

ESTUDO DE MATERIAIS POLIMÉRICOS PARA A APLICAÇÃO EM COLETORES SOLARES PLANOS

José Maurício Leitão – leitao_mauricio@hotmail.com,

Mario Henrique Macagnan – mhmac@unisinis.br

Tatiana Louise Ávila de Campos Rocha – tlavila@unisinis.br

Escola Politécnica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Unisinis, São Leopoldo, Brasil

Resumo. Para avaliar a adequação de coletores solares planos em que são utilizados materiais poliméricos, a escolha desses materiais leva ao fato da necessidade de características distintas em cada parte do coletor. Na cobertura, os materiais utilizados devem ter uma boa resistência a ruptura, devem ser transparentes e ter uma transmitância elevada em comprimentos de ondas até $2,5 \mu\text{m}$ e uma transmitância baixa em comprimentos de onda com mais de $2,5 \mu\text{m}$. Isso se deve ao fato de que a cobertura deve ser transparente para a radiação Sol (baixo comprimento de onda) e ser opaca para a radiação emitida pela placa absorvedora (comprimento de onda alto). O material que mais se adequa nesse requisito é o Policarbonato (PC). O PC exibe uma perda de transmitância de 3% a 5% após 2 a 3 anos, mas com a adição de uma película protetora contra raios UV, laminada junto com o PC, exibe uma perda significativa somente após 10 a 15 anos. Um dos fatores que se leva em conta na seleção do polímero no absorvedor, é seu nível de degradação com o tempo e sua condutividade térmica, dois materiais que se destacam, são o Polissulfona (PSU) e o Polietileno (PE). O PSU tem o melhor resultado em relação ao nível de degradação pois sua cadeia polimérica é composta por anéis aromáticos e fortes ligações de carbono, enxofre e oxigênio dentro da espinha dorsal do polímero. No caso do PE, os resultados de degradação em uma câmara de intemperismo acelerado se concluiu que o polímero tem uma baixa perda de transmitância em relação ao tempo exposto. Em relação à condutividade térmica, o PSU possui uma condutividade de $0,26 \text{ W/m/K}$ enquanto que o PE é entorno de $0,4 \text{ W/m/K}$.

Palavras-chave: Energia solar, Coletor solar plano, Coletores poliméricos

1. INTRODUÇÃO

A produção de energia, com eficiência e economia são fatores chave no desenvolvimento social e econômico de um país. A energia solar é uma fonte de energia limpa e renovável que vem se destacando no cenário mundial, por ser a menos poluente e menos finita se comparada a qualquer outra fonte conhecida até o momento. A utilização da energia solar, em sua maior parte, acontece para o aquecimento de água com coletores solares planos, utilizados tanto no uso doméstico como industrial. Nos últimos 10 anos, os coletores solares planos, por causa do apelo mundial na utilização de materiais com maior facilidade na reciclagem, bem como pelo poder econômico, vem utilizando cada vez mais materiais poliméricos, substituindo os materiais utilizados convencionalmente.

Por este motivo são procurados materiais que possam substituir os convencionais, mas para a implementação destes, o material selecionado deve ser competitivo termicamente e fisicamente com os materiais já utilizados. Os absorvedores solares poliméricos têm sido reconhecidos como uma alternativa promissora para reduzir o custo dos coletores solares. Os absorvedores poliméricos, em coletores solares sem cobertura, para aquecimento de piscinas estão no mercado há muitos anos (OLIVARES *et al.*, 2010).

O uso mais difundido da energia solar no país tem sido através da instalação de coletores solares utilizados para o aquecimento de água em residências, hotéis, hospitais e piscinas. A utilização de um polímero para o absorvedor ocasiona uma vantagem no custo, mas também leva uma desvantagem no tempo de vida, devido a degradação do material. Os níveis de degradação são dependentes do tipo de polímero utilizado e pelo aditivo adicionado ao material.

Na procura do polímero ideal, testes de degradação são essenciais, mas não primordiais, pois o material deve ter propriedades térmicas comparáveis aos materiais convencionais e, para a análise destas propriedades, testes térmicos e ópticos são aconselháveis, com o intuito de escolher o material ideal a ser utilizado em um coletor solar.

2. COLETORES SOLARES

De acordo com Duffie e Beckman (2013), coletor solar é um tipo especial de trocador de calor que transforma a radiação solar em energia térmica. O coletor solar difere em muitos aspectos a um trocador de calor convencional que, na maioria das vezes, troca calor de um fluido para outro, diferentemente de um coletor solar, que transforma a radiação solar em forma de calor para um fluido. Segundo Köhl *et al.* (2012), a particularidade e importância de um coletor solar térmico se dá ao fato de ser um dispositivo que converte a radiação da fonte de energia mais duradoura, o Sol, na forma de calor e utilizando o no seu melhor potencial, como o aquecimento de um fluido.

Segundo Kalogirou (2004), existem basicamente dois tipos de coletores solares: planos e concentradores. Um coletor plano ou também chamado de não concentrador, tem a mesma área de interceptação e de absorção de radiação, ou seja, o

tamanho do absorvedor é o tamanho do próprio coletor. Nos coletores concentradores, normalmente a área de interceptação da radiação é maior que a área de absorção. Isso se dá devido a presença de superfícies refletivas, que refletem todo feixe de radiação na área total do coletor para uma área, normalmente no centro, pequena, onde está localizado o absorvedor, ocasionando um fluxo de radiação muito maior se comparado a um coletor plano e perdas térmicas menores.

2.1 Coletor Solar Plano

O coletor solar plano é constituído por uma caixa isolada à prova de água, normalmente de alumínio ou em aço inox ou algum material polimérico, uma placa de absorção de cor escura, ligada diretamente a uma tubulação de cobre, onde o fluido circula e uma cobertura feita normalmente de vidro com uma ou mais camadas. No absorvedor, as placas são tipicamente feitas de metal devido à sua alta condutividade térmica e pintadas com revestimentos específicos, a fim de aumentar a absorvância da radiação, com o intuito de atingir temperaturas maiores no fluido.

Quando a radiação solar passa através da cobertura e incide no absorvedor negro de alta absorvância, uma larga porção dessa energia é absorvida pela placa e transferida em forma de calor para o fluido contido nos tubos. A parte inferior bem como as laterais do absorvedor são isoladas para se reduzir as perdas por condução (KALOGIROU, 2009). Existem vários tipos de design, principalmente em relação ao absorvedor, bem como podem ser utilizados diversos materiais diferentes, tanto no absorvedor como na cobertura. O maior propósito de um coletor é coletar o máximo de energia solar possível e transferi-la o mais eficientemente possível para o fluido de trabalho, obtendo também o custo total o mais baixo possível.

Cobertura. A cobertura tem como principais objetivos proteger a placa absorvedora das intempéries, reduzir as perdas de calor por convecção através da camada de ar estagnada entre a placa absorvedora e a cobertura e as perdas de calor por radiação entre o absorvedor e o meio externo. O material mais comum usado é o vidro, por ter uma boa transmitância, de tal forma que é transparente para a radiação de baixo comprimento de onda, proveniente do Sol, e opaca para a radiação no espectro infravermelho, proveniente da placa absorvedora, como representado na Fig. 1, além de ter uma boa resistência as intempéries, protegendo assim a placa absorvedora (DUFFIE e BECKMAN, 2013).

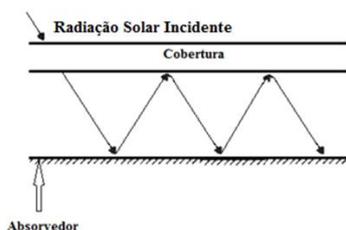


Figura 1 – Comportamento da radiação solar sobre uma cobertura.

Absorvedor. O absorvedor, como o próprio nome esclarece, tem como objetivo absorver a radiação incidente e transmitir para o fluido em forma de calor, para o aquece-lo. O absorvedor pode ter vários formatos, cada um dependente da aplicação bem como o custo aplicado no coletor, ou seja, quanto mais complexa a geometria a fim de maximizar a transmissão de calor para o fluido, mais caro será o projeto.

Isolamento. O isolamento tem como principal função minimizar a transferência de calor da placa com o meio externo, através das laterais e do fundo do coletor. Outra função do isolamento é a contribuição na estrutura do conjunto, assim melhorando a fixação em telhados e afins. Os materiais mais comuns que são utilizados no isolamento dos coletores são lã de rocha, lã de vidro e poliuretano expandido.

3. POLÍMEROS

Polímero é uma classe de material que inclui materiais plásticos e borrachas. Muitos dos polímeros são compostos orgânicos que têm sua química baseada no carbono, no hidrogênio e em outros elementos não metálicos, como exemplo, O, N e Si. Além disso, eles têm estruturas moleculares muito grandes, com frequência na forma de cadeias, que frequentemente possuem uma estrutura composta por átomos de carbono (Callister e Rethwisch, 2012).

Os polímeros podem ser tanto naturais como sintéticos, de acordo com a origem dos mesmos. Apesar da quantidade de polímeros naturais exceder de longe a produção de polímeros sintéticos na indústria moderna, os polímeros naturais perderam sua importância econômica com o advento da tecnologia dos polímeros. No entanto, os polímeros naturais estão retomando a sua importância econômica com a mudança de atitude da humanidade através da conscientização ecológica. Os polímeros naturais mais conhecidos e utilizados são: a borracha natural, a celulose e as proteínas. Entre os polímeros sintéticos tem-se o polietileno (PE), o polipropileno (PP), o polietileno tereftalato (PET), como alguns exemplos (Silva e Silva, 2003).

Muitos dos polímeros são extremamente dúcteis e flexíveis, ocasionando uma vantagem ao serem conformados em formas complexas, isto é, podem tomar formas em processos mais simples se comparados a metais. A escolha do uso de um polímero em um projeto é principalmente pelo baixo custo e sua baixa densidade. As duas características estão

relacionadas de modo que, em razão de ter uma baixa massa específica, o material tem um menor valor por unidade de volume do que a maioria dos outros materiais.

3.1 Tipos

Os polímeros podem ser classificados quanto as características distintas de cada grupo, nos quais se dividem em termofixos, termoplásticos e elastômeros. As duas subdivisões mais importantes são os termofixos e os termoplásticos. Isso se deve ao fato de que, de acordo com Callister e Rethwisch (2012), a resposta de um polímero às forças mecânicas em temperaturas elevadas está relacionada à sua estrutura molecular dominante. De fato, um esquema de classificação para esses materiais é feito de acordo com seu comportamento frente a uma elevação na temperatura. Termoplásticos e termofixos são as duas subdivisões.

Termoplásticos. Estes polímeros são fusíveis e solúveis em solventes orgânicos, podem ser fundidos sob aquecimento e solidificado por resfriamento e ao mesmo tempo não ocorre uma decomposição generalizada. Do ponto de vista estrutural, são polímeros com macromoléculas lineares e podem conter ou não ramificações.

Os termoplásticos quando são aquecidos podem ser fundidos, pela questão de amolecerem e, eventualmente se liquefazem, possibilitando a fusão com outro polímero e endurecem quando são resfriados. Estes processos são totalmente reversíveis e podem ser repetidos. Por terem uma maior possibilidade de reciclagem, os termoplásticos apresentam como principal vantagem na escolha do material, isso se deve ao fato de atualmente a consciência ecológica ter um grande peso na escolha de um material para um projeto. Segundo Callister e Rethwisch (2012), em uma escala molecular, conforme a temperatura é elevada, as forças de ligação secundárias diminuem, ocasionando a quebra das ligações secundárias existentes entre as cadeias poliméricas resultando então na fusão do material. Uma degradação irreversível ocorre quando a temperatura de um polímero termoplástico fundido for aumentada excessivamente. Além disso, os termoplásticos são relativamente macios. A maioria dos polímeros lineares e aqueles que tem algumas estruturas ramificadas com cadeias flexíveis são termoplásticos. Esses materiais são fabricados normalmente com aplicação simultânea de calor e pressão. Exemplos de polímeros termoplásticos comuns incluem o polietileno (PE), poliestireno (PS), polietileno tereftalato (PET) e cloreto de polivinila (PVC).

Termofixos. Os termofixos ou termorrígidos como podem ser chamados também, são infusíveis e insolúveis. Sob aquecimento, esses polímeros acabam se decompondo sem fundir. Esses polímeros possuem cadeias com ligações cruzadas. Segundo Callister e Rethwisch (2012), os polímeros termofixos são polímeros em rede. Eles tornam-se permanentemente rígidos durante sua formação e não amolecem sob aquecimento. Os polímeros em rede apresentam ligações cruzadas covalentes entre as cadeias moleculares adjacentes. Durante os tratamentos térmicos, essas ligações prendem as cadeias umas as outras para resistir aos movimentos de vibração e de rotação da cadeia em temperaturas elevadas. Dessa forma, os materiais não amolecem quando são aquecidos. A densidade de ligações cruzadas é geralmente elevada, tal que entre 10% e 50% das unidades repetidas na cadeia tem ligações cruzadas. Apenas um aquecimento até temperaturas excessivas causará o rompimento dessas ligações cruzadas e a degradação do polímero.

Os polímeros termofixos apresentam uma vantagem em relação aos termoplásticos, por serem, em geral, mais duros e mais resistentes e possuírem melhor estabilidade dimensional. São exemplos de termofixos: borrachas vulcanizadas, epóxis, resinas fenólicas, baquelite e silicões. A principal desvantagem é que são de difícil reciclagem, sendo que a maioria não é reciclável. Isso acontece porque depois de reticulados não fundem e se expostos a temperaturas muito elevadas se decompõem e não voltam a sua característica original, diferentemente dos termoplásticos.

4. COLETORES SOLARES COM MATERIAL POLIMÉRICO

Na área de coletores solares os polímeros têm uma grande vantagem, tanto em relação ao baixo custo se comparado aos coletores convencionais, como em peso, fator importante presente na instalação de um coletor, facilitando a instalação de um coletor solar em lugares de difícil acesso.

Segundo Piekarczyk (2014), aplicações de materiais poliméricos foram bem sucedidas em sistemas térmicos, tanto em termos de economia de energia convencional e redução de custos de produção, transporte, bem como de instalação. De acordo com a *Solar Heating and Cooling Energy Agency* (SHC), no seu evento Task 39, onde foi discutida a aplicação de materiais poliméricos para sistemas térmicos, os plásticos são os materiais chave em termos de confiabilidade e custo-benefício na aplicação de aquecimento de água ao redor do mundo, com um custo reduzido na fabricação, no processo e bem como no material a ser usado. Essa combinação resulta na fabricação de um coletor solar completamente inovador, criando projetos competitivos na aplicação de coletores em novos edifícios, nos quais se procuram soluções para custo, eficiência e durabilidade, ocasionando uma maior facilidade de integração de um sistema térmico no projeto de um edifício, reduzindo assim a poluição para o meio ambiente, antes da forma tanto da queima de gás em sistemas de aquecimento como a preservação de energia, na qual em maior parte vem da geração de fontes fósseis. Se possibilita também a integração de sistemas térmicos em edifícios e residências de baixo custo.

Absorvedores de material polimérico para aquecimento de piscinas são produzidos desde o início da década de 1970. O coletor solar sem cobertura, usado para este tipo de aplicação é o sistema ideal para o uso de materiais de baixo custo, tal como polímeros. O alto volume de produção também traz vantagens na confecção deste tipo de coletor, reduzindo

custos de produção e padronizando modelos. Eles representam uma tecnologia com a maior capacidade instalada nos EUA e Austrália em termos de potência térmica, conforme mostra a Fig. 2, conforme Mauthner *et al.* (2015).

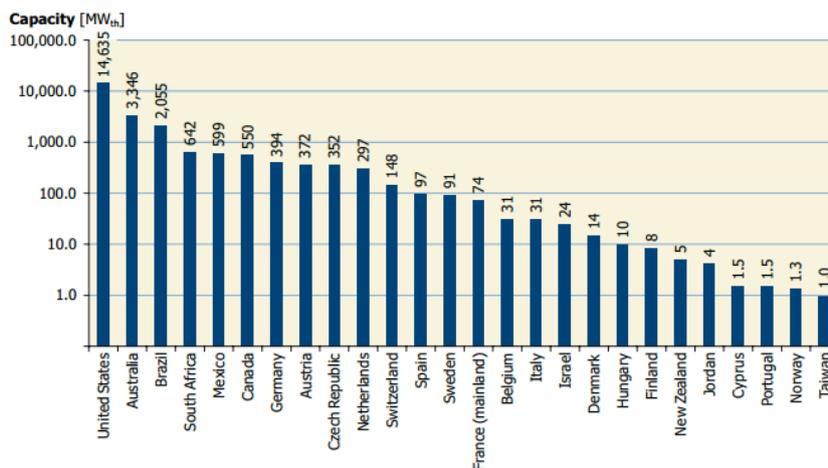


Figura 2 – Capacidade instalada total de coletores sem cobertura até o fim de 2013.

Coletores solares de alto desempenho feitos com materiais poliméricos são o maior desafio atualmente, do ponto de vista tecnológico e mais interessante ainda devido ao potencial de mercado que se tem à disposição.

Nos últimos 10 anos diversos estudos foram realizados, buscando a melhor eficiência em um coletor solar plano de alto desempenho. Diversos tipos de polímeros foram estudados, tanto para a cobertura como para o absorvedor, que são as duas partes do coletor mais aprofundadas em inúmeras pesquisas, nas quais buscam-se sempre características essenciais para poder se equiparar a um coletor solar convencional que geralmente utiliza tubos de cobre para o absorvedor e vidro para a cobertura. As principais características que se buscam no absorvedor são relacionadas ao desempenho térmico, sua absorptância e refletância, além de, principalmente, seu nível de degradação com o tempo.

Já para cobertura se busca um material transparente que tenha uma elevada transmitância em comprimentos de ondas até 2,5 μm e uma transmitância baixa em comprimentos de onda com mais de 2,5 μm . Isso se deve ao fato de que a cobertura deve ser transparente para a radiação proveniente do Sol (baixos comprimentos de onda) e ser opaca para a radiação originada do absorvedor (comprimentos de onda elevados).

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Quanto aos objetivos, esta pesquisa se caracteriza como de predição, pois visa, ao final deste estudo, avaliar a viabilidade futura de aplicação dos materiais selecionados em um coletor solar plano, de tal forma que permita a sua utilização em termos de eficiência e custo.

Já no que se refere à coleta de dados e fontes de informações, inicialmente a pesquisa se caracteriza como documental e bibliográfica, progredindo para uma pesquisa experimental, onde serão analisadas características químicas do material que passou pelo ensaio de degradação, por meio de uma espectroscopia do infravermelho. Após os resultados obtidos, serão selecionados então os materiais utilizados na cobertura e no absorvedor do coletor. Por fim, uma comparação com a literatura existente será realizada para assim concluir o trabalho e confirmar os dados obtidos.

5.1 Características dos polímeros para uso em coletores solares térmicos

O coletor solar plano pode ser dividido, em três partes distintas: uma cobertura de material transparente, na qual tem como objetivo reduzir as perdas de energia por radiação e convecção, uma superfície absorvedora, capaz de absorver a maior parte da radiação solar recebida e a transferir para um fluido de trabalho e uma isolamento térmica, com o intuito de reduzir as perdas por convecção pela base e laterais do coletor. Os materiais designados em cada uma dessas partes necessitam possuir propriedades adequadas para manter o desempenho do sistema em valores desejados.

Cobertura. Como citado anteriormente o vidro é o material mais utilizado na cobertura, mas a busca por materiais poliméricos para a substituição do vidro é longa e, muitas vezes, decepcionante em função da elevada degradação que o material apresenta pelo efeito da temperatura de operação e, principalmente pela ação da radiação UV. Como indicadores da degradação dos materiais para essa aplicação, utilizam-se a transmitância solar ponderada, integrada no espectro solar (τ_{sol}) e valores integrais na faixa de comprimentos de onda entre 400 e 600 nm ($\tau_{400-600}$). A largura de banda entre 400 e 600 nm é utilizada uma vez que a degradação da transmitância de muitos materiais poliméricos é mais pronunciada nessa faixa espectral (Köhl *et al.*, 2005). Na Tab. 1 são apresentadas algumas características dos materiais possíveis de serem utilizados como cobertura.

Tabela 1 – Materiais para cobertura de coletores solares planos.

Material	Nomes comerciais	Características	Espessura (mm)	τ_{sol} ($\lambda=300$ a 2500 nm)	Tipo
PET ^a	Mylar D	Não estável UV	0,18	86,7	Filme
PET ^a	Melinex 442/400	Não estável UV	0,10	86,2	Filme
PET ^a	Melinex D 387	Estabilizado UV	0,03	85,4	Filme
PET ^a	Melinex D 389	Estabilizado UV	0,03	85,4	Filme
PEN ^a	Kaladex	Orientado biaxialmente	0,10	84,6	Filme
PEN	Teonex Q65F	Orientado biaxialmente	0,24	87,0	Filme
E/TFE ^a	Tefzel 150 ZMC	Estabilizado termicamente	0,04	93,8	Filme
E/TFE ^a	Tefzel 250 ZMC	Estabilizado termicamente	0,06	94,0	Filme
E/TFE ^a	Duralar CS50	Não orientado	0,05	93,7	Filme
E/TFE ^a	Duralar E	Orientado mono axialmente	0,05	93,9	Filme
E-CTFE ^a	Halar Clear NP		0,05	92,9	Filme
PFA ^a	Teflon PM	Estabilizado termicamente	0,05	95,8	Filme
PFA ^a	Teflon PH	Termo retrátil	0,05	95,7	Filme
PVDF ^a	Kynar		0,03	93,9	Filme
Acrílico ^a	Korad Clear	Absorvedor de UV	0,05	89,3	Filme
PC ^a	Lexan HP92WDB	Cobertura UV	0,18	89,2	Filme
PC ^a	Lexan HP92WDB	Cobertura UV	0,51	86,6	Filme
PC ^a	Lexan Thermoclear	Cobertura UV	5,99	74,8	Parede dupla
PC ^a	Lexan Thermoclear	Cobertura UV	7,92	77,0	Parede dupla
PC ^a	Lexan XL10	Cobertura UV	3,00	79,6	Folha
PC ^a	APEC 9351	Estabilizado termicamente	3,18	83,0	Folha
PC ^a	APEC 9353	UV e estabil. term.	3,35	79,9	Folha
PEI ^a	Ultem 1000		0,10	83,5	Filme
PEI ^a	Ultem 1000		0,18	78,7	Filme
PE ^a		Cobertura UV	0,13	86,8	Filme
PS ^a		Cobertura UV		85,1	Folha
PVC ^a	DuraGlas		1,02	82,9	Folha

^a Raman et al. (2000).

De acordo com o trabalho de Raman *et al.* (2000), o uso do Korad como material de proteção contra os efeitos do UV, laminado em folhas de policarbonato, apresentou resultados promissores. Materiais como o PET e o PE, mesmo nas versões estabilizadas para UV apresentaram degradação acentuada, sendo a mais comum o amarelamento do material, conforme estudos de Jorgensen *et al.* (2003). O mesmo estudo mostrou que os materiais Kynar, Duralar, Tefzel e Halar, assim como o PC laminado com filmes protetores de UV mantiveram, depois de dois anos de ensaios externos e acelerados, valores elevados de τ_{sol} .

Para a cobertura, são selecionados os polímeros ópticos que apresentam uma transmitância elevada em comprimentos de onda baixos, na região do espectro solar, mas uma transmitância baixa em comprimentos de onda alto, na região do infravermelho. Isso se deve ao fato de ter uma transmissão alta no infravermelho próximo, mas absorver fortemente no ultravioleta, conforme o estudo de Weber (2003), no qual ilustra o espectro de transmissão de quatro tipos de polímeros, como mostrado na Fig. 3. A maioria dos polímeros se degrada tanto em propriedades físicas como ópticas quando expostos à radiação ultravioleta ao longo do tempo.

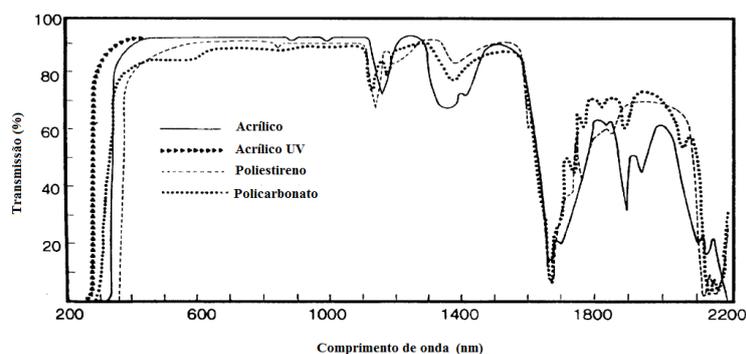


Figura 3 – Espectro de transmissão de polímeros ópticos. Espessura da amostra: 3,2 mm.

Absorvedor. Os materiais utilizados comumente em absorvedores são o cobre ou o alumínio e isso ocasiona uma grande dificuldade em selecionar um material polimérico, pois o mesmo não é comparável em termos térmicos, mas leva como vantagem o preço e o peso serem muito menores. Os materiais poliméricos selecionados devem manter o desempenho térmico adequado e assegurar uma durabilidade por longo prazo. A principal desvantagem desses materiais é a ruptura ou deformação excessiva, ocasionando assim o colapso da passagem do fluido. O absorvedor sofrerá deformação se a sua temperatura se aproximar da temperatura de fusão do material, particularmente se a mesma se mantiver elevada. A pior situação do uso de polímeros acontece durante a condição de estagnação, isso é, quando existe uma radiação recebida elevada e um fluxo de fluido zero.

De acordo com Silva (2012), um parâmetro importante para essa análise é a definição de uma temperatura máxima de serviço, chamada índice térmico relativo (RTI). Esse índice é definido como a temperatura na qual o material perde 50% de suas propriedades mecânicas (resistência ao impacto, tensão ou rigidez) após ser mantido 100.000 horas nessa temperatura. Como exemplo, a RTI do óxido de polifenileno (PPO ou PPE) e do propileno (PP), dois materiais utilizados como absorvedores são, respectivamente de 105 °C e 115 °C. As temperaturas de fusão desses materiais são de 280 °C e 193 °C, respectivamente. As outras temperaturas limites típicas disponíveis são úteis quando comparando diferentes materiais poliméricos (Kearney *et al.*, 2005) mas não indicam efeitos de longo prazo.

Como solução da baixa temperatura de fusão de materiais poliméricos são estudadas possibilidades de utilizar ventilação forçada, isso é, o uso de fluxo de ar ambiente, induzido pela convecção natural através do coletor, para controle da temperatura do absorvedor. Alguns materiais já testados anteriormente por Kahlen *et al.* (2010) são apresentados na Tab. 2.

Tabela 2 – Materiais para absorvedores de coletores solares planos.

Material	Nomes comerciais	RTI, °C	Temp. fusão, °C	Condutividade térmica, W/mK
PPE+PS ^b	Noryl EN 150SP	104	154	0,28
PC ^b	Makrolon 3103	115	> 138	0,20
PA12 HI ^b	Grilamid L25ANZ	110	179	0,23
PA12 HT ^b	Grilamid L25H	110	179	0,23
PE-X1 ^c	Taborex	-	126	0,46 – 0,48
PE-X2 ^c	Polidan T/A-HF	-	126	0,46 – 0,48
PP-1 ^c	RA130E-8427	105	165	0,12 – 0,22
PP-2 ^c	Beta-PPR RA 7050	105	165	0,12 – 0,22

^b Kahlen *et al.* (2010).

Os testes apresentados por Kahlen (2010), realizados com exposição do material em ar quente a 140 °C durante 500 h e em água quente a 80 °C durante 16.000 h, mostraram grande degradação física e/ou química dos materiais PPE+PS e PC. O material PA12-HI apresentou resultados promissores para seu uso como material para absorvedores de coletores de placa plana. Os testes, realizados de forma similar, mostraram boas perspectivas de uso tanto do PP-2 quanto do PE-X2, apesar de ambos necessitarem de proteção para as condições de estagnação para evitar problemas de instabilidade dimensional uma vez que apresentam temperaturas de fusão relativamente baixas (142 °C para o PP-2 e 125 °C para o PE-X2).

Um dos fatores que se leva em conta na seleção do polímero é seu nível de degradação com o tempo. Um estudo experimental realizado por Freeman *et al.* (2005), para avaliar o desempenho mecânico da polisulfona (PSU), polibutileno (PB) e poliamida 6/6 (PA66), quando em contato com água clorada quente, apresentou a polisulfona como o melhor resultado no nível de resistência à degradação, pois sua cadeia polimérica é composta por anéis aromáticos e fortes ligações de carbono, enxofre e oxigênio dentro da cadeia principal do polímero. No caso do polibutileno, o tempo de vida em um ambiente oxidante é estendido quando é incluído um antioxidante e o polímero não irá degradar significativamente até que o antioxidante for esgotado. A poliamida 6/6 tem a pior resistência a degradação, ocasionando então a sua exclusão na seleção como material em um coletor solar plano. As propriedades dos polímeros são apresentadas na Tab. 3.

Tabela 3 – Propriedades do PB, PSU e PA66.

	PSU	PB	PA66
Módulo de tensão (MPa)	2480	290-295	1250
Resistência a Tração (MPa)	70,3	36,5	85
Peso molecular (g/mol)	45.000	725.000	12.000-20.000
% Cristalinidade	Amorfo	48-55	40-60
Temperatura de fusão (°C)	-	124-126	263
Absorção de água (%)	0,3	<0,03	8,5
Transição vítrea (°C)	186	-25 até -17	35
Condutividade térmica, Wm ⁻¹ K ⁻¹	0,26	0,22	0,25
Referências	(Madkour, 1999; Solvay Advanced Polymers, 2002)	(Basell Polylefins; Panse and Phillips, 1999)	(DuPont, 2004; Viers, 1999)

5.2 Intemperismo acelerado

Para a preparação dos ensaios, será utilizada a norma ASTM G154. De acordo com esta norma, os ensaios consistem em expor o material a uma lâmpada que emite radiação em comprimentos de onda superiores a 0,3 μm . O ensaio tem por objetivo realizar um envelhecimento acelerado através da irradiação UVA e UVB. O equipamento acelera o processo de deterioração do material, ocasionando perda de brilho e fragilização, tudo através da irradiação UVA-UVB. A câmara de intemperismo acelerado utilizada é do modelo EQUV-RC, do fabricante Equilam.

Para o procedimento dos testes foram usadas as condições estipuladas na norma ASTM G154 (2016) onde, de acordo com o apêndice X1, as lâmpadas utilizadas serão de radiação UVB, conforme subseção X1.2.2 da mesma norma. Essa subseção estabelece para lâmpadas UVB-313: a região UVB (0,28 a 0,315 μm) inclui os comprimentos de onda mais curtos encontrados na radiação solar na superfície terrestre e é responsável por consideráveis danos aos polímeros. Existem dois tipos comumente disponíveis de lâmpadas UVB-313 que atendem aos requisitos ao documento. Eles são conhecidos comercialmente como UVB-313 e FS-40. Essas lâmpadas emitem quantidades diferentes de energia total, mas ambas têm um comprimento de onda máximo de 0,313 μm e produzem os mesmos comprimentos de onda UV nas mesmas proporções relativas (ASTM G154, 2016).

O material selecionado para sofrer o intemperismo acelerado foi o polietileno (PE), então o ciclo de exposição das amostras no teste é estipulado pela norma G154, no apêndice X2, no qual o teste terá um ciclo de 4 h em secagem por irradiação UVB à 60 °C aproximadamente e 4 h em condensação à 50 °C aproximadamente, repetindo esse ciclo até que sejam atingidas as 800 h. A irradiação selecionada foi de 0,63 Wm⁻² nm⁻¹. O material para efeito de análise foi retirado a cada 200 h.

5.3 Espectroscopia do infravermelho

Espectroscopia ATR é uma técnica utilizada para se obter espectros no infravermelho de amostras que não podem ser analisados pelos métodos normais, como pastilhas ou filmes. O princípio deste tipo de espectroscopia baseia-se no fato de que quando um feixe de radiação passa de um meio mais denso, nesse caso o cristal padrão do equipamento, para um meio menos denso, no caso a amostra, ocorre uma reflexão. Essa fração do feixe de luz incidente que é refletida aumenta conforme aumenta o ângulo de incidência e quando excede um determinado ângulo crítico a reflexão é completa. A radiação de penetração é chamada onda evanescente. Se a amostra absorve em certo comprimento de onda evanescente, há uma atenuação do feixe a um determinado comprimento de onda. Essa atenuação a comprimentos de ondas correspondentes às bandas de absorção no infravermelho, originam o espectro (Luz, 2003).

Essa técnica é muito utilizada para análise de superfícies de polímeros. Ela utiliza um cristal com um índice de refração superior ao da amostra e com uma baixa absorção na região do infravermelho. O equipamento utilizado é de modelo Agilent Cary 630, no qual utiliza o cristal SeZn. O espectro foi gravado na faixa de 4000-650 cm⁻¹ em uma resolução de 2 cm⁻¹.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Espectroscopia do infravermelho

Os resultados da espectrometria do infravermelho são mostrados nas Fig. 4-8.

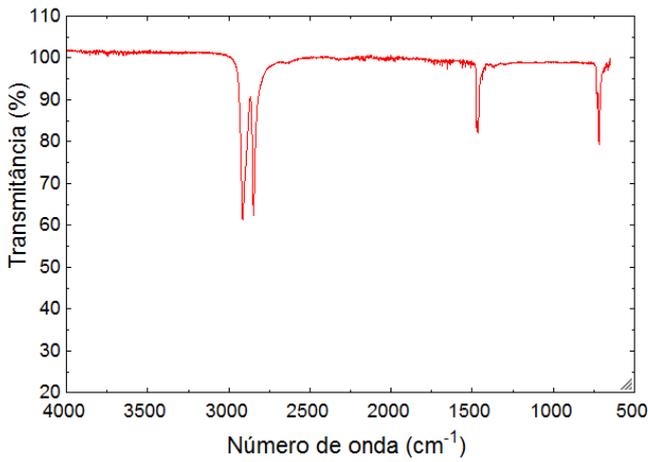


Figura 4 – Espectroscopia do infravermelho do PE sem degradação

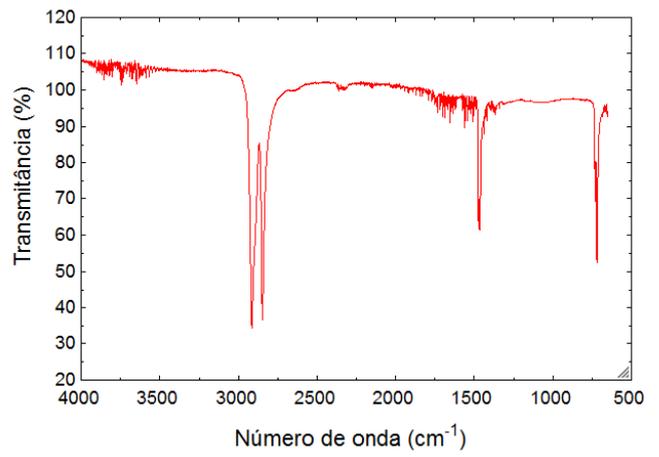


Figura 7 - Espectroscopia do infravermelho do PE exposto por 600 horas

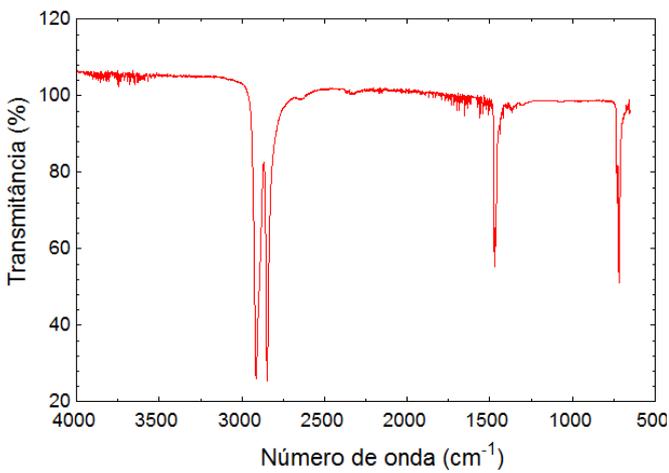


Figura 5 - Espectroscopia do infravermelho do PE exposto por 200 horas

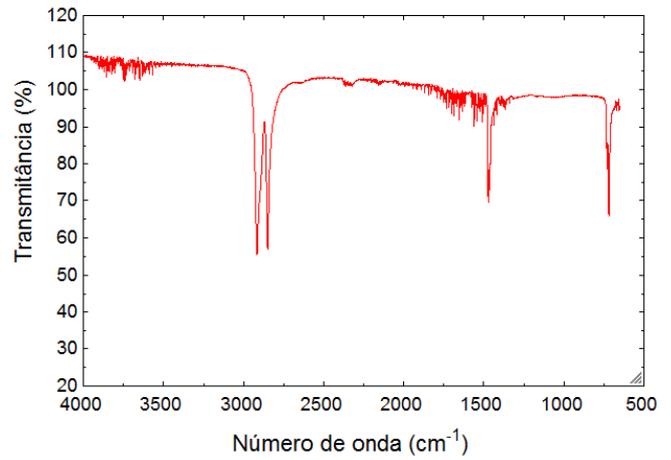


Figura 8 - Espectroscopia do infravermelho do PE exposto por 800 horas

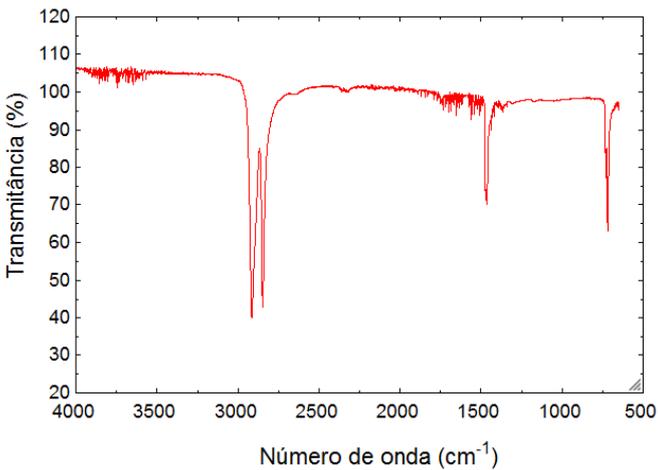


Figura 6 - Espectroscopia do infravermelho do PE exposto por 400 horas

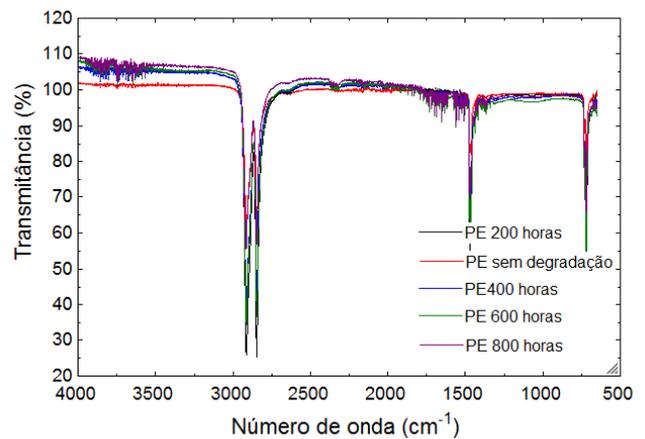


Figura 9 - Espectroscopia do infravermelho do PE

Os resultados obtidos com a espectroscopia do infravermelho realizada no PE, apresentam um resultado esperado, de tal forma que a transmittância do mesmo sofre uma queda conforme o nível de degradação do material, mas em uma visão total dos níveis de degradação, a transmittância sofre uma pequena queda, conseqüentemente apresenta um resultado positivo para o uso do material, logo que a principal desvantagem do uso do polímero é seu tempo de vida.

6.2 Comparação com a literatura

Em um estudo realizado por Jelle e Nilsen (2011), foi analisada a transmitância do PE de alta densidade em método de envelhecimento acelerado através do uso do ATR. O estudo se baseou em três métodos de envelhecimento, dos quais o realizado em uma câmara de envelhecimento pode ser usado para efeito de comparação. As amostras de PE foram sujeitas à radiação UV a uma temperatura de ar de 50 °C constante. As intensidades de UVA e UVB são calculadas em média para 28 W m⁻² e 2,8 W m⁻² respectivamente. Os resultados são expostos na Fig. 10.

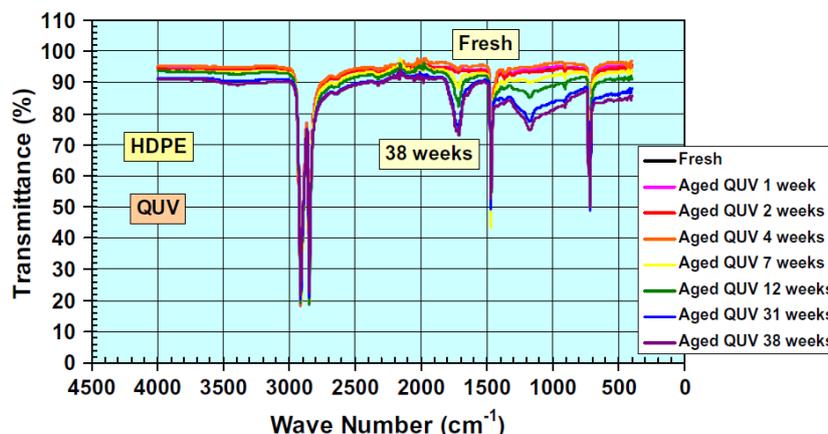


Figura 10- Transmitância versus número de onda entre 4000 e 400 cm⁻¹ para o PE durante a exposição na câmara de envelhecimento
Fonte: Jelle e Nilsen (2011)

Comparando as duas análises realizadas é possível concluir que o PE em relação ao teste de espectroscopia do infravermelho, tem um bom resultado quanto ao nível de degradação com o tempo.

7. CONCLUSÃO

O uso de um polímero em um coletor solar poderá, com o tempo, adquirir maior importância, seja em razão dos custos envolvidos na fabricação de um coletor ou mesmo em razão de uma mudança de pensamento mundial devido à nova visão política e econômica de desenvolvimento sustentável do mundo.

Os polímeros estudados nesse trabalho apresentam diversas características que podem justificar o seu uso em coletores solares planos. A cobertura de um coletor, como citado no trabalho, deve ter alta transmitância na faixa de comprimentos de onda da banda solar, sendo o Policarbonato o material que atende a estes requisitos uma vez que tem características similares às do vidro, utilizado normalmente em um coletor.

No absorvedor o Polietileno seria o material mais adequado pelo fato de ser um polímero com boa resistência à degradação e por apresentar boa condutividade térmica, superior a do Polissulfona.

REFERÊNCIAS

- ASTM G154-06, 2006. Standard Practice for Operating Fluorescent Light Apparatus for UV Exposure of Nonmetallic Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM G154-16, 2016. Standard Practice for Operating Fluorescent Ultraviolet (UV) Lamp Apparatus for Exposure of Nonmetallic Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Callister, W. D.; Rethwisch, D. G., 2012. Ciência e Engenharia de Materiais. 8ª. ed. [s.l]: LTC.
- Duffie, J.A.; Beckman, W.A., 2013. Solar engineering of thermal processes. 4ª ed. Madison: Wiley.
- Freeman, A.; Mantell, S. C.; Davidson, Jane H., 2005. Mechanical performance of polysulfone, polybutylene, and polyamide 6/6 in hot chlorinated water. *Solar Energy*, vol. 79, n. 6, pp.624-637.
- Kahlen, S.; Wallner, G.M.; Lang, R.W., 2010. Aging behavior and lifetime modeling for polycarbonate. *Solar Energy*, vol. 84, n. 5, pp.755-762.
- Kalogirou, S. A., 2004. Solar thermal collectors and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 30, n. 3, pp. 231-295.
- Jelle, Bjørn Petter; Nilsen, Tom-Nils, 2011. Comparison of accelerated climate ageing methods of polymer building materials by attenuated total reflectance Fourier transform infrared radiation spectroscopy. *Construction And Building Materials*, [s.l.], v. 25, n. 4, p.2122-2132, abr.
- Kalogirou, S. A., 2009. *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. Academic Press, Elsevier.
- Kearney, M., 2005. Polymeric absorbers for flat-plate collectors: can venting provide adequate overhear protection?. *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 127, pp. 421-424.
- Köhl, M., 2012. *Polymeric materials for solar thermal applications*. Singapore: Wiley-vch.
- Luz, E. R. Da., 2003. Predição de propriedades de gasolinas usando espectroscopia FTIR e regressão por mínimos quadrados parciais. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Química, PUC-Rio, Rio de Janeiro.

- Mauthner, F.; Weiss, W.; Spörk-Dur, M., 2015. Solar Heat Worldwide: Markets and Contribution to the Energy Supply 2013. Gleisdorf, Austria: IEA Solar Heating & Cooling Programme.
- Olivares, A. et al., 2010. Degradation model for an extruded polymeric solar thermal absorber. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 94, n. 6, pp.1031-1037.
- Piekarczyk, A., 2014. Cost analysis and production cost optimization of polymeric collectors for a global market, Gleisdorf SOLAR 2014, Gleisdorf, Austria, June.
- Raman, R., 2000. A review of polymer materials for solar water heating systems. *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 122, pp. 92-100.
- SHC Task 39. IEA, 2015. Polymeric Materials for Solar Thermal Applications. Solar Heating & Cooling Programme, p.1-11, Jun.
- SILVA, A. L. B. B; SILVA, E.O. da., 2003. Apostila Instituto de Ciências Exatas e da Terra: Conhecendo Materiais Poliméricos. Cuiabá: Universidade Federal de Mato Grosso. Grupo de Pesquisa em Novos Materiais.
- Weber, M. J., 2003. Handbook of Optical Materials. CRC Press.
- SILVA, D. dos S., 2012. Desenvolvimento de uma ferramenta computacional para dimensionamento de coletores solares de placa plana. Dissertação de Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PPGEM, Unisinos, São Leopoldo.

STUDY OF POLYMERIC MATERIALS FOR FLAT PLATE SOLAR COLLECTORS

Abstract. *In order to evaluate the suitability of flat plate solar collectors in which polymer materials are used, the choice of these materials leads to the need for distinct characteristics in each part of the collector. In the coating, the materials used must have a good breaking strength, be transparent and have a high transmittance at wavelengths up to 2.5 μm and a low transmittance at wavelengths over 2.5 μm . This is due to the fact that the coverage must be transparent to the Sun radiation (low wavelength) and be opaque to the radiation emitted by the absorber plate (high wavelength). The material that best fits this requirement is Polycarbonate (PC). The PC exhibits a transmittance loss of 3% to 5% after 2 to 3 years, but the addition of a UV protective film, laminated together with the PC, exhibits a significant loss only after 10 to 15 years. One of the factors that is taken into account in the selection of the polymer in the absorber is its level of degradation over time and its thermal conductivity, two materials that stand out are Polysulfone (PSU) and Polyethylene (PE). The PSU has the best result regarding the level of degradation because its polymer chain is composed of aromatic rings and strong bonds of carbon, sulfur and oxygen inside the backbone of the polymer. In the case of PE, the degradation results in a chamber of accelerated weathering have concluded that the polymer has a low loss of transmittance in relation to the time exposed. Regarding the thermal conductivity, the PSU has a conductivity of 0.26 W/m/K while the PB is around 0.4 W/m/K.*

Key words: *Solar energy, Flat plate solar collector, polymeric collectors*