PVC, which is among the most thermoplastics consumed in the world, together with coconut fiber, which is found in abundance in tropical regions may be an alternative that covers both the environmental issue, as economical, because is sought a material with better properties and it costs cheaper. Coupled to all this context comes the reuse, where is possible to make PVC from recycled materials. The application of coconut fibers in the production process was not efficient, because they obstructed the extruder. Was tested using micronized fibers, but without positive results, due to it loses the quality of the reinforcement material. Finally, using an alternative manufacturing process PVC, two samples were compared to composite acoustic absorption in the board with higher fiber absorbed a greater percentage of sound. In possession of the results, we suggest increasing the amount of fiber in resin and draw a profile in which they get an attractive result for the acoustics, both for structural much.

Keywords: PVC, coconut fiber, recycling, sound absorption.

ÍNDICE

Capítulo 1 – Introdução	1
Capítulo 2 – Objetivos	3
2.1 – Objetivos específicos	3
Capítulo 3	4
3.1 – Revisão Bibliográfica	4
3.2 - Polimerização do monômero cloreto de vinila	4
3.2.1 – Processos	4
3.3 – Aspectos morfológicos relacionados aos processos de polimerização	5
3.4 – Relação entre estrutura e cristalinidade	7
3.5 – PVC e suas formulações	7
3.5.1 – Propriedades	7
3.5.2 – Principais aplicações	8
3.5.2.1 Embalagens	8
3.5.2.2 Calçados	8
3.5.2.3 Construção Civil	8
3.6 Absorção Sonora	10
Capítulo 4	11
4.1 – Materiais e Métodos	11
Difração de Raios-x	11
Análise Termogravimétrica	12
Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier	12
Ensaio Mecânicos	12
Produção do Compósito	12
Medição do coeficiente de absorção do material	15
Capítulo 5	17
5.1 – Resultados e discussão	17
Caracterização do PVCR	17
Absorção acústica	20
Capítulo 6	22
6.1 – Conclusões	22
Capítulo 7	23
7.1 Sugestões para trabalhos futuros	23
Capítulo 8 – Referências Bibliográficas	24

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática da formação do poli(cloreto de vinila)(PVC)	5
Figura 2 - Micrografia eletrônica de varredura de uma partícula de PVC obtido pelo processo de polimerização em suspensão.....	7
Figura 3 - Representação esquemática de um cristalito	7
Figura 4 - Principais aplicações do PVC no Brasil	10
Figura 5 - Coeficiente de absorção de materiais porosos ou fibrosos	12
Figura 6 - Reciclagem mecânica.	13
Figura 7 - Fibra de coco como recebida	15
Figura 8 - Sanduicheira industrial com a fibra vegetal distribuída.....	15
Figura 9 - Mistura antes do aquecimento	16
Figura 10 - Cargas sobre a mistura durante o processo.....	16
Figura 11 - Equipamento utilizado para medição do coeficiente de absorção do material	17
Figura 12 - Esquema do tubo de impedância usado no ensaio de absorção sonora.....	18
Figura 13 - Dispositivo para calibração dos microfones	18
Figura 14 - Difratoograma de raios-X da amostra de PVCR	19
Figura 15 - Espectro de infravermelho (FTIR) do PVC reciclado	20
Figura 16 - Curva de degradação térmica do PVCR	21
Figura 17 - Gráfico tensão x deformação para corpos de prova de PVCR	22
Figura 18 - Gráfico Frequência x Absorção sonora para placa 1	22
Figura 19 - Gráfico Frequência x Absorção sonora para placa 2	23

CAPÍTULO 1

1. Introdução

O desenvolvimento das resinas de PVC teve início em 1835, quando Justus von Liebig descobriu o monômero cloreto de vinila (VC), um gás à temperatura ambiente com ponto de ebulição igual a $-13,8^{\circ}\text{C}$. A descoberta de Liebig fez-se por meio da reação do 1,2-dicloroetano com hidróxido de potássio em solução alcoólica. Entretanto, foi um de seus alunos, Victor Regnault, o responsável pela publicação de um trabalho, em 1839, relatando a ocorrência de um pó branco após a exposição à luz solar de ampolas seladas preenchidas com cloreto de vinila, o qual pensava se tratar de poli(cloreto de vinila) - PVC, mas estudos indicaram tratar-se do poli (cloreto de vinilideno).

O primeiro registro da polimerização do cloreto de vinila e da obtenção do PVC ocorreu em 1872. Baumann detalhou a mudança do monômero induzida pela luz para um produto sólido branco. As propriedades dessa substância, descritas por ele, coincidem com as propriedades apresentadas para o PVC (NUNES, 2002).

Em 1912, Fritz Klatte descobriu na Alemanha o procedimento básico para a produção do PVC. Klatte descobriu os meios para a produção do cloreto de vinila por intermédio da chamada rota do acetileno, pela reação desse gás com o cloreto de hidrogênio. Descobriu ainda, em 1915, a polimerização do cloreto de vinila via radicais livres por meio de iniciadores do tipo peróxidos orgânicos. Porém, a produção comercial na Alemanha ficou limitada às várias tentativas de se construir equipamentos capazes de processar o PVC, devido à sua instabilidade térmica. Tal fato levou à suspensão da manutenção das diversas patentes editadas, tendo aberto caminho para que outras empresas passassem a tentar produzir o PVC.

Finalmente em 1926, W. Semon descobriu nos Estados Unidos que, misturando o PVC com fosfato de tricresila ou ftalato de dibutila - hoje conhecidos como plastificantes - era possível processá-lo e torná-lo altamente flexível. O problema da baixa estabilidade ao calor foi posteriormente superado com o desenvolvimento de uma série de compostos organometálicos e sais baseados principalmente em chumbo, cádmio, bário, zinco, cálcio e estanho, com propriedades de estabilização dos intermediários responsáveis pelas reações de degradação térmica.

Com isso, deu-se início à produção comercial do PVC. Os alemães começaram a produzi-lo nos anos 30, enquanto a produção britânica teve início na década de 40. No Brasil, a produção comercial do PVC teve início em 1954 em uma planta construída mediante a associação da B. F. Goodrich (EUA) e das Indústrias Químicas Matarazzo, utilizando tecnologia da primeira.

Atualmente, o PVC é apresentado como o segundo termoplástico mais consumido no mundo, com uma demanda superior a 27 milhões de toneladas no ano de 2001, só perdendo em volume para o polietileno. Dessa demanda total, o Brasil foi responsável por cerca de 2,5% do consumo de resinas de PVC⁽¹⁾. Desses dados, uma grande

quantidade de material plástico utilizado no polímero entram na corrente de resíduos sólidos, após o fim de sua utilização.

Em anos recentes, o problema da eliminação de resíduos de PVC vem ganhando cada vez mais destaque na discussão pública, devido ao aumento do consumo, diminuição das áreas de aterro disponíveis e os potenciais riscos ambientais decorrentes da disposição inadequada de resíduos sólidos (DA CRUZ, 2003). Diante desta problemática reforçada pelos crescentes movimentos ecológicos em prol da preservação dos recursos naturais surge a reciclagem(PENNAFORT, 2012), processo que nos últimos anos vem tendo seu reconhecimento aumentado, sendo assunto de interesse crescente em várias pesquisas(VILAPLANA, 2008).

A busca por novos materiais visando minimizar os problemas ambientais, tão discutidos nos últimos tempos, tem levado os cientistas a desenvolver compósitos utilizando fibras naturais como cargas de reforço(WAMBUA, 2003). Estas, que comparadas às fibras sintéticas, apresentam menor custo, além de serem de fontes renováveis. No caso das fibras de coco, ainda apresentam a vantagem de diminuir a quantidade de lixo sólido gerada, visto que são rejeitos das indústrias alimentícias de países tropicais.

A fibra do coco maduro já vem sendo utilizada na agricultura e na indústria. Por sua vez, a fibra da casca do coco verde, que ainda não vem sendo amplamente utilizada, poderá se tornar matéria-prima importante na produção de compósitos poliméricos. A facilidade de produção, baixa densidade e alta disponibilidade são as vantagens apresentadas por esta fibra.

A absorção acústica serve para atenuar o som que é refletido em uma superfície. Deste modo, absorvendo uma parte das ondas sonoras que chegam à superfície desse material.

Atualmente a preocupação com absorção acústica tem aumentado e sua aplicação se faz necessária em muitas áreas, como: redução de ruído em ambientes industriais, isolamento acústico em aviões e automóveis, revestimento acústico em teatros cinemas restaurante dentre outros.

Na construção civil, o PVC é largamente utilizado em forros. Mas, em alguns casos, o seu uso pode vir seguido de um inconveniente: o material não ser um bom absorvedor acústico. Um exemplo prático é o uso em divisórias de gabinetes de professores universitários, como é visto na Universidade Federal do Ceará, onde os próprios servidores criticam o fato de serem incomodados com sons provenientes do meio externo, ou até mesmo da sala vizinha.

Sendo assim, diante da problemática explicitada, este trabalho visa estudar um novo material compósito, que poderá reduzir ou até eliminar tais inconvenientes.

CAPÍTULO 2 - Objetivos

Este trabalho tem como objetivo estudar o comportamento do material composto de PVC reciclado e Fibra de coco no tocante à absorção acústica.

2.1 Os objetivos específicos do trabalho são:

- Caracterizar o PVC reciclado, comparando suas propriedades com um PVC virgem, por meio de Difração de raios-x; Análise termogravimétrica; Espectroscopia de Infravermelho com transformada de Fourier e ensaio de tração;
- Produzir um material composto, de forma que a fibra de coco fique distribuída de forma homogênea na resina polimérica;
- Realizar o ensaio de absorção sonora no material produzido, de acordo com a norma ISO 10534-2 (*Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes-Part 2: Transfer-function method*).

CAPÍTULO 3

3.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.2 Polimerização do monômero cloreto de vinila

3.2.1 Processos

A polimerização via radicais livres do cloreto de vinila produz um polímero de coloração branca, com alta massa molar, rígido e quebradiço. A Figura 1 mostra esquematicamente a polimerização do cloreto de vinila.

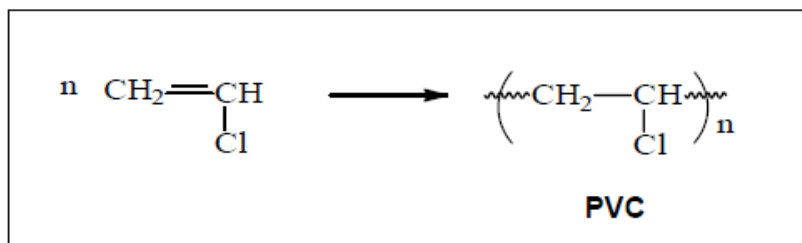


Figura 1 - Representação esquemática da formação do poli(cloreto de vinila)(PVC)
Fonte: Portal São Francisco

Cerca de 10 a 15% do PVC consumido mundialmente é produzido pelas técnicas de polimerização em emulsão e micro suspensão. Por estes processos, obtêm-se os chamados látices de PVC, que são definidos como emulsões estáveis de pequenas partículas de polímero em água, contendo ainda pequenas quantidades de constituintes não poliméricos, tais como emulsificantes, no qual as partículas formadas apresentam tamanho médio da ordem de 0,1 a 0,25 μm .

A formulação de látices de PVC é feita considerando-se a incorporação de aditivos tais como estabilizantes térmicos, compatibilizantes, espessantes, antiespumantes, plastificantes, cargas e pigmentos. O composto líquido resultante é então utilizado como agente promotor de adesão para fibras não-tecidas, base de carpetes, impermeabilização de tecidos diversos e revestimento de papéis especiais, uma vez que seu processamento depende da existência de um suporte para formação do filme de resina de PVC em sua superfície.

Polimerização em massa e polimerização em solução são outras técnicas também empregadas na obtenção do PVC, mas que possuem pouca representatividade no consumo total dessa resina.

Aproximadamente 80% do PVC consumido no mundo é produzido por meio da polimerização do monômero cloreto de vinila, em suspensão(NUNES, 2002). Devido ao fato do uso de solvente ser economicamente desinteressante, muitas vezes recorre-se a

essa técnica de polimerização, na qual se emprega água como meio de transferência de calor, mantendo o sistema com uma temperatura controlada. Nesse processo, o iniciador é previamente dissolvido no monômero. À mistura adiciona-se um agente de suspensão, normalmente poli(álcool vinílico) - PVAL, o qual forma uma fina membrana pericelular com espessura na faixa de 0,01 a 0,02 μm . E então, inicia-se a agitação que dispersará o monômero na forma de pequenas gotas por todo o volume, mantendo-as estáveis pela ação do agente de suspensão que envolve cada gota. Com o aumento da temperatura, tem-se o início da polimerização de modo individualizado em cada uma das gotas. O produto final consiste de pérolas na dimensão de 50 a 200 μm que são separadas por filtração, lavadas, secas e empregadas (BRAUN, 2002).

3.3 Aspectos morfológicos relacionados aos processos de polimerização do PVC

O termo morfologia refere-se ao modo como todas as partículas de uma resina de PVC encontram-se organizadas. Essa morfologia de partícula, definida durante a polimerização, influencia fortemente a processabilidade e as propriedades físicas do produto final.

As resinas de PVC obtidas pelos processos de polimerização em suspensão e em massa consistem de partículas com diâmetro normalmente na faixa de 50 a 200 μm , partículas essas de estrutura interna bastante complexa. Se essa partícula é cortada de modo a revelar sua estrutura interna, tal como mostrado na micrografia da Figura 2, observa-se que seu interior é formado de aglomerados de pequenas partículas com diâmetro na faixa de 1 μm , chamadas de partículas primárias. Pode-se observar que o volume entre essas partículas primárias é o responsável pela porosidade da resina, característica essa que torna possível o processo de incorporação de aditivos ao PVC, por meio da ocupação desse volume livre.

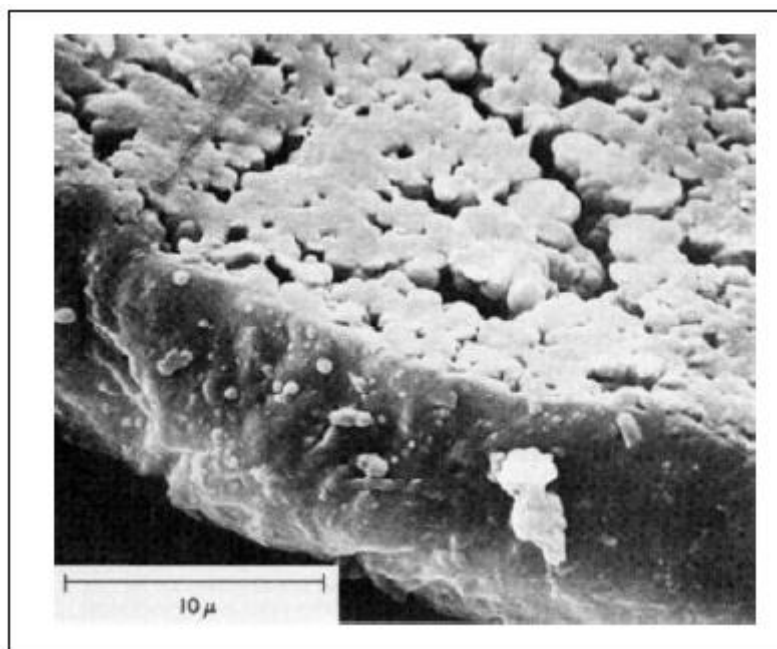


Figura 2 - Micrografia eletrônica de varredura de uma partícula de PVC obtido pelo processo de polimerização em suspensão, cortada de modo a exibir sua estrutura interna
 Fonte: Jr, A. R et al. "Tecnologia do PVC", Braskem, São Paulo (2002).

O PVC é considerado um polímero amorfo ou de baixa cristalinidade, sendo que essa propriedade varia conforme as condições de polimerização. Polímeros comerciais possuem cristalinidade da ordem de 8 a 10%, mas, em condições especiais, é possível aumentar significativamente esse valor. Polímeros obtidos a 5°C apresentam cristalinidade da ordem de 15%, ao passo que, se a polimerização for realizada a -75°C a cristalinidade é de cerca de 30%. Os cristalitos do PVC são pequenos, em média com 0,7 nm (3 unidades repetitivas) na direção da cadeia, e são empacotados lateralmente em dimensões relativamente maiores, da ordem de 4,1 nm. A Figura 3 fornece uma ideia dessa microestrutura.

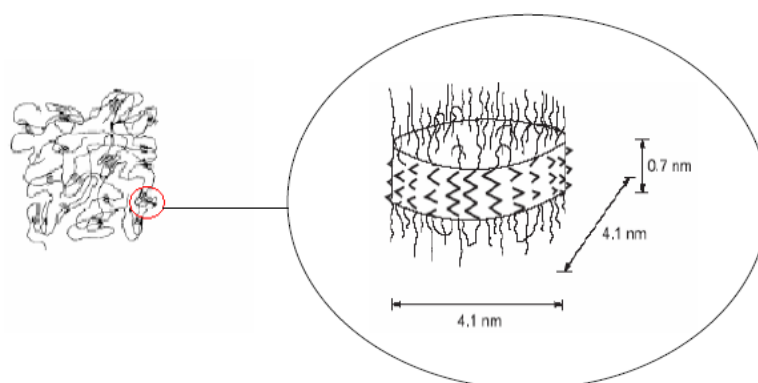


Figura 3 - Representação esquemática de um cristalito
 Fonte: Portal São Francisco

White reportou a polimerização do monômero cloreto de vinila na presença de complexos de ureia, a -78°C , este procedimento deu origem a um polímero altamente sindiotático e de cristalinidade da ordem de 65%. Porém, esse polímero mostrou-se insolúvel em todos os solventes, mesmo ciclohexanona (um tradicional solvente do PVC), além de não apresentar fusão abaixo dos 400°C .(WHITE, 1960)

3.4 Relação entre estrutura e cristalinidade

A estrutura cristalina dos polímeros está relacionada com a organização das longas cadeias poliméricas. Por isso o processo de cristalização de polímeros difere dos sólidos cristalinos convencionais. Os cristalitos são muito menores, contêm muito mais imperfeições e estão interconectados com as regiões amorfas(BRAUN, 2002).

Polímeros cristalizáveis típicos são os que possuem cadeias lineares; se tiverem ramificações ou grupos laterais, estes devem ser suficientemente pequenos ou dispostos regular e simetricamente ao longo das cadeias. A cristalização pode ser favorecida também, pela existência de grupos que promovam fortes ligações intermoleculares secundárias, tais como grupos polares ou que permitam a formação de ligações hidrogênio entre as moléculas((GUNTHER, 1996). Quanto maior a cristalinidade, mais elevadas são as propriedades de densidade, rigidez, resistência à abrasão, temperatura de fusão (T_m), temperatura de transição vítrea (T_g), etc.

3.5 PVC e suas formulações

3.5.1 Propriedades

A grande versatilidade do PVC atribui-se principalmente à necessidade e à capacidade de incorporação de aditivos antes de sua transformação no produto final. O grande teor de cloro presente na estrutura molecular do PVC lhe confere alta polaridade, o que aumenta sua afinidade e permite sua mistura com uma grande gama de aditivos. Através da escolha e da dosagem adequadas dos componentes da formulação, podem-se obter materiais poliméricos feitos sob medida para aplicações específicas. Dessa maneira, o PVC pode ter suas características alteradas dentro de um amplo espectro de propriedades, variando desde o rígido ao extremamente flexível, tornando-o o mais versátil dentre os polímeros termoplásticos((NASS, 1976).

Dentre os principais aditivos que podem ser incorporados ao PVC, destacam-se: plastificantes, estabilizantes, antiestáticos, lubrificantes, pigmentos, espumantes e modificadores de impacto. Dentre os aditivos citados, sem dúvida aqueles que representam maior importância na indústria do PVC, são os plastificantes(RABELLO, 2000).

Isso permite a sua adequação aos mais variados processos de moldagem, podendo ser injetado, extrudado, calandrado ou espalmado, dependendo da formulação utilizada e lhe confere excepcionais propriedades, dentre as quais podem ser citadas: transparência; brilho; impermeabilidade; alta resistência ao impacto; densidade relativamente baixa (1,4 g/cm³) - o que facilita seu manuseio e aplicação; boa resistência a ação de fungos, bactérias, insetos e roedores; bom isolamento térmico, elétrico e acústico; impermeabilidade aos gases e líquidos; resistência às intempéries (sol, chuva, vento e maresia); durabilidade; resistência à propagação de chamas; pode adquirir diferentes colorações pela incorporação de pigmentos, o que torna seu campo de utilização ainda mais amplo. O PVC ainda permite reciclagem e pode ser fabricado com baixo consumo de energia(RABELLO, 2000).

3.5.2 Principais aplicações

3.5.2.1 Embalagens

O uso como material de embalagem é devido ao seu excelente comportamento na formação de filme e ao fato de exibir baixo coeficiente de permeação para certos gases, o que evita ou reduz o contato do ar ou umidade com o produto que está sendo protegido. As aplicações do PVC nesse setor são muito variadas, pois as embalagens de PVC podem ser rígidas ou flexíveis e transparentes ou opacas, variando desde bolsas de sangue e blisters para a indústria farmacêutica, até grandes silos de estocagem. Passando por materiais de higiene e limpeza, frascos para cosméticos, filmes para proteção de alimentos, garrafas de água mineral, materiais para indústria automobilística, entre vários outros(FERRUTI, 2003).

3.5.2.2 Calçados

No segmento de calçados, o PVC surge como excelente opção para a confecção de solados e outros componentes, expandidos ou compactos, com os quais podem ser produzidas tanto sandálias inteiramente moldadas em uma única etapa, quanto calçados mais sofisticados nos quais acabamentos elaborados como transparência ou brilho podem ser dosados mediante a correta formulação do material.

3.5.2.3 Construção Civil

As aplicações diretamente ligadas à construção civil que abordam: tubos, conexões, perfis, fios e cabos somam aproximadamente 64% da demanda total de PVC no Brasil. Nessas aplicações o PVC mostra excelente relação custo-benefício, confrontando-se com materiais concorrentes como a madeira, metais e cerâmicas, além

de apresentar vantagens facilmente perceptíveis em quesitos fundamentais como comportamento antichama, resistência ao intemperismo, isolamento térmico e acústico, facilidade de instalação, baixa necessidade de manutenção e excelente acabamento e estética. A presença do átomo de cloro em sua estrutura molecular torna o PVC um polímero naturalmente resistente à propagação de chamas, contribuindo para aplicações nas quais este item é desejado, tais como fios e cabos elétricos, eletrodutos, forros e revestimentos residenciais. A Figura 4 ilustra os principais mercados nos quais o PVC tem participação no Brasil.

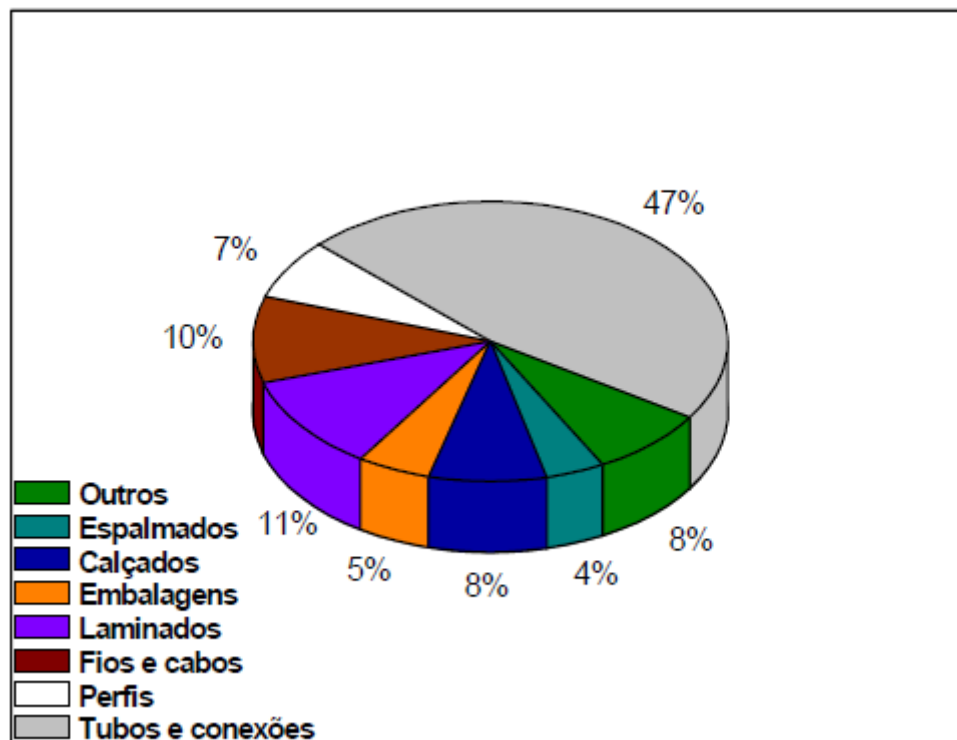


Figura 4 - Principais aplicações do PVC no Brasil
Fonte: Instituto do PVC

3.6 Absorção Sonora

As características de reflexão e absorção se medem pelo grau de absorção sonora no espaço. Todos os elementos de uma sala têm propriedades de absorção do som que afetam a sua qualidade acústica.

A absorção sonora é medida calculando-se o tempo de reverberação dentro das faixas de frequências de 100 a 5000 Hz, conforme a norma ISO 354. O ensaio compara os resultados entre duas situações da câmara reverberante, sendo uma vazia e outra com o produto em teste. A absorção sonora de uma sala é definida segundo a reverberação que ela produz. A inteligibilidade da fala depende do tempo de reverberação da sala.

O NRC (Coeficiente de Redução de Ruído) é um único valor baseado na média aritmética de quatro coeficientes de absorção sonora a 250, 500, 1.000 e 2.000 Hz, com aproximação de 0,05 (ASTM C 423-90 A).

Vale salientar que Isolamento Acústico é a capacidade de certos materiais formarem uma barreira, impedindo que a onda sonora ultrapasse de um recinto a outro. Já o Tratamento Acústico minimiza a reflexão das ondas sonoras num mesmo ambiente, diminuindo o nível de reverberação.

O coeficiente de absorção sonora (α) é a relação entre a quantidade de energia sonora que é absorvida pelo material e aquela que sobre ele incide (varia entre 0 e 1).

$$\alpha = I_a / I_i$$

onde I_a corresponde à intensidade sonora absorvida (W/m^2), e I_i à intensidade sonora incidente (W/m^2).

A absorção sonora total em uma sala pode ser expressa por:

$$A = S_1\alpha_1 + S_2\alpha_2 + \dots + S_n\alpha_n = \sum S_i\alpha_i$$

Onde A = absorção na sala (m^2)

S_n = área de superfície interna de determinado material "n" (m^2)

α_n = coeficiente de absorção de determinado material "n"

Materiais com $\alpha = 0,10$ absorvem 10% da energia que incide sobre ele. Materiais muito reflexivos (como o mármore) tem α quase nulo, da ordem de 0,01. Para ser considerado absorvedor, o material deve ter α superior a 0,5. Vale salientar que o valor de α para um dado material varia com a frequência de som incidente.

Existem três categorias que se dividem os materiais e sistemas absorvedores sonoros: os porosos e fibrosos (mais eficazes nas altas frequências), os ressoadores (mais eficazes nas médias frequências) e as membranas (mais eficazes nas baixas frequências).

No caso dos materiais fibrosos e porosos, o mecanismo baseia-se na existência de caminhos abertos. Fibras soltas e afastadas observa-se pouca energia perdida em calor, já as fibras concentradas não haverá penetração no material e o movimento do ar não gerará fricção suficiente para ser eficaz. Entre estes dois extremos, tem-se os bons materiais absorvedores sonoros. Sua eficácia depende essencialmente da densidade e da espessura.

Tem-se os tipos de materiais fibrosos e porosos:

Tecidos e cortinas – depende do peso específico, do franzido com que cobrem a superfície e da distância à parede.

Massas porosas (granulados minerais jateados) – massa específica de 150 (+/- 15) kg/m^3 e têm um excelente comportamento acústico.

Fibras minerais - lã de rocha, de vidro, etc. Varia em função do efeito da sua espessura, densidade e largura. A densidade indicadas entre 40 a 100 kg/m^3 .

Materiais plásticos - Poliuretano expandido, poliestireno expandido ou espumas flexíveis de poliuretano.

Aglomerados de cortiça - Aglomerado composto (espessura de 3 a 6 mm) ou aglomerado negro (espessura de 20 a 40 mm).

Aglomerados de fibras de madeira e de coco – ainda pouco estudo.

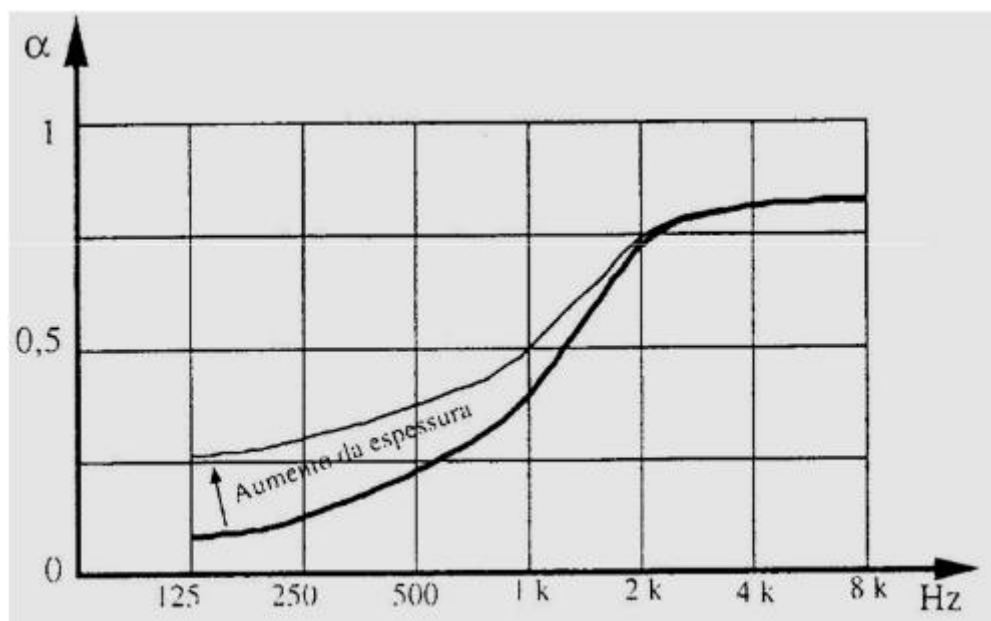


Figura 5 - Coeficiente de absorção de materiais porosos ou fibrosos
Fonte : UFSC

CAPÍTULO 4

4.1 Materiais e Métodos

Antes de ser obtido o tubo rígido de PVC reciclado, o resíduo de PVC oriundo de cooperativas de reciclagem foi reprocessado por reciclagem mecânica, seguindo as etapas de lavagem, secagem e moagem, figura 6a, sendo este último dividido em três níveis até a obtenção do resíduo micronizado, originando a matéria-prima, que posteriormente sofreu a incorporação de aditivos no misturador (figura 6b), formando o composto. Uma vez preparado o composto, o mesmo foi inserido na extrusora LGMT 75Mm monorosca, com temperatura de processamento por extrusão variando de 135 a 170°C, que na forma fundida alimentou a matriz, onde foi realizada a conformação do material na forma de produto final, conforme figura 6c.

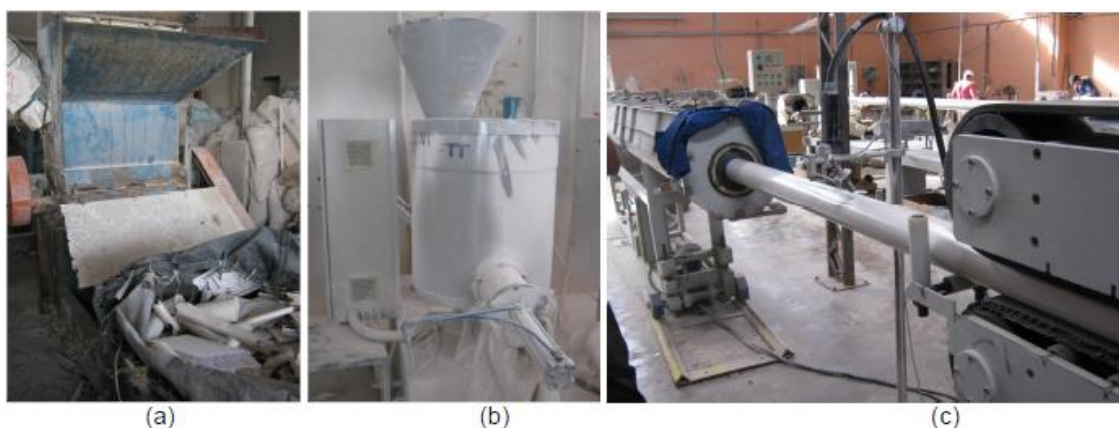


Figura 6 - Reciclagem mecânica. (a) Fardos com resíduos de PVC separados 1ª moagem - moinho de facas; (b) misturador: incorporação de aditivos ao PVC micronizado e (c) produto final: Tubos rígidos de PVC reciclado. Fonte: Autor

Caracterização do material

Difração de Raios-x (DRX)

Uma amostra de PVC reciclado (PVCR) na forma de pó foi submetida à difração de Raios-X. Esta técnica utiliza o espalhamento coerente da radiação X, por estruturas organizadas, permitindo assim realizar estudos morfológicos dos materiais.

A difração foi feita no equipamento Panalytical X'Pert Pro MPD equipado com um tubo de Cobalto no intervalo de 10° a 100°, no Laboratório de Raios-X – LRX do Departamento de Física da Universidade Federal do Ceará e a identificação das fases foram feitas utilizando-se o programa PANalytical X'Pert HighScore Plus e do Software DBWSTool versão 2.3 .

Análise Termogravimétrica

As curvas Termogravimétricas da amostra de PVC reciclado (PVCR) foi obtida em um equipamento da marca Mettler Toledo TGA/SDTA 851^e, conduzidas sob atmosfera de N₂ e ar atmosférico (fluxo de 50 cm³/min), com taxa de aquecimento de 10 °C/min, em uma faixa de temperatura entre (25 – 800 °C). Utilizou-se cadinho de Pt, com aproximadamente 6 a 8 mg de amostra à 60 mesh.

Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier – FTIR

Os espectros na região do infravermelho foram obtidos em um equipamento da marca Perkin, modelo Ezimer 200, na região de 400- 4000 cm⁻¹. A amostra de PVC reciclável foi misturada e prensada em pastilhas de KBr.

Ensaio Mecânicos

Foram produzidos pelos métodos de corte e usinagem, cinco corpos de prova na forma de “halteres” retirados diretamente de tubos rígidos de PVC reciclado, com base na norma ASTM D638 - Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics.

O ensaio de tração foi realizado de maneira totalmente computadorizada, utilizando-se a máquina de ensaio modelo EMIC, com velocidade de deslocamento de 2 mm/min, célula de carga com capacidade máxima de até 100 kN.

Produção do compósito

As fibras vegetais foram provenientes de doação da Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) triturada, conforme figura 7.



Figura 7 - Fibra de coco como recebida
Fonte: autor

Para a mistura, foi utilizada a sanduicheira industrial exibida nas figuras 8, 9 e 10 onde a temperatura ajustada foi de 170°C, por uma hora e com uma pressão de 50kgf, proveniente das cargas adicionadas (figura 10). Foram confeccionadas duas placas, de 10mm de espessura, que é o limite devido ao molde utilizado, sendo que a primeira com 0,32% de fibra em massa e a segunda 0,53% de fibra em massa.



Figura 8 - Sanduicheira industrial com a fibra vegetal distribuída.
Fonte : autor



Figura 9 - Mistura antes do aquecimento
Fonte: autor



Figura 10 - Cargas sobre a mistura durante o processo
Fonte: autor

Medição do coeficiente de absorção do material

Para o ensaio foi utilizado a máquina MC3522 do fabricante BSWA Tech, com o tubo de impedância SW260 e o software foi VA-Lab IMP, do mesmo fabricante. Com tal equipamento, a faixa de frequência englobada é de 125~6300Hz e os diâmetros utilizados são de 30 e 60mm.

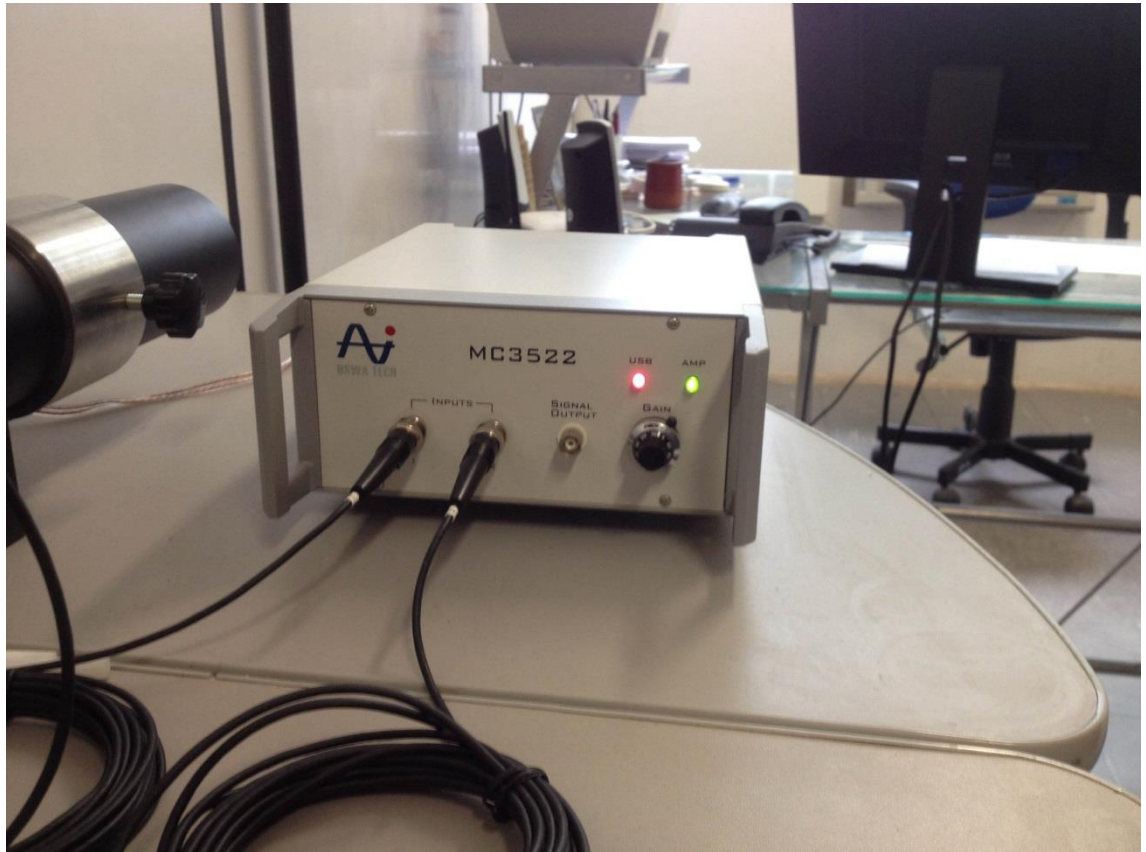


Figura 11 - Equipamento utilizado para medição do coeficiente de absorção do material
Fonte: autor

A norma utilizada foi a ISSO 10534-2, onde orienta que são utilizados dois microfones fixos para obter a pressão que é produzida por uma fonte de som perto da amostra, conforme figura 12.

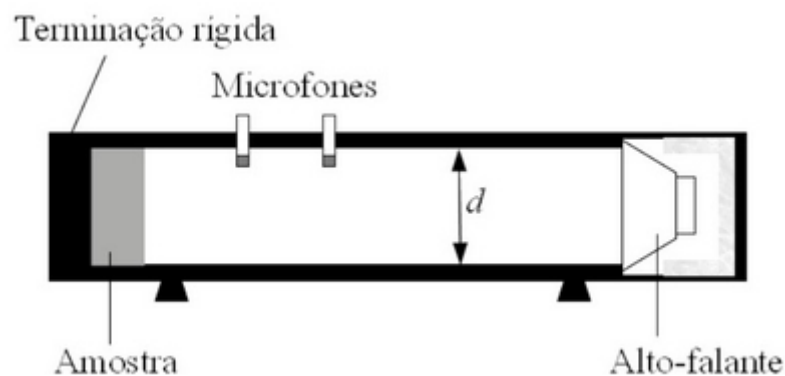


Figura 12 - Esquema do tubo de impedância usado no ensaio de absorção sonora segundo a norma ISO 10354-2
Fonte: UFSM

Para calibração do microfone, é necessário dispositivo auxiliar, que emite onda sonora de 114 dB de intensidade.

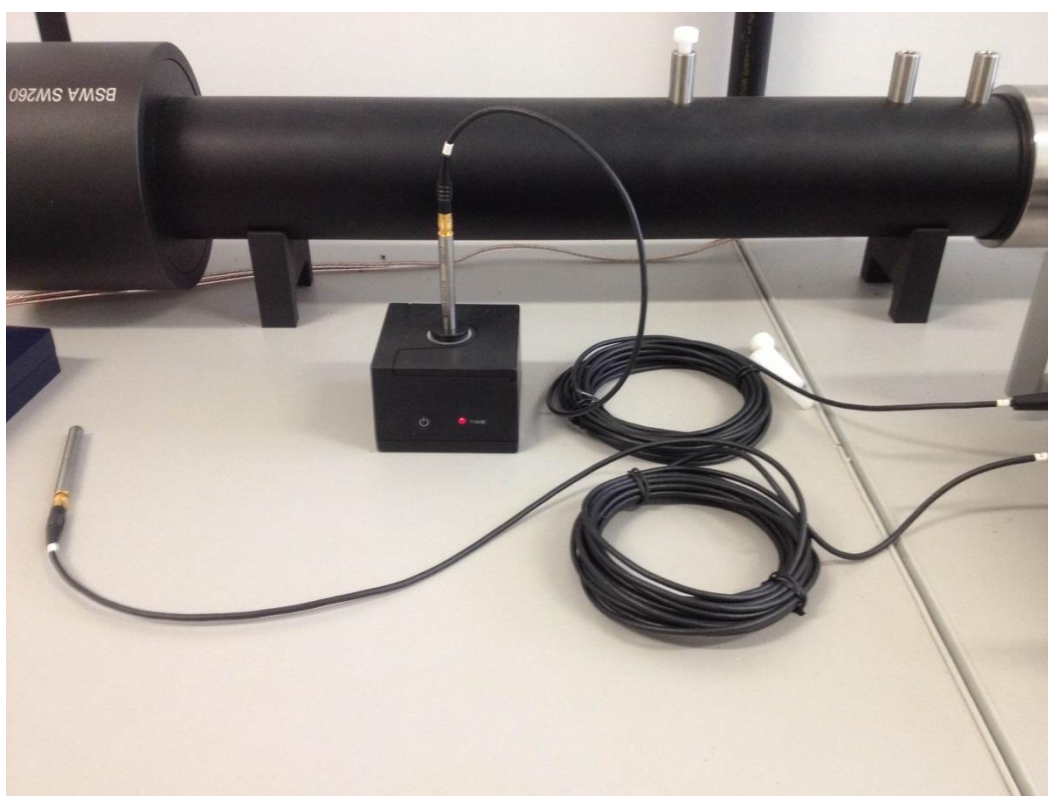


Figura 13 - Dispositivo para calibração dos microfones
Fonte: autor

Para cada material, foram ensaiados os modos:

- Tubo largo com espaço amplo (com *range* de frequência: 125~800Hz);
- Tubo largo (com *range* de frequência: 400~2500Hz); e
- Tubo pequeno (com *range* de frequência: 800~6300Hz).

CAPÍTULO 5

5.1 Resultados e Discussão

Caracterização do PVCR

Na figura 14 é apresentado o difratograma referente à amostra do PVC reciclado, com os perfis observados e calculados resolvidos pelo método de Rietveld(14).

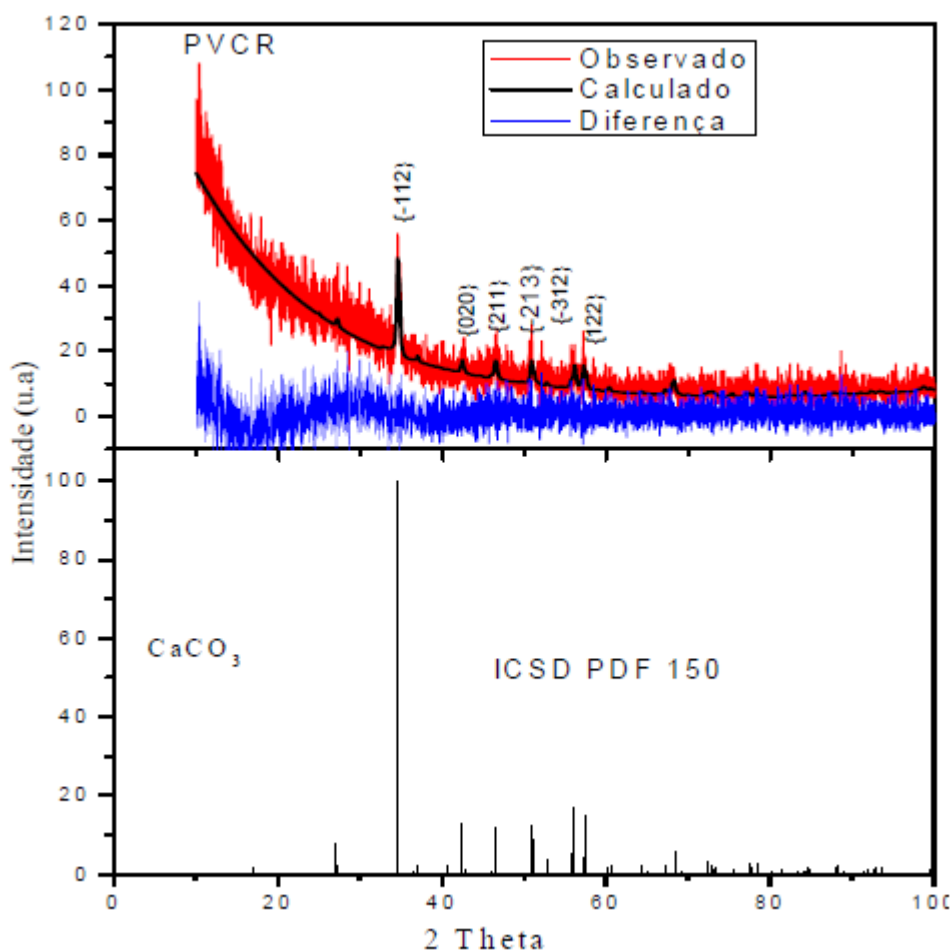


Figura 14 - Difratograma de raios-X da amostra de PVCR
Fonte: autor

Difratograma de raios-X da amostra de PVCR

Através dos resultados de DRX foi possível identificar a principal fase cristalina presente na matriz polimérica, cujo padrão de difração coincide com os valores da literatura⁽¹⁵⁾. As posições em 2θ e as intensidades relativas dos picos se sobrepõem ao padrão (ICSD PDF 150)(16) conforme observado no difratograma. O difratograma do carbonato de cálcio (CaCO₃) exibiu um padrão típico do sistema monoclinico, grupo espacial $P 1 21/c$, com os principais picos bem definidos em ângulos de 2θ de 34,6°, 42,4°, 46,4°, 50,3°, 56,7° e 57,4°, confirmando assim, a presença desta substância na amostra.

O carbonato de cálcio (CaCO_3) é utilizado em tubos de PVC como carga de reforço com o objetivo de reduzir o custo do material, além disso, proporciona um bom acabamento superficial, alto brilho, aumento da resistência mecânica e às intempéries, melhorando assim a estabilidade dimensional a elevadas temperaturas⁽¹⁷⁾.

A análise de infravermelho do PVC reciclado apresentou bandas, cujas posições e suas atribuições correspondentes dos grupos funcionais estão de acordo com os valores encontrado na literatura^(18, 19). As bandas no espectro, uma em 695 cm^{-1} e outra em 625 cm^{-1} , referente à deformação axial da ligação C-Cl, em 1250 cm^{-1} , referente à deformação angular simétrica fora do plano de $\text{CH}_2\text{-Cl}$. Foi observado ainda uma banda em aproximadamente 2900 cm^{-1} , referente à deformação axial de C-H, foi observado ainda os espectros absorvidos na banda 1418 cm^{-1} característicos de carbonato de cálcio (CANEVAROLO, 2004), conforme a Figura 15.

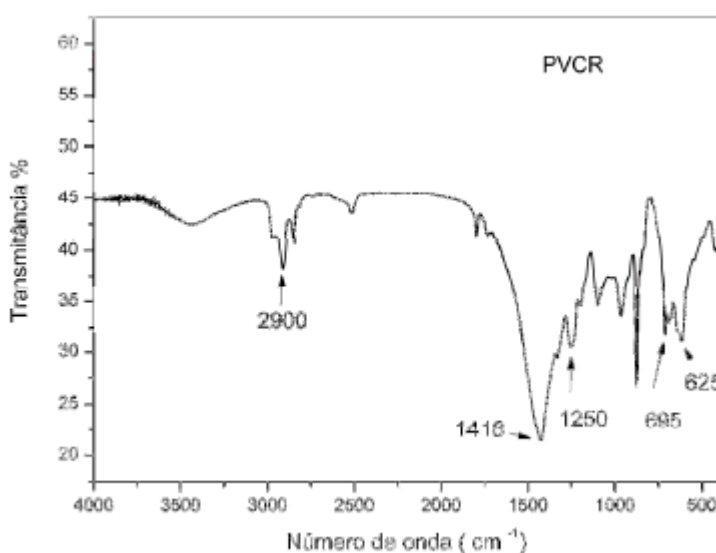


Figura 15 - Espectro de infravermelho (FTIR) do PVC reciclado
Fonte: autor

As análises térmicas constituem-se uma importante técnica na caracterização de materiais poliméricos, pois a estabilidade térmica observada nesses materiais são propriedades físicas imprescindíveis para possíveis aplicações tecnológicas.

Na figura 16 é apresentada a curva de TG do PVC reciclado e os principais estágios de degradação.

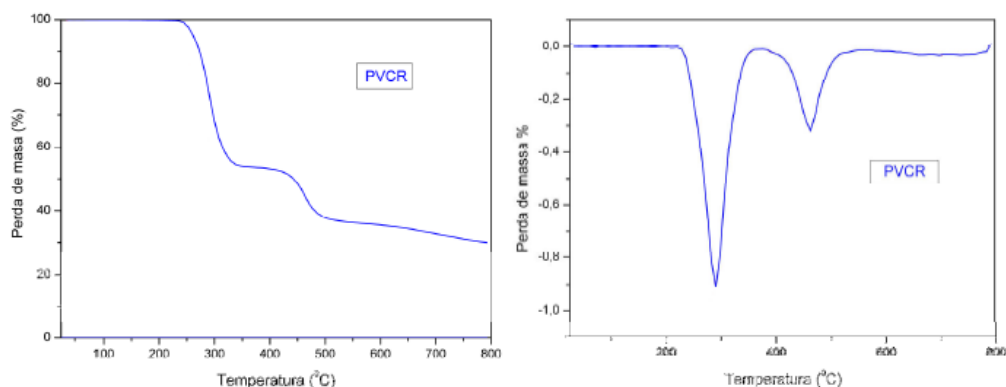


Figura 16 - Curva de degradação térmica do PVCR
Fonte: autor

O perfil da curva de decomposição da amostra de PVC Reciclado apresenta os principais eventos de degradação e suas respectivas perdas de massa. Os resultados apresentados para o PVC Reciclado mostram apenas dois eventos principais de degradação, em 265-312°C ocorre o primeiro estágio, referente ao desprendimento de HCl, seguido do último evento em 445-482°C, referente a degradação parcial do restante do polímero, resultados coerentes com os valores da literatura.

As propriedades mecânicas obtidas nos ensaios de tração são apresentadas na tabela 2. Onde o programa Mtest, software conectado a máquina de ensaio, forneceu os valores de força versus alongamento executada durante o ensaio, sendo esses dados usados para obter os valores das tensões máxima ($\sigma_{\max}$), de escoamento (σ_{esc}) e de ruptura (σ_{rup}), além da deformação na tensão de ruptura e o módulo de elasticidade (E).

Material	Tensão Máxima $\sigma_{\max}$ (MPa)	Tensão de Escoamento σ_{esc} (MPa)	Tensão de Ruptura σ_{rup} (MPa)	Deformação na σ_{rup} (mm)	Módulo de Elasticidade E (MPa)
PVCR	28,7	28,7	10,3	21,7	2283,2
	28,0	28,0	20,2	25,0	2456,3
	26,7	26,7	5,8	19,7	2223,4
	26,5	26,5	14,2	18,6	2199,0
	Média	27,5	12,6	21,3	2290,5
	Desvio	1,1	6,1	2,8	116,1

Tabela 1 – Propriedades Mecânicas obtidas no ensaio de tração

As curvas força versus alongamento obtidas do registro da máquina foram transformadas em curvas tensão de engenharia versus alongamento de engenharia, figura 17, tornando os resultados do ensaio independentes das dimensões do corpo de prova.

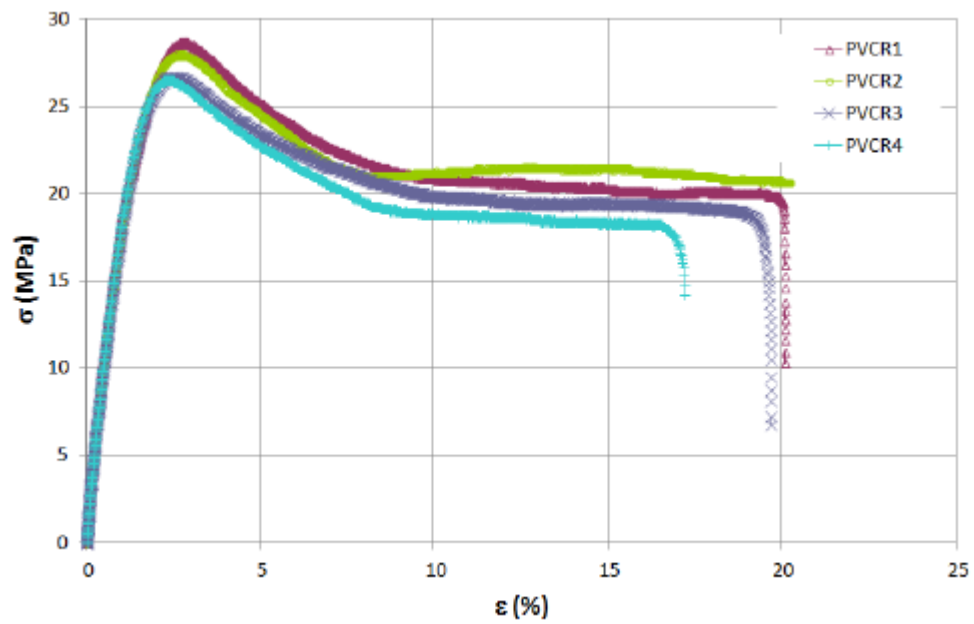


Figura 17 - Gráfico tensão x deformação para corpos de prova de PVCR
Fonte: autor

Absorção acústica

Para a placa 1 (0,32% em peso de fibra) tem-se o resultado combinado de absorção:

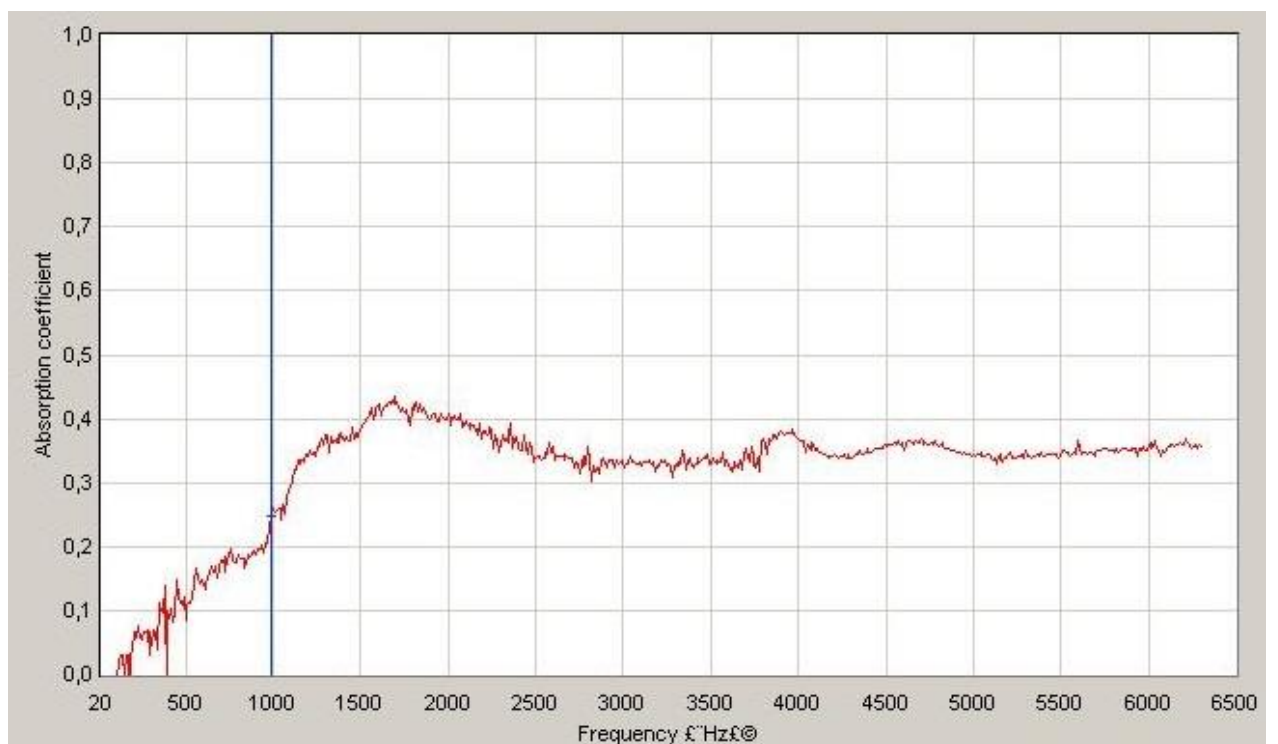


Figura 18 - Gráfico Frequência x Absorção sonora para placa 1
Fonte: autor

Interpretando o gráfico anterior, pode-se notar uma variação sutil no nível de absorção sonora, com um pico da ordem de 0,44 na frequência de 1700Hz.

Para a placa 2 (0,53% em peso de fibra) tem-se o resultado combinado de absorção:

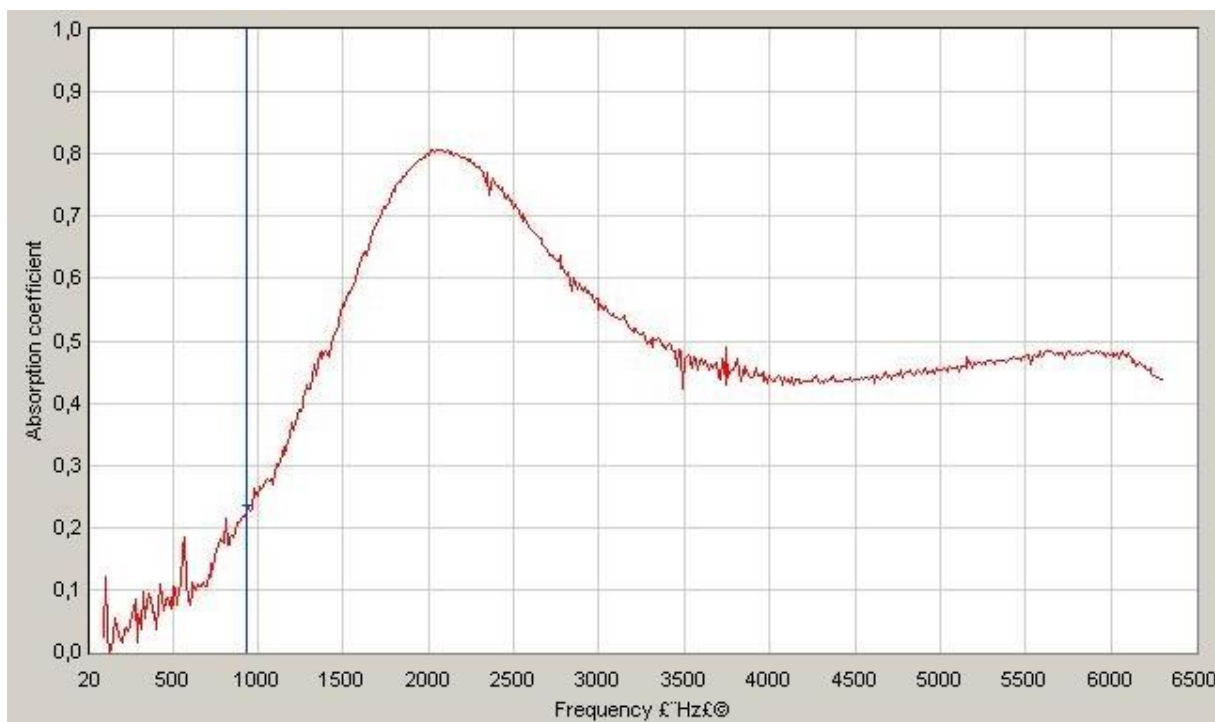


Figura 19 - Gráfico Frequência x Absorção sonora para placa 2
Fonte: autor

Para a segunda placa, pode-se notar pelo gráfico um pico de 0,81 nas frequências próximas de 2000Hz.

Para efeito de referência, a voz humana varia entre 50 e 3400Hz, ou seja, na faixa de 2000Hz, corresponde a uma voz média, nem tão grave, nem tão agudo.

CAPÍTULO 6

6.1 Conclusões

Com base nos resultados apresentados, pode-se extrair que a placa com mais fibra absorveu mais sons, principalmente na frequência próxima de 2000Hz, diferente da outra placa. Pode-se notar que, para uma mudança pequena na composição, reflete consideravelmente em suas propriedades acústicas.

Caso o material fosse utilizado numa sala, iria minimizar a intensidade sonora que “sairia”, caso um adulto estivesse conversando, por exemplo.

CAPÍTULO 7

7.1 – Sugestões para trabalhos futuros

- Aumentar a o número de composições diferentes, traçando, assim, um perfil de propriedades *versus* composição da fibra;
- Fabricar a placa com estabilizante térmico e plastificante para ensaio de tração;
- Estudar influência da orientação das fibras na placa.

CAPÍTULO 8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. NUNES, L. R.; RODOLFO, A. Jr.; ORMANJI, W., Tecnologia do PVC. São Paulo: ProEditores / Braskem, 2002.
2. NASS, L. I.; HEIBERGER, C. A. Encyclopedia of PVC. V. 1, p. 271, New York: Marcel Dekker, 1976.
3. BRAUN, D. Recycling of PVC. Prog Polym Sci, 27, p. 2171–2195, 2002.
4. XIONG, L. PVC: an enemy of public health and environment Disponível em: <http://www.msu.edu/~xiongli/project/PKG875/PKG875.pdf> (acessado em março. 2012).
5. PENNAFORT JR., L. C. G.; DA SILVA, F. R.; DE DEUS, E. P. Avaliação e caracterização de tubos fabricados com PVC Reciclado. Polímeros: Ciência e Tecnologia, aceito em setembro de 2012.
6. DA CRUZ, A. L. M. A reciclagem dos resíduos sólidos urbanos: um estudo de caso. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção – Universidade Federal de Santa Catarina, 57p, 2003.
7. GUNTHER, W. R., Resíduo Sólido Urbano, in: Tecnologia de Reciclagem do Plástico, apostila do curso de Reciclagem de Plásticos, promovido pelo ATUALTEC/CECAE-USP, São Paulo, 1996.
8. SOMBATSOMPOP, N. & THONGSANG, S. Rheology, morphology, and mechanical and thermal properties of recycled PVC pipes. Journal of Applied Polymer Science, John Wiley & Sons, Inc. vol. 82, p. 2478-2486, 2001.
9. VILAPLANA, F. & KARLSSON, S. Quality concepts for the improve use of recycled polymeric materials: a review. Macromolecular Materials and Engineering, Wiley-VCH vol. 293, p.274-297, 2008.
10. Wambua, P.; Ivens, J.; Verpoest, I. - Composites Science and Technology, 63, p.1259 (2003).
11. Pothan, L. A.; Thomas, S. - Composites Science and Technology, 63, p.1231 (2003).
12. WHITE, D.M. Journal of American Chemical Society, v. 82 (21), p. 5678-5685, 1960.
13. RABELLO, M. S. Aditivação de Polímeros. São Paulo: Artliber Editora, 2000.
14. LAKSHMI, S.; JAYAKRISHNAN, A. Photocross-linking of Dithiocarbamate-Substituted PVC Reduces Plasticizer Migration. Polymer, v. 39, p. 151-157, 1998.
15. FERRUTI, P. et al. Polycaprolactone-POLY(ETHYLENE GLYCOL) Multiblock Copolymers as Potential Substitutes for Di(ethylhexyl) Phthalate in Flexible Poly(vinyl chloride) Formulations. Biomacromolecules, v. 4, p. 181-188, 2003.
16. CANEVAROLO JR., S. V. Técnicas de caracterização de polímeros. Artliber editora, São Paulo-SP 2004.