

Sistema de baixo custo para determinação da permeabilidade de CO₂ em filmes plásticos

Low-cost system to determine CO₂ permeation through plastic films

Luis Gustavo Paulino Carmelo¹, Adonai Gimenez Calbo², Daniel Souza Correa², Marcos David Ferreira^{2*} 

¹ Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Programa de Pós-graduação em Biotecnologia, São Carlos/SP - Brasil

² Embrapa Instrumentação, São Carlos/SP - Brasil

*Corresponding Author

Marcos David Ferreira, Embrapa Instrumentação, Rua XV de Novembro, 1452, CEP: 13561-206, São Carlos/SP - Brasil, e-mail: marcos.david@embrapa.br

Cite as: Low-cost system to determine CO₂ permeation through plastic films. *Braz. J. Food Technol.*, v. 21, e2017071, 2018.

Received: May 13, 2017; Accepted: Mar. 26, 2018

Resumo

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um método simples, de baixo custo e eficaz para avaliação da permeabilidade de filmes plásticos utilizados como materiais de embalagem para alimentos. Para isto, foram projetadas e construídas câmaras de permeação que permitem a troca gasosa através de um filme plástico, com área conhecida, e a medição da permeabilidade específica ao CO₂ de cada filme. Para tanto, foram avaliados filmes de polietileno de baixa densidade (PEBD) e de policloreto de vinila (PVC). Os resultados demonstram correspondência com os testes realizados em equipamentos comerciais de análise da permeabilidade, em concordância com os valores apresentados por literatura específica. O método apresentado demonstrou eficiência nas análises de filmes poliméricos, podendo ser utilizado como uma ferramenta na determinação da permeabilidade de filmes a diferentes gases, como O₂, CO₂ e etileno. Além disto, o equipamento é de simples operação e os parâmetros, como umidade relativa, temperatura e fluxo, são facilmente ajustáveis.

Palavras-chave: Método; Permeação; Propriedades de barreira; Câmara; Gás; Umidificação; Embalagem; PEBD; PVC.

Abstract

The objective of this work was to develop a simple, low-cost and efficient method to evaluate the permeability of plastic food packaging films. Thus permeation chambers were projected and built, which allowed for the exchange of gases through a plastic film with a known area, in order to measure the specific CO₂ permeability of each film. Low density polyethylene (LDPE) and polyvinyl chloride (PVC) films were evaluated. The results showed good correlation with the tests carried out using commercial permeability analysis equipments, in agreement with the values found in the specific literature. The method was shown to be efficient in the analysis of polymeric films, and could be used as a tool for determining the permeability of films to different gases, such as O₂, CO₂ and ethylene. Moreover, the equipment is easy to use and the parameters, such as relative humidity, temperature and flow, can be easily adjusted.

Keywords: Method; Permeability; Barrier properties; Chamber; Gas; Humidification; Packaging; LDPE; PVC.

1 Introdução

Nas últimas décadas, é notório o esforço da indústria alimentícia para produzir e otimizar as embalagens para cada produto alimentício específico, em substituição às tradicionais embalagens metálicas e celulósicas (ARORA; PADUA, 2010; RHIM et al., 2013). Como alternativa à utilização destas, as embalagens poliméricas, em especial os filmes plásticos, têm sido utilizadas em larga escala, as quais se destacam

por apresentarem baixo custo, baixa densidade e excelente praticidade (ARORA; PADUA, 2010; PILLAI et al., 2014).

Desta forma, no mercado atual, é possível encontrar uma grande diversidade e variedade de filmes plásticos, com diferentes propriedades térmicas, mecânicas, bactericidas e/ou de barreira (DUDEFROI et al., 2018; TAN; THOMAS, 2016; BECARO et al., 2015, 2016), como os filmes plásticos aditivados



Sistema de baixo custo para determinação da permeabilidade de CO₂ em filmes plásticos

Carmelo, L. G. P. et al.

com cargas (como as nanoplaças de argila), os quais apresentam permeabilidade significativamente inferior em comparação aos filmes tradicionais (RAY et al., 2006; ARUNVISUT et al., 2007; DADBIN et al., 2008), característica que pode contribuir para a manutenção de uma atmosfera modificada ideal para a conservação de produtos alimentícios (DUNCAN, 2011).

O conhecimento da permeabilidade dos diferentes filmes plásticos utilizados como embalagens para alimentos é de grande importância, uma vez que a embalagem utilizada possui influência central na manutenção da qualidade e no prolongamento da vida de prateleira dos produtos (SIRACUSA, 2012). Todavia, nem sempre é possível conhecer as características de permeabilidade de um filme plástico, devido ao elevado custo das análises ou à dificuldade de acesso a equipamentos.

Desta forma, o desenvolvimento de metodologias que permitam a medição da permeabilidade dos diferentes materiais de embalagem é importante para otimizar o desenvolvimento e garantir a adequada utilização destes filmes. Em vista disso, vários autores (GILBERT; PEGAZ, 1969 apud GILBERT et al., 1983; FELDER; HUVARD, 1980; ASHLEY, 1985; AYRANCI; TUNC, 2003; McKEEN, 2012) descreveram alguns métodos que podem ser utilizados para a medição da permeabilidade de filmes plásticos, o que representou um considerável avanço para esta área da ciência.

Contudo, muitos dos métodos anteriormente levantados são difíceis de serem aplicados, devido à sua complexidade experimental e ao baixo treinamento do operador. Além disto, os equipamentos comerciais disponíveis atualmente para este tipo de medida são caros, de forma que o alto custo restringe a sua compra e utilização.

Desta forma, o objetivo deste trabalho foi desenvolver um método simples, de baixo custo e eficaz para avaliação da permeabilidade de filmes plásticos utilizados comumente em alimentos, incluindo os de polietileno de baixa densidade (PEBD) e policloreto de vinila (PVC).

2 Material e métodos

2.1 Princípio de funcionamento das câmaras de permeação

Câmaras de permeação foram projetadas e construídas, nas quais a troca gasosa é feita através de uma área conhecida de filme plástico e a quantificação dos gases envolvidos nesta troca gasosa é realizada por cromatografia a gás. Para a realização desses ensaios, um sistema de umidificação e controle do fluxo dos gases e da temperatura foi confeccionado. Um esquema geral do sistema é apresentado na Figura 1. O funcionamento de cada parte do sistema proposto, bem como as etapas de sua confecção, é descrito a seguir.

2.2 Câmaras de permeação

Cada câmara de permeação possui dois compartimentos com entrada e saída de gás (Figura 2), os quais são separados pelo corpo de prova do filme plástico a ser testado. Os gases permeiam através do filme plástico, movido pelo gradiente de pressão parcial (COMYN, 1985), ou seja, a difusão observada de cada gás, através do filme, ocorre do lado com maior pressão parcial desse gás em direção ao lado com menor pressão parcial.

No compartimento inferior, um fluxo contínuo de aproximadamente 25 mL/h do gás de interesse (no caso, CO₂) é fornecido. No compartimento superior, um fluxo contínuo de aproximadamente 25 mL/h do gás de arraste (N₂) é aplicado, de forma a remover continuamente o CO₂ permeado através do filme, mantendo estável a diferença de pressão parcial desse gás entre os dois compartimentos.

As câmaras de permeação foram projetadas para serem facilmente confeccionadas e utilizadas. O projeto e as medidas destas câmaras são apresentados na Figura 3. Cada câmara de permeação foi construída a partir de uma placa de policarbonato com 10 mm de espessura. Esta placa foi cortada em peças de formato circular, com diâmetro de 85 mm, usando-se serra de fita. Após o corte, cada peça foi individualmente usinada

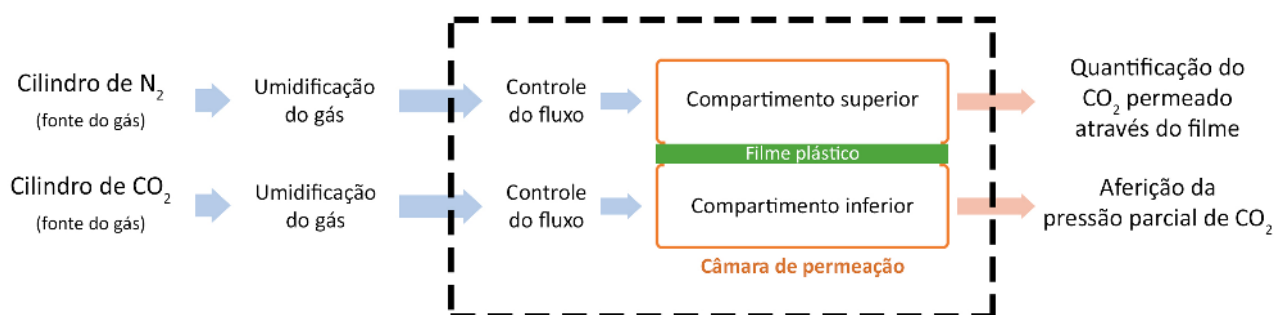


Figura 1. Fluxograma do sistema montado para a realização dos ensaios de permeação. As setas indicam o fluxo de gás; o retângulo tracejado preto indica o controle da temperatura realizado por uma estufa.

Sistema de baixo custo para determinação da permeabilidade de CO₂ em filmes plásticos

Carmelo, L. G. P. et al.

em um torno mecânico, em que, inicialmente, se usinou a face externa.

Após usinagem da face externa de cada peça, realizou-se um rebaixo na parte central, para fluxo do gás em cada peça. Realizou-se, ainda, outro rebaixo na parte periférica para a colocação de um anel de borracha para vedação ou *o'ring*. Após finalização da usinagem da peça, foram aplicados quatro furos laterais com broca de 4,9 mm, para a fixação das duas faces da câmara de permeação, utilizando-se parafuso e porca.

Para a colocação das conexões de engate rápido das tubulações de entrada e saída de gás, em cada peça foram confeccionados furos laterais transversais. O furo principal foi aplicado com uma broca de 2,5 mm. Para a fixação de cada conexão, uma rosca M5 foi confeccionada com o auxílio de um macho M5.

Para verificar a estanqueidade, as câmaras de permeação tiveram suas saídas obstruídas por tampas antes de serem pressurizadas (20 kPa) com gás comprimido e imersas em água. Nesse procedimento, os vazamentos são revelados pela ocorrência de borbulhamento.

2.3 Controle da umidade relativa dos gases e da temperatura

De acordo com a norma ISO 291 (ISO, 2008), os ensaios de permeação foram conduzidos com controle da temperatura e da umidade relativa. A temperatura foi ajustada em 27 °C e a umidade relativa dos gases em 65%.

Para o controle da umidade relativa (UR) nas câmaras de permeação, utilizou-se o princípio de duas pressões, proposto por Amdur e White (1965), os quais descreveram que a pressão de vapor de água em um gás continua a ser uma fração da pressão total, quando esta é alterada. A equação proposta pelos autores é:

$$UR = 100 \times \frac{p_2}{p_1} \quad (1)$$

na qual: UR = umidade relativa esperada, em porcentagem; p_1 = pressão no saturador; p_2 = pressão atmosférica.

Baseando-se nesse princípio, construiu-se um sistema para umidificação controlada dos gases a serem aplicados nas câmaras de permeação. O sistema é apresentado na Figura 4. Ao passar pelo saturador (4), que possui pressão controlada pela primeira válvula reguladora de pressão (3a), o gás proveniente do cilindro entra em contato com a água e fica saturado. Quando o gás passa pela segunda válvula (3b), tem sua pressão reduzida, levando a uma redução substancial de sua umidade relativa, pois quanto maior a diferença de pressão, maior será a redução na umidade (Equação 1).

Por fim, a corrente de gás passa por uma bifurcação. Por um dos lados, o gás flui através de uma restrição de

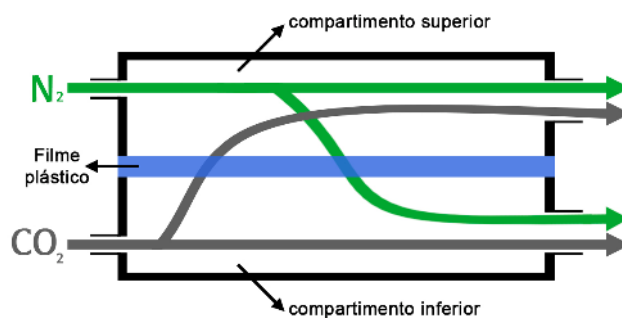


Figura 2. Representação da permeação de gases (CO₂ e N₂) através do filme plástico acoplado à câmara de permeação.

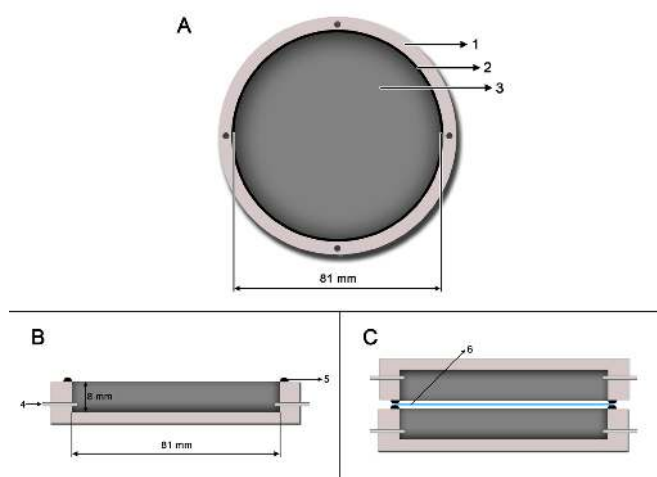


Figura 3. Representação da câmara de permeação em três vistas: (A) Vista superior de um dos compartimentos da câmara de permeação; (B) Vista lateral do compartimento inferior da câmara de permeação; (C) Vista lateral dos compartimentos inferior e superior, fechados sobre o corpo de prova. Partes: (1) Placa de policarbonato; (2) Anel de borracha (*o'ring*); (3) Compartimento interno da câmara de permeação, confeccionado em baixo relevo; (4) Entrada/saída de gás; (5) Vista lateral do *o'ring*; (6) Corpo de prova.

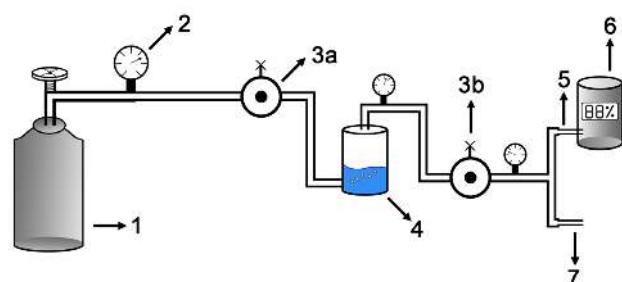


Figura 4. (1) Cilindro de gás; (2) Manômetro; (3a, 3b) Válvulas reguladoras de pressão; (4) Saturador; (5) Restrição de fluxo para controlar a vazão do gás; (6) Câmara com termo-higrômetro, que mede a umidade relativa; (7) Saída para o sistema de controle de fluxo aplicado às câmaras de permeação.

Sistema de baixo custo para determinação da permeabilidade de CO₂ em filmes plásticos

Carmelo, L. G. P. et al.

fluxo (~4.500 mL/h), que controla a vazão do gás para uma câmara com termo-higrômetro, na qual a temperatura e a umidade relativa são aferidas. O gás que flui pelo outro lado da bifurcação é utilizado para a alimentação, com fluxo controlado, das câmaras de permeação. Para o controle da temperatura, parte do sistema construído foi acomodada no interior de uma estufa com temperatura a 27 °C, conforme ilustrado na Figura 1.

2.4 Controle do fluxo dos gases

O controle do fluxo dos gases utilizados (N₂ e CO₂) foi realizado utilizando-se um *flowboard* e restrições de vidro, conforme procedimento descrito por Carmelo et al. (2015). O sistema permite o controle preciso do fluxo individual de cada gás em até 12 saídas independentes. O *flowboard* é um equipamento de fácil operação e comumente utilizado em laboratórios de pós-colheita, em que o controle do fluxo de gases é utilizado na produção de atmosferas controladas para frutas e hortaliças.

As restrições controladoras de fluxo são produzidas a partir de tubos capilares de vidro e podem ser facilmente confeccionadas, conforme especificação desejada.

2.5 Montagem das câmaras de permeação e análise da composição gasosa

Os ensaios de permeabilidade foram realizados com dois tipos de filmes plásticos de composições distintas: (1) polietileno de baixa densidade (PEBD), com espessura média de 62 µm, e (2) policloreto de vinila (PVC), com espessura média de 12 µm.

Antes de cada análise, os filmes foram condicionados em câmaras com temperatura controlada a 27 °C e umidade relativa de 65% por, no mínimo, 88 horas, conforme a norma ISO 291 (2008). O controle da temperatura foi realizado usando-se uma estufa e, para o controle da umidade relativa do ambiente, utilizou-se solução salina saturada de iodeto de potássio (GREENSPAN, 1977).

Após o período de condicionamento, os filmes foram fixados às câmaras de permeação. No início do ensaio, o compartimento inferior da câmara recebeu fluxo de CO₂ de 5 L/h durante 10 minutos, de forma a eliminar o ar antes presente. O mesmo procedimento foi realizado no compartimento superior, utilizando-se N₂.

Após a eliminação do ar atmosférico dos compartimentos, estes receberam fluxo contínuo de CO₂ ou N₂ (Figura 2), providos pelo sistema de *flowboard* e restrições. Os fluxos utilizados foram de 25 ± 3 mL CO₂/h para o compartimento inferior e 25 ± 3 mL N₂/h para o compartimento superior. A utilização destes fluxos é adequada para as dimensões da câmara projetada, não ocasionando efeitos indesejáveis, como deflexão no corpo de prova ou diferença de pressão entre os compartimentos (SARANTÓPOULOS et al., 2002).

Alíquotas de 1 mL de gás foram retiradas de cada compartimento da câmara de permeação, com o auxílio de uma seringa Hamilton® *Gas Tight* #1001. No ensaio com o filme de PVC, as amostras foram retiradas após 30, 60, 180, 240 e 1.440 minutos; no ensaio com o filme de PEBD, as amostras foram retiradas após 360, 720, 1.440 e 2.880 minutos, contados a partir do momento em que se iniciou o fluxo de CO₂ e N₂ nas câmaras. Para assegurar a vedação durante a retirada de cada alíquota, a agulha da seringa foi introduzida em cada compartimento através de um septo de silicone.

A análise da composição gasosa de cada alíquota foi realizada em cromatógrafo a gás VARIAN CP-3800, equipado com detector de condutividade térmica e coluna empacotada HayeSep N (80/100; 6' x 1/8" SS). As temperaturas utilizadas no injetor e no forno foram 150 °C e 30 °C, respectivamente. A temperatura do detector de condutividade térmica foi de 150 °C. Hidrogênio foi utilizado como gás de arraste.

As análises foram feitas em triplicata para cada filme, utilizando-se três câmaras de permeação. A análise da composição gasosa foi expressa em mililitros de CO₂ (CNTP) e, a partir dessa concentração, determinou-se a permeabilidade de cada filme plástico.

2.6 Cálculo da permeabilidade

Para o cálculo da permeabilidade dos filmes plásticos, é necessária a determinação da taxa de permeação de CO₂ através do filme, no tempo específico de cada análise. Para isso, o volume de CO₂ (CNTP), obtido pela análise de cromatografia gasosa do compartimento superior, foi convertido em concentração de CO₂ (%v/v) e multiplicado pelo fluxo de N₂ (mL/dia) no compartimento superior, conforme descrito por Felder e Huvad (1980), e expresso na equação a seguir, a qual permite calcular a taxa de permeação de CO₂ através do filme (mL (CNTP)/dia):

$$\text{Taxa de permeação} = \text{Concentração de CO}_2 \cdot \text{Fluxo de N}_2 \quad (2)$$

A permeabilidade foi então calculada a partir da equação estabelecida pela norma ASTM D1434-82 (ASTM, 2003):

$$P = \frac{Q \cdot l}{a \cdot t \cdot \Delta p} \quad (3)$$

A expressão $\frac{Q}{t}$ é a taxa de permeação (mL (CNTP)/dia) e é resolvida pela Equação 2. A espessura do filme (l), em milímetros, foi determinada a partir da média de espessura de três regiões do filme, aferida com um micrômetro digital Mitutoyo® Coolant Proof IP65. A área (a) de cada filme analisado na câmara de permeação foi de 0,005153 m². O tempo (t), em dias, foi correspondente a cada tempo de análise.

O gradiente de pressão parcial (Δp), em atmosferas (atm), foi calculado pela pressão parcial de CO₂ do

Sistema de baixo custo para determinação da permeabilidade de CO₂ em filmes plásticos

Carmelo, L. G. P. et al.

compartimento superior subtraída pela pressão parcial de CO₂ do compartimento inferior. A pressão parcial de cada compartimento foi determinada multiplicando-se a concentração deste gás (% v/v) em cada compartimento pela pressão da cidade de São Carlos-SP, assumida como 0,908 atm (INMET, 2014).

O resultado da Equação 3 corresponde à permeabilidade do filme analisado e é expresso em cm³(CNTP).mm.m⁻².dia⁻¹.atm⁻¹, conforme as respectivas grandezas.

3 Resultados e discussão

3.1 Estanqueidade e funcionamento das câmaras de permeação

A estanqueidade dos componentes da câmara de permeação foi conferida de acordo com a ausência de borbulhamento das peças que foram individualmente testadas por pressurização de ar, imersas em água e com todas as demais saídas fechadas. Nos testes, as conexões de engate rápido para os tubos de entrada e saída de ar asseguraram boa vedação e facilidade de manuseio.

As câmaras de permeação apresentaram facilidade de montagem e de uso. As etapas de montagem da câmara

de permeação para uso em ensaios de permeabilidade são apresentadas na Figura 5. O detalhe do rebaixo central e da colocação do *o'ring*, e a vista lateral da câmara de permeação são apresentados nas Figuras 6 e 7.

3.2 Regulagem da umidade relativa

Para se atingir a umidade relativa de 65%, conforme esperado, a pressão utilizada no saturador foi de 13,3 kPa. Esse valor, obtido de forma empírica, difere substancialmente dos resultados obtidos a partir da Equação 1, proposta por Amdur e White (1965). Além disso, para que a umidificação acontecesse eficientemente, foi necessário aumentar o fluxo de gás que passa pelo saturador para aproximadamente 5 L/h.

Uma possível explicação para a diferença na pressão e fluxo ajustados é que o saturador utilizado não foi totalmente eficiente em umidificar o ar, o que pode estar relacionado a diversos fatores, como altura da coluna de água, dimensões do saturador, temperatura e, em especial, ao fluxo de gás. O ajuste realizado certifica que o método de umidificação apresentado é versátil e pode ser adaptado a diferentes condições e equipamentos.

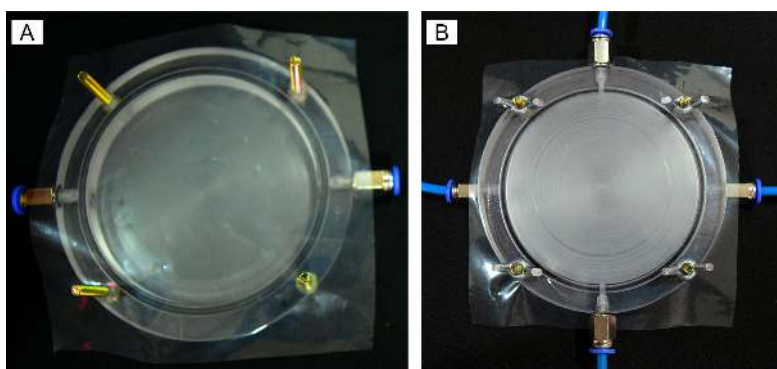


Figura 5. Vista superior da câmara de permeação. (A) Corpo de prova colocado acima do compartimento inferior e fixado nos parafusos; (B) Câmara de permeação completa, com os dois compartimentos fechados sobre o corpo de prova e os tubos de entrada e saída dos gases, ligados às conexões de engate rápido.

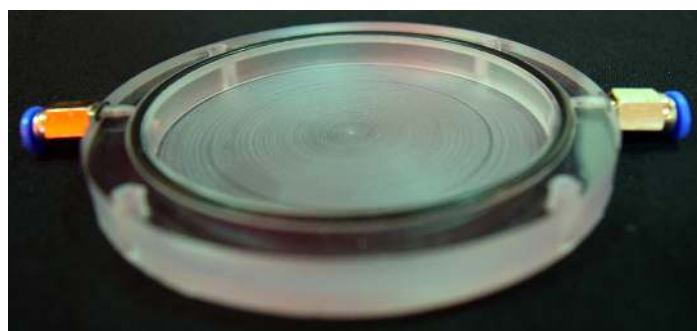


Figura 6. Vista lateral do compartimento inferior da câmara de permeação, pela qual é possível observar o rebaixo central e a posição do *o'ring*.

Sistema de baixo custo para determinação da permeabilidade de CO₂ em filmes plásticos

Carmelo, L. G. P. et al.

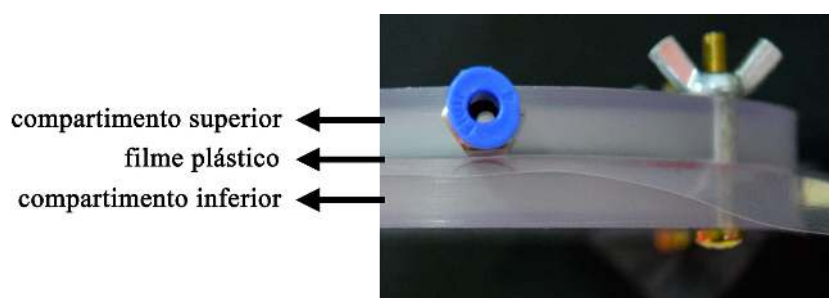


Figura 7. Vista lateral da câmara de permeação com o filme plástico.

3.3 Permeabilidade dos filmes avaliados

Na Figura 8, é apresentado o gráfico de permeabilidade ao CO₂ dos filmes plásticos ao longo do tempo. É possível observar que, para todos os filmes analisados, a medição da permeabilidade no tempo de 24 horas corresponde a um estado de equilíbrio da taxa de permeação. Dessa forma, utilizou-se esse tempo específico para a determinação da permeabilidade específica de cada filme, valores que estão apresentados na Tabela 1.

Esses valores são próximos à faixa de valores de permeabilidade encontrados na literatura para os respectivos materiais (MARK, 1985; BRYDSON, 1999; MASSEY, 2003; SANDHYA, 2010). Todavia, é importante ressaltar que a permeabilidade específica do filme plástico depende de fatores ambientais (temperatura, umidade relativa) e é também fortemente dependente das características do material, como sua composição e seu processo de fabricação. Para tanto, o material utilizado foi considerado homogêneo, desta forma a taxa de permeabilidade foi transformada em coeficiente.

A partir dos resultados de permeabilidade encontrados e da correspondência destes com os valores reportados na literatura, evidencia-se que a eficiência das câmaras de permeação foi atingida. Desta forma, o método desenvolvido mostrou-se eficiente, versátil e pouco oneroso.

O método proposto é eficiente, pois, por meio deste, é possível calcular a permeabilidade. O método é altamente versátil por dois principais motivos: (1) pode ser utilizado para determinação da permeabilidade a diferentes gases, como O₂, CO₂ e etileno, e (2) possui parâmetros, como umidade relativa, temperatura e fluxo, que podem ser facilmente ajustáveis de acordo com a necessidade do operador.

A câmara de permeação desenvolvida pode ser utilizada em laboratórios que trabalham com o desenvolvimento e a aplicação de novos filmes plásticos, em que se espera que a análise da permeabilidade seja realizada de forma eficaz e pouco onerosa.

Em comparação com os atuais equipamentos destinados a analisar a permeabilidade de filmes plásticos,

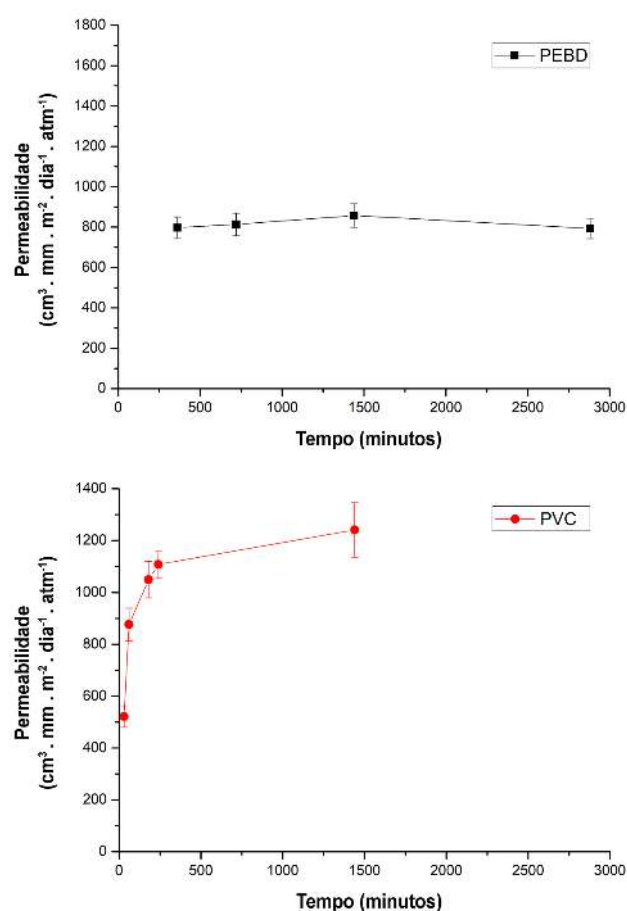


Figura 8. Permeabilidade ao CO₂ dos filmes de PEBD e PVC.

Tabela 1. Valores de permeabilidade ao CO₂ dos filmes analisados (média ± desvio padrão) e valores apresentados por outros autores.

Filme plástico	Permeabilidade ao CO ₂ (cm³ mm m² dia⁻¹ atm⁻¹)	
	Valores experimentais	Faixa de valores encontrados na literatura ^a
PEBD	857 ± 57	230 a 1060
PVC	1241 ± 105	12,5 a 1176

^aFonte: Mark (1985); Brydson (1999); Massey (2003); Sandhya (2010).

Sistema de baixo custo para determinação da permeabilidade de CO₂ em filmes plásticos

Carmelo, L. G. P. et al.

o método desenvolvido é de baixo custo, embora exija equipamento auxiliar para determinação da concentração dos gases de interesse. Em contrapartida, os equipamentos comerciais para análise da permeabilidade são de alto custo e, muitas vezes, restritos à análise de um único gás (O₂ ou CO₂, por exemplo), ao passo que a câmara proposta neste trabalho pode ser utilizada para determinação da permeabilidade de diversos gases.

Outros autores (GILBERT; PEGAZ, 1969 apud GILBERT et al., 1983; FELDER; HUVARD, 1980; ASHLEY, 1985; AYRANCI; TUNC, 2003; STEFFENS, 2006) já descreveram a utilização de câmaras de permeação com princípio de funcionamento semelhante ao aqui apresentado. O método proposto neste trabalho, contudo, é diferenciado por três principais aspectos: (1) todos os componentes utilizados na avaliação da permeabilidade são de baixo custo, podendo ser adquiridos, utilizados e/ou manufaturados com facilidade, o que permite a análise da permeabilidade de filmes em larga escala; (2) os sistemas de controle de fluxo, umidificação e análise da permeabilidade são de simples operação, e (3) em muitos laboratórios de pós-colheita e fisiologia vegetal, já existem equipamentos como o *flowboard* e o cromatógrafo a gás, o que possibilita, dessa forma, a análise de permeabilidade ser realizada apenas se confeccionando as câmaras de permeação. Estudos futuros poderão comparar o método aqui proposto com os métodos e equipamentos já utilizados para medição da permeabilidade de filmes plásticos, e corroborar a precisão, estabilidade e reprodutibilidade deste novo método.

4 Conclusão

O método apresentado para avaliação da permeabilidade de filmes plásticos, que não apresentam alta barreira a gases, é de baixo custo, demonstrou eficiência quando comparado a outras metodologias e mostrou-se de aplicação versátil para diferentes gases e com parâmetros de uso, como umidade relativa, temperatura e fluxo, facilmente ajustáveis. A sua utilização pode contribuir para uma avaliação rápida, segura e de baixo custo de distintos filmes plásticos.

Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), e à Rede Agronano – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) e MCTI-SisNano.

Referências

- AMDUR, E. J.; WHITE, R. W. Two-pressure relative humidity standards. In: WEXLER, A. (Ed.). **Humidity and moisture**. London: Chapman & Hall, 1965. v. 3, p. 445-454.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **D1434-82**: standard test method for determining gas permeability characteristics of plastic film and sheeting. West Conshohocken: ASTM International, 2003. 12 p.
- ARORA, A.; PADUA, G. W. Review: nanocomposites in food packaging. **Journal of Food Science**, v. 75, n. 1, p. 43-49, 2010. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1750-3841.2009.01456.x>. PMID:20492194.
- ARUNVISUT, S.; PHUMMANEE, S.; SOMWANGTHANAROJ, A. Effect of clay on mechanical and gas barrier properties of blown film LDPE/clay nanocomposites. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 106, n. 4, p. 2210-2217, 2007. <http://dx.doi.org/10.1002/app.26839>.
- ASHLEY, R. J. Permeability and plastics packaging. In: COMYN, J. (Ed.). **Polymer permeability**. Dordrecht: Springer, 1985. p. 269-308. http://dx.doi.org/10.1007/978-94-009-4858-7_7.
- AYRANCI, E.; TUNC, S. A method for the measurement of the oxygen permeability and the development of edible films to reduce the rate of oxidative reactions in fresh foods. **Food Chemistry**, v. 80, n. 3, p. 423-431, 2003. [http://dx.doi.org/10.1016/S0308-8146\(02\)00485-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0308-8146(02)00485-5).
- BECARO, A. A.; PUTI, F. C.; CORREA, D. S.; PARIS, E. C.; MARCONCINI, J. M.; FERREIRA, M. D. Polyethylene films containing silver nanoparticles for applications in food packaging: characterization of physico-chemical and anti-microbial properties. **Journal of Nanoscience and Nanotechnology**, v. 15, n. 3, p. 2148-2156, 2015. <http://dx.doi.org/10.1166/jnn.2015.9721>. PMID:26413633.
- BECARO, A. A.; PUTI, F. C.; PANOSSO, A. R.; GERN, J. C.; BRANDÃO, H. M.; CORREA, D. S.; FERREIRA, M. D. Postharvest quality of fresh-cut carrots packaged in plastic films containing silver nanoparticles. **Food and Bioprocess Technology**, v. 9, n. 4, p. 637-649, 2016. <http://dx.doi.org/10.1007/s11947-015-1656-z>.
- BRYDSON, J. A. **Plastics materials**. New Delhi: Butterworth-Heinemann, 1999. 920 p.
- CARMELO, L. G. P.; FERREIRA, M. D.; CALBO, A. G.; BECARO, A. A. Flow-board portátil para experimentos com armazenamento em atmosfera controlada de frutas e hortaliças em mini-câmaras. **Engenharia Agrícola**, v. 35, n. 6, p. 1105-1116, 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v35n6p1105-1116/2015>.
- COMYN, J. Introduction to polymer permeability and the mathematics of diffusion. In: COMYN, J. (Ed.). **Polymer permeability**. Dordrecht: Springer, 1985. p. 1-10.
- DADBIN, S.; NOFERESTI, M.; FROUNCHI, M. Oxygen barrier LDPE/LLDPE/organoclay nano-composite films for food packaging.

Sistema de baixo custo para determinação da permeabilidade de CO₂ em filmes plásticos

Carmelo, L. G. P. et al.

- Macromolecular Symposia**, v. 274, n. 1, p. 22-27, 2008. <http://dx.doi.org/10.1002/masy.200851404>.
- DUDEFOI, W.; VILLARES, A.; PEYRON, S.; MOREAU, C.; ROPERS, M. H.; GONTARD, N.; CATHALA, B. Nanoscience and nanotechnologies for biobased materials, packaging and food applications: new opportunities and concerns. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 46, p. 107-121, 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ifset.2017.09.007>.
- DUNCAN, T. V. Applications of nanotechnology in food packaging and food safety: barrier materials, antimicrobials and sensors. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 363, n. 1, p. 1-24, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcis.2011.07.017>. PMID:21824625.
- FELDER, R. M.; HUVARD, G. S. Permeation, diffusion, and sorption of gases and vapors. In: FAVA, R. A. (Ed.). **Methods in experimental physics**. New York: Academic Press, 1980. v. 16, p. 315-377. [http://dx.doi.org/10.1016/S0076-695X\(08\)60536-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0076-695X(08)60536-0).
- GILBERT, S. G.; HATZIDIMITRIU, E.; LAI, C.; PASSY, N. Study of barrier properties of polymeric films to various organic aromatic vapors. In: CHARALAMBOUS, G.; INGLET, G. INTERNATIONAL FLAVOR CONFERENCE: INSTRUMENTAL ANALYSIS OF FOODS: RECENT PROGRESS, 3., 1983, Corfu, Greece. **Proceedings...** New York: Academic Press, 1983. p. 405-411.
- GREENSPAN, L. Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions. **Journal of Research of the National Bureau of Standards. Section A. Physics and Chemistry**, v. 81A, n. 1, p. 89-96, 1977. <http://dx.doi.org/10.6028/jres.081A.011>.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. **Estação meteorológica de observação de superfície automática**. Brasília: 2014. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesautomaticas>>. Acesso em: 10 mar. 2014.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO. **ISO 291**: plastics: standard atmospheres for conditioning and testing. Geneva, 2008. 14 p.
- MARK, H. F. **Encyclopedia of polymer science and engineering**. New York: Wiley-Interscience, 1985. v. 3. 848 p.
- MASSEY, L. K. **Permeability properties of plastics and elastomers: a guide to packaging and barrier materials**. 2nd ed. Norwich: William Andrew Publishing/Plastics Design Library, 2003. 556 p.
- MCKEEN, L. W. **Permeability properties of plastics and elastomers**. Waltham: Elsevier, 2012. 304 p.
- PILLAI, K. V.; HUNT, P. R.; DUNCAN, T. V. Nanoparticles in polymer nanocomposite food contact materials: uses, potential release, and emerging toxicological concerns. In: SNEDEKER, S. M. (Ed.). **Toxicants in food packaging and household plastics**. London: Springer-Verlag, 2014. p. 95-123. http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4471-6500-2_4.
- RAY, S.; QUEK, S. Y.; EASTEAL, A.; CHEN, X. D. The potential use of polymer-clay nanocomposites in food packaging. **International Journal of Food Engineering**, v. 2, n. 4, 2006. <http://dx.doi.org/10.2202/1556-3758.1149>.
- RHIM, J. W.; PARK, H. M.; HA, C. S. Bio-nanocomposites for food packaging applications. **Progress in Polymer Science**, v. 38, n. 10-11, p. 1629-1652, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2013.05.008>.
- SANDHYA. Modified atmosphere packaging of fresh produce: current status and future needs. **Lebensmittel-Wissenschaft + Technologie**, v. 43, n. 3, p. 381-392, 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2009.05.018>.
- SARANTÓPOULOS, C. I. G. L.; OLIVEIRA, L. M.; PADULA, M.; COLTRO, L.; ALVES, R. M. V.; GARCIA, E. E. C. **Embalagens plásticas flexíveis: principais polímeros e avaliação de propriedades**. Campinas: CETEA/ITAL, 2002. 267 p.
- SIRACUSA, V. Food packaging permeability behaviour: a report. **International Journal of Polymer Science**, v. 2012, p. 1-1, 1, 2012. <http://dx.doi.org/10.1155/2012/302029>.
- STEFFENS, C. A. **Respiração de frutos e permeabilidade de filmes poliméricos**. 2006. 88 f. Tese (Doutorado em Agronomia)-Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.
- TAN, B.; THOMAS, N. L. A review of the water barrier properties of polymer/clay and polymer/graphene nanocomposites. **Journal of Membrane Science**, v. 514, p. 595-612, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.memsci.2016.05.026>.