

CARACTERÍSTICAS DO POLIÉSTER REFORÇADO COM FIBRA DE
VIDRO PARA APLICAÇÕES EM COLETORES SOLARES TÉRMICOS

44/78

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE CAMPINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

CARACTERÍSTICAS DO POLIÉSTER REFORÇADO COM FIBRA
DE VIDRO PARA APLICAÇÕES EM COLETORES SOLARES TÉRMICOS

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual de Campinas, para obtenção do Título de MESTRE em ENGENHARIA MECÂNICA, na modalidade "MATERIAIS E PROCESSOS"

Elias Hage Júnior

Orientador: Profº Dr. Augusto Ruy de Oliveira Pinto

- CAMPINAS -

1978

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

Dedico o presente trabalho
à minha esposa GRAÇA e minha
filha GRACIELLI pela paciên
cia, compreensão e apoio.

CARACTERÍSTICAS DA RESINA POLIÉSTER REFORÇADA COM
FIBRA DE VIDRO PARA APLICAÇÕES EM COLETORES SOLARES TÉRMICOS

RESUMO

No Brasil o uso de coletores para captação da energia solar, planos e com concentração, vem se desenvolvendo a passos largos. O uso de materiais plásticos nestes tipos de coletores vem se difundindo cada vez mais, principalmente o do Poliéster Reforçado com Fibra de Vidro empregado como cobertura transparente. Entretanto, pouco se sabe de concreto sobre as limitações sofridas por esse material durante sua exposição às intempéries.

Este trabalho procura caracterizar o Poliéster Reforçado com Fibra de Vidro sob o ponto de vista de propriedades óticas (Transmitância) e sob o ponto de vista de propriedades mecânicas, quando este é submetido a um envelhecimento acelerado em laboratório.

Neste estudo foram utilizadas resinas comerciais de Poliéster, dentre elas; um tipo próprio para ser aplicado ao ar livre, um tipo de resina caracterizada pela alta transparência sem preparo especial para ser usada sob ação de intempéries e um tipo de resina para uso geral particularizada por suas boas propriedades mecânicas.

Após um levantamento das propriedades ótica e das propriedades mecânicas, antes e após tempos variados de exposição num Weather-Ometer, com diferentes tipos de reforços em fibra de vidro, encontrou-se características próprias de cada tipo de resina.

Com estes dados pode ser feita uma análise indicando qual o tipo de resina Poliéster comercial mais adequado à aplicação como cobertura transparente, não só em coletores solares, como em qualquer outra aplicação em condições de trabalho semelhantes.

CHARACTERISTICS OF FIBERGLASS REINFORCED POLYESTER
FOR APPLICATION IN SOLAR COLLECTORS

A B S T R A C T

The use of solar collectors, flat-plate or focusing, is growing fast. The use of plastic materials is becoming more popular, more particularly in the use of fiberglass reinforced polyester. However, little is known about the limitations of the material with respect to the outside exposure.

The purpose of this work is to characterize fiberglass reinforced polyester with respect to optical properties (transmittance) and mechanical properties after exposure to accelerated ageing as measured in the laboratory.

In this work two commercial polyester resins were used: one for outdoor use, one with high transparency, without prepared to stand climatic conditions, the other for general use characterized by good mechanical properties.

After a study of the optical and mechanical properties before and after exposure to the Weather-Ometer for different times, the characteristics of each resins were determined.

With this data it is possible to decide which is the most adequate type of resin to be used as transparent cover, not only in solar collectors, but also in other applications with outside exposure.

ÍNDICE

DEDICATÓRIA	i
AGRADECIMENTOS	ii
RESUMO	iii
ABSTRACT	iv

SECÇÕES

1- INTRODUÇÃO	01
1.1 Coletores Solares Térmicos	01
1.1.1 Coletores Planos (Flat-Plate).	03
1.1.2 Coletores com Concentração	04
1.2 Materiais Empregados na Construção de Coletores Solares . .	
Térmicos	05
1.3 Limitações do Uso destes Materiais	06
2- DEGRADAÇÃO DOS PLÁSTICOS	09
2.1 Teoria da Degradação Fotoquímica	09
2.2 Sistemas de Estabilização Contra Degradação UV	11
2.2.1 Por Reflexão	11
2.2.2 Por Absorção	12
2.2.3 Por Revestimento	12
2.2.4 Por Desativação	12
2.2.5 Por Inibição de Radial-Livre	13
2.3 Influência da Degradação dos Plásticos, como Cobertura . .	
Transparente, num Coletor Solar Térmico	13

3- RESINA POLIÉSTER	16 ✓
3.1 Estrutura da Resina Poliēster	16 ✓
3.1.1 Tipos de Resinas Poliēster	18 ✓
3.1.2 Cura da Resina Poliēster	21 ✓
3.2 Estrutura do Poliēster Reforçado com Fibra de Vidro	24 ✓
3.3 Exposição do Poliēster às Intempēries	28 ✓
4- ALTERNATIVAS PARA O ESTUDO DO ENVELHECIMENTO DE UM MATERIAL	34
4.1 Envelhecimento Natural	34
4.2 Envelhecimento Natural-Acelerado	34
4.3 Envelhecimento Acelerado em Laboratōrio	35
5- PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	37
5.1 Introduçāo	37 ✓
5.2 Preparaçāo dos laminados de poliēster reforçado com fibra . de vidro	37 ✓
5.2.1 Materiais Empregados	37
5.2.2 Composiçāo dos laminados poliēster - fibra de vidro	38 ✓
5.2.3 Condiçōes de Cura	39 ✓
5.2.4 Escolha da Espessura do Laminado	41
5.2.5 Fabricaçāo Propriamente Dita dos Laminados	42
5.3 Ensaio de Envelhecimento em Laboratōrio	45
5.3.1 Equipamento	45
5.3.2 Corpos de Prova	48
5.3.3 Procedimentos	48
5.4 Medida das Propriedades Desejadas	49
5.4.1 Medida da Transmitāncia	49
5.4.2 Medida da Resistēncia à Traçāo e Mōdulo de Elasticidade	52
5.4.3 Medida da Resistēncia ao Impacto	54
6- RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
6.1 Transmitāncias	57

6.1.1 Resultados	57
6.1.2 Discussão	64
6.2 Resistência à Tração e Módulo de Elasticidade	71
6.2.1 Resultados	71
6.2.2 Discussão	71
6.3 Resistência ao Impacto	72
6.3.1 Resultados	72
6.3.2 Discussão	75
7- CONCLUSÕES	78
8- LINHAS DE PESQUISA DECORRENTES DESTE TRABALHO	80
BIBLIOGRAFIA	81
APÊNDICE 1	84
APÊNDICE 2	86

1- INTRODUÇÃO

1.1 Coletores Solares Térmicos

O consumo mundial de energia está se desenvolvendo numa taxa alarmante, principalmente através das fontes energéticas; petróleo, carvão e gás. (Tabela 1.1)

Como já se tem ciência, alguns destes combustíveis fósseis tem seus dias contados para uso como fonte energética. (Tabela 1.2)

TABELA 1.1 - PERSPECTIVA DO CONSUMO MUNDIAL DE ENERGIA

Ano	Consumo de Energia ($\times 10^{18}$ BTU)
1970	0,18
2000	0,70
2070	9,0

Em vista disso um número muito grande de pesquisadores em todo mundo vem procurando, por caminhos práticos, utilizar algumas fontes de energia para substituir as já escassas atualmente.

TABELA 1.2 - RESERVAS MUNDIAIS DE ENERGIA

Origem	Ano de Esgotamento
Carvão 41 200 $\times 10^6$ toneladas	2500
Petróleo 76 200 $\times 10^6$ toneladas	2100
Gas Natural 49 900 000 $\times 10^6$ m ³	2015
Urânio 761 400 toneladas	2000

Estudos tem mostrado que fontes de energia: nuclear, hidroelétrica, hidrotérmica, vento e solar são as que irão proporcionar solução para esta deficiência (Fig. 1.1)

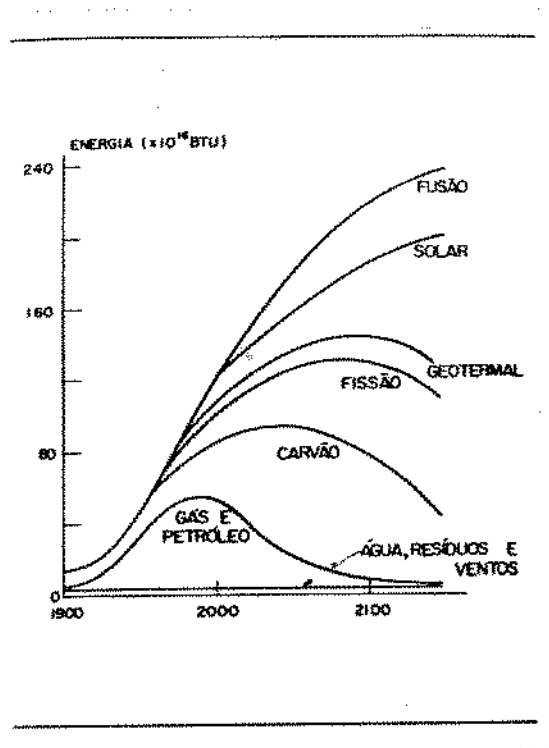


Fig. 1.1 - Perspectivas da Utilização das Várias Fontes Energéticas

Muitos estudiosos, na procura da alternativa energética, acreditam que a potência solar representa a maior esperança para a solução energética a longo prazo. Isto devido ao fato que, diferente das outras formas de energia, a utilização da energia solar não é acompanhada de sub-produtos indesejáveis à natureza humana. E, além desse fato, a luz solar não é limitada geograficamente.

A conversão de energia solar tem sido aplicada como fonte energia elétrica, térmica e mecânica. Para estas aplicações a energia solar é captada através coletores térmicos e de células solares (fotovoltaico)

Dentre os coletores térmicos existem dois tipos básicos: coletor solar plano e coletor solar com concentração.

1.1.1 Coletores Solares Planos (FLAT PLATE)

Este tipo de coletor consiste de uma placa plana, com uma superfície absorvedora (negra), que absorve a radiação solar. Junto a esta placa se encontra soldado um tubo metálico, em forma de serpentina, pelo qual circula um fluido de trabalho (água ou ar). Este fluido é quem absorve o calor da placa e transfere para o local de armazenagem, esta energia por sua vez vai aquecer ou esfriar algum local.

Por uma questão de eficiência térmica todo este sistema (placa e tubo) se encontra dentro de uma caixa isolada térmicamente. Somente a área de absorção fica exposta e é protegida por uma cobertura transparente à radiação solar. Esta cobertura além de proteger a superfície negra, também aumenta a eficiência térmica do processo Fig.

1.2 A)

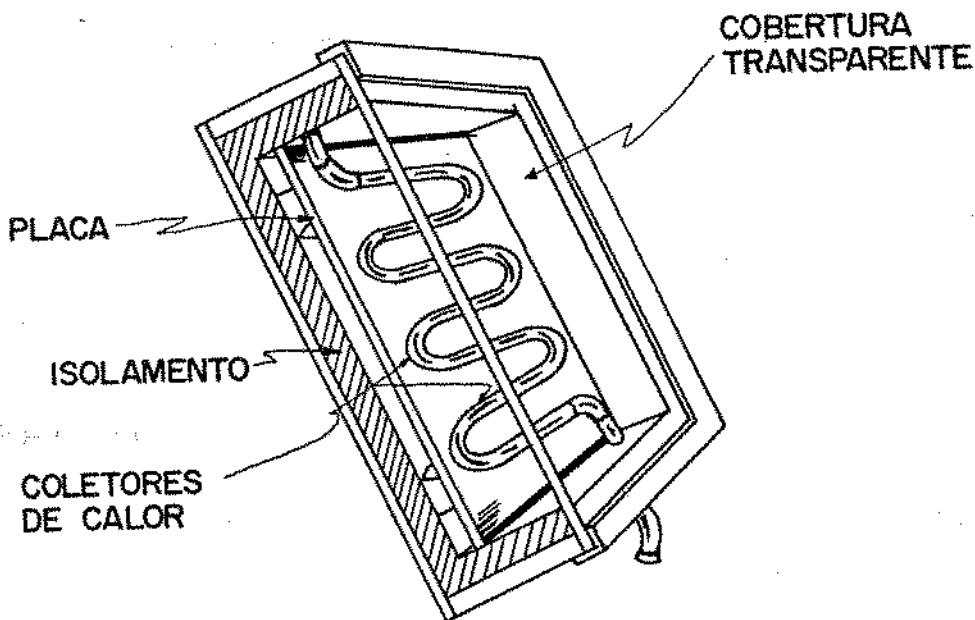


Fig. 1.2 A - Coletor Solar Plano

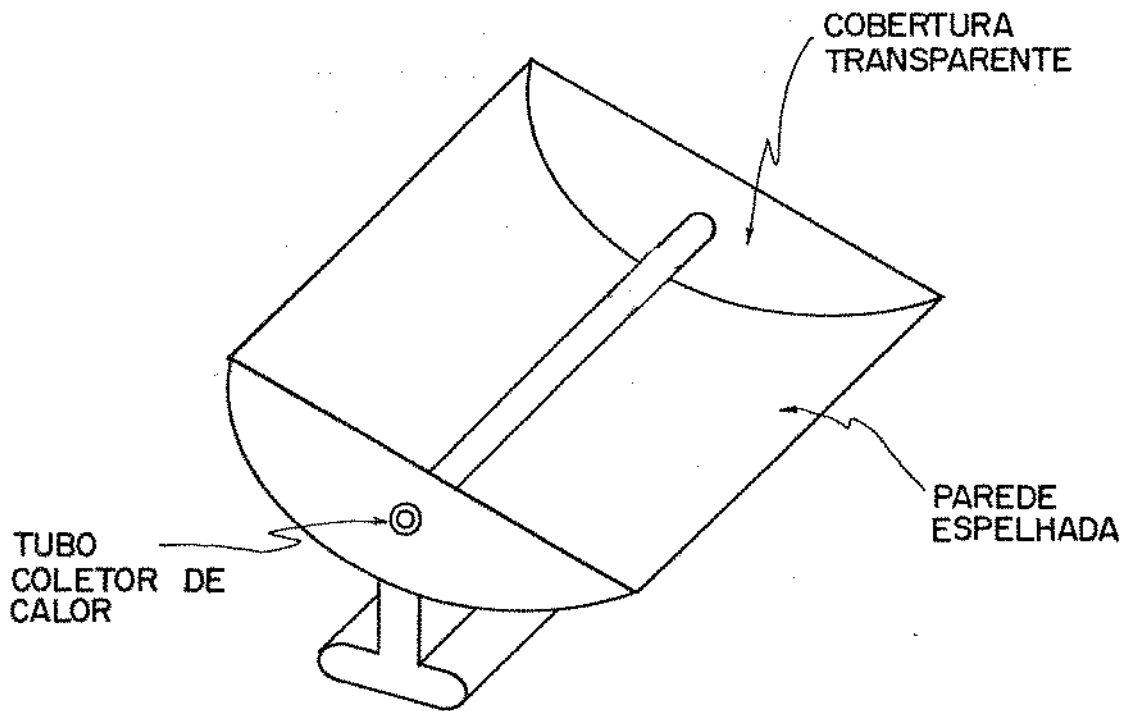


Fig. 1.2 B - Coletor com Concentração

1.1.2 Coletor Térmico com Concentração

O princípio básico deste tipo de coletor é concentrar a energia solar numa área de absorção bem menor que os coletores planos. Desta maneira há um aumento acentuado na temperatura do fluido de trabalho.

Este coletor consiste de um espelho parabólico que reflete e concentra em seu foco toda energia incidente. No foco dessa superfície espelhada se encontra um tubo, com superfície absorvedora, com fluido circulando internamente. (Fig. 1.2 B)

Este coletor pode ter uma cobertura transparente com a finalidade principal de proteger a superfície espelhada das intempéries.

Existem algumas diferenças básicas entre estes tipos de coletor

res: o coletor de concentração requer luz direta do sol, assim em dias nublados sua eficiência térmica é nula, enquanto o coletor plano aquece seu fluido mesmo com luz difusa; o coletor de concentração atinge temperaturas bem superiores aos coletores planos; o coletor plano tem um sistema de aquecimento menos sofisticado e portanto de custo mais baixo que o coletor de concentração.

Enfim estes dois tipos de coletores são muito usados, cada um com seu nível característico de temperatura de trabalho. (2)

1.2 *Materiais Empregados na Construção de Coletores Solares Térmicos*

O coletor solar térmico tem em seu desenvolvimento um relacionamento muito grande com os materiais empregados em sua construção, pois estes determinam a viabilidade da implantação da Energia Solar como fonte de energia térmica.

Estes materiais devem ser aplicados de maneira a atingir alguns objetivos principais, tais como: excelente eficiência térmica, baixo custo de fabricação e implantação, durabilidade, fácil manuseio, etc.

Três principais classes de materiais estão envolvidas na construção de um coletor solar térmico: cerâmicos - principalmente, o vidro empregado como cobertura transparente, como espelho de concentração ou como isolante térmico; os metais - utilizados estruturalmente ou como superfícies absorvedoras e condutoras de calor; os plásticos - aplicados sob a forma de isolante térmico, elemento estrutural, ou cobertura transparente.

Os vários componentes de um coletor são escolhidos visando do atingir os objetivos principais acima expostos. Desta maneira a escolha tem um caráter bastante técnico e principalmente econômico, que

por sua vez depende das diferentes regiões geográficas: O plástico é um dos materiais com uma potencialidade muito grande na construção destes componentes, podendo, como já foi dito, atuar estruturalmente, como isolante térmico e como cobertura.

Hoje existem inúmeras pesquisas, em projetos de coletores, tentando substituir algumas partes metálicas ou cerâmicas por materiais plásticos. Em vista disso, muitos destes componentes poliméricos já vem sendo empregados correntemente. Dentre estes materiais temos: Policarbonato, Polimetacrilato de metila (Acrílico), Polietileno, Polipropileno, Policloreto de vinila, Polifluoreto de vinila (Tedlar), Polietileno tereftalato (Mylar), Poli-tetra-fluoroetileno (Teflon), Polí siloxano de metila e Poliéster Reforçado com Fibra de Vidro (1).

Estes materiais podem ser utilizados estruturalmente (Poliéster Reforçado com Fibra de Vidro) ou como cobertura transparente (Mylar). Quando aplicados como cobertura podem estar na forma de chapas (Acrílico) ou filmes (Polietileno).

O material mais tradicional em cobertura transparente é sem dúvida o vidro, mas este vem sendo substituído pelos plásticos por algumas razões tais como: peso específico elevado, fragilidade, alto custo, etc.

O alumínio é o principal metal empregado como material estrutural devido ao seu peso específico ser um dos mais baixos dentre os metais. Outro componente metálico é a chapa absorvedora e os tubos condutores do fluido, estes são construídos de cobre ou ferro galvanizado.

1.3 Limitações do Uso Destes Materiais

Uma necessidade operacional requerida pelos componentes de coletores solares é a de que eles tenham uma boa resistência às in

tempéries. Portanto, a seleção de materiais funcionais para estes com
ponentes deve levar em conta a durabilidade à exposição, além de suas
requisitadas propriedades óticas ou térmicas.

Predições da vida de tais componentes são muito importan
tes para que se possa estabelecer ciclos de operações ótimas. As per
das nas propriedades óticas e térmicas, tais como: transparência da
cobertura, refletância dos espelhos de concentração e absorvância da
superfícies negras; podem se transformar diretamente em decréscimos
na eficiência e em aumento no custo da conversão de energia.

Além disso, algumas características físico-mecânicas, são
muito importantes pois podem determinar limitações na aplicação, den
tre elas: alto peso específico, baixa resistência ao impacto, diferen
ça muito grande do coeficiente de expansão térmica entre dois comp
onentes.

O vidro pode ser empregado em coletores para as seguintes
finalidades: cobertura transparente, isolamento térmico (lã de vidro)
e espelhos refletores. Entretanto tem suas maiores limitações quando
utilizado como cobertura transparente e espelhos, pois seu pêso espe
cífico é alto, sua fragilidade é acentuada e seu custo é elevado, prin
cipalmente para enormes áreas de exposição. Embora apresente vanta
gens, tais como: devido à sua rigidez, não necessita de muitos pontos
de apoio para manter sua superfície de exposição paralela à área de
absorção de calor; o vidro além de possuir alta transmitância à radia
ção solar, tem alta absorvância a comprimentos de onda infravermelhos
longos, tornando-o opaco à radiação reemitida pela placa absorvedora,
e, o vidro também exhibe excepcional resistência às intempéries.

A principal limitação que os materiais plásticos, como
componentes de coletores solares, sofrem é a ocorrência de um fenôme
no de deterioração (DEGRADAÇÃO) que causa perdas em propriedades es
senciais, quando em exposição a raios solares.

A maioria dos materiais poliméricos, tanto na forma de filmes como na forma de chapas, apresentam alta transmitância para os comprimentos de onda entre 5 e 25 μm , originários na reemissão do calor pela superfície negra. Não retendo desta forma o calor fornecido por esta faixa de radiação. Esta é outra desvantagem quando se usam plásticos transparentes para cobertura de coletores planos.

A degradação fotoquímica nos polímeros modifica algumas propriedades óticas e mecânicas (3,22). Este efeito pode ser observado na figura 1.3, para alguns plásticos com grande potencial de aplicação.

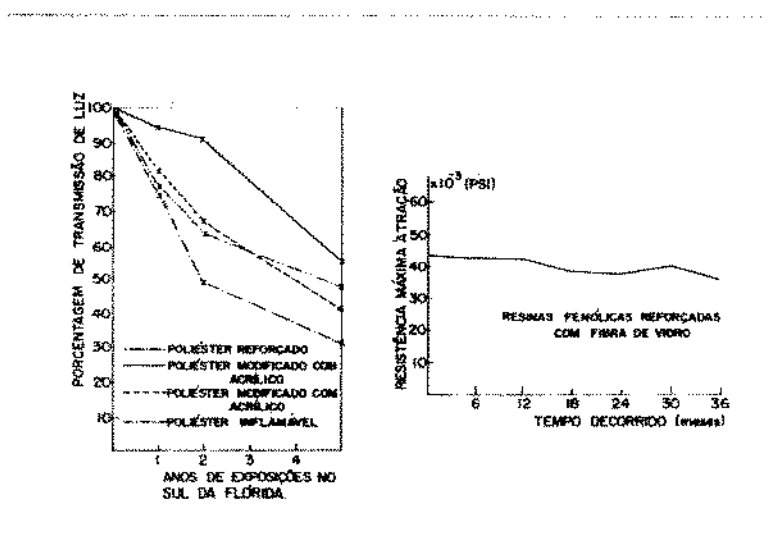


Fig. 1.3 - Perda das Propriedades Físico-Mecânicas dos Polímeros com a Exposição às Intempéries

2- DEGRADAÇÃO DOS PLÁSTICOS

A degradação, ou seja, qualquer fenômeno que proporcione diminuição no peso molecular médio do plástico sempre é observada como um processo prejudicial, pois faz com que algumas propriedades físicas decaiam.

O grau de deterioração depende da extensão da degradação molecular e está intimamente ligada à natureza dos processos que a provoca.

2.1 Teoria da Degradação Fotoquímica

A degradação dos plásticos, quando expostos às intempéries, é provocada por três motivos principais: energia ultra-violeta, proveniente do Sol que chega ao solo terrestre; água de chuva ou orvalho; e o calor. Sabe-se que existem outros fatores como: água salina, fatores biológicos e de poluição do ar, mas estes são inerentes a locais particulares (5).

Da energia que chega ao solo terrestre proveniente do Sol, cerca de 5%, somente, detém a radiação ultra-violeta. Esta pequena faixa de comprimentos de onda pode ser subdividida em 3 faixas:

UV - A	315 - 400 nm
UV - B	290 - 315 nm
UV - C*	abaixo de 290 nm

A faixa UV - B é a responsável pelas mudanças fotoquímicas. O restante da radiação solar que alcança a superfície terrestre

(*) Esta faixa de comprimento de onda nunca alcança a superfície terrestre.


(99,9 %), simplesmente não tem energia suficiente para causar a de
te
ri
o
r
a
ç
ã
o.

Esta faixa UV - B contém somente 0,1 % em média da ener
gia
total
solar, ou seja, 0,05 % no inverno e 0,2% no verão.

A Tabela 2.1 mostra quais são os comprimentos de onda, na
faixa ultravioleta, que atingem a máxima sensibilidade para polímeros
comerciais.

TABELA 2.1 - SENSIBILIDADE DOS POLÍMEROS POR COMPRIMENTOS
DE ONDA NA FAIXA UV. (18)

Polímero	Comprimento de Onda UV de Máxima Sensibilidade (nm)
Poliésteres	325
Poliestireno	318
Polietileno	300
Polipropileno	310
PVC	310
Policarbonato	295
Polimetacrilato de metila	290-315

A maioria dos polímeros possuem em suas cadeias molecula
res
grupos
funcionais que absorvem luz ultravioleta, dentre eles: o
grupo carbonila (C = O), anéis aromáticos , ligações C = C.

Quando uma molécula de polímero absorve luz ultravioleta'
através dos grupos funcionais, esta energia leva a estrutura à um es
tado
mais
excitado, instável. Com a tendência do retorno a um estado
mais estável, este excesso de energia pode ser descarregado por vá
rios
caminhos:

- Pode transferir a excitação à outra molécula, e assim restabi
lizar-se.

- Estes grupos podem retornar, por etapas, ao seu estado original reemitindo o excesso de energia em comprimentos de onda mais longos, tais como, luz visível ou calor.
- Pode converter o excesso de energia diretamente em vibrações térmicas como calor.
- Se a molécula excitada não pode dispersar o excesso de energia por algum desses caminhos, haverá um rompimento na molécula.

A umidade, sob forma de água de chuva ou orvalho, tem uma importância fundamental sobre a reação fotoquímica iniciada. Isto porque ela fornece oxigênio para a oxidação das moléculas rompidas. Quando se deposita água-de-chuva ou principalmente orvalho sobre a superfície de um plástico exposto às intempéries, forma-se um condensado sobre a área exposta, que contém vapor de água e ar. Estes por sua vez são eletrólitos produzindo oxigênio dissolvido que acelera a oxidação.

O aumento da temperatura com a exposição aos raios solares proporciona uma contribuição para se alcançar um estado excitado, acelerando a reação fotoquímica.

Enfim estes três fatores principais concorrem concomitantemente para o aparecimento dos sintomas de deterioração, tais como: enrijecimento, fragilidade, rachaduras, discoloração, opacidade, etc.

2.2 Sistemas de Estabilização Contra Degradação U.V.

A fim de procurar evitar o prejuízo causado pela radiação ultravioleta, existem hoje algumas opções para estabilizar o polímero.

2.2.1 Por Reflexão

Pigmentos opacos ao ultravioleta, podem ser adicionados

ao polímero como *filtros de UV* para protegê-lo. Estes refletem os raios ultravioleta antes que estes penetrem no polímero. Geralmente pigmentos marrons e negros são mais eficazes do que os brancos.

2.2.2 *Por Absorção*

É deveras prático adicionar pequenas quantidades de substâncias que absorvam fortemente a radiação ultravioleta preferencialmente, e reemitam esta energia em níveis mais baixos, não afetando assim, a estrutura do polímero.

Este tipo de estabilizante se encontra tanto na forma de substância inorgânica (negro de fumo, óxido de zinco) como substância orgânica (hidroxibenzofenona, benzotriazol).

Os estabilizantes orgânicos são muito usados para polímeros que venham a ser aplicados como peças transparentes (17).

2.2.3 *Por Revestimento*

Desde que um absorvedor de ultravioleta no interior do polímero pode ainda permitir alguns ataques sobre o polímero, algumas vezes é necessário aplicar um revestimento superficial contendo alta concentração de absorvedor de ultravioleta.

2.2.4 *Por Desativação*

Um estabilizante contra UV. pode absorver o excesso de energia numa molécula polimérica excitada e levá-la ao seu estado mais estável outra vez. Este fenômeno é chamado de **DISSIPACÃO** (quenching) (17, 18). O estabilizante deve dissipar a energia absorvida de maneira amena. Compostos Organo-níquel tem encontrado grande

aplicação em poliolefinas funcionando segundo este processo.

2.2.5 *Por Inibição de Radical-Livre*

Um estabilizante à UV pode funcionar depois que a radiação já tenha excitado o polímero e formado radicais livres, pois estes proporcionam uma reação de degradação em cadeia caso não haja estabilizante. O estabilizante entra no processo neste ponto e para a reação em cadeia antes que a degradação tenha um progresso. Ele reage com o radical livre exterminando este radical instável. Antioxidantes são os mais empregados para este tipo de estabilização.

Embora haja vários sistemas de estabilização ainda hoje as pesquisas neste campo são bastante empíricas, e uma eficiência de 100% nunca é economicamente viável.

2.3 *Influência da Degradação dos Plásticos, como Cobertura Transparente, num Coletor Solar Térmico*

Um dos fatores mais importantes dentro do processo de conversão de energia solar em energia térmica é sua eficiência, pois esta mostrará se o sistema é viável economicamente.

O rendimento térmico é influenciado por vários fatores num coletor plano: o isolamento térmico que está intimamente ligado às perdas térmicas, a insolação que fornece a energia radiante, a temperatura de entrada do fluido no coletor, a absorvância da placa negra absorvedora e a transmitância da cobertura transparente (2).

Portanto cada um destes aspectos devem ser otimizados para que se obtenha eficiência desejada.

Existem duas leis que congregam os vários fatores citados para a determinação da eficiência térmica:

$$\eta = F' \left[\overline{\alpha \tau} - U_L \left(\frac{\bar{T}_f - T_a}{q_i} \right) \right], \text{ e}$$

(1)

$$\eta = F_R \left[\overline{\alpha \tau} - U_L \left(\frac{T_i - T_a}{q_i} \right) \right]$$

O termo F' na equação (1) é o *Fator Eficiência da Placa* e é a relação entre energia útil real coletada e a energia útil que teria sido coletada se a entrada da placa absorvedora estivesse na temperatura média do fluido. Da mesma forma F_R é a *Eficiência de Remoção de Calor* sendo a razão entre a energia útil coletada e a energia útil que teria sido coletada se a entrada da placa estivesse na temperatura de entrada do fluido.

Ambos F' e F_R são independentes da intensidade solar, das temperaturas de operação do coletor \bar{T}_f (temperatura média do fluido) e \bar{T}_p (temperatura média da placa), e da temperatura ambiente.

\bar{T}_f é definido como a média aritmética entre a temperatura de entrada (T_i) e de saída (T_o) do fluido. T_a é a temperatura ambiente.

U_L representa a soma total das perdas térmicas, tanto pelo isolamento térmico como pela cobertura transparente, e q_i é a insolação, energia proveniente do Sol que chega na superfície do coletor.

Finalmente $\overline{\alpha \tau}$ é a média do produto da absorptância da placa (α) pela transmitância (τ) da cobertura. Ambas propriedades sofrem alterações em suas propriedades principais pela ação das intempéries. A absorptância decresce após determinado tempo de exposição ao espectro de radiação solar, pois o revestimento negro que recobre a placa sofre uma degradação fotoquímica. A transmitância também pode se alterar quando a cobertura é feita de material plástico transparente.

Pode-se notar através da equação (1) que haverá uma queda na eficiência térmica à medida que o produto $\overline{\alpha \tau}$ decresce com o tempo. Disso conclui-se que as propriedades óticas tem fundamental importância no rendimento do processo de aquecimento no coletor plano.

Após esta análise, fica patente que o estudo do comportamento da transmitância da cobertura, durante a operação do coletor plano, é vital para o controle do processo.

O desempenho deste componente é obtido submetendo-o a um teste de exposição às intempéries.

3- RESINA POLIÉSTER

3.1 Estrutura da Resina Poliéster

O poliéster insaturado é um polímero termofixo produzido pela reação de álcoois e ácidos polifuncionais. Os polímeros, como se sabe, constituem uma classe de compostos orgânicos que caracterizam por apresentar moléculas de alto peso, sob forma de cadeia polimérica.

A estrutura de um poliéster insaturado é composta geralmente de três componentes básicos: ácidos saturados, ácidos insaturados e glicóis. Cada um desses componentes tem sua função básica durante a obtenção da resina poliéster.

Como pode ser observado na Figura 3.1 o ácido insaturado (C) proporciona insaturações (duplas ligações) dentro da cadeia polimérica. Estas duplas ligações vão ser os pontos reativos durante o processo de cura da resina. O ácido saturado é responsável pela distância entre as insaturações ao longo da cadeia poliéster. O glicol (B) naturalmente, proporciona o meio para a esterificação e a ponte de ligação entre os ácidos saturados e insaturados.

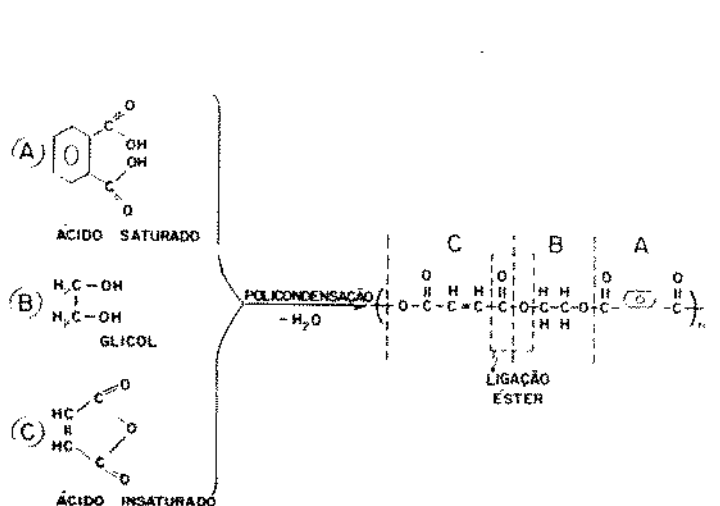


Fig. 3.1 - Esquema para a Formação de uma Molécula de Poliéster Insaturado

A estrutura do poliéster insaturado antes da cura é constituída basicamente de cadeias lineares de baixo peso molecular. Seu aspecto físico neste estado é de um líquido xaroposo.

Para este líquido tornar-se um material sólido com aplicações práticas, existe um outro componente que vai proporcionar ligações entre as insaturações de cadeias lineares vizinhas, conforme pode ser observado na Figura 3.2. Este é o chamado monômero insaturado (estireno, metacrilato de metila) que também serve como um solvente para a resina poliéster antes da cura. Desta forma o poliéster insaturado se encontra diluído neste monômero.

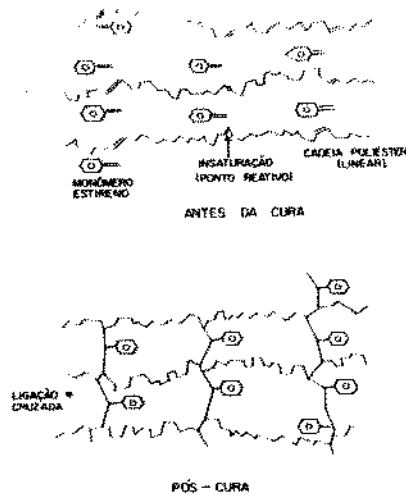


Fig. 3.2 - Esquema da Estrutura do Poliéster Antes e Depois da Cura

As ligações entre as insaturações de cadeias lineares vizinhas têm características de ligação química primária (covalente), e são chamadas *ligações cruzadas*.

A quantidade de insaturações por cadeia linear do poliés

ter é importante pois esta determina a densidade de ligações cruzadas da estrutura. Quanto maior for a densidade de ligações maior será a rigidez do poliéster após a cura, influenciando assim nas propriedades mecânicas do produto curado.

Existem vários tipos de ácidos saturados, insaturados e glicóis empregados na obtenção do poliéster insaturado, dentre eles pode-se destacar: ácidos ortoftálicos, isoftálicos (ácidos saturados); ácido maleico (ácido insaturado) e, etileno glicol, propileno glicol, neopentil-glicol (glicóis).

3.1.1 Tipos de Resinas Poliéster

Devido a estes diferentes componentes utilizados na obtenção dos poliésteres insaturados existem alguns tipos de poliésteres; dentre eles pode-se destacar:

- Poliésteres Ortoftálicos

São poliésteres obtidos a partir de ácidos saturados ortoftálicos, normalmente empregado como anidrido ortoftálico (ácido sem uma molécula de água).

A Figura 3.3 mostra a reação que proporciona a formação de uma cadeia de poliéster ortoftálico. Nesta reação pode se observar a proximidade dos grupos $C = O$ na molécula do ácido ortoftálico, esta interferência provoca a formação de cadeias poliméricas curtas.

As cadeias curtas provocam o aparecimento de muitos grupos éster por cadeia e um alto índice de acidez à resina. Para o abaixamento do índice de acidez é adicionado um excesso de glicol, que por outro lado, prejudica a resistência química do polímero.

- Poliésteres Isoftálicos

Os poliésteres isoftálicos são obtidos a partir de ácido

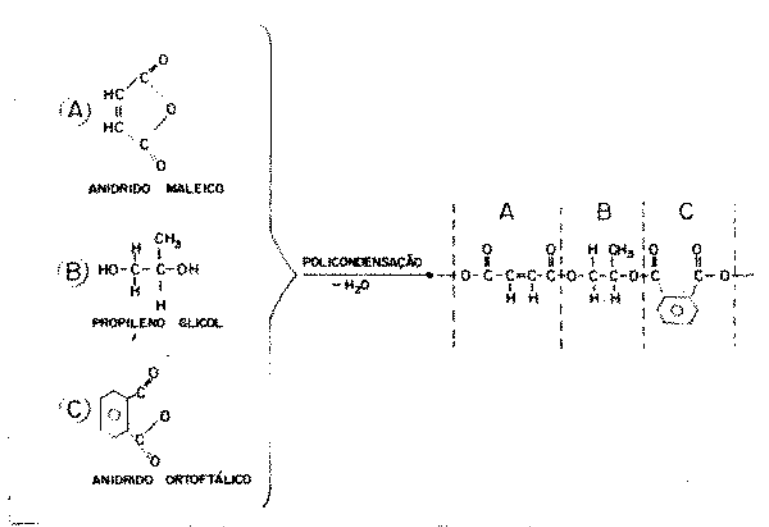


Fig. 3.3 - Reação para Formação do Poliéster Ortoftálico

saturado isoftálico. Este componente tem maior distância entre os radicais ácidos e desta forma proporciona cadeias de poliésteres mais longas. Neste caso não há necessidade da adição de um excesso de glicol, assim proporcionando um poliéster com maior resistência química.

A Figura 3.4 representa a reação química para a obtenção da molécula de poliéster isoftálico.

Existe um outro tipo de resina poliéster isoftálica obtida usando o Neopentil-glicol. Como as cadeias do poliéster isoftálico descrito anteriormente são longas, a viscosidade da resina é consequentemente alta. Este último tipo de resina isoftálica proporciona uma espécie com menor viscosidade, portanto mais fácil de ser trabalhada.

- Resinas de Poliéster Bisfenólicas

São produtos de reações simplificadas do óxido de poliprop

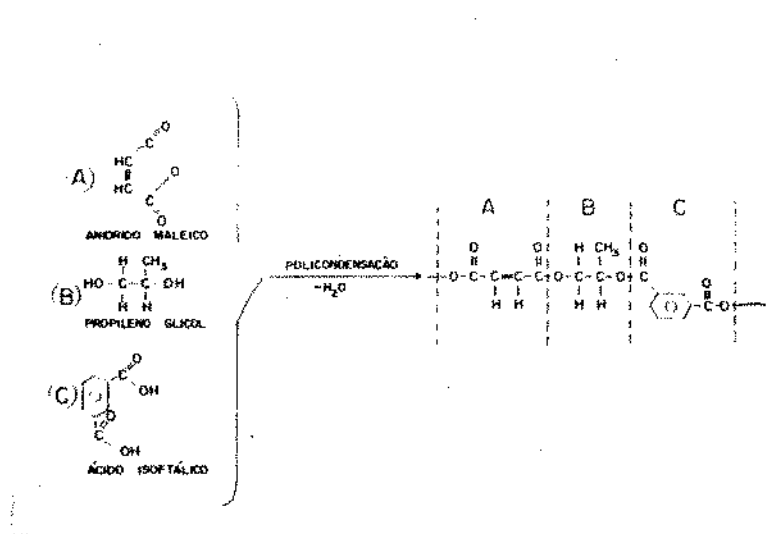


Fig. 3.4 - Obtenção do Poliéster Isoftálico

pileno e o bisfenol A, resultando o bisfenol A propoxilado, que de pois reagirá com um ácido insaturado para formação das cadeias de poliéster.

Estas resinas bisfenólicas, cuja estrutura apresenta poucas ligações éster, têm boa resistência à degradação hidrolítica, pelo ataque a estas ligações. Além disto, a presença de grupos aromáticos na cadeia principal pelo emprego do glicol aromático (bisfenol A propoxilado) reduz muito hidrólise

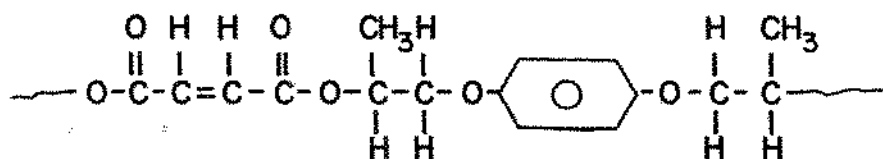


Fig. 3.5 - Esquema de uma Molécula do Poliéster Bisfenólico

- Resinas Ester-Vinílicas

É um tipo de poliéster resultante da reação do bisfenol A com epiclоридrina. Na Figura 3.6 pode-se observar que há grupos éster ao lado de ligações vinílicas

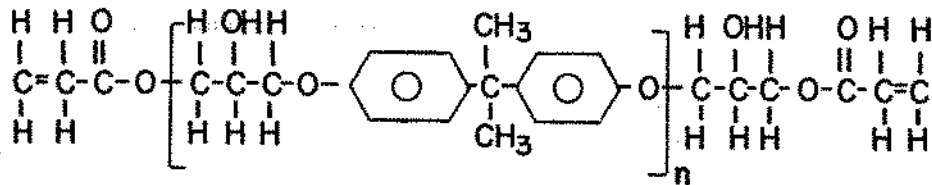


Fig. 3.6 - Representação de uma Cadeia Polimérica da Resina Ester-Vinílica

Por não possuírem duplas ligações localizadas no meio da cadeia molecular, este poliéster tem boa capacidade de absorção de energia resultante de um impacto.

Além destes tipos de resina poliéster existem outras espécies que tem características específicas de aplicação. Dentre elas encontramos o poliéster flexível, onde há a utilização de ácido (ácido saturado) como um componente, que diminui a quantidade de insaturações por cadeia. Existem também os poliésteres auto-extinguíveis, ou seja, resistentes ao fogo. Estes são obtidos pela inclusão de compostos halogenados na cadeia polimérica que proporcionam combate às chamas.

3.1.2 Cura da Resina Poliéster

As primeiras resinas poliéster sofriam o processo de cura através o calor. A resina era disposta no molde e este era aquecido. Com a evolução da técnica de cura da resina apareceram sistemas de cura para a temperatura ambiente.

Estes sistemas são constituídos de um catalizador e um acelerador. O acelerador tem como função atacar o catalizador e fazer deste um radical livre. Este radical livre por sua vez vai atacar as insaturações C = C existentes dentro da molécula de poliéster, condicionando-se, dessa forma, as moléculas ao processo de ligações cruzadas.

Os catalizadores mais utilizados são os peróxidos orgânicos, dentre estes destacam-se o peróxido de benzoíla (Fig. 3.7), peróxido de metil etil cetona (PMEK) e o peróxido de cumila.

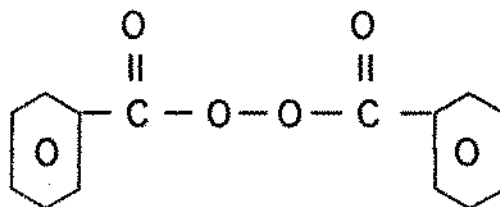


Fig. 3.7 - Fórmula Química do Peróxido de Benzoíla

Os aceleradores mais utilizados são sais de alguns metais (naftalenato ou naftenato de cobalto, manganês, vanádio e aminas terciárias (dimetil diamina).

Para cada catalizador existe um acelerador mais eficiente para a cura na temperatura ambiente. Por exemplo, para o peróxido de metil etil cetona emprega-se o naftalenato de cobalto e para o peróxido de benzoíla emprega-se dimetil amina.

As quantidades do catalizador e do acelerador vão proporcionar maiores ou menores velocidades de cura.

Alguns tipos de resinas, empregadas para determinadas a

plicações, são fornecidas comercialmente pré-aceleradas, desta forma não necessitando a adição de acelerador no processo de cura.

O processo de cura constitui basicamente na transformação da resina líquida em um polímero sólido com ligações cruzadas.

A cura possui algumas etapas características. A sequência do aparecimento destas etapas acontece com a geração de radicais livres, proporcionados pelo catalizador e acelerador.

A próxima etapa é o ataque das duplas ligações pelos radicais livres e início da formação de ligações cruzadas.

A Figura 3.8 esquematiza as várias etapas depois do rompimento das duplas ligações.

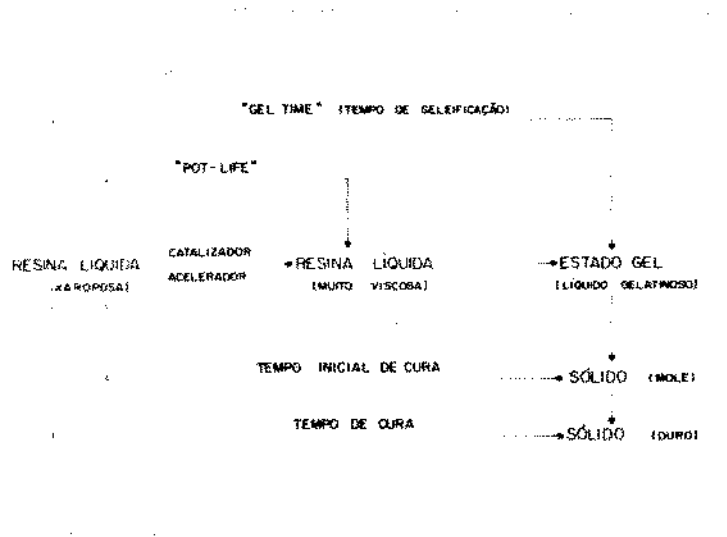


Fig. 3.8 - Etapas de Cura da Resina Poliéster

Como as etapas de cura acontecem numa sequência de tempos, existem alguns tempos característicos que proporcionam separação no acontecimento das etapas.

Assim temos:

- *Pot - Life* - tempo útil de manuseio, neste intervalo pode-se trabalhar com a resina com a viscosidade baixa. Após o tempo de *Pot - life*, a resina apresenta uma viscosidade muito alta tornando difícil o seu manuseio.
- *Gel time* - é o tempo decorrido desde o início da cura até a formação de um estado gelatinoso pela resina. Após este tempo a resina começa a se tornar sólida.
- *Tempo Inicial de Cura* - é o tempo decorrido desde o início da cura até a solidificação da resina.
- *Tempo de Cura* - é o intervalo de tempo desde o início da cura até o momento em que o polímero está completamente curado.

Um dos métodos de saber se o polímero está bem curado é através da medida da dureza (dureza Barcol) da peça. Existem alguns níveis dessa dureza em que o poliéster é considerado completamente curado.

3.2 Estrutura do Poliéster Reforçado com Fibra de Vidro

A adição da fibra de vidro à resina poliéster não tem outro objetivo senão conferir ao material conjugado uma melhora sensível em algumas de suas propriedades mecânicas, tais como: resistência à ruptura por tração, resistência ao impacto, resistência a flexão e principalmente no módulo de elasticidade.

As fibras de vidro, apesar de possuírem algumas excelentes propriedades mecânicas (TABELA 3.1), não poderiam isoladamente serem empregadas como material estrutural, por não suportarem tensões

de cisalhamento e compressão, e também por desgastarem por abrasão.

TABELA 3.1 - PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DA FIBRA DE VIDRO

Propriedades	Valores
Peso Específico	2,55 g/cm ³
Resistência à Tração	35 000 Kg/cm ²
Módulo de Elasticidade à Tração	7,5 x 10 ⁵ Kg/cm ²
Alongamento até a Ruptura	4,8 %
Recuperação Elástica	100 %
Coef. de Expansão Térmica	4,6x10 ⁻⁶ cm/cm/°C
Rigidez Dielétrica (Excelente valor)	> 100 KV/mm
Constante Dielétrica entre 50 e 10 ⁶ HZ	6 a 7
Índice de Refração	1,55

As resinas poliésteres por possuírem baixo módulo de elasticidade, baixa resistência à tração (TABELA 3.2), tem suas aplicações estruturais bastante limitadas, embora sua resistência à compressão seja elevada e seu módulo de flexão razoável.

Portanto, sozinhos não possuem função estrutural, mas quando conjugados apresentam todas as características ideais para serem aplicados estruturalmente.

A primeira vista a utilização de fibras de vidro (material inorgânico) em resinas poliéster (material orgânico) parece ser estranho, pois a natureza dos dois materiais é quimicamente incompatível. Entretanto o fenômeno de reforço acontece, pois, quando a resina é submetida ao processo de cura, ela sofre contração que provoca o ancoramento da fibra na matriz (polímero), isto é, acontece uma amarração da fibra pela matriz.

Entretanto existe ainda um outro fenômeno que, proporciona uma excelente ligação da fibra à matriz polimérica, além do proces

TABELA 3.2 - CARACTERÍSTICAS DE UMA RESINA POLIÉSTER

Propriedades	Valores
Resistência à Tração	770 - 800 Kg/cm ²
Resistência à Flexão	840 - 900 Kg/cm ²
Módulo de Flexão	0,4 x 10 ⁵ Kg/cm ²
Resistência à Compressão	1500 - 1600 Kg/cm ²
Alongamento	2 - 3 %

so de cura. Este acontece devido a um tratamento superficial dado à fibra através uma substância química (agente de acoplagem) que proporciona uma ligação química vidro-resina, muito mais forte que a força de contração.

Devido à boa adesão da fibra à matriz tem-se um material composto com boas propriedades mecânicas (TABELA 3.3).

TABELA 3.3 - CARACTERÍSTICAS FÍSICO-MECÂNICAS DE POLIÉSTER REFORÇADO COM FIBRA DE VIDRO (LAMINADO PARA COLETOR SOLAR SUN-LITE → BAIXA PORCENTAGEM DE REFORÇO)

Propriedades	Valores
Resistência à Tração	900 Kg/cm ²
Resistência à Flexão	1600 Kg/cm ²
Módulo de Flexão	1,3 x 10 ⁶ Kg/cm ²
Resistência ao Impacto Izod	9,4 Ft. lb/in
Expansão Térmica	2,4 cm/cm/°C
Índice de Refração	1,61

O fenômeno da boa resistência mecânica proporcionada pela fibra de vidro junto com o poliéster é devido ao fato que quando este

material está sob tensão, a matriz transfere a tensão, por ela absorvida, para a fibra e esta suporta esta tensão.

A transferência de tensão da matriz para a fibra depende muito do agente de acoplagem. Existem dois tipos de agentes de acoplagem sendo empregados atualmente, um deles contendo cromo em sua molécula e o outro contendo silício (agentes silanos).

O mecanismo pelo qual acontece a ponte de ligação entre a fibra e a matriz, através o agente de acoplagem, ainda hoje não é bem definido, mas o agente de ligação correto já esta sendo empregado de uma maneira bem desenvolta (9).

Existem duas teorias que tentam explicar como ocorre a adesão da fibra na matriz: uma delas afirma que a adesão é dada por ligações químicas primárias (covalentes) (Figura 3.9 A), e a outra diz que a única força de ligação existentes é a ponte de hidrogênio (Figura 3.9 B).

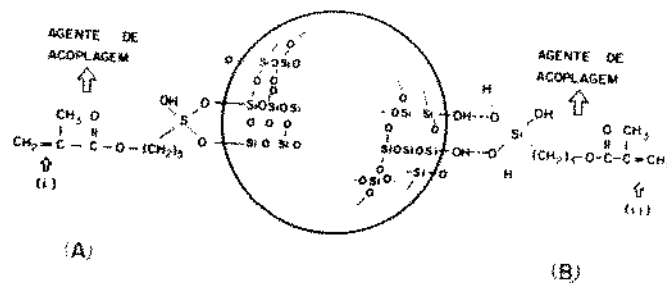


Fig. 3.9 - Secção Transversal de uma Fibra de Vidro. Os pontos(i) e (ii) apontam onde ocorre a ligação da fibra com a resina

As fibras de vidro apresentam-se comercialmente de várias maneiras; como fios cortados, fios contínuos, mantas, tecido e véu de superfície.

- *Fios Cortados ("CHOPPED STRANDS")* - são fibras cortadas a partir dos fios contínuos.
- *Fios Contínuos ("ROVING")* - são as fibras longas e contínuas
- *Mantas ("MATS")* - são fios picados em comprimentos variáveis entre 25 a 50 milímetros, dispostos multidirecionalmente e aglomerados em mantas pelo uso de um ligante apropriado.
- *Tecido* - é constituído do entrelaçamento do fio contínuo segundo o processo de tecelagem num tear.
- *Véu de superfície ("SURFACE MAT")* - é uma manta bem fina e ser o acabamento superficial (10).

3.5 *Aplicações das Intempéries*

O revestimento de plástico tem sido muito empregado em aplicações que necessariamente são expostas ao ar livre. Desta forma sempre se pode encontrar o poliéster reforçado com fibra de vidro sendo utilizado em painéis decorativos, na fabricação de telhas translúcidas, como material estrutural, etc.

Como já se referiu em capítulos anteriores estas aplicações são limitadas pelas alterações sofridas durante o tempo de exposição às intempéries.

O estudo dessas alterações nas propriedades tem seguido dois caminhos distintos: o primeiro que se preocupa basicamente com as modificações sofridas pela aparência e pela transparência (Figura 3.10 A) e outro que aborda as variações na resistência mecânica (Figura

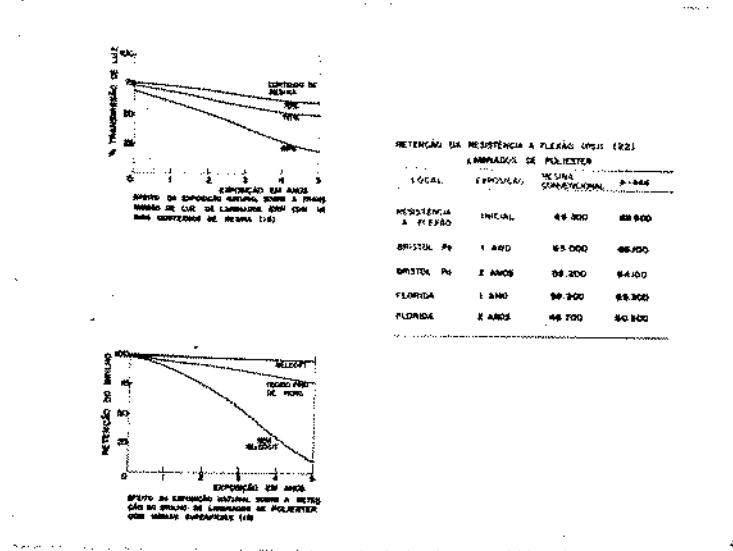


Fig. 3.10 - Alterações nas Propriedades Óticas e Mecânicas do Poliéster Reforçado durante a Exposição às Intempéries

Durante a exposição do poliéster reforçado com fibra de vidro às intempéries, principalmente aos raios solares, acontece um fenômeno bastante interessante. O poliéster começa a apresentar uma cor amarelada, esta cor certamente indica um sintoma de degradação.

O amarelecimento afeta principalmente a aparência do poliéster quando usado como painéis decorativos e coberturas transparentes.

Embora existam vários estudos sobre a degradação do poliéster, muito pouco se sabe sobre os motivos corretos que provocam essa cor amarelada. (16). A única coisa de concreto é que os estudos mostram que a porcentagem de amarelecimento aumenta com o tempo de exposição às intempéries (Figura 3.11).

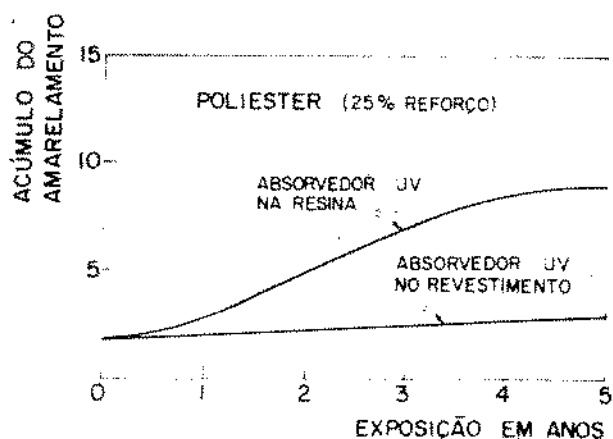


Fig. 3.11.- Efeito da Exposição Natural no Amarelecimento do Laminado de Poliéster

Os fatores que podem proporcionar este amarelecimento ao poliéster, e conseqüentemente sua degradação são vários, dentre eles podemos destacar: o tipo de monômero usado para a formação de ligações cruzadas, o grau de cura, o sistema de estabilização ao ultravioleta e a estrutura da resina poliéster, ou seja, a quantidade de moléculas de ácidos insaturados por cadeia polimérica.

O tipo de monômero usado na resina, como já foi comentado, tem muita influência sobre sua estabilidade à radiação ultravioleta, principalmente sobre a transparência.

Quando se usa o estireno como monômero, o fenômeno de amarelecimento é muito mais acentuado do que quando se utiliza uma mistura de metacrilato de metila e estireno como monômero. Alguns trabalhos publicados mostram algumas alternativas de estabilização através

a utilização de determinados tipos de monômeros (14, 15, 29). A Figura 3.12 ilustra bem a influência do tipo de monômero na transmitância de um laminado de poliéster reforçado com fibra de vidro.

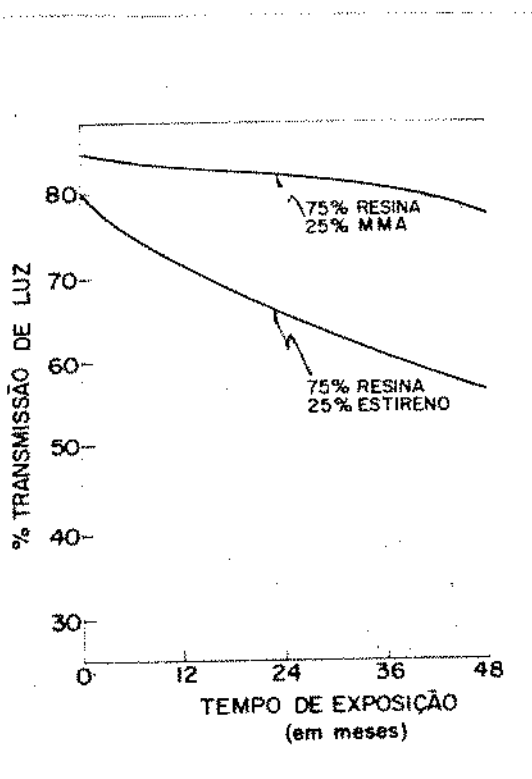


Fig. 3.12 - Influência do Tipo de Monômeros, na Resina Poliéster, sobre a Transmitância durante o Envelhecimento.

O grau de cura do laminado de poliéster reforçado pode ser uma causa importante para o processo de degradação. Um laminado mal curado tem em sua estrutura monômeros e moléculas do polímero não reagidos, e ainda vestígios de catalizador ativo. Durante a exposição à radiação ultravioleta proveniente do Sol e ao oxigênio do ar, acontece um processo de oxidação mais acelerado no laminado pois a estrutura do poliéster ainda se encontra instável antes da cura completa.

A TABELA 3.4 ilustra a perda de transmitância de um laminado mal curado durante seu envelhecimento.

TABELA 3.4 - EFEITO DA CURA INCOMPLETA SOBRE A TRANSMITÂNCIA DURANTE UM ENVELHECIMENTO EM LABORATÓRIO (16)

Catalizador	Condição de Cura	Transmissão à Luz a 440 nm		Dureza Bariol
		Original	Depois de 1000 horas	
		%	%	
1 % MEK	3hs à 70 ^o C	88	50	48 cura incompleta
	2hs à 105 ^o C			
1 % MEK	3hs à 70 ^o C	90	83	53
	2hs à 105 ^o C			

Os sistemas de estabilização de uma resina poliéster à radiação UV tem grande influência sobre as causas pelas quais acontece a degradação das propriedades físico-mecânicas. Como já foi descrito no capítulo 2 existem vários caminhos para a estabilização de um plástico, cada qual com suas vantagens e desvantagens, já que os atuais sistemas de estabilização não alcançam o sucesso total.

Um exemplo da influência do estabilizante pode ser observado na TABELA 3.5. Estes tipos de estabilizantes funcionam como absorvedores da radiação UV e reemitem esta radiação absorvida numa faixa de energia menos prejudicial à estrutura do polímero.

Através da TABELA 3.5 pode-se notar que os dois últimos estabilizantes reemitem a energia absorvida numa faixa de comprimento de onda na região UV. Portanto são mais prejudiciais que o primeiro que reemite na faixa do visível, que é menos prejudicial. Por tudo isso a escolha certa do estabilizante à UV é muito importante.

A composição química do poliéster usado não é menos importante do que a escolha do sistema de monômero e de estabilização à UV.

mas comparativamente há pouca informação sobre os efeitos da estrutu
ra do poliéster sobre sua resistência às intempéries. Publicações nes
te campo de pesquisa (20) somente citam que o tipo de ácido saturado
usado e a razão de ácido saturado para insaturado são fatores impor
tantes.

Enfim o estudo da degradação de algumas propriedades nos
polímeros é bastante complexo pois os fatores que afetam são muitos,
além de ocorrerem ao mesmo tempo.

4- ALTERNATIVAS PARA O ESTUDO DO ENVELHECIMENTO DE UM MATERIAL

O envelhecimento que alguns componentes de um coletor solar térmico sofrem durante sua utilização pode ser estudado através três caminhos:

- Envelhecimento Natural
- Envelhecimento Natural-Acelerado
- Envelhecimento Acelerado em Laboratório

4.1 Envelhecimento Natural

Neste tipo de estudo as amostras são dispostas em painéis inclinados e, estes são submetidos à exposição em locais onde haja grande porcentagem de energia solar incidente e clima agressivo.

Após tempos pré-determinados, um certo número de amostras é retirado e submetido a testes físico-mecânicos desejados.

Este tipo de teste é muito desenvolvido no USA, onde existem vários locais considerados ideais para o desenvolvimento dos experimentos (Flórida, Arizona, etc) (11).

O inconveniente desse envelhecimento é a demora muito grande (3 a 5 anos) para se obterem resultados significativos. Este fato limita um pouco o emprego desse processo, pois qualquer modificação no material testado implica numa expectativa de 3 a 4 anos. Mas este tipo de envelhecimento é o ideal para estudos de degradação.

4.2 Envelhecimento Natural - Acelerado

Os russos já tem muita experiência com este tipo de envelhecimento e continuam aperfeiçoando este método (12).

Consistindo de um sistema concentrador (lentes ou espe

lhos) de energia solar, estes equipamentos submetem as amostras à um envelhecimento natural acelerado. Esta concentração dos raios solares é limitada pela temperatura atingida pelos corpos de prova. Se a concentração for muito grande, em vez do material sofrer uma degradação fotoquímica acabará sofrendo uma degradação térmica.

Este processo de envelhecimento proporciona resultados significativos em bem menos tempo e não deixa de ser um envelhecimento natural, pois a composição espectral da radiação incidente não é alterada.

A principal limitação deste experimento é o alto custo da montagem do sistema de concentração para que o espectro de radiação solar não se altere, além disso há uma extrema limitação com respeito ao número de amostras expostas. Como a concentração é proporcionada pela aplicação da mesma energia proveniente do Sol numa área menor, a área para exposição das amostras fica reduzida.

4.3 Envelhecimento Acelerado em Laboratório

Este consiste basicamente na rotação das amostras expostas, em torno de uma lâmpada cujo espectro de radiação não é muito diferente daquele proveniente do Sol e que chega ao solo terrestre.

Equipamentos baseados neste princípio de funcionamento, existem desde os mais simples (Fadeometer, Fade Outfit, Fugitometer, Xenotest) (23) até os mais sofisticados (Weather Ometer).

Os mais simples somente tem um porta-amostras que gira em torno uma lâmpada especial.

Os mais sofisticados, além de possuírem da fonte de radiação, tem sistemas que mantêm temperatura, umidade e atmosfera controladas, incluindo *SPRAYS* que simulam chuva e orvalho (Weather-Ometer).

A fonte de energia radiante é dada por uma lâmpada (xenônio, arco-carbono, fluorescente) que, quando acesa, tem seu espectro próximo mas não *exatamente* igual ao que chega ao solo terrestre proveniente do Sol.

Este é um dos fatores restritivos à utilização deste método. Porém alguns cálculos e estimativas podem contornar esse entrave e recorreger a energia incidente sobre a amostra (APÊNDICE 2).

Atualmente há muitas pesquisas em desenvolvimento a fim de encontrar fontes de radiação (lâmpadas) que emitam o espectro de radiação semelhante ao recebido na face da Terra. (24, 25).

5- PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

5.1 Introdução

O trabalho experimental constituiu-se em 3 etapas distintas que se seguiram de uma maneira lógica.

- a) Preparação dos laminados
 - i) Escolha dos materiais empregados
 - ii) Estudo das condições de cura
 - iii) Fabricação propriamente dita dos laminados
- b) Ensaio do Envelhecimento em Laboratório
- c) Medida das Propriedades Desejadas
 - i) Medida da Transmitância
 - ii) Medida da resistência à tração e módulo de elasticidade
 - iii) Medida da resistência ao impacto

5.2 Preparação dos laminados de poliéster reforçado com fibra de vidro

5.2.1 Materiais Empregados

Na confecção dos laminados foram utilizados os seguintes componentes: resina polimérica (poliéster insaturado), reforço (fibra de vidro) e aditivos de cura (catalizador e iniciador). Além destes componentes não foram utilizados produtos complementares, tais como: carga, pigmentos, etc.

Os materiais empregados para este estudo foram:

a) Resinas de Poliéster Insaturado

As resinas de poliéster utilizadas nos experimentos foram resinas ortoftálicas: Polylite 8001, Polylite T-208 e Polylite 10-090.

fabricadas pela Resana S/A Indústrias Químicas.

A escolha destes tipos de resinas foi feita levando em conta um tipo comum (8001), um tipo transparente sem estabilização ao UV (T-208) e um com estabilização (10-090). Esta escolha sempre levou em conta o objetivo deste trabalho, ou seja, aplicação como cobertura transparente exposta às intempéries.

As principais características destas resinas são:

- PolyLite 8001 - resina ortoftálica, não acelerada, viscosidade média, baixa reatividade, contendo 35% de estireno, para uso geral, reforçada ou não com fibra de vidro.
- PolyLite T-208 - resina ortoftálica, pré-acelerada, média viscosidade, baixa reatividade, contendo 30% de estireno, utilizada para peças transparentes.
- PolyLite 10-090 - resina ortoftálica, pré-acelerada, baixa viscosidade, tixotrópica, estabilizada aos raios ultravioleta, usada em domos, telhas e painéis que devem ficar expostos ao tempo.

b) Tipos de Reforços com Fibra de Vidro

As fibras de vidro usadas para esta pesquisa foram aplicadas na forma de mantas. Estas mantas são fabricadas pela Ocfibras Ltda e suas especificações se encontram na TABELA 5.1

O tipo *Surface Mat* na realidade fornece um aumento não muito grande na resistência mecânica, mas proporciona boa transparência ao laminado.

Os outros dois tipos de manta já fornecem um relativo aumento em algumas propriedades mecânicas, entretanto proporcionam um laminado de não muito alta transparência.

TABELA 5.1 - TIPOS DE FIBRA DE VIDRO

Amostra	Aspecto	Dens. Superficial (g/cm ²)
M - 700 225	Manta	225
M - 700 450	Manta	450
SURFACE MAT.	Véu	40

c) *Catalizador*

O catalizador empregado para este estudo foi o peróxido de metil etil cetona, um líquido incolor que junto a determinados aceleradores, promove a cura na temperatura ambiente.

d) *Acelerador*

O Naftalenato de Cobalto (Naftenato de Cobalto) foi utilizado como acelerador. Ele é um líquido de cor violeta.

5.2.2. *Composição dos laminados poliéster-fibra de vidro*

Para cada das matrizes poliméricas empregadas (8001, T-208 e 10-090) foram fabricados laminados com uma camada de *Surface Mat*, uma camada da manta M 700 225 e uma camada da manta M 700 450. Desta forma foram obtidos 9 tipos de laminados diferentes.

5.2.3 *Condições de Cura*

A fim de se obter resultados comparativos nos ensaios efetuados, procurou-se fornecer às amostras as mesmas condições de cura, ou seja, os mesmos tempos de geleificação.

O sistema de cura constitui num dos fatores de influência

sobre as características finais das resinas poliésteres. Desta forma uma das preocupações iniciais deste trabalho consistiu em verificar - experimentalmente se haveriam variações nas propriedades óticas desses polímeros em função da porcentagem de catalizador empregada.

Assim foram preparadas várias amostras da resina Polylyte 10-090 - que já contém acelerador adicionado na própria fábrica - variando-se a porcentagem de catalizador e conseqüentemente as condições de cura.

O gráfico da Figura 5.1, mostra os valores de transmitância em duas faixas de comprimentos de onda. A primeira de 0,4 a 1,0 μm e a segunda de 1,0 a 2,5 μm .

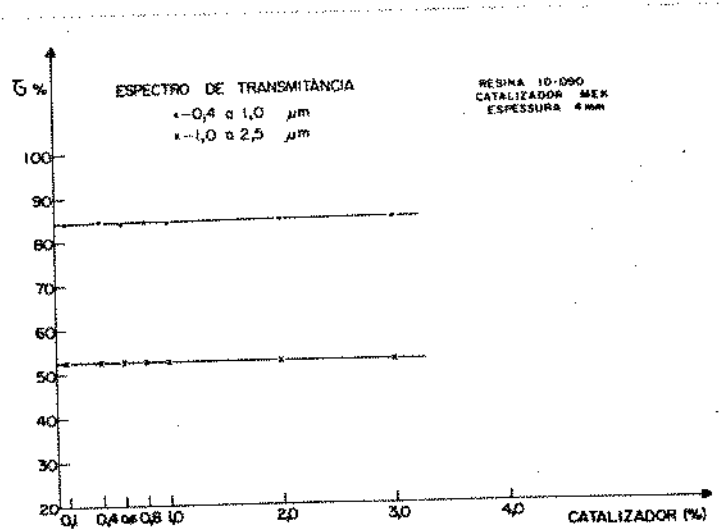


Fig. 5.1 - Influência da porcentagem de catalizador sobre a Transmitância (τ) para a resina 10-090

As sete amostras preparadas com diferentes porcentagens de catalizador não apresentam qualquer diferença significativa no índice de transmitância.

Deste modo pode-se concluir que pelo menos até 3% de catalizador a transmitância dos laminados independe desta variável.

Devido a este último fato foram escolhidas quantidades de catalizador e acelerador, quando necessário, para as resinas que for_u necessessem mesmas condições de cura e proporcionassem um tempo de manu_u seio (POTE-LIFE) suficiente para o preenchimento do molde.

As melhores condições de cura encontradas para as três re_u sinas estão ilustradas na TABELA 5.2, e estas foram utilizadas duran_u te todo estudo.

TABELA 5.2 - CONDIÇÕES DE CURA

Amostra	% Catalizador	% Acelerador	Tempo de Geleificação (minutos)
8001	0,6	0,1	18
T-208	0,4	-	19
10-090	0,4	-	19

5.2.4 Escolha da Espessura do Laminado

Visto que a espessura dos corpos de prova afetam na medi_u da de transmitância, foi necessário escolher uma determinada espessu_u ra que, fosse constante principalmente durante os ensaios de transmi_u tância.

Naturalmente quanto menos espesso for o laminado melhor será sua transmitância, entretanto o laminado não pode ser delgado de_u mais pois desta forma não proporcionará corpos de prova para o ensaio de impacto IZOD. (Figura 5.12)

Foi feito um levantamento experimental para observar a in_u fluência da espessura sobre a transmitância de uma resina poliéster.

Para isto utilizou-se como amostra a resina 10-090 que mostrou seu comportamento de acordo com a Figura 5.2.

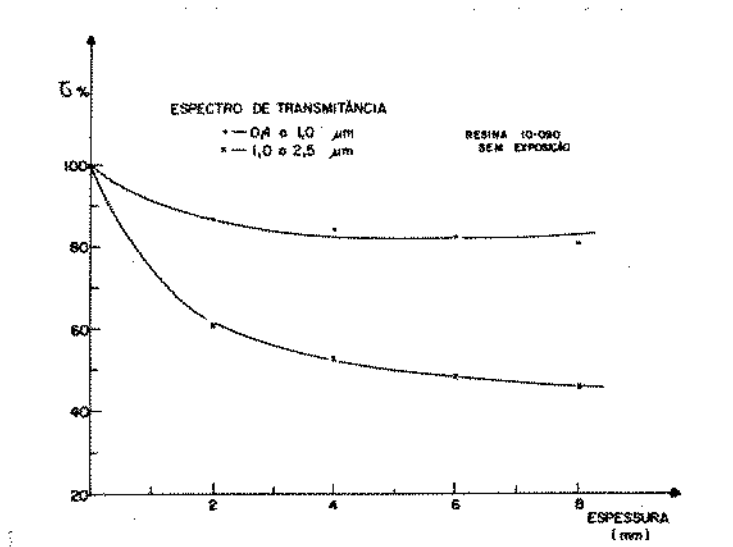


Fig. 5.2 - Influência da espessura sobre a transmissância da resina 10-090

Procurando, além dos fatores descritos, escolher uma espessura que fornecesse maiores facilidades na confecção do laminado, encontrou-se a espessura de 4 mm ser a mais viável.

5.2.5 Fabricação Propriamente Dita dos Laminados

Os laminados, tanto reforçados como não, foram confeccionados em moldes de vidro.

Este tipo de molde foi escolhido por fornecer aos laminados um bom acabamento em ambas as superfícies. Como é sabido a resina de poliéster copia fielmente a superfície de contato depois de curada. Além disso este tipo de molde fornece um bom controle da espessura

ra desejada do laminado.

Durante os experimentos foi utilizado um outro tipo de molde, de polietileno, com somente uma superfície de contato com a resina, a outra superfície ficava diretamente em contato com o ar. Notou-se que a superfície em contato com o ar após a cura se tornava rugosa causando desta forma variações na espessura ao longo da área da placa, característica indesejável para esse trabalho, assim o método foi abandonado.

a) *Moldes de Vidro*

Estes moldes constituíam-se de duas placas retangulares de vidro, com 5mm de espessura e uma área de $35 \times 18 \text{ cm}^2$ cada uma. Existiam ainda os espaçadores, também de vidro, que forneceriam a espessura desejada do laminado. Estes se localizavam nas bordas das placas.

Após os espaçadores serem dispostos nas laterais de uma das placas de vidro, a outra placa era colocada sobre esta. Após montado o molde, as laterais eram recobertas com uma fita adesiva para proporcionar uma estrutura compacta e, a necessária vedação (Figura 5.3).

Somente uma das bordas não tinha espaçador nem fita adesiva, este local era por onde se vertia a resina líquida no interior do molde.

b) *Preparação do molde para receber a resina*

As resinas de poliéster têm alto poder de adesão, por isso foi necessária uma preparação do molde.

As faces internas das placas do molde eram encerradas com *Separol em Pasta* (cera) e deixadas secar. Os espaçadores também sofriam este procedimento, e após secos, junto com as placas, eram lus

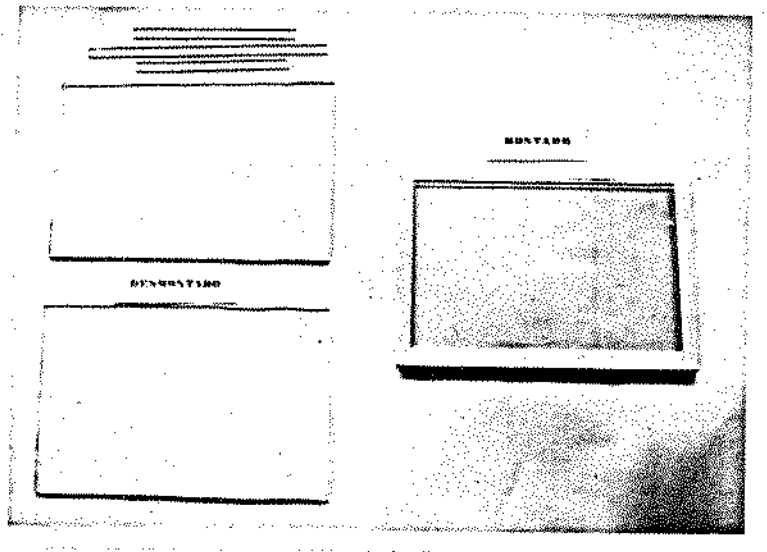


Fig. 5.3 - Molde de Vidro Utilizado

trados a fim de se obter uma superfície brilhante (espelhada) que proporcionasse fácil desmoldagem. O molde montado é vedado com fita adesiva, estava pronto para receber a resina.

c) *Confeccção do laminado sem reforço*

Conhecido o volume necessário de resina para completar o molde, esta resina era preparada adicionando a quantidade pré-determinada de catalizador e de acelerador, quando necessário. Depois de misturada adequadamente com essas substâncias, a resina era vertida dentro do molde e deixada curar à temperatura ambiente.

Devido a impossibilidade de se ter em mãos um durômetro que medisse a dureza Barcol, o laminado foi considerado completamente curado após 24 horas.

d) *Fabricação do laminado com reforço*

Após alguns estudos prévios decidiu-se proceder da seguinte

te forma para se obter o laminado reforçado.

As mantas de fibra de vidro eram cortadas em dimensão 33 cm x 17 cm e molhadas em uma resina catalizada. Após algum tempo a resina que envolvia a manta estava curada e a manta tinha agora uma certa rigidez que facilitava sua introdução no molde.

A manta era introduzida no molde e distanciada igualmente das duas faces do molde, e em seguida a resina catalizada e acelerada era derramada no molde. Desta forma se conseguia um laminado com reforço distribuído simetricamente com relação à espessura. Neste caso o laminado estava considerado curado 24 horas após.

Em ambos os casos, reforçados ou não, após a desmontagem dos moldes os laminados estavam prontos para serem utilizados nos ensaios.

5.3 Ensaios de Envelhecimento em Laboratório

Este experimento teve como finalidade submeter as amostras às intempéries em laboratório, tentando-se dessa forma simular o que ocorre na realidade, de uma maneira mais acelerada. Tudo isto para observar as características do poliéster insaturado durante seu envelhecimento.

Para este ensaio foi utilizado como equipamento um Weather-Ometer.

5.3.1 Equipamento

Foi utilizado um Weather-Ometer modelo 65/XW - WR 1 (Figura 5.4)

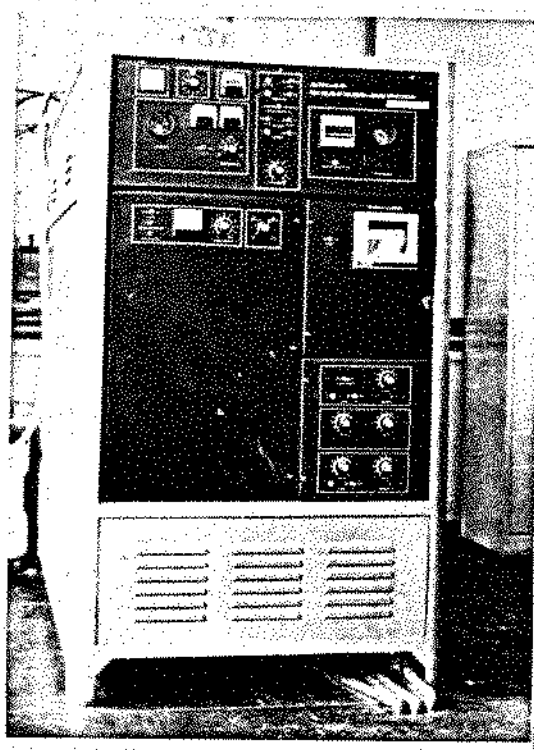


Fig. 5.4 - Weather-Ometer 65/XW - WR 1

Este aparelho consiste basicamente de uma câmara teste de aço inox, com temperatura e umidade controlada. Exatamente no centro desta câmara se encontra uma lâmpada de xenônio, que, quando acesa, possui um espectro de emissão de radiação não muito diferente daquele proveniente do Sol e que chega ao solo terrestre, ao meio dia solar (Figura 5.5). Através deste aspecto é que se pode dizer que o ensaio é um teste acelerado, pois é como se as amostras ficassem sempre expostas ao Sol do meio-dia.

Em torno da lâmpada existe uma espécie de carrossel que gira constantemente em torno dela. Neste carrossel as amostras de ensaio são fixas, ainda nele se encontra um painel negro com um termômetro adaptado (dial), onde se pode ler a temperatura aparente das amostras expostas.

Existe um acessório neste equipamento que pode alterar a temperatura interna da câmara, isto é, são aquecedores de ar localiza

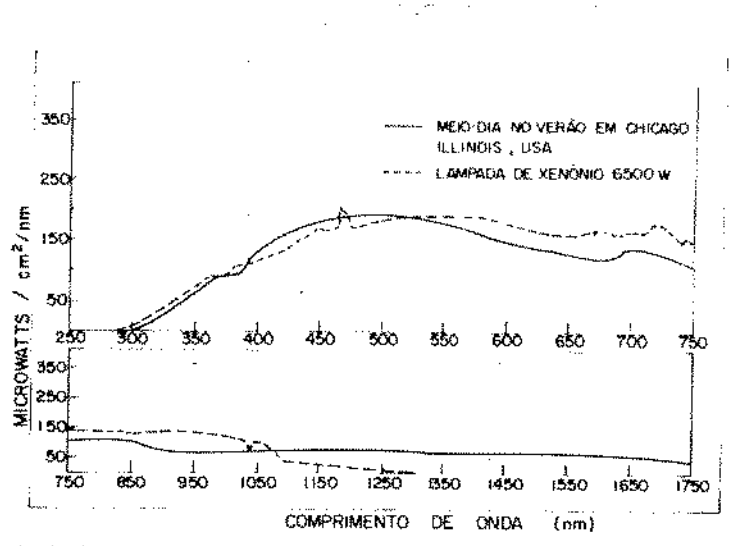


Fig. 5.5 - Comparação entre o espectro de emissão de radiação do Sol e da lâmpada de xenônio

dos nas entradas de ar da câmara que podem ser energizados quando de sejado.

A umidade relativa do ar dentro da câmara pode ser alterada através de um umidificador que faz parte do equipamento. Esta umidade é registrada no decorrer do ensaio através de um sistema de bulbo sêco e bulbo úmido que está localizado dentro da câmara. Existe um registrador de papel que proporciona leituras alternadas destes bulbos de 30 em 30 segundos.

Após o término do ensaio os mapas (papel registrado) de temperaturas de bulbo sêco e úmido são interpretados, e através das diferenças destas temperaturas se obtém a umidade relativa do ar média durante o ensaio de envelhecimento.

5.3.2 *Corpos de Prova*

Dos laminados foram retiradas peças retangulares com di mensões de 23 cm x 7 cm, destinadas aos ensaios mecânicos, e com di mensões de 7 cm x 4 cm, destinadas às medidas de transmitância.

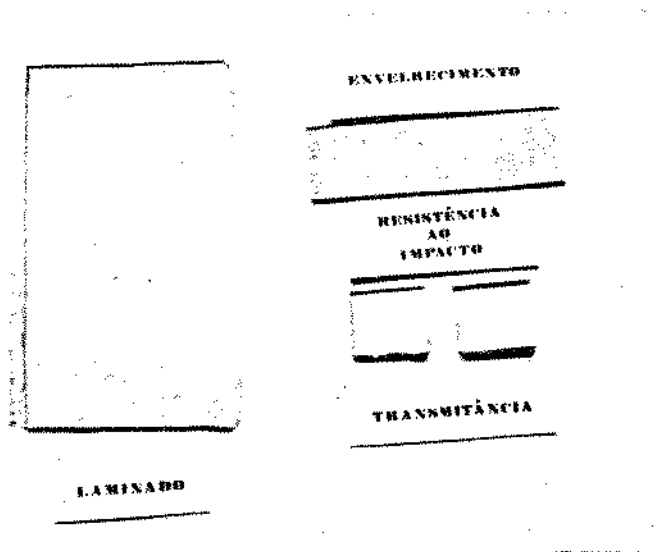


Fig. 5.6 - Corpos de Prova para o Ensaio de Envelhecimento

As placas retangulares para os ensaios mecânicos eram co locadas diretamente no carrossel e as peças para as medidas de trans mitância eram dispostas em porta-amostras (23 cm x 7 cm) antes de se rem fixas no carrossel

5.3.3 *Procedimentos*

Para cada variável deste trabalho (tipo de resina, tipo de reforço, etc) foram expostas 10 placas retangulares para os ensaios mecânicos e 30 retângulos 7 cm x 4 cm para a medida de transmitância.

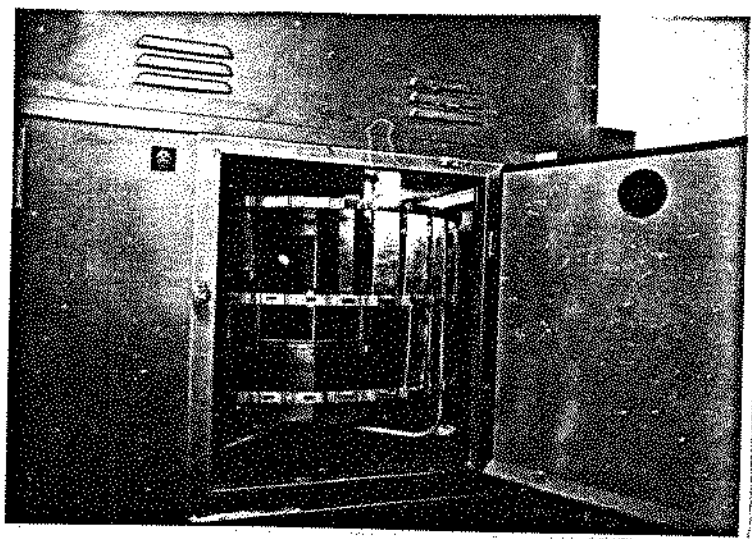


Fig. 5.7 - Carrossel com os Corpos de Prova

Após um ciclo de exposição contínua de aproximadamente 100 horas, eram retirados 3 retângulos para cada variável em razão da medida da propriedade ótica, e uma placa para cada variável para os ensaios mecânicos.

5.4 Medida das Propriedades Desejadas

Na tentativa de se caracterizar o poliéster reforçado com fibra de vidro para aplicações em coletores solares térmicos, foram efetuados dois tipos de ensaios: o ensaio para medida de transmitância e o ensaio para as medidas das propriedades mecânicas.

5.4.1 Medida da Transmitância

O objetivo desse ensaio foi medir a porcentagem de radia

ção que o poliéster, reforçado ou não, deixa passar através. O espectro de transmitância usado foi próximo daquele que chega ao solo terrestre proveniente do Sol (0,4 a 2,5 μm).

Para isso as amostras, envelhecidas ou não, eram expostas a um espectrofotômetro.

a) *Equipamento*

Foi utilizado um espectrofotômetro ZEISS-DMC-25 (Figura 5.8)

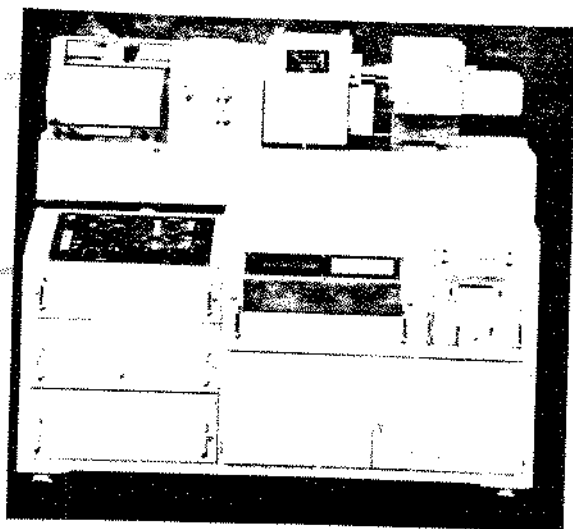


Fig. 5.8 - Espectrofotômetro ZEISS-DMC-25

Este equipamento é constituído de uma lâmpada que emite luz com espectro de radiação compreendido entre 0,37 a 2,5 μm . Existe um sistema de lentes e filtros que faz incidir sobre a amostra raios de luz paralelos e comprimentos de ondas bem definidos. Desta maneira o equipamento fornece percentagem de transmitância por comprimento de

onda.

Após estes raios de luz atravessarem a amostra, vão incidir sobre uma fotocélula, que já tendo recebido a intensidade dos raios antes destes passarem pela amostra, proporciona a porcentagem da passagem de luz. O sinal proporcionado pela fotocélula é registrado em papel fornecendo uma curva característica (Figura 5.9)

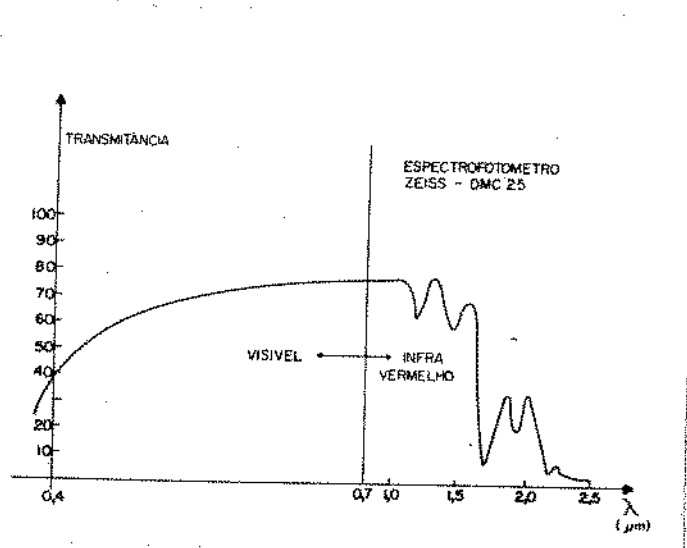


Fig. 5.9 - Curva característica fornecida pelo espectrofotômetro ZEISS-DMC-25 para uma amostra de poliéster

b) Procedimento

O corpo de prova é colocado num compartimento onde vai ser exposto aos raios de luz monocromática. Em seguida é acionado o componente que proporciona a leitura e o registro das transmittâncias por comprimento de onda.

Com as curvas, semelhantes à figura 5.9, em mãos, a medição da transmittância para uma determinada faixa de radiação era efetuada

da através da medida da área sob a curva com um Planímetro Polar. O cálculo da transmitância para uma faixa de radiação era feito dividindo a área sob a curva pela área total para 100 % de transmitância para qualquer comprimento de onda.

5.4.2 Medida da Resistência à Tração e Módulo de Elasticidade

Para o levantamento destas duas propriedades mecânicas, para o poliéster puro e com reforço, foi utilizada a norma de ensaio de tração e módulo de elasticidade da ASTM D-638. Entretanto devido a dificuldade de confecção dos corpos de provas de acordo com esta norma, isto é, por este tipo de corpo de prova demorar muito tempo para ser usinado em comparação com o número de corpos de prova a serem ensaiados (Figura 5.10).

Assim procurou-se fazer corpos de prova retangulares conforme a Figura 5.10.

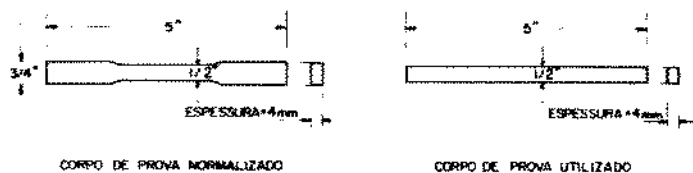


Fig. 5.10 - Corpos de prova para o ensaio de tração

Segundo a norma, foram ensaiados 5 corpos de prova para cada variável (tempo de exposição, tipo de reforço, etc).

a) Equipamento

O ensaio de tração foi efetuado na Máquina Universal de Ensaio *Instron*, modelo 1127. A célula de carga usada para esse ensaio foi de 25.000 Kg.

b) Corpos de Prova

Os corpos de prova, conforme já foi discutido, foram usinados de maneira retangular e tinham dimensões de 0,5 pol x 5,0 pol (Figura 5.10).

c) Procedimento

Os corpos de prova eram colocados entre as garras de tração e eram fixados nestas garras. Depois de ser colocado e alinhado com a direção de tração, o corpo de prova era tracionado a uma velocidade de 0,5 cm/min.

O resultado do ensaio, registrado em papel, fornecia um gráfico de carga aplicada versus deformação (distância entre as garras).

Estes gráficos forneciam os resultados desejados, a saber:

- Tensão de Ruptura à Tração (Resistência à Tração)

$$GR = \frac{PR}{A_0}$$

onde; PR = carga de ruptura em tração e

A₀ = área inicial da secção transversal do corpo de prova

- Módulo de Elasticidade em tração (Módulo de Young)

$$E = \frac{P \cdot l_0}{A_0 \cdot \Delta l}$$

onde; l_0 = comprimento inicial entre as marcas feitas no corpo de prova antes do ensaio

P = carga de tração que provoca uma deformação Δl entre as marcas

A_0 = área inicial da seção transversal do corpo de prova

Observação

Durante os ensaios de tração verificou-se que, devido a área transversal do corpo de prova ser constante ao longo deste, os corpos de prova rompiam-se na garra, não fornecendo desta maneira resultados significativos.

Constatado este fato, tentou-se melhorar a resistência do corpo de prova na garra reforçando as extremidades de contato com a garra, com fibra de vidro e resina poliéster.

Todo esse esforço foi em vão pois os corpos de prova continuaram a quebrar nas garras quando tracionados.

5.4.3 Medida da Resistência ao Impacto

Este tipo de ensaio foi realizado segundo a norma D-258-70, método IZOD.

a) Equipamento

Todas as medidas de resistência ao impacto, método IZOD, foram realizadas numa Máquina de Impacto CSI (modelo CS-137-043) (Figura 5.11)

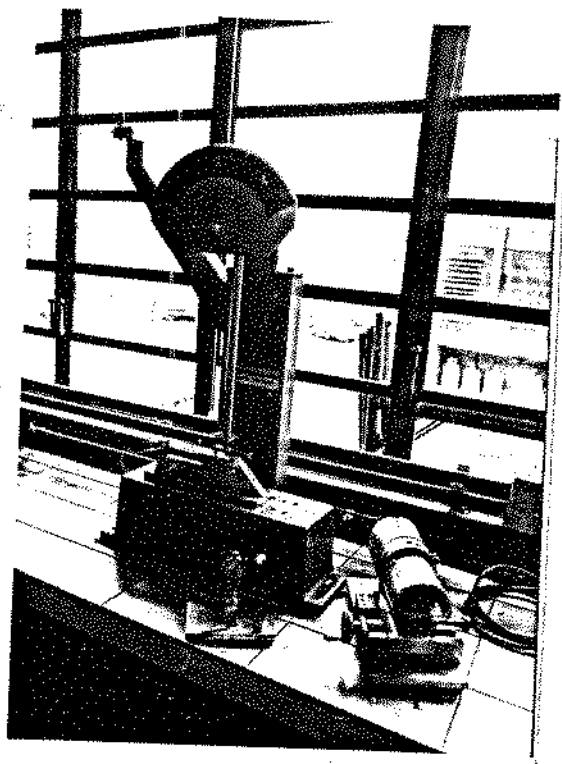


Fig. 5.11 - Máquina de Impacto CSI

O princípio de funcionamento deste aparelho consiste em medir a energia potencial de um pêndulo (martelo) perdida durante seu impacto com uma amostra entalhada. Esta perda de energia nada mais é que a energia necessária para a ruptura do material por impacto.

b) Corpos de Prova

Os corpos de prova com dimensões normalizadas 2,5 pol x 0,5 pol x espessura, ilustrados na Figura 5.12, eram recortados das placas, envelhecidas ou não, lixados e entalhados, através uma fresa especial (acessório da máquina de impacto).

A usinagem do entalhe com dimensão de $0,1 \pm 0,002$ pol de profundidade, era feita após ter-se preparado o retângulo 2,5 pol x 0,5 pol, conforme mostra a Figura 5.12. Vale a pena frisar aqui que a função deste entalhe normalizado é facilitar a quebra da amostra sob impacto.

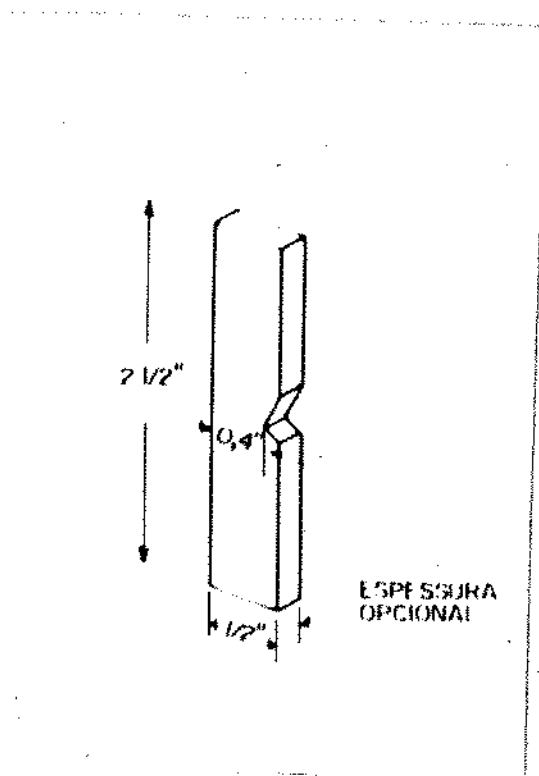


Fig. 5.12 - Corpo de Prova utilizado para o ensaio de impacto IZOD

c) Procedimento

Depois de medida a espessura do corpo de prova, este era fixado na posição exata e sobre ele era incidido o pêndulo da máquina de impacto.

Após o choque com a amostra o pêndulo fornecia o registro da energia necessária para a ruptura do corpo de prova. Este valor tinha como unidades pé-libras/pol de entalhe, que é a unidade convencional de resistência ao impacto para os plásticos reforçados.

6- RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Transmîtâncias

6.1.1 Resultados

O primeiro resultado significativo é o mostrado pela Figura 6.1, onde se pode observar a variação da porcentagem de transmitância (τ %) como o tempo de exposição em horas, num Weather-Ometer, para resina 10-090. Estudou-se simultaneamente a influência da espessura e do tempo de exposição empregando-se resina sem reforço.

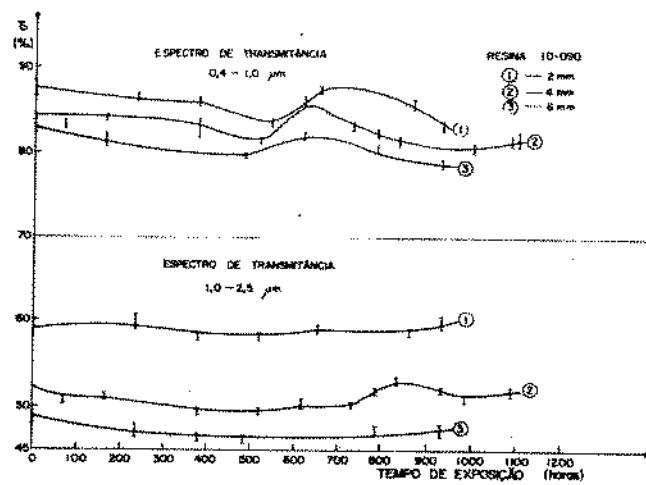


Fig. 6.1 - Influência do tempo de exposição num Weather-Ometer sobre a transmitância para a resina 10-090.

Para todas as medidas desta propriedade ótica foram utilizadas duas faixas para o espectro de transmitância;

- 0,4 a 1,0 μm , que corresponde aproximadamente à 90 % do espectro de radiação solar que chega à superfície da Terra.

- 1,0 à 2,5 μm , que corresponde aos 5 % do espectro de radiação solar na faixa do infravermelho próximo.

A Figura 6.2 mostra um estudo comparativo do envelhecimento acelerado para uma resina com estabilização à radiação ultravioleta (10-090) e outra sem o agente de proteção (T-208).

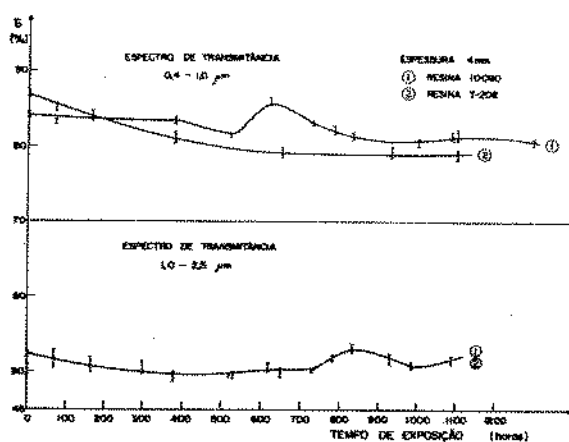


Fig. 6.2 - Influência da estabilização à radiação UV numa resina poliéster durante o envelhecimento acelerado

Os resultados a seguir referem-se aos ensaios para a medição da influência do envelhecimento acelerado sobre várias resinas poliéster reforçadas com fibra de vidro.

A Figura 6.3 mostra como a exposição no Weather-Ometer afeta a transmitância da resina 8001 com vários tipos de reforço.

A curva 1 corresponde ao reforço com véu de superfície (surface mat), e as 2 e 3 aos reforços com mantas de respectivamente 225 e 450 g/cm^2 . Todos os corpos de prova têm a mesma espessura, e o

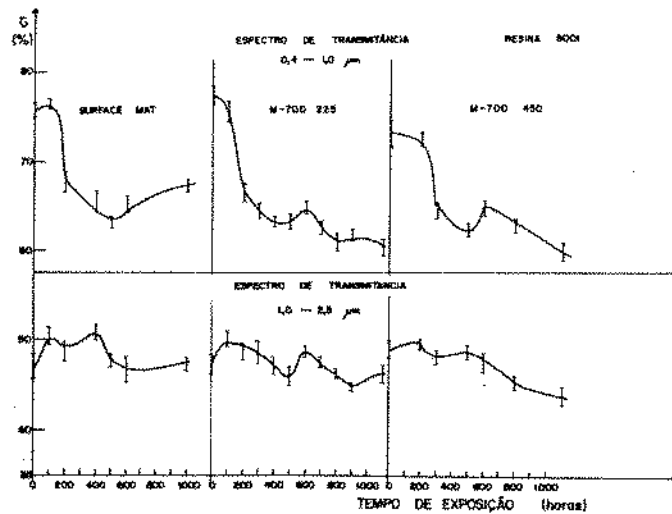


Fig. 6.3 - Influência da exposição no Weather-Ometer sobre a transmitância da resina 8001 para vários tipos de reforços

reforço ocupa uma posição simétrica em relação às faces da amostra. Desta forma as amostras apresentam porcentagem de reforço crescente quando se passa do véu de superfície para a manta M-700 450.

As curvas foram desenhadas separadamente para melhor visualização de seu andamento.

A Figura 6.4 apresenta a variação da transmitância com o envelhecimento acelerado para a resina T-208 com os mesmos tipos de reforços e nas mesmas condições do ensaio anterior.

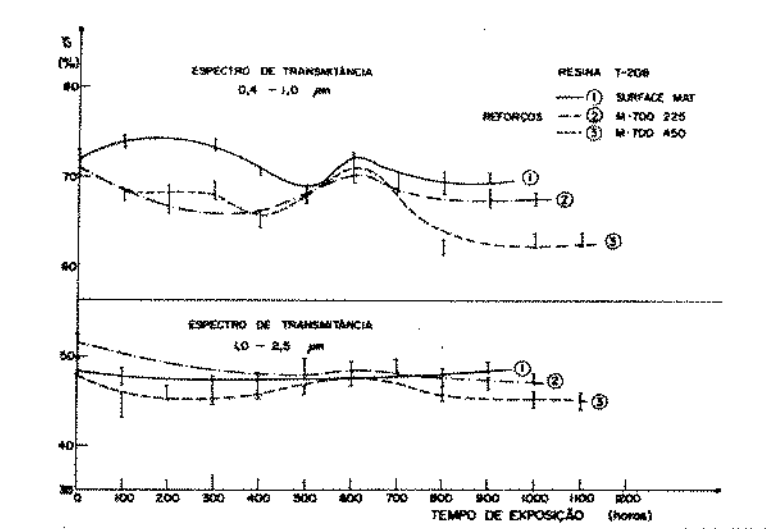


Fig. 6.4 - Variação da transmitância contra o envelhecimento acelerado para a resina T-208 reforçada

A Figura 6.5 mostra a influência do envelhecimento acelerado sobre a transmitância em uma resina estabilizada à radiação UV (10-090) empregando-se ainda os mesmos tipos de fibras de vidro e idêntica espessura como no caso anterior.

As figuras 6.6, 6.7, e 6.8 comparam agora o desempenho dos diversos poliésteres empregados na pesquisa, mostrando como a transmitância se comporta durante a exposição num Weather-Ometer, para três tipos de resina com um mesmo tipo de reforço e idêntica espessura.

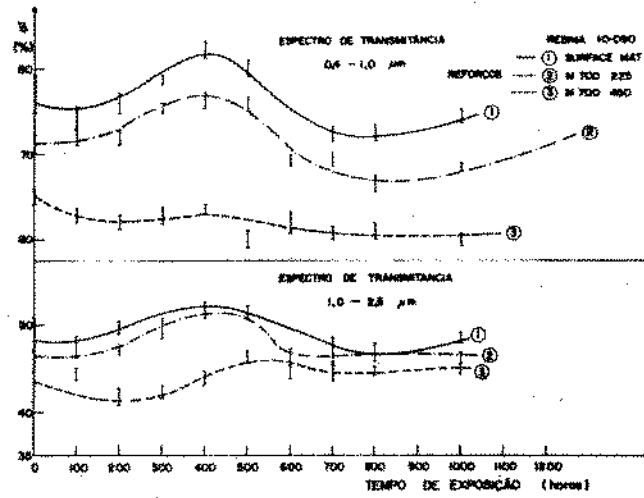


Fig. 6.5 - Influência do envelhecimento acelerado sobre a transmissão para a resina 10-090 reforçada com fibra de vidro

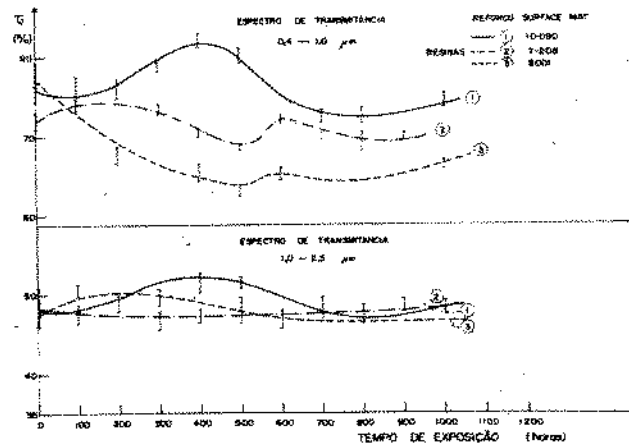


Fig. 6.6 - Influência do envelhecimento acelerado sobre a transmissão para as resinas 10-090, T-208 e 8001 utilizando "Surface Mat" como reforço

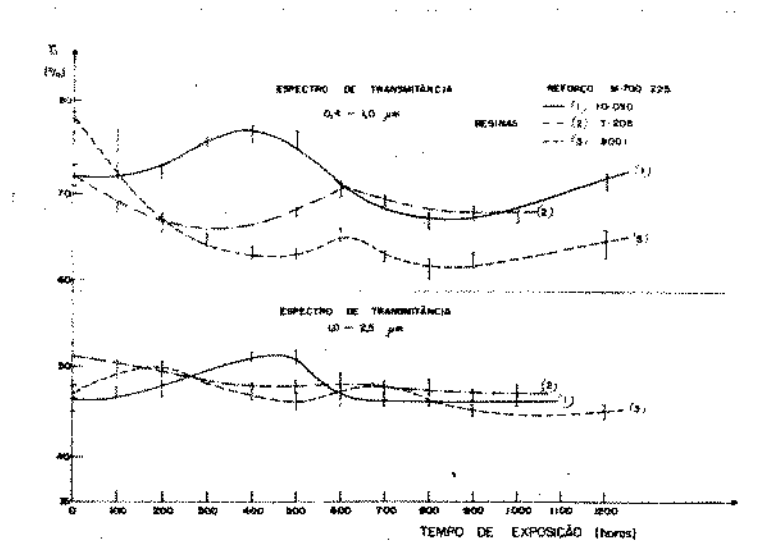


Fig. 6.7 - Influência do envelhecimento acelerado sobre a transmissão para as resinas 10-090, T-208 e 8001 com reforço manta M-700 225

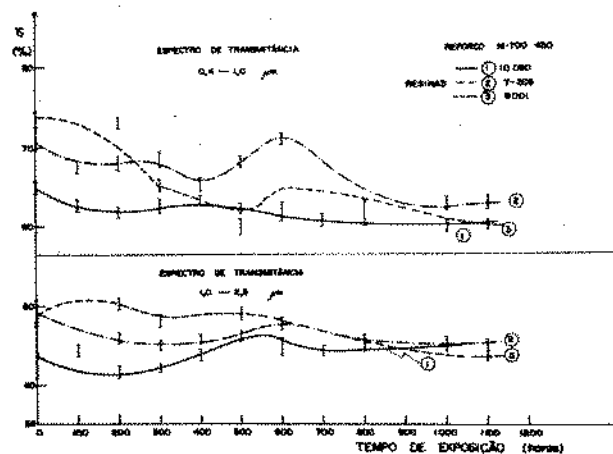


Fig. 6.8 - Influência do envelhecimento acelerado sobre a transmissão para as resinas 10-090, T-208 e 8001 com reforço manta M-700 450

As figuras 6.9, 6.10 e 6.11 analisam quantitativamente o comportamento da transmitância com a porcentagem em peso de reforço para as três amostras empregadas, a alguns níveis de envelhecimento

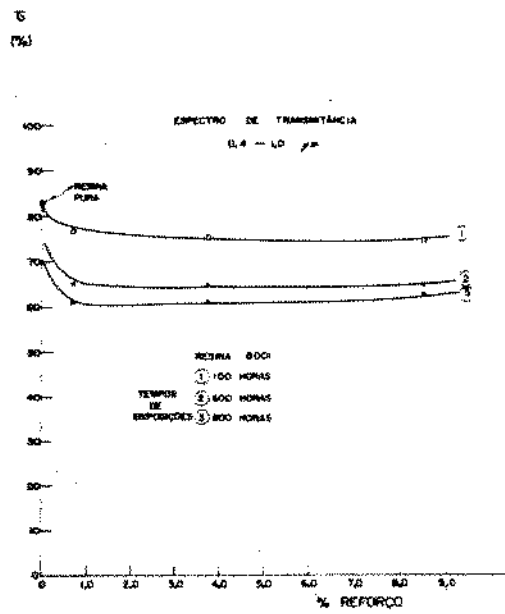


Fig. 6.9 - Comportamento da transmitância com a variação da porcentagem em peso de reforço para a resina 8001

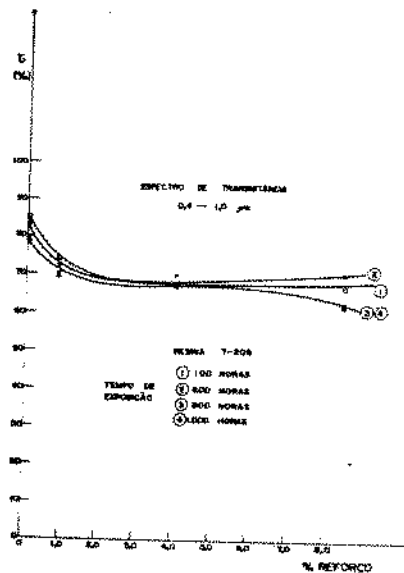


Fig. 6.10 - Influência da porcentagem em peso de reforço sobre a transmitância para a resina T-208, a vários níveis de envelhecimento

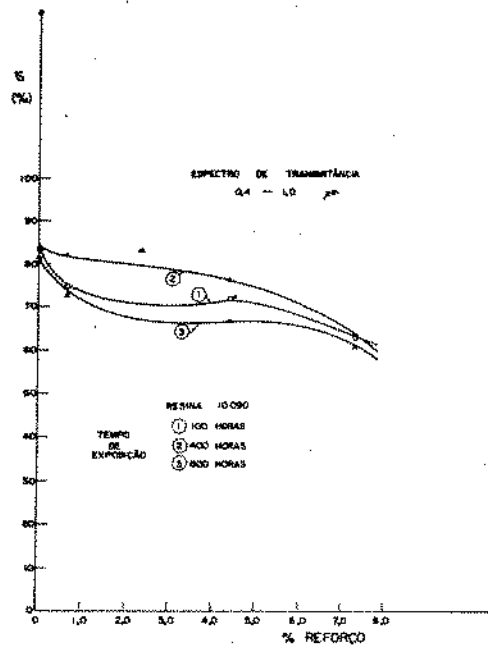


Fig. 6.11 - Influência da porcentagem em peso de reforço sobre a transmitância para a resina 10-090 em algumas faixas de envelhecimento

Nestas figuras ficaram omitidas as barras de desvio-padrão nas curvas para uma melhor visualização do fenômeno observado.

6.1.2 Discussão

Observando-se as figuras anteriores pode-se notar que, de uma maneira geral, as três resinas (10-090, T-208 e 8001) apresentam características próprias durante o envelhecimento-acelerado.

Outro aspecto bastante interessante a ser observado é a discordância de alguns resultados com aqueles previstos na introdução deste trabalho. Um destes aspectos é que a transmitância de qualquer amostra, reforçada ou não, sempre deveria cair com o aumento do número de horas de exposição num Weather-Ometer (Figura 1.3). Isto, no en

tanto , não acontece para a resina 10-090 (Figura 6.1 - espectro de transmitância 0,4 - 1,0 μm) na faixa de 500 a 800 horas, onde acontece um aumento na transmitância atingindo índices iguais ou superiores aos do início do ensaio, ou seja, da amostra antes da exposição.

Deve ser ressaltado outra vez que a resina 10-090 possui estabilidade à radiação UV. A Figura 6.2 mostra que o fato não constitui regra geral, pois o mesmo fenômeno não ocorre para uma amostra que não possui em sua estrutura agentes protetores contra a radiação UV como a resina T-208.

Nestas duas figuras já citadas, o tempo de exposição praticamente não afeta a transmitância no espectro de 1,0 a 2,5 μm . Esta propriedade ótica se mantém quase constante, enquanto que para o espectro de transmitância 0,4 - 1,0 μm nota-se uma tendência à queda na transmitância após 1000 horas de exposição, para ambas resinas.

Outro fato a se destacar é a coincidência das curvas de transmitância (Figura 6.2) para a faixa do infravermelho (1,0-2,5 μm), parecendo que esta propriedade ótica, nesta região particular de radiação, independe do tipo de resina poliéster.

A Figura 6.5 mostra que o fenômeno de aumento de transmitância volta a se repetir quando se submete a amostra 10-090, reforçada com fibra de vidro ao envelhecimento acelerado. Neste caso o aumento é mais acentuado para níveis menores de reforço. No entanto, o fato ocorre em uma faixa de envelhecimento de 200 a 600 horas, distinta portanto daquela apresentada pela resina sem reforço que se situava entre 600 e 800 horas. Este fenômeno ocorre para ambos os espectros de transmitância.

Na tentativa de procurar explicar o porquê do aumento de transmitância, podem-se tecer algumas hipóteses: cura posterior, reações fotoquímicas que alteram a transmitância, melhora na igualdade

dos índices de refração entre a fibra de vidro e a resina, com o envelhecimento.

O primeiro aspecto pode realmente acontecer, pois durante a cura nem todos monômeros irão participar das ligações cruzadas (16), desta maneira restam moléculas livres destes monômeros na estrutura. Estas moléculas que não reagiram contribuem para a perda de transmitância.

Desta forma, quando a resina está exposta à fonte de luz do Weather-Ometer, após um certo número de horas, ela acumula energia radiante que vai proporcionar a reação completa dos monômeros restantes. Isto tudo resulta numa melhora da propriedade ótica.

A segunda hipótese diz respeito à ocorrência de determinadas reações fotoquímicas no poliéster que por sua vez vão ter influência na melhora da transmitância. Para esta comprovação foram levantados espectros de infravermelho, em um espectrofotômetro de infravermelho, para vários intervalos de tempos de exposição com a resina 10-090, e ficou constatado que ocorrem mudanças no espectro resultante (Figura 6.12) que correspondem a modificações na estrutura molecular.

Nesta figura pode-se observar que para as frequências de 700 e 740 cm^{-1} ocorrem picos de absorção. A observação importante é que o tamanho do pico a partir da linha base, na frequência de 700 cm^{-1} , após decorrido um tempo de exposição (600 horas), passa a ser menor que o pico de 740 cm^{-1} .

Certamente esta constatação está intimamente ligada ao fenômeno de aumento de transmitância, pois justamente a inversão nos picos do espectro de infravermelho ocorre no mesmo tempo de exposição - onde se verifica o máximo de transmitância (6)

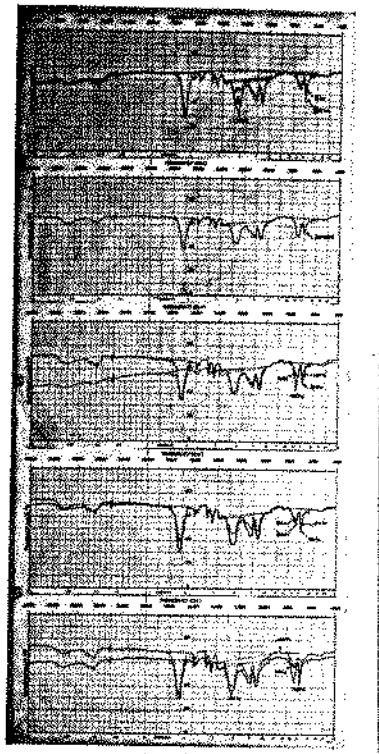


Fig. 6.12 - Espectro do Infravermelho para a amostra 10-090 para intervalos de 100 horas de exposição

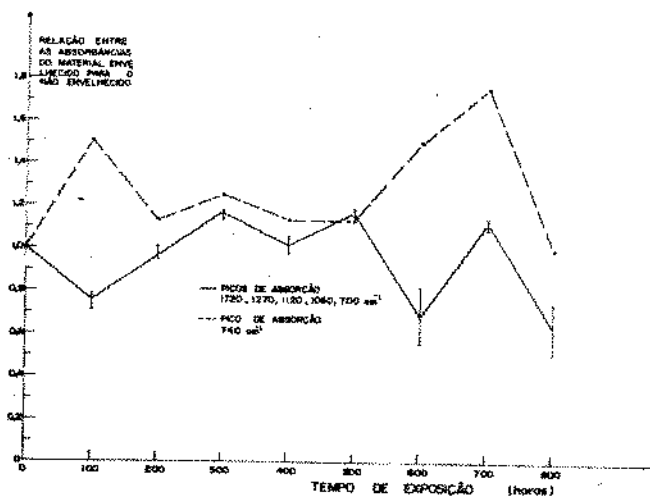


Fig. 6.13 - Influência do envelhecimento acelerado sobre a relação entre as absorvâncias da resina 10-090 exposta e não exposta

A Espectroscopia de Infravermelho tem como objetivo mostrar quais são os picos de absorção característicos de cada grupo funcional contido na amostra testada. Por conseguinte, qualquer alteração, principalmente, reações químicas internas na amostra, vai mudar o espectro de absorção, pois aparecem grupos funcionais novos ou altera-se a quantidade dos grupos funcionais já existentes (27).

Na Figura 6.12 pode-se observar que ocorre uma variação acentuada no tamanho do pico 740 cm^{-1} comparado com o pico 700 cm^{-1} , para os tempos de exposição 100, 600 e 700 horas. A Figura 6.13 comprova este fato, mostrando que as relações entre as absorbâncias nas duas frequências se alteram somente para os tempos de envelhecimento de 600 e 700 horas.

A outra hipótese seria uma consequência desta última análise, ou seja, uma reação fotoquímica que provoque uma melhor igualdade de índices de refração e conseqüentemente a passagem de uma maior porcentagem de luz.

Dentre estes três aspectos analisados uma conclusão muito importante pode se tirar, ou seja, a ocorrência com certeza de uma reação fotoquímica que, sem dúvida, está ligada às propriedades óticas do poliéster, demonstrada pela espectroscopia de infravermelho.

Embora as amostras 8001 e T-208 não apresentem um aumento na transmitância como a 10-090, pode-se notar nas Figuras 6.3 e 6.4 que por volta de 600 horas de exposição acontece uma elevação da porcentagem de transmitância.

Através das curvas, destas figuras, pode-se concluir que a amostra 8001 é muito mais sensível à degradação das propriedades óticas logo após as primeiras horas de exposição.

Isto pode ser explicado pelo fato que a resina 8001 tem em seu sistema de cura um acelerador (naftalenato de cobalto) que além de acelerar o processo de cura; ativa as reações fotoquímicas de

degradação (16, 17, 18).

Outra característica que a amostra 8001 possui durante a exposição até 1000 horas é que o aumento da quantidade de reforço não tem influência sobre a transmitância. Este fato pode ser melhor observado na Figura 6.9.

A amostra T-208, já possui um outro tipo de acelerador de cura, proporcionando uma degradação menos drástica. Esta amostra por sua vez apresenta uma influência mais acentuada da porcentagem de reforço utilizada, sobre transmitância, após 800 horas de exposição, conforme é mostrado na Figura 6.10.

A fim de obter um estudo comparativo entre as amostras foram traçadas as curvas de transmitância em função do envelhecimento nas figuras 6.6, 6.7 e 6.8. O traçado das curvas revela que a amostra 10-090 embora apresente melhor resistência ao envelhecimento acelerado, ela tem sua transmitância decrescente em relação as outras duas amostras, a medida que cresce a porcentagem de reforço. A propriedade de transmitância desta resina é mais sensível ao reforçamento, fato corroborado pelos gráficos da Figura 6.11.

Todas estas considerações levam a uma características importante com respeito ao uso destes tipos de resinas em laminados transparentes. A resina 10-090 embora seja transparente e tenha absorvedor de radiação ultravioleta não tem boa afinidade pelo reforço de fibra de vidro. Enquanto que a resina T-208 embora não tendo estabilização à radiação UV apresenta melhor transmitância que as outras 2 amostras para o reforço M-700 450, para exposição até 1000 horas. A resina 8001 não sendo muito transparente e não tendo absorvedor de UV tem melhor transmitância que os outros dois tipos para grandes porcentagens de reforço (Figura 6.9 e 6.10).

Um aspecto muito importante que deveria ser discutido nes

te capítulo diz respeito aos tipos de monômeros empregados para as resinas de poliéster transparentes. Como já foi esclarecido na introdução, existem 2 tipos de monômeros usados em poliéster: o estireno e o metacrilato de metila. Deve ficar ressaltado aqui que todas as resinas utilizadas neste trabalho tinham como monômero o estireno.

Como alguns trabalhos científicos mostram, o melhor monômero para o poliéster é uma mistura dos dois compostos orgânicos citados, isto quando se deseja um laminado com boa transmitância e melhor estabilidade (14, 19, 20). As pesquisas neste campo mostram que a mistura que proporciona melhor transmitância e melhor durabilidade está na proporção 60/20/20 de resina, metacrilato de metila e estireno, respectivamente.

Embora este trabalho não apresente como objetivo a comparação entre o poliéster reforçado com fibra de vidro e outros materiais usados como coberturas transparentes, na TABELA 6.1 pode ser observado algumas características do vidro e o poliéster sob o ponto de vista de utilização como cobertura de coletores planos.

Os dados de custo do vidro na TABELA 6.1 são retirados a partir de preços comerciais, e o custo do poliéster reforçado com fibra de vidro é estimativo, já que este tipo de laminado foi produzido em laboratório.

Observando a TABELA 6.1 pode-se notar uma diferença entre as transmitâncias do vidro e do poliéster reforçado com fibra de vidro, a título de esclarecimento deve ser dito que o laminado de poliéster utilizados como cobertura tem no máximo 2mm de espessura e o vidro utilizado normalmente de 4 a 5 mm. Então na realidade, em termos de aplicação a diferença entre as transmitâncias não é tão grande.

Deve ficar explícito aqui que as medidas das transmitâncias na faixa de espectro de 1,0 a 2,5 μm aparecem nos resultados de

uma maneira quase que somente ilustrativa. Isto porque, como já foi esclarecido, menos do que 5 % de energia total do Sol que chega ao solo terrestre, faz parte desta faixa do espectro. Assim não são tão significativos, em termos gerais e práticos, os resultados obtidos para esta região espectral.

TABELA 6.1 - CARACTERÍSTICAS DO VIDRO COMERCIAL E O POLIÉSTER REFORÇADO COM FIBRA DE VIDRO UTILIZADOS COMO COBERTURA TRANSPARENTE

Propriedade	Poliéster Reforçado Espessura (4mm) (10-090-Vêu-1000hs)	Vidro Comercial Espessura 2 mm	Vidro Comercial Espessura 4 mm
Transmitância Solar	75 %	90 %	84 %
Resistência ao Impacto (IZOD)	13,14 Nm/m	3,1 Nm/m	4,2 Nm/m
Custo	Cr\$ 120,00/m ²	Cr\$ 200,00/m ²	Cr\$ 260,00/m ²

6.2 Resistência à Tração e Módulo de Elasticidade

6.2.1 Resultados

Conforme já foi descrito na parte experimental, foi impossível obter algum resultado significativo para a resistência a tração, pois a dispersão foi muito elevada dos resultados para o poliéster reforçado estiveram abaixo do poliéster puro.

O módulo de elasticidade obtido também não tem significado algum, pois seus valores se mantinham bem abaixo do polímero puro.

6.2.2 Discussão

A melhor explicação para o ocorrido com os testes de tra

ção é que a técnica de confecção dos laminados não foi a melhor escolhida para esta propriedade mecânica.

Como manta de fibra de vidro não se manteve homogênea ao longo de toda espessura do laminado a superfície ficou muito rica em resina de poliéster. De acordo com o procedimento experimental a manta de fibra de vidro ficava disposta bem no centro do corpo de prova.

O mascaramento dos resultados se deu devido ao fato que os corpos de prova de tração, mesmo reforçados em suas extremidades, sofriam ruptura na área de contato com as garras de tração.

Uma explicação é que a resistência da resina à compressão, principalmente na garra, era muito menor que a resistência à tração. Ou seja, a tensão para manter o corpo de prova na garra sem escorregar era demasiada para o corpo de prova.

Outra explicação, também observada experimentalmente, é que as placas expostas ao envelhecimento sofriam uma certa envergadura. Consequentemente os corpos de prova também possuíam este mínimo de envergadura que provocava um desalinhamento entre as garras de tração. Este desalinhamento fornecia um teste de tração e flexão ao mesmo tempo que por sua vez resultava numa quebra na garra de tração.

Enfim estas duas propriedades mecânicas não foram caracterizadas, somente forneceram indícios de que o tipo de técnica de fabricação do laminado para este estudo não é adequado para medida deste tipo de propriedade.

6.3 Resistência ao Impacto

6.3.1 Resultados

A Figura 6.14 ilustra muito bem o comportamento da resistência ao impacto com o tempo de exposição num Weather-Dmeter para a

amostra 8001 com três tipos de reforço.

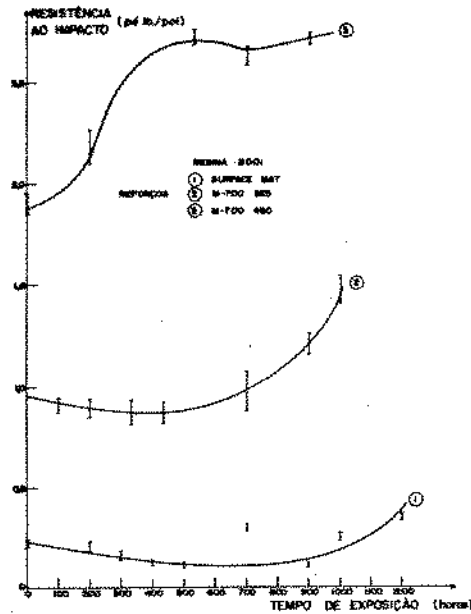


Fig. 6.14 - Influência do envelhecimento sobre a resistência ao impacto para a amostra 8001 reforçada

A Figura 6.15 mostra como a resistência ao impacto se comporta com o tempo de envelhecimento para a amostra T-208 com 3 tipos de reforço.

A variação da resistência ao impacto com o envelhecimento acelerado para a resina 10-090 reforçada é mostrado pela Figura 6.16

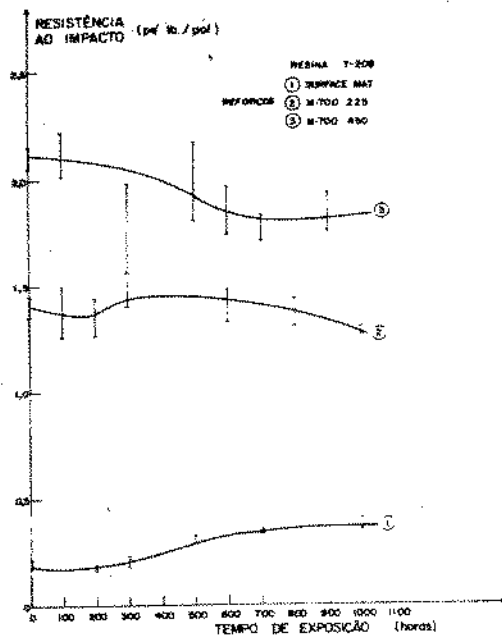


Fig. 6.15 - Comportamento da resistência do impacto com o tempo de exposição para a amostra T-208 reforçada

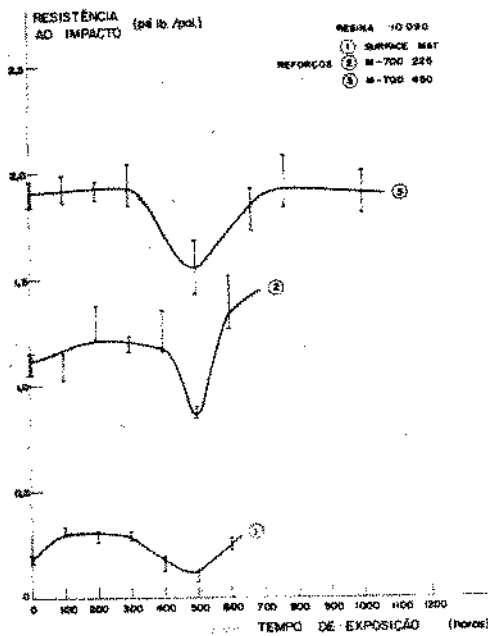


Fig. 6.16 - Influência do envelhecimento acelerado sobre a resistência ao impacto para a amostra 10-090 com 3 tipos de reforços

6.3.2 Discussão:

A resistência ao impacto para uma amostra de poliéster, como qualquer termofixo, é inversamente proporcional à densidade de ligações cruzadas dentro da estrutura da resina curada. Desta forma quanto maior for o número de ligações cruzadas no poliéster menor é a resistência ao impacto, ou seja, mais frágil torna-se o material.

Quando é adicionado o reforço em fibra de vidro a resistência ao impacto aumenta junto com o incremento da porcentagem deste. Entretanto existe um ponto de máxima resistência com a incorporação de reforço, e a partir desse ponto começa a aparecer a influência da fibra de vidro, que é bastante frágil, e a resistência ao impacto cai (Figura 6.17)

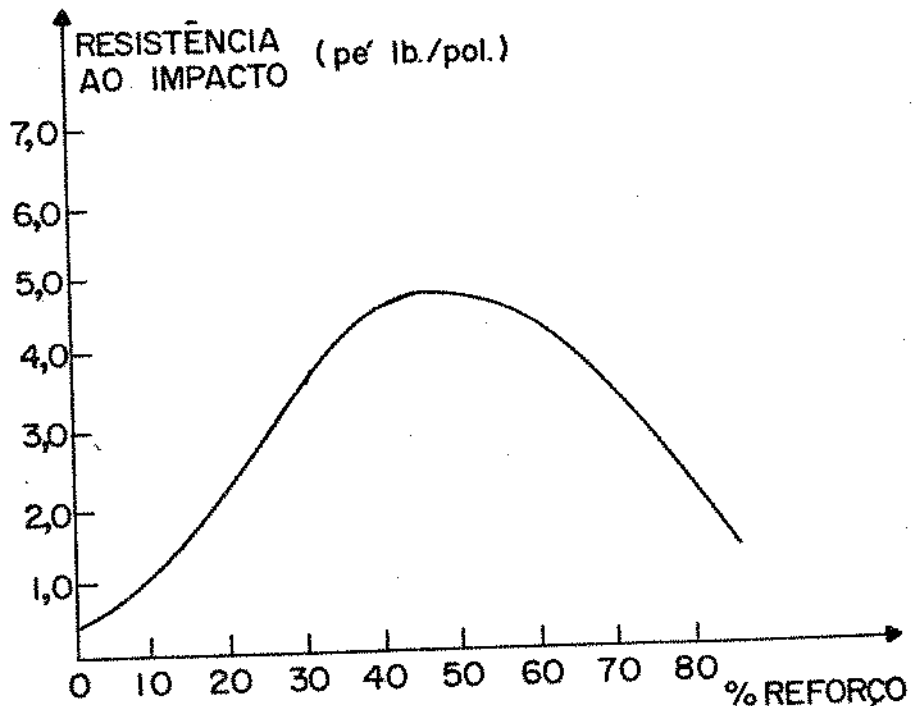


Fig. 6.17 - Influência da porcentagem de reforço sobre a resistência ao impacto de uma resina poliéster

A Figura 6.14 mostra um comportamento normal para a amostra 8001, ou seja, para os níveis menores de reforço há uma queda na resistência nas primeiras horas de exposição e após algum tempo aparece um aumento quase que exponencial na resistência.

A explicação deste comportamento pode ser encontrada numa das hipóteses da secção 6.1.2 deste capítulo. Nas primeiras horas de exposição acontece uma cura posterior provocada pela energia de ativação fotoquímica, proveniente da fonte de luz do Weather-Ometer. A cura posterior provoca o aumento na densidade de ligações cruzadas e conseqüente queda da resistência ao impacto.

O aumento da resistência após esta etapa acontece devido ao fato que, com o número elevado de horas de exposição aparece a degradação da estrutura, e conseqüente quebra das ligações cruzadas. Esta cisão nas cadeias poliméricas torna o material mais dúctil.

Como pode ser observado nesta figura quanto maior for a porcentagem em volume de reforço menor é o tempo de exposição para ocorrer a cura posterior. A curva 3 mostra que a tendência da resistência ao impacto é se estabilizar em algum valor.

A amostra T-208 apresenta o mesmo comportamento somente para baixas porcentagens de reforço. Entretanto para a maior quantidade de fibra o comportamento é inverso, ou seja, há uma queda constante na resistência ao impacto.

A única explicação para este fato é que sempre acontece um aumento na densidade de ligações cruzadas, ou seja, a estrutura molecular proporciona condições para que o ataque fotoquímico crie mais ligações cruzadas, tornando o material mais frágil.

A amostra 10-090 apresenta um comportamento um pouco diferente das outras duas. Neste caso acontece uma queda na resistência ao impacto por volta de 500 horas de exposição e depois volta a crescer. A explicação para este vale nas curvas deve estar intimamente

ligada ao fato mostrado na secção 6.1.2, onde ocorrem reações químicas que foram constatadas num espectro de infravermelho (Figura 6.12).

7- CONCLUSÕES

De acordo com o objetivo deste trabalho a caracterização do comportamento do poliéster reforçado com fibra de vidro para utilização em cobertura transparente de coletores solares térmicos pode-se destacar vários pontos importantes.

A resina com estabilização à radiação UV (10-090) apresenta boa transmitância à luz solar quando pura ou com baixos níveis de reforços. Entretanto quando se aumenta a porcentagem de fibra de vidro, esta transmitância cai drasticamente. Sua resistência ao impacto com o tempo de exposição se mantém, em média, quase que constante.

A resina T-208, sem estabilização, embora apresente uma perda de transmitância com o tempo de exposição quando sem reforço, tem melhor propriedade ótica quando possui médio e alto nível de reforçamento. Sua resistência ao impacto tende a cair com o tempo de exposição para maiores porcentagens de fibra de vidro.

A resina 8001, não muito transparente e sem estabilização, não apresentou uma variação significativa na sua transmitância com o incremento de reforçamento, entretanto sua perda de transparência à luz solar é drástica com o tempo de envelhecimento acelerado. Por outro lado, a sua resistência ao impacto aumenta com tempo de exposição, o que não acontece com os outros 2 tipos de resina.

Deve ficar ressaltado neste capítulo que numa aplicação prática do poliéster com fibra de vidro em coletores solares térmicos, utilizam-se espessuras menores do que aquelas empregadas neste trabalho. Desta forma, quando se analisar os resultados visando o estudo da eficiência térmica, os valores encontrados de transmitância devem ser corrigidos para a espessura, ou seja, por porcentagem de reforço, usada na cobertura do coletor.

Conforme a análise anterior, a escolha do tipo de resina no projeto da cobertura depende muito do nível de reforçamento. Para a aplicação proposta, na verdade não se faz necessário uma grande porcentagem de reforço. O emprego de uma camada da manta 225 g/cm^2 para as espessuras até 4mm é mais que suficiente para conferir à placa de poliéster, adequada rigidez e resistência ao impacto - esta última propriedade é aproximadamente 6 vezes superior a do vidro na mesma espessura.

Nestas condições recomenda-se o emprego de resinas de alta transparência e estabilizadas contra os raios ultravioleta, como a PolyLite 10-090 utilizada nesta pesquisa.

Quando, por alguma razão for necessário empregar porcentagens de reforço elevados pode-se concluir que a resina 10-090 passa a não ter tantas vantagens sobre os outros tipos, PolyLite 8001 e PolyLite T-208, mesmo sobre longos períodos de exposição. Neste caso a escolha da resina a empregar deverá ser direcionada a um aspecto econômico, pois sob o ponto de vista de eficiência apresentam pouca diferença entre si.

As tentativas para a explicação dos fenômenos inesperados, encontrados nesta pesquisa, foram abordadas superficialmente. Os estudos de tais fenômenos devem fazer parte de um trabalho em separado, pois exigem uma abordagem que foge do objetivo deste trabalho.

Através da correlação entre o envelhecimento acelerado e o natural, exposto no Apendice 1, conclui-se que as resinas poliéster podem ser consideradas materiais aptos para emprego como cobertura de coletores solares por períodos de pelo menos 5 anos.

8- LINHAS DE PESQUISA DECORRENTES DESTE TRABALHO

Como foi mostrado neste trabalho as características de algumas resinas de poliéster comerciais nacionais não são muito vantajosas para a aplicação como cobertura transparentes. Existem alguns tipos de resinas poliéster, cujo monômero é uma mistura de metacrilato de metila e estireno, com uma eficiência muito maior quando utilizados em exposição às intempéries.

Deveria ser feito um estudo procurando encontrar um poliéster com maior resistência às intempéries, a partir da variação das porcentagens dos tipos de monômeros, com o mais baixo custo. O monômero de metacrilato de metila é bem mais caro que o estireno.

Neste trabalho foi observado que existem vários fatores que influenciam na degradação da resina poliéster. Todos estudos efetados utilizaram as resinas comerciais, portanto é muito difícil conhecer os fenômenos constatados por causa da incerteza quanto a estrutura do poliéster, naturalmente, são informações que o fabricante resguarda. Em vista disto, um estudo muito interessante seria da influência da estrutura do poliéster sobre a degradação. Este tipo de pesquisa é muito pouco explorada.

Enfim este estudo a ser seguido teria como objetivo um desenvolvimento tecnológico visando a fabricação de uma resina especial, com melhor eficiência, para utilização em coberturas transparentes de coletores, ou quaisquer outras aplicações semelhantes.

BIBLIOGRAFIA

- 1- STEIN, C. (editor) - "Critical Materials Problems in Energy Production" - Academic Press, Inc.; New York, 1976
- 2- DUFFIE, J. A. e BECKMAN, W. A. - "Solar Energy Thermal Processes" Wiley-Interscience Publication, New York, 1974
- 3- SCHWARTZ, R. T. e ROSATO, D. V. - "Environmental Effects on Polymeric Materials" (vol.1). Interscience Publishers, 1968, New York.
- 4- REICH, L. e STIVALA, S. S. - "Elements of Polymer Degradation" McGraw-Hill Book Company, New York, 1971
- 5- GROSSMAN, G. W. - "Correlation of Laboratory to Natural Weathering" - Journal of Coatings Technology, vol 49, n° 633, pag 45-54, october 1977
- 6- HIRT, R. C.; SCHNUTT, R. G. e DUTTON, W. L. - "Solarization Studies on Polyester Resin Using a Heliostat-Spectrometer". Solar Energy, n° 11, pag 19-22, 1974
- 7- WHITE, J. S. - "Weatherability of Fiberglass Solar Collector Covers" - Polymer News, 3, n° 5, pag 239-45, 1977
- 8- "Polímeros Reforçados com Fibra de Vidro" - Boletim Técnico - Ocfibras (Subsidiária da Owen/Corning Fiberglass Corp.)
- 9- McCURUM, N. G. - "A Review of the Science of Fibre Reinforced Plastics" - H. M. Stationery Office - London, 1971.
- 10- "Tipos de Vidro e suas Aplicações" - Boletim Técnico-Ocfibras
- 11- RAINHART, L. G. e SCHIMMEL, W. P. - "Effect of Outdoor Aging on Acrylic Sheet" - Solar Energy, vol 17, pag 259-64, 1975
- 12- SHERMAZANYAM, Ya. T. - "Accelerated Light and Weather Ageing Tests on Materials an Manufactured Components Using Solar Installations (A REVIEW) Geliotekhnika, vol 6, n° 44, pag 37-49, 1970

- 13- "Atlas Fade-Ometer and Weather-Ometer" - Boletim Técnico nº 1300 B
ATLAS ELECTRIC DEVICES COMPANY.
- 14- SMITH, A. L. e LOWRY, J. R. - "Long-Term Durabilities of
Polyesters in Glass-Reinforced Parts" - Plastics Technology,
vol 6, pag 50, Aug., 1960
- 15- WHITEHOUSE, A. A. K e WILDMAN, D. - "Surface Weathering Characteristics
of Reinforced Polyesters" - Reinforced Plastics, 9 pag
137-142, Jan, 1965
- 16- DEAN, R. T. e MANASIA, J. P. - "Stabilization of Polyesters to
Light" - Modern Plastics, 32, 6, pag 131-39, Feb-1955
- 17- PHILLIPS, D. - "Photo-oxidation and Weathering of Polymers" -
Polymer News, 3, nº 5, pag 246-50, 1977
- 18- DEANIN, R. D.; ORROTH, S. A.; ELIASSEN, R. W.; e GREER, T. N. -
"Mechanism of Ultra-Violet Degradation and Stabilization in
Plastics" - Polymer Engineering and Science, vol 10, nº 4, July
1970
- 19- SMITH, A. L. e LOWRY, J. R. - "Unsaturated Polyester Resins
Containing Methyl Methacrylate Monomer" - Modern Plastics, pag
134-42, Mar., 1958
- 20- EDWARDS, D. L.; VON BARMER, P. T.; TRENT, P. J. e CURTIS, L. G. -
"Weather Resistance of Polyester Resins" - Plastics, pag 997-98,
Aug 1966
- 21- SCOVILLE, A. E. - "An Alternate Cover Materials for Solar Collectors
" - Plast. Bldg. Constr., 1, nº 11, pag 17-20, Nov. 1975
- 22- RUGGER, R. G. et al - "Weathering of Glass Reinforced Plastics
Technical Evaluation Center Picatinny Arsenal, Dover New Jersey
Jan. 1966
- 23- MOSS, W. H. e LANS, A. B. - "The use of Accelerated Weathering
Methods in the Development of Reinforced Plastics Products for
Outdoor Use" Appl. Plast. Reinforced, 7, nº 11, pag 26/1 - 26/6

Nov. 1964

- 24- "A New Sunshine Arc Electrode" - Atlas Sun Spots, vol 5, 12,
Spring 1976
- 25- NORTON, J. E. - "New 6500 W Water Cooled Xenon Lamp" - Atlas Sun
Spots, vol 3, 8, Nov. 1974
- 26- BEAVAN, S. W.; HACKETT, P. A. e PHILLIPS, D. - "Phosphorescence of
Carbonyl Compounds Produced By Thermal And Photo-oxidation of
Polybutadiene - European Polymer Journal, vol 10, pag 925-32,
1974
- 27- HANNAH, R. W. e SWINEHART, J. S. - "Experiments in Techniques of
Infrared Spectroscopy" - Perkin-Elmer Corporation Infrared
Applications Laboratory, Settembre, 1974
- 28- BILLMEYER, F. W. - "Textbook of Polymer Science" - Interscience
Publisher, 1972, New York
- 29- RODRIGUES, F. - "Principles of Polymer Systems" - McGRAW-HILL Book
Company, 1970, New York

APÊNDICE 1

Estimativa da Correlação entre o Envelhecimento pelo Weather - Ometer 65/XW-WR1 para o Natural

O objetivo da realização do cálculo desta correlação se fundamenta no fato de que se deve ter em mãos dados para tentar transformar o envelhecimento acelerado em natural. Entretanto é necessário frisar aqui que esta correlação é simplesmente uma estimativa, pois são inúmeras as variáveis que a natureza apresenta, e o Weather-Ometer não possui possibilidade de reproduzi-las.

Como já foi feita a explanação da influência dos 3 fatores que afetam o polímero exposto às intempéries: temperatura, umidade e a faixa de radiação UV (290-315nm), vale a pena ressaltar outra vez que estes são interdependentes. Seria quase impossível estudar a variação dos 3 efeitos ao mesmo tempo. Desta forma, para facilidade de cálculo deve-se ter os dois efeitos menos importantes fixos durante os experimentos e fazer a correlação em torno do terceiro efeito. Isto é, mantendo-se a temperatura e umidade constantes e utilizando-se a variação da porcentagem de radiação solar que chega ao solo terrestre.

No Weather-Ometer a temperatura e a umidade durante os ensaios de envelhecimento foram mantidas fixas, ou seja 45°C e 75 % de umidade relativa do ar (URA).

Nesta estimativa o principal fator de degradação considerado é a energia proporcionada por uma faixa de comprimentos de onda no espectro de radiação UV. A faixa de radiação, proveniente do Sol que chega ao solo terrestre, que provoca a degradação é 290 a 315 nm.

A lâmpada que fornece luz no Weather-Ometer tem um espectro de radiação próprio (Figura 5.5). Neste espectro pode-se tirar, medindo a área sob a curva, a energia fornecida pela lâmpada na faixa acima.

Procedendo-se desta maneira encontrou-se que a lâmpada emite $0,111 \frac{\text{KWh}}{\text{m}^2 \text{ dia}}$ na referida faixa de radiação.

Através de dados fornecidos pelo *Instituto Agronômico de Campinas*, a energia solar média anual (Hm) em Campinas-SP é $4,48 \frac{\text{KWh}}{\text{m}^2 \text{ dia}}$. Como foi descrito no capítulo 2, a energia fornecida pela faixa 290 a 315 nm é de 0,1 % em média, da energia média anual, assim $0,0045 \frac{\text{KWh}}{\text{m}^2 \text{ dia}}$, teoricamente, provoca a deterioração do material plástico.

Portanto a correlação é calculada dividindo a energia da lâmpada pela energia solar, na faixa 290 a 315 nm.

$$\frac{0,111}{0,0045} = 25$$

Esta correlação indica que cada hora de exposição no Weather-Ometer representa 25 horas de exposição às intempéries.

Análise do Resultado

A correlação encontrada certamente não é a real, pois a variação de unidade foi relegada a segundo plano, mas quando se proporciona tempos longos de exposição esta correlação não se distancia muito da real.

Assim 1000 horas de exposição no Weather-Ometer equivale a mais ou menos 3 a 4 anos de exposição natural, 2000 horas de exposição equivale de 5 a 7 anos (23).

APENDICE 2

Neste capítulo estão dispostas todas as tabelas referentes aos diversos ensaios efetuados e diversas figuras desenhadas.

TABELAS

1- Influência da porcentagem de catalizador sobre a transmitância (τ) para a resina 10-090

Porcentagem de Catalizador (PMEK)	Transmitância (%)	
	0,4 - 1,0 μm	1,0 - 2,5 μm
0,1	84,1	51,5
0,4	84,2	52,1
0,6	84,3	52,1
0,8	84,4	52,1
1,0	85,0	51,9
2,0	85,6	51,9
3,0	85,0	51,6

2- Influência da espessura sobre a transmitância da resina 10-090

Espessura (mm)	Transmitância	
	0,4 - 1,0 μm	1,0 - 2,5 μm
2	87,7	59,3
4	84,2	52,1
6	82,7	48,1
8	81,0	43,3

3- Influência do Tempo de exposição num Weather-Ometer sobre a transmitância para a resina 10-090.

Tempo de Exposição (horas)	Espessura (mm)	Transmitância	
		0,4 - 1,0 μm	1,0 - 2,5 μm
0	2	87,2	59,3
234	2	86,4	60,1
380	2	86,1	58,2
520	2	83,5	58,1
656	2	87,3	59,2
866	2	85,8	58,8
930	2	82,6	59,9
0	4	84,2	52,1
69	4	83,3	50,8
166	4	84,1	51,2
380	4	83,5	49,5
520	4	81,4	49,5
531	4	81,6	50,1
620	4	86,6	50,4
729	4	83,0	50,3
785	4	82,2	52,0
832	4	81,4	53,4
985	4	79,8	50,9
1000	4	81,5	-
1085	4	80,5	51,9
1100	4	81,9	-
0	6	82,7	48,1
234	6	81,6	47,2
380	6	82,2	46,4
485	6	79,6	46,2
620	6	81,8	-
785	6	80,5	47,4
900	6	77,3	-
930	6	78,6	47,7

4- Influência do tempo de exposição num Weather-Ometer sobre a transmitância para a resina T-208

Tempo de Exposição (horas)	Transmitância	
	0,4 - 1,0 μm	1,0 - 2,5 μm
0	86,8	50,3
69	85,3	52,2
166	84,2	50,7
297	84,0	50,5
380	81,4	49,2
531	83,5	49,7
930	79,2	51,5
1100	79,4	-

5- Influência da exposição no Weather-Ometer sobre a transmitância da resina 8001 para tipos de reforços

Tempo de Exposição (horas)	Transmitância					
	0,4 - 1,0 μm			1,0 - 2,5 μm		
	Surface Mat	M - 700 225	M - 700 450	Surface Mat	M - 700 225	M - 700 450
0	75,2	77,3	73,1	46,8	47,3	48,1
100	76,6	75,5	-	50,5	50,3	-
200	67,8	66,5	72,7	48,8	48,7	49,6
300	-	64,4	64,6	-	48,8	48,1
400	65,6	63,1	-	50,9	47,2	-
500	63,3	63,0	62,4	47,8	46,1	48,9
600	65,3	64,8	65,0	46,8	48,9	47,7
700	-	62,7	-	-	47,8	-
800	-	61,0	63,1	-	46,5	45,5
900	-	62,1	-	-	45,0	-
1000	68,7	-	-	47,5	-	-
1100	-	60,5	59,6	-	46,3	43,8
1200	-	63,7	-	-	45,1	-

6- Variação da transmitância contra o envelhecimento acelerado para a resina T-208 reforçada

Tempo de Exposição	Transmitância					
	0,4 - 1,0 μm			1,0 - 2,5 μm		
	Surface Mat	M - 700 225	M - 700 450	Surface Mat	M - 700 225	M - 700 450
0	71,9	71,5	71,5	48,6	51,3	49,2
100	74,1	68,1	67,3	47,5	48,2	44,7
200	-	66,6	68,1	-	49,6	46,1
300	73,1	-	68,4	46,8	-	45,6
400	70,0	-	65,2	47,2	-	46,1
500	68,4	67,4	68,1	48,5	48,3	46,4
600	72,1	70,1	71,0	47,5	48,7	48,7
700	70,0	68,9	-	49,0	47,5	-
800	69,3	-	62,1	47,0	-	46,0
900	70,7	67,5	-	48,7	47,0	-
1000	-	67,7	63,2	-	48,0	45,2
1100	-	-	63,0	-	-	45,0
1200	-	-	-	-	-	-

7- Influência do envelhecimento acelerado sobre a transmitância para a resina 10-090 reforçada com fibra de vidro

Tempo de Exposição (horas)	Transmitância					
	0,4 - 1,0 μm			1,0 - 2,5 μm		
	Surface Mat	M - 700 225	M - 700 450	Surface Mat	M - 700 225	M - 700 450
0	77,3	71,2	65,1	48,7	46,2	42,7
100	74,3	72,1	62,8	47,4	47,8	44,4
200	75,9	72,1	62,1	49,7	47,2	41,0
300	78,8	75,6	62,8	49,4	49,4	42,4
400	82,1	76,3	63,0	52,3	51,4	44,1
500	80,1	76,2	59,9	51,6	51,4	46,4
600	-	69,2	61,9	-	46,5	44,8
700	72,3	69,5	60,7	47,5	46,7	44,5
800	72,5	66,5	61,1	47,1	46,5	45,0
900	-	-	-	-	-	-
1000	74,6	68,6	60,0	48,6	46,4	45,1
1100	-	-	-	-	-	-
1200	-	71,1	-	-	-	-

8- Influência do envelhecimento acelerado sobre a resistência ao impacto para a amostra 10-090 com 3 tipos de reforços

Tempo de Exposição (horas)	Resistência ao Impacto pé. lb/pol		
	Surface Mat	M - 700 225	M - 700 450
0	0,176	1,055	1,900
100	0,31	1,085	1,920
200	0,282	1,292	1,910
300	0,290	1,187	1,942
400	0,158	1,225	-
500	0,100	0,860	1,538
600	0,250	1,379	1,820
700	-	-	1,940

9- Comportamento da resistência ao impacto com o tempo de exposição a amostra T-208 reforçada

Tempo de Exposição (horas)	Resistência ao Impacto pê. lb/pol		
	Surface Mat	M - 700 225	M - 700 450
0	0,200	1,350	2,100
100	-	1,376	2,120
200	0,183	1,352	-
300	0,210	1,479	1,754
400	-	-	-
500	0,310	0,975	2,010
600	0,165	1,400	1,840
700	0,340	-	1,776
800	-	1,370	-
900	-	-	1,840
1000	0,380	1,280	-

10- Influência do envelhecimento sobre a resistência ao impacto para a amostra 8001 reforçada

Tempo de Exposição (horas)	Resistência ao Impacto pê. lb/pol		
	Surface Mat	M - 700 225	M - 700 450
0	0,220	0,950	1,95
100	-	0,920	1,934
200	0,200	0,900	2,170
300	0,164	0,876	-
400	0,122	0,877	-
500	0,110	-	2,747
600	-	-	-
700	0,295	0,977	2,618
800	-	-	-
900	0,107	1,201	2,700
1000	0,250	1,470	-
1100	-	-	-
1200	0,350	1,08	-