

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais
PPGE3M

**INVESTIGAÇÃO DE FIBRAS VEGETAIS COMO PROMOTORES DE
FLUXO NA MOLDAGEM POR TRANSFERÊNCIA DE RESINA**

Tese para obtenção do título de Doutor em Engenharia

Tiago de Medeiros Schmidt, M. Sc.

Porto Alegre
2016

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais
PPGE3M

TESE DE DOUTORADO

**INVESTIGAÇÃO DE FIBRAS VEGETAIS COMO PROMOTORES DE
FLUXO NA MOLDAGEM POR TRANSFERÊNCIA DE RESINA**

Tiago de Medeiros Schmidt, M. Sc.

Trabalho realizado no Departamento de Materiais da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Porto Alegre
2016

Essa Tese foi julgada adequada para obtenção do título de Doutor em Engenharia, área de concentração de Ciência e Tecnologia dos Materiais e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Dr. Sandro Campos Amico (PPGE3M / UFRGS)

Banca Examinadora:

Dr. Ademir José Zattera (PGEPROTEC / UCS)

Dr. Carlos Arthur Ferreira (PPGE3M / UFRGS)

Dr. Jeferson Avila Souza (PPGMC / FURG)

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann
Coordenador do PPGE3M / UFRGS

*“Tutto il nostro sapere ha origine
dalle nostre percezioni.”*
(Leonardo da Vinci)

*Dedico este trabalho
à minha família, à minha esposa e ao meu filho
pela energia positiva de todos os momentos.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por me permitir experimentar desse momento ímpar na minha vida e na minha carreira profissional, fortalecendo-me sempre ao cumprimento dos desafios estabelecidos.

Ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M – da Escola de Engenharia da UFRGS pelo aceite no curso para a realização desse trabalho, e ao Laboratório de Materiais Poliméricos – LAPOL – por ter me acolhido nesse período de desenvolvimento do trabalho.

Ao exímio professor e orientador Sandro Amico pela confiança ao me fazer o convite para trabalhar na idealização, preparação e construção de uma metodologia destinada aos materiais compósitos moldados por RTM dentro do LAPOL, bem como pelo apoio e importante suporte na execução de tarefas para o desenvolvimento desse trabalho.

À professora Madalena pelos seus valiosos conselhos que sempre me fizeram crescer como pesquisador, e sem dúvida pelo incentivo incondicional ao dizer “sim” quando a oportunidade me foi oferecida para desenvolver o presente trabalho.

Aos professores Ademir Zattera, Carlos Ferreira, Estevão Freire, Jeferson Souza, Luiz Coelho, Ruth Santana e Sérgio Pezzin pelo conhecimento compartilhado nos inúmeros eventos em que participamos juntos.

Ao estimado colega, amigo e técnico Martin Bischoff pelo suporte contínuo para o adequado funcionamento do aparato experimental de moldagem por RTM no laboratório, e pelas duradouras e fraternais conversas após o expediente no Campus do Vale.

Aos alunos de iniciação científica Guilherme Hiller, Jorge Filla, Thiago Goss, Amanda Biagini, Katia Suzuki, Rafael Sonaglio, Felipe Koops, Tiago Abreu, Marta Drummond e Eduardo Kerche pela paciência, parceria, dedicação e suporte para que tivéssemos êxitos nas publicações em geral.

Aos respeitáveis colegas das salas 111, 117, 121 e salas anexas do LAPOL bem como aos colegas da UCS, mas em especial Alessandra Baldissera, Álvaro Moraes, Bianca Rabello, Caroline Pigatto, Cristina Cordella, Diógenes Vedoy, Micheli Haack e Sandro Borges pelo companheirismo diário, pela união, pela companhia nas viagens aos eventos, pelos momentos de incentivo, pela troca de conhecimento e experiência, pelas recomendações e pelas inúmeras risadas que demos ao longo desse tempo de convivência.

Ao LAPOL, LACAR, LAMEF, LTM, IQ e Centro de Microscopia da UFRGS pela essencial disponibilidade que me foi concedida para a realização de ensaios de caracterização de fluidos, fibras e reforços fibrosos. Ao Laboratório de Polímeros da UCS pela realização dos ensaios mecânicos.

Aos verdadeiros amigos, Carlos Eduardo “Duda” e Thiago Ferreira, que sempre me questionaram sobre o andamento do trabalho e apoiaram rumo à conclusão do mesmo.

Aos meus pais, Ronaldo e Lúcia, por sempre incentivarem e acreditarem nas minhas decisões de cunho profissional. Aos meus irmãos, Graciane e Felipe, por as valorizarem ainda mais.

À minha esposa e ao meu filho, Flavia e Leonardo, por entenderem que a ausência em alguns momentos essenciais em família será recompensada por eternas recordações no futuro.

Finalmente, aos órgãos de fomento: CNPq pela bolsa concedida, CAPES/PROCAD e FAPERGS pelo apoio financeiro ao projeto.

PUBLICAÇÕES RELACIONADAS

➤ PERIÓDICO E CONGRESSOS

- ✓ SCHMIDT, T.M. *et al.* Permeability of hybrid reinforcements and mechanical properties of their composites moulded by resin transfer moulding. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, v.28, n.23, p.2839-2850, 2009.
- ✓ SCHMIDT, T.M. *et al.* Avaliação de mantas de sisal utilizadas como promotor de fluxo na moldagem por RTM de reforços de fibra de vidro. In: *11º Congresso Brasileiro de Polímeros (CBPol)*, 2011, Campos do Jordão/SP. p. 3031-3036.
- ✓ SCHMIDT, T.M. *et al.* Influence of the fiber mat compaction on the permeability of hybrid composites. In: *11th International Conference on Advanced Materials (ICAM)*, 2009, Rio de Janeiro/RJ. p. 1 (resumo)
- ✓ SCHMIDT, T.M. *et al.* Avaliação da permeabilidade de diferentes fibras vegetais utilizadas como reforços em compósitos poliméricos. In: *18º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais (CBECIMat)*, 2008, Porto de Galinhas/PE. p. 3852-3862.
- ✓ SCHMIDT, T.M. *et al.* Evaluation of the permeability of hybrid fibrous reinforcements as a function of the stacking sequence in resin transfer molding (RTM). In: *International Conference on Advanced Materials and Composites (ICAMC)*, 2007, Trivandrum, India. p. 82-89.
- ✓ SCHMIDT, T.M. *et al.* Determinação da permeabilidade de reforços fibrosos no processo de moldagem por transferência de resina. In: *IV Congresso Brasileiro de Carbono (CARBONO)*, 2007, Gramado/RS. p. 94-99.
- ✓ SCHMIDT, T.M. *et al.* Influência das condições de moldagem por transferência de resina (RTM) no comportamento mecânico de compósitos poliméricos. In: *17º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais (CBECIMAT)*, Foz do Iguaçu/PR, 2006, p. 1-8.

➤ PATENTE

- ✓ UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL - UFRGS, Porto Alegre/RS; SCHMIDT, T.M. *et al.* **Processo de produção de mantas e uso de fibras vegetais como promotor de fluxo.** B29C 43/02 C08J 5/04. BR nº PI 0903094-8 A2. 04 ago. 2009; 12 abr. 2011. Revista da Propriedade Industrial, n. 2101, p. 139.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	XI
LISTA DE TABELAS.....	XIII
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIÇÕES.....	XIV
RESUMO.....	XVI
ABSTRACT.....	XVII
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.1. OBJETIVO GERAL.....	3
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1. MOLDAGEM LÍQUIDA.....	4
3.2. PERMEABILIDADE.....	10
3.3. PROMOTORES DE FLUXO.....	15
3.4. REFORÇOS FIBROSOS PARA COMPÓSITOS.....	18
3.4.1. <i>Fibras sintéticas</i>	18
3.4.2. <i>Fibras vegetais</i>	20
3.5. HIBRIDIZAÇÃO DE FIBRAS SINTÉTICAS E FIBRAS VEGETAIS.....	27
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	29
4.1. MATERIAIS.....	29
4.2. MÉTODOS.....	33
4.2.1. <i>Caracterização dos fluidos impregnantes</i>	33
4.2.2. <i>Tratamento químico e caracterização das fibras</i>	34
4.2.3. <i>Preparo das mantas homogêneas e dos reforços híbridos</i>	36
4.2.4. <i>Compressibilidade de reforços híbridos</i>	39
4.2.5. <i>Medidas de permeabilidade via RTM</i>	40
4.2.6. <i>Moldagem e caracterização dos compósitos</i>	43
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	48
5.1. AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS FLUIDOS IMPREGNANTES.....	48
5.2. AVALIAÇÃO DE FIBRAS E REFORÇOS FIBROSOS.....	51
5.3. DETERMINAÇÃO DA PERMEABILIDADE EM INFILTRAÇÕES RETILÍNEAS E RADIAIS.....	57

5.4.	INFLUÊNCIA DO TIPO DE FLUIDO NA PERMEABILIDADE DE REFORÇOS HOMOGÊNEOS.....	65
5.5.	INFLUÊNCIA DO COMPRIMENTO DAS FIBRAS DE SISAL E DA SUA FRAÇÃO VOLUMÉTRICA NA PERMEABILIDADE DE MANTAS	68
5.6.	INFLUÊNCIA DO TIPO DE REFORÇO NA PERMEABILIDADE DE REFORÇOS HOMOGÊNEOS.....	71
5.7.	INFLUÊNCIA DO TIPO DE FIBRA VEGETAL NA PERMEABILIDADE DE REFORÇOS HOMOGÊNEOS	75
5.8.	INFLUÊNCIA DO PROMOTOR DE FLUXO NA PERMEABILIDADE DE REFORÇOS HÍBRIDOS.....	76
5.9.	INFLUÊNCIA DA SEQUÊNCIA DE EMPILHAMENTO NA PERMEABILIDADE DE REFORÇOS HÍBRIDOS	79
5.10.	ESTUDO DA COMPRESSIBILIDADE DAS CAMADAS EM REFORÇOS HÍBRIDOS	81
5.11.	PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS MOLDADOS POR RTM – CONDIÇÃO NÃO-ENVELHECIDOS	86
5.12.	PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS MOLDADOS POR RTM – CONDIÇÃO ENVELHECIDOS ..	89
5.13.	ABSORÇÃO DE ÁGUA EM COMPÓSITOS MOLDADOS POR RTM	91
6.	CONCLUSÕES	93
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	95
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	96

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1 – ALGUMAS VARIANTES NO PROCESSO DE MOLDAGEM LÍQUIDA (LCM).....	4
FIGURA 3.2 – ESQUEMA SIMPLIFICADO DO PROCESSO DE MOLDAGEM POR RTM.....	7
FIGURA 3.3 – MECANISMO DE FORMAÇÃO DE VAZIOS EM REFORÇO FIBROSO DO TIPO TECIDO: ENTRE FEIXES (A), DENTRO DOS FEIXES (B) [17].	8
FIGURA 3.4 – COMPARAÇÃO ESQUEMÁTICA DE ALGUMAS VARIANTES DO PROCESSO DE MOLDAGEM LÍQUIDA DE COMPÓSITOS [25].	9
FIGURA 3.5 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO FLUXO DE RESINA LÍQUIDA ATRAVÉS DE UM TECIDO FIBROSO UNIDIRECIONAL (A) E BIDIRECIONAL (B) [4].	12
FIGURA 3.6 – CONFIGURAÇÕES DO MOLDE PARA FLUXO RETILÍNEO (A), E RADIAL (B) [21].	14
FIGURA 3.7 – CONSTITUIÇÃO ESTRUTURAL DE UMA CÉLULA DE FIBRA VEGETAL [55].	22
FIGURA 3.8 – PLANTA (A) A PARTIR DA QUAL SE OBTÉM A FIBRA DE SISAL (B).	23
FIGURA 3.9 – MICROGRAFIAS DE MEV DA VISTA LONGITUDINAL (A) E DA SEÇÃO TRANSVERSAL (B) DA FIBRA DE SISAL [65].	24
FIGURA 3.10 – MICROGRAFIAS DE MEV DA FIBRA DE CURAUÁ CONTENDO RESÍDUOS ADERIDOS NA SUPERFÍCIE (A) E TRATADA (B) [44].	25
FIGURA 3.11 – MICROGRAFIAS DE MEV DA FIBRA DE JUTA [19].	26
FIGURA 4.1 – MICROSCOPIA ÓPTICA DAS DIFERENTES FIBRAS VEGETAIS: COCO (A), CURAUÁ (B), JUTA (C), RAMI (D), E SISAL (E).....	32
FIGURA 4.2 – TENSÍMETRO NIMA MODELO DST 9005 (A), E DETALHES DO APARATO DE ENSAIO (B).	34
FIGURA 4.3 – MANTAS HOMOGÊNEAS DE FIBRAS VEGETAIS: COCO (A), JUTA (B), RAMI (C), E SISAL (D).....	36
FIGURA 4.4 – MANTAS HOMOGÊNEAS DE FIBRA DE VIDRO (A) E NÚCLEO DE PP.	37
FIGURA 4.5 – ETAPAS DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE MANTAS DE SISAL.	38
FIGURA 4.6 – ENSAIO DE COMPRESSÃO DE REFORÇOS FIBROSOS.	39
FIGURA 4.7 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO SISTEMA EXPERIMENTAL DE RTM.	41
FIGURA 4.8 – DESENHO DA PARTE INFERIOR DO MOLDE DO EQUIPAMENTO EXPERIMENTAL DE RTM CONFIGURADO PARA INFILTRAÇÃO RETILÍNEA.	41
FIGURA 4.9 – DESENHO DA PARTE INFERIOR DO MOLDE DO EQUIPAMENTO EXPERIMENTAL DE RTM CONFIGURADO PARA INFILTRAÇÃO RADIAL.	42
FIGURA 4.10 – SEQUÊNCIA DE IMAGENS MOSTRANDO A POSIÇÃO DA FRENTE DE FLUXO DO FLUIDO PARA UM EXPERIMENTO RETILÍNEO EM DIFERENTES TEMPOS DE PREENCHIMENTO: 15 s (A), 40 s (B), 65 s (C), 125 s (D), 340 s (E), E 480 s (F).....	43
FIGURA 4.11 – SEQUÊNCIA DE IMAGENS MOSTRANDO A POSIÇÃO DA FRENTE DE FLUXO DO FLUIDO PARA UM EXPERIMENTO RADIAL EM DIFERENTES TEMPOS DE PREENCHIMENTO: 05 s (A), 37 s (B), 86 s (C), 155 s (D), 235 s (E), E 300 s (F).	43
FIGURA 4.12 – DESENHO ESQUEMÁTICO DO COMPÓSITO UTILIZADO NO MAPEAMENTO DE ESPESSURA.	45
FIGURA 5.1 – VISCOSIDADE DINÂMICA DE FLUIDOS IMPREGNANTES EM DIFERENTES TEMPERATURAS OBTIDA PELO MÉTODO DE FLUXO REVERSO CANNON-FENSKE.	50
FIGURA 5.2 – MICROGRAFIAS DE MEV DA FIBRA DE SISAL NT (A) E (C), E SISAL T (B) E (D) EM DIFERENTES MAGNIFICAÇÕES.....	53
FIGURA 5.3 – MAPA DE ESPESSURA DE COMPÓSITOS MOLDADOS COM RESINA EPÓXI E MANTAS DE FIBRA DE VIDRO COM 6 CAMADAS (A), 8 CAMADAS (B) E 9 CAMADAS (C).	55

FIGURA 5.4 – MAPA DE ESPESSURA DE COMPÓSITOS MOLDADOS COM RESINA EPÓXI E MANTAS DE FIBRA DE VIDRO COM 10 CAMADAS (A) E 12 CAMADAS (B).	56
FIGURA 5.5 – MAPA DE ESPESSURA DE COMPÓSITO MOLDADO COM RESINA EPÓXI E 1 MANTA DE FIBRA DE SISAL.....	56
FIGURA 5.6 – CURVAS DE LEITURAS REAIS DOS TRANSDUTORES DE PRESSÃO VERSUS TEMPO PARA UM EXPERIMENTO TÍPICO DE INFILTRAÇÃO.....	57
FIGURA 5.7 – CURVAS DE LEITURAS SINCRONIZADAS DA POSIÇÃO DA FRENTE DE FLUXO DO FLUIDO E PRESSÃO PARA UM EXPERIMENTO TÍPICO DE INFILTRAÇÃO.....	58
FIGURA 5.8 – CURVAS DE LEITURA DA POSIÇÃO DA FRENTE DO FLUIDO COM O TEMPO PARA EXPERIMENTOS RETILÍNEOS TRADICIONAIS COM SIMILARES FRAÇÕES VOLUMÉTRICAS DE FIBRAS E DIFERENTES PRESSÕES DE INJEÇÃO.	59
FIGURA 5.9 – CURVAS DE X_{FF}^2 VS. TEMPO PARA EXPERIMENTOS RETILÍNEOS TRADICIONAIS COM FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE FIBRA SIMILAR E DIFERENTES PRESSÕES DE INJEÇÃO (LINHAS DE TENDÊNCIA REPRESENTAM AJUSTES LINEARES).....	60
FIGURA 5.10 – CURVAS DE Φ VS. TEMPO PARA EXPERIMENTOS RADIAIS TRADICIONAIS COM DIFERENTES FRAÇÕES VOLUMÉTRICAS DE FIBRAS E MESMA PRESSÃO DE INJEÇÃO (LINHAS DE TENDÊNCIA REPRESENTAM AJUSTES LINEARES).....	61
FIGURA 5.11 – CURVAS ISOBÁRICAS DE K VS. $\%V_F$ PARA AS INFILTRAÇÕES RETILÍNEAS EM FUNÇÃO DA PRESSÃO DE INJEÇÃO APLICADA (LINHAS DE TENDÊNCIA REPRESENTAM AJUSTES DE POTÊNCIA).	63
FIGURA 5.12 – COMPARATIVO DE K PARA INFILTRAÇÕES RETILÍNEAS E RADIAIS EM CONDIÇÕES SIMILARES DE FRAÇÕES VOLUMÉTRICAS DE FIBRAS E PRESSÕES DE INJEÇÃO.....	65
FIGURA 5.13 – ÂNGULO DE CONTATO DA GOTA DE SOLUÇÃO DE GLIC./H ₂ O 85:15 NA SUPERFÍCIE DA FIBRA DE VIDRO (A) E FIBRA DE SISAL (B).....	66
FIGURA 5.14 – VARIAÇÃO DE K DE MANTAS DE SISAL EM FUNÇÃO DA FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE FIBRAS ($P_{PRÉ-AJUSTADA} = 0,10$ BAR).....	70
FIGURA 5.15 – CURVAS DE X_{FF}^2 VERSUS TEMPO PARA OS REFORÇOS HOMOGÊNEOS DE FV, NÚCLEO DE PP E SISAL COM $\%V_F = 20\%$ E $P_{PRÉ-AJUSTADA} = 0,10$ BAR (LINHAS DE TENDÊNCIA REPRESENTAM AJUSTES LINEARES).	72
FIGURA 5.16 – ACOMPANHAMENTO DA INFILTRAÇÃO RADIAL DO REFORÇO DE MANTA DE FIBRA DE VIDRO.	74
FIGURA 5.17 – ACOMPANHAMENTO DA INFILTRAÇÃO RADIAL DO REFORÇO DE MANTA DE FIBRA DE SISAL.	74
FIGURA 5.18 – PERMEABILIDADE DE MANTAS COM DIFERENTES FIBRAS VEGETAIS E RESPECTIVOS TEMPOS DE PREENCHIMENTO ($\%V_F = 20\%$ E $P_{PRÉ-AJUSTADA} = 0,10$ BAR).	76
FIGURA 5.19 - VARIAÇÃO DA PERMEABILIDADE E DO TEMPO DE PREENCHIMENTO PARA OS REFORÇOS HÍBRIDOS COM PROMOTOR DE FLUXO ($P_{PRÉ-AJUSTADA} = 0,10$ BAR).	78
FIGURA 5.20 – DESENHO ESQUEMÁTICO MOSTRANDO A IMPREGNAÇÃO DO FLUIDO ATRAVÉS DE UM REFORÇO HÍBRIDO COM UMA CAMADA DE ALTA PERMEABILIDADE RELATIVA.	80
FIGURA 5.21 – MEDIÇÃO DA ESPESSURA DE CAMADAS DO REFORÇO HÍBRIDO [$V_2/S/V_2$].	81
FIGURA 5.22 – MICROGRAFIAS MOSTRANDO AS DIFERENTES CAMADAS NOS DIFERENTES REFORÇOS HÍBRIDOS DE PP E SISAL.....	82
FIGURA 5.23 – VARIAÇÃO DA ESPESSURA DOS REFORÇOS HOMOGÊNEOS DE FIBRA DE SISAL E FIBRA DE VIDRO, E DO REFORÇO HÍBRIDO [$V_2/S/V_2$] EM FUNÇÃO DA PRESSÃO APLICADA.	83
FIGURA 5.24 – VARIAÇÃO DA ESPESSURA DO REFORÇO HÍBRIDO EM FUNÇÃO DA PRESSÃO APLICADA.....	84
FIGURA 5.25 – VARIAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA PARA COMPÓSITOS MOLDADOS POR RTM COM MESMA FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE FIBRAS.	92

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE ALGUMAS FIBRAS VEGETAIS (EM %PESO) [44,67,68].	26
TABELA 4.1 – ESPECIFICAÇÃO DAS RESINAS POLIÉSTERES ORTOFTÁLICAS UTILIZADAS (VALORES TÍPICOS)...	30
TABELA 4.2 – ESPECIFICAÇÃO DO P-MEK BUTANOX M-50 DA AKZO NOBEL.	30
TABELA 4.3 – ESPECIFICAÇÃO DA RESINA EPÓXI ARLDITE GY-1109 DA HUNTSMAN.	30
TABELA 4.4 – ESPECIFICAÇÃO DO ENDURECEDOR 2969 DA HUNTSMAN.	31
TABELA 4.5 – PARÂMETROS DE MOLDAGEM E FINALIDADE DOS COMPÓSITOS OBTIDOS.	44
TABELA 5.1 – PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DOS FLUIDOS EM DIFERENTES TEMPERATURAS.	49
TABELA 5.2 – RESULTADOS DE MASSA ESPECÍFICA E DIÂMETRO MÉDIO DE DIFERENTES FIBRAS VEGETAIS.	52
TABELA 5.3 – RESULTADOS DE $%V_F$ ATRAVÉS DOS MAPAS DE ESPESSURA DE COMPÓSITOS MOLDADOS.	54
TABELA 5.4 – PERMEABILIDADE, TEMPO DE ESTABILIZAÇÃO DA PRESSÃO E TEMPO TOTAL DE PREENCHIMENTO DO MOLDE POR ÓLEO DE SOJA PARA AS INFILTRAÇÕES RETILÍNEAS TRADICIONAIS COM DIFERENTES FRAÇÕES VOLUMÉTRICAS DE FIBRAS E PRESSÕES DE INJEÇÃO.	62
TABELA 5.5 – PERMEABILIDADE, TEMPO DE ESTABILIZAÇÃO DA PRESSÃO E TEMPO TOTAL DE PREENCHIMENTO DO MOLDE PELO ÓLEO DE SOJA PARA INFILTRAÇÕES RADIAIS TRADICIONAIS COM DIFERENTES FRAÇÕES VOLUMÉTRICAS DE FIBRAS E PRESSÕES DE INJEÇÃO.	64
TABELA 5.6 – PERMEABILIDADE DE MANTAS DE VIDRO E SISAL EM FUNÇÃO DO TIPO DE FLUIDO ($%V_F = 20%$, $P_{PRÉ-AJUSTADA} = 0,10$ BAR).	67
TABELA 5.7 – PERMEABILIDADE, TEMPO TOTAL DE PREENCHIMENTO DO MOLDE E VISCOSIDADE DINÂMICA DO ÓLEO PARA AS INFILTRAÇÕES RETILÍNEAS EM MANTA DE FIBRA DE SISAL ($%V_F = 20%$, $P_{PRÉ-AJUSTADA} = 0,10$ BAR).	69
TABELA 5.8 – PERMEABILIDADE E TEMPO DE PREENCHIMENTO PARA DIFERENTES REFORÇOS HOMOGÊNEOS ($P_{PRÉ-AJUSTADA} = 0,10$ BAR).	73
TABELA 5.9 – PERMEABILIDADE DETERMINADA PARA REFORÇOS HÍBRIDOS COM PROMOTORES DE FLUXO.	77
TABELA 5.10 – PERMEABILIDADES MEDIDAS E TEMPOS DE PREENCHIMENTO PARA REFORÇOS FIBROSOS HÍBRIDOS COM $%V_F = 20%$ E $P_{PRÉ-AJUSTADA} = 0,10$ BAR.	79
TABELA 5.11 – ALTURA INICIAL E PRESSÃO DE COMPACTAÇÃO DOS REFORÇOS HÍBRIDOS NA ESPESSURA DE 3,80 MM EM FUNÇÃO DA $%V_F$ TOTAL DE FIBRAS.	85
TABELA 5.12 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS COM REFORÇOS HOMOGÊNEOS COM $%V_F = 20%$ (NÃO-ENVELHECIDOS).	86
TABELA 5.13 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS COM REFORÇOS HÍBRIDOS COM $%V_F = 20%$ (NÃO-ENVELHECIDOS).	88
TABELA 5.14 – MASSA ESPECÍFICA E TEOR DE VAZIOS DE COMPÓSITOS HÍBRIDOS COM $%V_F = 20%$.	88
TABELA 5.15 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS COM REFORÇO HOMOGÊNEO DE FV E REFORÇO HÍBRIDO DE SISAL COM $%V_F = 20%$ (ENVELHECIDOS).	90

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIações

ILSS – *Interlaminar Shear Strength*, MPa

K – Permeabilidade do reforço fibroso, m²

K₀ – Constante de Carman-Kozeny

LCM – *Liquid Composite Molding*

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

P – Camada de núcleo de polipropileno no reforço híbrido

PAN – Poliacrilonitrila

PBO – poli(N,N' alquil bis-(4,4' ftalamido) - 1,3,4-oxidiazole-2,5-diil)

P_{inj} – Pressão de injeção

PMI – Polimetilacrilamida

PP – Polipropileno

PU – Poliuretano

PVC – Policloreto de vinila

r_{ff} – Raio da frente de fluxo do fluido em infiltração radial, m

r_{inj} – Raio da porta de injeção localizada no molde, m

RTM – *Resin Transfer Molding*

S – Camada de sisal no reforço fibroso híbrido

Sisal NT – Sisal lavado em água destilada

Sisal T – Sisal tratado em solução aquosa NaOH 2%

SCRIMP – *Seemann Composite Resin Infusion Molding Process*

SRIM – *Structural Reaction Injection Molding*

t_{ff} – Tempo para que a frente de fluxo do fluido assuma uma determinada posição na cavidade do molde, s

\vec{u} – Vetor velocidade da frente do fluido na cavidade do molde

V – Camada de vidro no reforço híbrido

VARTM – *Vacuum Assisted Resin Transfer Molding*

$\%V_f$ – Fração volumétrica de fibras total, ou teor de fibras total

$\%V_{FV}$ – Fração volumétrica de fibras de vidro

$\%V_{FS}$ – Fração volumétrica de fibras de sisal

$\%V_{PP}$ – Fração volumétrica de núcleo de polipropileno

x_{ff} – Posição da frente de fluxo do fluido na cavidade do molde em infiltração retilínea, m

Símbolos gregos

∇P – Gradiente de pressão na cavidade do molde

ε – Porosidade do reforço fibroso ($\varepsilon = 1 - V_f$)

μ – Viscosidade dinâmica do fluido, cP

ρ_e – Massa específica experimental do material, g/cm³

ρ_t – Massa específica teórica do material, g/cm³

RESUMO

A utilização de fibras vegetais em materiais compósitos tem crescido significativamente nos últimos anos em diferentes aplicações, tendo em vista propriedades como baixa massa específica e alta resistência específica, quando comparadas a fibras sintéticas tradicionais (especialmente vidro), além do requisito de baixa energia para processamento e da vantagem ambiental. O foco principal desse trabalho foi identificar e avaliar o potencial de utilização de fibras vegetais como promotores de fluxo frente a materiais convencionais disponíveis e utilizados em processos de moldagem líquida. Dessa forma, foram realizadas infiltrações retilíneas e radiais, em processos de moldagem por transferência de resina (RTM), de reforços de mantas de fibra de vidro com diferentes frações volumétricas e diferentes pressões de injeção a fim de se verificar tais influências nos cálculos de permeabilidade planar através da Lei de Darcy. Foi avaliada a isotropia de mantas homogêneas de vidro e sisal em infiltrações radiais. Experimentos de infiltração retilínea foram realizados para se determinar a permeabilidade planar em função da utilização do tipo de reforço fibroso, da fração volumétrica ($\%V_f$), do comprimento da fibra, do tipo de fluido impregnante, além de se avaliar o efeito da hibridização de reforços fibrosos e da sequência de empilhamento. A permeabilidade diminuiu com o aumento da $\%V_f$, e a permeabilidade de mantas de sisal foi superior às mantas de fibra de vidro e de não-tecidos de polipropileno (PP) usados como promotores de fluxo. Houve uma leve tendência ao aumento da permeabilidade com o comprimento da fibra de sisal. O uso da manta de sisal como promotor de fluxo contribuiu tanto para o aumento da permeabilidade de reforços híbridos em relação aos constituídos com promotor de fluxo tradicional de PP, quanto para as propriedades mecânicas de compósitos moldados. Mesmo que o percentual de absorção de água tenha sido mais evidente nos compósitos reforçados com fibras de sisal, o envelhecimento não se mostrou muito agressivo as suas propriedades mecânicas. Dessa forma, do ponto de vista de utilização, a fibra de sisal pode ser indicada em aplicações de engenharia como potencial substituta aos promotores de fluxo comerciais empregados em processos de moldagem líquida, tais como RTM light e infusão.

ABSTRACT

The use of natural fibers to reinforce composite materials increased dramatically in the last years. These fibers have many advantages such as light weight and good specific strength compared to synthetic fibers (especially glass fiber), low energy requirements for processing and favorable environmental impact. In this way, the main focus of this work was to identify and evaluate the utilization of vegetable fibers as flow enhancement systems in comparison with traditional ones in composite manufacturing based on liquid molding. This way, rectilinear and radial infiltration experiments have been carried out using glass-fiber mats with different fiber volume content and injection pressure in order to evaluate their influence on in-plane permeability calculation by Darcy's law. Isotropy of homogeneous fiber reinforcements (glass mats and sisal mats) was evaluated through radial infiltration experiments. Other rectilinear experiments were done to determine in-plane permeability as a function of the type of reinforcement, fiber volume ratio, fiber length, type of impregnated fluid, and also to study hybridization of fiber mats and the stacking sequence of mats. Permeability decreased for higher fiber content. For similar fiber volume content, permeability of the sisal mats was much higher than of glass mats and PP non-woven core used as commercial infiltration medium. A slight trend towards higher permeability for sisal fiber of higher length. The use of the sisal mat as a flow medium increased permeability of the hybrid reinforcement in comparison with the PP medium and slightly improved its mechanical behavior. Even though water uptake was higher for the sisal composites, their aging in water was not too detrimental regarding mechanical properties. Hence, the sisal fiber mat might be used in engineering applications as a substitute for commercial flow media, widely used in liquid molding processes, such as RTM light or infusion.

1. INTRODUÇÃO

As técnicas da família da moldagem líquida têm sido cada vez mais empregadas para produzir compósitos poliméricos reforçados de médio a alto desempenho os quais podem ser aplicados, por exemplo, na indústria automotiva ou aeroespacial [1-4]. A moldagem por transferência de resina (RTM), por exemplo, apresenta vantagens sobre outros processos de fabricação, incluindo custo de ferramental baixo, ciclo de produção curto, fabricação de estruturas grandes e complexas com baixo impacto ambiental, além da produção de peças com boa estabilidade dimensional e ambas as superfícies com bom acabamento [4,5].

A moldagem líquida envolve a injeção de uma resina líquida formulada na cavidade de um molde fechado contendo o reforço fibroso seco e a subsequente cura dessa resina, produzindo uma peça rígida [1,2,6]. A impregnação parcial do reforço e a formação de vazios durante o estágio de infiltração estão entre os maiores problemas que levam à fabricação de peças defeituosas [6].

Para uma moldagem bem sucedida é necessário que o ar presente no meio fibroso seja totalmente eliminado durante a infiltração. A fase de infiltração é dependente de alguns parâmetros importantes, tais como a viscosidade do fluido, a pressão de injeção, a porosidade e, principalmente, a permeabilidade do reforço fibroso [7]. A permeabilidade pode ser entendida como uma medida da resistência ao fluxo do fluido no reforço fibroso e varia com a natureza da fibra e a arquitetura da preforma fibrosa, i.e. geometria e orientação das fibras, sendo utilizados modelos de fluxo micro e macroscópico (1-D, 2-D e 3-D) [2,3,6-15] para descrever a impregnação do fluido no reforço fibroso, além de prever/otimizar o tempo de preenchimento do molde, levando a uma redução considerável do ciclo de produção dos compósitos e, conseqüentemente, dos custos associados. Normalmente, os modelos de preenchimento baseiam-se na lei de Darcy e consideram o fluxo de um fluido Newtoniano, para o qual a viscosidade é independente da taxa de cisalhamento e do tempo, e incompressível através de um meio poroso homogêneo.

Certos meios de infiltração têm sido utilizados como promotores de fluxo de resina em algumas técnicas da família da moldagem líquida, como a infusão.

Quando inserido no reforço fibroso estrutural (e.g. fibra de vidro), ou acima deste, este material é capaz de criar canais de fluxo, ajudando a promover mais facilmente o fluxo de resina ao longo do reforço, ou seja, aumentando a permeabilidade do conjunto e diminuindo, conseqüentemente, o tempo de preenchimento da cavidade do molde e o processo em geral. A utilização destes meios de infiltração é importante na produção de componentes relativamente grandes e com alto teor de fibras.

A manta moldável produzida pela empresa Owens Corning é, por exemplo, um produto designado para uso em várias técnicas de transferência de resina em molde fechado, sendo composta de um núcleo de não-tecido sintético costurado entre duas camadas de fibra de vidro picada. Esse núcleo sintético de polipropileno (PP) proporciona um maior fluxo de resina, enquanto as fibras de vidro conferem as propriedades mecânicas ao laminado. A manta moldável, devido à elevada permeabilidade e rapidez na molhabilidade em processos de moldagem por transferência de resina, permite a produção de peças com excelente qualidade com reduzido tempo de processamento, aumentando a produtividade. A combinação do núcleo sintético costurado com a fibra de vidro resulta em um material de reforço com boa conformabilidade em moldes com diferentes geometrias, permitindo alguma variação na espessura da peça dentro da cavidade e mantendo, dessa maneira, o bom fluxo da resina.

Diferentemente do núcleo de PP, as fibras vegetais, encontradas em abundância no Brasil e em outros países do mundo, poderiam assumir esse papel de promotor de fluxo com melhor custo-benefício, quando inserido entre mantas de fibras de vidro e em diferentes gramaturas que visam proporcionar a otimização de preenchimento de moldes, atendendo o requisito mínimo de desempenho mecânico do compósito moldado por transferência de resina para a aplicação final. O tipo de fibra vegetal bem como o seu respectivo comprimento e tratamento superficial são alguns dos fatores relevantes que podem influenciar diretamente no comportamento do fluxo de resina no interior do molde, portanto a escolha de um material natural alternativo passa pela sua caracterização previamente à sua utilização de forma a se obter um compósito moldado que atenda a especificação requerida para determinada aplicação.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é estudar o fluxo de fluidos em diferentes reforços fibrosos - manta de fibras de vidro, manta de fibras vegetais, promotor de fluxo comercial de polipropileno (núcleo de PP), e também híbridos, focando na investigação do potencial de uso de fibras vegetais como promotores de fluxo.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinação da permeabilidade planar de meios porosos homogêneos e híbridos de interesse através do modelo da lei de Darcy, variando:
 - Infiltração (retilínea e radial);
 - Fluido impregnante (óleo de soja, solução de glicerina/água e resina poliéster);
 - Pressão de injeção;
 - Fração volumétrica de fibras total;
 - Fibra vegetal e comprimento da fibra;
 - Sequência de empilhamento de mantas em reforços híbridos.
- Verificação do potencial de aplicação da manta de sisal como promotor de fluxo no interior de mantas de fibra de vidro, comparando-a com um tipo comercial existente no mercado.
 - Avaliação e comparação das propriedades físicas e mecânicas de compósitos híbridos (vidro + sisal e vidro + núcleo de PP);
 - Avaliação da viabilidade técnica para utilização de fibras vegetais incorporadas junto ao reforço fibroso sintético.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. MOLDAGEM LÍQUIDA

A moldagem líquida de compósitos (LCM – *Liquid Composite Molding*) representa uma gama de processos que possibilita a fabricação de componentes complexos e de boa qualidade em material compósito. A característica compartilhada por estes métodos de processamento é a introdução de uma resina líquida termorrígida em um molde fechado através da aplicação de um gradiente de pressão, sendo o reforço fibroso impregnado, com posterior cura da resina e extração da peça do molde [16-20]. A diferença de pressão pode ser criada tanto pela aplicação de vácuo ao molde (infusão a vácuo) quanto por uma fonte externa de pressão (pressão positiva), sendo esta a gravidade ou um vaso de pressão, por exemplo. Há também a aplicação combinada de vácuo e pressão positiva ao molde. Algumas variantes do processo de moldagem líquida de compósitos e suas particularidades podem ser vistas na Figura 3.1.

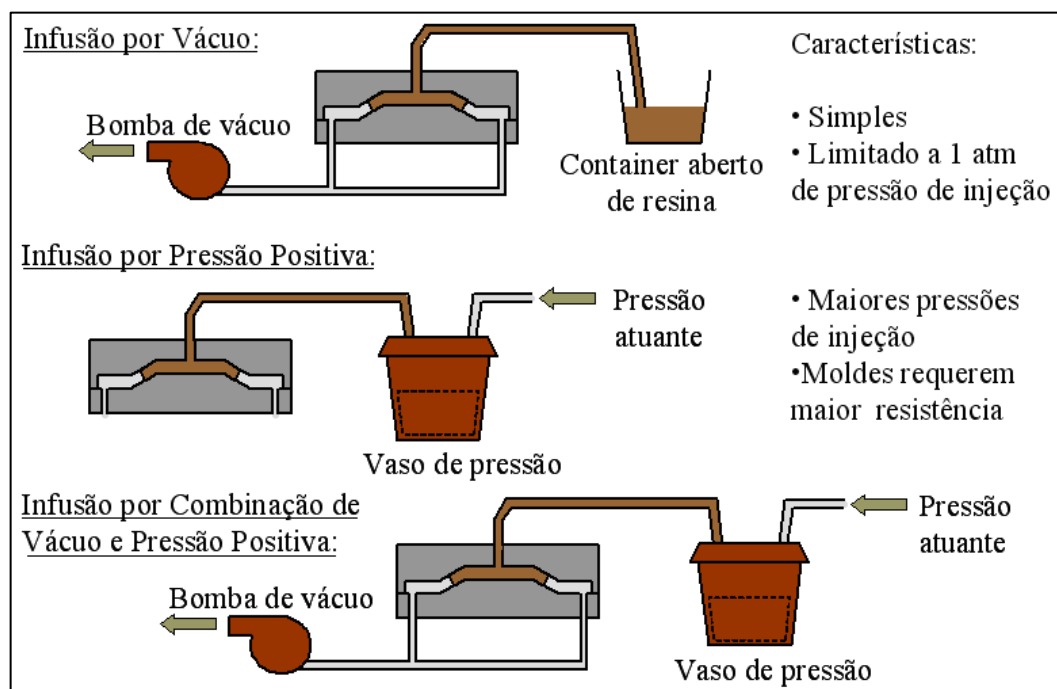


Figura 3.1 – Algumas variantes no processo de moldagem líquida (LCM).

Os processos que pertencem à família da LCM apresentam o potencial de minimizar ou eliminar as dificuldades de fabricação envolvidas no processamento de compósitos, de médio a alto volume, além de serem rotas de processamento com custo aceitável [21]. Algumas vantagens da moldagem líquida sobre outras técnicas incluem: aplicação a uma variada gama de componentes, potencial para incorporação de fibras que são pré-dispostas na orientação necessária de modo a atender as necessidades estruturais de projeto do componente, moldes geralmente de baixo custo que resultam em um menor investimento inicial, sistemas controlados de bombeamento de resina, permitindo um melhor controle da formulação, molde fechado e selado, permitindo ótimo controle de dimensões e bom acabamento superficial, além do controle da emissão de voláteis, que tem importância crescente por questões de segurança e preservação do meio-ambiente.

Dentre os métodos de processamento de moldagem líquida pode-se citar a impregnação por gravidade, a moldagem por injeção e reação estrutural (SRIM), além da moldagem por transferência de resina (RTM) e algumas de suas variantes importantes, como o RTM *light* (tipo de impregnação a vácuo) e a moldagem por transferência de resina auxiliada por vácuo (VARTM). O grande número de variantes é um atrativo da LCM uma vez que o processo pode ser realizado sob medida, focado para uma aplicação particular. Mesmo assim, todas as variantes necessitam de: sistema de entrega de resina, sistema de manuseio da fibra, moldes com fechamento, além de uma estratégia para controle da remoção de ar e fluxo de resina. O grau de sofisticação de cada sistema depende da escala de fabricação, das dimensões da peça e da quantidade de investimento de capital disponível. Protótipos e moldagens simples podem ser feitos por gravidade ou vácuo em moldes de baixa resistência e de baixo custo; por outro lado, altos volumes de produção de compósitos normalmente envolvem moldes de alta resistência (e.g. aço) e de alto custo para equipamentos com injeção de resina [21].

Quanto ao processo RTM, em especial, sua origem é de difícil reconhecimento, porém sabe-se que em 1940, o método Marco, que utilizava vácuo para forçar a impregnação, foi utilizado por fornecedores da marinha americana no desenvolvimento de grandes botes fabricados com reforço de fibra de vidro [21]. Em 1950, o RTM já era utilizado por uma variedade de indústrias como um avanço dos processos manuais, com a vantagem de oferecer duas faces de qualidade no

moldado, operando com baixas pressões. Em 1970, esse processo era utilizado a fim de se produzir peças para o setor marítimo, porém em 1980 houve um desenvolvimento significativo, com a introdução de peças estruturais e semiestruturais de aeronaves, estruturas de automóveis e artefatos para esportes de alto desempenho. Assim, aplicações iniciais no setor marítimo, automotivo (baixo volume) e ferroviário se estenderam para aeroespacial, automotivo (médio volume) e outros setores onde o uso de compósitos não era tão difundido. No Brasil, o RTM começou a ser utilizado como uma alternativa a sistemas de laminação manual e de larga produção, como a moldagem por compressão.

O processo de fabricação de compósitos por RTM [22-24] se baseia na utilização de um reforço fibroso seco com arquitetura definida em termos do tipo, formato e orientação das fibras, o qual é inserido dentro do molde, procedendo-se com o fechamento deste. A resina polimérica formulada de viscosidade relativamente baixa é então injetada sob pressão controlada definida previamente, a fim de se evitar a movimentação do reforço fibroso, através de uma ou mais portas de injeção (*inlets*) dispostas ao longo da cavidade do molde. Durante esse período de tempo, denominado tempo de infiltração, a resina flui através do reforço fibroso contido no molde, impregnando-o. O ar contido no interior do molde e do reforço é expelido, sendo forçado a deixar o molde através de portas de saída ou portas de ventilação (*outlets* ou *air vents*) que usualmente estão posicionadas estrategicamente em regiões opostas à injeção. Se necessário, o molde pode ser submetido a aquecimento para que o processo de cura da resina seja acelerado, e, enfim, a peça produzida possa ser removida do mesmo. Como neste processo os moldes são fechados, ambas as superfícies da peça desmoldada tendem a apresentar bom acabamento. Um esquema simplificado do processo pode ser visto na Figura 3.2.

O RTM apresenta muitas vantagens por ser um processo versátil, capaz de produzir eficientemente compósitos de geometrias diversas e complexas, consolidando peças que alcançam elevado desempenho estrutural. Além disso, é possível incorporar um alto teor de reforço e atingir um baixo teor de vazios no compósito. O processo é capaz de suprir tanto demandas da indústria automotiva, na qual o médio-alto volume de produção (500-50.000 peças/ano) deve estar aliado ao baixo custo, quanto demandas da indústria aeroespacial, com baixo volume de

produção (50-5.000 partes/ano) aliado a elevado desempenho. O RTM é considerado bastante útil na fabricação de compósitos de grande área superficial e de elevada qualidade, geralmente com auxílio de vácuo para compactação do reforço e fechamento do molde.

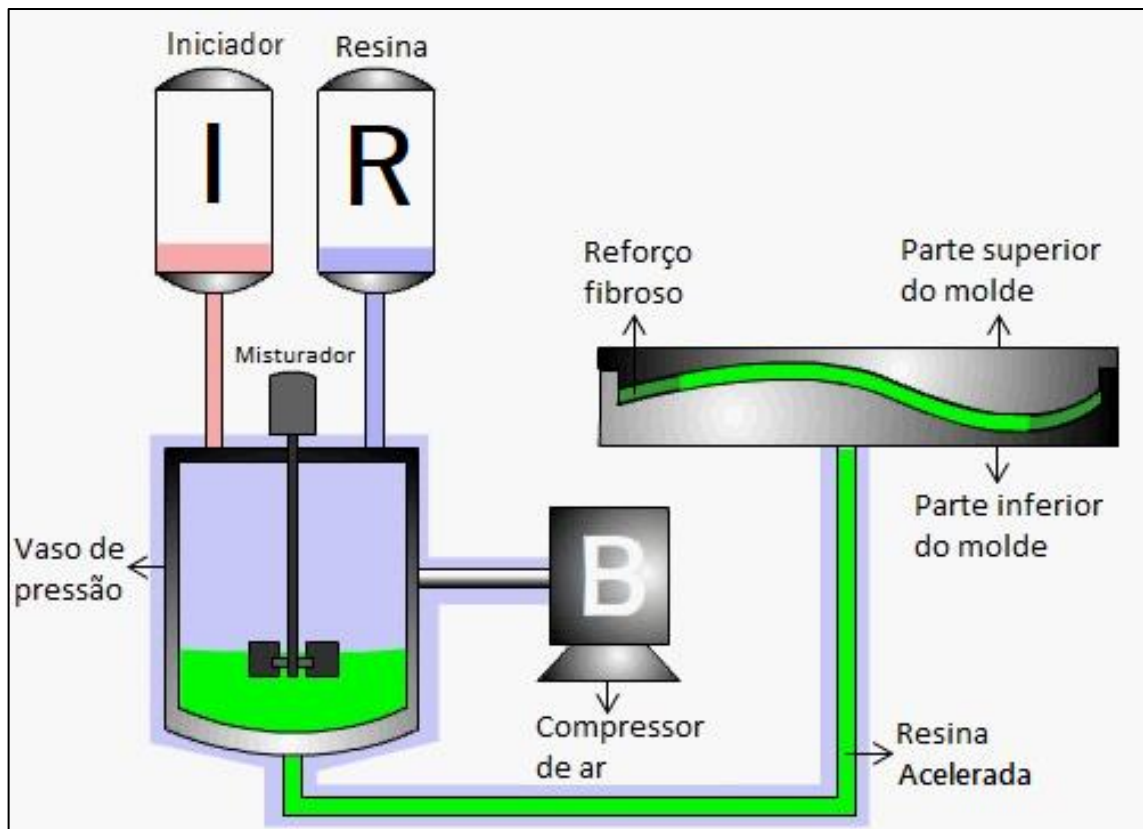


Figura 3.2 – Esquema simplificado do processo de moldagem por RTM.

Um aspecto-chave da moldagem bem sucedida é a completa impregnação do reforço fibroso sem deixar traços secos na cavidade, removendo todo o ar do molde que se faz presente entre os feixes de fibras e dentro destes. As principais fontes de poros resultantes nesse tipo de processamento são os vazios mesoscópicos, devido à coalescência de frentes de fluxo mais desenvolvidas nas extremidades do molde (*race tracking*), à presença de umidade, à emissão de voláteis pela resina, ou pelo aprisionamento de ar dentro ou ao redor dos feixes de fibras. A Figura 3.3, por exemplo, apresenta o mecanismo de formação de vazios

devido às frentes de fluxo que competem entre si dentro do feixe e entre os feixes de fibras.

No RTM *light* [25-28], a parte superior do molde é considerada semirrígida, deformável visto que é normalmente feita de um compósito polimérico de baixo teor de fibras. Um promotor de fluxo pode ser inserido no reforço fibroso, e este é compactado pela aplicação do vácuo no centro do molde, auxiliando também no seu fechamento. O vácuo força a impregnação da resina através do reforço, que ocorre preferencialmente na periferia, convergindo para o centro da peça, e é interrompido quando a mesma alcança a porta de saída do molde, sendo a peça desmoldada após a reação de cura.

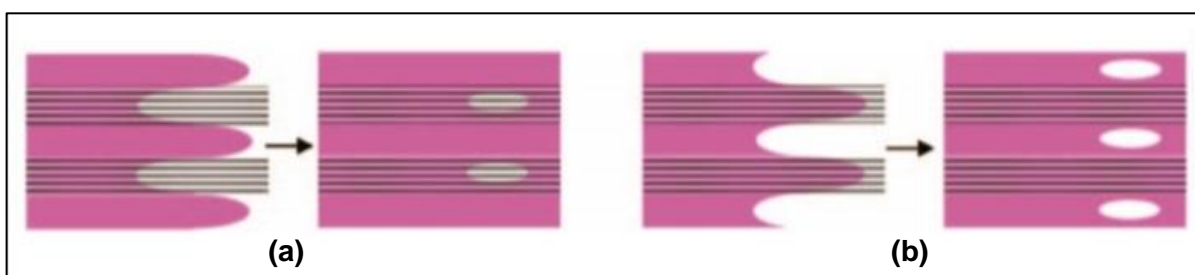


Figura 3.3 – Mecanismo de formação de vazios em reforço fibroso do tipo tecido: entre feixes (a), dentro dos feixes (b) [17].

A moldagem por VARTM [25-28] é uma técnica amplamente empregada para a fabricação de compósitos de grandes dimensões. Neste processo, não há um molde rígido na parte superior. A preforma fibrosa é colocada sobre o molde inferior, que é coberto por uma camada mais permeável conhecida como promotor de fluxo, responsável pelo aumento da eficiência da impregnação do reforço fibroso ao longo do plano principal da peça. O molde é então selado com uma bolsa plástica (*vacuum bag*). O vácuo aplicado nas extremidades da bolsa compacta a preforma fibrosa e puxa a resina através do promotor de fluxo. Uma vez que a resina alcança as portas de saída, a injeção é interrompida, entretanto o vácuo é normalmente mantido até a cura da peça para evitar a formação de vazios no moldado. A Figura 3.4 mostra uma comparação esquemática das principais variantes da moldagem líquida: RTM, VARTM e RTM *light*.

Informações importantes no processo de infiltração por RTM [23,24], como padrão de fluxo e distribuição de pressão apresentam um papel fundamental no projeto do molde e no posicionamento apropriado das portas de ventilação para o controle de qualidade dos compósitos produzidos. Esses parâmetros dependem de variáveis como geometria da peça, arquitetura da preforma fibrosa, posição das portas de injeção, pressão de injeção, além da reação de cura da resina, e a consequente mudança de viscosidade, e podem influenciar decisivamente no tempo total de ciclo de produção e nas propriedades finais dos compósitos moldados.

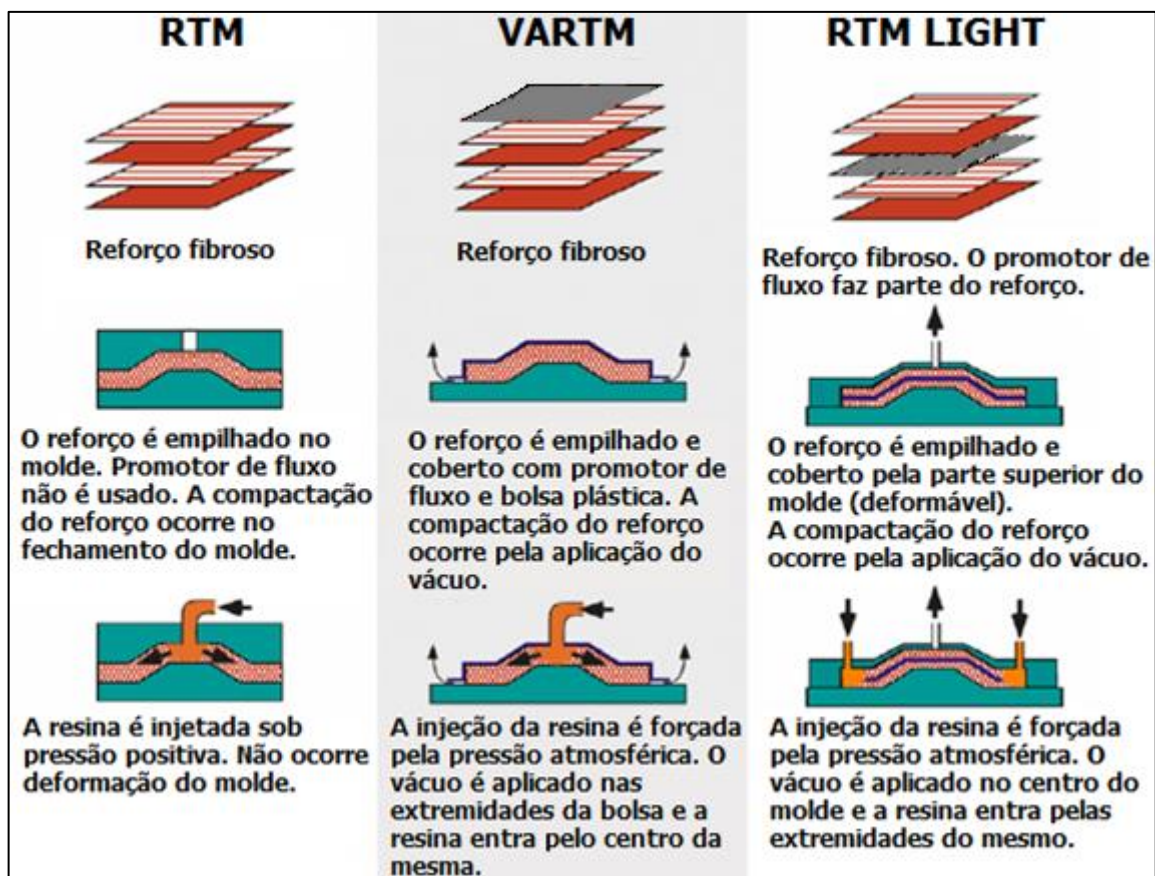


Figura 3.4 – Comparação esquemática de algumas variantes do processo de moldagem líquida de compósitos [25].

Assim, a qualidade de peças moldadas por RTM e a eficiência do processo dependem do estágio de preenchimento do molde, e padrões de fluxo inapropriados podem levar a indesejáveis efeitos adversos, como, por exemplo, formação de partes secas ou não impregnadas pela resina, observação de longos tempos de

preenchimento, utilização de altas pressões de moldagem, deformação do molde e perturbação ou deslocamento do reforço fibroso. O comportamento do fluxo do fluido é amplamente afetado pela permeabilidade do reforço fibroso inserido no interior do molde [24] e muitos estudos têm sido realizados para investigar este parâmetro.

3.2. PERMEABILIDADE

A crescente utilização da moldagem por RTM para a fabricação de materiais compósitos de alto desempenho tem despertado um grande interesse no estudo de modelos de fluxo desse processo. Prever o fluxo do fluido ao longo da cavidade do molde, determinar a pressão requerida para uma completa e rápida impregnação do reforço, além do posicionamento estratégico das portas de entrada e saída de resina no molde são desafios importantes para produzir peças com geometrias complexas e ausências de defeitos.

A permeabilidade é uma propriedade fundamental que indica a relativa facilidade com que o fluido impregna os poros de uma preforma fibrosa, sendo normalmente estudada por infiltrações RTM/VARTM. Essa propriedade depende da arquitetura do reforço fibroso, sua porosidade, propriedades do fluido impregnante, condições de processamento. As propriedades do fluido impregnante que influenciam na infiltração são viscosidade, tensão superficial e ângulo de contato. As condições de processamento, tais como pressão de injeção, vazão de fluxo e temperatura também impactam na permeabilidade [3,18].

Existem técnicas [18,29] para medição de permeabilidade 1-D, quando o fluxo é linear ou retilíneo (direção principal no plano do molde), experimento no qual a resina é injetada em uma porta de injeção localizada na extremidade da preforma fibrosa. Técnicas 2-D estão disponíveis, quando a permeabilidade pode ser mensurada simultaneamente em duas direções do molde (x e y), sendo a resina injetada em uma porta central do molde, como é o caso das infiltrações radiais. Há também a infiltração na direção da espessura do reforço, para preformas fibrosas espessas, permitindo-se observar a frente de fluxo do fluido na direção transversal.

Modelos de fluxo no processo de RTM têm sido utilizados para caracterizar a impregnação do fluido no reforço fibroso [6,7,9,13]. Algumas variáveis do processo, como a pressão de injeção e a fração volumétrica de fibras total, por exemplo, são utilizadas diretamente nesses modelos que governam a frente de fluxo do fluido em meios porosos constituídos por fibras, de qualquer origem, a fim de se determinar a permeabilidade. Reforços fibrosos altamente compactados e variação da viscosidade da resina ao longo da infiltração são alguns dos fatores que dificultam a estimativa dessa importante propriedade em processos de moldagem líquida.

Simulações em moldagem líquida, que são baseadas em modelos de fluxo do fluido, podem incluir todas as etapas do processo, tais como o aquecimento do molde e das fibras, a injeção da resina bem como a cura desta. Através desses modelos, pode-se otimizar as características do molde, minimizar a formação de vazios, além de estimar e reduzir os tempos de injeção. Na maioria dos casos, o fluxo é linear (1-D) ou planar (2-D) devido à baixa espessura da peça. Entretanto, efeitos em fluxos 3-D podem ser considerados importantes para algumas configurações.

Uma vez que os reforços usados no RTM são secos e a preforma fibrosa é impregnada progressivamente com o tempo, o estágio de preenchimento é considerado um processo de fluxo insaturado [17]. Sendo assim é possível distinguir duas regiões durante a impregnação da resina: a região impregnada (saturada) e a região seca (insaturada) a ser posteriormente impregnada [30]. O fluxo de fluido na moldagem progride através do reforço fibroso em duas escalas: um movimento global da resina nos mesoporos e, simultaneamente, a impregnação dos microporos dentro dos feixes (entre os filamentos) [4]. Sob condições normais de processo RTM, a frente nos mesoporos (fluxo mesoscópico) se move de forma avançada em relação à frente do microporo (fluxo microscópico). Um diagrama esquemático do fluxo da resina pode ser visto na Figura 3.5.

A maioria dos modelos se concentra no fluxo mesoscópico [8,9,31] quando descreve o movimento global da frente de fluxo do fluido, não levando em conta a presença de feixes individuais do reforço fibroso ou dos canais presentes nos feixes. Esta aproximação é extremamente útil quando se trabalha, por exemplo, com permeabilidade de mantas com fibras curtas distribuídas aleatoriamente visto que

estas não possuem canais bem definidos. Porém, mesmo os tecidos, que têm propriedades direcionais definidas, têm sido modelados com esta aproximação. Outros modelos consideram também o fluxo microscópico [8,11], que tende a se atrasar em relação ao macroscópico devido à atuação da força viscosa e da tensão superficial do fluido ao longo do feixe da fibra [16], tornando complexas as soluções numéricas.

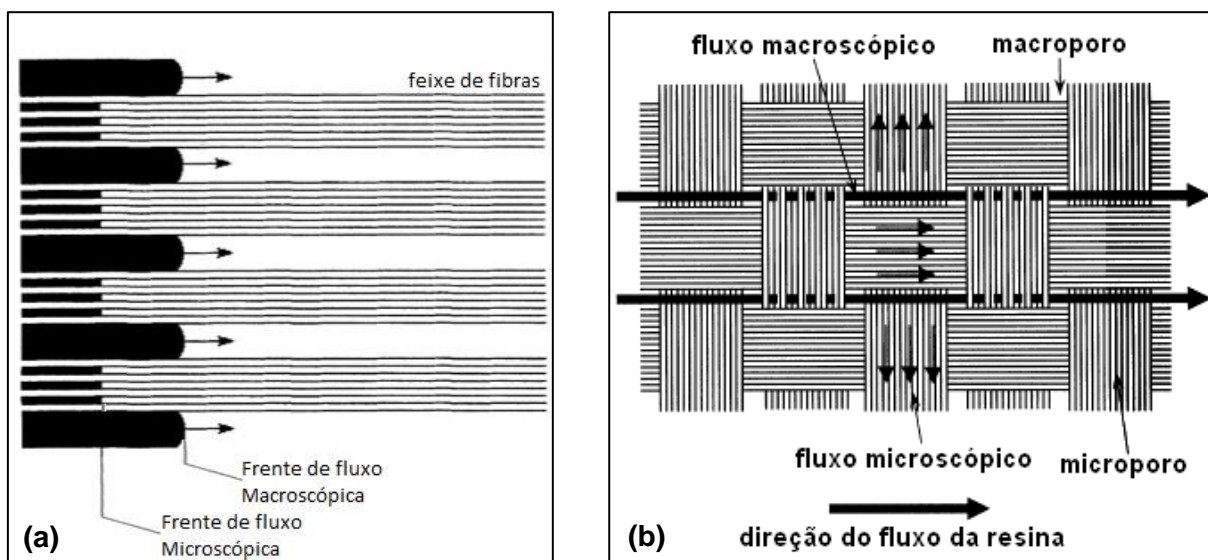


Figura 3.5 – Representação esquemática do fluxo de resina líquida através de um tecido fibroso unidirecional (a) e bidirecional (b) [4].

As resinas utilizadas no RTM são fluidos poliméricos viscosos. Uma consideração comum nos modelos de fluxo é assumir que o fluido é Newtoniano nas pressões e taxas de cisalhamento presentes, além de ser descrito como incompressível [3,14,30,32]. A viscosidade da resina é uma característica fundamental do fluido para o processo de RTM. Como o tempo de injeção é limitado e os reforços fibrosos normalmente possuem baixa permeabilidade, se a viscosidade da resina é alta, a pressão de injeção deverá ser alta, e com isso poderá ocorrer arraste de fibras (*fiber washing*). Por outro lado, se a viscosidade da resina é muito baixa, existe um risco do molde ter o seu volume preenchido, porém com impregnação parcial no interior do reforço fibroso. É possível processar resinas com viscosidade superior a 1000 cP, entretanto, na prática, as resinas para o RTM apresentam viscosidade inferior a 500 cP, sendo entre 100 e 200 cP a faixa ideal de viscosidade para o processo [33].

No processo RTM e afins, a equação geralmente aceita para descrever o fluxo macroscópico de um fluido Newtoniano em um meio poroso fibroso devido à aplicação de um gradiente de pressão é a Lei de Darcy [3,4,7-9,12,13,28], dada pela Equação (3.1):

$$\vec{u} = -\frac{1}{\mu} [K] \cdot \nabla P \quad (3.1)$$

A Lei de Darcy estabelece que a velocidade do fluido através do meio fibroso (\vec{u}) é proporcional ao gradiente de pressão (∇P) e inversamente proporcional à viscosidade do fluido (μ). O coeficiente de proporcionalidade é conhecido como permeabilidade (K), que deve ser calculada [34]. A permeabilidade está relacionada à porosidade (ε), que é definida como a relação entre o volume total de poros abertos e o volume da cavidade interna do molde. Assim, a porosidade está relacionada com a fração volumétrica de fibras (V_f), sendo $\varepsilon = 1 - V_f$. Idealmente, todo este volume de poros disponível deve ser ocupado por resina após a impregnação do reforço, deslocando o ar inicialmente presente neste.

Expandindo-se a Equação (3.1) para sua forma cartesiana 3-D [10,34], obtém-se a Equação (3.2):

$$\begin{pmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{pmatrix} = -\frac{1}{\mu} \begin{pmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \partial P / \partial x \\ \partial P / \partial y \\ \partial P / \partial z \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

Para um fluxo planar, caso a espessura da cavidade do molde seja muito menor que as dimensões do plano, a Equação (3.2) pode ser reduzida à Equação (3.3):

$$\begin{pmatrix} u_x \\ u_y \end{pmatrix} = -\frac{1}{\mu} \begin{pmatrix} K_{xx} & K_{xy} \\ K_{yx} & K_{yy} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \partial P / \partial x \\ \partial P / \partial y \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

Os dois métodos mais utilizados para a caracterização do fluxo do fluido através do reforço fibroso são o de fluxo unidirecional ou retilíneo (Figura 3.6a), e o

de fluxo radial (Figura 3.6b) [10]. A infiltração retilínea permite estimar a permeabilidade apenas na direção do fluxo e leva em consideração dados de fluxo insaturado a serem comparados com dados de fluxo saturado, sendo possível compreender diferenças que podem ocorrer durante as moldagens. A infiltração radial permite determinar ambos os componentes principais do tensor permeabilidade no plano. Nesse tipo de infiltração, consegue-se também eliminar os efeitos de extremidade (*edge effects*) que influenciam negativamente a determinação da permeabilidade pelo método do fluxo retilíneo.

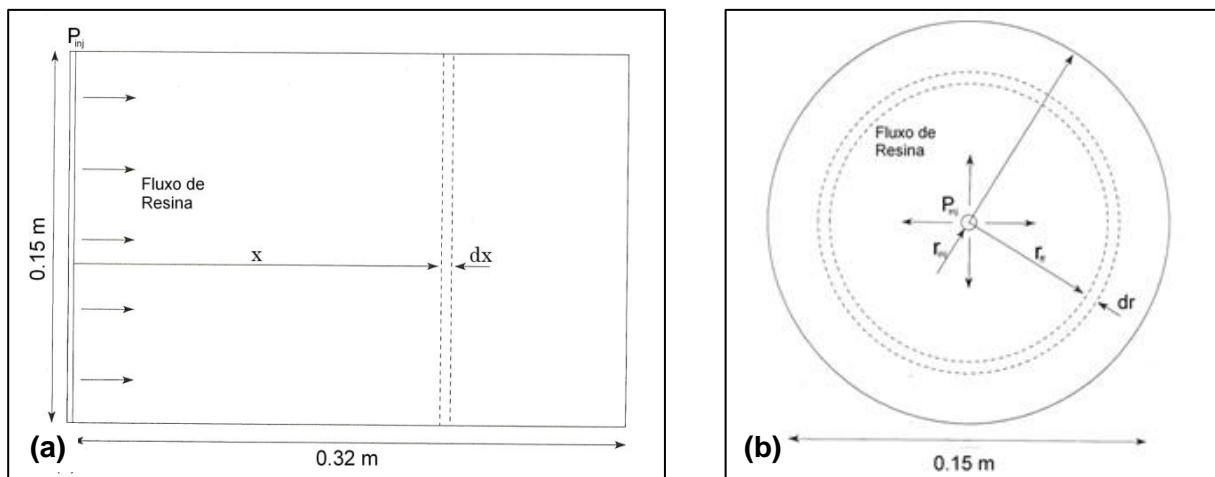


Figura 3.6 – Configurações do molde para fluxo retilíneo (a), e radial (b) [21].

Na infiltração retilínea com pressão de injeção (P_{inj}) constante, o tempo (t_{ff}) requerido para a frente de fluxo do fluido alcançar uma posição (x_{ff}) particular dentro do molde pode ser obtido pela Equação (3.4), onde μ é a viscosidade dinâmica do fluido.

$$t_{ff} = \frac{\varepsilon \cdot \mu}{2 \cdot K \cdot P_{inj}} \cdot x_{ff}^2 \quad (3.4)$$

Na infiltração radial, o tempo requerido para a frente do fluxo do fluido, que passa por uma porta de injeção com raio r_{inj} , preencher uma região de raio r_{ff} dentro do molde é dado pela Equação (3.5), que pode ser aplicada até que a frente do fluxo alcance alguma parede do molde. Assim, curvas de posição da frente de fluxo do

fluido vs. tempo permitem a estimativa da permeabilidade do reforço fibroso, que é dada pela declividade da reta.

$$t_{ff} = \frac{\varepsilon \cdot \mu}{2 \cdot K \cdot P_{inj}} \cdot r_{ff}^2 \cdot \left(\ln \left(\frac{r_{ff}}{r_{inj}} \right) - \frac{1}{2} \cdot (r_{ff}^2 - r_{inj}^2) \right) \quad (3.5)$$

O modelo empírico de Carman-Kozeny constitui-se em um segundo método utilizado para estimar a permeabilidade [3,14]. A equação de Carman-Kozeny se ajusta bem para meios porosos isotrópicos e para casos de fluxo 1-D, sendo originada a partir do fluxo laminar através de tubos capilares que é descrito pela equação de Hagen-Poiseuille [16]. A permeabilidade determinada por Carman-Kozeny é dada pela Equação (3.6), a qual depende do diâmetro médio da fibra (D_f), da fração volumétrica de fibras (V_f) e da constante Carman-Kozeny (K_0) que leva em conta a uniformidade, tortuosidade, geometria e orientação do reforço empacotado.

$$K = \frac{D_f^2}{16 \cdot K_0} \cdot \frac{(1 - V_f)^3}{V_f^2} \quad (3.6)$$

3.3. PROMOTORES DE FLUXO

Estudos de resinas termorrígidas para fabricação de compósitos por VARTM ou RTM *light* têm sido realizados visando aperfeiçoar o processo de infiltração, ou seja, para que ocorra a completa impregnação do reforço no menor tempo possível. A eficiência do processo está relacionada com a formulação da resina, pois pode-se promover a redução de sua viscosidade para aumentar a velocidade de infiltração do reforço. No entanto, uma impregnação muito rápida pode ocasionar problemas de preenchimento do reforço. Por isso, a velocidade de infiltração deve ser equilibrada com a reatividade e a cinética da cura da resina. A tentativa de balancear baixa viscosidade com tempo de gel curto pode levar à produção de peças defeituosas, por exemplo, devido à exotermia da reação de cura da resina.

Uma outra alternativa importante para aumentar a produtividade envolve o uso de promotores de fluxo (meios porosos de alta permeabilidade) nos reforços

fibrosos tradicionais, aumentando a permeabilidade macroscópica global do meio. Promotores de fluxo são materiais desenvolvidos com a finalidade básica de maximizar a eficiência da impregnação de reforços fibrosos, particularmente em altos teores de fibra visto que a permeabilidade do reforço é relativamente baixa nessas situações. Os promotores de fluxo, de geometria variada, usualmente criam canais para permitir o fluxo de resina e a fuga de gases. Outros são capazes de auxiliar na impregnação por apresentarem maior molhabilidade com a resina líquida.

Devido à baixa pressão de injeção usada (normalmente menor que 1 atm para RTM *light*), o promotor de fluxo é frequentemente incorporado ao reforço como uma camada de alta permeabilidade que contém “caminhos livres” de baixa resistência para o fluxo da resina. Se por um lado a utilização da camada de alta permeabilidade pode ajudar no processamento, por outro pode prejudicar as propriedades mecânicas do compósito moldado, pois, muitas vezes, as fibras que constituem essa camada não apresentam as propriedades ou a configuração geométrica desejada (i.e. alta razão de aspecto).

Na moldagem por VARTM, o promotor de fluxo é colocado normalmente na superfície da preforma fibrosa. A primeira utilização deste meio poroso de alta permeabilidade adjacente à preforma fibrosa foi patenteada [35-37] e ficou conhecida como SCRIMP (*Seemann composite resin infusion molding process*) [38]. Durante a infusão, a resina flui preferencialmente ao longo da superfície e simultaneamente através da espessura da preforma, permitindo que grandes componentes sejam fabricados [38-41].

Os promotores de fluxo, quando posicionados estrategicamente, ajudam a distribuir resina ao longo da peça a fim de evitar áreas secas ou mal impregnadas. Alguns podem ser removidos e outros podem permanecer como parte do reforço, conferindo propriedades adicionais ao compósito moldado. A escolha do material dependerá do tipo de processo e da aplicação do componente moldado. Exemplos destes materiais são: não-tecido de polipropileno, espuma expandida, *honeycomb*, tecido de nylon, entre outros.

O reforço amplamente utilizado na indústria automotiva é aquele constituído de um núcleo de não-tecido sintético (e.g. polipropileno) costurado com fio de

poliéster ou poliamida entre duas mantas de fibra de vidro. O núcleo sintético proporciona um fluxo de resina superior, enquanto as fibras de vidro conferem as propriedades mecânicas necessárias ao componente moldado.

Núcleos de espuma expandida apresentam-se como espuma de célula-fechada e que possui eficiência similar ao *honeycomb*, conferindo rigidez e leveza ao compósito. O tipo de espuma é selecionado conforme a aplicação desejada. A espuma de poliuretano (PU), por exemplo, é muito utilizada em componentes industriais, produtos esportivos e estofamento de aeronaves. A espuma linear de policloreto de vinila (PVC) é amplamente empregada em compósitos para cascos de botes de alto desempenho devido a sua habilidade de absorver impacto de ondas. A espuma de polimetilacrilamida (PMI) pode ser selecionada para uso em aplicações aeroespaciais. Outros tipos podem ainda conferir estabilidade dimensional, resistência a altas temperaturas (e.g. 400 °C), resistência a solventes, entre outras propriedades.

O núcleo de *honeycomb* é um promotor de fluxo normalmente utilizado na indústria aeroespacial, e apresenta vantagens em relação a outros promotores incluindo: ampla gama de aplicações, alta resistência ao cisalhamento e à compressão do *honeycomb* Nomex[®], além da boa resistência química e ao fogo. Porém, para seu uso, as células do *honeycomb* devem ser seladas para evitar o seu preenchimento pela resina. Isto é feito através do preenchimento das células com espuma ou do seu recobrimento com um filme impermeável à resina líquida.

Heider *et al.* [41] verificaram, no processo VARTM, que os reforços com promotores de fluxo na superfície apresentaram maiores tempos de infusão, limitando a utilização de resinas com tempos de gel mais longos. Por outro lado, nos reforços com promotores de fluxo inseridos entre as camadas de tecidos, a permeabilidade foi aumentada, reduzindo consideravelmente o tempo de processamento e a espessura aparente da preforma.

Hsiao *et al.* [42] relataram que o tempo de preenchimento diminuiu e a velocidade do fluxo aumentou quando a espessura do promotor de fluxo foi aumentada em relação à preforma. Verificaram também que a porosidade do promotor de fluxo não afetou o tempo de preenchimento e a velocidade do fluxo

significativamente. A velocidade da frente de fluxo foi mais sensível à permeabilidade do promotor de fluxo que da preforma fibrosa propriamente dita.

3.4. REFORÇOS FIBROSOS PARA COMPÓSITOS

Os reforços para compósitos podem apresentar-se na forma de fibras contínuas, descontínuas e na forma de partículas. Os tecidos (constituídos de fibras contínuas tramadas) e as mantas (constituídos de fibras picadas distribuídas aleatoriamente) são os reforços mais utilizados no processo de RTM *Light*. A seleção de um reforço depende de fatores como a magnitude das propriedades mecânicas e as características de processamento, dentre elas a permeabilidade e a molhabilidade do reforço.

O tipo de fibra (natural ou sintética) a ser usada depende de fatores relacionados à aplicação pretendida. Fibras de vidro, em particular as do tipo E, são as mais utilizadas em aplicações automotivas devido ao baixo custo relativamente associado. Aplicações de alto desempenho incluem componentes para a indústria aeroespacial que, frequentemente, utilizam fibras de carbono, sendo o elevado custo justificado pelas propriedades mecânicas diferenciadas. Dentre as fibras poliméricas mais utilizadas, destaca-se a aramida. Ultimamente, a utilização de fibras vegetais (e.g. sisal, curauá, coco, cânhamo, juta e rami) em compósitos tem crescido bastante, mesmo apresentando propriedades mecânicas inferiores às fibras sintéticas.

3.4.1. Fibras sintéticas

O tipo de fibra mais utilizado em compósitos com matriz polimérica é a de vidro, devido principalmente ao seu baixo custo, alta resistência à tração e grande inércia química. As desvantagens dessa fibra estão relacionadas ao seu baixo módulo de elasticidade, elevada massa específica, auto-abrasividade e à baixa resistência à fadiga quando agregada a compósitos. As fibras de vidro são isotrópicas, portanto, o módulo de elasticidade é o mesmo nas direções axial e

transversal em relação ao eixo principal. As fibras de vidro são produzidas como filamentos contínuos, que posteriormente podem ser picados.

A composição do vidro pode influenciar significativamente as propriedades da fibra obtida. As fibras de vidro do tipo S, por exemplo, são de difícil estiramento devido à estreita faixa de temperatura para formação do filamento e, portanto, apresentam maior custo. Embora as fibras de vidro do tipo E tenham desempenho satisfatório em ambientes aquosos neutros, tornam-se suscetíveis à degradação em ambientes ácidos e alcalinos. Por esta razão, fibras do tipo C, utilizadas na forma de véu para barreiras químicas em equipamentos e reservatórios químicos, e fibras do tipo AR para reforço de cimento, têm encontrado crescente utilização. As fibras AR contém ZrO_2 e Na_2O que conferem resistência à corrosão proveniente da alcalinidade do cimento.

No início da década de 60, teve início a produção comercial de fibras de carbono, especialmente para aplicação na indústria aeroespacial, em estruturas de baixo peso e alta resistência. Alguns precursores podem ser utilizados para produzir fibras de carbono, conferindo diferentes morfologias e características específicas, sendo os mais comuns a poliácridonitrila (PAN), as fibras de celulose (viscose *rayon*, algodão) e piche de petróleo. A lignina, um material orgânico natural, tem sido estudada como possível candidata para a produção das fibras [43], podendo ter um custo mais vantajoso quando comparado com os demais precursores comerciais. Como em qualquer outro processo de obtenção de fibras, as propriedades finais são influenciadas pelas matérias-primas, pelo processo de produção e pelas condições utilizadas para formação da fibra precursora.

As fibras poliméricas têm alcançado significativa importância como reforço de compósitos. Entre estas, as fibras de aramida (poliamida aromática) e de polietileno de ultra alto peso molecular têm se mostrado de grande utilidade para reforço. As fibras poliméricas sintéticas diferem da produção de fibras inorgânicas, devido à natureza unidimensional das cadeias poliméricas. Dessa forma, para produzir fibras resistentes e rígidas, as cadeias do polímero devem ser estiradas e orientadas longitudinalmente à fibra, de forma que após esses processos existam fortes ligações covalentes interatômicas direcionadas ao longo da cadeia polimérica. Polímeros que exibem uma fase cristalina podem ser submetidos à fiação de tal

forma que as moléculas em forma de fibrilas sejam orientadas uniaxialmente após a saída do equipamento de fabricação da fibra. Para polímeros nos quais as cadeias são enoveladas e têm orientação aleatória (polímeros amorfos), as cadeias são submetidas ao estiramento após a fiação.

Outros polímeros podem ser obtidos na forma de fibras para reforço, como, por exemplo, o poli(N,N' alquil bis-(4,4' ftalamido) - 1,3,4-oxidiazole-2,5-diil), um copoliéster aromático conhecido como fibra de PBO. Uma característica marcante desta fibra é a alta estabilidade térmica e resistência à chama, podendo atingir temperatura máxima de uso por volta de 650 °C. As fibras de poliimida também podem ser usadas como reforços de compósitos, podendo ser aplicadas em temperaturas que superam 300 °C.

Shin *et al.* [7] determinaram a permeabilidade planar em infiltrações radiais de mantas de fibra de vidro com diferentes teores de fibra utilizando óleo de silicone como fluido de impregnação e verificaram $K = 7,5 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ (para $\%V_f = 42\%$) e $K = 6,9 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ (para $\%V_f = 56\%$). Luo *et al.* [12] determinaram que a permeabilidade planar de um tecido tricotado (700 g/m^2) variou entre $14,6 \times 10^{-10}$ e $1,87 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ para $\%V_f$ entre 19–40%, utilizando óleo de silicone como fluido de impregnação à temperatura ambiente. Já para um tecido plano (420 g/m^2), para uma faixa de $\%V_f$ entre 43 e 53% a permeabilidade variou entre $4,73 \times 10^{-10}$ e $0,75 \times 10^{-10} \text{ m}^2$.

3.4.2. Fibras vegetais

A utilização de fibras naturais de origem vegetal em compósitos envolve aspectos ambientais, sociais e econômicos. A busca por matérias-primas renováveis e de baixo custo tem sido importante para a pesquisa de compósitos reforçados com estas fibras. Devido às condições climáticas extremamente favoráveis à agricultura, o Brasil está entre os maiores produtores de fibras vegetais, apresentando importância para o desenvolvimento socioeconômico do país.

A baixa massa específica, renovabilidade, reciclabilidade e biodegradabilidade são algumas das vantagens das fibras vegetais. Por outro lado, algumas desvantagens que limitam seu uso incluem: processamento em baixas temperaturas

devido à baixa estabilidade térmica, sensibilidade a efeitos ambientais (variações de umidade e temperatura) e heterogeneidade dentro de um mesmo lote. Mesmo assim, os compósitos reforçados com fibras vegetais ou híbridos (fibras de vidro e fibras vegetais) podem ser uma alternativa viável em relação àqueles que usam unicamente as fibras de vidro, porque as fibras vegetais podem conferir boas propriedades mecânicas específicas e características de isolamento térmico e acústico.

Fibras vegetais são classificadas de acordo com a sua origem e podem ser agrupadas em fibras de sementes (algodão), fibras de entrecasca (juta, linho, cânhamo), fibras de folhas (banana, sisal, curauá) e fibras de frutas (coco) [44].

Compósitos de matriz poliéster reforçados por fibras vegetais têm sido estudados [45-50] devido às boas propriedades mecânicas desses materiais e às vantagens associadas a essas fibras. Kiran *et al.* [51] investigaram a influência do comprimento e da fração mássica de fibra nas propriedades mecânicas de compósitos de resina poliéster reforçados com fibras vegetais de sisal, cânhamo e banana. Rouison *et al.* [52] utilizaram um modelo baseado na equação de condução de calor unidimensional para prever o perfil de temperatura no molde de RTM durante a cura da resina poliéster e otimizar o tempo de processamento de compósitos de poliéster/cânhamo para que estes não apresentassem defeitos perceptíveis. Laranjeira *et al.* [53] avaliaram a resistência à tração e ao impacto de compósitos poliéster/juta moldados por compressão em função do teor e orientação da fibras.

Compósitos constituídos de fibras vegetais têm sido utilizados em larga escala na indústria automotiva. Podem ser aplicados tanto em peças de pequenas dimensões, como botões do painel de carros, maçanetas, dobradiças de quebra-sol, como de grandes dimensões, e.g. parte interna das portas e tampa do compartimento de bagagem de alguns modelos de carros [54].

A composição química e a estrutura da célula de fibras vegetais são bem complexas. Cada fibra é essencialmente um compósito no qual as microfibrilas rígidas de celulose são incorporadas em uma matriz de lignina e hemicelulose [55,56], como mostrado esquematicamente na Figura 3.7, indicando que a parede

secundária nível 2 responde por cerca de 80% da espessura total da fibra. Além disso, as microfibrilas são helicoidalmente enroladas ao longo do eixo das fibras, formando células ocas. Desenrolar essas fibrilas consome grande quantidade de energia e trata-se como um modo de falha predominante. A composição rica em celulose e hemicelulose tornam as fibras vegetais altamente hidrofílicas.

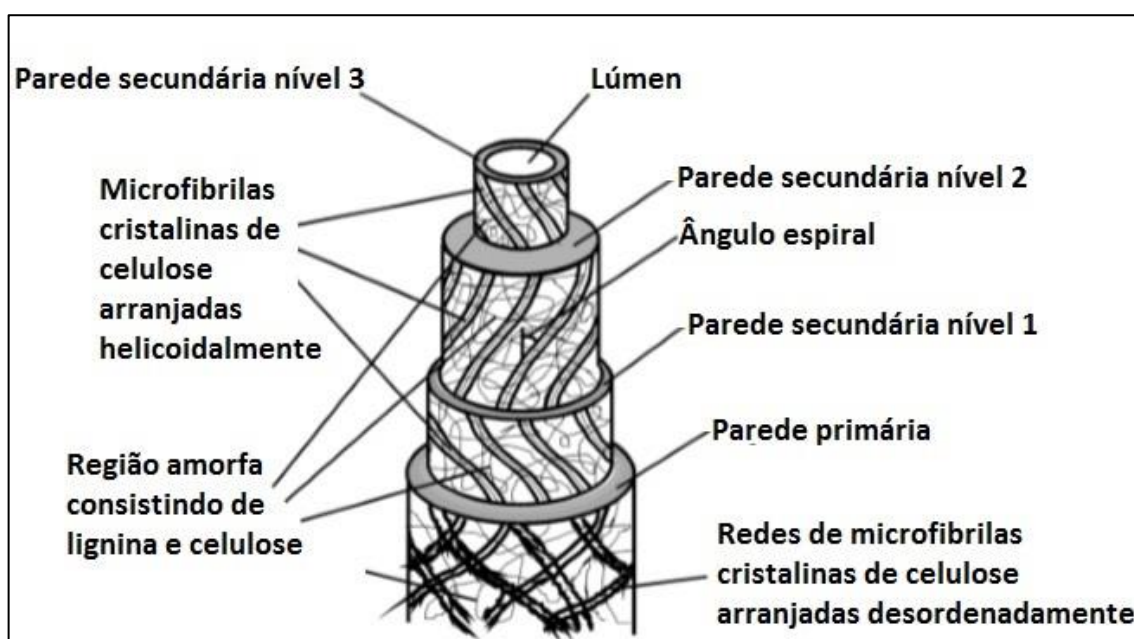


Figura 3.7 – Constituição estrutural de uma célula de fibra vegetal [55].

As propriedades mecânicas dos compósitos são dependentes do grau de adesão entre a matriz e as fibras. Para alcançar o nível desejado de resistência e módulo, a carga deve ser transferida da matriz para as fibras via interface matriz/fibra. Uma vez que as fibras vegetais possuem uma baixa molhabilidade e adsorbabilidade em relação aos polímeros resultante da hidrofilicidade desse tipo de fibra, os reforços de fibras vegetais não formam ligações químicas diretas com a resina, o que resulta em uma baixa adesão fibra/matriz. Dessa forma, tratamentos superficiais, como modificação superficial ou plastificação, são realizados para melhorar a ligação interfacial [55]. O tratamento pode ocasionar mudanças químicas e estruturais não somente na superfície da fibra vegetal, mas também nas células, que podem influenciar diretamente as propriedades das fibras e dos compósitos.

O tratamento escolhido depende do tipo de resina e do tipo de fibra que vão compor o compósito e das características finais desejadas da peça. Tratamentos superficiais de fibras com agentes de acoplamento silânicos [57,58], N-metacrilamida [58], isocianatos e derivados [59], acetilação, cianoetilação e hidróxido de sódio [60,61] vêm sendo usados como alguns métodos químicos para melhorar a adesão da fibra hidrofílica com a matriz hidrofóbica. Métodos físicos, que incluem corona, plasma, ultravioleta, além de tratamentos térmicos têm sido extensivamente pesquisados com o objetivo de trazer hidrofiliabilidade ou aumentar rugosidade da superfície da fibra, aumentando a adesão interfacial.

Alterações na morfologia das fibras vegetais modificadas são normalmente acompanhadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) [45,61]. Os tratamentos também podem ser avaliados pela medição do ângulo de contato fibra/matriz, que está relacionado à molhabilidade da fibra (energia livre superficial) e sua ligação com a matriz [62,63], ou mesmo por ensaios de tenacidade à fratura, onde ocorre a extração de fibras da matriz (conhecido como *pull-out*) [62-64].

A fibra de sisal (*Agave sisalana*) está entre as fibras vegetais mais cultivadas e empregadas como reforço em compósitos, sendo talvez a mais citada na literatura. O Brasil é o maior produtor mundiais de sisal, sendo muito explorado na região nordeste do Brasil onde apresenta importância para a economia local. A planta de sisal de onde se extrai a fibra para posterior tratamento pode ser vista na Figura 3.8.

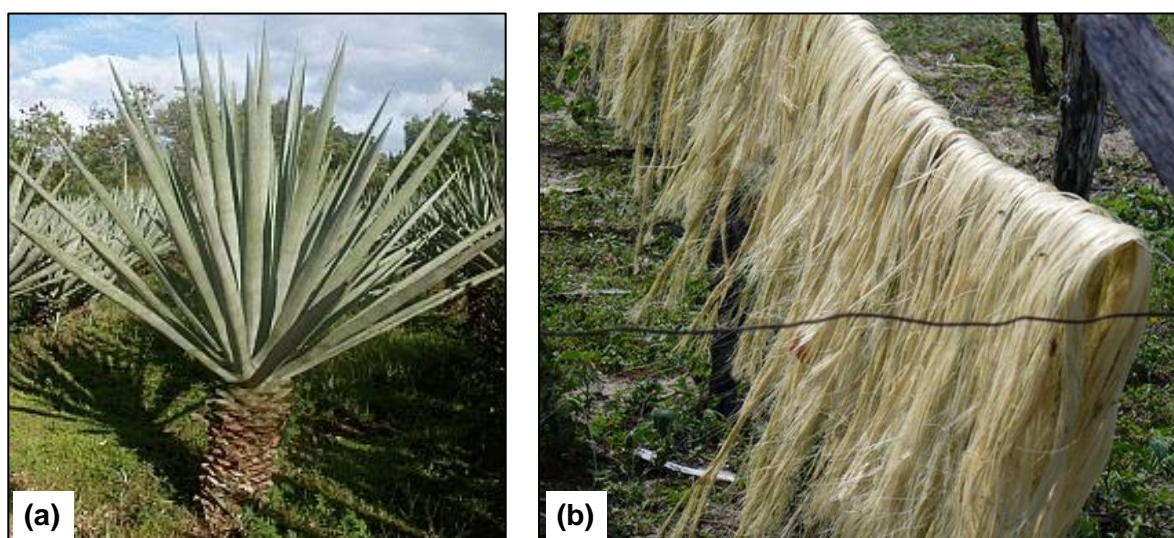


Figura 3.8 – Planta (a) a partir da qual se obtém a fibra de sisal (b).

A fibra de sisal consiste predominantemente de 65,8% de celulose, 9,9% de lignina e 12,0% de hemicelulose e se mostra muito sensível ao NaOH, que lhe causa uma significativa perda de peso devido à dissolução parcial da hemicelulose [55]. O aspecto superficial da fibra de sisal nos sentidos longitudinal e transversal pode ser visto através de imagens de MEV destacadas na Figura 3.9, evidenciando uma topologia celular homogênea. O sisal apresenta potencial de substituir parcialmente fibras sintéticas por aliar características como baixa massa específica, alto módulo e resistência específica além de alta tenacidade. Comparada à fibra de vidro, o sisal não provoca problemas associados à saúde, além de não causar danos por abrasão aos equipamentos utilizados no processamento e de custar aproximadamente dez vezes menos por unidade de peso.

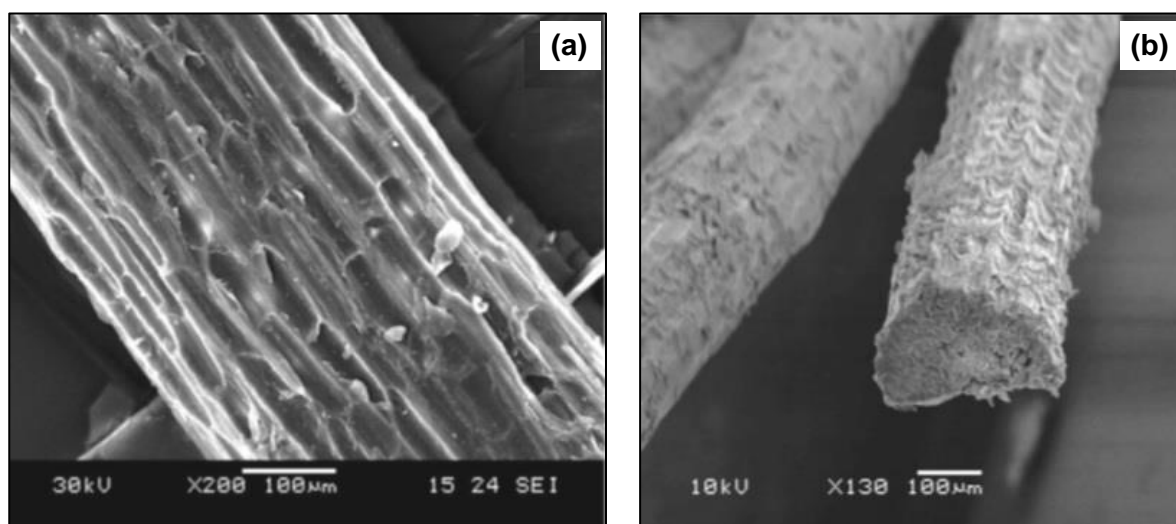


Figura 3.9 – Micrografias de MEV da vista longitudinal (a) e da seção transversal (b) da fibra de sisal [65].

A fibra de curauá (*Ananas erectifolius*), obtida de uma bromélia de grande porte da região amazônica, também vem sendo empregada na indústria automotiva em razão das suas boas propriedades mecânicas aliadas a sua baixa massa específica em relação a outras fibras vegetais, a fim de substituir parcialmente a fibra de vidro em materiais compósitos [44]. A produção brasileira atual está concentrada na região Norte do Brasil, no estado do Pará. A fibra de curauá lembra o sisal na aparência, porém é mais macia e tem como principal característica conferir

elevada resistência mecânica aos compósitos fabricados. Na Figura 3.10 pode-se visualizar a morfologia da fibra natural e tratada após processo de cardação.

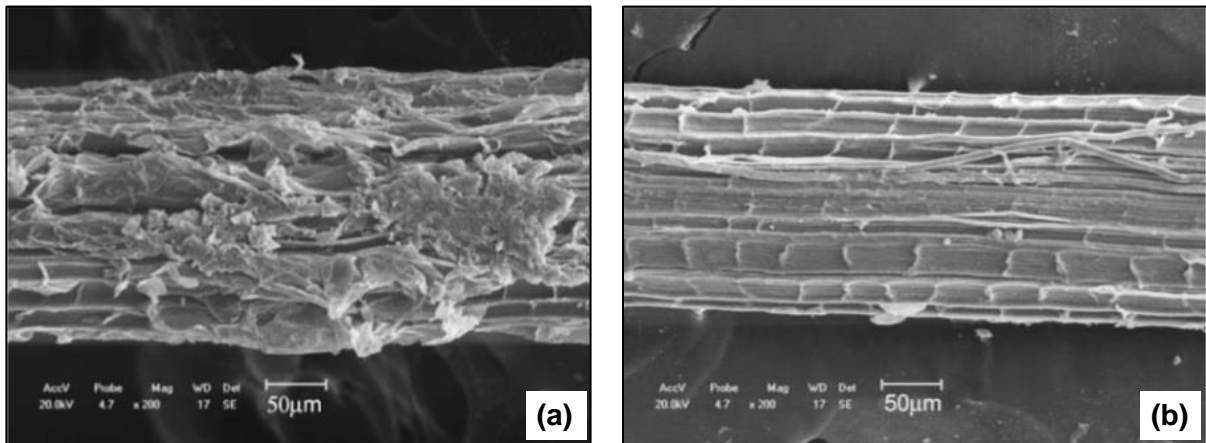


Figura 3.10 – Micrografias de MEV da fibra de curauá contendo resíduos aderidos na superfície (a) e tratada (b) [44].

A fibra de juta (*Corchorus capsularis*) se distingue pela robustez e pela cor branca, sendo amplamente cultivada no Norte do Brasil em virtude do clima quente e úmido da região. A fibra é um feixe entre 50-100 µm de fibras elementares da ordem de 10-20 µm, chamadas de macrofibrilas unidas em uma matriz de lignina e hemicelulose. Essas macrofibrilas são materiais compósitos feitas de diversas camadas de microfibrilas de celulose, que são responsáveis pelas propriedades mecânicas da fibra [19]. A morfologia da fibra elementar de juta pode ser vista na Figura 3.11, indicando a existência de canais centrais abertos chamados de lúmen.

Embora a fibra de coco (*Cocos nucifera*) seja rica em lignina, esta é fraca se comparada a outras fibras ricas em celulose, tais como sisal, juta e abacaxi, mas possui uma alta deformação na ruptura, entre 25-40%. A fina camada cerosa que reveste a fibra a torna incompatível com resinas poliésteres, sendo necessária sua remoção para se ter uma boa adesão interfacial com matrizes com característica polar [66].

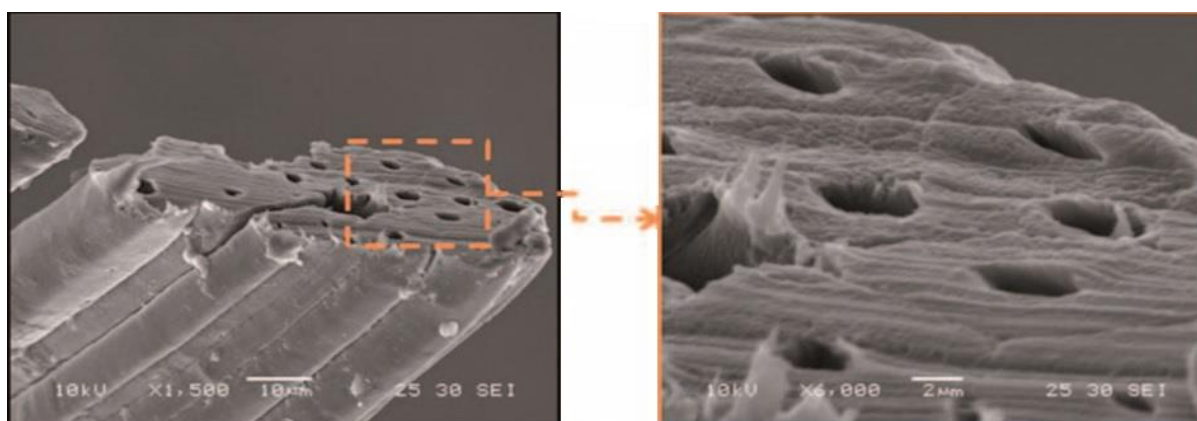


Figura 3.11 – Micrografias de MEV da fibra de juta [19].

A fibra de rami (*Boehmeria nivea*) se caracteriza por ser longa e resistente. Em termos de propriedades específicas, a fibra de rami pode competir com fibras sintéticas uma vez que a resistência específica é quase a mesma da fibra de vidro, além de possuir maior alongamento [67]. A Tabela 3.1 mostra dados de composição de algumas fibras vegetais compilados de Silva *et al.* [44] e outros autores [67-68].

Tabela 3.1 – Composição química de algumas fibras vegetais (em %peso) [44,67,68].

Composição / Fibra	Coco	Curauá	Juta	Rami	Sisal
Celulose	36,0-43,0	70,7-73,6	61,0-71,5	68,6-76,2	67,0-78,0
Hemicelulose	15,0-25,0	9,9	13,6-20,4	13,1-16,7	10,0-14,2
Lignina	41,0-45,0	7,5-11,1	12,0-15,0	0,6-0,7	8,0-11,0
Pectina	3,0-4,0	---	0,2	1,9	10,0
Água solúvel	---	---	1,1	---	16,2
Ceras	---	---	0,5	0,3	2,0
Ângulo espiral	15,0-41,0	---	8,0	7,5	20,0
Teor de umidade	---	7,9	12,6	8,0	11,0

Rodriguez *et al.* [69] compararam a relação permeabilidade-porosidade de mantas de fibras de sisal, juta e de vidro. Os valores experimentais de permeabilidade, ajustados a partir da equação de Carman-Kozeny, foram maiores para as fibras vegetais, pois estas são mais flexíveis e, assim, desenvolvem facilmente canais de fluxo nas mantas (em baixas pressões).

Rouison *et al.* [70] determinaram a permeabilidade e os tempos de preenchimento do molde de mantas de fibra de cânhamo, usando uma simplificada aproximação matemática, devido a simples geometria do molde. Avaliaram que a permeabilidade decresceu com o teor de fibras e, além disto, o valor da permeabilidade da manta de cânhamo foi uma ordem de grandeza menor do que o da manta de fibra de vidro com teor próximo a 19%.

3.5. HIBRIDIZAÇÃO DE FIBRAS SINTÉTICAS E FIBRAS VEGETAIS

O desempenho de compósitos depende da seleção dos materiais constituintes, sendo a fibra um deles. A utilização de dois ou mais tipos de fibras tem atraído a atenção de pesquisadores [49,60,71,72], porque a utilização de um único tipo de fibra às vezes se mostra insuficiente por questões técnicas e econômicas na fabricação de compósitos reforçados. Por isso, a combinação de fibras com diferentes conjuntos de propriedades oferece versatilidade em termos de desempenho do produto.

De fato, a hibridização de fibras de origem vegetal e sintéticas em uma mesma matriz pode resultar em compósitos híbridos que aproveitam ao máximo as melhores propriedades dos constituintes e, assim obter um componente com boas características em termos de custo-benefício. Isso principalmente devido ao menor custo das fibras vegetais utilizadas, tais como algodão, juta e sisal que são mais baratas que as fibras sintéticas [73].

Se por um lado as fibras vegetais apresentam propriedades mecânicas inferiores que as das fibras sintéticas e baixa resistência à absorção de umidade, por outro lado se caracterizam por serem matérias-primas renováveis e apresentam reciclabilidade. A hibridização da fibra natural sensível ao ambiente com uma fibra

sintética com maior resistência a intempéries pode melhorar a rigidez, a resistência mecânica e diminuir a absorção de umidade de um compósito reforçado com fibra natural somente, oferecendo, dessa maneira, um importante balanço entre o impacto ambiental e o desempenho mecânico em uma determinada aplicação [71].

Na literatura, existem diversos estudos para avaliar o efeito da hibridização de fibras em materiais compósitos. Yahaya *et al.* [74] estudaram o comportamento mecânico de compósitos híbridos cânhamo/Kevlar, em diferentes frações volumétricas, frente ao envelhecimento em água. Silva *et al.* [75] avaliaram a degradação das propriedades mecânicas devido à absorção de água de compósitos híbridos formados por mantas de fibra de vidro e fibras contínuas de curauá. Em outro estudo Silva *et al.* [76] manufacturaram compósitos híbridos à base de fibras de vidro (manta e tecido) e cargas mistas de madeira/coco a fim de verificar a resposta mecânica nas interfaces usando análises micro e macroscópicas. Almeida Jr. *et al.* [77] também avaliaram o efeito da hibridização de fibra de vidro com fibras de curauá nas propriedades mecânicas de materiais compósitos. Em outro trabalho, uma fibra vegetal (e.g. linho) foi utilizada em combinação com fibra de carbono para produzir quadros de bicicleta, onde a fibra sintética confere rigidez ao compósito e a fibra vegetal é responsável pela absorção de impacto [78].

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo foi dividido em duas partes, sendo que na primeira são apresentados os materiais e na segunda, os métodos utilizados na caracterização dos fluidos impregnantes bem como das fibras vegetais que deram origem às mantas de reforços fibrosos com foco na avaliação de permeabilidade e propriedades mecânicas.

4.1. MATERIAIS

Os seguintes materiais foram utilizados nos experimentos:

- ❖ Óleo de soja comercial como fluido para a impregnação do reforço fibroso.
- ❖ Solução glicerina:água em diferentes proporções volumétricas, Solução Glic./H₂O 85:15, Solução Glic./H₂O 70:30 e Solução Glic./H₂O 50:50 (vol:vol).
- ❖ Resinas poliésteres ortoftálicas UC 2080 e UC 5518 da Elekeiroz, especificadas na Tabela 4.1.
- ❖ Peróxido de metil-etil-cetona (P-MEK) Butanox M-50 da Akzo Nobel usado como iniciador da cura das resinas poliéster UC 2080 e UC 5518, na proporção recomendada de 1,5 a 2,0% em volume (ver Tabela 4.2).
- ❖ Resina epóxi Araldite GY-1109 da Huntsman à base de diglicidil-éter-bisfenol A (DGEBA) especificada na Tabela 4.3.
- ❖ Endurecedor Aradur 2969 da Huntsman à base de amina aromática usado como agente de cura da resina epóxi Araldite GY-1109, especificado na Tabela 4.4. A proporção em peso especificada de resina:endurecedor é de 100:60 (p:p). De acordo com o fabricante, a viscosidade da mistura a 25 °C é de 950 cPs e o tempo de gel a 20 °C é de aproximadamente de 235 min.

Tabela 4.1 – Especificação das resinas poliésteres ortoftálicas utilizadas (valores típicos).

Resina poliéster ortoftálica	UC 2080	UC 5518
Aplicação	Laminados em geral	RTM
Teor de estireno	45% max.	45% max.
Massa específica (@25 °C/4 °C)	1,07-1,13 g/cm ³	1,07-1,13 g/cm ³
Viscosidade (@25 °C)	300-350 cPs ^a	90-120 cPs ^b
Gel-time (@25 °C)	9-15 min ^c	6-11 min ^d
Resistência à tração / Módulo	43 MPa / 2,8 GPa ^e	26 MPa / 2,1 GPa ^f
Resistência à flexão / Módulo	69 MPa / 3,1 GPa ^e	74 MPa / 4,8 GPa ^f
Temperatura de deflexão térmica	81 °C ^e	75 °C ^f

a – Medição realizada em viscosímetro Brookfield RVT, Spindle 2, 100 RPM; b – Medição realizada em viscosímetro Brookfield RVT, Spindle 2, 20 RPM; c – 0,9 ml Peróxido de Metil Etil Cetona (PMEK) em 100 g resina; d – 0,1 mL Dimetilnilina (DMA) + 1,0 mL Peróxido de Acetil Acetona (AAP) em 100 g resina; e – Resina curada com 1% PMEK por 24 h à temperatura ambiente e pós-curada por 2 h a 60 °C (sem reforço); f – Resina curada com 0,1% DMA + 1% AAP (sem reforço).

Tabela 4.2 – Especificação do P-MEK Butanox M-50 da Akzo Nobel.

Teor de peróxido	33%
Percentual oxigênio ativo	8,80-9,00%
Massa específica (@ 20 °C)	1,18 g/cm ³
Viscosidade (@ 20 °C)	24 cPs
Dosagem	1-4 phr

Tabela 4.3 – Especificação da resina epóxi Araldite GY-1109 da Huntsman.

Tipo de resina epóxi	DGEBA
Massa equivalente epóxi	200-213 g/Eq
Índice epóxi	4,70-5,00 Eq/kg
Massa específica (@ 20 °C)	1,10 g/cm ³
Viscosidade (@ 25 °C)	1200-1600 cPs

Tabela 4.4 – Especificação do endurecedor 2969 da Huntsman.

Tipo de amina	Aromática
Índice amina	264-281 mg KOH/g
Massa recomenda por equivalente epóxi	115 g/Eq
Massa específica (@ 20 °C)	1,11 g/cm ³
Viscosidade (@ 25 °C)	700-900 cPs

- ❖ Fibras vegetais adquiridas comercialmente “in natura”:
 - Coco: fibra obtida na forma de filamentos (Figura 4.1a);
 - Curauá: fibra obtida na forma de filamentos (Figura 4.1b);
 - Juta: fibra obtida na forma de corda torcida (Figura 4.1c);
 - Rami: fibra obtida na forma de tecido tramado (Figura 4.1d);
 - Sisal: fibra obtida na forma de corda torcida (Figura 4.1e).

- ❖ Fibra de vidro: a manta M821B, usada como recebida da Owens Corning, é um material de reforço obtido de fibras de vidro do tipo E, cortadas e distribuídas de maneira uniforme e aleatória, as quais são aglutinadas umas às outras através de ligante de baixa solubilidade em monômero de estireno, com compatibilidade com resinas poliéster, viniléster, epóxi e poliuretano. A 20°C as características da fibra de vidro são: massa específica = 2,50 g/cm³ e gramatura = 300 g/m².

- ❖ Promotor de fluxo comercial de não-tecido de polipropileno (núcleo de PP), usado como recebido da Owens Corning. A 20°C as características do promotor de fluxo são: massa específica = 0,92 g/cm³ e gramatura = 200-250 g/m².

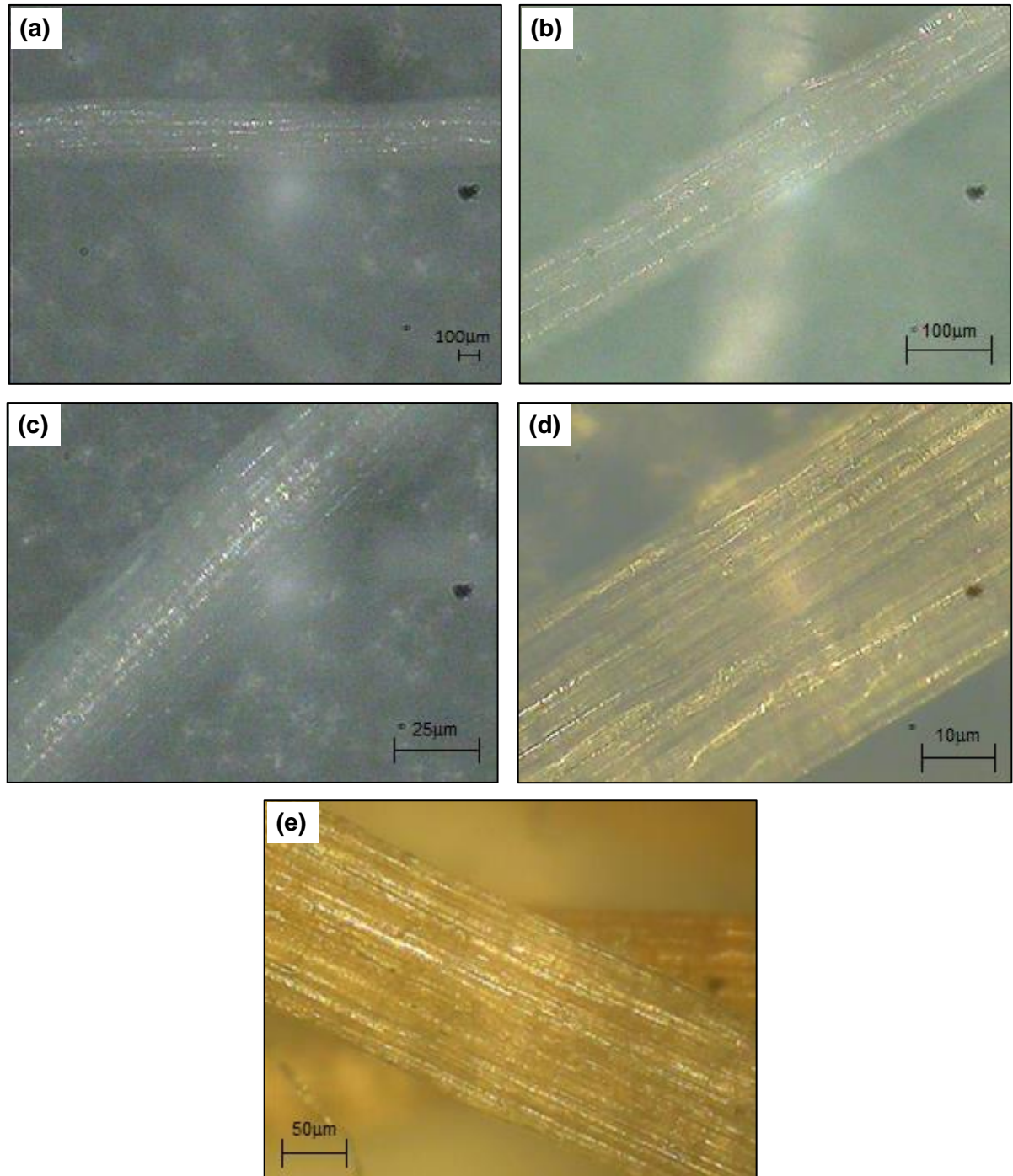


Figura 4.1 – Microscopia óptica das diferentes fibras vegetais: coco (a), curauá (b), juta (c), rami (d), e sisal (e).

4.2. MÉTODOS

4.2.1. Caracterização dos fluidos impregnantes

4.2.1.1. Massa específica

A massa específica do óleo de soja foi medida experimentalmente por picnometria em diferentes temperaturas (15, 20 e 25 °C) usando um picnômetro com volume nominal de 51,45 cm³ e banho termostático de acordo com a norma ASTM D5355-95. A massa específica das soluções glicerina:água foram calculadas com base nas massas específicas da glicerina ($\rho_{\text{glicerina}} = 1,262 \text{ g/cm}^3$) e da água ($\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 0,999\text{-}0,997 \text{ g/cm}^3$) em temperaturas entre 15 e 25 °C e nas proporções das soluções usadas, i.e. 85:15, 70:30 e 50:50. A massa específica média da resina poliéster UC 2080 foi obtida conforme especificação do fornecedor como $\rho_{\text{poliéster}} = 1,110 \text{ g/cm}^3$.

4.2.1.2. Viscosidade

A viscosidade é uma propriedade muito importante do fluido impregnante no que se refere ao processo de moldagem por RTM. Medidas de viscosidade foram realizadas em diferentes temperaturas (15, 20 e 25 °C) usando um viscosímetro de fluxo reverso Cannon-Fenske (com constante do viscosímetro capilar $k = 0,2411 \text{ m}^2/\text{s}^2$). O viscosímetro capilar foi colocado em um banho termostático e três tempos de fluxo foram medidos para cada temperatura. A partir dos tempos de fluxo (t), determinou-se a viscosidade cinemática (ν) e a viscosidade dinâmica (μ) através das equações $\nu = k \cdot t$ e $\mu = \nu \cdot \rho_{\text{óleo}}$, respectivamente.

O método de viscosimetria de fluxo reverso tipo Cannon-Fensk também foi usado para a determinação da viscosidade das soluções de glicerina:água. Não foi possível utilizar tal método para a resina poliéster devido a sua alta viscosidade. As equações obtidas pela regressão potencial representam os melhores ajustes para o comportamento desses fluidos entre 15-25 °C cujos resultados estão apresentados na seção 5.1. Como método complementar, foi utilizado um viscosímetro do tipo *Brookfield* para determinação da viscosidade dinâmica a 20 °C. Para o óleo de soja

e soluções de glicerina:água foi utilizado o *spindle UL Adapter*, enquanto para a resina poliéster foi utilizado o *spindle LV1*.

4.2.1.3. Tensão superficial

A tensão superficial (σ) foi medida na temperatura de 20 °C em um tensiômetro NIMA modelo DST 9005, apresentado na Figura 4.2, sendo este método baseado no princípio do Noüy, i.e. um anel horizontal de platina foi imerso no fluido e a força máxima requerida para retirar o anel da superfície foi medida. A tensão superficial nesse caso é proporcional a esta força [79].

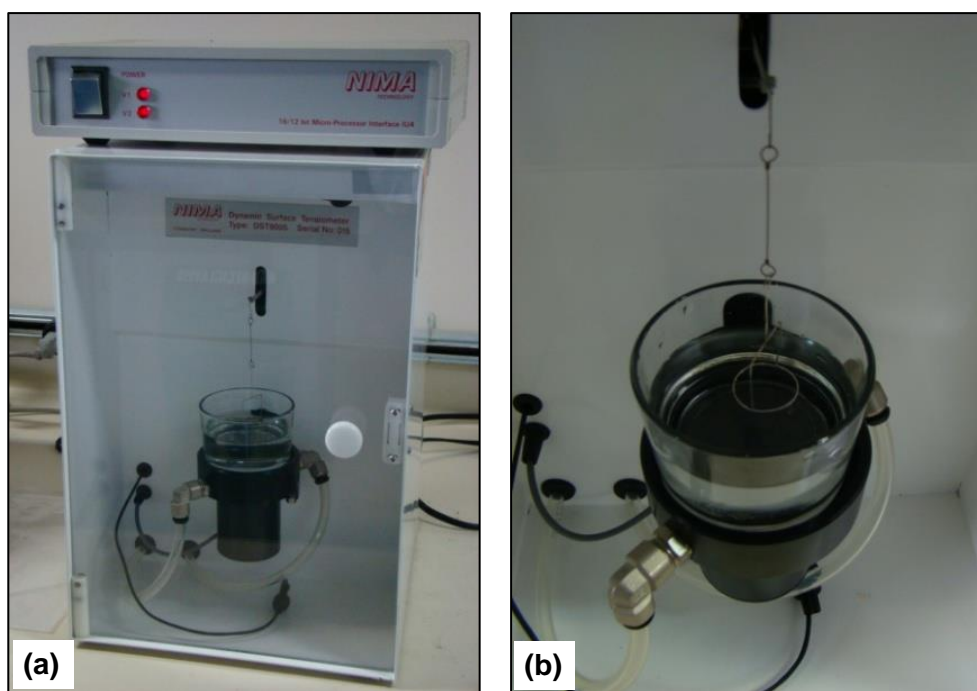


Figura 4.2 – Tensiômetro NIMA modelo DST 9005 (a), e detalhes do aparato de ensaio (b).

4.2.2. Tratamento químico e caracterização das fibras

4.2.2.1. Tratamento químico

A fibra de sisal com 40 mm de comprimento foi submetida a um tratamento químico superficial em solução aquosa de hidróxido de sódio 2% sob agitação por 1 h à temperatura ambiente, seguido da lavagem em água destilada até pH neutro e

secagem em estufa com circulação de ar a 105 °C por 30 min. Tal tratamento teve a finalidade de uniformizar a superfície da fibra e melhorar a sua razão de aspecto, determinada pela relação comprimento/diâmetro. A fibra de sisal apenas lavada em água destilada foi identificada como Sisal NT, enquanto a fibra tratada em solução aquosa NaOH 2%, foi denominada Sisal T.

4.2.2.2. Caracterização

A massa específica das fibras vegetais lavadas em água destilada foi determinada por picnometria através da norma ISO 1183-1 usando-se um líquido de imersão adequado para cada fibra baseado na sua massa específica, qual seja: etanol para a fibra de coco, acetato n-butílica para as fibras de curauá, juta e rami, e água destilada para a fibra de sisal. A massa específica da fibra de vidro comercial (2,50 g/cm³) foi obtida do fornecedor (Owens Corning).

As fibras vegetais (coco, curauá, juta, rami e sisal) e a fibra de vidro foram dimensionalmente avaliadas em relação aos seus diâmetros. O diâmetro médio das fibras foi obtido a partir de dez medidas realizadas em um micrômetro Mitutoyo modelo nº 2046F (NO: 7301) com resolução de 0,01 mm. Previamente à medição, as fibras vegetais foram devidamente lavadas em água destilada e secas em estufa.

Para as medidas de ângulo de contato (Θ) entre o fluido e a fibra, o fluido de interesse foi gotejado sobre a superfície da fibra com auxílio de uma micro-seringa. Fotos foram capturadas em um microscópio Olympus SZ40 (magnificação máxima de 40x) com câmera Olympus DP11 acoplada. As imagens foram tratadas no programa ImageJ, sendo o ângulo de contato medido com uma extensão do programa chamado Dropsnake [80].

O ângulo de contato entre a gota de um líquido de tensão superficial conhecida e uma superfície sólida depende da relação entre forças adesivas, as quais obrigam a gota a se espalhar sobre a superfície, e forças coesivas do líquido, as quais tendem a fazer a gota atingir um formato esférico, com uma área de superfície mínima. Quando a gota de um líquido repousa sobre uma superfície sólida, forma-se um ângulo de contato de equilíbrio (i.e. estado de menor energia)

entre o líquido e a superfície sólida. O ângulo entre um plano tangente à gota do líquido (fluido) e um plano contendo a superfície (fibra) onde o líquido se encontra depositado representa uma medida quantitativa da molhabilidade, sendo que um maior ângulo indica um menor grau de molhabilidade do fluido na superfície da fibra.

4.2.3. Preparo das mantas homogêneas e dos reforços híbridos

Os reforços fibrosos foram utilizados como mantas homogêneas (vegetais ou sintéticas), sendo algumas mostradas na Figura 4.3, ou como mantas híbridas em razão de combinações de fibras de vidro (Figura 4.4a), núcleo de PP (Figura 4.4b) e sisal. Para os reforços híbridos as camadas correspondentes às mantas de fibra de vidro foram chamadas de “V”, a camada de sisal de “S” e a camada de núcleo de PP de “P”. A fração volumétrica de fibras total ($\%V_f$) foi estimada de acordo com a massa de reforço fibroso colocada na cavidade do molde.

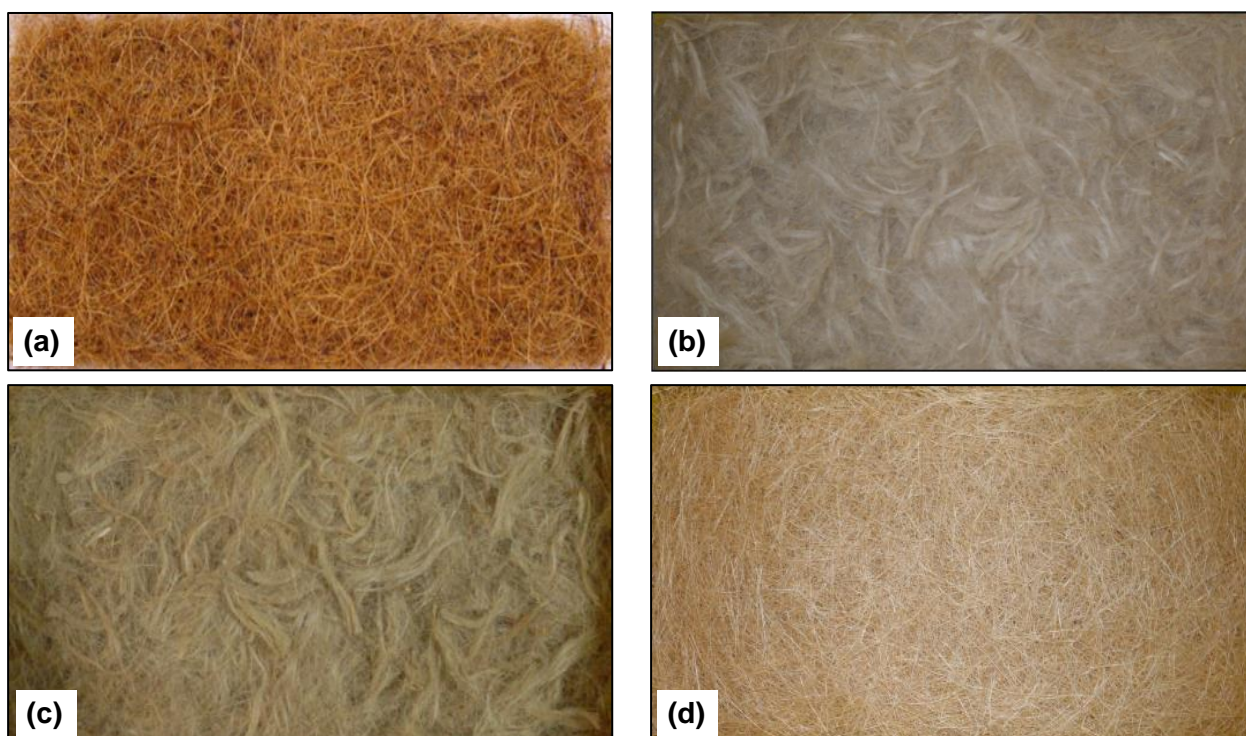


Figura 4.3 – Mantas homogêneas de fibras vegetais: coco (a), juta (b), rami (c), e sisal (d).

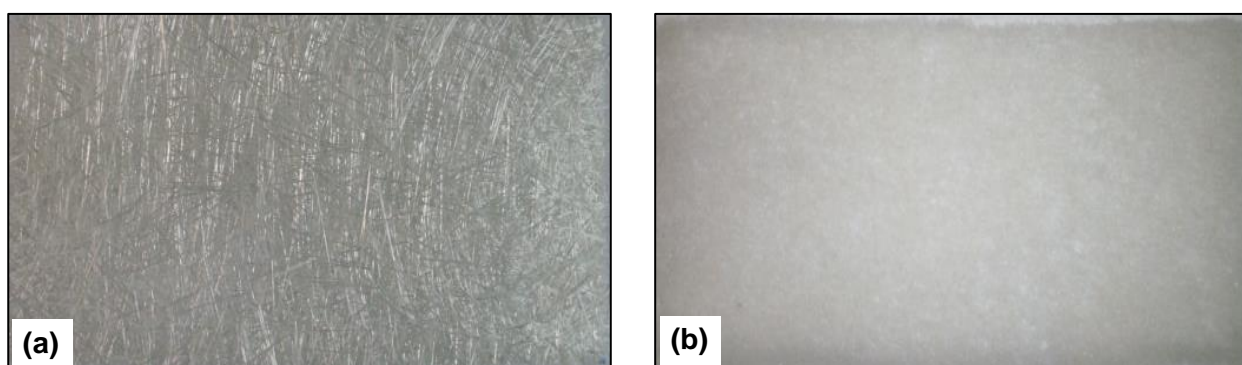


Figura 4.4 – Mantas homogêneas de fibra de vidro (a) e núcleo de PP.

O número de camadas nos reforços híbridos foi mantido constante uma vez que a permeabilidade na direção perpendicular ao plano do reforço pode diminuir com o aumento do número de camadas devido à probabilidade de se ter mais canais bloqueados entre as camadas [34]. As mantas de fibra de vidro foram cortadas nas dimensões da cavidade do molde. A manta de sisal produzida ou o núcleo de PP foram inseridos entre mantas de fibra de vidro, formando um sanduíche no caso dos laminados híbridos.

As mantas de fibras vegetais foram obtidas por um processo composto basicamente de etapas manuais, descritas abaixo e que podem ser vistas na Figura 4.4 no caso da preparação de uma manta de fibra de sisal:

- ❖ Etapa 1: Obtenção da fibra vegetal “in natura” conforme citado na seção 4.1 – ver Figura 4.5a.
- ❖ Etapa 2: Corte da fibra no comprimento adequado para utilização no processo de infiltração. As fibras vegetais de uma maneira geral foram cortadas no comprimento de 40 mm. A fibra de sisal, em específico, foi cortada em diferentes comprimentos: 1, 10, 20, 30, 40, 50 e 100 mm – ver Figura 4.5b.
- ❖ Etapa 3: Realização de tratamento superficial da fibra, lavando-a em água destilada ou com uma solução aquosa NaOH 2% por 1 h sob agitação constante. A etapa prevê a eliminação de impurezas bem como a melhora das características de superfície – ver Figura 4.5c.

- ❖ Etapa 4: Secagem até massa constante da fibra cortada em estufa com ventilação a 105 °C por 30 min. A eliminação da umidade das fibras auxilia também na consolidação da manta – ver Figura 4.5d.
- ❖ Etapa 5: Distribuição aleatória e homogênea das fibras em um pré-molde com dimensões 320 × 150 mm para produzir a manta não-compactada (pré-formada) – ver Figura 4.5e.
- ❖ Etapa 6: Compressão da manta pré-formada em uma prensa hidráulica a 80 °C por 30 min, tornando-a apta à utilização no processo de moldagem por transferência de resina – ver Figura 4.5f.

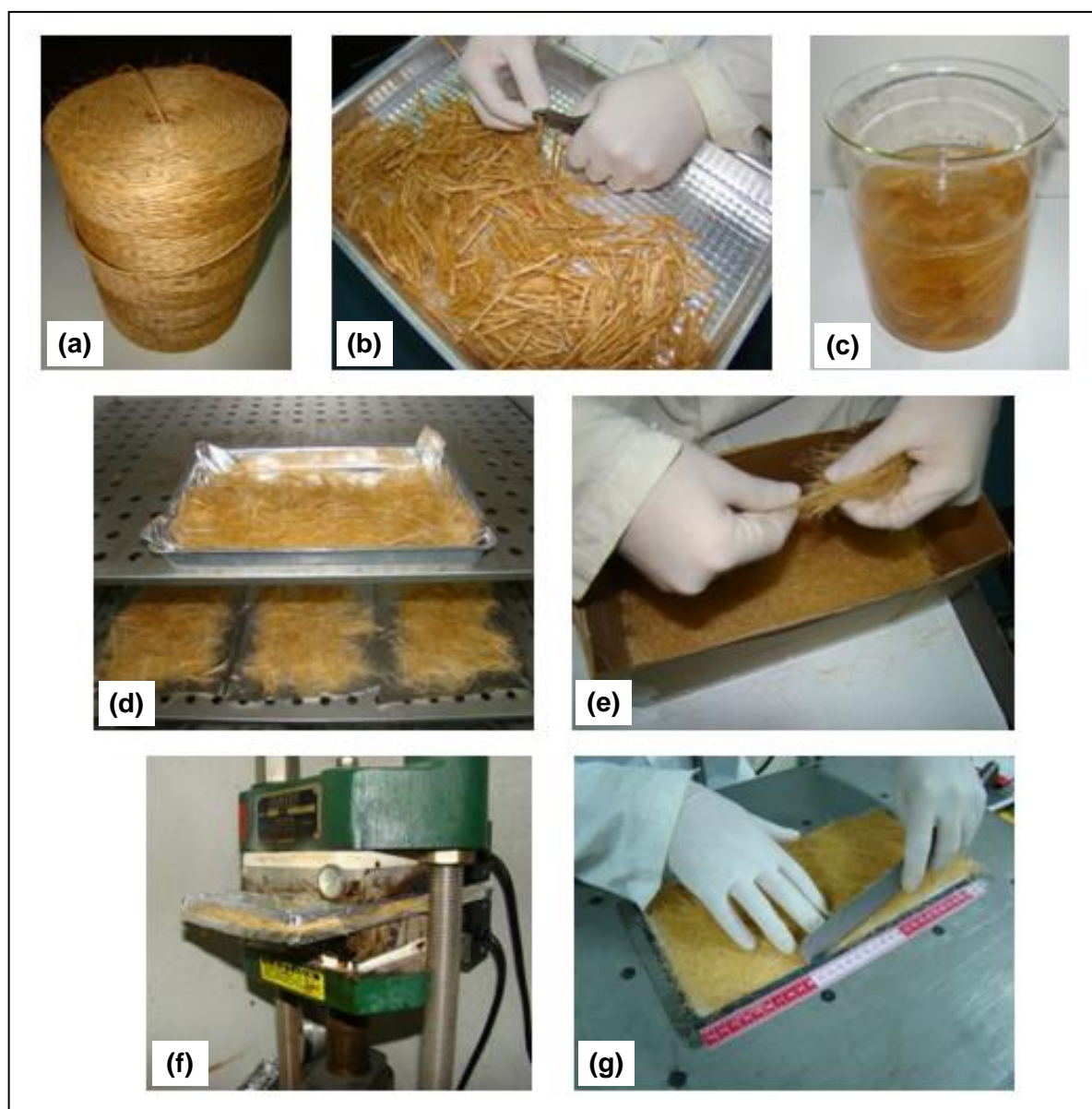


Figura 4.5 – Etapas do processo de fabricação de mantas de sisal.

Quando a manta de fibra vegetal estava devidamente compactada em condições de uso no experimento, esta era disposta no molde, como mostra a Figura 4.5g, onde era utilizada como reforço homogêneo ou empilhada juntamente com outras mantas de fibra de vidro, formando reforço híbrido, atuando nesse caso como um possível promotor de fluxo. O processo de fabricação de mantas de fibras vegetais foi descrito em detalhes em patente depositada pelo grupo de pesquisa do Laboratório de Materiais Poliméricos – LAPOL/UFRGS em 2009, conforme registro no INPI pelo número PI0903094-8 [81].

4.2.4. Compressibilidade de reforços híbridos

Os ensaios foram realizados em uma máquina universal de ensaios Shimadzu Autograph, com célula de carga de 50 kN e velocidade de deslocamento de 10 mm/min, gerando curvas de tensão vs. espessura de manta, simulando o que ocorreria na cavidade do molde com o seu fechamento. Aplicou-se uma pré-carga de 10 N para avaliação da espessura inicial. Foram feitas análises micrográficas dos compósitos produzidos em um microscópio trinocular Axio Scope A1 marca Carl Zeiss para observação das camadas constituintes.

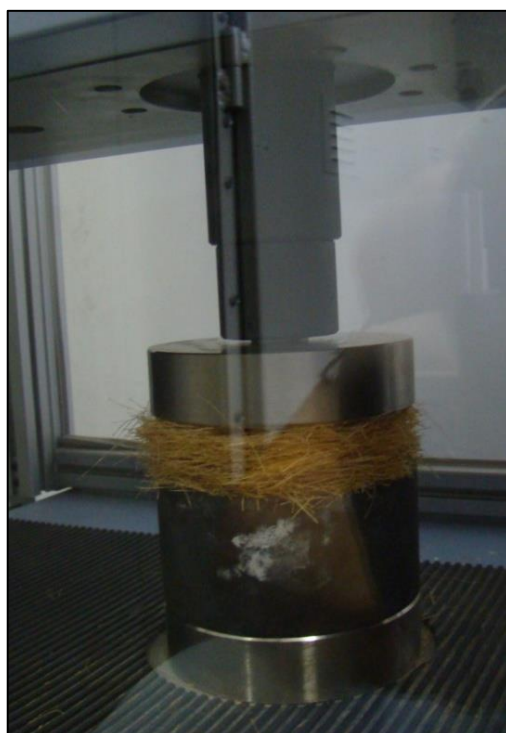


Figura 4.6 – Ensaio de compressão de reforços fibrosos.

As mantas de fibra de vidro, PP e sisal foram cortadas em formato circular (diâmetro: 100 mm) e empilhadas conforme indicado na seção 5.10 para ensaio de compressibilidade. Foram submetidos a esse experimento reforços homogêneos de fibra de vidro e fibra de sisal com $\%V_f = 20\%$, além de reforços híbridos V/S e V/P com $\%V_f$ de 13%, 20%, 26% e 31%.

4.2.5. Medidas de permeabilidade via RTM

Na Figura 4.7 pode ser visto o sistema experimental de RTM construído no LAPOL/UFRGS, destacando-se seus principais componentes:

- ❖ Molde em aço inox (parte inferior) cuja cavidade interna possui $320 \times 150 \times 4$ mm, detalhada na Figura 4.8 para infiltração retilínea ou na Figura 4.9 para infiltração radial.
- ❖ Molde superior em vidro para a visualização da frente de fluxo do fluido.
- ❖ Câmera fotográfica digital Sony Cyber-shot DSC-H9 com controle remoto para a captura da frente de fluxo com o tempo.
- ❖ Controlador eletrônico de pressão *Druck* DPI 530 10 bar.
- ❖ Vaso de pressão Kaizen Tech 6100E, onde o fluido é alojado para a infusão.
- ❖ Transdutores de pressão calibrados Field Logger posicionados no molde.
- ❖ Computador com interface Novus LPS para aquisição dos dados de pressão dos transdutores.

Nos experimentos retilíneos ou radiais, o óleo de soja foi injetado nos reforços fibrosos sob pressão constante e pré-ajustada ($P_{\text{pré-ajustada}}$) no controlador eletrônico de pressão: 0,10, 0,35, 0,60 ou 1,10 bar. Infiltrações foram realizadas à temperatura ambiente, que variou entre 17 e 24 °C. Considerando que há uma pequena variação da pressão durante a injeção, a pressão real considerada durante as infiltrações

(utilizada nas Equações (3.4) e (3.5) como P_{inj}) foi obtida pelo valor correspondente a 99% da pressão máxima alcançada, lida no transdutor P1.

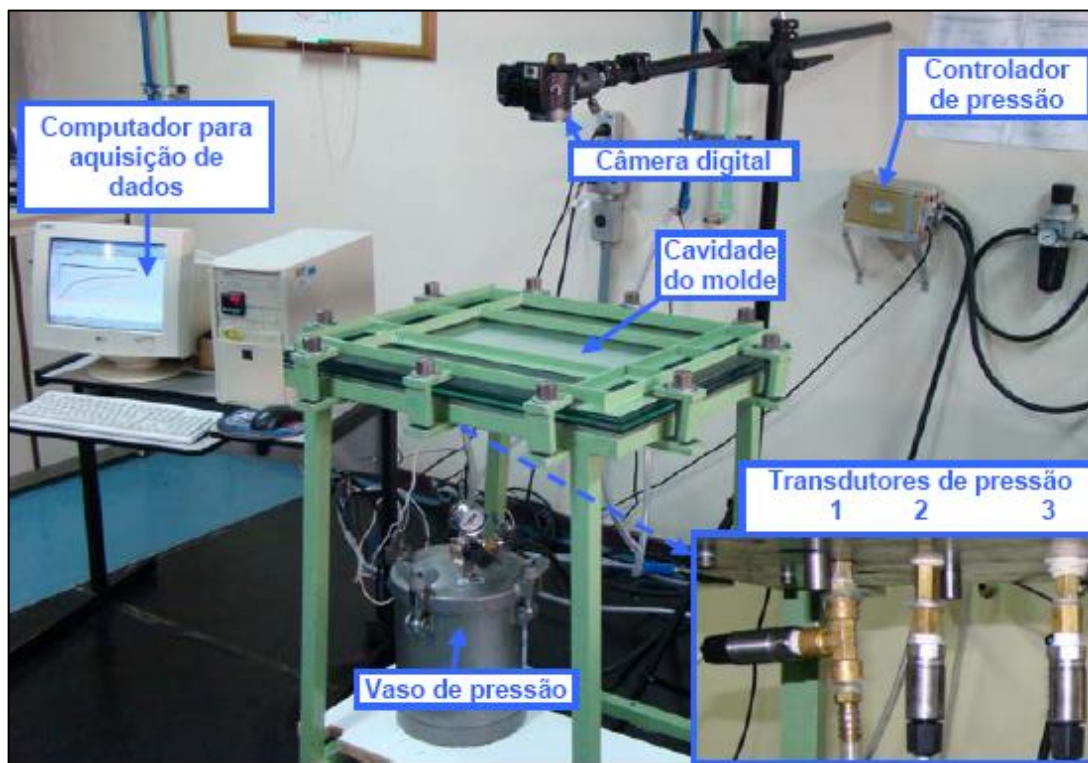


Figura 4.7 – Representação esquemática do sistema experimental de RTM.

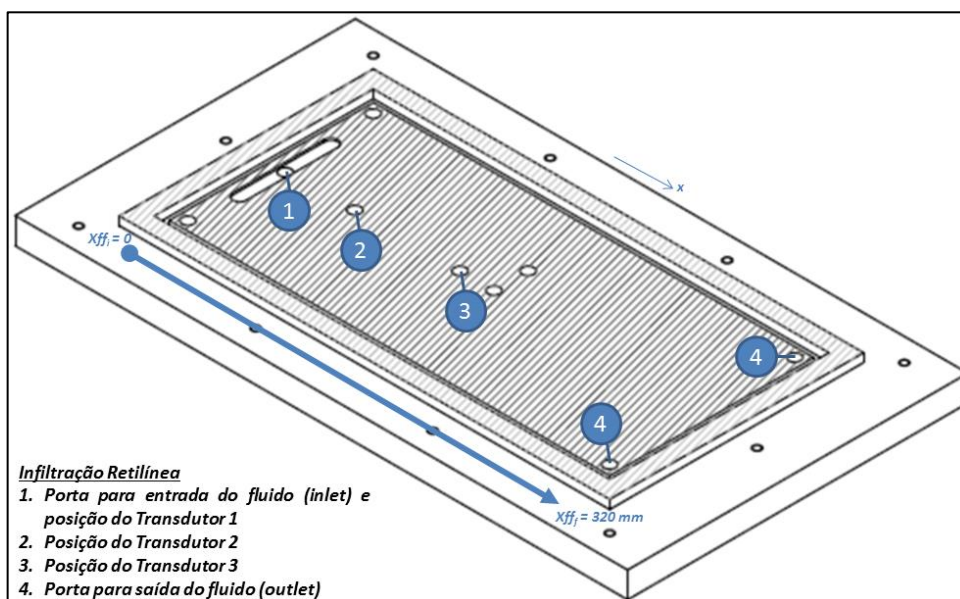


Figura 4.8 – Desenho da parte inferior do molde do equipamento experimental de RTM configurado para infiltração retilínea.

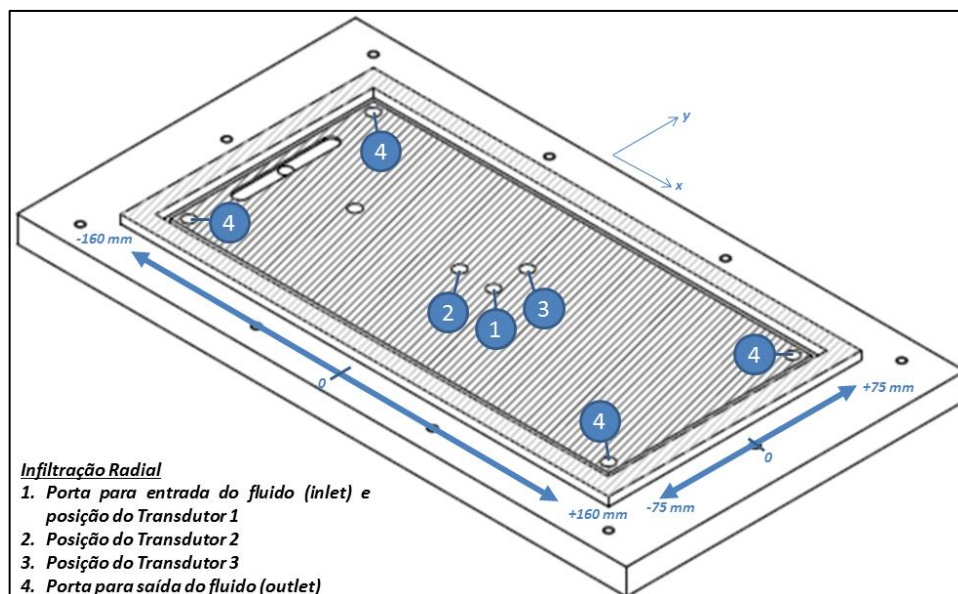


Figura 4.9 – Desenho da parte inferior do molde do equipamento experimental de RTM configurado para infiltração radial.

Imagens da posição da frente de fluxo do fluido (x_{ff}) na infiltração retilínea e do raio da frente do fluxo do fluido (r_{ff}) na infiltração radial foram capturadas em intervalos regulares de tempo até atingir, respectivamente, $x_{ff} = 310$ mm ou $r_{ff} = 75$ mm. As leituras de pressão dos transdutores e o tempo foram sincronizados e usando as Equações (3.4) e (3.5) foi possível determinar a permeabilidade planar (K) retilínea e radial a partir da declividade das curvas x_{ff}^2 versus tempo e Φ versus tempo, respectivamente.

O número de fotografias capturadas nas infiltrações dependeu de algumas variáveis e dos parâmetros utilizados nos experimentos, tais como natureza do reforço, número de camadas empilhadas, fluido impregnante e pressão de injeção pré-ajustada no controlador. Assim, o número de leituras de posição da frente de fluxo do fluido foi proporcional ao número de fotografias capturadas, tendo variado dessa forma de 20 a 70 fotografias para cada experimento realizado.

A Figura 4.10 mostra uma seqüência de fotografias capturadas para um experimento retilíneo típico, com mantas de fibra de vidro empilhadas, nas quais é possível visualizar o avanço da posição da frente de fluxo com o tempo. Da mesma

forma, a Figura 4.11 mostra uma sequência de fotos para um experimento radial típico.

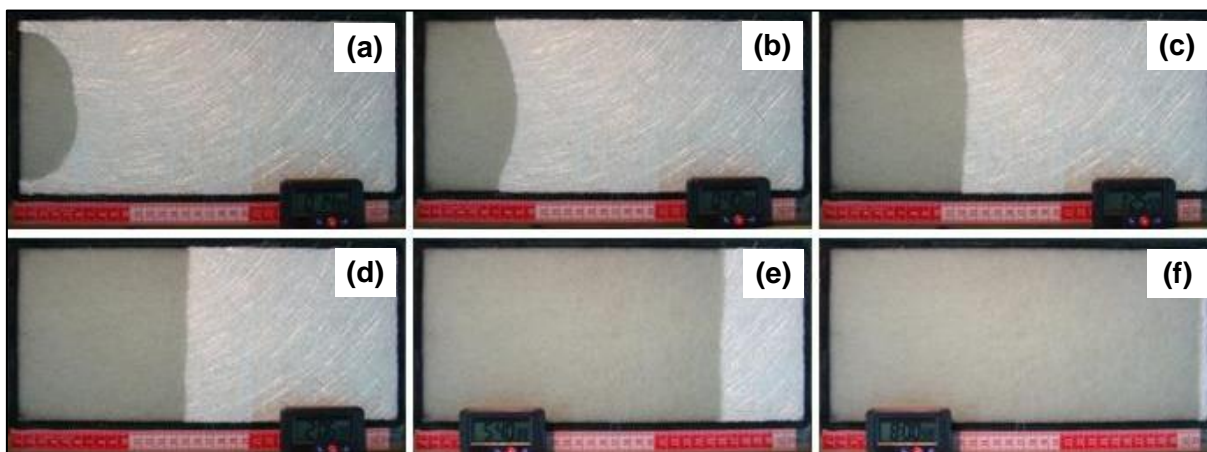


Figura 4.10 – Sequência de imagens mostrando a posição da frente de fluxo do fluido para um experimento retilíneo em diferentes tempos de preenchimento: 15 s (a), 40 s (b), 65 s (c), 125 s (d), 340 s (e), e 480 s (f).

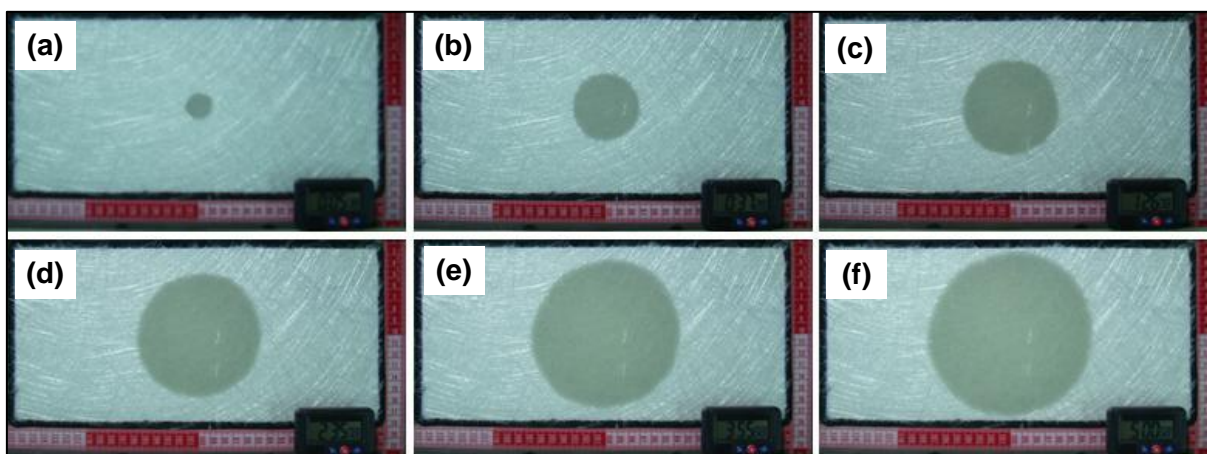


Figura 4.11 – Sequência de imagens mostrando a posição da frente de fluxo do fluido para um experimento radial em diferentes tempos de preenchimento: 05 s (a), 37 s (b), 86 s (c), 155 s (d), 235 s (e), e 300 s (f).

4.2.6. Moldagem e caracterização dos compósitos

Compósitos foram moldados por RTM para observação do campo de espessura do moldado, da espessura de cada camada de reforço nos híbridos bem

como para a obtenção das propriedades mecânicas originais e envelhecidas dos compósitos. Os parâmetros de moldagem e os compósitos obtidos estão apresentados na Tabela 4.5. A resina poliéster UC 2080 acelerada com 1,5% PMEK (v/v) foi utilizada na fabricação de compósitos reforçados, sendo moldados por RTM para obtenção de corpos-de-prova destinados à medição das respectivas propriedades mecânicas; a resina poliéster UC 2080 acelerada com 2,5% PMEK (v/v) foi utilizada para medição de espessura de cada camada em compósitos moldados; e, por final, a resina epóxi 1109 foi formulada com endurecedor 2969 (p/p), a qual foi empregada para medição da espessura das placas moldadas por RTM em razão do seu baixo percentual de retração dimensional.

Tabela 4.5 – Parâmetros de moldagem e finalidade dos compósitos obtidos.

Poliéster	Poliéster	Epóxi
UC 2080 + PMEK 1,5%	UC 5518 + PMEK 2%	1109 + 2969 (100:60)
Moldagem à T ambiente	Moldagem à T ambiente	Moldagem à T ambiente
$P_{inj} = 0,3$ bar max.	$P_{inj} = 0,3$ bar max.	$P_{inj} = 0,8$ bar max.
Propriedades Mecânicas	Espessura de Camada	Espessura do Compósito

A Figura 4.12 mostra desenho esquemático dos pontos, indicados em azul, onde foram dimensionadas as espessuras na placa para mapeamento de espessura de compósitos moldados por RTM. Ao todo, as espessuras foram determinadas em 45 diferentes pontos, os quais distam entre si 40,00 mm em “x” e 37,50 mm em “y” ao longo de cada compósito moldado. Mapas de espessura de compósitos epóxi/fibra de vidro foram realizados tendo-se variado o número de mantas (6, 8, 9, 10 e 12), e foi obtida a espessura média do compósito utilizada nos cálculos de fração volumétrica de fibras. Um mapa de espessura do compósito epóxi/sisal ($\%V_f = 22,5\%$) também foi feito. Como será visto, a utilização de até 10 mantas de fibra de vidro não afetou significativamente a espessura dos compósitos moldados.

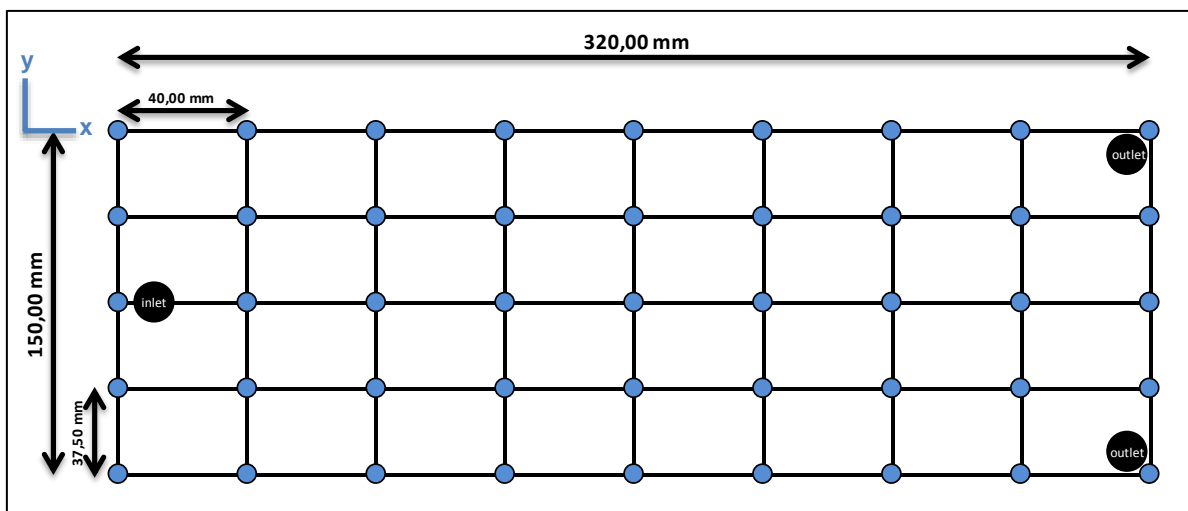


Figura 4.12 – Desenho esquemático do compósito utilizado no mapeamento de espessura.

As placas de compósito moldadas foram cortadas em uma serra fita vertical Acerbi (SFMA-C) para a obtenção dos corpos-de-prova, os quais foram posteriormente lixados em uma politriz-lixadeira motorizada Pantec (POLIPAN-U) sob velocidade de 200 RPM com lixas de granulometria 80, 150 e 240.

Compósitos híbridos de fibra de vidro com núcleo de PP ou com fibra de sisal foram moldados, inserindo-se folhas de alumínio entre as camadas a fim de facilitar a medição da espessura das mesmas em reforços com diferentes frações volumétricas de fibras. A seção transversal de cada compósito híbrido moldado foi devidamente preparada para captura de imagens em microscópio óptico, sendo as espessuras médias medidas com auxílio do software Image J.

A massa específica dos compósitos foi determinada experimentalmente segundo a norma ASTM D792-00 e o teor de vazios foi determinado de acordo com a norma ASTM D2734-94, comparando-se a massa específica experimental (ρ_e) e a teórica (ρ_t). A massa específica dos constituintes dos compósitos, isto é, resina poliéster, fibra de vidro, fibra de sisal e núcleo de PP, foi também medida por picnometria, sendo 1,20, 2,50, 1,10 e 0,92 g/cm³ os respectivos valores médios.

O efeito do envelhecimento dos compósitos fabricados foi condicionado pelo efeito da absorção de água com base na norma ASTM D5229M-92. Corpos-de-prova retangulares com dimensões aproximadas de 10 × 10 × 3,5 mm foram imersos em

água destilada à temperatura ambiente por 30 dias e pesados regularmente. As bordas das amostras foram previamente seladas a fim de garantir a infiltração somente no plano perpendicular ao laminado. Antes do início do teste, as amostras foram colocadas em estufa com auxílio de vácuo por 24 horas para remoção da umidade. A absorção de água em cada período de tempo foi calculada pela Equação (4.1), sendo “M” a massa do corpo-de-prova após imersão e “Mo” a massa referência seca do corpo-de-prova, ambas em gramas.

$$\text{Absorção Água (\%)} = \left[\frac{M - M_o}{M_o} \right] \times 100 \quad (4.1)$$

Amostras de compósitos moldados antes e após envelhecimento em água destilada foram avaliadas mecanicamente a fim de se verificar a perda de resistência em relação às propriedades originais.

Ensaio de tração foram realizados usando uma máquina universal EMIC DL2000 com uma célula de carga de 2000 kgf. Cada corpo-de-prova, cujas dimensões foram 150 × 25 × 3,5 mm, foi testado sob velocidade constante de 1,5 mm/min de acordo com a norma ASTM D3039-07. Cinco amostras foram testadas para cada compósito, e o valor médio e o desvio padrão são reportados.

Ensaio de flexão em 3 pontos foram usados para se determinar a resistência e o módulo em flexão de acordo com a norma ASTM D790-03, usando a mesma máquina universal EMIC descrita. Os testes foram conduzidos sob velocidade constante de 1,5 mm/min e cinco corpos-de-prova (dimensões: 127 × 12,7 × 3,5 mm) foram ensaiados para cada compósito. Ensaio de impacto Izod foram realizados em corpos-de-prova sem entalhe usando um equipamento CEAST com um martelo de 5,5 J, que impacta a 3,46 m/s, seguindo a norma ASTM D256-00. Seis amostras (dimensões: 60 × 11 × 3,5 mm) foram testadas para cada compósito.

Ensaio de resistência *short-beam*, anteriormente conhecido como cisalhamento interlaminar (ILSS ou *interlaminar shear strength*), foram realizados em corpos-de-prova de compósitos simétricos de acordo com a norma ASTM D2344-00

no mesmo equipamento EMIC descrito. O comprimento e a largura são dependentes da espessura. Os testes foram feitos sob velocidade constante de 1,0 mm/min e cerca de dez corpos-de-prova foram testados para cada tipo de compósito.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS FLUIDOS IMPREGNANTES

Os valores de massa específica dos fluidos em diferentes temperaturas utilizados no estudo foram compilados na Tabela 5.1. A solução de glicerina 85:15 apresentou a maior massa específica ($\rho_{\text{sol.85:15}} = 1,24 \text{ g/cm}^3$), enquanto o óleo de soja apresentou a menor ($\rho_{\text{óleo}} = 0,92 \text{ g/cm}^3$) na mesma temperatura.

O valor de viscosidade dinâmica obtido é usado diretamente na equação que governa o fluxo do fluido para a determinação da permeabilidade. Com relação à viscosidade dos fluidos, ambos os métodos utilizados na sua determinação mostraram ser equivalentes para a maioria dos fluidos visto que apresentaram valores similares. A resina poliéster ortoftálica UC 2080 foi o fluido que apresentou a maior viscosidade ($\mu_{\text{poliéster}} = 660 \text{ cP}$), cerca de setenta vezes superior ao fluido de menor viscosidade ($\mu_{\text{sol.50:50}} = 9 \text{ cP}$), e de aproximadamente dez vezes em relação ao óleo de soja. Os valores de viscosidade dos fluidos em diferentes temperaturas também podem ser vistos na Tabela 5.1.

A viscosidade da resina é uma característica fundamental do fluido para o processo de RTM. Como o tempo de injeção é limitado e os reforços fibrosos normalmente possuem baixa permeabilidade, se a viscosidade do fluido impregnante é alta, a pressão de injeção deverá ser alta a fim de permitir a finalização do processo de preenchimento do molde antes de ocorrer, por exemplo, a gelificação da resina. Se a pressão de injeção for alta, esta pode provocar o deslocamento do reforço. Por outro lado, se a viscosidade da resina é muito baixa, pode ocorrer o total preenchimento do molde antes da completa impregnação do reforço fibroso, levando à formação de partes secas isoladas. Nesse último caso, a baixa viscosidade da resina não é eficientemente capaz de deslocar completamente o ar do interior do reforço durante a moldagem. O resultado, nesse caso, é de preenchimento total dos mesoporos e parcial dos microporos.

Tabela 5.1 – Propriedades físico-químicas dos fluidos em diferentes temperaturas.

Fluido		Massa específica (g/cm ³)	Viscosidade cinemática (cSt) ^a	Viscosidade dinâmica (cP) ^a	Viscosidade dinâmica (cP) ^b	Tensão superficial (10 ⁻³ N/m)
Óleo de soja	15 °C	0,922 ± 0,001	87,7 ± 0,4	80,8 ± 0,4	---	---
	20 °C	0,919 ± 0,002	70,7 ± 0,9	64,9 ± 0,8	58 ^c	33,8 ± 0,1
	25 °C	0,916 ± 0,003	58,1 ± 0,6	53,2 ± 0,6	---	---
Solução Glic./H ₂ O 85:15	15 °C	1,223 ± 0,001	123,1 ± 0,1	150,5 ± 0,1	---	---
	20 °C	1,222 ± 0,003	85,5 ± 0,7	104,5 ± 0,9	135 ^c	60,6 ± 1,7
	25 °C	1,222 ± 0,004	63,0 ± 0,1	77,0 ± 0,2	---	---
Solução Glic./H ₂ O 70:30	15 °C	1,183 ± 0,001	33,9 ± 0,1	40,1 ± 0,1	---	---
	20 °C	1,183 ± 0,003	24,8 ± 0,1	29,4 ± 0,1	31 ^c	59,5 ± 0,4
	25 °C	1,183 ± 0,004	19,4 ± 0,1	23,0 ± 0,1	---	---
Solução Glic./H ₂ O 50:50	15 °C	1,131 ± 0,001	9,9 ± 0,1	11,2 ± 0,1	---	---
	20 °C	1,130 ± 0,002	8,1 ± 0,1	9,1 ± 0,1	8 ^c	57,1 ± 1,1
	25 °C	1,130 ± 0,004	6,6 ± 0,1	7,4 ± 0,1	---	---
Poliéster UC 2080	20 °C	1,110 ± 0,002	---	---	660 ^d	36,1 ± 0,1

a – Viscosidade medida com viscosímetro de fluxo reverso Cannon-Fenske;

b – Viscosidade medida com viscosímetro Brookfield @ 20 °C;

c – Viscosidade medida com spindle UL Adapter (Brookfield);

d – Viscosidade medida com spindle LV1 (Brookfield).

A Figura 5.1 mostra as equações que representam as curvas de viscosidade dinâmica das soluções glicerina:água e do óleo de soja obtidas através das linhas de tendência com intervalo de confiança superior a 99,5%, sendo a temperatura do experimento na faixa entre 15 e 25 °C. É possível observar para o óleo de soja que a viscosidade varia entre 53 e 81 cP. Para as soluções de glicerina, a variação da viscosidade com a temperatura é muito mais sensível, especialmente a solução 85:15 uma vez que a viscosidade apresentou redução superior a 70 pontos. Por último, observa-se que quando a diluição da solução de glicerina passa de 15 para 30 partes em volume de água, a viscosidade reduz abruptamente.

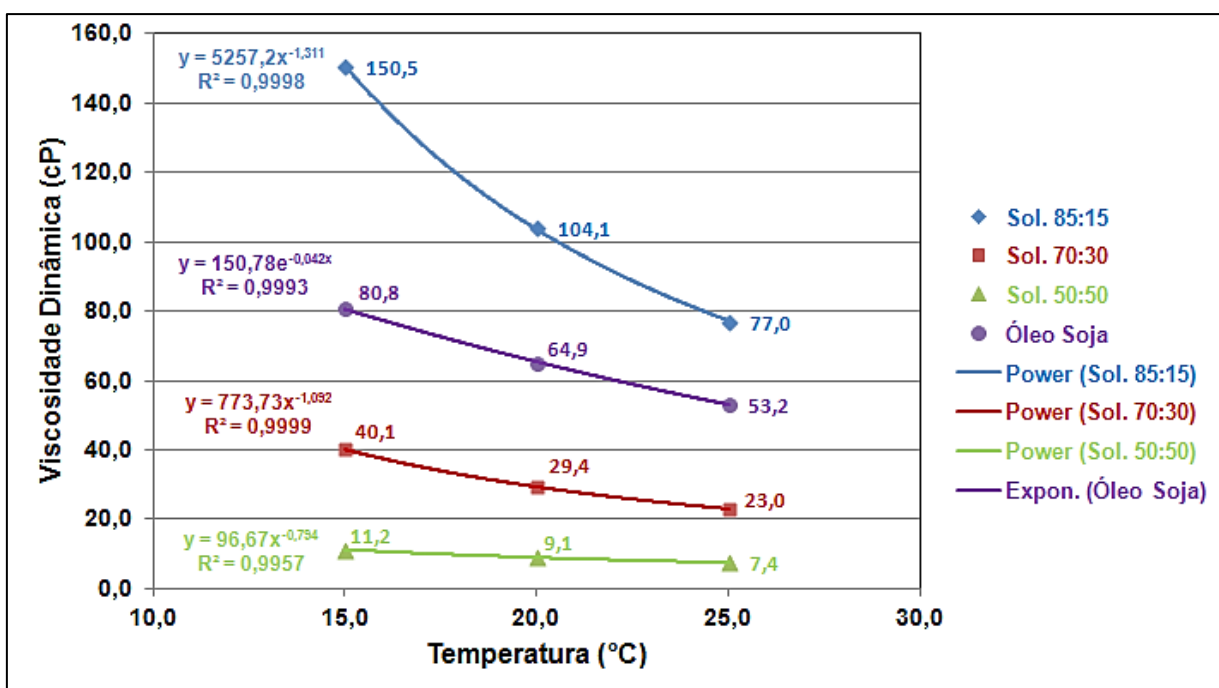


Figura 5.1 – Viscosidade dinâmica de fluidos impregnantes em diferentes temperaturas obtida pelo método de fluxo reverso Cannon-Fenske.

Kiuna *et al.* [82] desenvolveram um modelo para viscosidade da resina durante a cura no processo de RTM, mostrando que a reologia da resina é sensível à progressão da reação de cura, então a metodologia proposta poderia ser aplicada previamente para prever a cinética da reação, antes mesmo da gelificação ter sido alcançada. Segundo Shojaei *et al.* [23], a reação de cura é um fator que afeta a propriedade final de compósitos moldados por RTM e sobretudo o tempo de ciclo de

processo. Idealmente, a reação de cura da resina não pode ocorrer durante o estágio de preenchimento do molde uma vez que o aumento da viscosidade resultante da reação dificulta a impregnação progressiva do reforço fibroso e causa pobre molhamento.

A molhabilidade da fibra pelo fluido é um dos aspectos mais importantes no processo de moldagem por RTM. O fluxo padrão da resina líquida é governado pelo fluxo macroscópico, quando ocorre a impregnação ao longo da cavidade, e pelo fluxo microscópico, quando ocorre a impregnação no interior dos filamentos das fibras. Nessa última condição, o fluxo é governado pela tensão superficial e pressão capilar, simultaneamente. Dessa forma, para se atingir um bom fluxo microscópico, é indispensável assegurar que a molhabilidade da fibra, que está correlacionada à tensão superficial, seja suficiente para refletir em uma boa impregnação do reforço fibroso [4].

Os resultados de tensão superficial a 20 °C de cada fluido utilizado nos experimentos, que indicam a tendência do fluido se espalhar mais sobre a superfície sólida quanto maior a sua magnitude, estão compilados na Tabela 5.1. No processo de infiltração, a diferença de tensão superficial entre as fases ajuda na impregnação do reforço pela resina e, conseqüentemente, eliminação do ar presente no mesmo [83]. O fluido molha e espalha-se naturalmente sobre uma superfície sólida se a energia superficial do sólido é menor que a energia superficial do líquido [84].

Foi verificado que as soluções de glicerina:água em geral apresentaram os maiores valores de tensão superficial quando comparadas à resina poliéster e ao óleo de soja. A partir destes valores, pode-se inferir então que as soluções de glicerina tenderão a se espalhar mais sobre as superfícies sólidas, nesse caso as fibras utilizadas nas infiltrações retilíneas e radiais.

5.2. AVALIAÇÃO DE FIBRAS E REFORÇOS FIBROSOS

Os resultados de massa específica e diâmetro médio das fibras vegetais estão destacados na Tabela 5.2. De uma forma geral, a fibra de coco foi a que apresentou o menor valor de massa específica (0,92 g/cm³) bem como maior

diâmetro e variação ($301 \pm 60 \mu\text{m}$) entre as fibras, seguido pela fibra de sisal. Por outro lado, as fibras de juta, rami e curauá apresentaram os maiores valores de massa específica ($1,26$, $1,37$ e $1,36 \text{ g/cm}^3$, respectivamente) e os menores diâmetros (48 , 55 e $93 \mu\text{m}$).

Tabela 5.2 – Resultados de massa específica e diâmetro médio de diferentes fibras vegetais.

Fibra vegetal	Tipo de tratamento	Picnometria		Diâmetro médio (μm)
		Líquido de imersão	Massa específica (g/cm^3)	
Coco	H ₂ O destilada	Etanol	$0,92 \pm 0,01$	301 ± 60
Curauá	H ₂ O destilada	Acetato N-Butila	$1,36 \pm 0,02$	93 ± 18
Juta	H ₂ O destilada	Acetato N-Butila	$1,26 \pm 0,01$	48 ± 16
Rami	H ₂ O destilada	Acetato N-Butila	$1,37 \pm 0,01$	55 ± 21
Sisal NT	H ₂ O destilada	H ₂ O destilada	$1,10 \pm 0,02$	175 ± 47
Sisal T	Sol. Aq. NaOH 2%	H ₂ O destilada	$1,45 \pm 0,01$	165 ± 31

O tipo de tratamento (água destilada ou NaOH 2%) não alterou significativamente o diâmetro nominal médio das fibras de sisal visto que os valores observados foram similares, embora tenha-se notado uma tendência de menor valor para Sisal T. No entanto, observou-se um aumento considerável de aproximadamente 32% na massa específica da fibra tratada em solução alcalina em razão da modificação ocasionada pelo tratamento.

O tratamento superficial, que é usualmente realizado para alterar a característica superficial ou a razão de aspecto da fibra, tem a função de melhorar primordialmente a adesão fibra-matriz, e, por consequência, aumentar o desempenho mecânico de compósitos moldados. Moraes *et al.* [85] mostraram que o banho em água destilada atua somente nas células primárias da fibra, enquanto

que o tratamento alcalino em solução NaOH 2% atua em camada mais profundas de células secundárias da fibra vegetal, levando à densificação da fibra.

A Figura 5.2 mostra micrografias realizadas em MEV, evidenciando comparativamente a característica superficial da fibra de sisal NT e sisal T. A fibra de sisal tratada sofreu leve redução no diâmetro médio e apresentou superfície mais regular após o tratamento alcalino, visto que houve remoção de fibrilose da estrutura superficial da fibra, i.e. a fibra de sisal tem a sua fase amorfa de lignina removida após o tratamento com solução de NaOH 2%, como relatado por Olivero *et al.* [86].

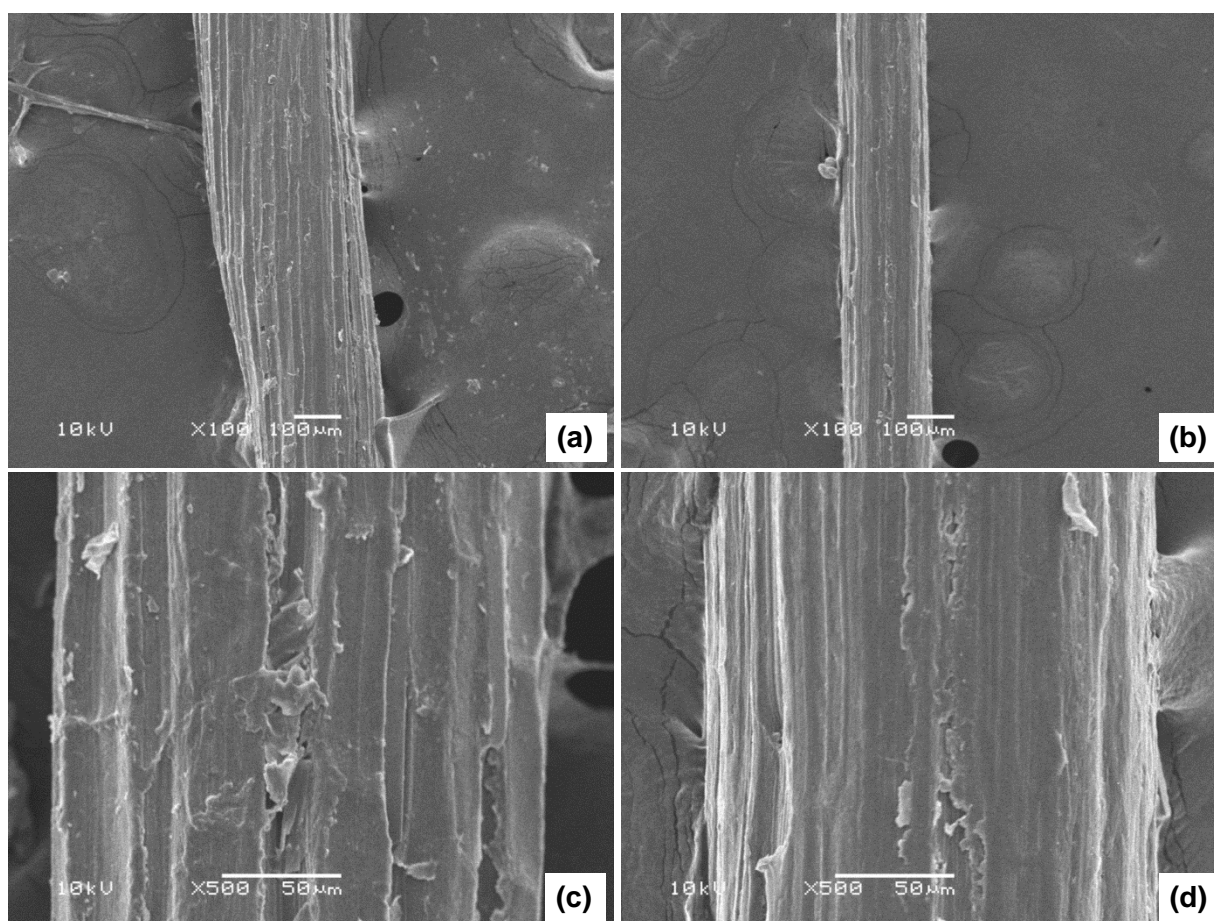


Figura 5.2 – Micrografias de MEV da fibra de sisal NT (a) e (c), e sisal T (b) e (d) em diferentes magnificações.

O teor de fibra no interior do molde de RTM foi calculado utilizando-se mapas de espessura. Com a massa de fibra utilizada, a altura final e a massa do compósito

moldado com resina epóxi de baixa retração na cura, pode-se calcular o teor de fibras. A Tabela 5.3 compila os resultados encontrados de fração volumétrica de fibra no interior do molde através dos mapas de espessura dos compósitos moldados.

Tabela 5.3 – Resultados de $\%V_f$ através dos mapas de espessura de compósitos moldados.

Fibra	Número de camadas	Massa de fibra	Espessura média	$\%V_f$	Figura relacionada
Vidro	6	86,4 g	3,70 mm	20,0%	Figura 5.3a
Vidro	8	115,5 g	3,80 mm	25,0%	Figura 5.3b
Vidro	9	126,0 g	3,80 mm	28,0%	Figura 5.3c
Vidro	10	138,0 g	3,80 mm	30,0%	Figura 5.4a
Vidro	12	172,5 g	4,00 mm	36,0%	Figura 5.4b
Sisal	1	42,7 g	3,60 mm	22,5%	Figura 5.5

As Figuras 5.3(a)-(c), 5.4(a)-(b) e 5.5 mostram os mapas das espessuras medidas em diferentes posições dos compósitos moldados para os sistemas com 6, 8, 9, 10 e 12 mantas de FV e 1 manta de sisal. À medida que se aumentou a massa do reforço de fibra de vidro pelo aumento do número de camadas, houve aumento progressivo da fração volumétrica percentual ocupada pelo reforço no molde, resultado com relevância direta nos cálculos de permeabilidade dos experimentos de infiltração. Para a fibra sintética, $\%V_f$ variou entre 20 e 36% quando o número de camadas de fibra de vidro variou entre 6 e 12, respectivamente. Já para a fibra de sisal manufaturou-se uma camada única de 42,7 g, o que permitiu atingir uma fração volumétrica de fibras em tono de 22,5%.

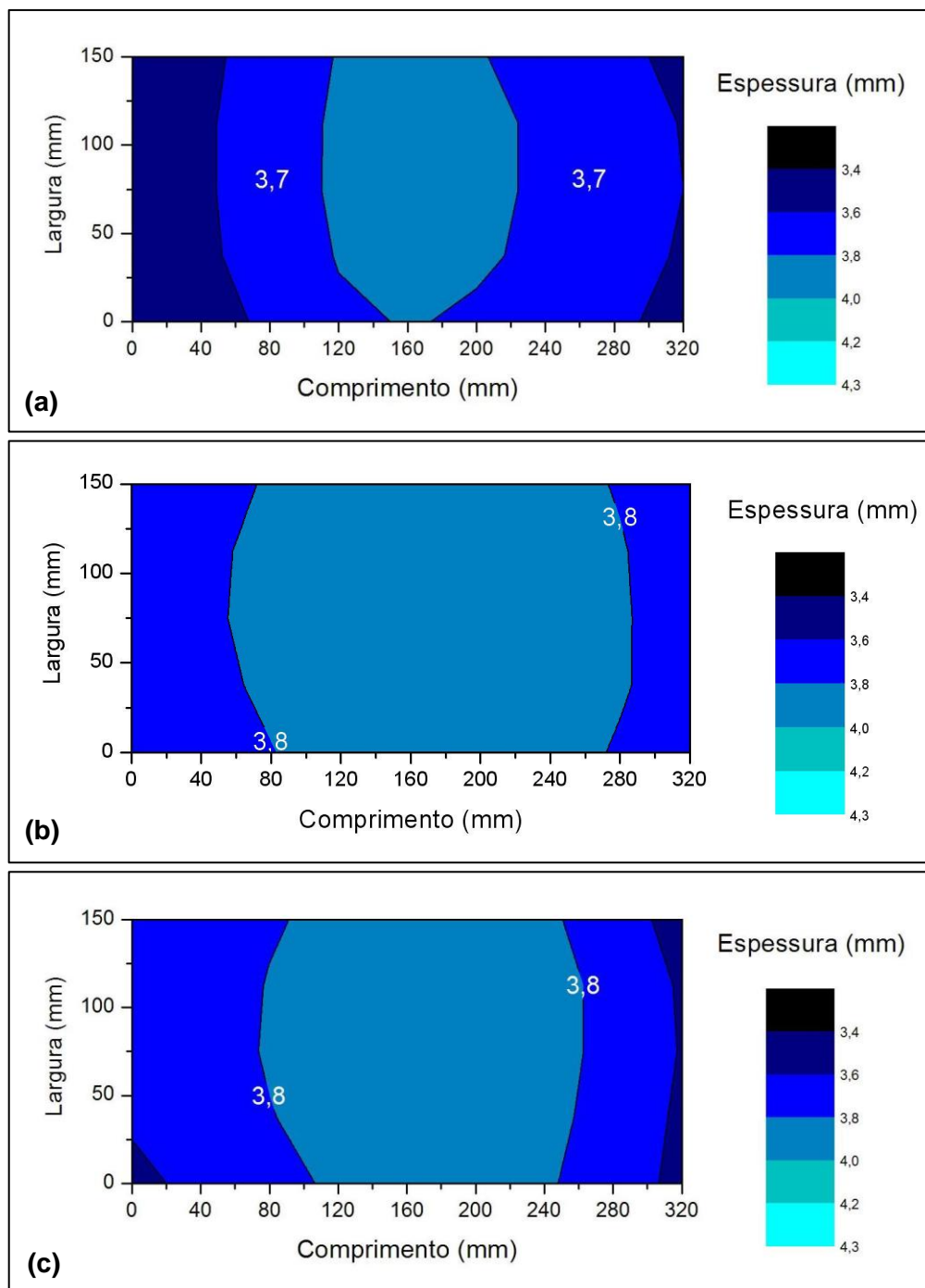


Figura 5.3 – Mapa de espessura de compósitos moldados com resina epóxi e mantas de fibra de vidro com 6 camadas (a), 8 camadas (b) e 9 camadas (c).

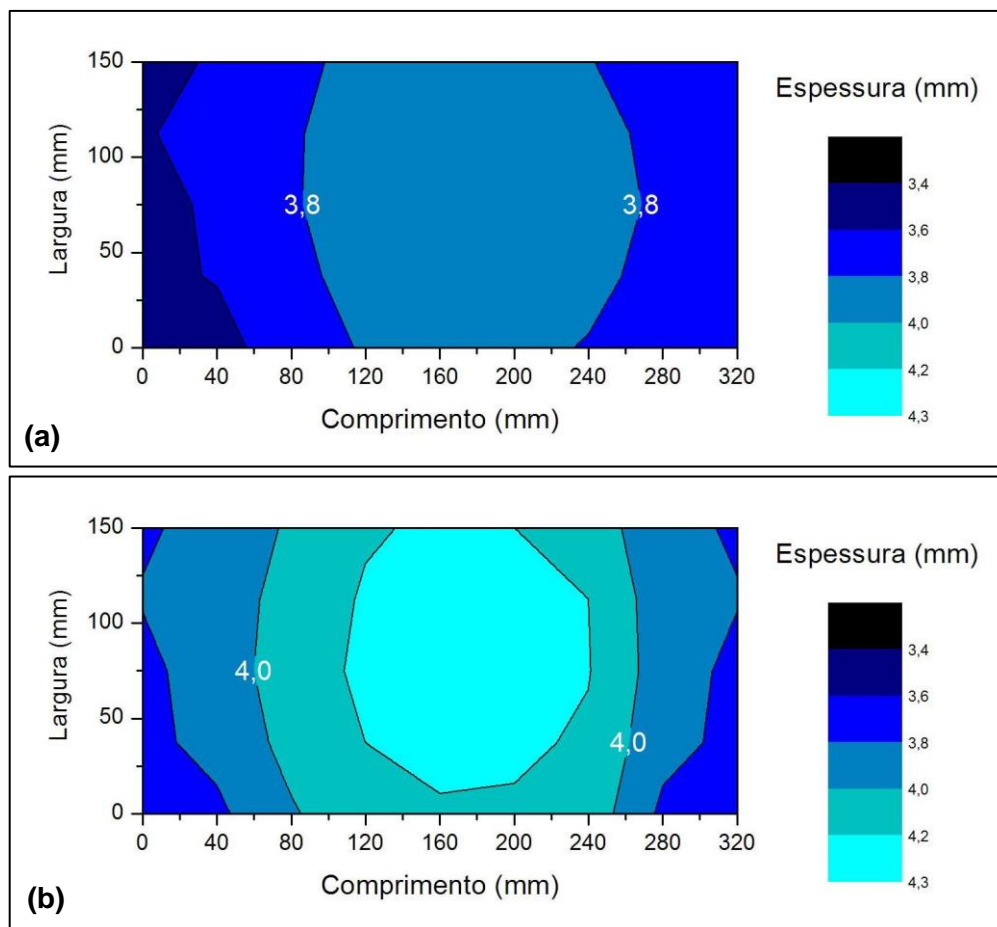


Figura 5.4 – Mapa de espessura de compósitos moldados com resina epóxi e mantas de fibra de vidro com 10 camadas (a) e 12 camadas (b).

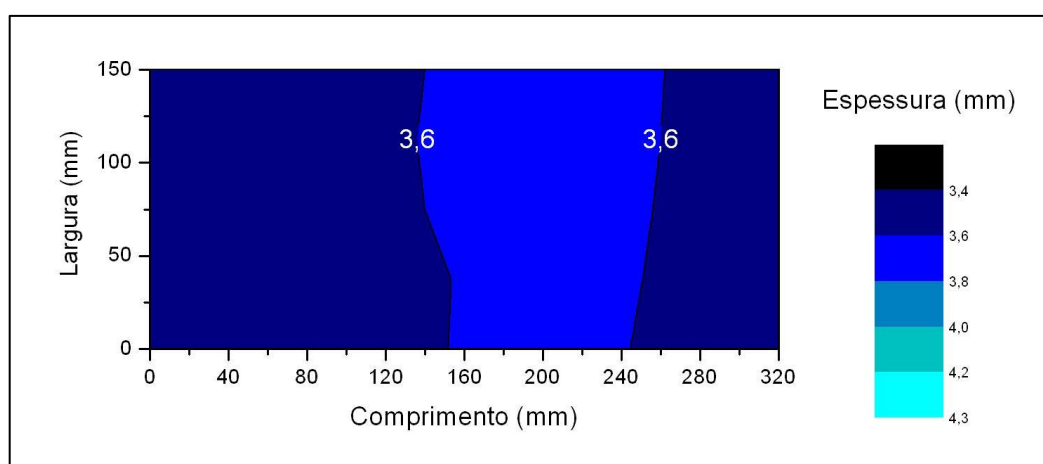


Figura 5.5 – Mapa de espessura de compósito moldado com resina epóxi e 1 manta de fibra de sisal.

5.3. DETERMINAÇÃO DA PERMEABILIDADE EM INFILTRAÇÕES RETILÍNEAS E RADIAIS

Três transdutores de pressão em linha foram usados nos experimentos de infiltração, ou seja, três curvas de pressão foram obtidas, como mostra a Figura 5.6 para um experimento típico. As pressões medidas nos transdutores aumentam com o tempo, tendendo a diferentes níveis de platô, visto que estão localizados em posições diferenciadas no molde. Entretanto, devido às dimensões limitadas do molde, somente no transdutor 1, conectado junto ao ponto de injeção, a pressão alcança um platô (pressão de injeção constante) e, portanto, todos os cálculos de permeabilidade foram feitos considerando apenas este transdutor.

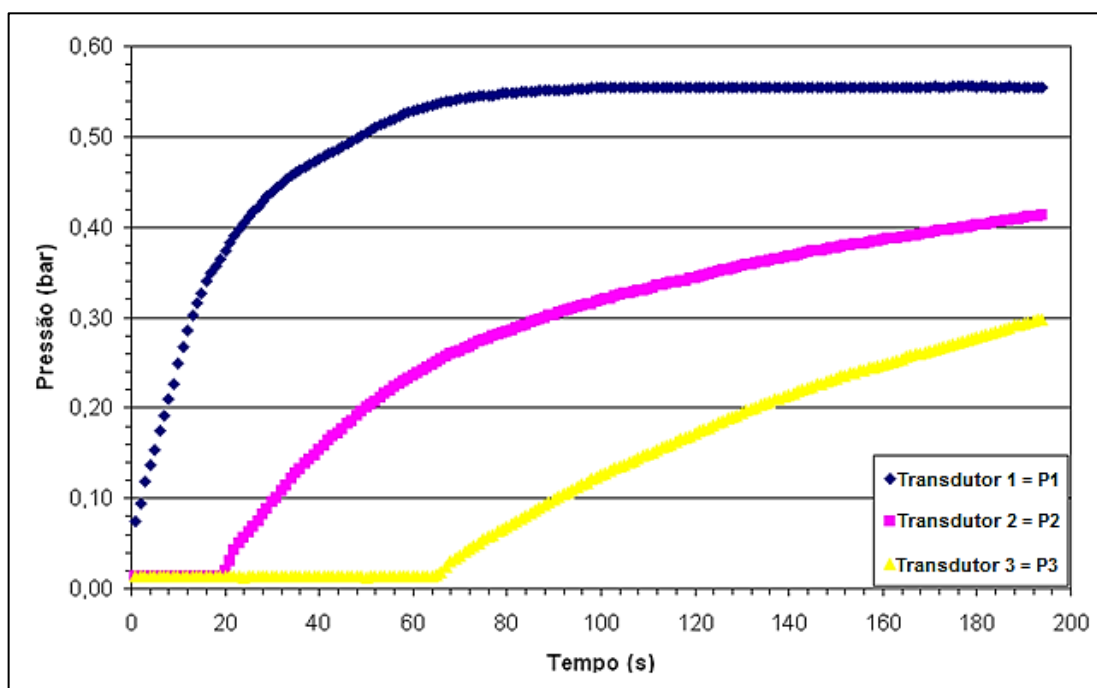


Figura 5.6 – Curvas de leituras reais dos transdutores de pressão versus tempo para um experimento típico de infiltração.

Os experimentos preliminares de infiltração retilínea e radial para determinação da permeabilidade foram nomeados conforme o tipo de infiltração (se Retilínea – RET ou Radial – RAD), a fração volumétrica de fibras utilizada e pressão pré-ajustada no controlador, e.g. RET_18,9/0,10 (representa uma infiltração retilínea,

com $\%V_f = 18,9\%$ e $P_{\text{pré-ajustada}} = 0,10$ bar) e RAD_19,3/0,60 (representa uma infiltração radial, com $\%V_f = 19,3\%$ e $P_{\text{pré-ajustada}} = 0,60$ bar).

A Figura 5.7 mostra os dados sincronizados de pressão com as leituras das posições da frente de fluxo do fluido para um experimento típico. Verifica-se que a velocidade do fluido decresce com o tempo devido ao aumento contínuo da resistência ao fluxo do fluido, matematicamente, isso se dá pela diminuição do gradiente dP/dx .

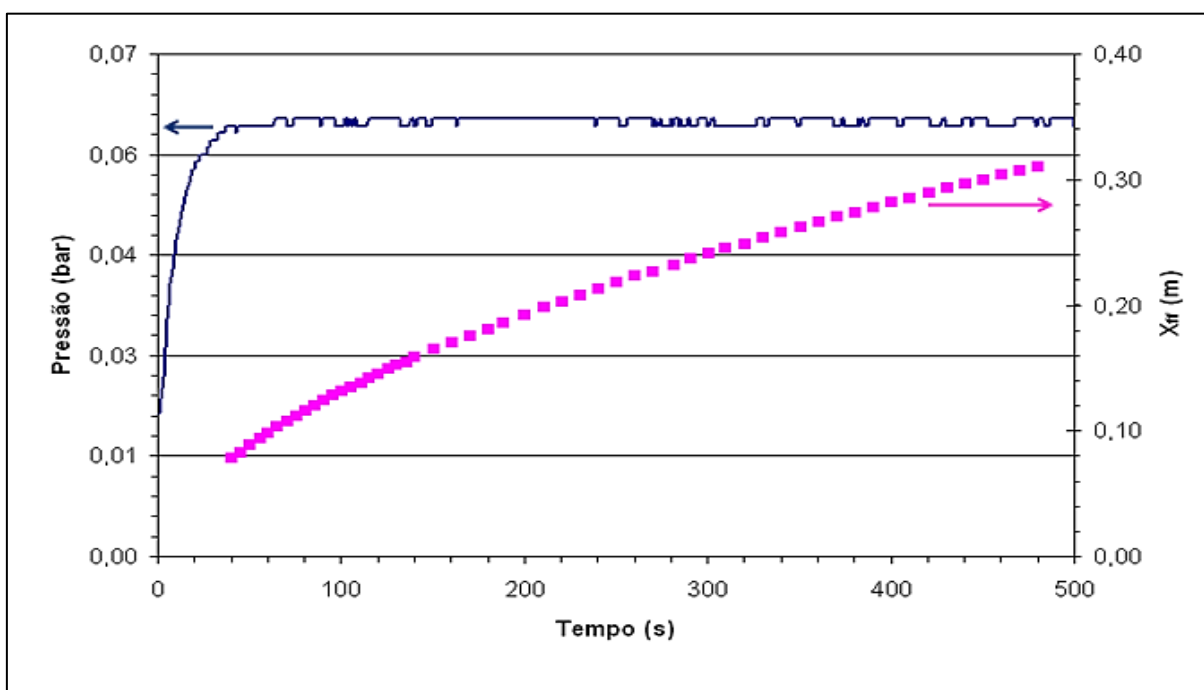


Figura 5.7 – Curvas de leituras sincronizadas da posição da frente de fluxo do fluido e pressão para um experimento típico de infiltração.

A Figura 5.8 mostra a evolução da posição com o tempo para diferentes experimentos. Neste trabalho, o tempo de preenchimento foi definido como o tempo em que a frente de fluxo do fluido leva para alcançar as portas de saída do molde à medida que impregna um reforço fibroso. Avaliou-se que, para experimentos com aproximadamente o mesmo $\%V_f$, o aumento da pressão provocou uma redução considerável no tempo de preenchimento do molde. Para a pressão de 0,10 bar, o tempo de preenchimento foi de aproximadamente 2280 s, enquanto para as

pressões de 0,35, 0,60 e 1,1 bar os tempos de preenchimento foram inferiores a 400 s, ou seja, uma redução superior a 80%. Comportamento similar foi observado nas infiltrações radiais, onde o tempo de preenchimento diminuiu de 1220 s para 235 s, uma redução de aproximadamente 80%, quando a pressão aumentou de 0,10 para 0,35 bar.

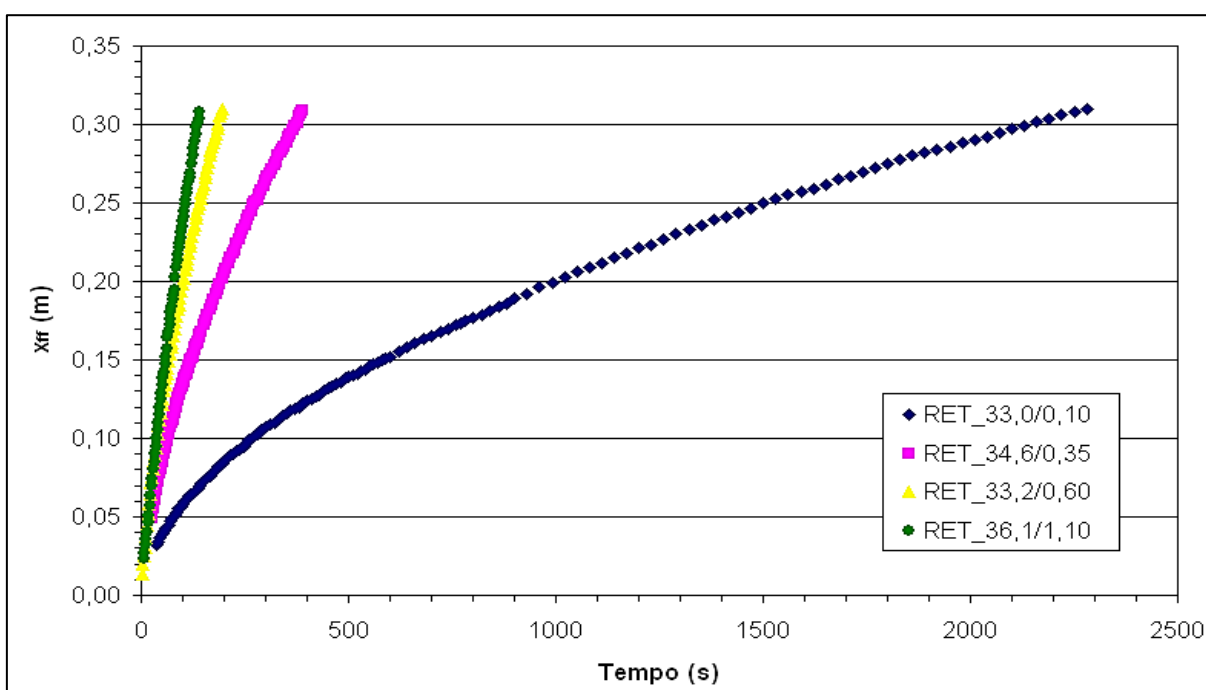


Figura 5.8 – Curvas de leitura da posição da frente do fluido com o tempo para experimentos retilíneos tradicionais com similares frações volumétricas de fibras e diferentes pressões de injeção.

Através das Equações (3.4) e (3.5) plotam-se, respectivamente, as curvas com comportamento linear de x_{ff}^2 vs. tempo e Φ vs. tempo (onde $\Phi = \ln(r_{ff}/r_{inj}) - 1/2 \cdot (r_{ff}^2 - r_{inj}^2)$) vs. tempo, de onde a permeabilidade (K) dos reforços fibrosos é obtida a partir da declividade das retas linearmente regredidas. Visualmente, as diferentes declividades das retas para experimentos realizados indicam qualitativamente diferenças na permeabilidade dos reforços fibrosos testados, sendo maior K quanto maior a inclinação da reta. Na Figura 5.9, verifica-se o comportamento das infiltrações retilíneas sob pressão variável e com reforços fibrosos homogêneos de FV cuja fração volumétrica de fibras manteve-se constante

na faixa entre 33,0 e 36,1%. Os valores de permeabilidade, indicados pela declividade da reta, aumentaram com a pressão de injeção, de 0,10 a 1,10 bar. O aumento na pressão de injeção força o fluido a permear com maior velocidade no reforço fibroso, inferindo-se magnitudes de permeabilidade ampliadas.

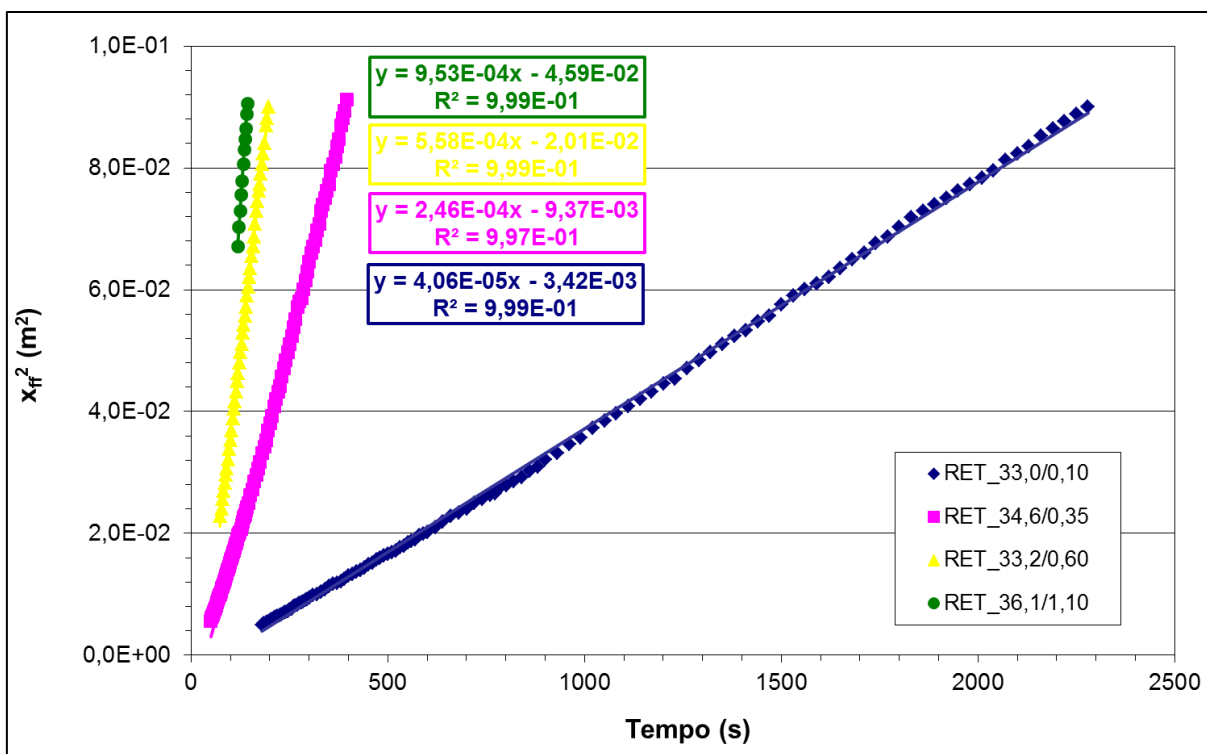


Figura 5.9 – Curvas de x_{ff}^2 vs. tempo para experimentos retilíneos tradicionais com fração volumétrica de fibra similar e diferentes pressões de injeção (linhas de tendência representam ajustes lineares).

Na Figura 5.10, observa-se para infiltrações radiais sob pressão constante, que a permeabilidade aumentou com a diminuição da $\%V_f$, como já era esperado. Os valores de permeabilidade podem ser vistos na Tabela 5.4, confirmando que $K_{RAD_{26,8/0,10}} > K_{RAD_{28,9/0,10}} > K_{RAD_{32,3/0,10}}$. A mesma tendência foi observada nas infiltrações retilíneas, isto é, $K_{RET_{18,9/0,10}} > K_{RET_{21,3/0,10}} > K_{RET_{25,8/0,10}} > K_{RET_{28,7/0,10}} > K_{RET_{33,0/0,10}}$.

Na Tabela 5.4, vê-se que, dependendo da $\%V_f$ utilizada, há pouca diferença de permeabilidade com o aumento da pressão, como para os experimentos

RET_18,9/0,10 e RET_19,6/0,60, e para RET_33,0/0,10 e RET_34,6/0,35. Porém, os tempos de preenchimento diminuem significativamente. Isso porque os poros do reforço fibroso são ocupados mais rapidamente sem que a pressão afete muito a resistência à impregnação do fluido, i.e. a característica de permeabilidade. Para infiltrações retilíneas com pressão de injeção constante, observa-se que a permeabilidade diminuiu com o aumento da $\%V_f$, com um coeficiente de variação máximo de 11%. Tal comportamento também pode ser visto na Figura 5.10.

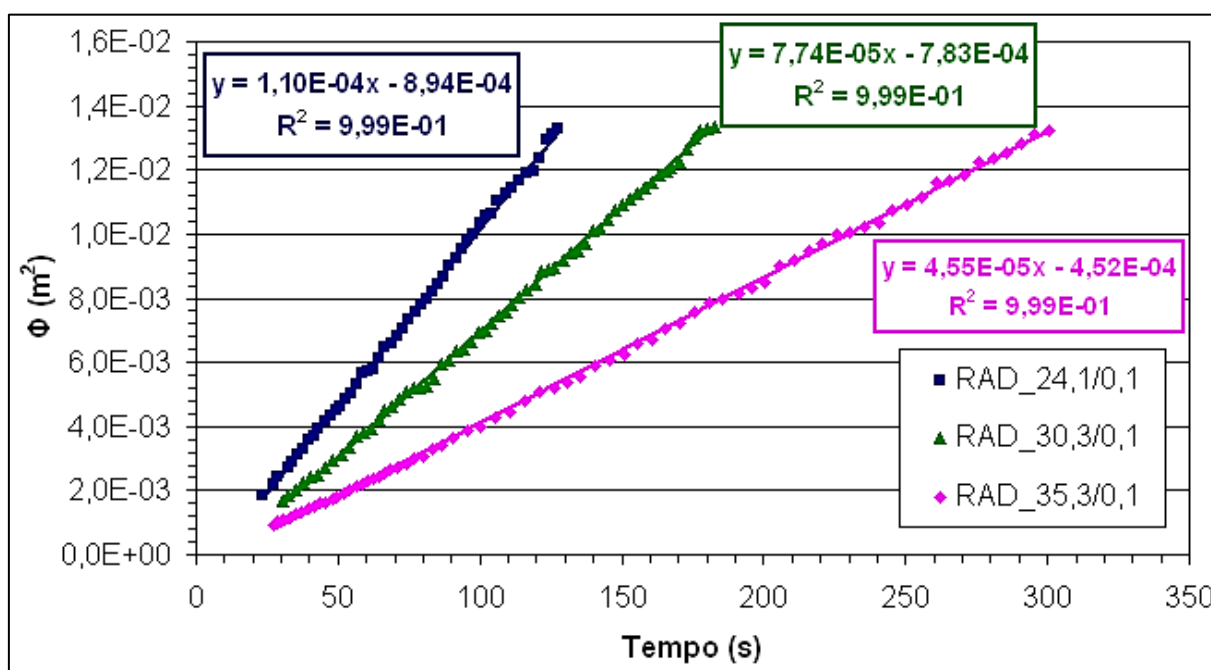


Figura 5.10 – Curvas de Φ vs. tempo para experimentos radiais tradicionais com diferentes frações volumétricas de fibras e mesma pressão de injeção (linhas de tendência representam ajustes lineares).

Olivero *et al.* [86] apresentaram resultados em que a permeabilidade diminui com fração volumétrica (6,83% a 24,83%) de mantas de fibra de vidro no interior do molde, i.e. utilizando-se solução de água e xarope de milho como fluido impregnante. A permeabilidade reportada para o reforço com $\%V_f \approx 25\%$ (para 12 mantas finas de fibra de vidro) foi de $K = 2,33 \times 10^{-10} \text{ m}^2$.

As curvas de tendência plotadas na Figura 5.11 ilustram a variação da permeabilidade em razão da $\%V_f$ e da P_{inj} . Considerando-se o efeito da variação da

pressão de injeção para um $\%V_f$ constante, vê-se que a permeabilidade apresentou um leve aumento, i.e. $K_{RET_18,9/0,10} < K_{RET_19,6/0,60}$, $K_{RET_25,8/0,10} < K_{RET_25,9/0,6}$, $K_{RET_28,7/0,10} < K_{RET_29,9/0,60} < K_{RET_31,2/1,10}$. Para $\%V_f = 25\%$, a permeabilidade aumenta de 4,8 para $6,1 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ (um aumento de aproximadamente 28%), quando a pressão aumentou 6x, passando de 0,10 para 0,60 bar, respectivamente.

Tabela 5.4 – Permeabilidade, tempo de estabilização da pressão e tempo total de preenchimento do molde por óleo de soja para as infiltrações retilíneas tradicionais com diferentes frações volumétricas de fibras e pressões de injeção.

Infiltrações retilíneas	K (10^{-10} m^2)	Tempo de estabilização da pressão (s)	Tempo de preenchimento do molde (s)
RET_18,9/0,10	11,2	42	413
RET_21,3/0,10	7,91	37	480
RET_25,8/0,10	4,58	36	890
RET_28,7/0,10	3,02	25	1272
RET_33,0/0,10	1,74	30	2280
RET_34,6/0,35	1,78	42	392
RET_19,6/0,60	12,3	61	67
RET_25,9/0,60	5,19	85	117
RET_29,9/0,60	3,91	63	134
RET_33,2/0,60	2,41	74	196
RET_31,2/1,10	4,04	89	105
RET_36,1/1,10	2,15	118	143

Na Tabela 5.5, mostram-se os valores de permeabilidade e os tempos de preenchimento das infiltrações radiais, sendo observado nesses experimentos um coeficiente de variação máximo de 11%. Conforme ocorreu nas infiltrações

retilíneas, verificou-se que nas infiltrações radiais o aumento da $\%V_f$ (e sob pressão constante) resultou em redução nos valores de permeabilidade do reforço fibroso ($K_{RAD_24,1/0,10} > K_{RAD_30,3/0,10} > K_{RAD_35,3/0,10}$) e aumento dos tempos de preenchimento. Variando-se a pressão de injeção de 0,10 para 0,35 bar, as permeabilidades calculadas apresentaram valores muito próximos ($K_{RAD_35,3/0,10} = 1,81 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ e $K_{RAD_35,0/0,35} = 1,77 \times 10^{-10} \text{ m}^2$), porém o tempo de preenchimento foi aproximadamente 5 vezes menor. Para as infiltrações radiais em que foram utilizadas pressões de injeção de 0,60 e 1,10 bar, não foi possível calcular os valores de permeabilidade uma vez que a velocidade de infiltração do fluido através dos reforços homogêneos, cujo $\%V_f$ estava entre 19 e 35%, foi relativamente rápida a ponto de não permitir a estabilização da pressão, como requer a lei de Darcy.

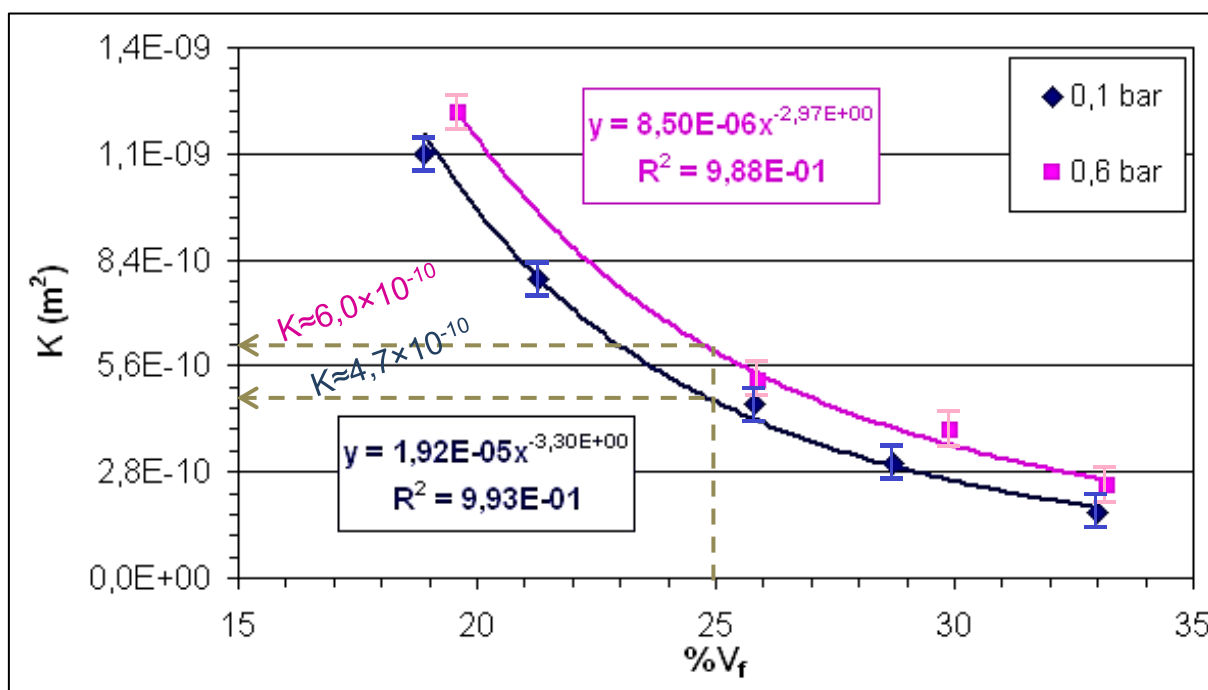


Figura 5.11 – Curvas isobáricas de K vs. $\%V_f$ para as infiltrações retilíneas em função da pressão de injeção aplicada (linhas de tendência representam ajustes de potência).

Tabela 5.5 – Permeabilidade, tempo de estabilização da pressão e tempo total de preenchimento do molde pelo óleo de soja para infiltrações radiais tradicionais com diferentes frações volumétricas de fibras e pressões de injeção.

Infiltrações radiais	K (10^{-10} m ²)	Tempo de estabilização da pressão (s)	Tempo de preenchimento (s)
RAD_24,1/0,10	5,37	23	481
RAD_30,3/0,10	3,46	30	690
RAD_35,3/0,10	1,81	27	1220
RAD_35,0/0,35	1,77	52	235
RAD_19,3/0,60	<i>Valores não obtidos visto que a pressão de injeção não estabilizou.</i>		37
RAD_25,1/0,60			65
RAD_30,0/0,60			104
RAD_34,9/0,60			126
RAD_31,3/1,10			68

Na Figura 5.12, comparam-se os resultados de permeabilidade em infiltrações retilíneas e radiais. A maior variação encontrada na permeabilidade foi de aproximadamente 17% para $P_{inj} = 0,10$ bar e $\%V_f$'s de 25,8% (infiltração retilínea) e 24,1% (infiltração radial). Já para pressão de 0,35 bar, a permeabilidade obtida para $\%V_f = 34,6\%$ no experimento retilíneo foi de $1,74 \times 10^{-10}$ m², enquanto que a permeabilidade para $\%V_f = 35,0\%$ no experimento radial foi de $1,77 \times 10^{-10}$ m², ou seja, uma variação na permeabilidade inferior a 2%. Assim, considerando que os $\%V_f$'s não são exatamente os mesmos em cada caso, pode-se concluir que os dois métodos de avaliação da permeabilidade se equivalem, pois as diferenças nas medidas estão dentro de um coeficiente de variação percentual máxima de 11%, ou seja, não foram significativas (principalmente em alto $\%V_f$) para uma mesma pressão de injeção.

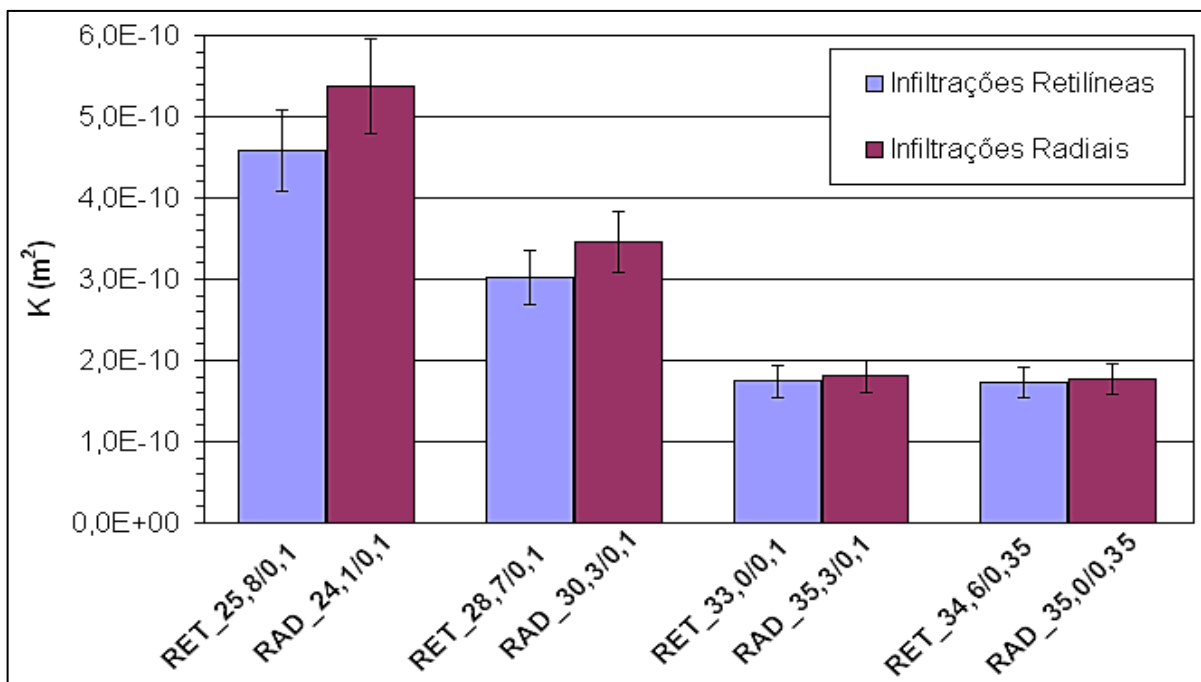


Figura 5.12 – Comparativo de K para infiltrações retilíneas e radiais em condições similares de frações volumétricas de fibras e pressões de injeção.

5.4. INFLUÊNCIA DO TIPO DE FLUIDO NA PERMEABILIDADE DE REFORÇOS HOMOGÊNEOS

O ângulo de contato (Θ) é determinado pela interação fluido-fibra, e esse mostra um indicativo do grau de molhabilidade do líquido nas fibras. Como indicado por Luo *et al.* [12], uma maior influência de um determinado fluido em experimento de medição da permeabilidade pode ser esperada quando a fração volumétrica é alta e quando os fluidos são bem diferentes em relação a propriedades de molhabilidade e tensão superficial.

Na Tabela 5.6 é possível visualizar os resultados obtidos neste trabalho para ângulo de contato dos fluidos, i.e. soluções aquosas de glicerina, resina poliéster e óleo de soja, sobre fibras de vidro, sisal NT e sisal T. Na Figura 5.13 pode-se verificar a indicação do ângulo de contato que a gota de solução de glicerina 85:15 em equilíbrio faz com as fibras de vidro (Θ') e sisal (Θ''), por exemplo. Nesse caso, a molhabilidade da solução 85:15 na fibra de sisal é maior, pois o ângulo de contato encontrado foi menor ($\Theta'' = 26^\circ$), se comparado ao da fibra de vidro ($\Theta' = 34^\circ$).

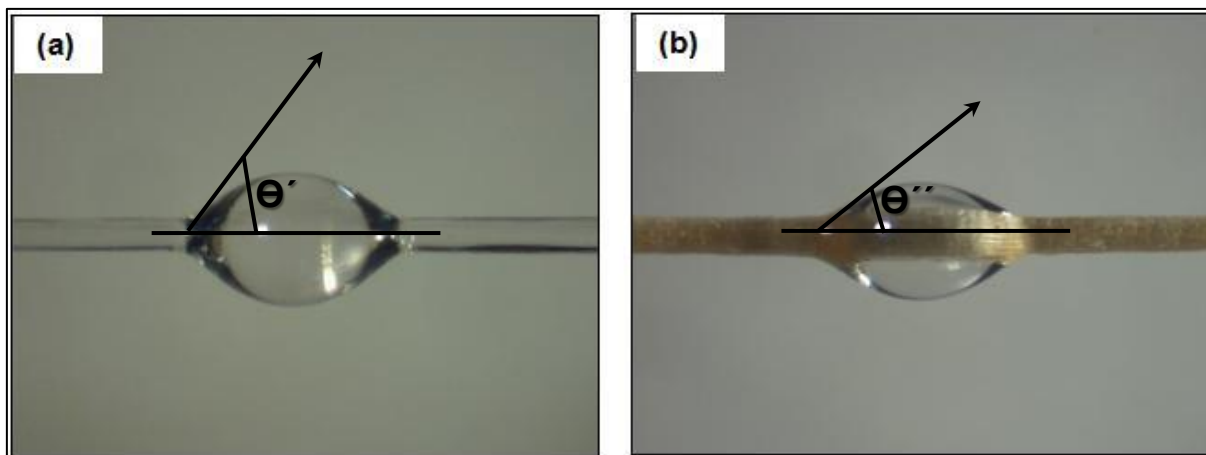


Figura 5.13 – Ângulo de contato da gota de solução de Glic./H₂O 85:15 na superfície da fibra de vidro (a) e fibra de sisal (b).

Pela análise da Tabela 5.6, notou-se que o tipo de fluido influenciou de maneira diferente nos valores de permeabilidade dos reforços fibrosos em infiltrações retilíneas (% V_f constante de 20%). Com o aumento do teor de água nas soluções de Glic./H₂O (85:15, 70:30 e 50:50) e conseqüente diminuição da viscosidade (mostrado na seção 5.1), verificou-se que a permeabilidade de mantas de fibra de vidro aumentou de 0,81 a $1,07 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ com o aumento do ângulo de contato (de 34° para 44°). Portanto, o aumento de 32% na permeabilidade foi resultante da ação combinada de menor molhabilidade e menor viscosidade para a solução de glicerina 50:50 no reforço, o qual ofereceu menor resistência ao fluxo do fluido nessa condição.

O tempo de preenchimento sofreu significativa queda para os experimentos utilizando-se soluções aquosas de glicerina, de 936 para 71 s, uma vez que foi influenciado primordialmente pela diminuição da viscosidade em razão do aumento de volume de água nos respectivos fluidos à base de glicerina, quando em contato com mantas de fibras de vidro. A solução de glicerina 50:50 e a resina poliéster, cujos ângulos de contato com fibra de vidro são da ordem de 44° e 41° , respectivamente, mostraram diferença de aproximadamente 20% entre resultados de permeabilidade, i.e. $1,07$ e $0,89 \times 10^{-9} \text{ m}^2$, contudo apresentem tempos de preenchimento muito diferentes também em razão da diferença de viscosidade dos fluidos.

Tabela 5.6 – Permeabilidade de mantas de vidro e sisal em função do tipo de fluido ($\%V_f = 20\%$, $P_{\text{pré-ajustada}} = 0,10 \text{ bar}$).

Mantas	Fluido	Ângulo de contato ($^\circ$)	K (10^{-9} m^2)	Tempo de preenchimento (s)
Fibra de vidro ($\varnothing_{\text{feixe}} = 66 \pm 18 \mu\text{m}$ e $\varnothing_{\text{mono}} = 6 \pm 3 \mu\text{m}$)	Glic./H ₂ O 85:15	34 ± 1	$0,81 \pm 0,03$	936
	Glic./H ₂ O 70:30	38 ± 2	$0,84 \pm 0,07$	264
	Glic./H ₂ O 50:50	44 ± 2	$1,07 \pm 0,01$	71
	Poliéster UC 2080	41 ± 1	$0,89 \pm 0,03$	4560
	Óleo de soja	40 ± 2	$1,28 \pm 0,15$	350
Sisal NT ($\varnothing = 175 \pm 47 \mu\text{m}$)	Solução 85:15	26 ± 2	$1,97 \pm 0,09$	408
	Óleo de soja	31 ± 5	$3,82 \pm 0,20$	105
Sisal T ($\varnothing = 165 \pm 31 \mu\text{m}$)	Solução 85:15	27 ± 2	$1,93 \pm 0,15$	420
	Óleo de soja	40 ± 1	$3,78 \pm 0,25$	110

Amico *et al.* [84] estimaram a permeabilidade de reforços com camadas de tecido de fibra de vidro usando-se óleo de silicone ($\mu = 115 \text{ cP}$, $\sigma = 23 \times 10^{-3} \text{ N/m}$ e $\Theta = 21^\circ$) e resina epóxi ($\mu = 1900 \text{ cP}$, $\sigma = 44 \times 10^{-3} \text{ N/m}$ e $\Theta = 57^\circ$) como fluidos impregnantes e verificaram que os experimentos com epóxi foram muito mais lentos do que com silicone devido à grande diferença de viscosidade. Concluíram que, embora os fluidos apresentem características distintas de tensão superficial ($\sigma_{\text{epóxi}} \approx 2 \times \sigma_{\text{silicone}}$) e de ângulo de contato ($\Theta_{\text{epóxi/vidro}} \approx 3 \times \Theta_{\text{silicone/vidro}}$), as permeabilidades medidas dos reforços foram aproximadamente iguais ($K_{\text{epóxi}} \approx 3,6 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ e $K_{\text{silicone}} \approx 3,7 \times 10^{-10} \text{ m}^2$), sendo então independentes do tipo de fluido.

Usando-se óleo de soja como fluido impregnante, maiores valores de permeabilidade foram obtidos para todas as fibras. Isso pode estar relacionado ao caráter hidrofóbico do óleo que impregna mais facilmente os poros do reforço sem interagir muito com a superfície da fibra. Os maiores valores de permeabilidade

encontrados para manta de fibra vegetal ($\approx 3,8 \times 10^{-9} \text{ m}^2$) em comparação à manta de fibra sintética ($\approx 1,3 \times 10^{-9} \text{ m}^2$) ocorreram devido à possibilidade do reforço de sisal desenvolver canais mais largos (espaços vazios ou poros) para o fluido impregnar e também devido à presença do ligante (*binder*) nas mantas de vidro.

Finalmente, foi possível verificar também que o tipo de tratamento superficial da fibra vegetal não afetou significativamente os valores de permeabilidade para um mesmo fluido, mesmo com diferenças nas características de molhabilidade observadas após o tratamento superficial da fibra de sisal. Para o sisal NT e T, a permeabilidade dos reforços resultou em uma insignificante variação de aproximadamente 2%, passando de 1,97 para $1,93 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ com a solução de glicerina 85:15, enquanto que, usando-se óleo de soja, a permeabilidade não variou, sendo $\approx 3,8 \times 10^{-9} \text{ m}^2$. Nesses experimentos, os tempos de preenchimento foram superiores para as fibras tratadas com álcali, passando de 408 para 420 s com a solução de glicerina 85:15, e de 105 para 110 s com o óleo de soja.

Tais resultados podem ser corroborados pelos estudos realizados por Rodriguez *et al.* [87], os quais evidenciaram que os tempos de infiltração obtidos foram maiores para as fibras de juta mercerizadas pois o tratamento alcalino promoveu a sua fibrilação, i.e. provocou a formação de fendas ao longo do eixo da fibra. No entanto, este efeito não foi suficiente para alterar a permeabilidade, visto que os reforços ($\%V_f = 30\%$) com fibras apresentaram valores muito similares, i.e. $K_{\text{juta não-tratada}} = 4,25 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ e $K_{\text{juta tratada}} = 4,63 \times 10^{-9} \text{ m}^2$.

5.5. INFLUÊNCIA DO COMPRIMENTO DAS FIBRAS DE SISAL E DA SUA FRAÇÃO VOLUMÉTRICA NA PERMEABILIDADE DE MANTAS

A Tabela 5.7 mostra os valores de permeabilidade de mantas de sisal com diferentes comprimentos de fibra ($L = 1-100 \text{ mm}$) e $\%V_f = 20\%$, utilizando-se como fluido impregnante o óleo de soja em infiltrações retilíneas, com pressão de injeção pré-ajustada a 0,10 bar. Foi possível verificar que todas as mantas apresentaram elevados valores de permeabilidade. Comparando-se, por exemplo, com mantas de fibra de vidro, para um mesmo $\%V_f$, o sisal mostrou-se 3 vezes mais permeável.

Além disso, houve um aumento da permeabilidade com o comprimento da fibra, até que se atingiu um platô a partir de $L = 30$ mm, chegando-se a $K \approx 4,0 \times 10^{-9} \text{ m}^2$. O oposto ocorreu com os tempos de preenchimento que decresceram, estabilizando em 102-110 s. Esses experimentos também mostraram boa reprodutibilidade, com desvios relativamente baixos. Umer *et al.* [88] também relataram que o aumento do comprimento da fibra de linho em mantas promoveu o aumento da permeabilidade planar em relação às fibras mais curtas.

Analisando-se o tratamento superficial da fibra com $L = 40$ mm, verificou-se que este não foi relevante para variar a permeabilidade do reforço, indicando que o beneficiamento da fibra pode melhorar as propriedades mecânicas sem prejudicar o processamento. Considerando que não houve variação significativa da permeabilidade das mantas de sisal acima de 20 mm e que o tamanho de 40 mm é comumente utilizado em mantas de fibras sintéticas, este comprimento foi escolhido como padrão para as comparações com diferentes materiais e sequências de empilhamento que serão apresentadas posteriormente.

Tabela 5.7 – Permeabilidade, tempo total de preenchimento do molde e viscosidade dinâmica do óleo para as infiltrações retilíneas em manta de fibra de sisal ($\%V_f = 20\%$, $P_{\text{pré-ajustada}} = 0,10$ bar).

Comprimento da fibra	Tratamento da fibra com NaOH	K (10^{-9} m^2)	Coefficiente de variação	Tempo de preenchimento (s)
1 mm	Não	$0,84 \pm 0,03$	4%	398
10 mm	Não	$3,16 \pm 0,36$	11%	122
20 mm	Não	$3,61 \pm 0,07$	2%	110
30 mm	Não	$4,00 \pm 0,20$	5%	104
40 mm	Não	$3,82 \pm 0,20$	5%	106
	Sim	$3,78 \pm 0,28$	8%	110
50 mm	Não	$3,78 \pm 0,14$	4%	104
100 mm	Não	$3,88 \pm 0,17$	4%	102

Adicionalmente, foram produzidas mantas de fibras de sisal, estabelecendo-se $\%V_f$ de 10, 15, 20, 25 e 30% para medidas de permeabilidade em infiltrações retilíneas com óleo de soja utilizando-se pressão injeção pré-ajustada a 0,10 bar. A Figura 5.14 mostra esses resultados juntamente com uma linha de tendência potencial num intervalo de confiança superior a 99%, e verifica-se que a permeabilidade diminuiu progressivamente e significativamente ($\approx 88\%$) com o teor volumétrico de fibras.

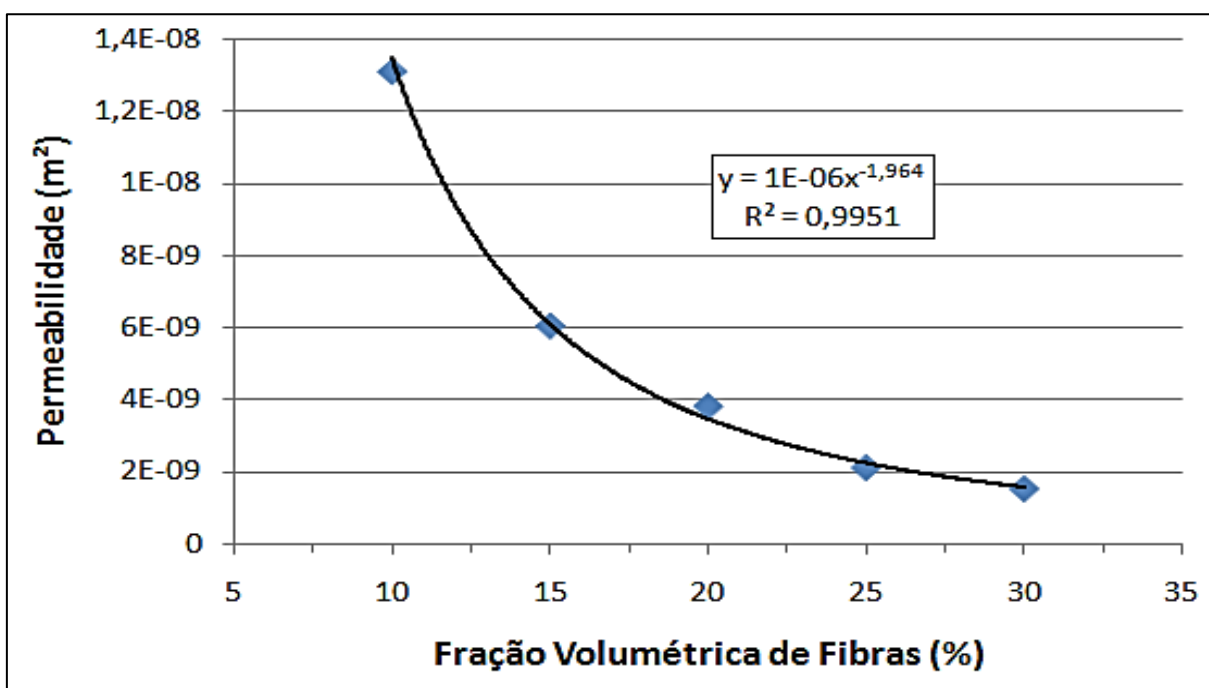


Figura 5.14 – Variação de K de mantas de sisal em função da fração volumétrica de fibras ($P_{\text{pré-ajustada}} = 0,10$ bar).

A diminuição da permeabilidade ocorre devido à diminuição do volume de canais disponíveis para o fluxo em consequência do maior teor de fibras, dificultando a infiltração do reforço. A variação mais significativa nos valores de permeabilidade ocorreu em baixos teores de fibras, quando a $\%V_f$ passou de 10 a 15%, resultando em um decréscimo de K em torno de 54%. Para altos teores de fibras, K sofreu redução de aproximadamente 28%, quando a $\%V_f$ passou de 25 a 30%. Para menores teores de fibra, uma determinada variação de porosidade causa diferença

significativa na tortuosidade do fluxo. Porém, quando a manta já está razoavelmente compactada, em maiores $\%V_f$'s, uma variação similar de porosidade não tem um efeito considerável nas características do fluxo. Este fenômeno também pode estar relacionado à resistência à compactação da manta, que será discutida posteriormente. Tortuosidade, isto é, a sinuosidade do caminho que deve ser atravessado pelo fluido ao impregnar o reforço é influenciada pela forma do reforço, anisotropia do material e teor de fibras [89] e afeta a infiltração, reduzindo a velocidade por aumentar a resistência do fluxo (permeabilidade) [34].

5.6. INFLUÊNCIA DO TIPO DE REFORÇO NA PERMEABILIDADE DE REFORÇOS HOMOGÊNEOS

Diferentes reforços fibrosos homogêneos de mantas de fibra de vidro, sisal e núcleo de PP foram avaliados de modo a se verificar influência do tipo de fibra na permeabilidade. A Figura 5.15 mostra a variação da posição da frente de fluxo com o tempo para esses reforços, todos com $\%V_f = 20\%$ e pressão de injeção pré-ajustada de 0,10 bar, usando-se óleo de soja como fluido em infiltrações retilíneas. Para esse tipo de gráfico, mantendo-se os parâmetros constantes de infiltração, uma maior declividade da reta implica diretamente em um maior valor de permeabilidade, como previsto pela Lei de Darcy [3,17,18,23]. Portanto, o reforço com fibra de sisal é o que possui o meio mais permeável, sendo seguido pelo núcleo de PP e a fibra de vidro, i.e. $K_{\text{Fibra de Sisal}} > K_{\text{Núcleo de PP}} > K_{\text{Fibra de Vidro}}$.

A Tabela 5.8 mostra os valores de permeabilidade dos reforços homogêneos estudados. Considerando primeiro os resultados para $\%V_f = 20\%$, para a fibra de vidro foi encontrada a permeabilidade média de $1,28 \times 10^{-9} \text{ m}^2$, com tempo de preenchimento de 350 s, enquanto o núcleo de PP apresentou permeabilidade cerca de 45% maior do que a FV, com redução de 40% no tempo de preenchimento. Para o reforço de fibra de sisal, o aumento da permeabilidade foi ainda maior, cerca de três vezes em relação à FV, com 70% de redução no tempo de preenchimento, isto é, o sisal permitiu uma impregnação muito mais rápida que os reforços comerciais com o mesmo $\%V_f$.

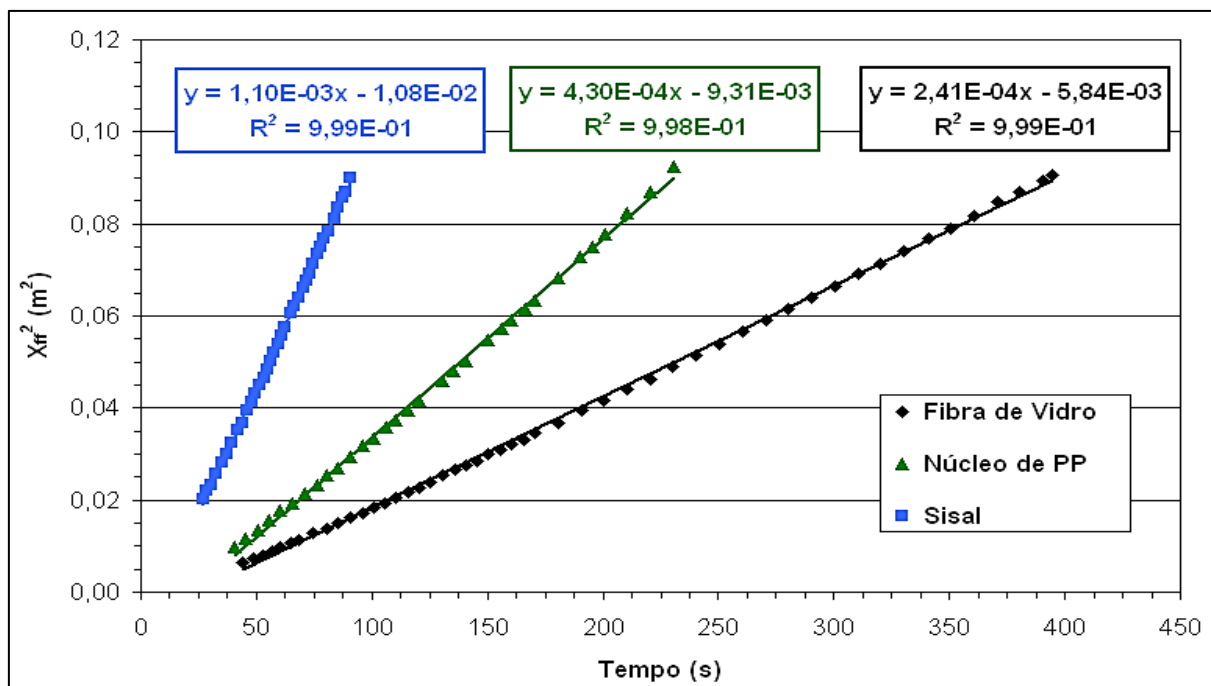


Figura 5.15 – Curvas de x_{ff}^2 versus tempo para os reforços homogêneos de FV, núcleo de PP e sisal com $\%V_f = 20\%$ e $P_{pré-ajustada} = 0,10$ bar (linhas de tendência representam ajustes lineares).

Como também apresentado na Tabela 5.8, a permeabilidade do reforço de fibra de vidro reduziu cerca de 38% quando o $\%V_f$ aumentou um pouco de 20 a 22,5%, e para o núcleo de PP houve redução em torno de 17%; em contrapartida, para o sisal houve um aumento de 22%. Materiais como o núcleo de PP são capazes de melhorar o fluxo de reforços fibrosos sintéticos através da criação de canais preferenciais de fluxo, sendo importantes na redução dos tempos de infiltração e permitindo a produção de peças relativamente grandes e com alto $\%V_f$. Analogamente, reforços de mantas de fibra de sisal poderiam ser utilizados como alternativa de substituição ao núcleo de PP, conforme o que foi apresentado na seção 5.6, pois apresenta tendência de manter canais livres para o fluxo, mesmo se suscetíveis a maior compressão em relação ao núcleo comercial de PP, o que é demonstrado na seção 5.10 deste trabalho.

O melhor desempenho do sisal comparado ao núcleo de PP nos testes de permeabilidade ocorreu devido à possibilidade do sisal desenvolver canais mais largos (espaços vazios) para o fluido impregnar com menor tortuosidade [69]. Além

disso, uma maior tortuosidade do reforço prejudica a permeabilidade transversal do mesmo [34]. A menor tortuosidade do sisal pode ser consequência do seu maior diâmetro (diâmetro médio = 195 μm [90]) em relação à fibra de polipropileno (diâmetro médio medido = 56 μm) e também porque as fibras de sisal apresentam maior heterogeneidade de diâmetro em um mesmo reforço [90], o que prejudica a compactação da camada e aumenta a permeabilidade.

Tabela 5.8 – Permeabilidade e tempo de preenchimento para diferentes reforços homogêneos ($P_{\text{pré-ajustada}} = 0,10 \text{ bar}$).

Reforço fibroso homogêneo	$\%V_f$ (%)	K (10^{-9} m^2)	K/K_{FV} (mesmo $\%V_f$)	Tempo de preenchimento médio (s)	Redução no tempo de preenchimento (mesmo $\%V_f$)
Fibra de Vidro	20,0	$1,28 \pm 0,15$	---	350	---
	22,5	$0,79 \pm 0,09$	---	480	---
Núcleo de PP	20,0	$1,86 \pm 0,23$	1,45	211	40%
	22,5	$1,55 \pm 0,17$	1,96	300	38%
Fibra de Sisal (L = 40 mm)	20,0	$3,82 \pm 0,20$	2,98	106	70%
	22,5	$3,67 \pm 0,31$	4,65	116	76%

As mantas de sisal foram também avaliadas em infiltrações radiais para verificação da sua isotropia em relação ao fluxo. Em infiltrações radiais, a resina é injetada através de uma porta centralizada no molde, e o fluido impregnante se propaga em formato circular ou elíptico. Para preformas isotrópicas a frente de fluxo do fluido terá formato circular, enquanto aquelas ortotrópicas produzirão um formato elíptico. Pode-se destacar como exemplos típicos de isotrópicos as mantas com fibras cortadas e distribuídas aleatoriamente ao longo da preforma [18].

As Figuras 5.16 e 5.17 mostram valores instantâneos dos raios da frente de fluxo do fluido nas direções “x” e “y” ao longo do tempo em infiltrações radiais com óleo de soja e pressão de injeção pré-ajustada em 0,10 bar em mantas de fibra de

vidro e de fibra de sisal, respectivamente. As curvas são apresentadas até que o fluido se aproxime do limite físico da largura do molde, próximo a 140 mm.

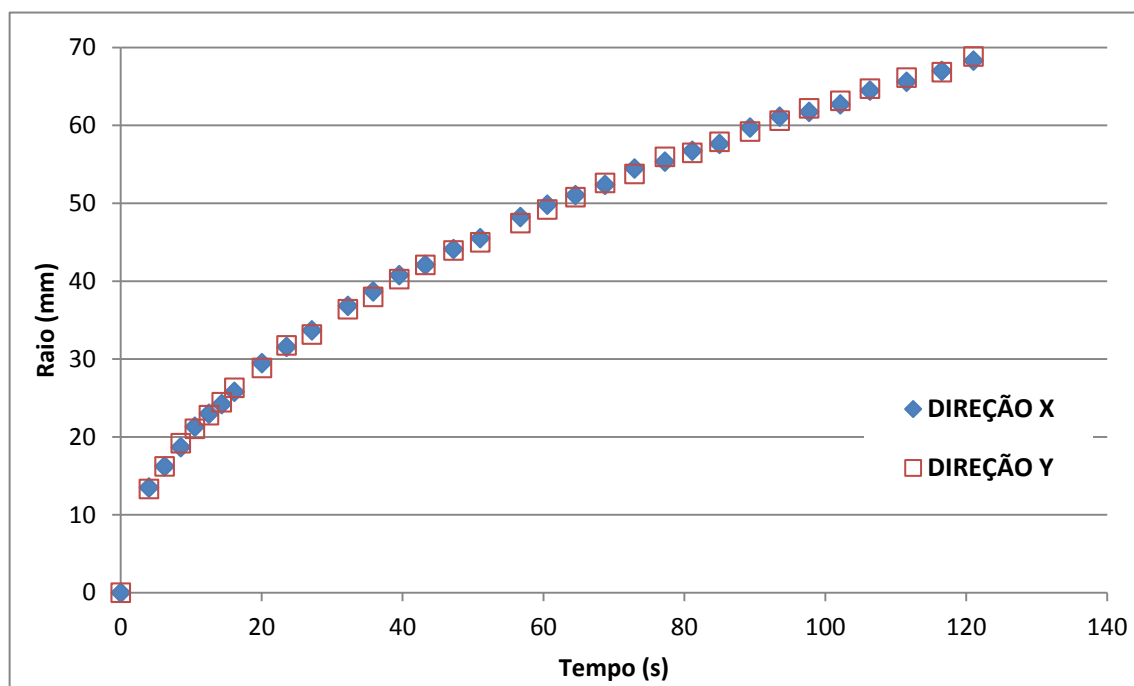


Figura 5.16 – Acompanhamento da infiltração radial do reforço de manta de fibra de vidro.

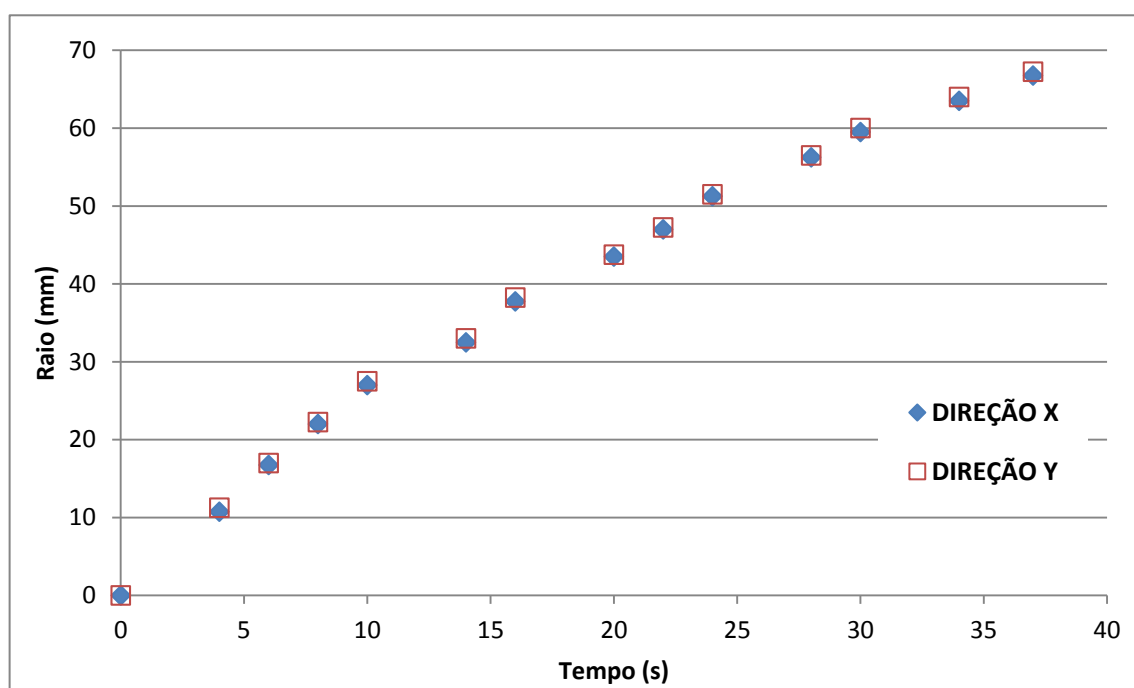


Figura 5.17 – Acompanhamento da infiltração radial do reforço de manta de fibra de sisal.

Avaliando-se a Figura 5.16, é possível observar para o reforço com mantas de fibra de vidro que os raios da frente de fluxo do fluido nas direções “x” e “y” praticamente se superpõem ao longo dos 120 s de infiltração, evidenciando que este reforço fibroso sintético é isotrópico. Da mesma forma, analisando os resultados da Figura 5.17, verifica-se que o reforço de fibra de sisal mostrou uma frente de fluxo do fluido praticamente circular, com raios na direção “x” e “y” também superpostos. Assim, conclui-se que o reforço de fibra vegetal manufaturado no laboratório também apresenta característica isotrópica, sendo esse outro fator importante para utilização como um promotor de fluxo alternativo ao núcleo de PP comercial.

5.7. INFLUÊNCIA DO TIPO DE FIBRA VEGETAL NA PERMEABILIDADE DE REFORÇOS HOMOGÊNEOS

Como mostrado na seção 5.7, o reforço de fibra de sisal apresentou permeabilidade superior em relação ao núcleo de PP, então, por isso, outras fibras vegetais (coco, curauá, juta e rami) foram comparativamente avaliadas na construção de mantas homogêneas seguindo a mesma preparação apresentada na seção 4.2.2.

A permeabilidade das mantas homogêneas com as diferentes fibras vegetais e mesmo teor de fibras ($\%V_f = 20\%$) foi medida experimentalmente e os resultados estão apresentados na Figura 5.18. Verificou-se que a manta de fibra de coco apresentou o maior valor de permeabilidade, $K_{\text{coco}} = 5,47 \times 10^{-9} \text{ m}^2$, enquanto que as mantas de fibra de juta e rami apresentaram os menores valores, sendo $K_{\text{juta}} = 3,50 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ e $K_{\text{rami}} = 3,43 \times 10^{-10} \text{ m}^2$.

O tempo de preenchimento do molde para as mantas de menor permeabilidade (juta e rami) foi cerca de treze vezes superior à manta de maior permeabilidade (coco). O melhor desempenho do coco comparado às outras fibras nos testes de permeabilidade ocorreu devido à possibilidade do coco desenvolver canais mais largos (espaços vazios) para o fluido impregnar com menor tortuosidade [91]. A menor tortuosidade do coco pode ser consequência do seu maior diâmetro (diâmetro médio = 301 μm) em relação às demais fibras (diâmetros médios inferiores

a 175 μm) e também porque as fibras de coco parecem apresentar maior heterogeneidade de diâmetro em um mesmo reforço, o que dificulta a compactação da camada e com isso aumenta a permeabilidade [88].

Se por um lado, a fibra de coco auxilia sobremaneira o processamento, por outro não contribui de forma significativa nas propriedades mecânicas de compósitos moldados. Quando a fibra de coco é comparada diretamente a outros tipos de fibras vegetais (e.g, curauá, juta e sisal), verifica-se desvantagem de utilização em compósitos em decorrência da sua resistência mecânica e módulo de elasticidade [44]. Por essa razão, o presente trabalho foi direcionado para a utilização de mantas de fibra de sisal em comparação ao núcleo de PP comercial como promotor de fluxo.

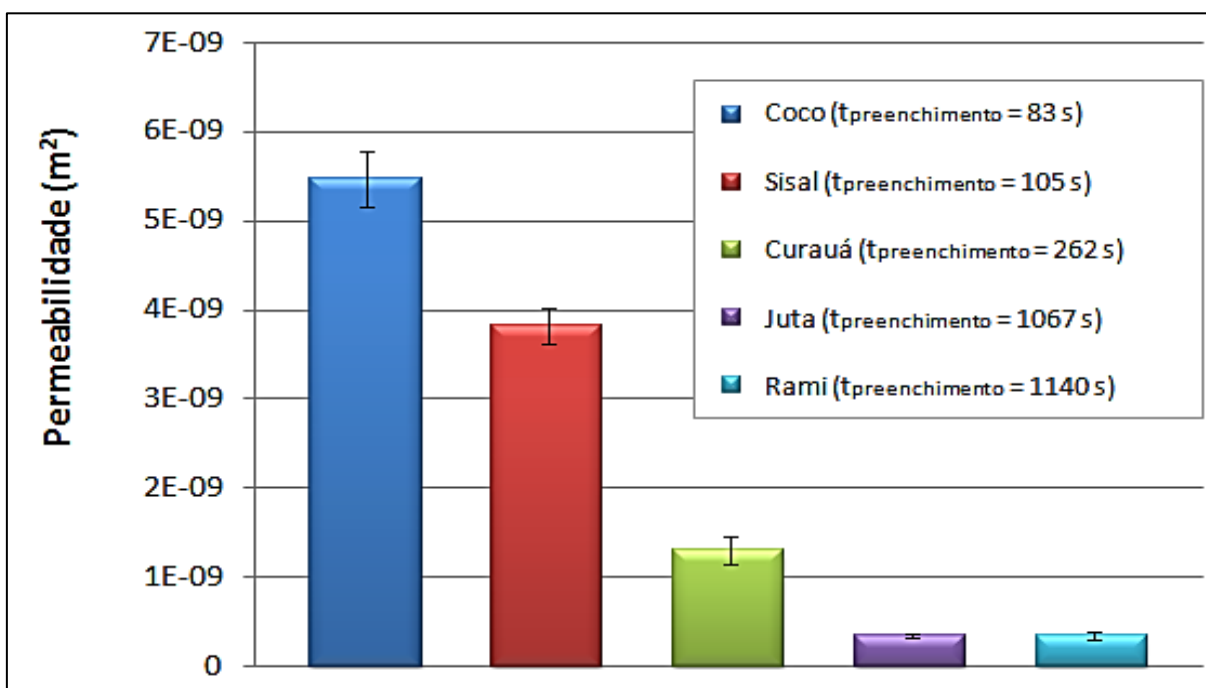


Figura 5.18 – Permeabilidade de mantas com diferentes fibras vegetais e respectivos tempos de preenchimento ($\%V_f = 20\%$ e $P_{\text{pré-ajustada}} = 0,10$ bar).

5.8. INFLUÊNCIA DO PROMOTOR DE FLUXO NA PERMEABILIDADE DE REFORÇOS HÍBRIDOS

Nesta parte da tese, determinou-se a permeabilidade global de reforços híbridos produzidos, visando avaliar o potencial da manta de fibra de sisal como

promotor de fluxo em comparação ao núcleo de PP comercialmente utilizado. Para isso, variou-se o teor volumétrico de fibras de vidro ($\%V_{FV} = 6,3\sim 24,3\%$), e manteve-se constante o teor de promotor de fluxo (e.g. $\%V_P = 6,7\%$ ou $\%V_S = 6,7\%$, se núcleo de PP ou sisal, respectivamente) dependendo do reforço híbrido manufacturado.

A Tabela 5.9 apresenta a nomenclatura para os reforços fibrosos híbridos produzidos com núcleo de PP comercial – $[V_4/P/V_4]$, $[V_3/P/V_3]$, $[V_2/P/V_2]$ e $[V/P/V]$ – e os reforços híbridos nos quais se utilizou a fibra de sisal como promotor de fluxo – $[V_4/S/V_4]$, $[V_3/S/V_3]$, $[V_2/S/V_2]$ e $[V/S/V]$, bem como os resultados de permeabilidade obtidos. Para facilitar a comparação, esses resultados foram também apresentados na forma de gráfico (Figura 5.19).

Tabela 5.9 – Permeabilidade determinada para reforços híbridos com promotores de fluxo.

Reforços*	Promotor de fluxo	$\%V_f$ total	K (10^{-9} m^2)	Tempo de preenchimento médio (s)
$[V_4/P/V_4]$	PP	31%	$0,63 \pm 0,10$	590
$[V_3/P/V_3]$	PP	26%	$1,10 \pm 0,20$	376
$[V_2/P/V_2]$	PP	20%	$2,03 \pm 0,16$	252
$[V/P/V]$	PP	13%	$4,81 \pm 0,24$	120
$[V_4/S/V_4]$	PP	31%	$0,83 \pm 0,14$ (+32%) ^a	400 (-32%) ^b
$[V_3/S/V_3]$	Sisal	26%	$1,73 \pm 0,23$ (+57%) ^a	225 (-40%) ^b
$[V_2/S/V_2]$	Sisal	20%	$2,99 \pm 0,13$ (+47%) ^a	182 (-28%) ^b
$[V/S/V]$	Sisal	13%	$7,27 \pm 0,19$ (+51%) ^a	101 (-16%) ^b

*V: Vidro; P: Núcleo de PP; S: Sisal. ^aVariação em K em relação ao análogo de núcleo de PP (%). ^bVariação no tempo de preenchimento em relação ao análogo núcleo de PP (%).

Pode-se notar claramente que a permeabilidade diminuiu com o aumento do teor total de fibras para os reforços híbridos, como esperado. Mais importante, a permeabilidade dos reforços híbridos com manta de sisal como promotor de fluxo foi sempre superior àqueles com o promotor de fluxo comercial, o núcleo de PP, na mesma fração volumétrica. Os promotores de fluxo são particularmente importantes na redução do tempo de infiltração para a produção de peças relativamente grandes e/ou com elevado teor de fibras.

Como a Tabela 5.9 mostra, o ganho em processabilidade foi mais significativo para os reforços híbridos com maior $%V_f$ total, de 31% (i.e. $[V_4/P/V_4]$ e $[V_4/S/V_4]$). Neste caso, a permeabilidade aumentou entre 32-57% e o tempo de preenchimento reduziu entre 16-40% quando se utilizou o sisal como promotor de fluxo, reforçando o potencial do sisal para esta finalidade.

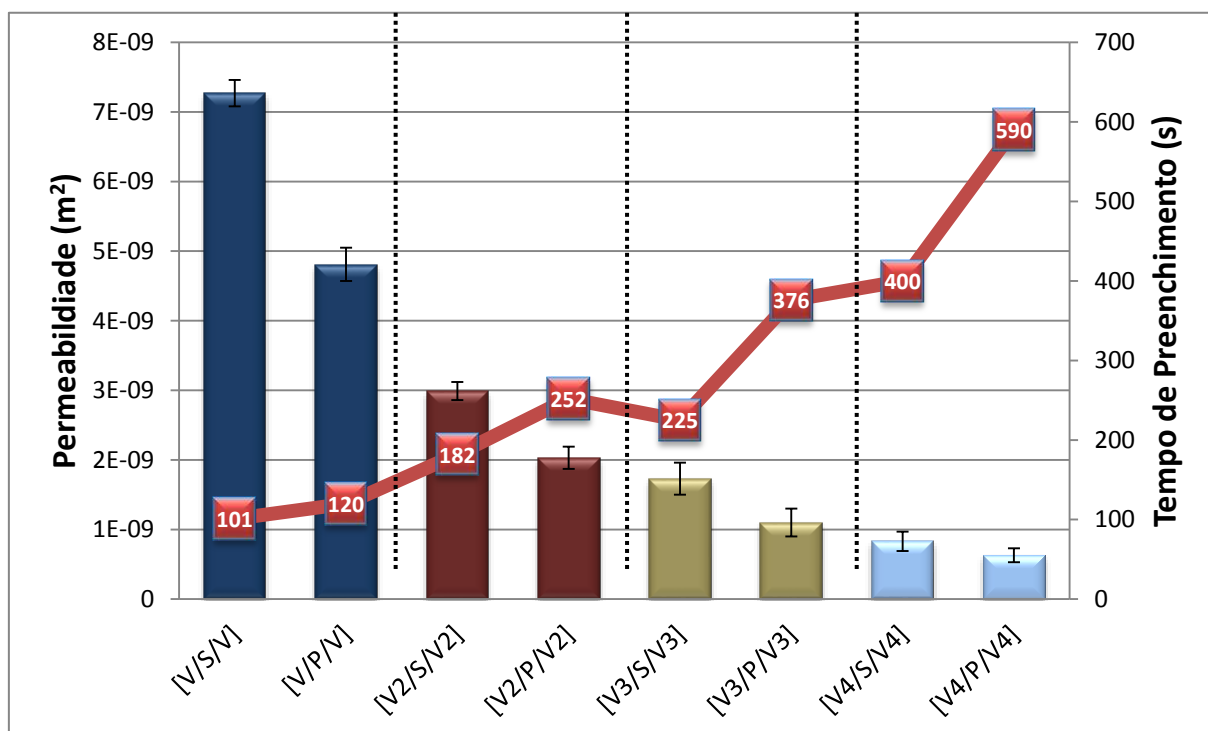


Figura 5.19 - Variação da permeabilidade e do tempo de preenchimento para os reforços híbridos com promotor de fluxo ($P_{\text{pré-ajustada}} = 0,10$ bar).

5.9. INFLUÊNCIA DA SEQUÊNCIA DE EMPILHAMENTO NA PERMEABILIDADE DE REFORÇOS HÍBRIDOS

Nesta parte do estudo, reforços híbridos foram construídos a fim de se tentar reproduzir reforços comercialmente disponíveis para RTM light e comparar seus respectivos desempenhos. Esses reforços comerciais possuem mantas de fibra de vidro nas extremidades (faces) e uma camada de alta permeabilidade no meio (e.g. núcleo de PP), formando um “sanduíche”.

O reforço híbrido produzido e nomeado como $[V_2/P/V_2]$ é bastante similar ao reforço comercial amplamente utilizado na produção de compósitos para o setor automotivo, que tem mantas de fibra de vidro com gramatura de 1200 g/m^2 e núcleo de PP com 250 g/m^2 . Como pode ser visto na Tabela 5.10, o valor de permeabilidade desse reforço, foi de $2,03 \times 10^{-9} \text{ m}^2$, enquanto para o reforço análogo $[V_2/S/V_2]$, onde o núcleo de PP é substituído por uma manta de sisal com mesmo teor de fibras, a permeabilidade aumentou $\approx 47\%$, alcançando $2,99 \times 10^{-9} \text{ m}^2$, com uma redução aproximada de 28% no tempo de preenchimento.

Tabela 5.10 – Permeabilidades medidas e tempos de preenchimento para reforços fibrosos híbridos com $\%V_f = 20\%$ e $P_{\text{pré-ajustada}} = 0,10 \text{ bar}$.

Reforço Fibroso Híbrido	K (10^{-9} m^2)	$K/K_{[V_2/P/V_2]}$	Tempo de Preenchimento (s)	Redução no tempo em relação ao $[V_2/P/V_2]$
$[V_2/P/V_2]$	2,03	---	250	---
$[V_4/P]$	2,45	1,21	212	15%
$[P/V_4]$	2,51	1,24	185	26%
$[V_2/S/V_2]$	2,99	1,47	182	27%
$[V_4/S]$	3,60	1,77	159	36%
$[S/V_4]$	3,71	1,83	134	46%

*V: Vidro; P: Núcleo de PP; S: Sisal.

A efetividade do reforço híbrido pode ser ampliada pela mudança na sequência de empilhamento das camadas constituintes. Se a camada mais permeável for colocada na face inferior do reforço, por exemplo, ($[V_4/P]$ ou $[V_4/S]$), i.e. mais próxima ao canal de injeção, em vez do centro do reforço, a permeabilidade aumenta para $2,45 \times 10^{-9}$ e $3,60 \times 10^{-9} \text{ m}^2$, respectivamente, com reduções nos tempos de preenchimento da ordem de 15 e 36% em comparação ao reforço original $[V_2/P/V_2]$ utilizado comercialmente. Se a camada mais permeável for colocada na face superior do reforço ($[P/V_4]$ ou $[S/V_4]$), o ganho em permeabilidade é similar ($2,51 \times 10^{-9}$ e $3,71 \times 10^{-9} \text{ m}^2$, respectivamente) e os tempos de preenchimento apresentam reduções ainda mais significativas (26 e 46%, respectivamente), em relação ao reforço padrão. Portanto, mesmo que a frente de fluxo real esteja um pouco defasada (atrasada) em relação à frente de fluxo aparente na imagem instantânea registrada, o posicionamento do promotor de fluxo (vegetal ou comercial) nas extremidades do reforço facilita a impregnação, e isto ocorre provavelmente devido ao favorecimento do fluxo transversal dentro do reforço, como ilustrado de forma qualitativa na Figura 5.20.

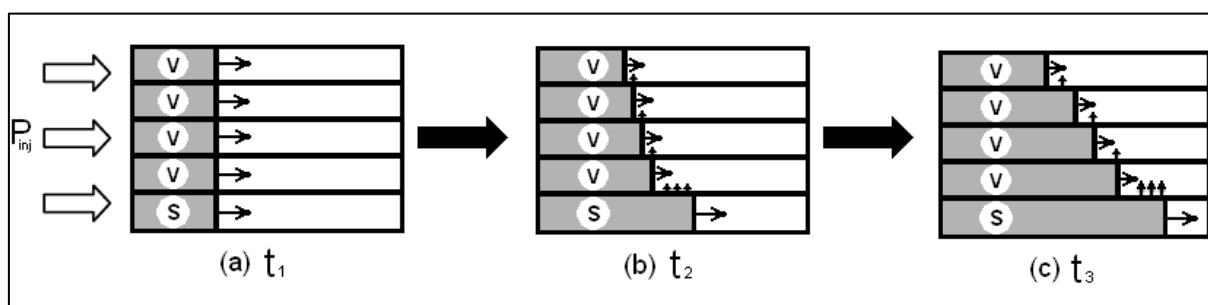


Figura 5.20 – Desenho esquemático mostrando a impregnação do fluido através de um reforço híbrido com uma camada de alta permeabilidade relativa.

A grande diferença nos tempos de preenchimento é notada mesmo no molde pequeno utilizado (0,32 m de comprimento). Pela lei de Darcy, estimou-se o tempo de preenchimento dos reforços híbridos $[V_2/S/V_2]$ e $[V_2/P/V_2]$, assumindo como premissa a cavidade de um molde com 1 m de comprimento, então os tempos de preenchimento calculados em cada experimento seriam 1747 s (29 min) e 2417 s (40 min), respectivamente. Em suma, a utilização do sisal é muito favorável nas

moldagens por RTM de grandes componentes nessas condições. E embora a pressão de injeção adotada nestes experimentos seja menor que 1 atm, comumente usada para RTM light, não há razões para se acreditar que o sisal se comportaria diferente em pressões de injeção mais altas.

5.10. ESTUDO DA COMPRESSIBILIDADE DAS CAMADAS EM REFORÇOS HÍBRIDOS

A compactação das mantas é um dos fatores que influenciam diretamente a infiltração de um fluido impregnante em um determinado reforço fibroso, por isso a importância de se correlacionar tal fator com a permeabilidade dos reforços estudados.

Primeiramente, compósitos híbridos foram moldados por RTM a fim de possibilitar a medição da espessura média das camadas, separadas por folhas de alumínio, que constituem os reforços fibrosos, como mostra, por exemplo, a Figura 5.21 para o reforço $[V_2/S/V_2]$, cujo $\%V_f$ total = 20%. Nesse caso, foi verificado que as camadas de fibra de vidro alcançaram espessura de 0,86 mm, enquanto a camada de fibra de sisal ($\%V_f = 6,7\%$) alcançou espessura de 1,95 mm.

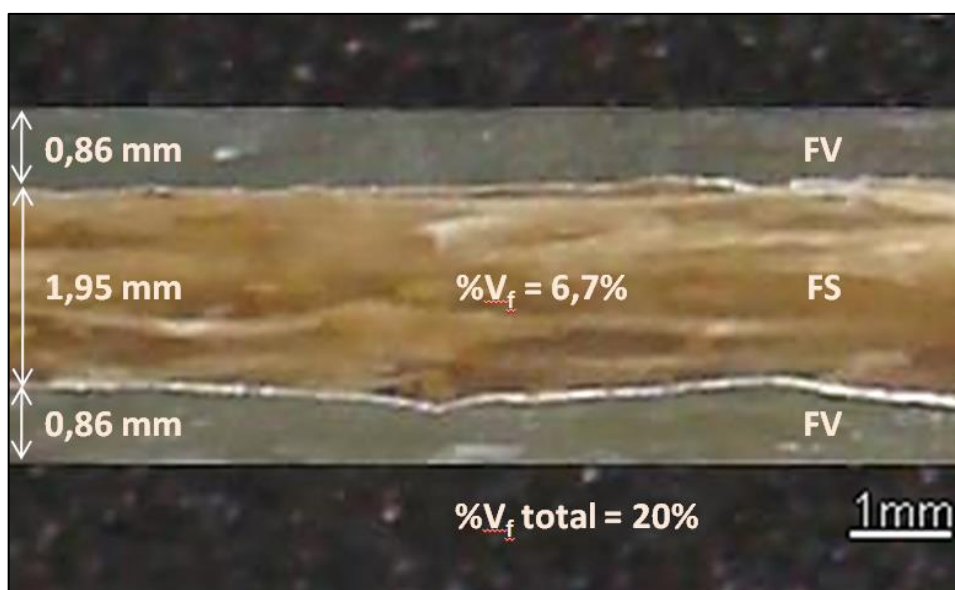


Figura 5.21 – Medição da espessura de camadas do reforço híbrido $[V_2/S/V_2]$.

Similarmente, foram capturadas imagens por microscopia ótica da seção transversal dos demais reforços híbridos com manta de sisal [V₄/S/V₄], [V₃/S/V₃] e [V/S/V], e com núcleo de PP [V₄/P/V₄], [V₃/P/V₃], [V₂/P/V₂] e [V/P/V]. Na Figura 5.22, vê-se que os compósitos híbridos com maior número de camadas de fibras de vidro tendem a comprimir mais os promotores de fluxo, tanto o núcleo de PP como a manta de sisal. As micrografias mostram que o promotor de fluxo vegetal ofereceu uma menor resistência à compressão que o núcleo de PP em todos os reforços híbridos uma vez que atingiu menor espessura final nos compósitos moldados, gerando, naquela camada, uma menor porosidade local. Entretanto, como já constatado na seção 5.9, a manta de sisal, mesmo submetida a essa condição desfavorável, consegue atuar como um promotor de fluxo de forma mais efetiva do que o núcleo de PP comercial, o que foi confirmado pelos bons resultados de permeabilidade obtidos para os reforços híbridos.

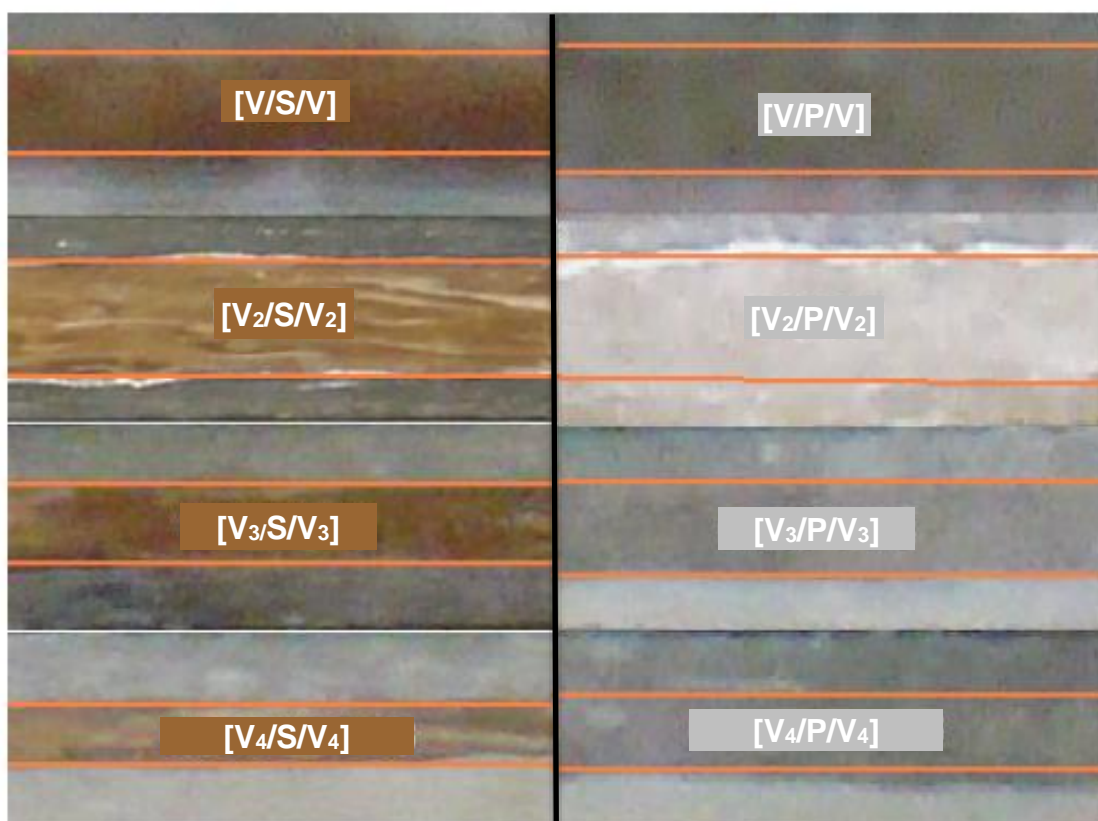


Figura 5.22 – Micrografias mostrando as diferentes camadas nos diferentes reforços híbridos de PP e sisal.

Considerando os resultados obtidos para os compósitos híbridos, optou-se por estudar em mais detalhes os reforços utilizando ensaios de compressão. Para os reforços homogêneos de fibra de vidro ($\%V_{FV} = 20\%$), manta de sisal ($\%V_{FS} = 20\%$) e para o reforço híbrido $[V_2/S/V_2]$, todos com $\%V_f$ total = 20%, verifica-se na Figura 5.23 que a fibra de vidro foi a que respondeu com os maiores valores de pressão de compactação à medida que foi submetido ao esforço de compressão, e a fibra de sisal foi a que apresentou os menores valores, tendo o reforço híbrido apresentado valores intermediários. Tomando-se como exemplo a espessura de 3,5 mm, próxima à espessura final dos compósitos moldados, observa-se que a pressão necessária para compactar a manta de fibra de sisal foi cerca de 75% menor que para compactar o reforço de fibra de vidro.

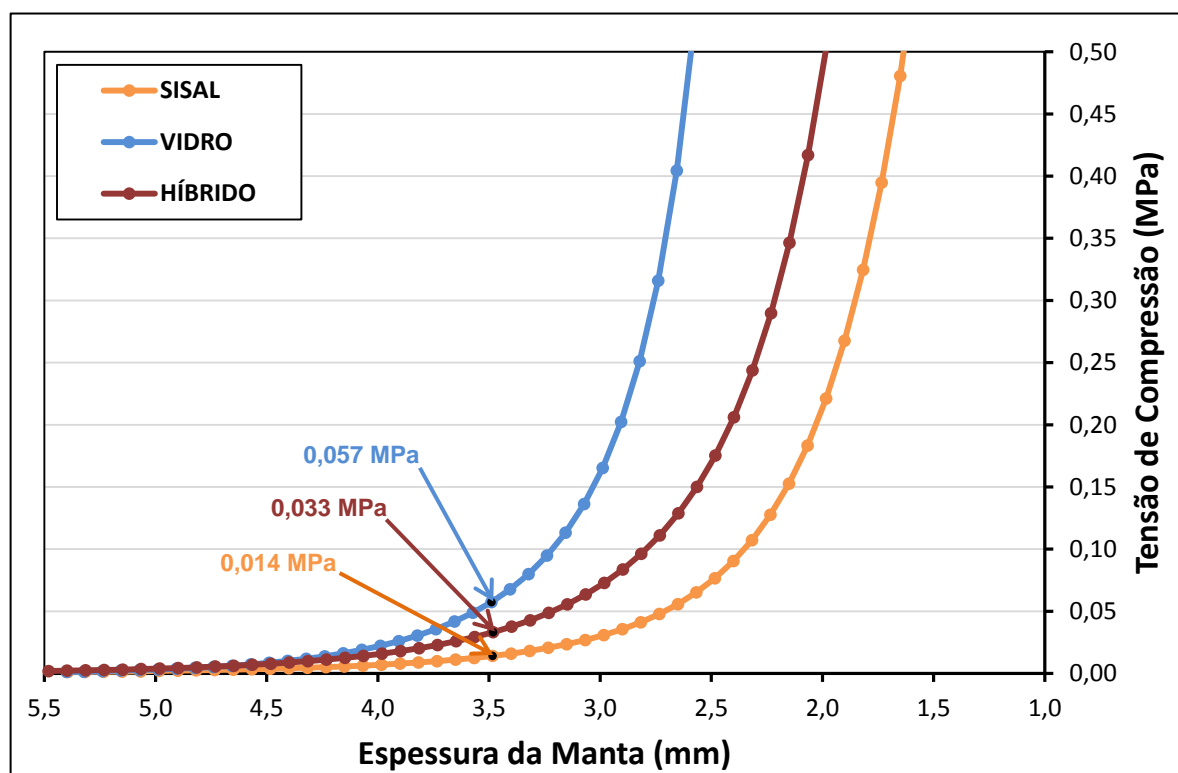


Figura 5.23 – Variação da espessura dos reforços homogêneos de fibra de sisal e fibra de vidro, e do reforço híbrido $[V_2/S/V_2]$ em função da pressão aplicada.

Embora a compactação da manta não seja o único fator que afeta a permeabilidade de um sistema, fica evidente que a inserção de uma manta de fibra

de sisal altera a compressibilidade do reforço híbrido, e como visto, torna-o mais permeável que o reforço homogêneo de fibra de vidro. Mesmo que a manta de sisal tenha sido mais suscetível à compressão em razão dos valores relativamente mais baixos de pressão de compactação, esta foi capaz de manter seus canais livres por onde o fluido impregnou preferencialmente no sistema híbrido.

A Figura 5.24 mostra a variação da espessura dos diversos reforços híbridos em função da pressão de compactação aplicada, comparando-se especialmente os reforços híbridos com núcleo de PP ou manta de sisal. Verificou-se, de uma maneira geral, um aumento da pressão de compactação com o número de camadas para os reforços híbridos, i.e. para um aumento de $\%V_f$. Levando-se em conta o mesmo teor de fibras, os reforços híbridos com núcleo de PP foram os que apresentaram os maiores valores de tensão ao longo de toda a faixa de espessura a que foram submetidos.

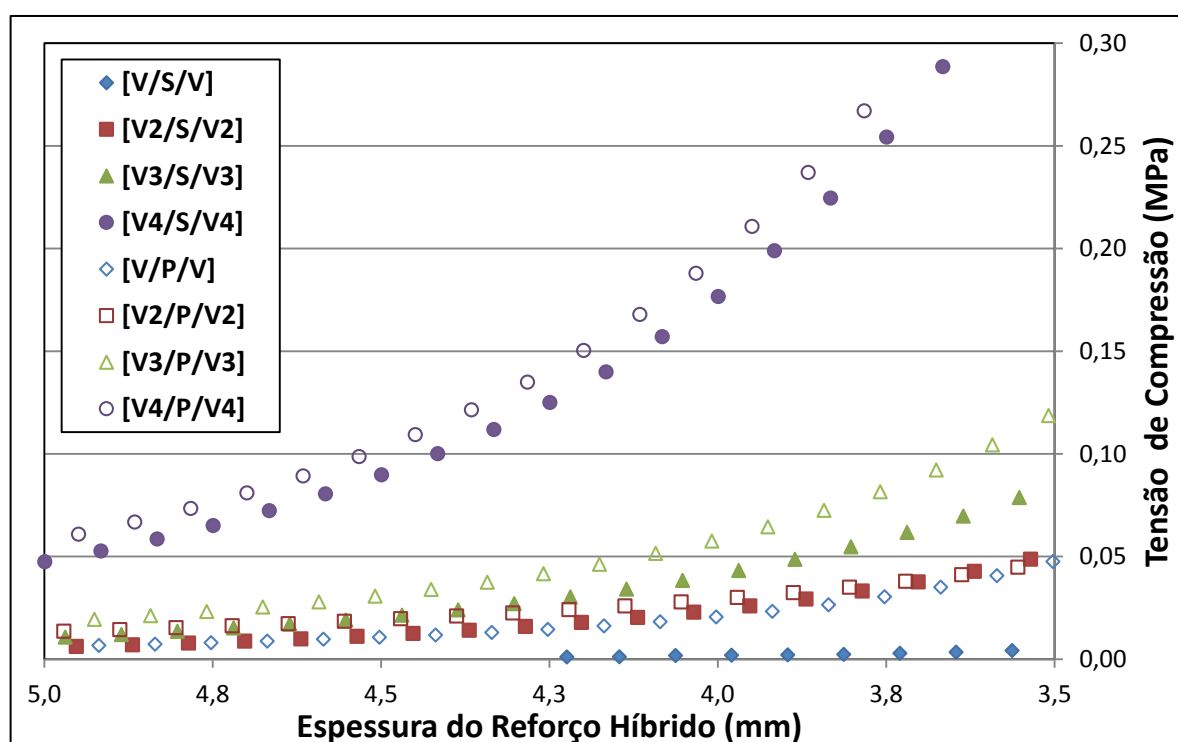


Figura 5.24 – Variação da espessura do reforço híbrido em função da pressão aplicada.

Os reforços híbridos constituídos por núcleo de PP apresentaram alturas iniciais superiores em toda a faixa estudada de $\%V_f$, quando aplicada a pré-carga de 10N, e isso confirma a tendência desse tipo de reforço apresentar maiores valores de pressão de compactação, como pode ser visto na Tabela 5.11, por exemplo, para a espessura de 3,80 mm. Os reforços híbridos com manta de sisal apresentaram comportamento diferenciado uma vez que o aumento da $\%V_{FV}$ implicou em um aumento relativo mais acentuado da pressão de compactação, se comparados aos reforços híbridos com núcleo de PP para a mesma espessura. Isso pode estar relacionado ao fato da manta de sisal oferecer uma maior resistência inicial frente à compressão das mantas de fibra de vidro, mesmo que apresentem uma maior deformação e uma menor espessura final nos reforços híbridos.

Tabela 5.11 – Altura inicial e pressão de compactação dos reforços híbridos na espessura de 3,80 mm em função da $\%V_f$ total de fibras.

Reforços híbridos	$\%V_f$ total	Altura Inicial @ 10N pré-carga (mm)	Tensão @ 3,80 mm (10^{-3} MPa)	Aumento relativo da pressão sobre [V/S/V]	Aumento relativo da pressão sobre [V/P/V]
[V/S/V]	13%	4,2	2,4	---	---
[V/P/V]		6,4	26,5	---	---
[V ₂ /S/V ₂]	20%	6,0	33,2	13,8x	---
[V ₂ /P/V ₂]		8,1	35,0	---	1,3x
[V ₃ /S/V ₃]	26%	6,4	54,7	22,8x	---
[V ₃ /P/V ₃]		8,4	72,5	---	2,7x
[V ₄ /S/V ₄]	31%	7,7	224,5	93,5x	---
[V ₄ /P/V ₄]		9,7	267,0	---	10,1x

A compactação de mantas de tecidos de fibra natural em moldagem líquida foi experimentalmente estudada por Francucci *et al.* [19], sendo relatado que a pressão de compactação e deformação permanente das preformas fibrosas de fibra de juta

foram dependentes da fração volumétrica total de fibras. Além disso, foi observado que a estrutura das fibras da juta afetou sua compactação uma vez que cada fibra é composta de várias fibras ocas elementares que tendem a quebrar e colapsar devido à carga de compressão, por isso é esperado que a deformação permanente de reforços com fibras vegetais seja maior do que para reforços de fibras sintéticas.

5.11. PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS MOLDADOS POR RTM – CONDIÇÃO NÃO-ENVELHECIDOS

Os resultados dos testes mecânicos realizados em compósitos homogêneos de fibra de vidro, núcleo de PP e fibra de sisal estão mostrados na Tabela 5.12. Como esperado, o compósito constituído de fibra de vidro apresentou propriedades mecânicas bem superiores em relação aos constituídos somente por núcleo de PP ou sisal. De fato, a fibra mais utilizada no setor de compósitos é a de vidro, tendo em vista suas vantagens, que a tornam apta à utilização em aplicações diversas.

Tabela 5.12 – Propriedades mecânicas de compósitos com reforços homogêneos com $V_f = 20\%$ (não-envelhecidos).

Propriedades Mecânicas		Poliéster/Fibra Vidro (V)	Poliéster/Núcleo PP (P)	Poliéster/Fibra Sisal (S)
Tração	Resistência (MPa)	105,7 ± 10,8	15,6 ± 2,4	20,0 ± 6,7
	Módulo (MPa)	1844 ± 66	1136 ± 28	1559 ± 108
	Deformação na ruptura (%)	6,3 ± 0,8	2,5 ± 0,4	3,2 ± 0,4
Flexão	Resistência (MPa)	182,3 ± 2,8	34,7 ± 2,6	44,9 ± 8,7
	Módulo (MPa)	8822 ± 223	3099 ± 183	4428 ± 455
	Deformação na ruptura (%)	2,6 ± 0,1	1,2 ± 0,1	1,3 ± 0,3
Impacto	Resistência (kJ/m ²)	75,2 ± 9,4	39,1 ± 14,6	21,6 ± 1,9
ILSS	Resistência (MPa)	27,4 ± 2,7	3,8 ± 1,2	5,4 ± 1,7

Entretanto, comparando-se os compósitos de PP e sisal, verificou-se que a fibra vegetal atingiu valores superiores de resistência e rigidez em tração e flexão, além de permitir uma deformação na ruptura levemente maior. Embora a fibra de sisal tenha apresentado uma menor absorção de energia ao impacto em relação ao núcleo de PP, devido ao módulo de elasticidade (rigidez) destes materiais, a fibra vegetal alcançou maior resistência ao cisalhamento interlaminar devido a sua característica superficial rugosa.

Deve-se lembrar que um reforço é usado basicamente para melhorar as propriedades mecânicas. Em contrapartida, a inserção de um promotor de fluxo em reforços de fibra de vidro, visando fundamentalmente melhorar a impregnação global do reforço, pode até mesmo prejudicar as propriedades mecânicas do compósito moldado.

Os resultados dos ensaios mecânicos realizados em compósitos híbridos de núcleo de PP (poliéster/[V₂/P/V₂]), e de sisal (poliéster/[V₂/S/V₂]), estão mostrados na Tabela 5.13. A resistência média em tração do compósito híbrido de sisal superou a do polipropileno, i.e. 66,3 e 44,9 MPa, respectivamente. A fibra de sisal conferiu razoável aumento da rigidez comparado ao núcleo de PP, e praticamente a mesma deformação na ruptura. Seguindo a mesma tendência das propriedades em tração, as propriedades em flexão, i.e. resistência, módulo e deformação na ruptura, do compósito híbrido de sisal foram superiores as do compósito híbrido de PP.

A falha por impacto de um compósito é controlada por fatores como fratura da matriz, descolamento fibra/matriz e fratura de fibras. A resistência ao impacto do compósito poliéster/[V₂/S/V₂] foi também levemente maior que do compósito poliéster/[V₂/P/V₂] (67,7 e 54,7 kJ/m², respectivamente). Isto poderia ser esperado uma vez que fibras de sisal conferem boas propriedades em impacto nos seus compósitos, provavelmente devido à natureza porosa da fibra de sisal, ângulo microfibrilar e tamanho do lúmen [46,92]. Em suma, a utilização do sisal em substituição ao núcleo de PP pode contribuir com maior efetividade não só na permeabilidade de reforços híbridos, mas também na resistência mecânica dos compósitos híbridos moldados por RTM.

Tabela 5.13 – Propriedades mecânicas de compósitos com reforços híbridos com $\%V_f = 20\%$ (não-envelhecidos).

Propriedades Mecânicas		Poliéster/[V ₂ /P/V ₂]	Poliéster/[V ₂ /S/V ₂]
Tração	Resistência (MPa)	44,9 ± 14,9	66,3 ± 7,7
	Módulo (MPa)	1864 ± 79	2104 ± 178
	Deformação na ruptura (%)	5,3 ± 0,7	5,5 ± 0,7
Flexão	Resistência (MPa)	137,4 ± 18,2	170,7 ± 28,6
	Módulo (MPa)	9983 ± 225	11177 ± 491
	Deformação na ruptura (%)	1,7 ± 0,1	2,2 ± 0,1
Impacto	Resistência (kJ/m ²)	54,7 ± 7,0	67,7 ± 10,9
ILSS	Resistência (MPa)	20,8 ± 3,4	21,1 ± 4,5

Os resultados de cisalhamento interlaminar, ≈ 21 MPa, foram similares aos encontrados na literatura, cerca de 20 MPa para um compósito poliéster/fibra de vidro com $\%V_f = 25\%$ [93]. Comparando os compósitos poliéster/[V₂/S/V₂] e o poliéster/[V₂/P/V₂], a fraca ligação do sisal não-tratado à matriz e também um maior teor de vazios podem ser responsáveis pela redução nas propriedades de cisalhamento interlaminar do primeiro. De fato, a Tabela 5.14 mostra que o teor de vazios para os compósitos híbridos com sisal foi de 0,6%, e o de PP 0,2%. A moldagem por RTM permite produzir compósitos com baixo teor volumétrico de vazios, uma vez que o tamanho dos vazios decresce devido à pressão hidrostática à medida que a frente de fluxo avança no reforço fibroso [47].

Tabela 5.14 – Massa específica e teor de vazios de compósitos híbridos com $\%V_f = 20\%$.

Compósito híbrido	ρ_e (g/cm ³)	ρ_t (g/cm ³)	Teor de vazios (%)
Poliéster/[V ₂ /S/V ₂]	1,364 ± 0,003	1,372	0,6
Poliéster/[V ₂ /P/V ₂]	1,357 ± 0,005	1,360	0,2

De acordo com Lee *et al.* [4], o teor de vazios nos compósitos moldados por RTM é influenciado por fatores como bolhas formadas inicialmente na resina, formação de vazios durante a infiltração bem como o crescimento de vazios ou retração durante a reação de cura. Um das maiores razões para o surgimento de vazios é o aprisionamento mecânico de ar durante a impregnação da resina. A formação de vazios e uma baixa adesão fibra-matriz resultante de um baixo grau de molhabilidade leva à redução de desempenho nas propriedades mecânicas e de acabamento final do compósito moldado.

Comparando as fibras vegetais (e.g. sisal) com fibras sintéticas, as primeiras tendem a formar mais vazios do que as últimas devido ao molhamento incompleto das fibras vegetais pela resina, e também pela presença de ar nos lumens da fibra [94,95]. Comparando a massa específica teórica do compósito com fibra de vidro de $\%V_f = 20\%$ ($1,463 \text{ g/cm}^3$) com a massa específica de compósitos híbridos moldados (13,5% de fibra de vidro + 6,5% de sisal), uma redução no peso de 6,8% é verificada. Para peças grandes, esta redução pode representar menor custo e economia de energia mesmo que as propriedades mecânicas sejam um pouco inferiores.

5.12. PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS MOLDADOS POR RTM – CONDIÇÃO ENVELHECIDOS

O sisal apresenta estabilidade térmica limitada já que as fibras vegetais são suscetíveis ao desenvolvimento de reações de degradação se expostas a altas temperaturas. Se não protegido por aditivos, o sisal é suscetível ao ataque microbiológico e, já que o teor de lignina e celulose é bastante variável, lotes distintos de fibras ou mesmo fibras oriundas de um mesmo lote podem apresentar uma grande variação de propriedades. Até mesmo o tipo de extração (mecânica ou química) acarreta em alterações nas características das fibras. A rápida absorção e dessorção de água bem como a biodegradabilidade do sisal podem também representar características negativas na produção de compósitos poliméricos.

Todo compósito polimérico absorve umidade do ambiente ou quando imerso em água. O efeito da absorção de umidade leva à degradação da região de interface

matriz-fibra, levando normalmente à redução do desempenho mecânico em razão da baixa eficiência de transferência de carregamento mecânico entre as fases constituintes do compósito moldado [96]. Na Tabela 5.15 esse comportamento pode ser constatado para o compósito reforçado com fibra de vidro para o qual foi observada a redução de 27% e 11% nas resistências à tração e à flexão, respectivamente, em relação ao seu estado original (Tabela 5.12). A resistência ao impacto, a deformação na ruptura em tração e flexão bem como a resistência ao cisalhamento interlaminar também apresentaram leve redução em magnitude. Para o compósito híbrido Poliéster/[V₂/S/V₂] submetido ao processo de envelhecimento de imersão em água, as propriedades de resistência em tração e flexão além do cisalhamento interlaminar representaram valores inferiores a 33% em relação aos resultados originais obtidos (Tabela 5.13), o que indica ter havido significativa degradação do compósito híbrido na condição envelhecido. A resistência ao impacto apresentou uma queda de 55% em relação ao respectivo compósito na condição não-envelhecido.

Tabela 5.15 – Propriedades mecânicas de compósitos com reforço homogêneo de FV e reforço híbrido de sisal com %V_f = 20% (envelhecidos).

Propriedades Mecânicas		Poliéster/Fibra Vidro (V)	Poliéster/[V ₂ /S/V ₂]
Tração	Resistência (MPa)	76,7 ± 14,9	17,3 ± 1,2
	Módulo (MPa)	2181 ± 208	1710 ± 170
	Deformação na ruptura (%)	5,7 ± 0,7	1,9 ± 0,4
Flexão	Resistência (MPa)	161,4 ± 8,9	49,5 ± 13,5
	Módulo (MPa)	11309 ± 1120	4849 ± 565
	Deformação na ruptura (%)	1,7 ± 0,2	2,0 ± 0,5
Impacto	Resistência (kJ/m ²)	62,6 ± 8,4	30,5 ± 7,9
ILSS	Resistência (MPa)	22,3 ± 3,8	7,0 ± 2,2

Dhakal *et al.* [96] mostraram que a redução nas propriedades mecânicas para a condição dos compósitos envelhecidos possa ser causada pela formação de pontes de hidrogênio entre as moléculas de água e a fibra de celulose. As fibras naturais com seu caráter de hidrofiliabilidade possuem vários grupos hidroxila (-OH) ao longo de suas paredes, o que leva à formação de pontes de hidrogênio entre as macromoléculas de celulose e a resina da matriz polimérica. Com o alto teor de -OH, as fibras naturais, como as fibras de sisal, tendem a mostrar baixa resistência à umidade, contribuindo na variação dimensional de compósitos moldados [96] e na fraca adesão fibra/matriz na interface pela deterioração resultante na interface [74], causando, por consequência, a redução nas propriedades mecânicas.

5.13. ABSORÇÃO DE ÁGUA EM COMPÓSITOS MOLDADOS POR RTM

Os compósitos poliméricos absorvem umidade do ambiente e quando imersos em água. A absorção de água degrada a região de interface fibra-matriz o que prejudica a eficiência de transferência de tensão entre as fases, resultando em redução das características dimensionais e mecânicas [24]. Uma das principais preocupações para o uso de materiais compósitos reforçados com fibras vegetais é a suscetibilidade em absorver umidade e o respectivo efeito nas propriedades físicas, mecânicas e térmicas [29]. Em geral, a absorção de água em compósitos depende de fatores como fração volumétrica, orientação, hidrofiliabilidade, permeabilidade e proteção superficial das fibras, bem como teor de vazios, viscosidade da matriz, umidade e temperatura [96].

A Figura 5.25 mostra o ganho de massa com o tempo para os compósitos moldados com reforços homogêneos – Vidro e Sisal, e híbrido – Poliéster/[V₂/S/V₂]. O compósito com sisal absorveu mais água que os demais, aproximadamente 4,7%, devido ao seu caráter intrínseco de hidrofiliabilidade, se comparadas às fibras inorgânicas, no caso a de vidro, cujo teor de umidade não ultrapassou 0,5%.

Sgriccia *et al.* [97] mostraram resultados similares, onde compósitos reforçados com fibras vegetais superficialmente tratadas e não-tratadas absorveram mais água que os compósitos de fibra de vidro [98]. A forte adesão entre a fibra de vidro e resina poliéster dificulta a difusão de água para o interior do compósito pois

há menos espaços vazios na região interfacial. De acordo com o estudo de Li *et al.* [99] a resistência à absorção de água de compósitos poderia ser melhorada se os lúmens da fibra vegetal, sisal nesse caso, forem preenchidos com a resina polimérica. Segundo Pickering *et al.* [57] a inclusão de fibra vegetal em compósito de matriz termorrígida com reforço de fibra de vidro traz como benefício um tempo mais prolongado quando exposto à umidade. Dessa forma, conforme esperado, o compósito híbrido apresentou comportamento intermediário em relação aos compósitos homogêneos, i.e. absorção máxima de umidade em torno de 2,0%.

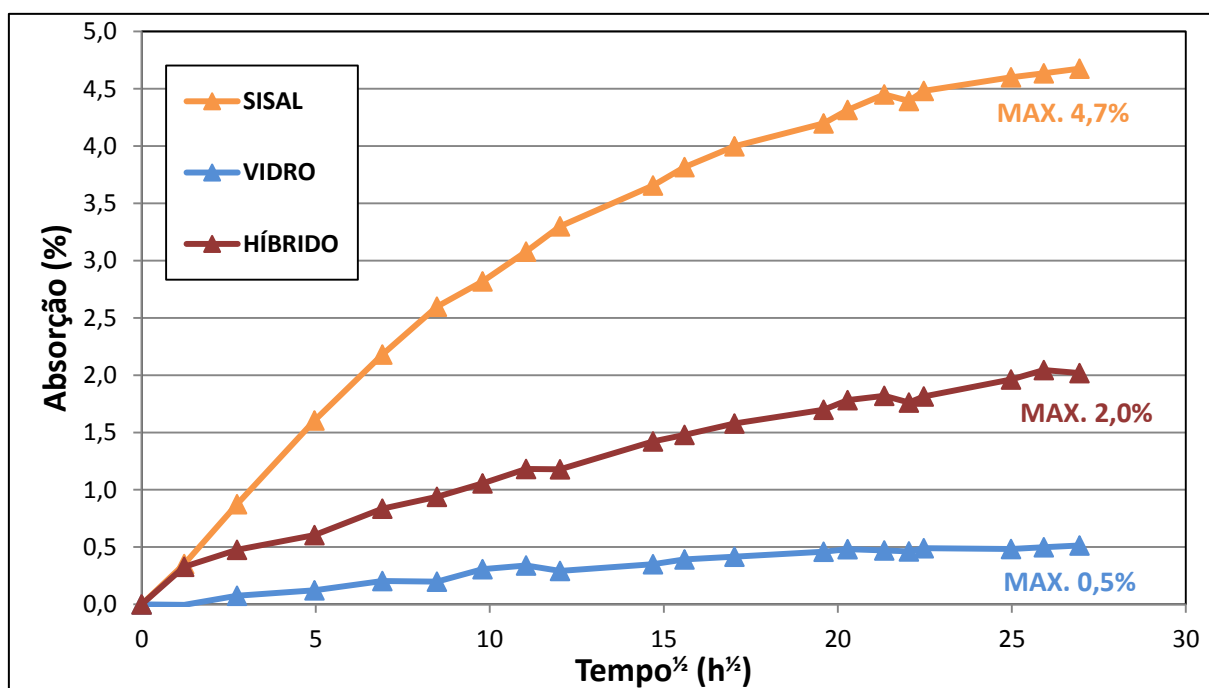


Figura 5.25 – Variação da absorção de água para compósitos moldados por RTM com mesma fração volumétrica de fibras.

6. CONCLUSÕES

Nas infiltrações realizadas, utilizando a lei de Darcy, verificou-se a redução dos valores de permeabilidade e dos tempos de preenchimento com o aumento da $\%V_f$ sob P_{inj} constante em razão do aumento da resistência à impregnação do fluido no reforço fibroso. Com o aumento da P_{inj} para uma mesma $\%V_f$ houve uma tendência ao aumento da permeabilidade do reforço fibroso e redução dos tempos de preenchimento. Observou-se ainda que ambos os experimentos de infiltração (retilíneo e radial) apresentaram resultados similares de permeabilidade sob as mesmas condições de injeção (P_{inj} e $\%V_f$). O tempo de preenchimento é inferior nas infiltrações radiais, como esperado.

Considerando uma mesma $\%V_f$, a permeabilidade do reforço de fibra de sisal foi superior a do reforço com mantas empilhadas de fibra de vidro e com núcleo de PP, sendo este último frequentemente usado como promotor de fluxo comercial. A variação no comprimento da fibra de sisal entre 1 e 100 mm (para teor de fibras constante) levou ao aumento da permeabilidade das mantas até que um platô foi atingido a partir de $L = 30$ mm. O tratamento superficial em meio alcalino – i.e. solução aquosa de NaOH 2% – não alterou a permeabilidade do reforço de forma significativa em relação à fibra lavada com água destilada somente. Nas infiltrações realizadas com diferentes fibras vegetais, a manta de fibra de coco apresentou o maior valor de permeabilidade visto que suas dimensões físicas e heterogeneidade influenciaram na compactação do reforço, facilitando assim a impregnação pelo óleo de soja através dos canais livres formados.

A permeabilidade do reforço com mantas de fibra de vidro frente a soluções de glicerina aumentou gradualmente com o ângulo de contato. A viscosidade do fluido, embora tenha afetado o tempo de preenchimento, não impactou na permeabilidade do reforço, o que era esperado, pois esta propriedade é considerada na lei de Darcy. O tratamento superficial da fibra de sisal com NaOH 2% não impactou de forma significativa a permeabilidade da manta. As fibras vegetais mostraram-se mais dependentes do fluido impregnante, o que deve estar

relacionado à característica de hidrofiliabilidade do sisal, se comparada à fibra de vidro. Soma-se a isso o aspecto físico das fibras de sisal que possuem maior diâmetro e maior heterogeneidade de diâmetros, o que dificulta a compactação da camada e com isso diminui a tortuosidade dos canais livres formados no meio, aumentando sua permeabilidade.

Reforços híbridos com sisal posicionado no centro apresentaram maior permeabilidade do que aqueles com núcleo de PP na mesma posição, devido à espessura e heterogeneidade das fibras vegetais que facilitam o fluxo do fluido perpendicular ao plano de infiltração, acelerando a impregnação no reforço fibroso. O promotor de fluxo também provou ser mais eficiente quando posicionado na face, inferior ou superior, da sequência de empilhamento ao invés do centro do reforço.

Os valores de resistência à tração, à flexão e ao impacto, e o módulo em tração do laminado híbrido com camada de sisal, $[V_2/S/V_2]$, foram levemente superiores que do laminado híbrido com promotor de fluxo de PP, $[V_2/P/V_2]$, porém houve leve redução no módulo em flexão. O teor de vazios dos compósitos híbridos moldados por RTM foi considerado baixo, mostrando a boa eficiência da degasagem da resina poliéster. De uma forma geral, a manta de sisal se comportou como um melhor meio de infiltração e melhorou levemente as propriedades mecânicas comparada ao promotor de fluxo de polipropileno (núcleo de PP), quando inseridos nos reforços. A absorção de água foi mais pronunciada no compósito reforçado com fibra de sisal, como já era esperado, em razão do seu caráter hidrofílico..

Em última análise, a manta de sisal pode ser uma alternativa vantajosa em aplicações de engenharia como substituto de promotores de fluxo comerciais de PP. Isso se deve ao seu notável desempenho como um promotor de fluxo, diminuindo a resistência ao fluxo do fluido nos reforços fibrosos no processo de moldagem líquida (ex. RTM light e infusão), bem como pela sua condição de auxiliar na manutenção das propriedades mecânicas dos compósitos moldados. Além disso, o fato da fibra de sisal ser encontrada em abundância na natureza tornaria a manufatura de reforços fibrosos e de materiais compósitos uma alternativa autossustentável de se produzir componentes que podem trazer benefícios ambientais à população global nas mais variadas aplicações da indústria.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar estudos de permeabilidade utilizando a lei de Carman-Kozeny em efeito comparativo à determinação experimental de K pela lei de Darcy.
- Realizar ensaios de medição da permeabilidade de reforços fibrosos híbridos, utilizando-se diferentes fluidos impregnantes.
- Realizar ensaios de medição da permeabilidade de reforços fibrosos vegetais saturados em comparação a reforços fibrosos sintéticos (e.g. FV).
- Realizar ensaios mecânicos de compósito moldado por RTM com reforço homogêneo de fibra de sisal T.
- Realizar ensaios mecânicos de compósitos moldados por RTM com reforço homogêneo de fibra de sisal NT e T, ambos na condição de envelhecidos.
- Realizar ensaios mecânicos de compósito moldado por RTM com reforço homogêneo de núcleo de PP na condição de envelhecido.
- Realizar ensaios comparativos de absorção de água em compósitos moldados por RTM (sisal NT vs. Sisal T vs. núcleo de PP) e avaliar processo de difusão pela lei de Fick. Avaliar também alterações no comportamento físico dos compósitos no que se refere à formação de trincas na matriz polimérica, variação dimensional e grau de inchamento das fibras.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. PEARCE, N.R.L.; SUMMERSCALES, J.; GUILD, F.J. Improving the resin transfer moulding process for fabric-reinforced composites by modification of the fabric architecture. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 31, n.12, 1433-1441, 2000.
2. MINAIE, B.; CHEN, Y.F. Adaptive control of filling pattern in resin transfer molding process. **Journal of Composite Materials**, v.39, n.16, 1497-1513, 2005.
3. AMICO, S.C.; LEKAKOU, C. An experimental study of the permeability and capillary pressure in resin-transfer molding. **Composites Science and Technology**, v.61, n.13, 1945-1959, 2001.
4. LEE, G.-W.; LEE, N.-J.; JANG, J.; LEE K.-J.; NAM, J.-D. Effects of surface modification on the resin-transfer moulding (RTM) of glass-fibre/unsaturated-polyester composites. **Composites Science and Technology**, v.62, n.1, 9-16, 2002.
5. LIU, Q.; PARNAS, R.S.; GIFFARD, H.S. New set-up for in-plane permeability measurement. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v.38, n.3, 954-962, 2007.
6. MINAIE, B.; CHEN, Y.F.; MESCHER, A.M. A methodology to obtain a desired filling pattern during resin transfer molding. **Journal of Composite Materials**, v.36, n.14, 1677-1692, 2002.
7. SHIN, K.S.; SONG, Y.S.; YOUN, J.R. Radial flow advancement in multi-layered preform for resin transfer molding. **Korea-Australia Rheology Journal**, v.18, n.4, 217-224, 2006.
8. LEE, D.H.; LEE, W.I.; KANG, M.K. Analysis and minimization of void formation during resin transfer molding process. **Composites Science and Technology**, v.66, n.16, 3281-3289, 2006.
9. ZHOU, F.; KUENTZER, N.; SIMACEK, P.; ADVANI, S.G.; WALSH, S. Analytic characterization of the permeability of dual-scale fibrous porous media. **Composites Science and Technology**, v.66, n.15, 2795-2803, 2006.

10. HAN, K.K.; LEE, C.W.; RICE, B.P. Measurements of the permeability of fiber preforms and applications. **Composites Science and Technology**, v.60, n.12-13, 2435-2441, 2000.
11. LEKAKOU, C.; EDWARDS, S.; BELL, G.; AMICO, S.C. Computer modelling for the prediction of the in-plane permeability of non-crimp stitch bonded fabrics. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v.37, n.6, 820-825, 2006.
12. LUO, Y.; VERPOEST, I.; HOES, K.; VANHEULE, M.; SOL, H.; CARDON, A. Permeability measurement of textile reinforcements with several test fluids. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v.32, n.10, 1497-1504, 2001.
13. SONG, Y.S., CHUNG, K.; KANG, T.J.; YOUN, J.R. Prediction of permeability tensor for three dimensional circular braided preform by applying a finite volume method to a unit cell. **Composites Science and Technology**, v.64, n.10-11, 1629-1636, 2004.
14. AMICO, S.C.; LEKAKOU, C. Mathematical modelling of capillary micro-flow through woven fabrics. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v.31, n.12, 1331-1344, 2000.
15. SIMACEK, P.; ADVANI, S.G. Desirable features in mold filling simulations for liquid composite molding processes. **Polymer Composites**, v.25, n.4 , 355-367, 2004.
16. PILLAI, K.M. Modeling the unsaturated flow in liquid composite molding processes: a review and some thoughts. **Journal of Composite Materials**, v.38, n.23, 2097-2118, 2004.
17. PARK, C.H; LEE, W.I. Modeling void formation and unsaturated flow in liquid composite molding processes: A survey and review. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, n.11, v.30, p.957-977, 2011.
18. NAIK, N.K.; SIRISHA, M.; INANI, A. Permeability characterization of polymer matrix composites by RTM/VARTM. **Progress in Aerospace Sciences**, v.65, p.22-40, 2014.

19. FRANCUCCI, G.; RODRÍGUEZ, E.S.; VÁZQUEZ, A. Experimental study of the compaction response of jute fabrics in liquid composite molding processes. **Journal of Composite Materials**, n. 2, v.46, p.155-167, 2011.
20. HSIAO, K.-T.; LITTLE, R.; RESTREPO, O.; MINAIE, B. A study of direct cure kinetics characterization during liquid composite molding. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v.37, p.925-933, 2006.
21. RUDD, C.D.; LONG, A.C.; KENDALL, K.N.; MANGIN, C.G.E. Liquid moulding technologies. SAE International – Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 1997.
22. NETO, F.L.; PARDINI, L.C. *Compósitos Estruturais: Ciência e Tecnologia*. 1. ed. Edgard Blücher, São Paulo, 2006.
23. SHOJAEI, A.; GHAFARIAN, S.R.; KARIMIAN, S.M.H. Modeling and simulation approaches in the resin transfer molding process: a review. **Polymer Composites**, n.4, v.24, p.525-544, 2003.
24. SHOJAEI, A.; TROCHU, F.; GHAFARIAN, S.R.; KARIMIAN, S.M.H.; LESSARD, L. An experimental study of saturated and unsaturated permeabilities in resin transfer molding based on unidirectional flow measurements. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, n. 14, v.23, p.1515-1536, 2004.
25. SIMACEK, P.; ADVANI, S.G. Modeling resin flow and fiber tow saturation induced by distribution media collapse in VARTM. **Composites Science and Technology**, v.67, n.13, 2757-2769, 2007.
26. BROUWER, W.D.; VAN HERPT, E.C.F.C.; LABORDUS, M. Vacuum injection moulding for large structural applications. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v.34, n.6; 551-558, 2003.
27. KUENTZER, N.; SIMACEK, P.; ADVANI, S.G.; WALSH, S. Correlation of void distribution to VARTM manufacturing techniques. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v.38, n.3; 802-813, 2007.
28. SIMACEK, P.; ADVANI, S.G. Role of acceleration forces in numerical simulation of mold filling processes in fibrous porous media. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v.37, n.11, 1970-1982, 2006.
29. ENDRUEWEIT, A.; MCGREGOR, P.; LONG, A.C.; JOHNSON, M.S. Influence of the fabric architecture on the variations in experimentally determined in-plane

- permeability values. **Composites Science and Technology**, v.66, p.1778-1792, 2006.
30. BINÉTRUY, C.; HILAIRE, B.; PABIOT, J. The interactions between flows occurring inside and outside fabric tows during RTM. **Composites Science and Technology**, v.57, n.5, 587-596, 1997.
31. BECHTOLD, G.; YE, L. Influence of fibre distribution on the transverse flow permeability in fibre bundles. **Composites Science and Technology**, v.63, n.14, 2069-2079, 2003.
32. HOESA, K.; DINESCUA, D.; SOLA, H.; VANHEULEA, M.; PARNASB, R.S.; LUOC, Y.; VERPOESTC, I. New set-up for measurement of permeability properties of fibrous reinforcements for RTM. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v.33, n.7, 959-969, 2002.
33. KRUCKENBERG, T.; PATON, R. Resin Transfer Moulding for Aerospace Structures, Kluwer Academic Publishers, MA, USA, 1998.
34. CHEN, Z.; YE, L.; LIU, H. Effective permeabilities of multilayer fabric preforms in liquid composite moulding. **Composite Structures**, v.66, n.1-4, 351-357, 2004.
35. SEEMANN, W.H. US Patent 4,902,215, 1990.
36. SEEMANN, W.H. US Patent 5,052,906, 1991.
37. SEEMANN, W.H. US Patent 5,316,462, 1994.
38. AFENDI, M.D.; BANKS, W.M.; KIRKWOOD, D. Bubble free resin for infusion process. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v.36, n.6, 739-746, 2005.
39. DONG, C. Injection gate definition for improving the accuracy of liquid composite molding process simulation. **Journal of Composite Materials**, v.41, n.15, 1851-1870, 2007.
40. LI, W.; KREHL, J.; J. W. GILLESPIE JR., J.W.; HEIDER, D.; ENDRULAT, M.; HOCHREIN, K.; DUNHAM, M.G.; DUBOIS, C.J.. Process and performance evaluation of the vacuum-assisted process. **Journal of Composite Materials**, v.38; n.20, 1803-1814, 2004.

41. HEIDER, D.; SIMACEK, P.; DOMINAUSKAS, A.; DEFFOR, H.; ADVANI, S.; GILLESPIE JR., J.W. Infusion design methodology for thick-section, low-permeability preforms using inter-laminar flow media. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v.38, n.2, 525-534, 2007.
42. HSIAO, K.-T.; MATHUR, R.; ADVANI, S.G.; GILLESPIE JR., J.W., FINK, B.K. A closed form solution for flow during the vacuum assisted resin transfer molding process. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v.122, n.3, 463-475, 2000.
43. SOUTO, F.; CALADO, V.; JUNIOR, N.P. Fibras de carbono a partir de lignina: uma revisão da literatura. **Revista Matéria**, n. 1, v.20, 100-114, 2015.
44. SILVA, R.V.; AQUINO, E.M.F. Curaua fiber: A new alternative to polymeric composites. **Journal of Reinforced Plastic and Composites**, n. 1, v.27, 103-112, 2008.
45. CYRA, V.P.; LANNACE, S.; KENNY, J.M.E.; VAZQUEZ, A. Relationship between processing and properties of biodegradable composites based on pcl/starch matrix and sisal fibers. **Polymer Composites**, v.22, n.1, 104-110, 2001.
46. IDICULA, M.; NEELAKANTAN, N.R.; OOMMEN, Z.; JOSEPH, K.; THOMAS, S. A study of the mechanical properties of randomly oriented short banana and sisal hybrid fiber reinforced polyester composites. **Journal of Applied Polymer Science**, v.96, n.5, 1699-1709, 2005.
47. SREEKUMAR, P.A.; JOSEPH, K.; UNNIKRIISHNAN, G.; THOMAS, S. A comparative study on mechanical properties of sisal-leaf fibre-reinforced polyester composites prepared by resin transfer and compression moulding techniques. **Composite Science and Technology**, v.67, n.3-4, 453-461, 2007.
48. AHMED K.S.; VIJAYARANGAN, S.; RAJPUT, C. Mechanical behavior of isothalic polyester based untreated woven jute and glass fabric hybrid composites. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v.25, n.15, 1549-1569, 2006.
49. JOHN, K. NAIDU, S.V. Effect of fiber content and fiber treatment on flexural properties of sisal fiber/glass fiber hybrid composites. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v.23, n.15, 1601-1605, 2004.

50. AQUINO, E.M.F.; SARMENTO, L.P.S.; OLIVEIRA, W.; SILVA, R.V. Moisture effect on degradation of jute/glass hybrid composites. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v.26, n.2, 219-233, 2007.
51. KIRAN, C.U.; REDDY, G.R.; DABADE, B.M.; RAJESHAM, S. Tensile properties of sun hemp, banana and sisal fiber reinforced polyester composites. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v.26; n.10, 1043-1050, 2007.
52. ROUISSON, D.; SAIN, M.; COUTURIER, M. Resin transfer molding of hemp fiber composites: optimization of the process and mechanical properties of the materials. **Composites Science and Technology**, v.66, n.7-8, 895-906, 2006.
53. LARANJEIRA, E.; CARVALHO, L.H.; SILVA, S.M.L.; D'ALMEIDA, J.R.M. Influence of fiber orientation on the mechanical properties of polyester/jute composites. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v.25; n.12, 1269-1278, 2006.
54. WUZELLA, G.; KANDELBAUER, A. Novel Composites based on natural fibres and thermosets. **JEC Composites Magazine: Feature Biocomposites**, n.37, Dezembro de 2007.
55. RONG, M.Z.; ZHANG, M.Q.; LIU, Y.; YANG, G.C.; ZENG, H.M. The effect of fiber treatment on the mechanical properties of unidirectional sisal-reinforced epoxy composites. **Composites Science and Technology**, v.61, 1437-1447, 2001.
56. FARIAS, M.A.; FARINA, M.Z.; PEZZIN, A.P.T.; SILVA, D.A.K. Unsaturated polyester composites reinforced with fiber and powder of peach palm: Mechanical characterization and water absorption profile. **Material Science and Engineering C**, v.29, 510-513, 2009.
57. PICKERING, K.L.; ARUAN EFENDY, M.G.; LE, T.M. A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v.83, 98-112, 2016.
58. LI, Y.; MAI, Y.-W.; YE, L. Sisal fibre and its composites: A review of recent developments. **Composites Science and Technology**, v.60, n.11; 2037-2055, 2000.

59. JOSEPH, K.; THOMAS, S. Effect of chemical treatment on the tensile properties of short fibre-reinforced polyethylene composites. **Polymer**, v.37, n.23, 5139-5149, 1996.
60. MISHRA, S.; MOHANTY, A.K.; DRZAL, L.T.; MISRA, M.; PARIJA, S.; NAYAK, S.K.; TRIPATHY, S.S. Studies on mechanical performance of biofibre/glass reinforced polyester hybrid composites. **Composites Science and Technology**, v.63, n.10, 1377-1385, 2003.
61. ALVAREZ, V.A.; VÁZQUEZ, A. Influence of fiber chemical modification procedure on the mechanical properties and water absorption of MaterBi-Y/sisal fiber composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v.37, n.10, 1672-1680, 2006.
62. MATHUR, V.K. Composite materials from local resources. **Construction and Building Materials**, v.20, n.7, 470-477, 2006.
63. SILVA, J.L.G.; AL-QURESHI, H.A. Mechanics of wetting systems of natural fibres with polymeric resin. **Journal of Materials Processing Technology**, v.92-93, n.30, 124-128, 1999.
64. SILVA, R.V.; SPINELLI, D.; BOSE FILHO, W.W.; CLARO NETO, S.; CHIERICE, G.O.; TARPANI, J.R. Fracture toughness of natural fibers/castor oil polyurethane composites. **Composites Science and Technology**, v.66, n.10, 1328-1335, 2006.
65. BELAADI, A.; BEZAZI, A.; BOURCHAK, M.; SCARPA, F.; ZHU, C. Thermochemical and statistical mechanical properties of natural sisal fibres. **Composites: Part B**, v.67, 481-489, 2014.
66. BRAHMAKUMAR, M.; PAVITHRAN, C.; PILLAI, R.M. Coconut fibre reinforced polyethylene composites: effect of natural waxy surface layer of the fibre on fibre/matrix interfacial bonding and strength of composites. **Composites Science and Technology**, n.3-4, v.65, 563-569, 2005.
67. KOICHI GODA; SREEKALA, M.S.; ALEXANDRE GOMES; TAKESHI KAJI; JUNJI OHGI. Improvement of plant based natural fibers for toughening green composites—Effect of load application during mercerization of ramie fibers. **Composites: Part A**, v.37, 2213-2220, 2006.

68. SATYANARAYANA, K.G.; GUIMARÃES, J.L.; WYPYCH, F. Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part I: Source, production, morphology, properties and applications. **Composites: Part A**, v.38, 1694-1709, 2007.
69. RODRIGUEZ, E.; GIACOMELLI, F.; VAZQUEZ, A. Permeability-porosity relationship in RTM for different fiberglass and natural reinforcements. **Journal of Composite Materials**, v.38, n.3, 259-268, 2004.
70. ROUISON, D; COUTURIER, M; PANTHAPULAKKAL, S; SAIN, M. Measurement of the average permeability of natural fibre mats in resin transfer moulding application. **Polymers & Polymer Composites**, v.14, n.3, 229-238, 2006.
71. VELMURUGAN, R.; MANIKANDAN, V. Mechanical properties of palmyra/glass fiber hybrid composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v.38, 2216-2226, 2007.
72. AMICO, S.C.; ANGRIZANI, C.C.; DRUMMOND, M.L. Evaluation of glass/sisal hybrid composites via flexural and short-beam testing. In: International Conference on Advanced Materials and Composites (ICAMC), 2007, Trivandrum. p. 950-955.
73. JOHN, K.; NAIDU, S.V. Sisal fiber/glass fiber hybrid composites: the impact and compressive properties. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, n. 12, v.23, 1253-1258, 2004.
74. YAHAYA, R.; SAPUAN, S.M.; JAWAID, M.; LEMAN, Z.; ZAINUDIN, E.S. In: 13th International Conference on Environment, Ecosystems, and Development (EED '15), 2015, Kuala Lumpur, Malaysia. p. 141-145.
75. SILVA, R.V.; AQUINO, E.M.F.; RODRIGUES, L.P.S.; BARROS, A.R.F. Curaua/Glass Hybrid Composite: The Effect of Water Aging on the Mechanical Properties. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v.00, 01-12, 2008.
76. SILVA, L.C.F.; LAHR, F.R.; AQUINO, E.M.F. Presence of Excessive Moisture and the Damage Mechanism in Alternative Hybrid Configurations of GFRP. **Journal of Composite Materials**, n.3, v.45, 369-383, 2011.
77. ALMEIDA JR., J.H.S.; AMICO, S.C; BOTELHO, E.C.; AMADO, F.D.R. Hybridization effect on the mechanical properties of curaua/glass fiber composites. **Composites Part B: Engineering**, v.55, 492-497, 2013.

78. VANFLETEREN, F. Flax-epoxy prepregs leading the race. **JEC Composites Magazine: Feature Biocomposites**, n.37, Dezembro de 2007.
79. ADAMSON, A.W. Physical chemistry of surfaces. New York: John Wiley & Sons, 1997.
80. STALDER, A.F.; KULIK, G.; SAGE, D.; BARBIERI, L.; HOFFMANN, P. A snake-based approach to accurate determination of both contact points and contact angles. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v.286, n.1-3, 92-103, 2006.
81. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL - UFRGS, Porto Alegre - RS; SCHMIDT, T.M.; GOSS, T.M.; AMICO, S.C. Processo de produção de mantas e uso de fibras vegetais como promotor de fluxo. B29C 43/02 C08J 5/04. BR nº PI 0903094-8 A2. 04 ago. 2009; 12 abr. 2011. Revista da Propriedade Industrial, n. 2101, p. 139, 12 abr. 2011.
82. KIUNA, N.; LAWRENCE, C. J.; FONTANA, Q. P. V.; LEE, P. D.; SELERLANDD, T.; SPELT, P.D.M. A model for resin viscosity during cure in the resin transfer moulding process. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v.33, p.1497-1503, 2002.
83. VERREY, J.; MICHAUD, V.; MANSON, J.-A. E. Dynamic capillary effects in liquid composite moulding with non-crimp fabrics. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v.37, n.1, p.92-102, 2006.
84. AMICO, S.C.; LEKAKOU, C. An experimental study of the permeability and capillary pressure in resin-transfer molding. **Composites Science and Technology**, v.61, n.13, 1945-1959, 2001.
85. MORAES, A.G.O.; SIERAKOWSKI, M.R.; AMICO, S.C. The Novel Use of Sodium Borohydride as a Protective Agent for the Chemical Treatment of Vegetable Fibers. **Fiber and Polymers**, n.5, v.13, p.641-646, 2012.
86. OLIVERO, K.A.; HAMIDI, Y.K.; AKTAS, L.; ALTAN, M.C. Effect of preform thickness and volume fraction on injection pressure and mechanical properties of resin transfer molded composites. **Journal of Composite Materials**, n.11, v.38, p.937-957, 2004.

87. RODRIGUEZ, E.S.; STEFANI, P. M.; VAZQUEZ, A. Effects of fibers alkali treatment on the resin transfer molding processing and mechanical properties of jute-vinylester composites. **Journal of Composite Materials**, v.41, n.14, p.1729-1741, 2007.
88. UMER, R.; BICKERTON, S.; FERNYHOUGH, A. The effect of yarn length and diameter on permeability and compaction response of flax fibre mats. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, n.7, v.42, p.723-732, 2011.
89. SENOGUZ, M.T.; DUNGAN, F.D.; SASTRY, A.M.; KLAMO, J.T. Simulations and experiments on low-pressure permeation of fabrics: Part II - The variable gap model and prediction of permeability. **Journal of Composite Materials**, v.35, n.14, 1285-1322, 2001.
90. AMICO, S.C.; SYDENSTRICKER, T.H.D.; DA SILVA, P.S.C.P. Evaluation of the influence of chemical treatment on the tensile strength of sisal fibres by a weibull distribution analysis. **Metals Materials and Processes**, v.17, n.3-4, 233-242, 2005.
91. RODRIGUEZ, E.; GIACOMELLI, F.; VAZQUEZ, A. Permeability-porosity relationship in RTM for different fiberglass and natural reinforcements. **Journal of Composite Materials**, v.38, n.3, 259-268, 2004.
92. BLEDZKI, A.K.; GASSAN, J. Composites reinforced with cellulose based fibres. **Progress in Polymer Science**, v.24, n.2, 221-274, 1999.
93. PERROT, Y.; BALEY, C.; GROHENS, Y.; DAVIES, P. Damage resistance of composites based on glass fibre reinforced low styrene emission resins for marine applications. **Applied Composite Materials**, v.14, n.1, 67-87, 2007.
94. KHALIL, H.P.S.A.; HANIDA, S.; KANG, C.W.; FUAAD, N.A.N. Agro-hybrid composite: the effects on mechanical and physical properties of oil palm fiber (EFB)/glass hybrid reinforced polyester composites. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v.26, n.2, 203-218, 2007.
95. HILL, C.A.S.; KHALIL, H.P.S.A. Effect of fiber treatments on mechanical properties of coir or oil palm fiber reinforced polyester composites. **Journal of Applied Polymer Science**, v.78, n.9, 1685-1697, 2000.

96. DHAKAL, H.N.; ZHANG, Z.Y.; RICHARDSON, M.O.W. Effect of water absorption on the mechanical properties of hemp fibre reinforced unsaturated polyester composites. **Composites Science and Technology**, v.67, 1674-1683, 2007.
97. SGRICCIA, N.; HAWLEY, M.C.; MISRA, M. Characterization of natural fiber surfaces and natural fiber composites. **Composites: Part A**, v.39, 1632-1637, 2008.
98. VILLAY, V.; MARIATTI, M.; MAT TAIB, R; MITSUGU TODO. Effect of fiber surface treatment and fiber loading on the properties of bagasse fiber-reinforced unsaturated polyester composites. **Composites Science and Technology**, v.68, 631-638, 2008.
99. LI, Y.; HAO, M.; SHEN, Y.; LI, Q.; ZHENG, Z. Effects of resin inside fiber lumen on the mechanical properties of sisal fiber reinforced composites. **Composites Science and Technology**, v.108, 32-40, 2015.