



CÁLCULO DA PERMEABILIDADE EM COMPÓSITOS MOLDADOS VIA RTM (RESIN TRANSFER MOLDING)

Tessie Gouvêa da Cruz Lopes¹, Gisele Alves dos Passos², Belmira Benedita Kurn¹

¹Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, Brasil (tessie@ufrj.br)

²Engenharia de Materiais pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, Brasil

Resumo: Este artigo apresenta uma metodologia baseada no processamento e análise de imagens para o cálculo da permeabilidade em compósitos processados por RTM (Resin Transfer Molding) com base em imagens capturadas durante o processo de injeção. Foi utilizada a Lei de Darcy para cálculo da constante de permeabilidade a partir da análise da frente de fluxo. Os resultados indicaram boa uniformidade do parâmetro ao longo das diferentes seções analisadas, validando a metodologia adotada.

Palavras-chave: Análise de imagens; Frente de fluxo; Lei de Darcy.

INTRODUÇÃO

A crescente demanda por materiais com alto desempenho mecânico, leveza e sustentabilidade tem incentivado o uso de compósitos na indústria (Rezende and Botelho, 2000). Entre os métodos de fabricação, o processo RTM (Resin Transfer Molding) destaca-se pela simplicidade operacional e pela viabilidade econômica, especialmente na produção de peças complexas. Nesse processo a moldagem ocorre através da impregnação do reforço fibroso pela matriz polimérica tendo como fator de influência variáveis como pressão, temperatura, dimensões das peças e propriedades intrínsecas dos materiais. Para que a peça conformada via RTM responda de forma satisfatória aos esforços que será submetida é necessário que exista boa interação interfacial entre fibra e resina resultando em impregnação efetiva do reforço pela matriz uma vez que a presença de vazios no interior da peça e o descolamento da fibra podem levar o material à falha. A permeabilidade, que diz respeito à resistência do reforço fibroso em relação à matriz fluida, é uma das principais variáveis do processo e precisa ser conhecida para que seja possível a simulação softwares e modelagem matemática, tornando a implementação do processo de moldagem via RTM menos custosa, mais rápida e mais eficiente (Garay, 2016). Dessa forma o cálculo da constante de permeabilidade na fabricação de peças via RTM é de grande importância no estudo do processo de injeção (Chen et.al, 2010; Bittrich et al, 2022). O principal objetivo desses estudos é encontrar um valor de permeabilidade, que precisa ser conhecido para que as ferramentas computacionais possam ser aplicadas na modelagem de problemas em RTM (Dutra, 2016).

Concomitantemente o processamento e análise de imagem, tem-se mostrado uma ferramenta disponível e valiosa na quantificação de parâmetros em diferentes materiais. No mercado existem softwares que atendem a essa demanda. Entre os softwares utilizados, o ImageJ é um software de processamento e análise de imagens de domínio público (freeware), que permite a adição de recursos específicos a partir de plugins e macros desenvolvidos pelos próprios usuários. Por sua versatilidade, possui vasta bibliografia disponível e facilidade de acesso sem a necessidade de licença para utilizá-lo. Este estudo calcular o valor do parâmetro de permeabilidade e verificar sua uniformidade ao longo da placa de compósito aplicando uma metodologia de processamento e análise de imagens usando o software ImageJ.

MATERIAL E MÉTODOS

Sistema de captura de imagens

Foi montado um sistema de injeção para placas produzidas via RTM (Resin Transfer Molding) onde em uma das extremidades havia um ponto de injeção e a aplicação de pressão de vácuo em extremidade oposta. Para o experimento foi usado um tecido bidirecional (duas camadas) de tecido em um molde retangular com as dimensões da cavidade de 500mm de comprimento por 300mm de largura por 3mm de espessura. O fluido utilizado no processo de injeção para fins de caracterização foi uma solução cujo valor médio da viscosidade equivale ao de uma resina. Para o fechamento do molde foi utilizada uma placa de acrílico transparente e para o registro das imagens do avanço da frente de fluxo da resina foi instalada uma câmera.



As imagens obtidas durante o processo RTM foram salvas em formato *tiff*. O intervalo de tempo referente ao preenchimento total do molde foi 18 minutos e 56 segundos. No total foram 20 imagens selecionadas ao longo do processo de injeção a fim de permitir a observação e análise da frente de fluxo durante o processamento. As imagens foram capturadas referentes aos intervalos de tempo apresentados na Tabela 1. As imagens abrangeram uma área de 500mm x 300mm.

Tabela 1. Intervalos de tempo (t) das imagens da frente de fluxo capturadas pela câmera.

Imagem	tempo (s)	Imagem	tempo (s)
1	83	11	675
2	133	12	725
3	183	13	774
4	273	14	824
5	322	15	875
6	363	16	925
7	405	17	974
8	454	18	1024
9	574	19	1114
10	623	20	1136

Metodologia de Processamento e Análise das Imagens

Na metodologia proposta foi utilizada como ferramenta para o processamento e análise das imagens o software público ImageJ. Para ampliar a precisão da análise, a placa foi dividida em 10 seções longitudinais, e em cada uma delas foi monitorada a frente de fluxo da resina. As imagens foram designadas de acordo com a seção (S) e o tempo (t). Dessa forma a Seção 1 no tempo 1 foi designada como S1, assim como a Seção 1 no tempo 2 foi designada como S2 e assim sucessivamente.

Cada seção foi transformada em uma imagem. A imagem original foi transformada para o padrão de 8 bits. Para a análise da imagem foi separado o objeto de interesse, neste caso, a frente de fluxo.

Foi utilizada a técnica de *segmentação* que subdivide uma imagem em regiões ou objetos que a compõem. O objetivo é dividir uma imagem com base nas mudanças bruscas de intensidade, baseado no seu histograma. Para cada seção (total 10) foi gerado o histograma para a identificação da frente de fluxo. Em seguida a imagem foi *limiarizada*, isto é, foi convertida de níveis de cinza em uma imagem binária (*threshold*), por meio da adoção de um ponto (limiar) contido no seu histograma.

Com base nas medidas da placa as imagens foram *calibradas* e o valor percorrido pela frente de fluxo (x) foi calculado.

Cálculo da permeabilidade

Para descrever o avanço da resina no interior do molde no processo de RTM, o modelo matemático adequado e comumente usados, é a Lei de Darcy (Equação 1), que é uma equação constitutiva que descreve o fluxo do fluido em um meio poroso (Nielsen and Pitchumani, 2004; Oliveira, 2011; Oliveira 2019; Milanse, 2012).

$$\vec{V} = -\frac{\bar{K}}{\mu} \Delta P \quad (1)$$

Onde: \vec{V} (m/s) é o vetor velocidade; \bar{K} (m²) é o tensor de permeabilidade; μ (Pa.s) é a viscosidade e P (pa) é a pressão.

Associado a Lei de Darcy, a solução para a modelagem do escoamento de fluido em RTM tem sido obtida na maior parte dos casos, através do método VOF (Volume de fluido) (Oliveira, 2011; Oliveira 2019; Milanse, 2012) de acordo com a Equação 2.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot V) \quad (2)$$

Onde: ρ (Kg/m³) é a massa específica; V (m/s) é a velocidade.

A partir de estudos experimentais realizados por Hattabi, para pressão de injeção constante e fluxo unidirecional, a cinética da frente de fluxo pode ser obtida analiticamente conforme a Equação 3 Oliveira, 2011; Oliveira 2019; Milanse, 2012).

$$x^2 = -\frac{2KPt}{\phi\mu} \quad (3)$$

Onde: x (m) é a distância percorrida pelo fluxo; K é a permeabilidade; P (pa) é a pressão; t (s) é o tempo; ϕ é a porosidade; μ (Pa.s) é a viscosidade dinâmica do fluido.

Logo a permeabilidade pode ser determinada a partir da constante que representa a inclinação da reta obtida na relação entre x^2 e t construída através de uma análise do avanço da frente de fluxo da resina no tempo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Imagens capturadas

A figura 1 apresenta exemplo de imagens capturadas da frente de fluxo, durante a injeção do fluido, nos instantes (a) $t = 83s$, (b) $t = 322s$, (c) $t = 623s$, (d) $t = 875s$ e (e) $t = 1136s$.

No trabalho foram usadas as 20 imagens capturadas. Pode se observar na Figura 1(a) - (e) onde as setas (em destaque vermelho) mostram a frente de fluxo central nos diferentes intervalos de tempo (t), $t = 83s$, $t = 322s$, $t = 623s$, $t = 875s$ e $t = 1136s$. Para a frente de fluxo superior observa-se as setas em destaque (amarelo) e na parte inferior observa-se as setas em destaque (azul). Nota-se o movimento das frentes de fluxo variando nas diferentes secções nestes intervalos.

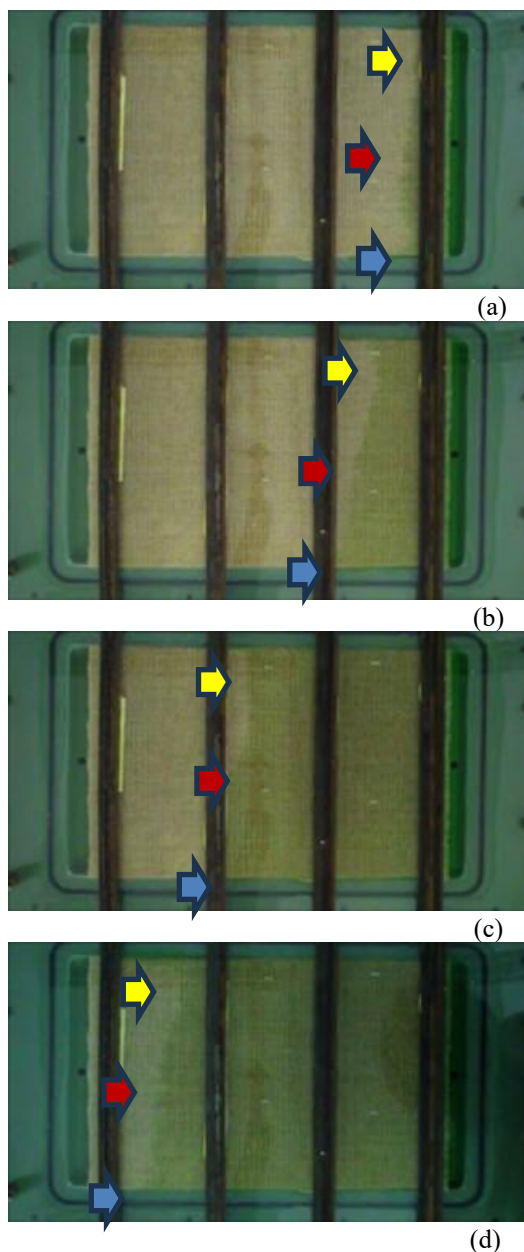
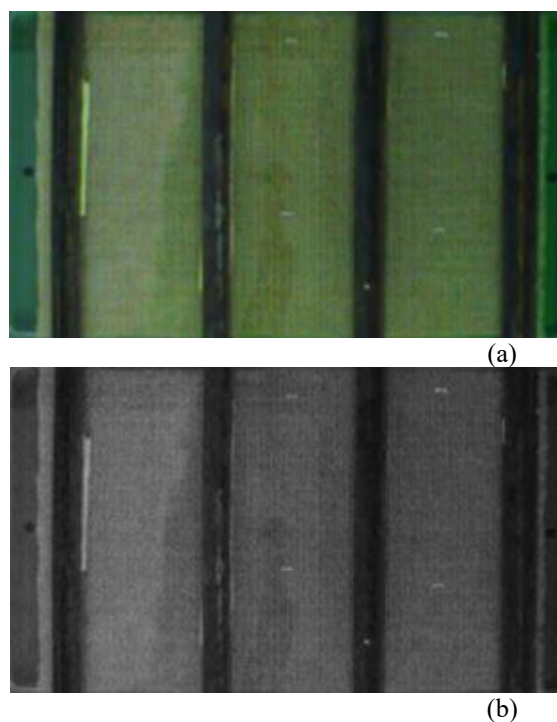


Figura 1. Exemplos de imagens capturadas nos instantes (a) $t = 83s$; (b) $t = 322s$; (c) $t = 623s$; (d) $t = 875s$ e (e) $t = 1136s$.

Metodologia de Processamento e Análise das Imagens

As Figuras 2(a)-(d) mostra um exemplo da imagem de frente de fluxo capturada e as etapas do processamento das imagens.

De acordo com a metodologia proposta neste trabalho, a imagem original [Figura 1(a)] é transformada em uma imagem 8-bit [Figura 2(b)]. Em seguida é aplicada a técnica de segmentação e limiarização [Figura 2(c)]. O comprimento longitudinal da frente de fluxo, com o uso de ferramentas do ImageJ, é medido em cada secção [Figura 2(d)].



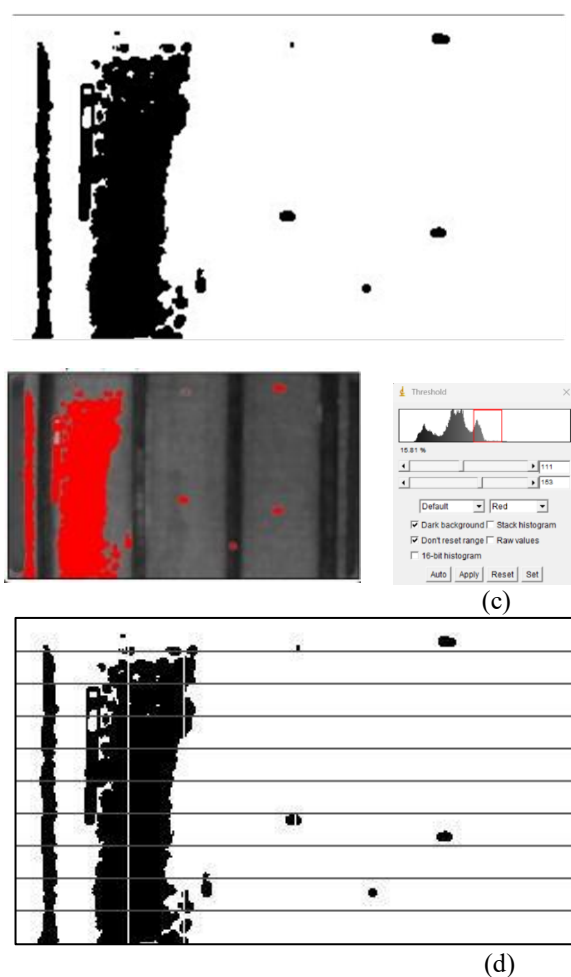


Figura 2. Etapas do processamento e análise de imagem para as imagens de frente de fluxo capturadas - (a) imagem original; (b) imagem original transformada em uma imagem 8-bit; (c) uso da técnica de *segmentação e limiarização* e (d) comprimento longitudinal da frente de fluxo, com o uso de ferramentas do ImageJ, é medido em cada secção.

Para apresentar os valores medidos, usando a metodologia proposta neste trabalho em cada secção foram agrupados nas Tabelas 2 e 3. Pode-se observar os valores das imagens da frente de fluxo das secções 1-5 capturadas pela câmera em relação ao tempo de injeção na Tabela 2 e os valores das secções 6-10 na Tabela 3.

Tabela 2. Intervalos de tempo (t) das imagens da frente de fluxo das secções 1-5 capturadas pela câmera.

T	S1	S2	S3	S4	S5
(s)	x^2 (m ²)	x^2 (m ²)	x^2 (m ²)	x^2 (m ²)	x^2 (m ²)
83	0,0018	0,0018	0,0018	0,0033	0,0034
133	0,0055	0,0056	0,0061	0,0067	0,0089

183	0,0143	0,0114	0,0127	0,0138	0,0163
273	0,0346	0,0345	0,0345	0,0345	0,0345
322	0,0523	0,0419	0,0429	0,0427	0,0446
363	0,0625	0,0571	0,0523	0,0561	0,0580
405	0,0671	0,0636	0,0600	0,0640	0,0692
454	0,0797	0,0792	0,0797	0,0775	0,0832
574	0,0953	0,1122	0,1122	0,1122	0,1156
623	0,1108	0,1122	0,1122	0,1191	0,1276
675	0,1150	0,1219	0,1291	0,1262	0,1365
725	0,1357	0,1233	0,1313	0,1350	0,1471
774	0,1425	0,1335	0,1342	0,1495	0,1558
824	0,1633	0,1449	0,1511	0,1527	0,1608
875	0,2015	0,1625	0,1649	0,1592	0,1716
925	0,2015	0,1725	0,1683	0,1691	0,1759
974	0,2242	0,1907	0,1733	0,1759	0,1854
1024	0,2261	0,2261	0,2261	0,2261	0,2261
1114	0,2379	0,2359	0,2339	0,2304	0,2304
1136	0,2500	0,2500	0,2500	0,2500	0,2500

Tabela 3. Intervalos de tempo (t) das imagens da frente de fluxo das secções 6-10 capturadas pela câmera.

T	S6	S7	S8	S9	S10
(s)	x^2 (m ²)	x^2 (m ²)	x^2 (m ²)	x^2 (m ²)	x^2 (m ²)
83	0,0043	0,0059	0,0055	0,0033	0,0080
133	0,0096	0,0097	0,0124	0,0112	0,0177
183	0,0186	0,0187	0,0224	0,0226	0,0249
273	0,0386	0,0416	0,0441	0,0445	0,0456
322	0,0465	0,0479	0,0610	0,0635	0,0656
363	0,0635	0,0714	0,0803	0,0797	0,0856
405	0,0803	0,0797	0,0873	0,0867	0,0879
454	0,0916	0,0959	0,0959	0,0959	0,0959
574	0,1170	0,1122	0,1122	0,1156	0,1365
623	0,1335	0,1122	0,1191	0,1276	0,1410
675	0,1395	0,1418	0,1395	0,1262	0,1365
725	0,1487	0,1425	0,1495	0,1448	0,1542
774	0,1526	0,1582	0,1672	0,1526	0,1558
824	0,1608	0,1666	0,1666	0,1697	0,1574
875	0,1733	0,1691	0,1733	0,1742	0,1811
925	0,1750	0,1708	0,1828	0,1828	0,1819
974	0,1934	0,1811	0,1890	0,1845	0,1898
1024	0,2261	0,2261	0,2261	0,1881	0,1952

1114	0,2330	0,2369	0,2369	0,2261	0,2261
1136	0,2500	0,2500	0,2500	0,2389	0,2400

De acordo com a metodologia apresentada as equações das retas obtidas a partir dos dados experimentais são utilizadas no cálculo da permeabilidade.

A Figura 3 mostra um exemplo de gráfico distância *versus* tempo obtido para a Secção 1. Foram calculados os gráficos e a equação de reta para todas as secções com os dados das tabelas 2 e 3.



Figura 3. Gráfico distância *versus* tempo obtido para a Secção 1 (S1).

Foram calculados os gráficos e a equação de reta para todas as secções e os resultados são apresentados na tabela 4.

Tabela 4. Resultado das equações de reta para cada secção.

Secção	Equação da reta
S1	$y = 0,0002440x - 0,031$
S2	$y = 0,0002291x - 0,0287$
S3	$y = 0,0002270x - 0,0276$
S4	$y = 0,0002260x - 0,0256$
S5	$y = 0,0002294x - 0,0256$
S6	$y = 0,0002270x - 0,0256$
S7	$y = 0,0002230x - 0,0157$
S8	$y = 0,0002220x - 0,011$
S9	$y = 0,0002252x - 0,0109$
S10	$y = 0,0002228x - 0,0068$

As equações das retas ajustadas forneceram os coeficientes angulares utilizados para o cálculo da constante de permeabilidade segundo a Lei de Darcy (Figura 4). O valor médio obtido foi de 0,00022755 com desvio padrão de 6,31599E-06.

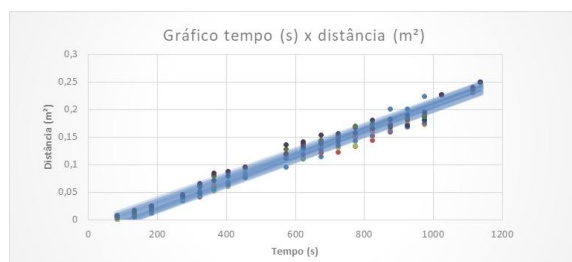


Figura 4. Gráfico distância *versus* tempo obtido para as Secções de 1-10.

Os resultados demonstraram que, apesar de pequenas variações locais no avanço da frente de fluxo, a constante de permeabilidade pode ser considerada uniforme ao longo da placa.

CONCLUSÃO

Os resultados atestam a confiabilidade da técnica de análise de imagens para estudos de escoamento em meios porosos e sua aplicação em modelagens numéricas do processo RTM.

AGRADECIMENTOS

À Profa. Dra. Andressa Cecília Milanese por ceder as imagens capturadas em sua pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Chen, YF; A. Rodriguez e B. Minaie. A methodology to determine permeability distribution of a preform in resin transfer molding process. *Join of Reinforced Plastics and Composites*, 30, 169-178, 2010.
- Dutra, Carla M. B. Estudo Numérico da Permeabilidade em Meios Porosos para RTM. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciado em Matemática) – Universidade Federal do Pampa, Bagé.
- Garay, André C. Propriedades Mecânicas de Compósitos Estruturais Sanduíche Moldadas por RTM Light e Simulação Numérica da Infiltração. 2016. Tese (Doutor em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Porto Alegre.
- Lars Bittrich, Julian Seuffert, Sarah Dietrich, Kai Uhlig, Tales de Vargas Lisboa, Luise Kärger and Axel Spickenheuer. On the Resin Transfer Molding (RTM) Infiltration of Fiber-Reinforced Composites Made by Tailored Fiber Placement. *Polymers*, 14, 4873, 2022.
- Milanese, Andressa C. Processamento e Caracterização de Compósitos Fibra de Sisal/Resina Epóxi via RTM. Tese, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.
- Nielsen, D.R. and R. Pitchumani. Control of flow in resin transfer molding with real-time preform



permeability estimatio. Polymer Composite, 23, 1087-1110, 2004.

Oliveira, Cristiano P.; SOUZA, Jeferson A.; AMICO, Sandro C.; ISOLDI, Liércio A.; SILVA, Rafael D. S. Comparação dos Métodos VOF e FE/CV Aplicados a Solução de Problemas de RTM. Vetor, v. 21, n.2, p. 22-33, 2011.

Oliveira, Cristiano P.; TRINDADE, Rafael S.; REICHWALD, Luis Guilherme G.; AMICO, Sandro C.; SOUZA Jeferson A. Determinação Numérico-Experimental da Permeabilidade Transversal em Problemas de RTM. Revista Cereus, vol. 11, nº1, p. 81-95, 2019.

Rezende, Mirabel C.; BOTELHO, Edson C. O Uso de Compósitos Estruturais na Indústria Aeroespacial. Polímeros: Ciência e Tecnologia, v10, nº2, 2000.