INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia Associada à Universidade de São Paulo

**VIABILIZAÇÃO DO REAPROVEITAMENTO DOS “BLISTER” DE PVC/AI E
ESTUDOS DAS PROPRIEDADES DO PVC APÓS PROCESSAMENTO POR
RADIAÇÃO IONIZANTE**

ALEX TERELA PINHEIRO DE CASTRO

Dissertação apresentada como parte dos requisitos
para obtenção do Grau de Mestre em Ciências na Área
de Tecnologia Nuclear – Aplicações.

Orientador:

Prof. Dr. Leonardo Gondim de Andrade e Silva

São Paulo

2008

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto de Pesquisa Energéticas e Nucleares (IPEN/CNEN) pelo acolhimento e oportunidade para realização de minha dissertação.

Ao ilustríssimo orientador, Dr. Leonardo Gondim de Andrade e Silva pela insistência, apoio e dedicação neste longo caminho.

Ao Dr. Edvaldo Luis Rossini, por me encaminhar, apoiar e transmitir ensinamentos desde o início das minhas atividades na instituição.

Ao Dr. Helio Wiebeck, pelos ensinamentos transmitidos.

A todos colaboradores do IPEN que muito bem me acolheram e respeitaram.

A todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

VIABILIZAÇÃO DO REAPROVEITAMENTO DOS “BLISTER” DE PVC/Al E ESTUDOS DAS PROPRIEDADES DO PVC APÓS PROCESSAMENTO POR RADIAÇÃO IONIZANTE

Alex Terela Pinheiro de Castro

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi o de separar através de um processo de dissolução, o PVC e o alumínio, que são componentes das embalagens tipo “blister”, comumente encontradas como embalagens de remédios. Foi estudado, também o efeito da radiação ionizante sobre o PVC e por ultimo a reciclagem mecânica do PVC separado por um processo de extrusão. O material utilizado neste trabalho foi oriundo de sobras da industria farmacêutica, sendo este em forma de embalagens com defeito ou rebarbas de produção. Após a moagem do material, realizada para facilitar o manuseio e a homogeneização do sistema, foram escolhidas duas bases para realizar a dissolução do alumínio: hidróxido de sódio e hidróxido de potássio. Foi utilizado um sistema com duas concentrações (1 e 2M), as duas bases, e se o sistema teria ou não agitação. Este método limitou em oito os experimentos. Após a dissolução, amostras do material foram submetidas a radiação ionizante, realizada com doses de 50, 100, 150 e 200kGy no acelerador de elétrons modelo Dynamitron II do CTR-IPEN/CNEN-SP. Estas amostras foram submetidas a seguir, a um ensaio de resistência à tração para a análise das modificações causadas pela irradiação. A última etapa do trabalho foi a reciclagem mecânica do PVC já separado do alumínio. A reciclagem foi realizada em equipamento industrial, uma extrusora de tubos de PVC. O material foi aditivado em um misturador intensivo com lubrificantes, estabilizantes térmicos carga e pigmento, e em seguida processado na forma de eletrodutos de PVC rígido. Após os oito experimentos, o sistema com a base hidróxido de potássio concentração 2M e agitação, foi o que apresentou a melhor relação entre tempo de dissolução e característica do material resultante, não ocorrendo degradação no PVC. Nas amostras irradiadas, a coloração do material foi modificada assim como o seu alongamento que foi maior quanto maior a dose de irradiação recebidas, indicando a cisão das cadeias de PVC. A extrusão do PVC foi

realizada com sucesso, conseguindo-se transformar aproximadamente 200kg de PVC, devidamente aditivado, demonstrando assim a viabilidade de todo o trabalho.

THE VIABILITY OF PVC/Al BLISTER REUSE AND PVC PROPERTY STUDIES AFTER IONIZING RADIATION PROCESSING

Alex Terela Pinheiro de Castro

ABSTRACT

The objective of this research was to separate, by means of a process of dissolution, the PVC and the aluminum that compose blister packs, generally used for pharmaceutical pills. We also studied the effect of the ionizing radiation on the PVC, and, finally, the mechanical recycling of the separated PVC, by a process of extrusion. The material we used in this work is the surplus of the pharmaceutical industry, i.e., packs with defects or burrs. We ground the material to facilitate the handling and the homogenization of the system. After that, we chose two bases for the dissolution of the aluminum: the sodium hydroxide and the potassium hydroxide. We used a system with two concentrations (1 and 2M) for each base, and for every solution we had also an agitated and a non-agitated process. From this method resulted eight experiments. After the dissolution, the samples of the material were submitted to ionizing radiation with doses of 50, 100, 150 and 200 kGy in the Dynamitron II electron accelerator of the CTR-IPEN/CNEN-SP. In the following, these samples were submitted to traction resistance tests to analyze which modifications the irradiation caused. The last step of the research was the recycling of the PVC separated from the Aluminum. We made the recycling in industrial equipment, a PVC tube extruder. The material was combined with lubricants, heat stabilizers and pigment in an intensive mixer and processed into the form of rigid PVC electrical conduits. After the eight experiments, the system with potassium hydroxide base, concentration of 2M and agitation presented the best relation between time of dissolution and characteristics of the resulting material, without degradation of the PVC. In the irradiated samples, the color of the material changed as well as its extension that was as larger as the dose of irradiation they received, indicating the dissociation of the PVC molecules. The extrusion of the PVC was successfully realized: about 200 kg (440 pounds) of properly combined were processed. This shows the viability of the whole research.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	15
3	REVISÃO DA LITERATURA	16
3.1	Polímeros	16
3.2	Poli Cloreto de vinila (PVC)	18
3.2.1	Características e propriedades	18
3.3	Compostos de PVC	21
3.4	Transformação de materiais plásticos	23
3.4.1	Extrusão e laminação	23
3.4.2	Termoformagem	25
3.5	Alumínio	26
3.5.1	Redução e processos	29
3.5.1.1	Trabalho a quente e a frio	31
3.5.1.2	Laminação do alumínio	32
3.6	“Blister”	35
3.6.1	Utilização europeia x norte americana	35
3.6.2	Componentes do “blister”	36
3.6.2.1	Filme moldável	37
3.6.2.1.1	Poli (cloreto de vinila) - PVC	37
3.6.2.1.2	Poli (cloreto de vinilideno) - PVDC	37
3.6.2.1.3	Polipropileno - PP	37
3.6.2.2	Selador	38
3.6.2.2.1	Alumínio	38
3.6.2.2.2	Papel/alumínio	38
3.6.2.3	Selagem	38
3.6.2.4	Impressão	39
3.6.2.5	Máquinas	39
3.7	Reciclagem de plásticos	40
3.7.1	Reciclagem mecânica	40
3.7.2	Reciclagem energética	40
3.7.3	Reciclagem química	40

3.8	Corrosão	40
3.9	Interação da radiação ionizante com a matéria	42
3.10	Interação da radiação ionizante em polímeros	42
3.10.1	Cisão	43
3.10.2	Reticulação	44
3.10.3	Aceleradores de elétrons	45
3.10.3.1	Princípio de funcionamento	46
4	MATERIAIS E MÉTODOS	48
4.1	Matéria-prima	48
4.2	Moagem	48
4.3	Solução alcalina para dissolução	50
4.4	Ensaio	51
4.5	Irradiação	52
4.6	Resistência à tração	52
4.7	Extrusão de tubos de PVC rígido	53
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
5.1	Dissolução	57
5.2	Irradiação	66
5.3	Resistência à tração	67
5.4	Extrusão de tubos de PVC rígido	74
6	CONCLUSÃO	76
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	77
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Distribuição dos experimentos	51
TABELA 2 - Formulação para fabricação de PVC rígido	54
TABELA 3 - Classificação das experiências por tempo	64
TABELA 4 - Dados obtidos no ensaio de resistência à tração de filme de PVC não irradiado sem tratamento	68
TABELA 5 - Dados obtidos no ensaio de resistência à tração de filme de PVC tratado com KOH 2M e não irradiado	69
TABELA 6 - Dados obtidos no ensaio de resistência à tração de filme de PVC tratado com KOH 2M e irradiado com 50kGy	70
TABELA 7 - Dados obtidos no ensaio de resistência à tração de filme de PVC tratado com KOH 2M e irradiado com 100kGy	71
TABELA 8 - Dados obtidos no ensaio de resistência à tração de filme de PVC tratado com KOH 2M e irradiado com 150kGy	72
TABELA 9 - Dados obtidos no ensaio de resistência à tração de filme de PVC tratado com KOH 2M e irradiado com 200kGy	73

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1a – Exemplo de estrutura de polímero tipo aleatório	17
FIGURA 1b – Exemplo de estrutura de polímero tipo alternado	17
FIGURA 1c – Exemplo de estrutura de polímero tipo em bloco	17
FIGURA 1d – Exemplo de estrutura de polímero tipo enxertado	18
FIGURA 2 – Estrutura básica da molécula de eteno	19
FIGURA 3 – Estrutura básica da molécula de cloreto de sódio	19
FIGURA 4 – Esquema de polimerização do PVC	19
FIGURA 5 – Estrutura molecular do poli(cloreto de vinila)	20
FIGURA 6 – Turbomisturador de PVC	22
FIGURA 7 – Parafuso ou rosca de plastificação de uma extrusora	24
FIGURA 8 – Ilustração do fluxo de material de uma extrusora	24
FIGURA 9 – <i>Flat die</i> e calandra para laminados rígidos	25
FIGURA 10 – Esquema de cilindros para resfriamento de um sistema de laminação	25
FIGURA 11 – Esquema de processo de termomoldagem	26
FIGURA 12 – Esquema do lago de resíduos para obtenção de alumina	28
FIGURA 13 – Fluxograma de produção de alumínio	30
FIGURA 14 – Encruamento e recristalização do alumínio	31
FIGURA 15 – Laminação de alumínio	32
FIGURA 16 – Chapas de Al laminadas	32
FIGURA 17 – Exemplo de embalagens tipo “blister”	39
FIGURA 18 – Esquema do processo de corrosão	41
FIGURA 19 – Processo de formação de ligações cruzadas em polímeros: reticulação	44
FIGURA 20 – (a) Ilustrações de esteiras utilizadas para transporte de material e (b) de um alimentador automático sendo utilizado para fios elétricos, visando a passagem sob um sistema de feixe de elétrons	45
FIGURA 21 – Esquema comparativo de funcionamento de um acelerador de elétrons	46
FIGURA 22 – Material recolhido como sobra da produção	49

FIGURA 23 – Moinho marca SEIBT usado na experiência	49
FIGURA 24 - Amostras cortadas em filetes prontas para testes de resistência à tração	53
FIGURA 25 – Linha de extrusão de tubos de PVC rígido	55
FIGURA 26 – Curva de temperatura x zona de aquecimento para extrusão de PVC rígido	55
FIGURA 27 – Início da reação	57
FIGURA 28 – Solução após a total dissolução do alumínio	57
FIGURA 29 – Curva de temperatura x tempo da experiência I	58
FIGURA 30 – Peneira malha 14 com PVC	58
FIGURA 31 – Curva de temperatura x tempo da experiência II	59
FIGURA 32 – Curva de temperatura x tempo da experiência III	60
FIGURA 33 – Reação NaOH 2M sem agitação com formação de gases	60
FIGURA 34 – Curva de temperatura x tempo da experiência IV	61
FIGURA 35 – Curva de temperatura x tempo da experiência V	61
FIGURA 36 – Curva de temperatura x tempo da experiência VI	62
FIGURA 37 – Curva de temperatura x tempo da experiência VII	62
FIGURA 38 – Curva de temperatura x tempo da experiência VIII	63
FIGURA 39 – Solução em equilíbrio com precipitação de hidróxido de alumínio	65
FIGURA 40 – “Blister” moído irradiado com dose de 200kGy	66
FIGURA 41 – “Blister” moído não irradiado	66
FIGURA 42 – Curva de temperatura x tempo do processo de dissolução do “blister” moído tratado com KOH e irradiado	67
FIGURA 43 – Curva de tensão de ruptura x deformação de filme de PVC não irradiado sem tratamento	68
FIGURA 44 – Curva de tensão de ruptura x deformação de filme de PVC tratado com KOH 2M e não irradiado	69
FIGURA 45 – Curva de tensão de ruptura x deformação de filme de PVC tratado com KOH 2M e irradiado com 50kGy	70
FIGURA 46 – Curva de tensão de ruptura x deformação de filme de PVC tratado com KOH 2M e irradiado com 100kGy	71

FIGURA 47 – Curva de tensão de ruptura x deformação de filme de PVC tratado com KOH 2M e irradiado com 150kGy	72
FIGURA 48 – Curva de tensão de ruptura x deformação de filme de PVC tratado com KOH 2M e irradiado com 200kGy	73
FIGURA 49 – Comparativo entre amostras de PVC não irradiada e irradiadas a diferentes doses antes e após o ensaio de tração	74

1 INTRODUÇÃO

Cerca de 30% do resíduo sólido urbano é composto por embalagens descartadas, constituindo-se na porção mais visível do lixo municipal. O lixo se acumula onde é abandonado, pois os processos existentes (reutilização, reciclagem, incineração e degradação natural ou degradação forçada) não são suficientes para tratar todo material a disposição. No Brasil, 76% do lixo gerado é disposto a céu-aberto, sem qualquer controle dos efluentes e das condições em que o processo de degradação natural do material ocorre. Esta situação não é muito diferente de outros países da América Latina e demais países em desenvolvimento no mundo.(1)

Menos de 5% das empresas que projetam suas embalagens no Brasil estabelecem a preservação da natureza como premissa inevitável. Entretanto, as empresas brasileiras que exportam seus produtos, já estão se deparando com a questão ambiental, pois certos países da Europa, com legislação mais rígida em relação à brasileira, exigem algum tipo de certificado de que os produtos, e por extensão que as suas embalagens não agredam o meio ambiente. No Brasil, há uma tendência de adoção de leis mais rigorosas, além das já existentes e extremamente permissivas quanto ao aspecto ambiental da embalagem.(2)

A redução de material é uma consequência econômica. A redução da espessura da parede da embalagem ou de sua massa, com a manutenção ou melhoria das características de desempenho nos ambientes de distribuição social ou distribuição física é uma preocupação constante da indústria. Quanto mais leve for a embalagem, mais barata ela tenderá a ser isoladamente, dependendo do custo da tecnologia empregada. Para as embalagens tornarem-se mais leves, muitas vezes, utilizam-se materiais combinados. Pode-se reduzir até 96% do peso ou 97% do volume das embalagens nesta substituição de um único tipo de material por combinações multicamadas [3].

Aí surge o segundo grande problema ambiental, muito pouco preocupante para a indústria. Materiais combinados são mais difíceis de reciclar, quando dispostos no ambiente demoram mais para degradar e quando incinerados têm maior probabilidade de liberar gases tóxicos. Raramente tem-se um estudo completo das consequências da disposição destes materiais no ambiente, como é o caso das atuais embalagens usadas em medicamentos, o “blister”.

Perguntas como, quantas embalagens de remédio são consumidas atualmente e mais, o que é feito com estas embalagens, além de uma análise do tipo de material empregado na sua confecção motivaram a realização deste trabalho. No ramo de reciclagem, os profissionais deparam-se com uma dificuldade enorme de encontrar bons materiais disponíveis (matéria-prima) para venda, tanto na indústria como na coleta seletiva.

A indústria, devido a enorme concorrência e processos de otimização, reaproveita ao máximo o seu material em “não conformidade”, retornando-o ao processo. Não sobrando desta forma, material adequado à venda aos recicladores, mas sim a borra de processo e material contaminado, que exige um retrabalho maior. Na coleta seletiva, a sucata de PVC (poli cloreto de vinila) existe em quantidades muito inferiores ao de materiais como PE (polietileno) e PP (polipropileno) e mais recentemente o PET (poli (tereftalato de etileno)), em forma de garrafas, sendo que neste último, na maioria dos pontos de coleta, o PVC é considerado um material contaminante.(4)

O processo de separação não é feito da maneira correta, deixando grandes quantidades de contaminantes que inviabilizam um melhor aproveitamento.

A vivência no mercado de sucatas faz com que se consigam alguns materiais interessantes, mas o volume nunca é suficiente. Então surgiu a idéia de aproveitar um material que é jogado no lixo, que não tem nenhum valor comercial aparente, e que é constituído de materiais nobres como PVC “cristal” ou “âmbar” (devido a sua transparência ou cor) e alumínio. Esta mistura de materiais é conhecida no mercado como embalagens tipo “blister”.

A principal idéia é separar os materiais, o PVC e o alumínio, pelo processo de corrosão do alumínio. Em seguida, estudar as características dos produtos obtidos e a otimização do processo de separação.

Os resultados deste trabalho poderão trazer grandes benefícios ao meio ambiente, diminuindo o volume de embalagens jogadas em aterros, e ainda ajudar a aumentar a renda dos programas de coleta seletiva, pois se podem oferecer pequenas quantias para o trabalho de separação do “blister” do lixo coletado.

Outras fontes de matéria-prima para este projeto são as indústrias que fabricam embalagens farmacêuticas, além dos próprios laboratórios e/ou indústrias farmacêuticas. Estes dois segmentos, não utilizam nenhuma forma de reaproveitamento dos resíduos gerados, tanto na fabricação como no processo de

embalagem dos produtos. Estes resíduos são rebarbas de corte e acabamento (*“reffilings”*). O volume desta produção de resíduos é inteiramente descartado hoje em aterros sanitários, sendo responsável por mais uma fatia da estatística de desperdício de materiais nobres em nosso País.

Portanto, afinados à necessidade de preservação do meio ambiente, reaproveitamento de material de forma economicamente viável e, por fim, visualizando o retorno social possível como fonte de renda à comunidade carente e a empresários, deu-se seguimento a esta pesquisa.

2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivos:

- A determinação das melhores condições para a realização da separação dos materiais das embalagens tipo “blister”;
- O estudo dos efeitos da radiação ionizante sobre o PVC antes e depois de realizada a dissolução do alumínio;
- A reciclagem do PVC, separado do alumínio, por meio de um processo de extrusão, confeccionando eletrodutos de PVC rígido.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Polímeros

Os polímeros são materiais de origem natural, artificial (polímeros naturais modificados) ou sintética, de natureza orgânica ou inorgânica, constituídos por muitas macromoléculas, sendo que cada uma dessas macromoléculas possui uma estrutura interna em que há a repetição de pequenas unidades (meros)(5). A palavra polímero vem do grego, significando: poli – muitas e meros - partes, ou seja, unidades de repetição. Quanto à forma final de utilização, os polímeros podem ser divididos em plásticos, fibras poliméricas, borrachas (ou elastômeros), espumas, tintas e adesivos. O termo plástico é também derivado do grego, cujo significado é “moldável”. Os plásticos podem ser subdivididos em duas categorias, segundo seu comportamento tecnológico diante das condições de processamento:(4,5)

Termoplásticos: materiais plásticos que apresentam a capacidade de ser repetidamente amolecidos pelo aumento de temperatura e endurecidos pelo resfriamento. Essa alteração é, portanto, reversível. O PVC é considerado um termoplástico, uma vez que exibe essas características. (4,5)

Termofixos ou termorrígidos: materiais plásticos que, quando curados, com ou sem aquecimento, não podem ser reamolecidos por meio de um aquecimento posterior. O processo de cura consiste em uma série de reações químicas que promovem a formação de ligações químicas primárias (ligações covalentes) entre as macromoléculas da resina termofixa, mediante o uso de calor, pressão, radiação ou catalisadores, tornando-a rígida, insolúvel e infusível.(5)

A matéria-prima para obtenção de cada polímero é chamada de monômero, que é uma molécula simples, bifuncional, (capaz de reagir por pelo menos duas de suas terminações), que em condições adequadas dá origem à unidade de repetição (mero) das muitas cadeias poliméricas que formam o polímero.(4,5,6)

Ao conjunto de reações químicas que levam monômeros a formar polímeros dá-se o nome de polimerização. O monômero utilizado na polimerização do PVC é o monômero cloreto de vinila (MVC).(5,6)

Os principais processos de polimerização, do ponto de vista tecnológico, podem ser diferenciados em polimerização em cadeia (baseada na reação de monômeros com duplas ligações carbono-carbono) e polimerização em etapas

(envolvendo, na sua maioria, reações entre monômeros com grupos funcionais reativos, com ou sem a formação de subprodutos de baixa massa molar).(4,5,6)

Polímeros cujas macromoléculas são formadas por um único tipo de unidade de repetição (mero) são chamados de homopolímeros e aqueles polímeros cujas macromoléculas são formadas pela repetição de dois ou mais tipos de meros, são conhecidos por copolímeros. Quanto à formação das macromoléculas, os copolímeros podem ser subdivididos em aleatórios (randômicos ou estatísticos), alternados, em bloco e enxertados, mostrados nas FIG. 1a, 1b, 1c e 1d.(5,6)

FIGURA 1a - Exemplo de estrutura de polímero tipo aleatório

FIGURA 1b - Exemplo de estrutura de polímero tipo alternado

FIGURA 1c - Exemplo de estrutura de polímero tipo em bloco

FIGURA 1d - Exemplo de estrutura de polímero tipo enxertado

Os polímeros de cloreto de vinila podem ser encontrados tanto na forma de homopolímeros quanto na de copolímeros, tais como os copolímeros de cloreto de vinila e acetato de vinila.

3.2 Poli(cloreto de vinila) - PVC

3.2.1 Características e propriedades

A descoberta do PVC ocorreu em 1872, por um cientista chamado Baumann, que observou a formação de um pó branco ao expor um gás, o cloreto de vinila, à ação dos raios solares durante vários meses em recipiente fechado. No entanto, foi somente em 1931, na Alemanha, que surgiu o interesse comercial por esta nova resina e conseqüentemente teve início a sua produção industrial.(5,6,7)

Em termos de comercialização o PVC é a resina que representa o segundo maior volume de produção entre os inúmeros polímeros e copolímeros vinílicos. A divisão do consumo de PVC por aplicação, no Brasil, é resumida em: 53% para tubos e conexões; 12% para laminados rígidos e flexíveis; 9% em embalagens; 8% em fios e cabos; 8% em perfis; 5% em calçados e 5% em outras aplicações específicas.(7)

O PVC é um polímero obtido a partir do cloreto de vinila, um monômero formado pela reação do eteno (43% em peso), FIG.2, e por cloro (57% em peso do polímero), FIG.3.(7)

FIGURA 2 – Estrutura básica da molécula de eteno

FIGURA 3 - Estrutura básica da molécula de cloreto de sódio

Estes produtos químicos têm sua origem em duas matérias-primas de origem natural, o sal comum, cloreto de sódio (NaCl), e o petróleo (eteno). O eteno, em contato com o cloro, por meio da reação conhecida como cloração, origina um novo gás, o dicloroetano (EDC). Este gás, ao sofrer pirólise, produz o monômero cloreto de vinila (MVC) de estrutura CH_2CHCl , e libera ácido clorídrico, HCl , como subproduto. A macromolécula, ou polímero formado de monômeros de cloreto de vinila é chamado de poli (cloreto de vinila) ou PVC e sua estrutura básica consiste de $(\text{CH}_2\text{CHCl})_n$, onde "n" é o número de vezes que esta unidade básica se repete, em geral entre 300 e 1700 vezes, FIG.4.(6,7)

FIGURA 4 - Esquema de polimerização do PVC

O PVC é um pó branco, em estado sólido à temperatura ambiente; inodoro ou de odor brando e quimicamente estável, não ocorrendo decomposição ou reação com outros produtos em condições normais, o que o classifica como não corrosivo, não explosivo ou não inflamável. A sua solubilidade em água é nula, sendo considerado um produto atóxico e inofensivo quando em contato com a pele;

entretanto, quando manuseado devem ser utilizadas máscaras ou respiradores com filtros mecânicos. A resina de PVC, FIG 5, deve ser armazenada em temperatura moderada, livre da ação direta da luz solar e de umidade, devendo ser protegida do contato direto com o solo.(7)

FIGURA 5 - Estrutura molecular do PVC

Principais propriedades da resina PVC

- Massa molar: 50.000 a 100.000 g/mol
- Temperatura de fusão: 273°C
- Densidade: 1,39 g/cm³
- Temperatura de transição vítrea: 81°C
- Índice de refração: 1,53 - 1,56
- Cristalinidade: 5 – 15%

Na estrutura básica do poli(cloreto de vinila) observa-se os átomos volumosos de cloro, alternados na cadeia polimérica. Esta estrutura gera incompatibilidade com hidrocarbonetos não-polares, ou seja, é resistente à gasolina e aos óleos minerais, porém o torna solúvel em solventes fortemente polares, como acetona e hidrocarbonetos clorados.(7,8)

Para a maioria dos produtos feitos em PVC (tubos, perfis e outros), não é recomendado o uso em condições de exposição a temperaturas maiores que 60°C, pois pode ocorrer a degradação do material. A resistência a altas temperaturas (portanto, a resistência térmica) está relacionada à quantidade de cloro presente na cadeia polimérica. Desta forma, é possível ampliar a faixa de utilização de produtos de PVC para temperaturas entre 80 e 100°C, aumentando-se a quantidade de cloro na resina, o que além de aumentar a resistência térmica, aumenta também a densidade e o retardamento à chama.(7,8)

O elevado teor de cloro intrínseco à estrutura química do PVC é responsável pelo baixo índice de inflamabilidade e alta taxa de extinção de chamas no processo de combustão, tornando-o indicado para aplicações que requeiram alta resistência ao fogo, tais como no isolamento de fios e cabos elétricos, eletrodutos, tubos e conexões, perfis de esquadrias, forros, pisos e outros revestimentos utilizados na construção civil. As formulações de PVC rígido são muito resistentes à ignição e propagação de chamas, sendo que o processo de combustão ocorre somente quando uma fonte de energia ou chama externa é permanentemente aplicada sobre o material. Uma vez retirada essa fonte de energia, o processo de combustão encerra-se imediatamente, podendo o PVC ser considerado auto-extingüível. Já as formulações de PVC flexível, devido à presença de teores variados de plastificantes são menos resistentes à ignição. Essa característica, entretanto, pode ser melhorada por meio da utilização de plastificantes de baixa inflamabilidade ou aditivos retardantes de chama, o que reduz a inflamabilidade do composto. Todo e qualquer material em condições de incêndio gera gases durante sua combustão, podendo esses gases serem divididos em asfixiantes e irritantes. Qualquer material de origem orgânica que contenha em sua estrutura carbono e hidrogênio, como é o caso do PVC e da madeira geram dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO) e vapor de água durante o processo de combustão. Tanto o dióxido de carbono quanto, o monóxido de carbono são considerados gases asfixiantes, uma vez que deslocam o oxigênio do ambiente, tornando o ar não respirável. Esses gases são extremamente perigosos em condições de incêndio uma vez que, devido à ausência de odor, não podem ser detectados. Sabe-se que a grande maioria das mortes em situações de incêndio ocorrem não por queima, mas sim por asfixia. O PVC, devido à presença do cloro em sua estrutura química, forma ainda cloreto de hidrogênio (HCl) durante sua combustão. O cloreto de hidrogênio é um gás irritante, sendo facilmente detectado pelo odor, servindo, portanto como alarme. Em situações em que a liberação de cloreto de hidrogênio é crítica devido a problemas de corrosão, a formulação do composto de PVC pode receber supressores de fumaça, os quais reduzem sua emissão.(8)

3.3 Compostos de PVC

A utilização prática de resinas de PVC para a manufatura de produtos, salvo em situações extremamente especiais, demanda sua mistura com aditivos e

tem nesta mistura o nome de composto de PVC. A mistura da resina de PVC com os aditivos é normalmente realizada em misturadores intensivos do tipo bate-deira, também denominada turbomisturadores ou misturadores de alta velocidade (*Hi intensity mixers*). Esses misturadores consistem basicamente em uma câmara cilíndrica em cujo fundo são instaladas pás de mistura, para as quais cada fabricante define uma geometria particular. As pás de mistura são movimentadas por motores elétricos potentes, capazes de fazê-las girar em altas velocidades, necessárias para efetiva agitação do sistema e mistura dos componentes. A câmara cilíndrica tem em seu topo uma tampa dotada de aberturas pelas quais os aditivos podem ser inseridos conforme a sequência de mistura desejada, FIG.6.(7,8)

FIGURA 6 – Misturador intensivo de PVC

Os compostos rígidos desta resina são fabricados pela adição de todos os componentes da formulação no início e mistura em alta velocidade, até que a temperatura da massa atinja entre 120 e 130°C, condição essa necessária para que todos os componentes lubrificantes da formulação (estabilizantes térmicos e lubrificantes sólidos) sofram fusão, revestindo por completo as partículas de resina. (8)

Os compostos flexíveis da resina são fabricados a partir da adição da resina a lubrificantes sólidos e estabilizantes térmicos e mistura em alta velocidade, até que a temperatura da massa atinja entre 80 e 90°C. Nessa faixa de temperatura a resina tem sua porosidade completamente aberta, sendo receptiva à incorporação

dos aditivos líquidos e plastificantes, que devem ser lentamente adicionados à mistura em velocidade reduzida. Uma vez que os líquidos são absorvidos pela resina, o que é indicado pela mudança na corrente do motor, a velocidade pode ser novamente aumentada; adicionam-se, então, as cargas minerais. A mistura é descarregada quando a temperatura da massa atinge entre 110 e 120°C. A incorporação das cargas minerais pode ser realizada no início da mistura, porém parte dos aditivos líquidos pode ser absorvida por elas, alterando características dos compostos, como por exemplo, a dureza.(8)

A temperatura de descarga deve ser cuidadosamente monitorada no caso de compostos flexíveis devido ao risco de pré-gelificação e formação de aglomerados no misturador, o que causaria perda de fluidez do composto.(6,7,8)

3.4 Transformação de materiais plásticos

O material utilizado nesta pesquisa foi produzido pelo processo de extrusão/laminação e termoformagem, portanto, será dada ênfase somente a estes processos, deixando os processos de injeção, sopro, rotomoldagem e outros existentes de lado.

3.4.1 Extrusão – laminação

A palavra extrusão origina-se dos vocábulos latinos "*Ex*" - para fora e "*Trudere*" - Forçar ou Empurrar. Extrusão pode ser definida como o processo contínuo de obtenção de produtos com comprimentos ilimitados e dimensões constantes, forçando o material a passar por um cabeçote sob condições de pressão e temperatura pré-estabelecidas de acordo com especificações dos fabricantes dos materiais plásticos.(5,6,9)

A moldagem por extrusão pode ser empregada tanto na obtenção de produtos acabados quanto de semimanufaturados, que posteriormente serão novamente processados. A extrusão também é utilizada na remoção de umidade ou de compostos voláteis presentes no polímero e na incorporação de aditivos ao material. Vários produtos são obtidos por meio da extrusão tais como tubos, laminados, placas, chapas, filmes, calhas recobrimento de fios e cabos, mangueiras entre outros.

Uma extrusora compõe-se de um corpo cilíndrico, no qual se deslocam um ou mais corpos sólidos e rígidos de forma helicoidal (parafuso ou rosca), FIG.7,

com a finalidade de transportar, plastificar e homogeneizar termoplásticos de acordo com as necessidades dos processos subseqüentes.(7,8,9)

FIGURA 7 – Parafuso ou rosca de plastificação de uma extrusora

A extrusora basicamente compõe-se de: funil de alimentação, elemento rosca de acoplamento, seção de alimentação, cilindro-cabeçote, cilindro, caixa de redução, elementos de aquecimento, motor, variador, sistema de refrigeração da extrusora, como mostrado na FIG.8. O componente mais importante de uma extrusora é a rosca, sendo seu desenho varia para cada tipo de material processado sendo impossível realizar uma extrusão adequada de um polímero com uma rosca projetada para outro.(7,8,9)

FIGURA 8 – Ilustração do fluxo de material de uma extrusora

A extrusão de chapas utiliza matriz plana (*flat die*), FIG.9, com o material processado passando em seguida, por cilindros refrigerados, FIG.10, que calibram a espessura das chapas.

FIGURA 9 – *Flat die* e calandra para laminados rígidos

FIGURA 10 – Esquema de cilindros para resfriamento de um sistema de laminação

3.4.2 Termoformagem

Este processo de moldagem utiliza o aquecimento de folhas ou placas plásticas extrusadas, pela sua aproximação a um conjunto de resistências elétricas, até seu amolecimento, a folha aquecida é imediatamente aplicada sobre um molde maciço contendo perfurações apoiado sobre uma base no interior da qual se aplica vácuo, FIG.11. De acordo com o grau de complexidade em detalhes da superfície da peça a ser moldada, pode-se ainda sobrepor pressão à folha. O processo emprega normalmente moldes de custo baixo, sendo utilizado na fabricação de protótipos industriais, peças de grandes dimensões e artefatos descartáveis, sem exigências

especiais de acabamento como, por exemplo, copos, pratos, bandejas, “blister”, letreiros entre outros.(5,9)

FIGURA 11 – Esquema de processo de termomoldagem

A termoformagem é comumente conhecida como moldagem a vácuo (*vacuum forming*). Os moldes podem ser confeccionados com gesso, madeira, metal, pois serão submetidos a solicitações mecânicas pequenas, existem ainda equipamentos sofisticados para a produção contínua de embalagens e produtos termoformados.(5,9)

3.5 Alumínio

A bauxita, rocha que deu nome ao minério de alumínio, foi identificada pela primeira vez em 1821, na localidade de Les Baux, no sul da França, por Berthier. Nessa época o metal alumínio ainda não era conhecido.(10)

O alumínio é o mais abundante elemento metálico da Terra, sendo o mais moderno dos metais comuns, tendo sido isolado em 1825 e introduzido ao público em 1855. O seu desconhecimento ao longo do tempo, deve-se ao fato de que, ao contrário de outros elementos metálicos (cobre ou ferro), ele não se encontra naturalmente em sua forma metálica, existindo sempre em combinação com outros elementos, principalmente o oxigênio, com o qual forma um óxido extremamente duro, conhecido como alumina.(10,11)

Entretanto, é reconhecido que há mais de sete mil anos fabricantes de peças cerâmicas, na Pérsia, utilizavam um tipo de barro contendo óxido de alumínio. Os egípcios e os babilônios utilizavam outros minerais contendo alumínio na fabricação de cosméticos e produtos medicinais. Em 1808, Humphrey Davy conseguiu provar a existência do alumínio, dando-lhe este nome. Após este fato, em 1825, o físico alemão Hans Christian Oersted isolou pela primeira vez o metal,

enquanto a primeira obtenção industrial do alumínio por via química foi realizada por Sainte-Claire Deville, em 1854. Já nesse período, percebeu-se a grande possibilidade de aplicação que o metal teria em diversos setores da indústria, por suas características em relação aos outros metais até então utilizados. Atualmente, para a obtenção do alumínio em escala industrial, a bauxita passa por um processo de moagem e, misturada a uma solução de soda cáustica, dá como resultado uma pasta que, aquecida sob pressão e recebendo uma nova adição de soda cáustica, se dissolve formando uma solução que passa por processos de sedimentação e filtração, que eliminam as impurezas.(10,11)

Observa-se então, que a alumina é o resultado do processamento químico da bauxita, conhecido como processo *Bayer*. Essa operação se realiza na refinaria, onde o minério é transformado em alumina calcinada, a qual posteriormente será utilizada no processo eletrolítico. Por meio de uma reação química, a alumina será precipitada pelo processo de cristalização por semente. O material cristalizado é lavado e secado por aquecimento para que o primeiro produto do processo de produção do alumínio, o óxido de alumínio de alta pureza, ou alumina (um pó branco e refinado), seja obtido.(10)

A alumina produzida será o principal insumo para a produção do alumínio que, pelo processo de redução, é transformada em alumínio metálico. Trata-se de um processo eletrolítico utilizando corrente elétrica que foi descoberto por Paul Louis Toussaint Héroult (Normandia, França) e Charles Martin Hall (Ohio, EUA). Em 1886, esses dois pesquisadores, sem se conhecer, inventaram ao mesmo tempo o procedimento de produção de alumínio (FIG.12), mais conhecido como processo *Hall-Héroult*.(10)

O consumo de eletricidade para a produção de alumínio é muito alto, porém vem decrescendo sistematicamente (enquanto em 1940, a indústria consumia 24.000 kWh/t, as modernas fundições de hoje consomem 13.000 kWh/t). Em termos dos volumes utilizados na sequência de obtenção do alumínio são necessárias aproximadamente 2,3t de bauxita para a produção de 1t de alumina, e 1,95 toneladas de alumina são necessárias para produzir 1 tonelada de alumínio no processo de redução. A bauxita é a principal matéria-prima utilizada na indústria do alumínio. Trata-se de uma rocha constituída, principalmente, de minerais hidratados de alumínio. Cerca de 95% da produção mundial de bauxita são utilizadas na produção de alumina. Essa é a bauxita denominada bauxita grau metalúrgico, cujas

especificações são as seguintes: mínimo de 55% de Al_2O_3 , máximo de 7% de SiO_2 reativa, 8% de Fe_2O_3 e 4% de TiO_2 . As bauxitas também são empregadas nas indústrias químicas (sulfato de alumínio), de abrasivos e de cimento (aluminoso). São as bauxitas de grau não-metalúrgico ou refratárias (alta alumina), aquelas cujas especificações em base calcinada são: mínimo de 85% (em peso) de Al_2O_3 , máximo de 7% de SiO_2 reativa, máximo de 3,75% de Fe_2O_3 e máximo de 3,75% de TiO_2 com densidade relativa de 3,1.(10,11)

O alumínio pode ser substituído pelo cobre em muitas aplicações, principalmente no setor elétrico. O magnésio e o titânio são substitutos para o alumínio em diversos usos estruturais e de transporte, porém com custos mais elevados. O aço também é um substituto em aplicações nas quais a economia em peso não é relevante. O aço, o ferro e a madeira competem com o alumínio na indústria da construção civil. Na indústria de embalagens, o aço, o plástico, o vidro e o papel são concorrentes, apesar do alumínio aumentar sua participação nesse setor.(11)

FIGURA 12 – Esquema do lago de resíduos para obtenção de alumina

Os principais insumos para a produção de alumínio durante o processo de redução são alumina e energia elétrica. O custo médio de energia para a indústria do alumínio no Brasil é de US\$19,1/MW, valor que vem se mantendo dentro da média mundial que é de US\$ 19,3/MW.(10)

A produção mundial de alumínio primário, em 2000, foi de 23,9 milhões de toneladas, das quais o Brasil respondeu por 5,4%. A capacidade mundial instalada

para a produção de alumínio primário, de acordo com o U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries (2001), para o ano 2000 era de 25,7 milhões de toneladas.(10,11)

Em 1988, o volume de alumínio primário produzido no Brasil foi de 873,5 mil toneladas, em 2000, a produção atingiu a marca recorde de 1,28 milhão de toneladas, apresentando uma taxa média de crescimento anual de 3,2%. Esse crescimento deve ser atribuído à entrada em operação da usina da Albras, localizada no município de Barcarena, estado do Pará, que iniciou sua produção em 1985, com um volume de 87.060 toneladas. Em 1988, a produção da Albras atingiu 170.361 toneladas, e em 2000, essa produção foi de 369.200 toneladas. Verifica-se, portanto, que a taxa média de crescimento anual da empresa foi de 6,6%, no período 1988-2000. A produção nacional de alumínio secundário (sucata reciclada) em 1988 foi de 66,8 mil toneladas. Em 2000 essa produção atingiu a marca recorde de 210,1 mil toneladas, mostrando uma taxa média anual de crescimento da ordem de 10%. A produção obtida em 2000 era equivalente a 14,1% do total do alumínio produzido (primário + sucata recuperada), que foi de 1.487,5 mil toneladas. Essa participação em 1988 era de apenas 7,1%, o que implica afirmar que a participação do alumínio secundário duplicou no período 1988 – 2000. Ressalta-se que, em 1991, o índice de reciclagem de latas de alumínio no Brasil já era de 37%, superior à média da Europa, que era de 21%. Nesse mesmo ano os índices do Japão e EUA eram, respectivamente, de 43% e 62%. No ano de 1999, o Brasil apresentou o segundo maior índice de reciclagem de latas de alumínio, ficando atrás somente do Japão que teve um índice de 79%, ultrapassando os EUA que apresentaram índice de 63%. O Brasil atingiu seu recorde chegando a reciclar atualmente 85% das latas de alumínio. A indústria brasileira do alumínio recicla, além das latas, diversos produtos como perfis, blocos de motores, utensílios domésticos, chapas, entre outros.(10)

3.5.1 Redução e processos

A redução da alumina em alumínio primário consiste na dissociação eletrolítica da alumina dissolvida num banho de criolita fundida a baixa tensão. A alumina se decompõe em oxigênio, que combina com o carvão do anodo, desprendendo-se sob a forma de gás, e em alumínio líquido, que se precipita no fundo da cuba.(10)

A voltagem de cada uma das cubas, ligadas em série, varia de 4 a 5 volts, dos quais apenas 1,6 volts são necessários para a eletrólise propriamente dita. A diferença de voltagem é a necessária para vencer resistências do circuito e gerar calor para manter o eletrólito em fusão.(10)

O processo completo de produção de alumínio é mostrado na FIG.13:

FIGURA 13 – Fluxograma de produção de alumínio

Nem sempre a estrutura de um metal obtido por fundição é adequado para determinadas aplicações que exigem altas resistências à tração e ductilidade, como é o caso, por exemplo, de perfis estruturais, chapas que serão conformadas, fios, cabos, entre outros. Para obtenção de propriedades mais compatíveis com estes tipos de aplicação, os metais passam por outros tipos de processamento, que se caracterizam por trabalharem o metal por meio da aplicação de pressão ou choque, visando duas coisas: obtenção do metal na forma desejada e melhoria de suas propriedades mecânicas, o que é obtido com o rompimento e refino da estrutura dendrítica (FIG.14) presente nos metais fundidos. Embora classificados como primários estes processos podem dar origem a produtos acabados, tais como trilhos, arames, tubos, entre outros, mas, na maioria dos casos, é necessária a utilização de processos secundários para a obtenção da peça pronta.(10)

Dentre os processos chamados de primários, os mais comuns são:

- Laminação
- Trefilação
- Forjamento

- Extrusão

Nestes processos, o metal pode ser trabalhado a quente ou a frio.

Pode-se definir como trabalho a quente aquele feito acima da temperatura de recristalização do metal e trabalho a frio como aquele realizado abaixo desta temperatura, ou seja, na maioria dos casos, à temperatura ambiente.(10,11)

FIGURA 14 - Encruamento e recristalização do alumínio

3.5.1.1 Trabalho a quente e a frio

Não altera a dureza do metal; grãos deformados durante o processo, logo mudam para novos grãos não deformados. Nesta mudança os grãos podem ser afinados por meio de rompimento e reformação, o que aumenta a tenacidade do metal. O metal aumenta sua resistência à tração em determinada direção, uma vez que as impurezas existentes são segregadas em fibras com orientação definida. O trabalho a quente é mais fácil e rápido, exigindo máquinas de potência menor para sua realização, porém que resistam às altas temperaturas do processo. O metal pode ser deformado em formas extremas quando quente, porque a reformação contínua dos cristais elimina rupturas e trincas. Conseqüentemente as deformações são mais profundas que no trabalho a frio. A temperatura de trabalho deve ser acima da de recristalização, mas não muito elevada para evitar a formação de granulometria grosseira. As temperaturas altas oxidam e formam carepa na superfície do metal e tolerâncias rigorosas não podem ser mantidas.(10)

O trabalho a frio é normalmente precedido do trabalho a quente, remoção de carepa, limpeza da superfície e possivelmente decapagem. Com este tipo de trabalho obtêm-se tolerâncias rigorosas, bom acabamento superficial e boas propriedades mecânicas. O trabalho a frio deve ser efetuado acima do limite de

escoamento do material para que a deformação seja permanente, embora a deformação sempre sofra um pequeno decréscimo com a retirada da carga, devido ao retorno elástico. Este fenômeno é chamado histerese. Quando um metal é trabalhado a frio os seus cristais são internamente deformados, provocando aumento de dureza e da resistência mecânica, perda de ductilidade e tensões residuais que, muitas vezes poderão levar à ruptura da peça. Isso pode ser evitado por meio de um tratamento térmico de recozimento ou normalização que faz o metal retornar às suas condições originais ou, próximo delas. As máquinas para execução de trabalhos a frio devem poder exercer forças muito maiores que as projetadas para trabalhos a quente, portanto devem ser mais robustas.(10)

3.5.1.2 Laminação do alumínio

A folha de alumínio é obtida na redução da secção transversal por compressão do metal, pela passagem entre dois cilindros de aço ou ferro fundido com eixos paralelos que giram em torno de si mesmos. Os produtos assim obtidos podem ser classificados quanto a espessura, em:(9)

- Folha super grossa: acima de 0,151mm; folha grossa: de 0,051 a 0,150mm;
- Folhas médias ou intermediárias: de 0,021 a 0,050mm;
- Folha fina: de 0,00635 a 0,020mm

A laminação do alumínio (FIG.15) ajuda a quebrar a estrutura bruta de fusão, distribuindo melhor os compostos, tornando as chapas mais dúcteis e mais maleáveis (FIG.16) possibilitando toda a diversificação na conformação do alumínio, na prática, a estampagem, dobramento e outras formas de transformação.

FIGURA 15 – Laminação de alumínio

FIGURA 16 – Chapas de Al laminadas

Características do laminado:

- Leveza: trata-se de um metal de peso específico $2,702 \text{ g/cm}^3$, e para embalagem seu peso é comparável favoravelmente em relação a garrafas de vidro e outros recipientes metálicos utilizados.
- Barreira à luz: a folha de alumínio é resistente a passagem de luz e, por isso, é usada para embalar produtos que podem perder o aroma ou tornar-se rançosos ou descoloridos pela exposição à luz.
- Barreira ao vapor de água, gases e gorduras: o alumínio é impermeável à maioria dos tipos de gordura e óleos, tanto em baixas como altas temperaturas, impedindo, também, a permeabilidade a gases e vapor de água.
- Higiene: a folha de alumínio é atóxica, não é absorvente e é isenta de odores. Após o processo de laminação, a folha sofre um tratamento térmico chamado de recozimento, que visa aliviar as tensões do processo de laminação e evaporar o óleo residual também oriundo da laminação, este tratamento assegura a folha de alumínio limpeza e esterilização.
- Flexibilidade e moldabilidade: o alumínio puro é um metal extremamente dúctil e assim é usado com vantagem quando se deseja um produto com máxima flexibilidade e pouca dureza. A folha de alumínio é altamente moldável e maleável, atendendo aos requisitos exigidos pelos segmentos de embalagem e bens de consumo.
- Alongamento: uma das características mecânicas do alumínio é uma medida relacionada com o acréscimo que um material sofre pelos esforços de tração, normalmente em porcentagem. Esta característica dá uma idéia da ductilidade do material; assim, é fácil perceber que quanto maior o alongamento, mais dúctil é o material.
- Condutibilidade térmica: a condutibilidade térmica do alumínio é alta e vantajosa para a manufatura de utensílios e peças que necessitam dissipar calor.

A folha de alumínio pode receber acabamento superficial fosco ou brilhante, conforme a aplicação final.

- Brilhante / brilhante: ambas as superfícies polidas definidas pelo acabamento dos cilindros de laminação;

- Comum / comum: superfícies com baixa reflexividade, mais opacas;
- Brilhante / fosco: uma superfície com o acabamento do cilindro e outra fosca, devido ao contato folha / folha da laminação duplada (aspecto sedoso).

As ligas dependem da aplicação. As folhas de alumínio podem ser diferenciadas por ligas ou têmperas diferentes. A seleção de uma liga para um determinado produto depende das propriedades finais que se deseja obter. Os metais mais comuns que formam liga com o alumínio são o cobre, manganês, silício, magnésio e zinco. A adição de cobre reduz a resistência à corrosão mais do que qualquer outro elemento. O manganês aumenta a resistência mecânica em grau moderado, com um mínimo de redução em ductibilidade e melhora apreciavelmente a resistência à corrosão. O efeito da adição de silício para formar uma liga depende muito da sua forma e locação na microestrutura da liga, melhorando também a resistência à corrosão. O magnésio aumenta a resistência à corrosão, especialmente contra a água do mar, é uma liga que apresenta boa resistência mecânica sem prejuízo para a ductibilidade. O zinco melhora as propriedades mecânicas e a resistência à corrosão.(10,12)

Após o término da laminação da folha, os materiais encruados poderão ser fornecidos como fabricados ou recozidos. Para o segundo caso, os materiais são tratados termicamente em fornos de cozimento a temperaturas que variam com a espessura, largura, peso, aplicação e tipo de forno. A finalidade do recozimento é, além de um alívio de tensões no material encruado pela laminação, retirar o óleo residual da laminação carregado pela folha durante o processo. Deste modo, as folhas podem ser classificadas quanto ao grau de recozimento, ou seja, têmperas .(10,12)

Têmpera "O" para alumínio totalmente recozido, onde o material apresenta seu menor nível de resistência mecânica. As têmperas nos estados intermediários são classificadas por "H", seguida de dois algarismos, que as denominam.(10)

Exemplos de produtos:

Tem-se o “blister” (mercado farmacêutico): estrutura aplicada como termo seláveis em recipientes de PVC. Laminado com papel, embalagem de chocolates, manteigas, rótulos, cigarros, entre outros. Tampa termo-selante: utilizadas em recipientes plásticos, geralmente PP ou PE - empregadas em copos d'água,

iogurtes, sobremesas lácteas, molhos, geléias, margarinas, sucos e envoltórios para chocolates.

3.6 “Blister”

No início dos anos 60, Karl Klein projetou a primeira máquina de produção de “blister”. Ele não obteve a patente do seu projeto, pois, na época, a indústria farmacêutica europeia não estava interessada nesta idéia. Porém, a pílula anticoncepcional foi inventada poucos anos após a invenção e escolheu o “blister” como embalagem porque aparentava ser a embalagem mais apropriada para armazenar a pílula e a forma mais fácil do usuário administrar a utilização do medicamento.(13)

A vantagem mais marcante do “blister” é fornecer ao paciente uma idéia clara do tamanho da dose e da fácil visualização das quantidades prescritas no medicamento. Além de conservar de forma inalterada o restante do medicamento até a próxima utilização. O manuseio e a estocagem do “blister” tornam a embalagem extremamente atrativa ao consumidor.(13)

As empresas produtoras de embalagens farmacêuticas reconhecem as vantagens do “blister” principalmente no que diz respeito a redução de custos, aumento da velocidade de produção de medicamentos e a prevenção de quebra de embalagens, no caso da utilização de vidro.(13)

Estes são alguns motivos que provam a versatilidade e eficiência do “blister” em comparação com outras embalagens farmacêuticas.

3.6.1 Utilização europeia x norte americana

A situação é totalmente oposta. Nos Estados Unidos, onde a maioria dos remédios está contida em recipientes de vidro ou plásticos, a febre do “blister” esta apenas começando. Menos de 20% dos remédios sólidos são embalados em “blister”.

Muitas especulações são feitas em torno da utilidade e confiança do blister. A primeira delas vem desde a segunda guerra mundial quando todo o maquinário europeu foi destruído forçando-os a começar do zero a tecnologia de produção de máquinas produtoras de embalagem. Optaram pelo “blister” em contraposição as embalagens feitas de vidro e plástico (garrafinhas). A segunda barreira criada à utilização do “blister” foi a legislação europeia por ser menos conservadora que a

norte americana, pois a ideologia americana pregava a contaminação dos medicamentos que estivessem em contato com o “blister”.(13)

A terceira barreira americana dizia respeito à quantidade de unidades do medicamento que poderia ser receitada para cada pessoa. Na Europa cada receita girava em torno de 10 a 14 unidades do remédio enquanto que nos Estados Unidos o número girava em torno de 60 unidades. Por ser muito mais barato embalar uma menor quantidade de medicamento tornava-se inviável comercialmente competir com a nova embalagem.(13)

O “blister” é cada vez mais aceito pela comunidade americana. Tanto para indústrias como para os pacientes que reconhecem os benefícios e a praticidade da embalagem. A forma com que o “blister” é disposto na embalagem ajuda os pacientes a controlarem e seguirem a prescrição médica, garantir que o tempo de vida útil do medicamento seja mantido inalterado e a facilidade de armazenamento e manuseio da embalagem.(13)

Defensores americanos do “blister” enumeram cinco aspectos que indicam que o “blister” é melhor do que as embalagens convencionais:(13)

- Manutenção da integridade do produto;
- Proteção total do medicamento;
- Evidência de que a embalagem esta totalmente lacrada;
- Redução da possibilidade de troca acidental de medicamentos;
- Cumprimento, por parte do paciente, da prescrição médica.

3.6.2 Componentes do “blister”

Existem quatro componentes básicos que formam este tipo de embalagem farmacêutica: o filme que será moldado, o molde, o selador, selagem e a impressão. Os materiais mais utilizados nos Estados Unidos são: o alumínio em folhas, filmes plásticos e papel que são aderidos a um material termo-moldável.

O filme moldável representa de 80 – 85% do peso final da embalagem enquanto a selagem de 15 – 20%. Esta disposição mostra que o molde é a parte mais resistente da embalagem, pois necessita de certa consistência e precisão para quando for receber o medicamento.(13)

3.6.2.1 Filme moldável

É a parte da embalagem que recebe o medicamento. Um segredo do sucesso do “blister” é a escolha do melhor filme a ser utilizado, pois, deve apresentar propriedades químicas e físicas compatíveis com a utilização. Esta escolha pode representar uma diminuição do custo final da embalagem muito significativa. Peso, formato, facilidade de selagem, resistência a impacto são algumas variáveis que impactam na escolha.

3.6.2.1.1 Poli(cloreto de vinila) - PVC

A utilização do PVC rígido é muito comum neste tipo de embalagem. Não possui muitos elementos que conferem plasticidade ao material, possui características termo-moldáveis excelentes, resistência a impactos, baixa permeabilidade a óleos, gorduras e aromas, boa resistência química, pode ser pintado desde que a tinta não possua solventes derivados do petróleo e baixo preço. Estas propriedades fazem do PVC o material mais utilizado pelas indústrias de embalagem na fabricação do “blister”.

Por outro lado, o PVC atrai muitas críticas porque sua combustão libera hidrocarbonetos como as dioxinas. Alguns países como Alemanha e Suíça proíbem a queima do PVC. Uma saída para isso foi a utilização de outros filmes na produção como o PP (polipropileno). Isso induziu a massificação do “blister” e forçou as empresas a flexibilizarem as máquinas podendo utilizar tanto o PVC como o PP.(13)

3.6.2.1.2 Poli(cloreto de vinilideno) - PVDC

Mesmo com um volume de produção muito menor, este material possui a possibilidade de ser utilizado como selagem ou filme, apresenta menor permeabilidade a umidade e pode possuir a espessura de filme em torno de 2 μ m enquanto que o PVC possui 10 μ m.(13)

3.6.2.1.3 Polipropileno - PP

Possui menor absorção a umidade do que o PVC, a espessura utilizada para o filme gira em torno de 10 μ m, não apresenta liberação de gases quando reciclado ou incinerado. Por outro lado possui problemas na termoformagem. Esta precisa possuir processo extremamente controlado para não deformação do PP.(13)

3.6.2.2 Selador

Responsável pela base estrutural do “blister”. É a parte final do processo e que vai prender o medicamento a embalagem moldada. É selecionado de acordo com o tamanho, formato, peso do produto e estilo da embalagem. A superfície necessita de ser compatível com a selagem térmica e possuir resistência a abertura adequada. A seguir seguem os diferentes tipos de seladores encontrados:

3.6.2.2.1 Alumínio

É um dos materiais mais utilizados na Europa. Possui uma espessura de 0,8mm podendo ser reduzida até 0,6mm, possui excelente resistência, pois suporta o medicamento e não prejudica a abertura da folha. Normalmente é utilizada com impressão feita do lado oposto a selagem, mas possui a possibilidade de ser utilizado para ambos os lados. Possui duas especificações: o “alumínio duro” e o “alumínio mole” que variam de acordo com a utilização e a facilidade de abertura da embalagem.(13)

3.6.2.2.2 Papel/alumínio

Com esta combinação a densidade do papel chega até 50 g/m². Na Europa a espessura do alumínio é 0,48mm enquanto que nos Estados Unidos a espessura é 1mm. Uma razão para isso é que os europeus moldam a embalagem para que a abertura seja facilitada. A adição de tinta ou impressão é feita sobre o papel e a selagem segue a mesma linha e os mesmos princípios das do alumínio.(13)

3.6.2.3 Selagem

Para o “blister”, a selagem é a parte mais crítica do processo. A aparência e integridade física da embalagem dependem da qualidade da selagem utilizada.

Este processo promove a união do molde (filme) ao selador (material metálico). Alguns solventes podem ser utilizados a fim de promover a união, porém a selagem é baseada essencialmente no tamanho da embalagem e nas propriedades de cada composto.(13)

Uma selagem adequada deve possuir boa resistência a abrasão, uniformidade de selagem em todos os pontos da embalagem, temperatura adequada, perfeita uniformidade entre o selador e o equipamento que promoverá a

selagem, pois, os efeitos, positivos ou negativos, serão percebidos no final do processo.(13)

3.6.2.4 Impressão

Responsável pela estética e o marketing do produto. Deve resistir temperaturas de aproximadamente 300°C sem sofrer nenhum tipo de desconfiguração das características iniciais, não podem reagir com o medicamento, principalmente se a tinta possuir hidrocarbonetos na sua composição.(13)

3.6.2.5 Máquinas

As máquinas modernas capazes de moldar, envasar e selar a embalagem trabalham com uma velocidade média de 800 pacotes/minuto. Contudo com a instalação de controles eletrônicos capazes de controlar a formação e o envase acredita-se que este número possa subir ainda mais. Equipamentos que avaliam a qualidade do medicamento enquanto o mesmo está sendo embalado são utilizados para conferir agilidade no processo de fabricação.(13)

A seqüência de aquecer o plástico, termoformá-lo em cavidades, injeção do medicamento, colocação do selador, selagem e recorte da embalagem podem ser atividades realizadas manualmente ou totalmente automatizadas. Na FIG.17 são mostrados exemplos de embalagens tipo “blister”.

FIGURA 17 – Exemplo de embalagens tipo “blister”

3.7 Reciclagem de plásticos

A capacidade de reciclagem é uma questão cada vez mais importante para o futuro das grandes cidades. Atualmente existem 3 processos principais de reciclagem:(7,8,9)

- Reciclagem mecânica,
- Reciclagem energética,
- Reciclagem química.

3.7.1 Reciclagem mecânica

Consiste na conversão dos resíduos plásticos industriais e pós-consumo, em grânulos, que podem ser reutilizados na produção de sacos de lixo, solados, pisos, mangueiras, componentes de automóveis, fibras, entre outros. É a forma mais utilizada no mundo, devido à simplicidade do processo, sendo extremamente dependente do incentivo ao programa de coleta seletiva do lixo urbano.(7,8,9)

3.7.2 Reciclagem energética

Consiste no reaproveitamento da energia gerada pela incineração do material plástico, que dentro dos padrões adequados (filtragem e lavagem dos gases), não causam danos ao meio ambiente. Os plásticos que usamos diariamente e que é jogado no lixo são ótimos combustíveis e possuem praticamente o mesmo poder calorífico que o óleo combustível e o gás natural.(6,7,8)

3.7.3 Reciclagem química

Existem variantes deste processo, sendo que atualmente a que se encontra em estágio mais avançado de desenvolvimento é a pirólise. Esta consiste na quebra molecular por aquecimento, transformando o plástico em óleo e gases, sendo estes novamente reutilizados como matéria-prima na indústria petroquímica.(7,8,9)

3.8 Corrosão

A corrosão consiste na deterioração dos materiais pela ação química ou eletroquímica do meio, podendo estar ou não associado a esforços mecânicos. Ao se considerar o emprego de materiais na construção de equipamentos ou instalações é necessário que estes resistam à ação do meio corrosivo, além de

apresentar propriedades mecânicas suficientes e características de fabricação adequadas.(14)

A corrosão pode incidir sobre diversos tipos de materiais, sejam metálicos como os aços ou as ligas de cobre por exemplo, ou não metálicos, como plásticos, cerâmicas ou concreto.(14)

Os processos de corrosão, FIG.18, são mais freqüentes na natureza e se caracterizam basicamente por:

- Necessariamente na presença de água no estado líquido;
- Temperaturas abaixo do ponto de orvalho da água, sendo a grande maioria na temperatura ambiente;
- Formação de uma pilha ou célula de corrosão, com a circulação de elétrons na superfície metálica.

Em face da necessidade do eletrólito conter água no estado líquido, a corrosão eletroquímica é também denominada corrosão em meio aquoso.(14,15)

FIGURA 18 Esquema do processo corrosão

Nos processos de corrosão, os metais reagem com os elementos não metálicos presentes no meio, O_2 , S, H_2S , CO_2 entre outros, produzindo compostos semelhantes aos encontrados na natureza, dos quais foram extraídos. Em meios ácidos haverá um decréscimo da acidez no entorno da área catódica e em meios básicos haverá um acréscimo da alcalinidade no entorno da área catódica. Conclui-se, portanto, que nestes casos a corrosão corresponde ao inverso dos processos metalúrgicos. Os produtos de corrosão nos processos eletroquímicos são, em geral, resultantes da formação de compostos insolúveis entre o íon do metal e o íon

hidroxila. O produto de corrosão é, portanto, na grande maioria dos casos hidróxido do metal corroído, ou óxido hidratado do metal. Quando o meio corrosivo contiver outros íons poderá haver a formação de outros componentes insolúveis e o produto de corrosão pode ser constituído de sulfetos, sulfatos, cloretos, dentre outras.(14,15)

3.9 Interação da radiação ionizante com a matéria

A radiação de energia alta pode provocar três efeitos principais quando interage com a matéria: mudança na estrutura nuclear com a criação de novos isótopos ou elementos, ou mudanças químicas como distúrbios da estrutura eletrônica, levando à ionização, excitação e captura de elétrons.(16,17)

Em se tratando de processamento de polímeros o mais importante é o último grupo.

A radiação de energia alta ou ionizante inclui a eletromagnética como raios X e raios γ e partículas como: partículas alfa (α), partículas beta (β), elétrons (e^-), prótons (p), nêutrons (n) e fragmentos de fissão. A principal característica da radiação de energia alta é causar ionização.

A ionização é a transferência de energia pela radiação ionizante à molécula, sendo suficiente para arrancar um elétron de seu orbital. Esta energia é maior que a energia de excitação, que é a necessária para passar um elétron de seu orbital de menor energia para um estado de maior energia.(18)

A absorção de energia proveniente da radiação ionizante produzida por um feixe de elétrons ocorre devido a interações da radiação com a nuvem eletrônica do meio. Se os elétrons do feixe não tiverem energia suficiente não atingem o núcleo, interagindo somente com a eletrosfera do átomo. Nesse caso a nuvem eletrônica age como uma proteção (blindagem), impedindo a aproximação dos elétrons junto ao núcleo.(19,20)

3.10 Interação da radiação ionizante em polímeros

A interação da radiação ionizante com a matéria promove eventos físicos, físico-químicos e químicos. No evento físico há transferência de energia produzindo excitações e ionizações. Espécies instáveis sofrem reações secundárias tanto espontaneamente como por colisão com moléculas vizinhas. No evento físico-químico existe a formação de espécies secundárias reativas como os radicais livres

e no evento químico o sistema restabelece o equilíbrio térmico. As espécies continuam a reagir entre si ou com outras espécies.

O estudo feito sobre o efeito da radiação em polímeros concentra-se nas reações posteriores à formação de radicais livres que se formam quando existe a absorção da radiação ionizante. As modificações causadas pela radiação ionizante em polímeros são de grande interesse, no entanto estas alterações dependem das condições do processo, ou seja, tipo de radiação, presença de oxigênio ou diferentes atmosferas, solventes, grau de cristalinidade e homogeneidade do material polimérico que irá absorver a energia, entre outras .(17,18,21)

Os principais efeitos causados em polímeros pela radiação ionizante são a cisão das ligações da cadeia principal (degradação) e a formação de ligações químicas entre moléculas poliméricas (reticulação).(18)

3.10.1 Cisão

Um dos processos que pode predominar quando a radiação ionizante interage com a cadeia polimérica é a cisão. Na cisão ocorre um rompimento aleatório das ligações químicas obtendo-se um polímero com menor massa molar.

Há ainda a formação de gases e insaturação, com perda de suas propriedades mecânicas. (22)

O número de cisões é diretamente proporcional à dose, assim a determinação da radiação química produzida na cisão $G(S)$ e reticulação $G(X)$ da cadeia principal, (o valor de G é o número de moléculas ou átomos produzidos por 100 eV de energia absorvida), significa que $G(S)$ e $G(X)$ designam o número de ligações quebradas e novamente formadas intermolecularmente, na cadeia molecular por 100 eV de energia absorvida.(16,18)

3.10.2 Reticulação

Este processo ocorre pela recombinação entre radicais formando redes tridimensionais do polímero irradiado. Na ligação cruzada as cadeias poliméricas se conectam por meio de ligações covalentes geradas por ligações químicas ou por radiação.

Na reticulação, existe um aumento da massa molar, da resistência mecânica, das redes tridimensionais do sistema, da viscosidade e a diminuição da solubilidade do polímero irradiado e alteração na temperatura da transição vítrea da fase amorfa.

Este mecanismo também depende da dose, taxa de dose, concentração, entre outros. Porém, a sensibilidade do polímero às mudanças de parâmetros depende do tipo e tamanho das cadeias como também da morfologia do polímero.(18,21)

Na FIG.19 é mostrado o processo de produção de ligações cruzadas via radicais livres.

a) Produção de radicais livres:

b) Produção de ligações cruzadas:

FIGURA 19 - Processo de formação de ligações cruzadas em polímeros: reticulação

3.10.3 Aceleradores de elétrons

Neste trabalho foi utilizado como radiação ionizante a radiação proveniente de aceleradores de elétrons de alta energia (elétrons acelerados), denominados feixe de elétrons ("electron beam") (FIG.20).

Os aceleradores industriais de elétrons são classificados como aceleradores de baixa, média e alta energia de acordo com a intensidade do feixe produzido.

FIGURA 20 – (a) Ilustrações de esteiras utilizadas para transporte de material e (b) de um alimentador automático sendo utilizado para fios elétricos, visando a passagem sob um sistema de feixe de elétrons

Os principais componentes e sub-sistemas de um acelerador de elétrons são: fonte de alta tensão, tubo acelerador a vácuo, canhão de elétrons, sistema de rádio frequência, câmara de irradiação, painel de controle, sistema de segurança e blindagem.

Os principais tipos de aceleradores de elétrons de baixa energia utilizados industrialmente são do tipo cortina ou varredura. Para energias de até 300keV, os elétrons emitidos por um filamento longo (cátodo) são mantidos confinados em uma região do espaço, de forma a se obter uma cortina.

Em outro tipo de acelerador, os elétrons produzidos em uma fonte pontual, são focalizados e acelerados com um gradiente de potencial no centro de um tubo, formando assim um feixe cilíndrico de elétrons, que pode ser movimentado por um campo magnético produzido por uma bobina que envolve o tubo acelerador. Pode-se então obter uma varredura sobre a superfície de irradiação.

Os principais tipos de aceleradores de elétrons disponíveis comercialmente são: acelerador de Van der Graaff: tem baixa potência, entre 0,4MeV e 4,0MeV, com corrente de 1,0mA, aceleradores com transformador de núcleo isolado (*insulating core transformer*): operam até 0,5MeV com correntes altas, da ordem de centenas de mA, aceleradores lineares por microondas (LINACS): possuem voltagem e potência elevados, entre 10kW e 100kW, aceleradores tipo Dynamitron: seguem o princípio dos aceleradores Cockcroft-Woltan (1,0MeV - 100mA; 1,5MeV - 70mA; 3,0MeV - 50mA; 4,5MeV - 34mA), são apropriadas para aplicações industriais e oferecem um custo por kW relativamente baixo.

3.10.3.1 Princípio de funcionamento

O acelerador de elétrons que usa a energia elétrica para gerar elétrons é composto de um filamento de tungstênio que ao ser aquecido fornece os elétrons. Este filamento que corresponde ao cátodo aquecido é mantido em uma região de potencial mais elevado. Estes elétrons são então acelerados por uma diferença de potencial aplicada entre o cátodo e o ânodo. O acelerador os focaliza na forma de um feixe linear, por campos magnéticos e são acelerados quase à velocidade da luz por meio de diferença de potencial. Assim os elétrons adquirem energia suficiente para atravessar a janela de saída que, em geral, é constituída de uma folha fina de titânio com espessura entre 20 μ m a 40 μ m. Toda a região de aceleração dos elétrons deve ser mantida em alto vácuo.(22,23,24)

Os aceleradores de elétrons devem ser blindados para barrar a passagem dos raios X gerados pelo freamento dos elétrons ao penetrarem na matéria. Na FIG.21 é mostrado em esquema comparativo de funcionamento de um acelerador de elétrons.

FIGURA 21 – Esquema comparativo de funcionamento de um acelerador de elétrons

As principais vantagens dos aceleradores de elétrons são: altas taxas de doses, tempo de irradiação curto, intensidade de radiação alta, condução do material a ser exposto mais facilitada, maior rendimento da energia, licenciamento similar ao raio-X, sistema liga-desliga que cessa emissão.

As principais desvantagens dos aceleradores de elétrons: necessita de operadores especializados, custo do equipamento, manutenção, baixo poder penetração (irradiação de material com pouca espessura).(25)

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Matéria-prima

O início do experimento se deu na coleta do material a ser separado, “blister”. Observou-se que o recolhimento em lixões, que seria a idéia inicial do projeto, não seria possível dado o tempo e localização disponível dos pesquisadores. Fez-se contato com as indústrias que poderiam ter este resíduo resultante de seu processo produtivo. Pelas embalagens recolhidas aleatoriamente de consumo, identificou-se facilmente estes fabricantes, incluindo aí um fato relevante que é o uso pela indústria de balas e confeitos deste tipo de embalagem. Alguns confeitos antes embalados e tradicionalmente em papel são agora envolvidos em embalagens tipo “blister”, reforçando ainda mais a idéia que a coleta seletiva deste material se tornará viável.

Algumas indústrias se mostraram um tanto quanto “desconfiadas” da seriedade do projeto e não se propuseram a ajudar no fornecimento da amostra. Conversas informais mostraram que como a indústria farmacêutica é cercada de muitos segredos, visitas fora do seu contexto não são a princípio bem aceitas. Mas como nem todas são iguais, a MALAVASI, indústria farmacêutica situada em Diadema – SP forneceu o material necessário para o início dos ensaios, bem como, se pôs a disposição para maiores esclarecimentos sobre o processo, também se mostrou interessada no acompanhamento do projeto. O material como foi descrito na introdução era descartado o que não gerou nenhum custo no seu fornecimento. O material foi acondicionado em sacos plásticos de polietileno e retirados sem nenhum transtorno.

4.2 Moagem

O material recolhido foi uma sobra da produção, rebarbas e próprias embalagens com defeito, tendo então um formato muito irregular (FIG.22) e difícil de manusear com isto teve-se a opção de moer o material previamente ao seu uso para facilitar a precisão das experiências, principalmente da pesagem.

FIGURA 22 – Material recolhido como sobra da produção

O moinho utilizado foi da marca SEIBT, modelo MGVS 4 com duas facas rotativas, e duas de espera, peneira de 8mm e motor de 4HP (FIG.23). A impressão inicial de que o moinho teria dificuldade em moer o material em função da presença do alumínio se confirmou, a produção que era estimada em pelo menos 40 kg/h pelo porte do moinho, foi de apenas 6 kg/h.

FIGURA 23 – Moinho marca SEIBT usado na experiência

O caso foi resolvido com uma nova reafiação das facas com pequena alteração do ângulo de corte e um ajuste de folga centesimal, que levou um pouco mais de duas horas para ser realizado, com isto o moinho aumentou de rendimento

em quase 600% chegando a 35 kg/h mostrando ser um resultado satisfatório para o produto. A moagem ocorreu de modo tranqüilo sem nenhum percalço confirmando a necessidade do ajuste realizado.

4.3 Solução alcalina para dissolução

Após a moagem foi realizada a dissolução do alumínio. Pesquisas feitas apontaram para duas bases distintas: O hidróxido de sódio e o hidróxido de potássio. Outros agentes como ácido clorídrico ou ácido nítrico também realizariam esta dissolução, mas poderiam comprometer a qualidade do PVC, o que não é interessante já que o PVC com aproximadamente 86% do peso total é a matéria-prima resultante de maior interesse neste projeto.(8,9)

O alumínio é trivalente em seus compostos. Os íons de alumínio (Al^{3+}) formam sais incolores com ânions incolores, com isso a expectativa era obter-se a formação de hidróxido de alumínio seguido de precipitação, com uma grande liberação de energia. A reação esperada foi a seguinte, como nas reações (1) e (2): (10,26)

O precipitado dissolve-se em excesso do reagente, formando íons tetrahidroxialuminato, os quais mantem-se em suspensão:

Como a intenção do projeto era conseguir uma otimização do processo para conseguir atingir uma escala industrial, facilitou-se ao máximo, fatores como concentração, volume, entre outros. Com isso utilizou-se em todos os experimentos o volume de 1 litro de solução em água comum da rede de distribuição, ao invés de água destilada ou desmineralizada, de forma a facilitar a ampliação à escala industrial. Foi realizado um planejamento experimental tipo 2^3 , limitando em oito os experimentos a serem realizados utilizando-se como parâmetros as duas bases, hidróxido de sódio e hidróxido de potássio, suas concentrações de 1 e 2M, e com ou sem agitação da solução. Toda a experiência foi conduzida para que houvesse 100% de dissolução do alumínio, sendo o tempo que a reação levou para se concretizar o fator de comparação entre os parâmetros. No decorrer da experiência

foram observados também alguns efeitos não quantitativos como a ação sobre o PVC e facilidade de processamento que serão discutidos posteriormente.

4.4 Ensaios

Os ensaios foram realizados no laboratório do CTR (Centro de Tecnologia das Radiações) no IPEN (Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares). Usou-se a nomenclatura em numerais romanos para identificar cada uma das experiências do planejamento experimental apresentado na TAB.1.

TABELA 1 – Distribuição dos experimentos

Nº	Base	Concentração	Agitação
I	NaOH	1 Molar	SIM
II	NaOH	1 Molar	NÃO
III	NaOH	2 Molar	SIM
IV	NaOH	2 Molar	NÃO
V	KOH	1 Molar	SIM
VI	KOH	1 Molar	NÃO
VII	KOH	2 Molar	SIM
VIII	KOH	2 Molar	NÃO

Pesou-se 40g de NaOH (hidróxido de sódio) em um vidro de relógio e adicionados a 1000ml de água em um béquer de 2000ml, a seguir esta solução foi agitada para total dissociação do hidróxido, concentração de 1M e pesou-se 80g de NaOH para concentrações de 2M, reação 3. Método este repetido em todas as experiências observando-se apenas a concentração da base.

Foram pesados 56g e 112g de KOH em 1000ml (concentrações de 1 e 2M) de água da rede de distribuição, a seguir uma leve agitação foi realizada para a completa dissolução do hidróxido de potássio, expressa pela reação (4).

Em todos os ensaios foram utilizados 146g de “blister” moído.

4.5 Irradiação

O passo seguinte, após todo processo de dissolução do alumínio, foi realizar a irradiação no irradiador de elétrons do CTR-IPEN/CNEN-SP com 1,5MeV de energia, corrente de 25mA e potência de 37,5kW, modelo Dynamitron II, marca Radiation Dynamics Inc.

Foram utilizados os mesmos materiais, sem a fase de dissolução, para que houvesse a observação de alguma diferença de tempo e qualidade na retirada do alumínio do filme de PVC.

Realizou-se a irradiação nas doses de 50kGy, 100kGy, 150kGy e 200kGy, o material foi previamente ensacado e irradiado no irradiador pelo processo de bandejas, onde o material fica acomodado em bandejas de aço inoxidável e percorre uma esteira de roletes e passam sob o defletor de elétrons do equipamento. O tempo e número de vezes que se realiza esta passagem faz com que de forma calculada se aumente as doses de radiação.

4.6 Resistência à tração

Durante a realização deste trabalho, houve uma grande dificuldade para se conseguir realizar ensaios com material injetado, o que fez com que o teste de resistência a tração fosse realizado de maneira comparativa entre os materiais irradiados e os não irradiados.

Para estes ensaios foram utilizadas amostras colhidas de uma bobina homogênea de PVC usada nos equipamentos de embalagem tipo “blister”, sendo portando as amostras totalmente compatíveis com o material colhido e moído que foram usados nos ensaios anteriores.

Todo material sofreu os mesmos processos dos ensaios anteriores como a dissolução e irradiação nas doses já comentadas. No caso da dissolução, como as amostras não continham alumínio, foi feito uma simulação com um banho de hidróxido de potássio com concentração 2M por um tempo de aproximadamente 30 minutos e com variações de temperatura iguais as da curva do método KOH 2M com agitação.

As amostras foram cortadas em filetes de 10mm de largura com aproximadamente 170mm de comprimento tendo a espessura média com valor de 0,8mm como mostradas na FIG.24.

FIGURA 24 - Amostras cortadas em filetes utilizados para os testes de resistência à tração

Foram realizados 5 ensaios para cada uma das doses de radiação bem como, com o material não irradiado.

Os testes de tração foram realizados em um equipamento de teste de tração e compressão marca Instron, modelo 5567 do CTR do IPEN-CNEN/SP.

4.7 Extrusão de tubos de PVC rígido

Depois de escolhido o melhor método e base para a realização da dissolução do alumínio foram realizados inúmeros ensaios para a obtenção de uma grande quantidade de material pronto para a reciclagem.

Foi realizada a dissolução de aproximadamente 200kg de material, obedecendo a técnica obtida em escala laboratorial, para que posteriormente fosse realizado o processo de extrusão, neste caso diretamente na fabricação de tubos e mangueiras.

A primeira etapa no processo após a dissolução foi a de secagem do material, pois a presença de água em qualquer processo de reciclagem de PVC provoca falhas e degradação que prejudicam e inviabilizam o resultado final.

Usou-se para a secagem do material um misturador intensivo, marca Mecanoplast com motor elétrico de 75cv e capacidade de carga de 100kg, acoplado

a um resfriador de mesma marca onde também se processou a aditivação do material.

O PVC rígido tem uma característica de fácil degradação ao ser reprocessado, para que isto não ocorra, foram adicionados aditivos para facilitar e viabilizar o reprocessamento.

Neste ensaio foram utilizados os seguintes aditivos:

- Estabilizante térmico a base de sais de chumbo tipo co-precipitado
- Lubrificante externo tipo estearina
- Carga tipo carbonato de cálcio
- Pigmento tipo negro de fumo

Foi elaborada uma formulação para a mistura dos materiais conforme apresentada na TAB. 2.

TABELA 2 – Formulação para fabricação de PVC rígido

Material	Quantidade
Sucata de PVC “blister”	100,0kg
Estabilizante térmico	2,0kg
Lubrificante externo	0,6kg
Pigmento	0,4kg
Carga	15,0kg

Com a mistura pronta, o próximo passo foi encaminhar o material para a extrusora para a fabricação de tubos de PVC (eletrodutos).

A extrusora utilizada foi da marca Pugliese tipo monorosca, com rosca e canhão de 60mm de diâmetro e L/D 28 onde o canhão é nitretado e a rosca cromada para maior durabilidade e para facilitar o escoamento do material durante o processamento. Esta linha de produção é acompanhada de: banheira de vácuo para a conformação e resfriamento do tubo, puxador tipo “catterpillar” composto por correias de borracha para fazer a tração dos tubos, gravador de marca e especificação do tubo, serra circular abrasiva tipo voadora para corte preciso das barras de tubos e calha tombadora exemplificadas na FIG.25.

FIGURA 25 – Linha de extrusão de tubos de PVC rígido

A curva de temperatura de operação da máquina (FIG.26), que é composta de 7 zonas de aquecimento, em todo o processo foi a seguinte:

Zona 1	- Alimentação	130°C
Zona 2	- Alimentação/Compressão	140°C
Zona 3	- Compressão	150°C
Zona 4	- Compressão/Dosagem	160°C
Zona 5	- Dosagem	165°C
Zona 6	- Cabeçote de conformação	180°C
Zona 7	- Bico do cabeçote	190°C

FIGURA 26 – Curva de temperatura x zona de aquecimento para extrusão de PVC rígido

Usou-se na extrusora uma matriz para tubos tipo eletrodutos medida $\frac{3}{4}$ de polegada com parede de 3,2 mm e medida externa de aproximadamente 26 mm.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Dissolução

Em todas os experimentos foram colocados os 146g do material moído “blister” composto por PVC/Alumínio.

Experiência I

A temperatura inicial deste experimento foi de 20°C.(FIG. 27) Houve no decorrer do experimento elevação da temperatura e pequena liberação de gases.

FIGURA 27 – Início da reação

A dissolução do alumínio chegou ao fim após 35 minutos a uma temperatura de 65°C gerando uma solução de cor cinza escura mostrada na FIG. 28. Observou-se ainda a sedimentação do PVC no fundo do béquer.

FIGURA 28 – Solução após a total dissolução do alumínio

A curva de temperatura x tempo desta reação (FIG. 29) bem como a sua equação de ajuste nos permite observar que o pico de temperatura ocorreu aos 34 minutos e a 68°C, estes dados são importantes para que haja, em escala industrial um aproveitamento da energia liberada da reação. Após o final da reação o material foi completamente despejado em uma peneira malha 14 (FIG. 30) sobre um béquer de 4000ml para a lavagem do PVC com água corrente comum. A parte em solução foi armazenada para a observação de precipitações. A precipitação ocorrida foi insignificante o que já era esperado, pelo fato demonstrado na reação (2) em excesso de reagente descrita anteriormente.

FIGURA 29 – Curva de temperatura x tempo da experiência I

FIGURA 30 – Peneira de malha 14 com PVC

O PVC resultante do experimento foi lavado em água corrente e deixado para escorrer. Não se notou características de degradação ou amarelecimento evidentes. A amostra foi recolhida em saco plástico e devidamente identificada.

Experiência II

Após um tempo de 4 minutos houve uma formação de gás mais intensa do que a ocorrida na experiência anterior, e um aumento de temperatura mais rápido como demonstrado na curva mostrada na FIG. 31.

FIGURA 31 – Curva de temperatura x tempo da experiência II

Devido a falta de homogeneização que é criada pela agitação, grandes quantidades de material ainda com alumínio encontravam-se sobrenadantes na solução, portanto não reagiam com a solução. Com isso, o tempo final desta experiência foi de 45 minutos. O processo a seguir, de retirada e lavagem, seguem os mesmos procedimentos anteriores. O material lavado apresentou um leve amarelecimento.

Experiência III

A temperatura inicial foi de 28°C, em apenas 1 minuto, a temperatura chegou a 36°C demonstrando uma reação exotérmica muito rápida (FIG. 32). Em apenas 7 minutos a temperatura se elevou a 85°C e com 11 minutos a reação terminou a 72°C. Houve uma grande liberação de gases o que obrigou a transferência das instalações para uma capela de fluxo laminar para filtragem dos gases.

FIGURA 32 – Curva de temperatura x tempo da experiência III

Apesar da reação ocorrer muito rapidamente, o PVC apresentou um amarelecimento acentuado indicando uma pequena degradação, a qual pode ser corrigida em uma aditivação posterior.

Experiência IV

A temperatura inicial foi de 25°C. A reação ocorreu de forma abrupta, com um rápido aumento de temperatura como demonstrado na curva mostrada na FIG. 34. O experimento foi encerrado em 23 minutos. Novamente a falta de agitação deixou para trás alguns pedaços com alumínio, mas em pequena quantidade que seria facilmente resolvido com agitação com espátula manual.

FIGURA 33 – Reação com NaOH 2M sem agitação com formação de gases

FIGURA 34 – Curva de temperatura x tempo da experiência IV

O PVC após a sua lavagem apresentou a mesma característica de amarelecimento observado anteriormente. Mesmo com uma lavagem com agitação, o material continuou apresentando amarelecimento indicando leve degradação.

Experiência V

A temperatura inicial foi de 28°C e com a agitação demorou-se a ter uma elevação de temperatura, pela curva mostrada na FIG. 35 pode-se observar que esta elevação ocorreu de maneira suave, uma vez que nas anteriores esta elevação de temperatura ocorria rapidamente. A reação teve fim aos 47 minutos.

FIGURA 35 – Curva de temperatura x tempo da experiência V

Experiência VI

A temperatura inicial foi de 29°C conforme a curva mostrada na FIG. 36, foi maior o aumento de temperatura, porém a característica observada nas experiências anteriores de que a falta de agitação ocasionava um maior tempo para que ocorresse a total dissolução se confirmou chegando ao fim em 51 minutos do início.

FIGURA 36 – Curva de temperatura x tempo da experiência VI

Experiência VII

A temperatura inicial foi de 24°C e a temperatura evoluiu conforme a curva mostrada na FIG. 37.

FIGURA 37 – Curva de temperatura x tempo da experiência VII

Houve um pico de temperatura de 75°C aos 26 minutos, e o fim da reação se deu aos 29 minutos e temperatura de 70°C. Também houve liberação de gases.

Ao fim do experimento o material foi lavado conforme já explicado, e com isso observou-se que o PVC se mostrou exatamente como no início, ou seja, não houve visualmente, nenhuma degradação, ocorrendo apenas a dissolução do alumínio.

Experiência VIII

A temperatura inicial foi de 28°C, e muito rapidamente houve formação de gases, em apenas 5 minutos. Ao contrário do que aconteceu com o experimento utilizando hidróxido de sódio a elevação de temperatura levou 15 minutos para começar e aos 20 minutos ocorreu a maior temperatura de 72°C conforme está mostrado na FIG. 38.

FIGURA 38 – Curva de temperatura x tempo da experiência VIII

O final da reação ocorreu depois de 35 minutos do início com a temperatura atingindo 63°C. Posteriormente o material foi lavado e armazenado conforme procedimento anterior, observando-se uma ligeira mudança no PVC, uma leve opacidade.

Ao final das experiências todas as amostras foram colocadas lado a lado para observação da degradação ocorrida, foram nove amostras, incluindo uma amostra do material sem alumínio que foi coletado previamente justamente para esta comparação.

Pode ser observado na TAB.3 a classificação com relação ao tempo de término das reações dos experimentos realizados.

TABELA 3 – Classificação por tempo das experiências.

	Nº	Base	Concentração	Agitação	Minutos
1º	III	NaOH	2 Molar	SIM	11
2º	IV	NaOH	2 Molar	NÃO	23
3º	VII	KOH	2 Molar	SIM	29
4º	VIII	KOH	2 Molar	NÃO	35
5º	I	NaOH	1 Molar	SIM	35
6º	II	NaOH	1 Molar	NÃO	45
7º	VII	KOH	1 Molar	SIM	47
8º	VIII	KOH	1 Molar	NÃO	51

De acordo com a TAB. 3, observou-se que o uso do hidróxido de sódio fez com que as reações levassem menos tempo para se concretizarem em ambas as concentrações estudadas de 1 e 2M, mostrando ser este reagente o mais eficiente. Porém quando a qualidade entra como um fator determinante, a escolha se deu para o hidróxido de potássio que não interferiu nas características do PVC. Todas as experiências realizadas com o hidróxido de sódio apresentaram certo nível de degradação como as realizadas sem agitação apresentando as maiores interferências, isto se deu devido ao maior tempo de exposição do PVC à solução. Já no uso do hidróxido de potássio a degradação foi de branda a nula, sendo a relação 2M com agitação a que apresentou nenhuma degradação e a 1M sem agitação a maior degradação do PVC devido ao tempo excessivo de exposição.

No decorrer dos ensaios, algumas experiências foram realizadas fora do planejamento experimental que valem a pena serem descritas.

Um fato importante foi a verificação da capacidade da solução em realizar mais de uma dissolução da carga proposta (146g de “blister”) sem nenhuma reativação ou renovação da quantidade de hidróxido presente, ou seja, após a primeira carga removida e filtrada uma nova carga foi inserida na solução para que fosse dissolvida. O resultado desta experiência mostrou-se satisfatório, pois se conseguiu 3 cargas em uma única pesagem de hidróxido, sendo que com o

hidróxido potássio foi o que melhor se comportou. Entende-se por melhor uma uniformidade nos tempos de cada dissolução. Ao final da terceira carga a solução mudou de cor, perdendo o tom cinza e adquirindo um leve amarelecimento, com formação de precipitado de hidróxido de alumínio de acordo com a equação de equilíbrio (reação 1), demonstrando o fim do excesso de reagente, como mostrado na FIG. 39.

FIGURA 39 - Solução em equilíbrio com precipitação do hidróxido de alumínio

Mais um resultado interessante, foi observado que o aumento de temperatura da solução diminuiu consideravelmente o tempo de dissolução, mostrando que a recuperação da energia exotérmica para o aquecimento de um banho posterior é viável.

5.2 Irradiação

A primeira característica do “blister” moído irradiado observada foi a mudança bem prenunciada da coloração (FIG. 40) quando comparado ao material não irradiado (FIG. 41) sendo que quanto maior a dose mais escuro, chegando ao preto na dose de 200kGy conforme mostrado na FIG. 40.

FIGURA 40 – “Blister” moído irradiado com dose de 200kGy

FIGURA 41- “Blister” moído não irradiado

Após a realização das irradiações o material foi processado novamente pelo processo de dissolução do alumínio, para que fosse possível a observação de diferenças de comportamento dos materiais irradiados e não irradiados.

Como o processo de dissolução do material não irradiado já havia sido estudado antes da irradiação ser realizada, optou-se pela realização única e exclusivamente do método usando o hidróxido de potássio com concentração 2M e com o sistema em agitação. Desta forma foi obtida uma média de temperatura x tempo dos quatro experimentos que resultou na curva mostrada na FIG. 42.

FIGURA 42 – Curva de temperatura x tempo do processo de dissolução do “blister” moído tratado com KOH e irradiado

A irradiação das amostras não trouxe diferença alguma no que diz respeito à dissolução do alumínio, não houve desprendimento do alumínio, nem qualquer outra alteração que realmente mostrasse benefícios gerados pela irradiação em qualquer uma das doses escolhidas. Porém nos ensaios de tração o material irradiado apresentou comportamento diferente do não irradiado, os quais serão discutidos na continuação.

5.3 Resistência à tração

Nas FIG. 43 a 48 e nas TAB. 4 a 9 são mostrados os gráficos e apresentados os resultados obtidos nos ensaios de resistência à tração de diferentes tipos de amostras de PVC, respectivamente.

FIGURA 43 – Curva de tensão de ruptura x deformação de filme de PVC não irradiado sem tratamento

TABELA 4 – Dados obtidos no ensaio de resistência à tração de filme de PVC não irradiado sem tratamento

Amostra sem tratamento e não irradiada	Deformação na ruptura (mm)	Tensão de ruptura (MPa)
1	> 28,61	43,21
2	> 22,17	44,74
3	> 28,77	44,96
4	> 25,40	47,10
5	> 24,43	42,58
Média	> 25,88	44,52
Desvio Padrão	2,82	1,76
Máximo	28,77	47,10
Mínimo	22,17	42,58
Coeficiente de Variação	10,91	3,95

FIGURA 44 – Curva de tensão de ruptura x deformação de filme de PVC tratado com KOH 2M e não irradiado

TABELA 5 – Dados obtidos no ensaio de resistência à tração de filme de PVC tratado com KOH 2M e não irradiado

Amostra PVC c/KOH 2M não irradiada	Deformação na ruptura (mm)	Tensão de ruptura (MPa)
1	> 10,50	48,35
2	> 28,05	46,49
3	> 39,07	46,77
4	> 20,29	42,75
5	> 23,31	48,52
Média	> 24,24	46,58
Desvio Padrão	10,48	2,32
Máximo	39,07	48,52
Mínimo	10,50	42,75
Coefficiente de Variação	43,24	2,90

FIGURA 45 – Curva de tensão de ruptura x deformação de filme de PVC tratado com KOH 2M e irradiado com 50kGy

TABELA 6 – Dados obtidos no ensaio de resistência à tração de filme de PVC tratado com KOH 2M e irradiado com 50kGy

Amostra PVC c/KOH 2M dose 50kGy	Deformação na ruptura (mm)	Tensão de ruptura (MPa)
1	> 15,33	43,01
2	> 21,90	45,47
3	> 23,01	46,27
4	> 33,42	46,86
5	> 33,61	45,27
Média	> 25,45	45,38
Desvio Padrão	7,93	1,47
Máximo	33,61	46,86
Mínimo	15,33	43,01
Coeficiente de Variação	31,14	3,23

FIGURA 46 – Curva de tensão de ruptura x deformação de filme de PVC tratado com KOH 2M e irradiado com 100kGy

TABELA 7 – Dados obtidos no ensaio de resistência à tração de filme de PVC tratado com KOH 2M e irradiado com 100kGy

Amostra PVC c/KOH 2M dose 100kGy	Deformação na ruptura (mm)	Tensão de ruptura (MPa)
1	> 40,81	42,41
2	> 32,96	45,13
3	> 46,13	43,83
4	> 27,11	47,07
5	> 30,45	44,60
Média	> 35,49	44,61
Desvio Padrão	7,81	1,71
Máximo	46,13	47,07
Mínimo	27,11	42,41
Coeficiente de Variação	21,99	3,84

FIGURA 47 – Curva de tensão de ruptura x deformação de filme de PVC tratado com KOH 2M e irradiado com 150kGy

TABELA 8 – Dados obtidos no ensaio de resistência à tração de filme de PVC tratado com KOH 2M e irradiado com 150kGy

Amostra PVC c/KOH 2M dose 150kGy	Deformação na ruptura (mm)	Tensão de ruptura (MPa)
1	> 34,98	43,95
2	> 30,34	42,89
3	> 29,01	37,51
4	> 25,14	35,42
5	> 33,46	42,04
Média	> 30,58	40,36
Desvio Padrão	3,86	3,69
Máximo	34,98	43,95
Mínimo	25,14	35,42
Coefficiente de Variação	12,64	9,15

FIGURA 48 – Curva de tensão de ruptura x deformação de filme de PVC tratado com KOH 2M e irradiado com 200kGy

TABELA 9 – Dados obtidos no ensaio de resistência à tração de filme de PVC tratado com KOH 2M e irradiado com 200kGy

Amostra PVC c/KOH 2M dose 200kGy	Deformação na ruptura (mm)	Tensão de ruptura (MPa)
1	> 112,39	46,58
2	> 132,62	45,00
3	> 132,79	40,18
4	> 129,27	45,07
5	> 116,47	43,61
Média	> 124,71	44,09
Desvio Padrão	9,60	2,42
Máximo	132,79	46,58
Mínimo	112,39	40,18
Coefficiente de Variação	7,70	5,50

Os resultados obtidos no teste de resistência à tração bem como pôde ser observado nas amostras na FIG. 49, mostraram que o alongamento do PVC irradiado foi maior quanto maior a dose de radiação indicando uma cisão das moléculas na cadeia polimérica do PVC. Em relação à tensão na ruptura não foi observada uma diferença significativa entre as amostras não irradiadas e irradiadas a diferentes doses.

FIGURA 49 – Comparativo entre amostras de PVC não irradiada e irradiadas a diferentes doses antes e após o ensaio de tração

5.4 Extrusão de tubos de PVC rígido

Como descrito anteriormente, a primeira etapa para a realização da extrusão foi a secagem no misturador intensivo, após aproximadamente 15 minutos de mistura o material já se encontrava seco e a uma temperatura próxima a 70°C. Após esta etapa o material ficou em agitação leve por alguns minutos no resfriador para homogeneização e completa secagem.

A sucata de PVC “blister” foi colocada novamente no misturador intensivo onde foram colocados aos poucos todos os outros componentes da formulação, esta mistura levou 12 minutos para chegar ao ponto de descarga com ótima homogeneização e incorporação dos estabilizantes e lubrificantes à sucata de PVC “blister”. O material permaneceu mais 10 minutos no resfriador para que perdesse

temperatura e assim fosse evitada a formação de placas e bolas de material que impedem o escoamento do material no funil da extrusora.

Alguns ajustes de processo são necessários durante a extrusão de tubos e variam de máquina para máquina, portanto ficam realmente difíceis de serem mensurados, pequenos ajustes de centralização da matriz se fizeram necessários, mas nada que comprometesse o ensaio.

Como o equipamento se trata de uma máquina de produção industrial, a operação de extrusão da formulação inteira descrita anteriormente se deu em aproximadamente 1 hora, atingindo assim o objetivo proposto.

Na extrusão de tubos, o material se mostrou excelente, não necessitando de pré-granulação para que seu uso fosse viável na fabricação de tubos do tipo eletroduto de PVC rígido. Alguns itens da formulação e do processo aqui usados podem ser alterados, pois o material plástico se comporta de maneiras diferentes em equipamentos diferentes, isto se deve especialmente as características construtivas das máquinas e seu estado de conservação levando em conta a folga entre canhão e rosca, precisão dos equipamentos de leitura de temperatura, umidade relativa do ambiente, temperatura da massa no misturador bem como a secagem do material.

6 CONCLUSÃO

Com a observação dos resultados, os experimentos mostraram que a utilização do hidróxido de sódio a 2M com agitação foi o sistema mais rápido para o processo de dissolução do alumínio. Porém, o uso desta base fez com que ocorresse o amarelecimento do PVC o que muda as características do material. Sendo assim, o uso do hidróxido de potássio com concentração 2M e agitação foi o sistema que melhor se comportou, pois obteve-se a dissolução com baixos tempos e não houve degradação do material fazendo-se assim com que o produto final tivesse características semelhantes às do material que não sofreu ação do processo de dissolução.

A irradiação por feixe de elétrons não trouxe benefícios com relação à separação do PVC e do alumínio, mas apresentou mudanças nas características mecânicas do PVC, aumentando o alongamento com o aumento da dose indicando uma cisão das cadeias de PVC.

Após a dissolução do “blister”, pelo sistema utilizando hidróxido de potássio com concentração 2M e agitação, o processo de reciclagem do PVC pelo processo de extrusão mostrou-se muito eficiente confirmando a viabilidade deste processo.

A aplicação deste processo de dissolução, aliada a reciclagem mecânica do PVC, produziu um material e um produto final de boa qualidade e que pode ser ampliado para uma escala industrial facilmente, transformando “lixo” em uma matéria prima reaproveitável.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) das amostras de PVC não irradiadas e irradiadas a diferentes doses de radiação.
- Estudos de outras propriedades mecânicas de amostras de PVC não irradiadas e irradiadas a diferentes doses de radiação.
- Purificação do hidróxido de alumínio obtido na separação dos componentes dos “blister”.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. JARDIM, N.S.; WELLS, C.; CONSONI, A.J.; AZEVEDO, R.M.B. **Gerenciamento Integrado do lixo municipal**. 2. ed. (Publicação IPT 2622), São Paulo, SP: IPT/CEMPRE, 2000.
2. EMBALAGENS DESAMBIENTADAS. **Plásticos em Revista**, São Paulo, n. 397, 1995.
3. DUNN, T.J. **Multilayer flexible packaging**. In: BRODY, A.L., MARSH, K.S. Encyclopedia of Packaging Technology. 2 ed. New York, N.Y.: Wiley, 1997.
4. WIEBECK, H.; PIVA M.A. **Reciclagem do Plástico**. São Paulo, SP: Ed. Artliber, 2004.
5. MANO, E. B.; MENDES, L. C. **Introdução a polímeros**. 2. ed. São Paulo, SP: Ed. Edgard Blücher, 2004.
6. CURSO BÁSICO INTENSIVO DE PLÁSTICOS. **Processamento de Polímeros Jornal de Plásticos** – INP (Instituto Nacional do Plástico), 2000.
7. WIEBECK, H.; PIVA M.A. **Reciclagem Mecânica do PVC**. CD – ROM Instituto do PVC, 2001.
8. NUNES, L.R. **Tecnologia do PVC**. São Paulo, SP: ProEditores, 2002.
9. HARADA, J. **Curso Processamento de Plásticos**. São Paulo, Cia Brasileira de Estireno, 1995.
10. CONHEÇA O ALUMÍNIO E SUAS APLICAÇÕES, Associação Brasileira de Alumínio, – Boletim Informativo . Consultado em agosto de 2003 no endereço eletrônico <http://www.abal.org.br/conheca/index.cfm?frame=conheca>
11. *Grande Enciclopédia Larousse*, v.2, Ed. Nova Cultural, 1998.
12. SHREVE NORRIS, R.; BRINK A.J. **Indústria de Processos Químicos**. 4^a ed., Ed. Guanabara – Koogan, 1997.
13. PILCKHIK, **Phamaceutical Technology**, Periódico – Edição Abril, p. 18-28, 2001.
14. GENTIL, V. **Corrosão**, 3 ed., Ed LTC, 1996.
15. EVANS, U.R. **The Corrosion and Oxidation of Metals: Scientific Principles and Pratical Applications.**, London: Edward Arnold Publishers, 1967.
16. CONCISE ENCYCLOPEDIA OF POLYMER PROCESSING AND APLICATION; **Radiations Effects On Polymers**. New York, N.Y.: Pergamom Press, p.581-588, 1992.

17. SPINKS, J. W. T.; WOODS, R. J. ***An Introduction to radiation Chemistry***. New York, N.Y., John Wiley e Sons Inc, 1990.
18. O'DONNELL, J.H.; SANGSTER, D.F. ***Principles of Radiation Chemistry***. New York, N.Y.: Arnold E., 1970.
19. MIRANDA, L.F. ***Estudos de Parâmetros de Processo para a síntese de Membranas Hidrofílicas a Base de Poli (N-Vinil-2-Pirrolidona)***. Tese de Doutorado. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo 1999.
20. EISENBERG, R.; RESNICK, R. ***Física Quantidade***. Rio de Janeiro, RJ.: Ed Campus, 1988.
21. LANDI, T.R.L. ***Estudo do Efeito da Radiação Ionizante por Feixe de Elétrons sobre o Terpolímero Acrilonitrila Butadieno Estireno ABS***. Dissertação de Mestrado, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2003.
22. FERRO, W.P. ***Estudo do Efeito da Radiação Ionizante nas Propriedades da Poliamida 6.6 com e sem Reforço de fibra de vidro***. Dissertação de Mestrado. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo, 2003.
23. CLELAND, M. R. ***High Power Electro Acceleration for Industrial Radiation Processing***. In SINGH, A.; SILVERMAN, J. Editors. ***Radiation Processing of Polymer***, Ch. 3. New York, N.Y.: Oxford University Press, 1992.
24. SINGH, A.; SILVEMAN, J. ***Radiation Processing on Overview*** - in Singh, A. & Silveman, J. Editors. ***Radiation Processing of Polymers***. Ch.1 New York: Oxford University Press, 1992.
25. AECL – IMPELA. ***Electron Acceleration*** - Atomic Energy of Canada limited, Whiteshell Laboratories. Pinawa, Manitoba, Canadá, 1993.
26. VOGUEL, A.I. ***Química Analítica Qualitativa***, Ed. Mestre Jou, 5 ed.1997