



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS

Infiltração de Fluidos Carregados em Meios Porosos via Processo RTM: Análise Teórica e Experimental

Autor: Iran Rodrigues de Oliveira

Orientadores: Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima

Prof. Dr. Sandro Campos Amico

Campina Grande, agosto de 2014.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS

Infiltração de Fluidos Carregados em Meios Porosos via Processo RTM: Análise Teórica e Experimental

Autor: Iran Rodrigues de Oliveira

Orientadores: Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima

Prof. Dr. Sandro Campos Amico

Curso: Doutorado em Engenharia de Processos

Área de Concentração: Térmica e Fluidos

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação Engenharia de Processos, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Engenharia de Processos.

Campina Grande, agosto de 2014.
PB - Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

- O48i Oliveira, Iran Rodrigues de.
Infiltração de fluidos carregados em meios porosos via processo RTM :
análise teórica e experimental / Iran Rodrigues de Oliveira. – Campina
Grande, 2014.
169 f. : il. color.
- Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal
de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2014.
- "Orientação: Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima, Prof. Dr.
Sandro Campos Amico".
Referências.
1. Resina – Engenharia de Processos. 2. RTM. 3. Tempo de
Preenchimento. 4. Pressão. 5. Experimental. I. Lima, Antonio Gilson
Barbosa de. II. Amico, Sandro Campos. III. Título.

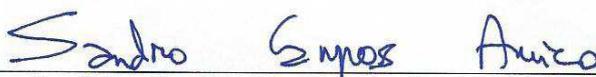
CDU 620.1:665.944.2(043)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA TESE DE DOUTORADO DE IRAN RODRIGUES DE OLIVEIRA APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS DO CENTRO DE CIENCIAS E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE.

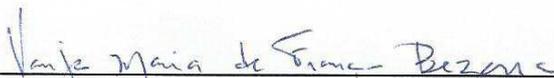
Tese de Doutorado **aprovada** em: 22 de agosto de 2014.



Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima (DEQ/CCT/UFCG)
Orientador



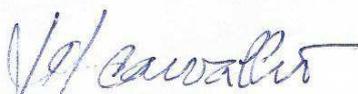
Prof. Dr. Sandro Campos Amico (DEMAT / UFRGS)
Orientador



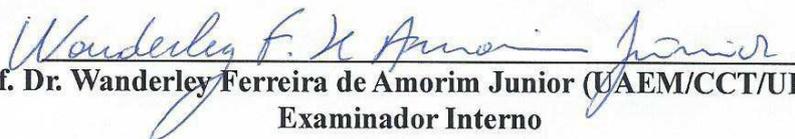
Prof.ª Dr.ª. Vanja Maria de França Bezerra (DEQ /CT/ UFRN)
Examinadora Externa



Prof. Dr. Jeferson Avila Souza (PPGMC/FURG)
Examinador Externo



Prof.ª Dr.ª. Laura Hecker de Carvalho (UAEM /CCT/ UFCG)
Examinadora Interna



Prof. Dr. Wanderley Ferreira de Amorim Junior (UAEM/CCT/UFCG)
Examinador Interno

Campina Grande, agosto de 2014.

PB, Brasil

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho a meus pais Ivanildo Coelho (in memorian) e Maria Rodrigues; aos meus irmãos Ivanilda, Conceição, Sebastião, Ivan Rodrigues, Iranildo Rodrigues e Ivone Rodrigues e a minha esposa e filhas Rosa Maria, Daniely Maria e Deysiele Maria que mesmo com as dificuldades me deram confiança, apoio e amor.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus pelo fôlego para suportar as provas e pela oportunidade de ter concluído mais uma etapa na minha vida. Ao CNPq, à FINEP e à CAPES pelo apoio financeiro concedido ao Laboratório Computacional de Térmica e Fluidos (CCT/UFCG).

Ao Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima pelos ensinamentos, conversas, disponibilidade, comprometimento na busca dos melhores resultados, inspiração com suas frases de efeito e, acima de tudo, pela amizade.

Ao Prof. Dr. Sandro Campos Amico que mais que um professor, foi um grande amigo no Rio Grande do Sul, que me recebeu e acolheu de braços abertos, sempre disponível para o que fosse preciso.

Ao Prof. Dr. Jeferson Ávila Souza da FURG-RS, pelo suporte fundamental no início da pesquisa, pelas observações sempre pertinentes e principalmente pela troca de ideias no ensinamento do software PAM-RTM. E ao Prof. Dr. Liércio André Isoldi, que mesmo distante sempre estava disponível para me ajudar no que era necessário.

Aos membros da banca examinadora, Prof^ª. Dr^ª. Laura Hecker de Carvalho, Prof. Dr. Wanderley Ferreira de A. Junior e Prof^ª. Dr^ª. Vanja Maria de França Bezerra, pela generosidade ao disponibilizar tempo para a apreciação deste trabalho.

Aos amigos do Laboratório Computacional de Térmica e Fluidos da UFCG, em especial, Aguinaldo Araújo, Elder Guedes, Evaldo Marcos, João Paulo, José Vieira, Fernando José, João Carlos, Acto Cunha, Brauner, Brasileiro pela amizade e colaboração, tornando possível a realização deste trabalho. Aos Professores, Maria do Socorro, Walenska Maysa,

Jackson Idelfoson, José Gomes, Genival Almeida, Rodrigo Uchikawa, Pedro Marcos, Nagaete Almeida, Neide Cristina, Ana Fraga, Nhelma Magna.

Gostaria de agradecer ao Excelentíssimo prefeito de Igarassu Mario Ricardo e ao Secretário de Educação Dário Uchikawa, pelo apoio e confiança.

Aos amigos que fiz no Sul, sobretudo em Porto Alegre/RS, e principalmente aos colegas do Laboratório de Materiais Poliméricos (LAPOL) e do Grupo de Materiais Compósitos e Nanocompósitos (GCOMP) da Escola de Engenharia da UFRGS, em especial aos colegas da sala 121, Álvaro Moraes, André Catto, André Garay, Clarissa Angrizani, Cristiane Becker, Felipe Luz, Felipe Oliveira, Maurício Ferreira e Laís Vasconcelos que sempre proporcionaram dias agradáveis em um ambiente rico em conhecimento e alegria. Aos amigos e alunos de graduação da iniciação científica que juntamente comigo fizeram parte desse trabalho, ao Giulio Toso, ao Rodrigo Barcella (amigos para sempre) e ao Lucas Paese, que foram fundamentais para a conclusão deste trabalho.

Aos amigos e colegas, pelas alegrias e motivação para chegar tão longe, mas sempre sonhando ir além.

Ao PROCAD-NF/CAPES pelo apoio financeiro e por ter proporcionado a experiência de um doutorado sanduíche. A FURG e a UFRGS pela oportunidade de realizar esse trabalho. Por fim, agradeço a todos que estiveram comigo durante este período e que ainda continuarão, agora, me auxiliando na busca de novos e desafiadores objetivos.

Porque o SENHOR dá a sabedoria;
de sua boca é que vem o conhecimento e o discernimento.

Provérbios 2:6

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	v
AGRADECIMENTOS.....	vi
RESUMO	xii
ABSTRACT	xiii
LISTA DE FIGURAS	xiv
LISTA DE TABELAS	xxi
NOMENCLATURA	xxiii
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	26
CAPÍTULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA.....	31
2.1 Materiais Compósitos.....	31
2.1.1 Características gerais	31
2.1.2 Métodos para obtenção de material compósito	34
2.1.3 Aplicação de material compósito	34
2.1.3 Resina poliéster insaturada.....	36
2.1.5 Cargas minerais	40
2.1.6 Carbonato de cálcio	41
2.2 Processos de moldagem líquida de compósitos (LCM)	42
2.2.1 Moldagem por transferência de resina (RTM).....	43
2.2.2 Infusão	45
2.2.3 RTM light.....	46

2.2.4 Moldagem por injeção de reação estrutural (SRIM)	47
2.3 Escoamento em meios porosos	50
2.3.1 Características gerais de meios porosos	50
CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA EXPERIMENTAL	59
3.1 Material.....	59
3.2 Procedimento experimental	60
3.2.1 Resina com carga.....	60
3.2.2 O molde.....	61
3.2.3 A pré-forma.....	62
3.2.4 Equipamento de injeção da resina (Processo RTM).....	63
3.2.5 Descrição dos experimentos.....	64
3.2.5 Determinação das propriedades do meio fibroso e resina	66
4.1 Fluxo em meios porosos e a Lei de Darcy	71
4.2 Modelagem matemática	74
4.2.1 A Equação da conservação	74
4.2.2 Fluxo retilíneo através de um molde retangular	75
4.3.1 A malha numérica.....	78
4.3.2 Criação do modelo no PAM-RTM.....	79
4.3.3 Teste de independência de Malha	84
CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	85
5.1 Efeito do teor de CaCO ₃ na resina	85
5.1.1 Propriedades do meio fibroso, da mistura e do compósito	85
5.2 Efeito da variação da pressão de injeção ajustada	89
5.3.4 Pré-forma com diferentes camadas de fibra de vidro: Avaliação do efeito do teor de fibra	120
5.3.1 Domínio computacional e as condições de contornos.....	121
5.3.2 Teste de independência de malha	122
5.3.3 Pré-forma com 4 camadas de manta de fibra de vidro (Casos A1 e A2: V _f =19%, P = 0,25 bar).....	123
5.3.4 Pré-forma com 5 camadas de manta de fibra de vidro (Casos A3 - A7: V _f =24%, P = 0,25 bar).....	127

5.3.5 Pré-forma com 6 camadas de manta de fibra de vidro (Casos A8 – A22: $V_f=30\%$, $P = 0,25; 0,50$ e $0,75$ bar)	131
5.3.6 Pré-forma com 6 camadas de manta de fibra de vidro (A23 – A26: $V_f=30\%$, $P = 0,25$ bar, $38 \mu\text{m}$ e $75 \mu\text{m}$)	142
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	149
6.1 Conclusões.....	149
6.2 Etapa futuras	151
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	152
APÊNDICES	162
ANEXOS.....	162

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo realizar um estudo teórico e experimental do processo de moldagem por transferência de resina (RTM), com a adição de carbonato de cálcio (CaCO_3), na manufatura de compósitos de matriz poliéster reforçados com fibras de vidro. Realizou-se experimentos em molde com dimensões da cavidade de 320 x 150 x 3,6 mm, temperatura ambiente, pressão de injeção máxima de 0,25, 0,50 e 0,75 bar, volumes de fibras de 19, 24 e 30% e teores de CaCO_3 (0, 10, 20, 30 e 40%), e simulou-se a infiltração retilínea de resina no molde via software comercial PAM-RTM. Resultados da posição da frente de fluxo e tempo de preenchimento do molde são apresentados, analisados e comparados com os resultados obtidos via software a fim de se investigar o comportamento do escoamento e estimar a permeabilidade do meio usando o método do erro mínimo quadrático. Conclui-se que o uso de CaCO_3 na resina poliéster, dificulta o preenchimento do meio fibroso durante processo de moldagem do RTM, e afeta a permeabilidade, mobilidade e viscosidade da resina, e o tempo de preenchimento do molde. Observou-se também que as distribuições granulométricas ficaram próximas, enquanto que, na análise microscópica ver-se somente área sem fibras e sem CaCO_3 . Os resultados numéricos obtidos com o simulador apresentaram boa concordância com os dados experimentais em termos de posição da frente de fluxo, tempo de preenchimento e pressão de injeção.

Palavras Chave: RTM, resina, tempo de preenchimento, pressão, experimental.

ABSTRACT

This paper aims to conduct a theoretical and experimental study of the process of resin transfer molding (RTM), with the addition of calcium carbonate (CaCO_3) in the resin, in the manufacture of polyester matrix composites reinforced with glass fibers. Experiments were carried out in a mold with cavity dimensions 320 x 150 x 3.6 mm, at room temperature, maximum injection pressure of 0.25, 0.50 and 0.75 bar, fiber volume fraction of 19, 24 and 30% and CaCO_3 concentrations (0, 10, 20, 30 and 40%) and simulated in rectilinear infiltration of resin in the mold via software commercial PAM-RTM. Results of the flow front position and mold filling time are presented, analyzed and compared with results obtained via software in order to investigate the behavior of the flow and to estimate the permeability of the medium using the method of least squares error. It is concluded that the CaCO_3 used in the polyester resin hinders the filling of the fibrous medium for the RTM molding process and affects permeability, resin mobility and viscosity, and the filling time of the mold. It was also observed that the granulometric size distributions were next, while that, in the microscopic analysis seen only fiber area and without CaCO_3 . The numerical results obtained with the simulator showed good agreement with experimental data in terms of the position of the flow front, filling time and injection pressure.

Keywords: RTM, resin filling time, pressure, experimental.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Consumo de material compósito por segmento no Brasil (ABMACO, 2009).....	32
Figura 2.2 - Classificação dos compósitos (Neto e Pardini, 2006).....	33
Figura 2.3 - Distribuição percentual dos processos de fabricação de compósitos no Brasil em 2011 (ABMACO, 2013).....	34
Figura 2.4 - Exemplo de aplicação de compósitos na indústria automotiva (Revista Plástico Moderno, 2013).	35
Figura 2.5 - Exemplo de aplicação de compósitos no transporte marítimo	35
Figura 2.6 - Exemplo de aplicação de compósitos na indústria aeroespacial	36
Figura 2.7 : Resina poliéster ortoftálica insaturada (Neto e Pardini, 2006.).....	37
Figura 2.8 - Vários tipos de fibras.	38
Figura 2.9 - Forma microscópica (a) e macroscópica do carbonato de cálcio (b) (Garay, 2010).	42
Figura 2.10 - Esquema da moldagem RTM (Coutinho, 2013).....	44
Figura 2.11 – Estágios da infusão por VARTM (Alves, 2006).....	46
Figura 2.12 - Partes do molde RTM Light (ABMACO, 2007).	47
Figura 2.13 - Esquema do processo SRIM (Oliveira, 2010).....	48
Figura 2.14 - Esquema do processo VARTM (Grujicic et. al., 2003).	49
Figura 2.15 - Esquema do Processo SCRIMP (Oliveira, 2010).....	50
Figura 2.16 - Representação esquemática de um meio poroso (Vafai, 2005).....	51
Figura 2.17 - Volume total em um meio poroso (Hurtado, 2005).....	52

Figura 2.18 - Visão macroscópica e microscópica do campo de velocidade e temperatura no meio poroso (Vafai, 2005).....	54
Figura 3.1-Manta de fibra de vidro após corte.	60
Figura 3.2 - Molde inferior antes da colocação do reforço.	61
Figura 21.3 - Ilustração do posicionamento do reforço fibroso no sistema RTM UFRGS/LAPOL.	62
Figura 3.22 - Pré-forma no interior do molde.	62
Figura 3.5 - Aparato experimental RTM: (a) vaso de pressão, (b) molde superior em vidro reforçado, (c) molde inferior em aço, (d) controlador eletrônico de pressão, (e) transdutores de pressão calibrados, (f) sistema de aquisição de dados e (g) câmera digital.	63
Figura 3.24 - Sequencia esquemática do experimento no RTM: (a) limpeza do molde, (b) pesagem da manta fibra de vidro para calcular V_f , (c) posicionamento da manta no molde, (d) pesagem da resina, (e) pesagem do carbonato de cálcio, (f) agitação mecânica e (g) fechamento do molde, (h) preparo do programa de aquisição de dados, (i) fechamento das válvulas, (j) preparo da máquina fotográfica para registrar o tempo e a posição de injeção da resina, (l) ajuste da pressão de injeção e (m) injeção de resina no molde	64
Figura 3.25 - Desenho esquemático da distribuição dos transdutores de pressão no molde de RTM.	65
Figura 3.26 - Determinação da permeabilidade através do escoamento retilíneo.	69
Figura 4.1 – Esquema do experimento da filtração de Darcy.	72
Figura 4.2 - Malha 2D utilizada nas simulações computacionais com o PAM-RTM.	79
Figura 4.3 - Esboço do software PAM-RTM com detalhe no menu-guia lateral.....	80
Figura 4.4 - Preenchimento dos campos das propriedades no PAM-RTM para o caso $V_f = 30\%$, $P = 0,5$ bar e 40% de CaCO_3 . Propriedades da resina (a), propriedades do reforço (b), parâmetros do processo (c) e parâmetros numéricos (d).....	81
Figura 4.5 - Malha 2D em uma zona.	82
Figura 4.6 - Criação do grupo de entrada.....	82
Figura 4.7 - Preenchimento dos valores de P_{inj} para o caso $V_f = 30\%$, $P = 0,5$ bar e 40% CaCO_3 no PAM-RTM (a) e o gráfico gerado (b).	83
Figura 4.8 - Interface do PAM-RTM carregada com os resultados para o caso $V_f = 30\%$, $P = 0,5$ bar e 40% CaCO_3	83
Figura 5.1 - Curva de distribuição de tamanho da partícula do CaCO_3 (Amostra 1, 38 μm). .	86

Figura 5.2 - Curva de distribuição de tamanho da partícula do CaCO ₃ (Amostra 2, 75 μm). .	87
Figura 5.3 - Viscosidade da resina versus teor de CaCO ₃	88
Figura 5.4 - Variação da massa específica da resina com adição do CaCO ₃	89
Figura 5.5 - Pressão de injeção versus tempo de processo (P = 0,25 bar, V _f = 19%).....	90
Figura 5.6 - Pressão de injeção versus o tempo de processo (P = 0,25 bar, V _f = 24%).....	91
Figura 5.7 - Pressão de injeção versus tempo de processo (P=0,25 bar, V _f = 30%).....	92
Figura 5.8 - Pressão de injeção versus tempo de processo (P=0,50 bar, V _f = 30%).....	92
Figura 5.9 - Pressão de injeção versus tempo de processo (P=0,75 bar, V _f = 30%).....	93
Figura 5.10 - Pressão de injeção versus tempo de processo (P = 0,25 bar, V _f = 30%, 75μm).	94
Figura 5.11 - Permeabilidade do reforço em função do teor de CaCO ₃ na resina (V _f = 19%, P = 0,25 bar).	95
Figura 5.12 - Avanço da frente de fluxo durante a infiltração retilínea (0% CaCO ₃ ,.....	96
Figura 5.13 - Avanço da frente de fluxo durante a infiltração retilínea (40% CaCO ₃ , P = 0,25 bar, V _f = 19%).	96
Figura 5.14 - Posição da frente de fluxo versus tempo de preenchimento	97
Figura 5.15 - Permeabilidade do reforço em função do teor de CaCO ₃ na resina (V _f = 24%, P = 0,25 bar).	99
Figura 5.16 - Avanço da frente de fluxo durante a infiltração retilínea (0% CaCO ₃ ,.....	99
Figura 5.17 - Avanço da frente de fluxo durante a infiltração retilínea (40% CaCO ₃ ,.....	100
Figura 5.18 - Posição da frente de fluxo versus tempo de preenchimento para diferentes teores de CaCO ₃ (P = 0,25 bar, V _f = 24%).	100
Figura 5.19 - Posição da frente de fluxo versus tempo de injeção (P = 0,25 bar, V _f = 24%).	101
Figura 5.20 - Permeabilidade do reforço em função do teor de CaCO ₃ na resina (P = 0,25 bar, V _f = 30%).	103
Figura 5.21 - Permeabilidade do reforço em função do teor de CaCO ₃ na resina (P = 0,50 bar, V _f = 30%).	103
Figura 5.22 - Permeabilidade do reforço em função do teor de CaCO ₃ na resina (P = 0,75 bar, V _f = 30%).	103
Figura 5.23 - Avanço da frente de fluxo durante a infiltração retilínea (0% CaCO ₃ ,.....	104
Figura 5.24 - Avanço da frente de fluxo durante a infiltração retilínea (40% CaCO ₃ ,.....	104
Figura 5.25 - Avanço da frente de fluxo durante a infiltração retilínea (0% CaCO ₃ ,.....	105

Figura 5.26 - Avanço da frente de fluxo durante a infiltração retilínea (40% CaCO ₃ ,.....	105
Figura 5.27 - Avanço da frente de fluxo durante a infiltração retilínea (0% CaCO ₃ ,.....	105
Figura 5.28 - Avanço da frente de fluxo durante a infiltração retilínea (40% CaCO ₃ ,.....	106
Figura 5.29 - Posição da frente de fluxo versus tempo de injeção (P = 0,25 bar, V _f =30%).	106
Figura 5.30 - Posição da frente de fluxo versus tempo de injeção (P = 0,50 bar, V _f =30%).	107
Figura 5.31 - Posição da frente de fluxo versus tempo de injeção (P = 0,75 bar, V _f =30%).	107
Figura 5.32 - Posição da frente de fluxo versus tempo de injeção (P = 0,25 bar, V _f =30%).	108
Figura 5.33 - Posição da frente de fluxo versus tempo de injeção (P = 0,50 bar, V _f =30%).	108
Figura 5.34 - Posição da frente de fluxo versus tempo de injeção (P = 0,75 bar, V _f =30%).	109
Figura 5.35 - Permeabilidade do reforço em função do teor de CaCO ₃ na resina (P = 0,25 bar, V _f = 30%, 38μm).	111
Figura 5.36 - Permeabilidade do reforço em função do teor de CaCO ₃ na resina (P = 0,25 bar, V _f = 30%, 75μm).	111
Figura 5.37 - Avanço da frente de fluxo durante a infiltração retilínea (10% CaCO ₃ , P = 0,25 bar, V _f = 30% e granulometria de 38μm).	113
Figura 5.38 - Avanço da frente de fluxo durante a infiltração retilínea (40% CaCO ₃ , P = 0,25 bar, V _f = 30% e granulometria de 38μm).	113
Figura 5.39 - Avanço da frente de fluxo durante a infiltração retilínea (10% CaCO ₃ , P = 0,25 bar, V _f = 30% e granulometria 75μm).	113
Figura 5.40 - Avanço da frente de fluxo durante a infiltração retilínea (40% CaCO ₃ , P = 0,25 bar, V _f = 30% e granulometria 75μm).	114
Figura 5.41 - Posição da frente de fluxo versus tempo de injeção (P = 0,25 bar, V _f = 30%, 38 e 75 μm).	114
Figura 5.42 - Teor de carbonato de cálcio versus mobilidade (P = 0,25 bar, V _f = 19%).	115
Figura 5.43 - Mobilidade versus teor de carbonato de cálcio (P = 0,25 bar, V _f = 24%).	116
Figura 5.44 - Mobilidade versus teor de carbonato de cálcio (P = 0,25 bar, V _f = 30%).	117
Figura 5.45 - Mobilidade versus teor de carbonato de cálcio (P = 0,50 bar, V _f = 30%).	117
Figura 5.46 - Mobilidade versus teor de carbonato de cálcio (P = 0,75 bar, V _f = 30%).	117
Figura 5.47 - Mobilidade versus teor de carbonato de cálcio (P = 0,25 bar, V _f = 30%, 38 μm).	118
Figura 5. 48 - Mobilidade versus teor de carbonato de cálcio (P = 0,25 bar, V _f = 30%, 75 μm).	119

Figura 5.49 - Micrografia óptica da secção cortada do compósito produzido (40% de CaCO ₃ ,	119
Figura 5.50 - Posição da frente de fluxo versus tempo para o caso P = 0,25 bar e 40% de CaCO ₃	120
Figura 5.51 - Variação da permeabilidade experimental do meio fibroso com adição de 40% de CaCO ₃ na resina (P = 0,25 bar).....	121
Figura 5.52 - Representação esquemática do domínio computacional.....	121
Figura 5.53 – Tempo de preenchimento para malhas de: (a) 7077 elementos e (b) 41005 elementos.....	122
Figura 5.54 – Campo de pressão para malhas de: (a) 7077 elementos e (b) 41005 elementos.	123
Figura 5.55 - Perfil de infiltração de resina para reforço de fibra de vidro em diferentes tempos de preenchimento (P = 0,25 bar, V _f = 19%, 0% CaCO ₃).....	124
Figura 5.56 - Perfil de infiltração de resina para reforço de fibra de vidro em diferentes tempos de preenchimento (P = 0,25 bar, V _f = 19%, 40% CaCO ₃).....	124
Figura 5.57 - Posição da resina no molde versus tempo de injeção (P = 0,25 bar, V _f = 19%, 0% CaCO ₃).....	125
Figura 5.58 - Posição da resina no molde versus tempo de injeção (P = 0,25 bar, V _f = 19%, 40% CaCO ₃).....	125
Figura 5.59 - Comparação da frente de fluxo predita (PAM-RTM) e experimental em dois tempos de processo (P = 0,25 bar, V _f = 19%, 40% CaCO ₃).....	126
Figura 5.60 - Campo de pressão obtido com PAM-RTM: P = 0,25 bar, V _f = 19%, (a) 0% CaCO ₃ , (b) 40% CaCO ₃	126
Figura 5.61 - Perfil de infiltração de resina para reforço de fibra de vidro em diferentes tempos de preenchimento (P = 0,25 bar, V _f = 24%, 0% CaCO ₃).....	128
Figura 5.62 - Perfil de infiltração de resina para reforço de fibra de vidro em diferentes tempos de preenchimento (P = 0,25 bar, V _f = 24%, 40% CaCO ₃).....	128
Figura 5.63 - Posição da resina no molde versus tempo de injeção (P = 0,25 bar, V _f = 24%, 0% CaCO ₃).....	129
Figura 5.64 - Posição da resina no molde versus tempo de injeção (P = 0,25 bar, V _f = 24%, 40% CaCO ₃).....	129

Figura 5.65 - Comparação da posição da frente de fluxo em dois tempos ($P = 0,25$ bar, $V_f = 24\%$, 40% CaCO_3), (a e b) PAM-RTM e (c e d) Experimental.....	130
Figura 5.66 - Pressão de injeção obtida através do software PAM-RTM: $P = 0,25$ bar,.....	131
Figura 5.67 - Perfil de infiltração de resina para reforço de fibra de vidro em diferentes tempos de preenchimento ($P = 0,25$ bar, $V_f = 30\%$, 0% CaCO_3).....	133
Figura 5.68 - Perfil de infiltração de resina para reforço de fibra de vidro em diferentes tempos de preenchimento ($P = 0,25$ bar, $V_f = 30\%$, 40% CaCO_3).....	133
Figura 5.69 - Perfil de infiltração de resina para reforço de fibra de vidro em diferentes tempos de preenchimento ($P = 0,50$ bar, $V_f = 30\%$, 0% CaCO_3).....	134
Figura 5.70 - Perfil de infiltração de resina para reforço de fibra de vidro em diferentes tempos de preenchimento ($P = 0,50$ bar, $V_f = 30\%$, 40% CaCO_3).....	134
Figura 5.71 - Perfil de infiltração de resina para reforço de fibra de vidro em diferentes tempos de preenchimento ($P = 0,75$ bar, $V_f = 30\%$, 0% CaCO_3).....	134
Figura 5.72 - Perfil de infiltração de resina para reforço de fibra de vidro em diferentes tempos de preenchimento ($P = 0,75$ bar, $V_f = 30\%$, 40% CaCO_3).....	135
Figura 5.73 - Posição da resina no molde versus tempo de injeção ($P = 0,25$ bar, $V_f = 30\%$, 0% CaCO_3).....	135
Figura 5.74 - Posição da resina no molde versus tempo de injeção ($P = 0,50$ bar, $V_f = 30\%$, 0% CaCO_3).....	136
Figura 5.75 - Posição da resina no molde versus tempo de injeção ($P = 0,75$ bar, $V_f = 30\%$, 0% CaCO_3).....	136
Figura 5.76 - Posição da resina no molde versus tempo de injeção ($P = 0,25$ bar, $V_f = 30\%$, 40% CaCO_3).....	137
Figura 5.77 - Posição da resina no molde versus tempo de injeção ($P = 0,50$ bar, $V_f = 30\%$, 40% CaCO_3).....	137
Figura 5.78 - Posição da resina no molde versus tempo de injeção ($P = 0,75$ bar, $V_f = 30\%$, 40% CaCO_3).....	138
Figura 5.79 - Comparação da posição da frente de fluxo em dois tempos do processo ($P = 0,25$ bar, $V_f = 30\%$, 40% CaCO_3), (a) e (b) PAM-RTM e (c) e (d) Experimental.....	138
Figura 5.80 - Pressão de injeção obtida através do software PAM-RTM: $P = 0,25$ bar,.....	139
Figura 5.81 - Pressão de injeção obtida através do software PAM-RTM: $P = 0,50$ bar,.....	140
Figura 5.82 - Pressão de injeção obtida através do software PAM-RTM: $P = 0,75$ bar,.....	141

Figura 5.83 - Perfil de infiltração de resina em diferentes tempos de preenchimento (P = 0,25 bar, V _f = 30%, 10% CaCO ₃ , 38 μm).....	143
Figura 5.84 - Perfil de infiltração de resina em diferentes tempos de preenchimento (P = 0,25 bar, V _f = 30%, 40% CaCO ₃ , 38 μm).	143
Figura 5.85 - Perfil de infiltração de resina em diferentes tempos de preenchimento (P = 0,25 bar, V _f = 30%, 10% CaCO ₃ , 75 μm).	143
Figura 5.86 - Perfil de infiltração de resina em diferentes tempos de preenchimento (P = 0,25 bar, V _f = 30%, 40% CaCO ₃ , 75 μm).	144
Figura 5.87 - Posição da resina versus tempo de injeção (P = 0,25 bar, V _f = 30%, 10% CaCO ₃ , 38 μm).	144
Figura 5.88 - Posição da resina versus tempo de injeção (P = 0,25 bar, V _f = 30%, 40% CaCO ₃ , 38 μm).	145
Figura 5.89 - Posição da resina versus tempo de injeção (P = 0,25 bar, V _f = 30%, 10% CaCO ₃ , 75 μm).	145
Figura 5.90 - Posição da resina versus tempo de injeção (P = 0,25 bar, V _f = 30%, 40% CaCO ₃ , 75 μm).	146
Figura 5.91 - Comparação da posição da frente de fluxo em dois tempos de processo (P = 0,25 bar, V _f = 30%, 40% CaCO ₃ , 38 μm), (a) e (b) PAM-RTM e (c) e (d) Experimental.	147
Figura 5.92 - Comparação da posição da frente de fluxo em dois tempos de processo (P = 0,25 bar, V _f = 30%, 40% CaCO ₃ , 75 μm), (a) e (b) PAM-RTM e (c) e (d) Experimental.	147
Figura 5.93 - Pressão de injeção obtida através do software PAM-RTM: P = 0,25 bar,.....	148
Figura 5.94 - Pressão de injeção obtida através do software PAM-RTM: P = 0,25 bar,.....	148

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Composição de fibras de vidro utilizadas na manufatura de compósitos (Levy Neto e Pardini, 2006).	39
Tabela 3.1- Característica da resina poliéster (Garay, 2010).	60
Tabela 3.2 - Condições experimentais para os diferentes sistemas estudados.	66
Tabela 5.1. - Dados obtidos para cada experimento realizado ($V_f = 19\%$).	95
Tabela 5.2 - Dados experimentais de permeabilidade do meio, viscosidade da resina e tempo de preenchimento ($V_f=24\%$).....	98
Tabela 5.3 - Dados de permeabilidade para cada experimento realizado ($V_f = 30\%$).	102
Tabela 5.4 - Diferença de posição da frente de fluxo nas condições para os casos A3 e A7 para diferentes pressões de injeção e $t = 100$ s.....	109
Tabela 5.5 - Dados de permeabilidade para cada experimento realizado com carbonato de cálcio com diferentes granulometrias.	110
Tabela 5.6 - Resultados de permeabilidade para os casos com e sem peneiramento do CaCO_3	112
Tabela 5.7 - Distribuição de tamanho de partículas do CaCO_3 (Amostra 1).....	86
Tabela 5.8 - Distribuição de tamanho de partículas do CaCO_3 (Amostra 2).....	86
Tabela 5.9 - Resultados experimental e numérico do tempo de preenchimento.	123

Tabela 5.10 - Resultados experimental e numérico do tempo de preenchimento e posição da frente de fluxo.....	127
Tabela 5.11 - Resultados experimental e numérico do tempo de preenchimento e posição da frente de fluxo.....	132
Tabela 5.12 - Resultados experimental e numérico do tempo de preenchimento e posição da frente de fluxo.....	142

NOMENCLATURA

Letras Latinas

A	Área da secção transversal	m ²
g	Aceleração da gravidade	m/s ²
h	Altura	m
h ₁	Altura superior	m
h ₂	Altura inferior	m
h _c	Espessura da camada	m
h _t	Espessura total do compósito	m
K	Constante que depende das propriedades do fluido	m ²
K [^]	Nova constante	m ²
k _{exp.}	Permeabilidade experimental	m ²
k _{Num.}	Permeabilidade numérica (ajustada)	m ²
k	Permeabilidade do meio poroso	m ²
k _m	Permeabilidade da mistura	m ²
m	Massa de reforço fibra	g
p ₁	Pressão superior	Pa
p ₂	Pressão inferior	Pa

P	Pressão de injeção ajustada	Pa
p	Pressão de injeção máxima	Pa
∇P	Gradiente de pressão	Pa/m
Q	Vazão volumétrica	m ³ /s
Q _x	Vazão volumétrica	m ³ /s
t _{Total}	Tempo total de preenchimento do molde	s
t _{Trav.}	Tempo de travamento	s
u _x	Velocidade superficial	m/s
V	Volume do molde	mm ³
V _{f estimado}	Fração volumétrica (estimado)	g
V _{f real}	Fração volumétrica (real)	g
V _R	Fração volumétrica da resina	g
V _{CaCO₃}	Fração volumétrica do carbonato de cálcio	g
v _x	Velocidade da frente de fluxo	m/s
x	Distancia na direção do deslocamento da frente de fluxo	m
X _{ff}	Posição particular dentro do molde alcançada pelo fluido	m
z ₁	Ponto superior do filtro	m
z ₂	Ponto inferior do filtro	m

Letras Gregas

ρ	Massa específica	g/cm ³
ρ_{CaCO_3}	Massa específica do carbonato de cálcio	g/cm ³
ρ_m	Massa específica da mistura	g/cm ³
ρ_R	Massa específica da resina	g/cm ³
γ_{CaCO_3}	Mobilidade do carbonato de cálcio	m ² /cP
γ	Mobilidade do fluido	m ² /cP
γ_R	Mobilidade da resina	m ² /cP
μ	Viscosidade dinâmica	cP
μ_m	Viscosidade da mistura	cP
ε	Porosidade	
β	Teor de carbonato de cálcio	%

Siglas e Abreviações

ASTM	American Standard for Testing and Materials
CFD	Computational Fluid Dynamics
FAN	Flow Analysis Network
LCM	Moldagem Líquida de Compósitos
MDF	Métodos das Diferenças Finitas
MEF	Métodos dos Elementos Finitos
MVF	Métodos dos Volumes Finitos
RTM	Moldagem por Transferência de Resina
SCRIMP	Processo de Moldagem de Compósitos por Infusão de Resina de Seemann
SMC	Sheet Molding Compound
SRIM	Moldagem de Injeção de Reação Estrutural
VARTM	Moldagem por Transferência de Resina assistida por Vácuo

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Material compósito é qualquer material multifásico que exiba uma proporção significativa das propriedades das fases que o constituem, de tal modo que é obtida uma melhor combinação de propriedades (Callister, 2002). De uma maneira geral, pode-se considerar um compósito como sendo qualquer material conjugado formado por pelo menos duas fases ou dois componentes, sendo que uma das fases é contínua (matriz), e a outra, dispersa (elemento de reforço) (Moreira, 2010). As propriedades (resistência à tração, módulo de elasticidade, etc.) variam dependendo das combinações dos dois componentes, do tipo de matriz, do tipo e forma do reforço, do método de processamento aplicado, entre outros.

Os processos de moldagem líquida para produção de compósitos em moldes fechados têm um papel cada vez mais importante no meio científico e industrial, por se tratarem de processos com menor impacto ambiental e possibilitarem a produção em larga escala, entre outros fatores. Desta família de processos, destaca-se a moldagem por transferência de resina (RTM) que consiste em injetar uma resina termorrígida pré-catalisada em um molde fechado contendo uma pré-forma fibrosa seca, normalmente de fibra de carbono ou de vidro (Greve e Pickett, 2006). O RTM oferece significante benefícios sobre outros processos de moldagem aberta e fechada.

Comparando com a moldagem aberta, o RTM oferece: uma alternativa econômica em processo de moldagem fechada associada à baixa emissão de estireno; redução de consumo de

energia, pois não requer sistemas de exaustão de ar; taxas de produção no mínimo quatro ou cinco vezes mais rápidas do que a moldagem aberta, baseado no tempo de produção de um molde simples; peças que irão refletir o acabamento do molde em ambos os lados. O molde pode ter a aparência de cada lado similar ou diferente; Gel coat pode ser aplicado em um ou ambos os lados do molde; aumento de produtividade e espessuras constantes (Fiber center, 2014).

No processo RTM, existem alguns fatores que devem ser conhecidos e controlados como: viscosidade, pressão de injeção/vácuo, teor de fibra, temperatura do processo e permeabilidade do meio. Em várias situações, a resina é injetada juntamente com partículas sólidas, como por exemplo, carbonato de cálcio (CaCO_3), na tentativa de melhorar algumas propriedades mecânicas do compósito, diminuir custos e otimizar o processo (Chohra et al., 2006 ; Erdal et al.,1999).

Dos fatores acima citados, o aumento da viscosidade da resina, em um compósito polimérico, bem como a filtração de partículas (em nanoescala ou em microescala, como o carbonato de cálcio) através de uma pré-forma fibrosa contribuem para desacelerar o fluxo da resina, sendo responsáveis pelo surgimento de pontos com baixa molhabilidade, tempo de ciclo de produção lento ou saturação ineficiente dos feixes de fibras no processo (Lefevre, 2007). Isso implica que o preenchimento do molde torna-se inviável. Sob o ponto de vista da modelagem desse fenômeno complexo, sugere-se que um único modelo macroscópico de filtração durante o fluxo de resina não seja suficiente para caracterizar a filtração durante a impregnação (Destephen et al., 1996).

Vale salientar também que o tamanho de partículas em relação à pré-forma fibrosa é sempre analisado, podendo ocasionar, por exemplo, a filtração superficial (partículas não penetram na pré-forma fibrosa), a retenção das partículas mínima ou inexistente ou estas são progressivamente retidas de dentro do meio filtrante (Steenkamer, 1994). Argumenta-se que a modelagem combinada entre modelos macroscópicos fenomenológicos e modelos microscópicos (análise da trajetória das partículas, identificando-se diferentes forças que afetam seu transporte e retenção) seriam mais realistas e poderiam validar corridas experimentais em processos RTM.

Para melhor compreender esses parâmetros de processo do RTM, faz-se necessário o entendimento da mecânica dos fluidos envolvida no processo, mais precisamente sobre o escoamento de fluidos em meios porosos/fibrosos. O estudo dos meios fibrosos, definidos como meios sólidos que contêm espaços vazios em seu interior, tem despertado interesse em diversos campos da ciência e da engenharia (Jaganathan et al., 2007).

Sua aplicabilidade está inserida em diversas áreas, tais como: indústrias automobilística, náutica, aeroespacial, esportiva, biomédica (Steenkamer, 1994). Em virtude da grande complexidade dos meios porosos reais, é necessário o uso de modelos matemáticos igualmente complexos para a resolução de problemas. Tais modelos são descritos pelas equações de conservação que são usualmente utilizadas para o estudo do escoamento multifásico (ar/resina) em um meio poroso fibroso.

É importante destacar, que essa etapa do estudo é de fundamental importância, pois a partir dos dados experimentais é possível validar as soluções numéricas obtidas e conseqüentemente avançar no estudo numérico de problemas de RTM. No entanto, faz-se necessária a utilização de um software específico para simular o perfil de injeção de resina e avaliar o tempo de infiltração que deve ser inferior ao tempo de gel da resina, locais de impregnação deficientes e para determinar pontos de injeção e de saída de resina/ar (Tan et al., 2007), além de proporcionarem uma maior confiança no projeto do molde/contramolde.

Dentre os softwares dedicados exclusivamente para estudar o processo RTM, tem-se: PAM-RTM do ESI Group, o RTM-WORX de Polywork e o LIMS da Universidade de Delaware, que são comumente utilizados pela indústria e os não-dedicados, comumente usados para estudar CFD (Computational Fluid Dynamics) são ANSYS CFX[®] e FLUENT, ambos da ANSYS CFD e Abaqus, da Simula Abaqus, que são ferramentas de simulação para problemas de mecânica dos fluidos e transferência de calor, capazes de trabalhar com geometrias complexa e simular o avanço da resina no meio poroso e de cura dentro do molde.

O trabalho apresentado tem como objetivo realizar um estudo científico experimental e teórico sobre o processo de moldagem por transferência de resina (RTM), com a adição de

carbonato de cálcio (CaCO_3) na resina, na manufatura de compósitos de matriz poliéster reforçados com fibras de vidro.

Como objetivos específicos pode-se citar:

- ❖ Moldar peças na forma de placas planas por RTM, utilizando diferentes frações volumétricas de fibras;
- ❖ Realizar experimentos de injeção de resina com diferentes teores de CaCO_3 nas pré-formas obtidas sob diferentes condições de processo;
- ❖ Estimar a permeabilidade (numérica e experimentalmente) de diferentes reforços fibrosos, em diferentes frações volumétricas de fibras em infiltrações retilíneas, utilizando sistemas carregados com micropartículas (CaCO_3), de diferentes tamanhos;
- ❖ Verificar o efeito do teor de CaCO_3 , pressão de injeção da resina e teor volumétrico de fibra, sobre a velocidade de avanço da frente de fluxo, tempo total de processo, e qualidade da peça produzida via processo RTM;
- ❖ Realizar simulações em geometria 2-D com o software comercial PAM-RTM e verificar o tempo e comportamento da resina durante o preenchimento do molde, comparando com resultados experimentais;
- ❖ Realizar caracterização dos compósitos por microscopia ótica.

Organização do Trabalho

Este trabalho foi organizado em seis capítulos e três apêndices. No Capítulo 1, inicialmente é feita uma introdução sobre o assunto desta pesquisa. E por fim, o objetivo geral e os objetivos específicos desta pesquisa foram destacados.

O Capítulo 2 define os materiais compósitos e os métodos de produção via LCM. Em seguida, descreve conceitos de dinâmica dos fluidos em meios porosos, bem como a utilização do software PAM-RTM e métodos numéricos para solução deste tipo de problema. No final, é apresentada a ferramenta do PAM-RTM em aplicação de malhas em 2D e 3D.

O Capítulo 3 mostra os materiais utilizados nos experimentos e seus respectivos procedimentos. O capítulo ainda traz a descrição dos experimentos e determinação das propriedades do meio fibroso e da resina.

Informações acerca do fluxo em meios porosos através da lei Darcy e a validação da modelagem apresentada no presente trabalho com soluções algébricas disponíveis na literatura para escoamentos retilíneos são descritas no Capítulo 4. Além disso, demonstra-se como são realizadas as simulações em casos experimentais com geometrias retangulares. O capítulo termina tratando de conceitos que se mostraram úteis ao desenvolvimento das ferramentas computacionais no presente trabalho.

Alguns resultados obtidos são apresentados e discutidos no Capítulo 5, tais como: Efeito do teor de CaCO_3 , variação da pressão de injeção (P_{inj}), teor de fibra e da granulometria. Em seguida foram comparados os resultados experimentais através da solução numérica (PAM-RTM) para os diferentes efeitos.

O Capítulo 6 lista as conclusões finais e sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, os apêndices onde encontra-se os dados experimentais para obtenção da permeabilidade, viscosidade, densidade e mobilidade com seus respectivos teores de CaCO_3 , pressões de injeções, tempo de moldagem, tempo de travamento frações volumétricas e temperatura ambiente que foram utilizadas no PAM-RTM..

CAPÍTULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo são abordados os fundamentos teóricos sobre os quais este trabalho foi desenvolvido. Inicialmente é introduzida a definição e classificação de materiais compósitos e os métodos de produção. Em seguida, um breve comentário sobre cada material utilizado nesta pesquisa e seus processos de moldagem líquida de compósitos (LCM). E finalmente, são abordados conceitos gerais referentes à dinâmica dos fluidos em meios porosos.

2.1 Materiais Compósitos

2.1.1 Características gerais

Materiais compósitos consistem em duas ou mais fases físicas distintas, em que pelo menos uma apresenta característica filamentar, fibrosa ou particulada (fase reforço), dispersa e envolta em uma fase contínua denominada matriz (fase matriz) (Woodhead, 1994). A característica básica dos compósitos é combinar, a nível macroscópico, pelo menos dois materiais distintos, que constituem a fase matriz e a fase reforço (Daniel et al., 1994). Em um contexto mais amplo, em relação ao reforço, os compósitos podem ser divididos em naturais e sintéticos (Neto e Pardini, 2006).

Fibras de abacaxi, bananeira, coco, carauá, juta, piaçava, rami e sisal podem ser utilizadas como reforço em matrizes poliméricas. Uma das razões principais para as

excelentes propriedades dos compósitos resulta do fato das fibras apresentarem propriedades mecânicas muito superiores a de materiais idênticos na forma maciça (Barros, 2008).

A Figura 2.1 apresenta uma estimativa de como os materiais compósitos são utilizados em diferentes segmentos industriais no Brasil (Porto, 2012).

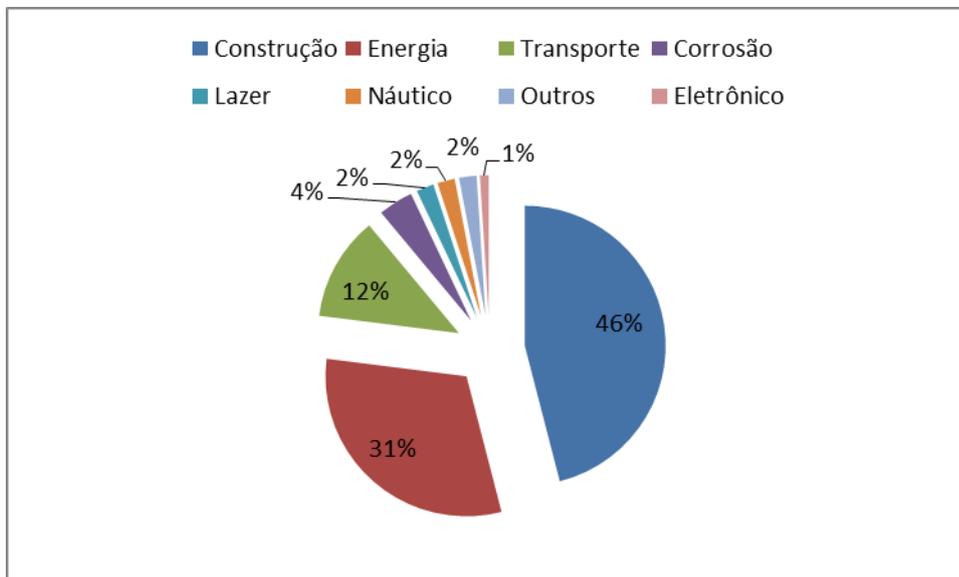


Figura 2.1 - Consumo de material compósito por segmento no Brasil (ABMACO, 2009).

Dentre os compósitos, e considerando as diferentes classes relacionadas com as várias opções de matrizes, pode-se classificá-lo de acordo com o tipo de arranjo dos reforços existentes, conforme mostra esquematicamente a Figura 2.2. Observa-se nesta Figura que os reforços em compósitos podem consistir de fibras e partículas. Caso o reforço seja na forma de fibras, pode-se dispô-las em feixes paralelos entre si, de modo a formar e orientar o reforço em direções, preferenciais multicamadas ou na forma de camadas isoladas ou lâminas. Os compósitos obtidos com reforço multidirecional têm como ponto de partida as pré-formas têxteis e se constituem em um salto tecnológico no sentido de se obter estruturas maciças de grande volume e com propriedades ajustadas à aplicação a que se destinam (Neto e Pardini, 2006).

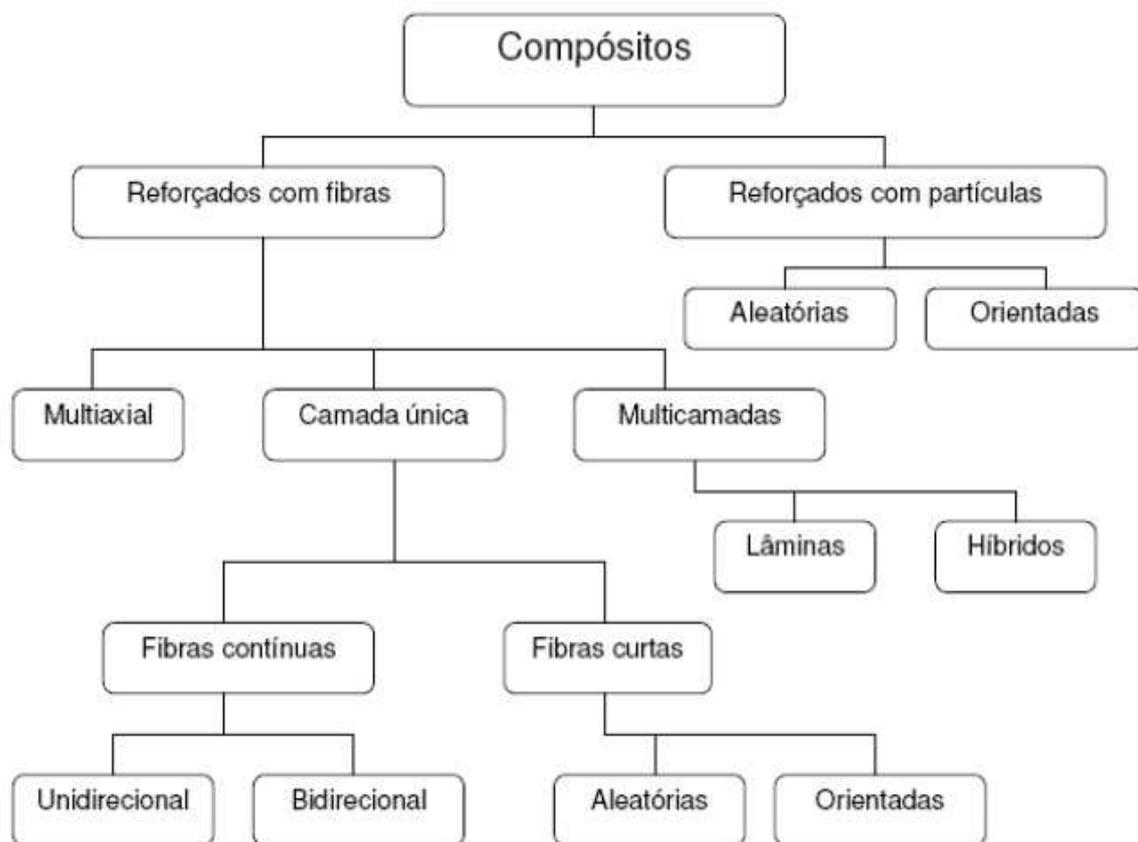


Figura 2.2 - Classificação dos compósitos (Neto e Pardini, 2006).

A adição do reforço à matriz modificará suas características como: aumento da rigidez e resistência mecânica, proteção contra degradação, aumento da condutividade térmica, entre outros (Psarras, 2006; Sgriecia et al, 2008). A matriz une as fibras, conservando a sua disposição geométrica, protegendo-as do ambiente exterior (Carvalho et al., 2006).

As propriedades mecânicas de um compósito dependem de vários fatores, tais como:

- Propriedades dos materiais constituintes (fibra e matriz);
- Orientação do reforço;
- Fração volumétrica das fases (razão entre o volume ocupado por uma fase e o volume total do compósito);
- Geometria do reforço (forma e dimensões);
- Adesão entre os componentes.

2.1.2 Métodos para obtenção de material compósito

Há uma extensa variedade de métodos de processamento disponíveis para se produzir compósitos de matriz polimérica, que podem ser classificados em processos de molde abertos (ex. moldagem manual, moldagem por spray), processos de molde fechados (ex. moldagem por injeção, moldagem por compressão, moldagem por transferência de resina) e processos contínuos (ex. pultrusão, produção de laminados). Tais processos podem ser observados na Figura 2.3. Dentre esses processos acima citados, será descrita posteriormente a moldagem líquida, em específico a moldagem por transferência de resina, que é o foco deste trabalho.

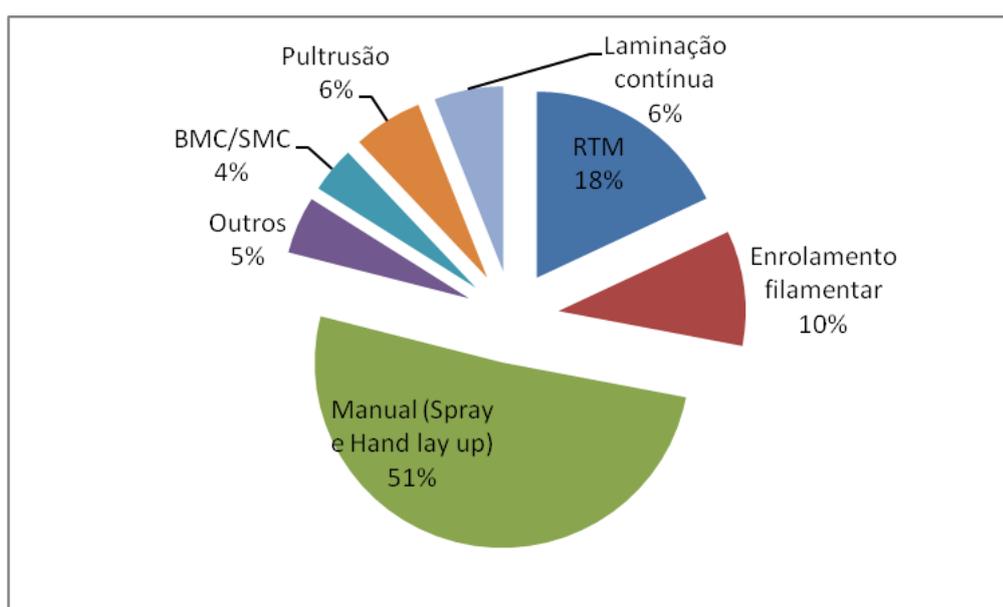


Figura 2.3 - Distribuição percentual dos processos de fabricação de compósitos no Brasil em 2011 (ABMACO, 2013).

2.1.3 Aplicação de material compósito

Após décadas de uso restrito em alguns setores da indústria, como na área de mísseis, foguetes e aeronaves de geometrias complexas, os compósitos poliméricos estruturais, também denominados avançados, têm ampliado a sua utilização em diferentes setores da indústria moderna, com um crescimento de 5% ao ano em média. Atualmente, a utilização de estruturas de alto desempenho e com baixo peso tem sido feita nas indústrias automotiva, esportiva, de construção civil, entre outras (Resende, 2000). Alguns dessas aplicações podem ser vistas nas Figuras 2.4 a 2.6.



Figura 2.4 - Exemplo de aplicação de compósitos na indústria automotiva (Revista Plástico Moderno, 2013).



Figura 2.5 - Exemplo de aplicação de compósitos no transporte marítimo (Fontoura, 2009).

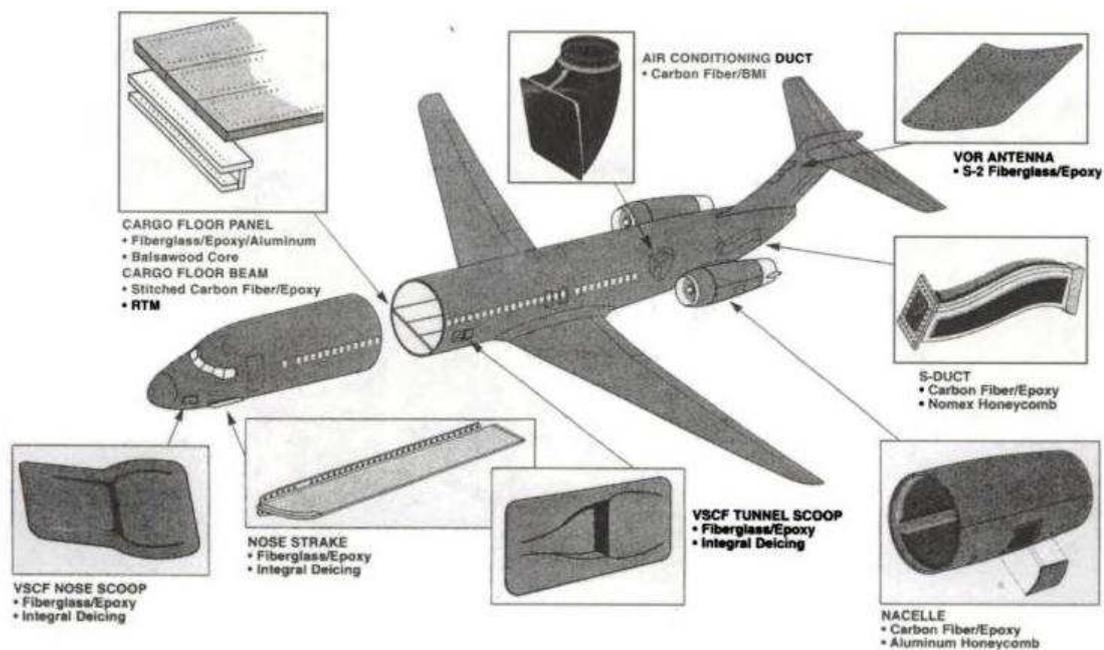


Figura 2.6 - Exemplo de aplicação de compósitos na indústria aeroespacial (Mazumdar, 2002).

2.1.3 Resina poliéster insaturada

A fase contínua dos compósitos é conhecida como matriz. As matrizes têm como função principal transferir as solicitações mecânicas às fibras e protegê-las do ambiente externo. As matrizes podem ser resinas poliéster, epóxi, éster vinílico entre outras (Júnior, 2007). A resina de poliéster é um polímero formado da reação de ácidos orgânicos dicarboxílicos (anidrido maleico ou ftálico) e glicóis que, quando reagidos, dão origem a moléculas de cadeias longas lineares. O tipo de ácido influencia as propriedades finais da resina e poliésteres ortoftálicos, isoftálicos e tereftálicos podem a ser produzidos. Se um ou mais constituintes principais são insaturados, ou seja, contêm uma ligação dupla reativa entre átomos de carbono, a resina resultante é insaturada (Neto e Pardini, 2006). O ácido isoftálico não forma anidrido cíclico, isto é, não sofre regeneração, como no caso das ortoftálicas e, conseqüentemente, pode ser usado para se obter poliésteres de alto peso molecular, ou seja, com cadeias mais longas. Tais cadeias conferem ao produto final maior resistência mecânica, pois absorvem melhor o impacto e, conseqüentemente, tornam-se polímeros de maior resistência química e térmica (Silva, 2010).

A reação de síntese da resina poliéster é uma reação de polimerização por condensação ou reação em etapas, ou seja, a reação de um álcool (base orgânica) com um ácido carboxílico resultam numa reação de esterificação, formando um éster e água. A reação é reversível e, na prática, o equilíbrio é deslocado na direção dos produtos, com eliminação de água do meio reacional. Quando a reação se processa com um diálcool e um diácido, o produto resultante contará com diversos grupos éster, dando origem a um poliéster, cujas unidades são unidas entre si por ligações éster (Neto e Pardini, 2006).

Neto e Pardini (2006) comentam também que a reação de cura de resinas poliéster insaturadas é realizada com iniciadores do tipo peróxido, que se dissociam formando um radical livre, para então se combinar a uma molécula de monômero (como estireno), que geralmente é utilizado como diluente reativo, formando uma cadeia polimérica de poliestireno que une as cadeias de poliéster umas as outras através de suas insaturações. A Figura 2.7 mostra a estrutura de uma resina poliéster ortoftálica.

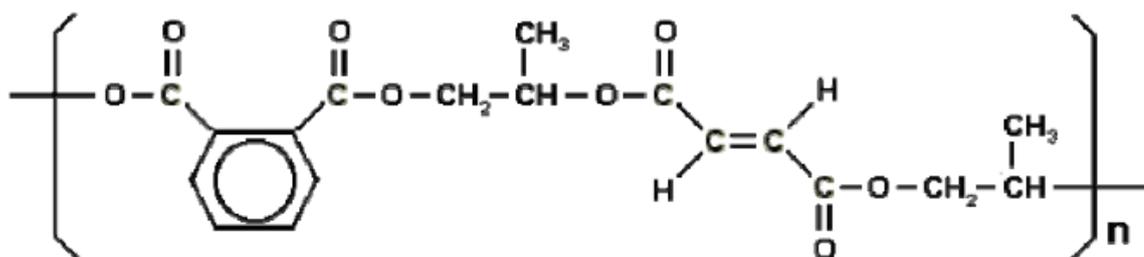


Figura 2.7 : Resina poliéster ortoftálica insaturada (Neto e Pardini, 2006.)

2.1.4 Reforços

Os reforços para compósitos podem se apresentar na forma de fibras contínuas, picadas e na forma de partículas. As fibras ou filamentos são o elemento de reforço dos compósitos estruturais que suportam carregamento mecânico. As fibras comerciais são produzidas basicamente por três processos: fiação por fusão, fiação a úmido e fiação a seco (Levy Neto e Pardini, 2006).

As fibras se constituem em um meio efetivo de reforço porque apresentam menor número de defeitos em relação a sua forma mássica. Sua configuração geométrica apresenta-

se com pequeno diâmetro e grande comprimento, proporcionando uma elevada relação área superficial/volume e, por consequência, um aumento na área interfacial fibra/matriz disponível para a transferência de tensão por unidade de volume da fibra. Dentre os diferentes tipos de fibras, pode-se destacar as de vidro, de carbono e de poliaramida (Figura 2.8). Neste trabalho, abordar-se-á apenas as fibras de vidro, que são as mais utilizadas em compósitos (Wambua et al., 2003; Aziz et al., 2005), principalmente devido ao seu menor custo, elevada resistência à tração e grande inércia química. As desvantagens dessa fibra são associadas ao relativamente baixo módulo de elasticidade, alta densidade e abrasividade e à baixa resistência à fadiga quando agregada em compósitos.

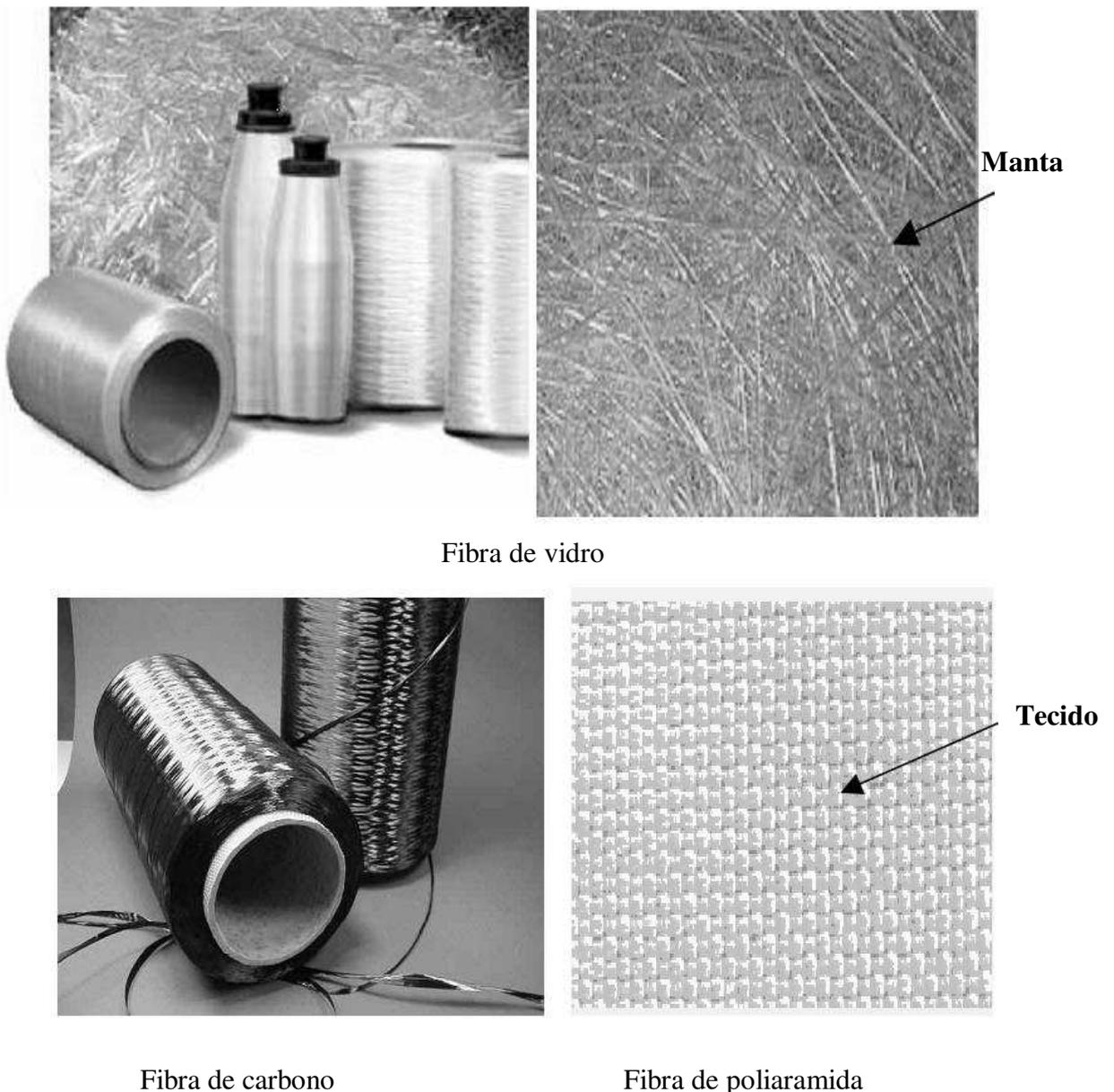


Figura 2.8 - Vários tipos de fibras.

Para se produzir a fibra de vidro, utiliza-se da aglomeração de finíssimos filamentos flexíveis de vidro, ou seja, este material é formado quando feixes finos de sílica são extrusados a partir de um fundido. Esta técnica de aquecimento, fusão e transformação do vidro em pequenos filamentos já vem sendo desenvolvida há milhares de ano. No entanto, o conceito de utilizar estas fibras para aplicações em compósito é mais recente, e tem permitido, a produção de peças com grande variedade de formatos e tamanhos, tais como: placas para montagem de circuitos eletrônicos, cascos e hélices de barcos, fuselagens de aviões, caixas d'água, piscinas, pranchas de surf, carrocerias de automóveis, na construção civil e em muitas outras aplicações (Zhu et al., 2007).

Composições típicas para fibras de vidro são mostradas na Tabela 2.1 (Levy Neto e Pardini, 2006). A base da formulação da fibra de vidro é a sílica que, em sua forma pura, existe como um polímero $(\text{SiO}_2)_n$, assim, não existe um ponto de fusão definido, e esse tipo de fibra amolece totalmente em torno de 2000 °C, quando começa a degradar. Na temperatura de 1713 °C, as moléculas podem se mover livremente, depois, o vidro é resfriado rapidamente, e elas serão incapazes de formar uma estrutura ordenada, visto que, o estado vítreo e cristalino da sílica possui níveis energéticos similares, o que significa que a forma vítrea é extremamente estável (Garay, 2010).

Tabela 2.1- Composição de fibras de vidro utilizadas na manufatura de compósitos (Levy Neto e Pardini, 2006).

Constituintes	SiO ₂	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O
Vidro E	55,2	14,8	7,3	3,3	18,7	-
Vidro C	65	4	5	3	14	8,5
Vidro S	65	25	-	10	-	-

Embora a sílica seja perfeitamente viável para a transformação em vidro, ela deve ser trabalhada em temperaturas muito elevadas, o que é uma desvantagem, a menos que algumas propriedades químicas específicas sejam necessárias. É comum introduzir impurezas no vidro na forma de outros materiais para reduzir essa temperatura. Essas impurezas, por sua vez propiciam outras propriedades que são benéficas em diferentes aplicações.

Em seus estudos, Garay (2010) cita as fibras de vidro mais comuns para materiais compósitos:

- Fibra de Vidro-A, que possui uma elevada resistência a álcalis.
- Fibra de Vidro-E, que foi a primeira formulação utilizada para a formação de um filamento contínuo e é a fibra mais empregada até hoje.
- Fibra de Vidro-S que tem uma formulação que fornece maior resistência mecânica.
- Fibra de Vidro-C desenvolvida para resistir a ataques químicos, na maioria ácidos, que prejudicariam o Vidro-E.

2.1.5 Cargas minerais

Partículas minerais são utilizadas como carga para polímeros há muitos anos, e a escolha da carga depende da performance no compósito e da aparência superficial. Para a escolha dos tipos e quantidades de carga mineral, alguns aspectos devem ser levados em consideração, a exemplo da baixa quantidade de umidade – máximo de 0,1% - baixa demanda de resina ou absorção de óleo, baixa abrasividade e baixo custo, entre outros. As cargas funcionais determinam as características ao produto final, tais como: aumento da dureza superficial, aumento das propriedades elétricas, redução do encolhimento do produto moldado, alteração na densidade, aumento da resistência química, alteração da coloração e redução da inflamabilidade (ABMACO, 2013).

A fabricação de cargas funcionais frequentemente envolve processos complexos de produção – precipitação, calcinação ou pirólise. Como exemplo de cargas funcionais temos a alumina trihidratada que é utilizada como retardante de fogo. As cargas não funcionais são usadas principalmente para reduzir custos. Produzidas de minerais extraídos de jazidas, são processadas a um custo muito baixo (ABMACO, 2013).

Carga mineral é a denominação comum que fabricantes e consumidores dão a um número muito grande de produtos de origem mineral, aos quais são aplicados os mais variados processos de transformação indo desde a extração a até complexos sistemas de operações unitárias, incluindo classificação, britagem, moagem, flotação, peneiramento,

aeroclassificação, calcinação, precipitação, micronização, atomização, pelotização, branqueamento químico, tratamento de superfície, secagem, separação gravimétrica, etc. As cargas minerais podem ser: minerais ou rochas. Pode ser encontrada na natureza, tais como: calcário (calcita, dolomita), filito, mica (muscovita, flogopita, biotita), sílica (quartzo, zeólita), caulim, talco, pirofilita (agalmatolito), gesso, barita, wolastonita, esmectita (bentonita, montmorilonita, hectorita) e ilita (Lewin et al., 2005).

As cargas de preenchimento são consideradas inertes, isto é, não desempenham qualquer papel na reação de cura, e atuam como dissipadores de calor ou diluentes (Rudd et al., 1997). Com a adição destas cargas na resina há um aumento em sua viscosidade, o que implicará num aumento no tempo de preenchimento na moldagem líquida (Lafontaine, 1984). Como uma elevada viscosidade é um problema na moldagem, pode-se utilizar de solventes como estireno ou aumentar a temperatura na moldagem para diminuir a viscosidade do sistema resina/carga e assim minimizar este defeito deletério¹ (Garay, 2010).

A adição de cargas inertes também afeta o comportamento de cura do sistema de resina. De fato, pode-se encontrar na literatura estudos sobre o efeito da adição de cargas inertes na cura da resina poliéster usando a técnica DSC (Differential Scanning Calorimetry) onde os resultados mostraram como principais efeitos a redução da condutividade térmica do sistema matriz/carga e do número de ligações duplas reativas por unidade de volume do material.

2.1.6 Carbonato de cálcio

O carbonato de cálcio, também conhecido como calcita, é um mineral inorgânico quimicamente bruto que resulta das reações do óxido de cálcio (cal virgem) com dióxido de carbono (Garay, 2010). Na natureza, o carbonato de cálcio pode ser encontrado nos minerais, na forma cristalina. Sua fórmula química é CaCO_3 e tem características alcalinas (ou seja, é um sal com características básicas que aumenta pH de uma solução aquosa). Assim, pode-se escrever:



¹ Deletério – Produto químico, venenoso nocivo à saúde.

As duas formas cristalinas do carbonato de cálcio (CaCO_3) encontradas na natureza são:

- Aragonita: Carbonato de cálcio cristalizado no sistema ortorrômbico.
- Calcita: Carbonato de cálcio natural, esbranquiçado, amarelado ou transparente.

O CaCO_3 tem aparência de um pó branco (Figura 2.9), com uma massa específica de $2,83 \text{ g/cm}^3$, ponto de fusão de $850 \text{ }^\circ\text{C}$, sendo insolúvel em água. Dentre as cargas minerais usadas em compósitos, o CaCO_3 está entre as mais utilizadas, pois possui baixo custo. No processo de obtenção de compósitos, os efeitos do teor de CaCO_3 como carga na resina, além da pressão de injeção e gradiente de temperatura no molde e pré-forma devem ser otimizados (Tuncol et al., 2007; Schmachtenberg et al., 2005), para que o acabamento final do compósito seja adequado.

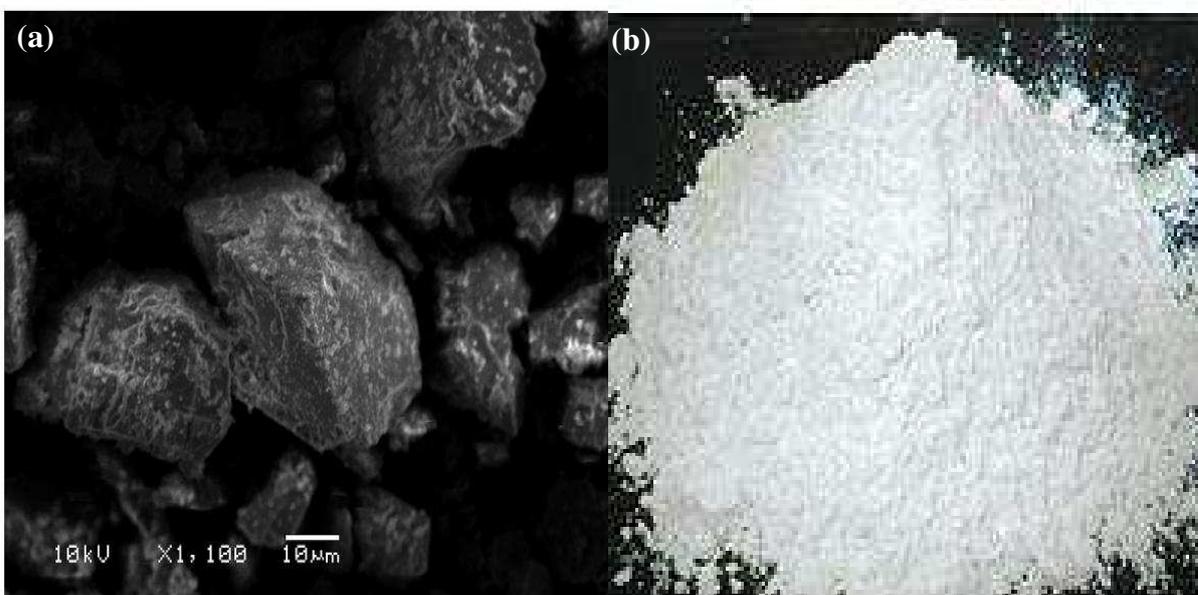


Figura 2.9 - Forma microscópica (a) e macroscópica do carbonato de cálcio (b) (Garay, 2010).

2.2 Processos de moldagem líquida de compósitos (LCM)

A família de Moldagem Líquida de Compósitos (LCM) compreende um conjunto de técnicas de fabricação de materiais compósitos onde uma resina líquida termorrígida é injetada em um molde fechado contendo uma pré-forma fibrosa seca, impregnando o reforço.

Dentre os processos de moldagem líquida, além do RTM, pode-se citar a infusão, o RTM Light, SRIM (*Structural Reaction Injection Molding*), o VARTM (*Vaccum-Assisted*

RTM), e o SCRIMP (*Seemann's Composites Resin Infusion Molding Process*), detalhados a seguir.

2.2.1 Moldagem por transferência de resina (RTM)

Como já foi mencionado, o processo de Moldagem por Transferência de Resina (RTM) tem sido amplamente aplicado em diversas áreas, tais como: indústrias automobilística, aeroespacial, esportiva e biomédica (Steenkamer, 1994), pois tem se mostrado bastante eficaz no processamento de materiais compósitos de alto desempenho (Hsião et al., 2006). Além disso, apresenta um baixo custo de mão-de-obra, ferramental simples, ciclo de tempo satisfatórios e possibilita fabricação de estruturas complexas com qualidade (Hamidi et al., 2005).

Este processo é constituído por três etapas básicas: pré-processamento, processamento ou injeção e pós-processamento (Figura 2.10). No pré-processamento a pré-forma ou reforços no formato da peça é inicialmente preparada e posicionada no molde. Em seguida, o molde é fechado e a pré-forma é comprimida. Para essa etapa pode-se citar como exemplos de fibras comumente utilizadas, fibra de vidro (FV), fibras de sisal (FS), entre tantas outras. Na preparação do molde, antes do posicionamento das fibras dentro da cavidade, o mesmo é revestido com um desmoldante a fim de que, após a cura da resina, o compósito acabado possa ser retirado sem nenhum prejuízo em sua estrutura.

A definição da pressão de injeção, é uma outra etapa importante no processamento por RTM. Normalmente são usadas pressões que estão compreendidas entre 1 e 10 bar, pois valores maiores podem causar:

- Arraste de fibras;
- Deflexão do molde/contramolde;
- Formação de vazios no compósito.

Na segunda etapa, de injeção ou processamento, a resina vai preenchendo o molde e o reforço fibroso é impregnado. Nesse momento deve ser feito o monitoramento do processo, e

a verificação de que o mesmo está se desenvolvendo corretamente. Cita-se como exemplos de fatores a serem monitorados a pressão de injeção, os pontos de injeção entrada de resina e o acompanhamento da resina nos pontos de saída do molde, entre outros. O molde RTM deve possuir pelo menos uma entrada, para injeção da resina, e uma saída, para permitir, durante a injeção da resina, a saída do ar existente no interior do molde. Em peças maiores, é comum, porém, a presença de várias entradas e saídas (Alves, 2006). A resina a ser utilizada no processo deve ter uma viscosidade baixa ($\mu \leq 1 \text{ Pa.s} \approx 1000 \text{ cP}$) para que se tenha uma boa impregnação do reforço e o tempo de injeção não seja muito elevado.

Finalmente, na última etapa ou pós-processamento, ocorre à cura da resina (*in-situ*, com molde à temperatura ambiente ou aquecido) e o processo de desmoldagem. Após a desmoldagem o compósito pode passar por um tratamento com produtos químicos e um processo de polimento a fim de deixar o mesmo pronto para a comercialização, atingindo assim, o máximo de suas propriedades (Júnior, 2007).

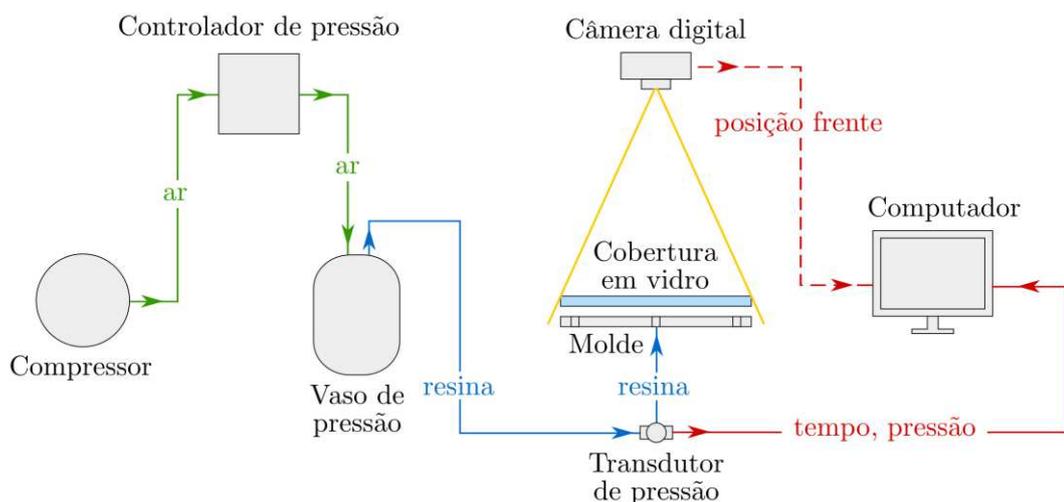


Figura 2.10 - Esquema da moldagem RTM (Coutinho, 2013).

Em casos nos quais a estrutura possua grandes dimensões, o molde/contramolde deve ser reforçado ou pode-se usar uma prensa para que não haja deflexão do mesmo no momento da injeção da resina. Algumas vantagens que se pode citar do processo RTM em relação a outros processos de fabricação (Oliveira et al., 2011), como sheet molding compound (SMC) e Moldagem por injeção, são:

- Baixo custo de mão de obra;

- Ferramental simples;
- Fabricação de estruturas complexas, com qualidade;
- Peças com as duas fases lisas;
- Escala de produção;
- Peças com dimensões diferentes e formas variadas;
- Controle de processo;
- Redução de emissão de estireno.

Um dos fatores que pode ser enfatizado no estudo do processo RTM é a determinação da permeabilidade do meio fibroso que é uma medida de resistência ao fluxo do fluido (resina) no reforço fibroso. A infiltração retilínea é usada para medir de maneira simples e prática a permeabilidade na direção do fluxo unidirecional (método de fluxo retilíneo), onde o preenchimento do meio fibroso é feito de forma direta.

2.2.2 Infusão

Neste processo, mostrado na Figura 2.11, o reforço é colocado no molde rígido com uma camada de tecido removível, usado para reduzir o tempo de preenchimento, juntamente com uma camada de fibra para facilitar o escoamento. Entradas e saídas são colocadas e a bolsa de vácuo é selada no molde usando uma fita de selante. O ar é extraído a partir da cavidade para compactar a pré-forma entre a bolsa de vácuo e o molde e submeter a resina a um diferencial de pressão que conduz o fluxo através da pré-forma compactada. Infusão é um processo de infiltração de resina dentro do molde fechado que apresenta muita similaridade com RTM. A diferença mais evidente, no entanto, é que duas partes de molde rígidas são utilizadas em RTM, enquanto na infusão há parte rígida selada com uma bolsa de vácuo.

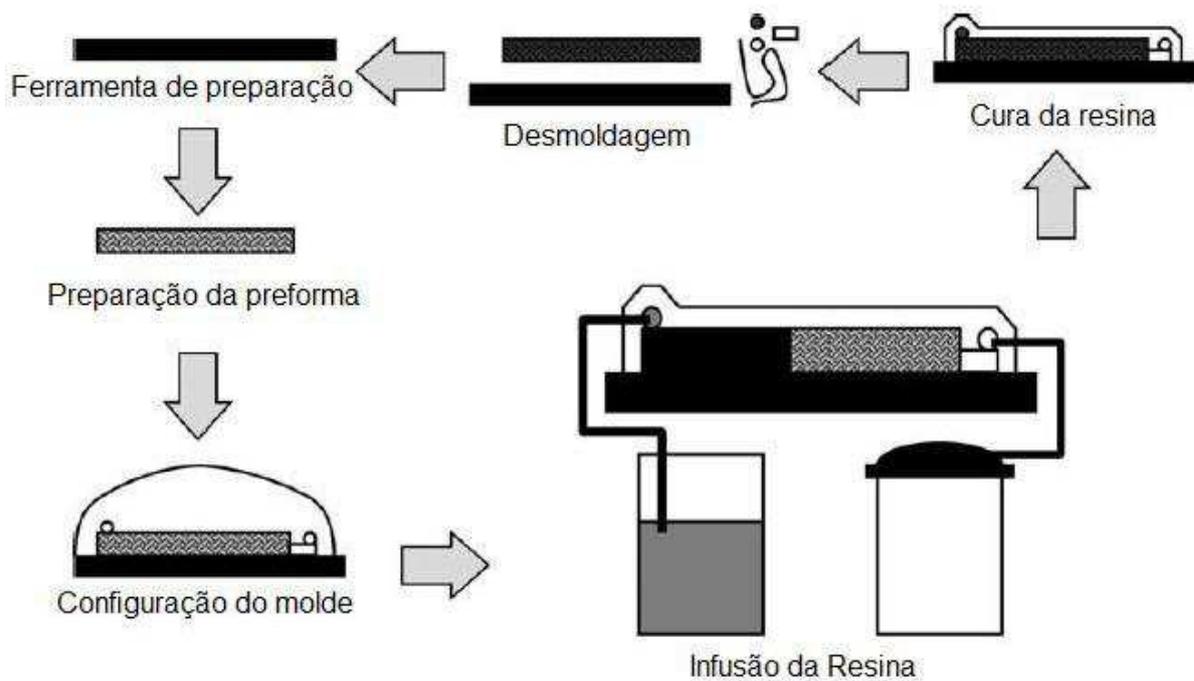


Figura 2.11 – Estágios da infusão por VARTM (Alves, 2006).

2.2.3 RTM light

Materiais compósitos vêm tendo uma crescente demanda nos últimos anos em diversos setores da indústria, ou seja, cresce a busca por novos processos, que sejam mais baratos e que causem menor impacto ambiental e, com isso, o processo RTM Light vem ganhando espaço mundial (Porto, 2012). O RTM e RTM Light emite pouco estireno no meio ambiente, e obedece a um sistema de padronização e regularidade de produção, praticamente isolando o trabalhador do contato com a resina e permitindo extrema flexibilidade de uso, em peças de pequenas e grandes dimensões, estruturais ou em material sanduíche (Porto, 2012).

A diferença entre os processos RTM e RTM Light com relação à injeção de resina, é que, no RTM, a mesma é feita através de pontos discretos, enquanto no RTM Light a resina é injetada com o auxílio de uma borda ou caneleta (sem reforço fibroso), que contorna todo o perímetro do molde. Em relação à pressão de injeção, no RTM Light é utilizado vácuo, já no RTM convencional é utilizada pressão positiva para forçar o escoamento da resina. Assim, o processo RTM Light (Figura 2.12) consiste em uma moldagem fechada, assistida por vácuo, onde a resina é injetada a baixa pressão ($\approx 0,5$ bar). O uso de baixa pressão possibilita o

emprego de moldes mais leves, com pouca estruturação, sendo rápido e facilmente construído. Geralmente, os moldes sofrem pouca deformação e possuem alta durabilidade devido às características do processo. Tanto o molde como o contramolde pode ser feitos de plástico reforçado com o uso de resina poliéster ou epóxi. O contramolde também é semi-rígido e seu baixo peso torna-o de fácil manuseio, além disso, podem ser usados contramoldes translúcidos que permitem observar o andamento da resina no molde.

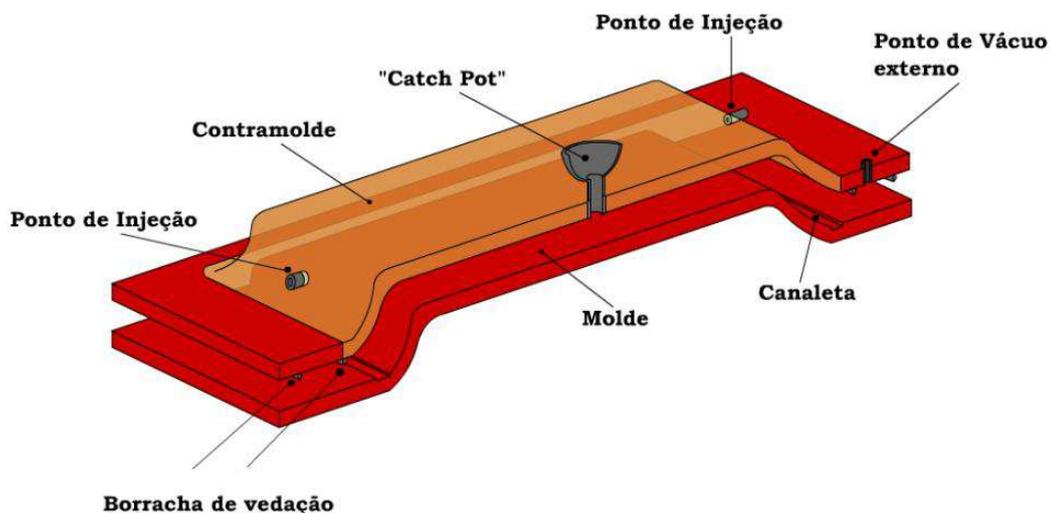


Figura 2.12 - Partes do molde RTM Light (ABMACO, 2007).

De acordo com Porto (2012), a matéria-prima utilizada no processo depende das exigências da peça, sendo que os reforços podem ser mantas de fios picados, pré-formas e tecidos, já as resinas devem ter duas características básicas: baixa viscosidade à temperatura ambiente e alta reatividade. O desperdício de matéria-prima quando comparado a outros processos é muito baixo, em torno de 2 a 7%, decorrente da rebarba das peças. Para comparação nos processos manuais o desperdício pode chegar a 40% (ABMACO, 2013). Como no processo RTM tradicional, as peças possuem bom acabamento em ambos os lados e permitem produção em grande escala.

2.2.4 Moldagem por injeção de reação estrutural (SRIM)

O SRIM, de acordo com a Figura 2.13, usa um sistema de resina de dois componentes, os quais são combinados e misturados juntos. Após essa mistura é injetada na cavidade do molde, onde encontra-se o reforço fibroso composto por fibras longas na forma de mantas de fibra contínua ou telas. Desta forma, a resina reage rapidamente e há a cura, formando a parte

de compósito (Liu et al., 2000). O processo RTM utiliza um misturador estático e bombeado para dentro do molde a uma taxa muito mais lenta do que o processo SRIM (minutos contra segundos) e a pressão de enchimento do molde é muitas vezes inferior a 100 psi para RTM, e a força necessária para fixar o molde também é baixo. No entanto, para o processo SRIM a pressão de enchimento do molde geralmente muitas vezes superior à do RTM, devido a taxa de enchimento muito elevado.

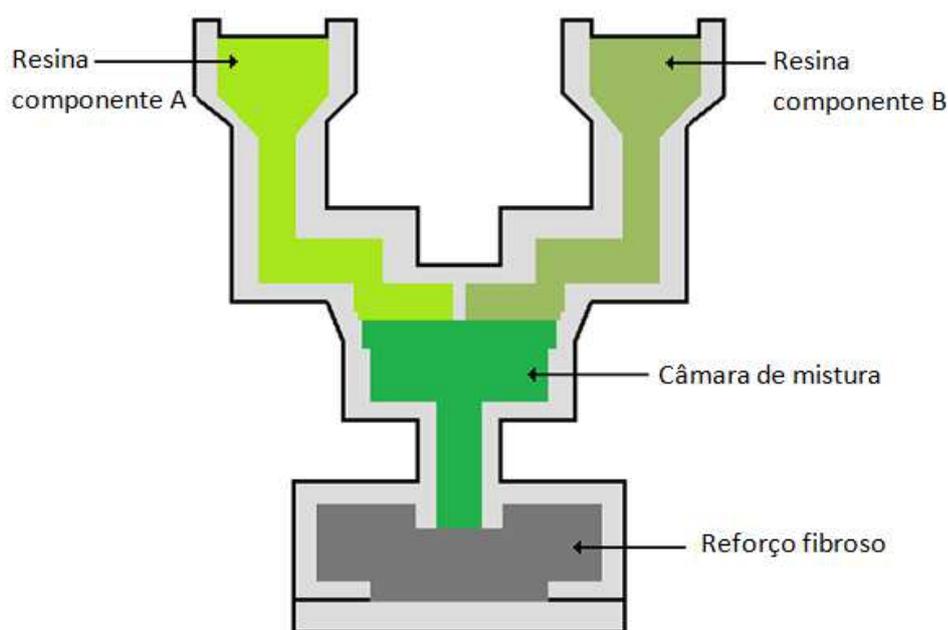


Figura 2.13 - Esquema do processo SRIM (Oliveira, 2010).

2.2.5 Moldagem por transferência de resina assistida a vácuo (VARTM)

Moldagem por transferência de resina assistida por vácuo (VARTM) é um processo de fabricação, em moldes abertos, de compósitos de matriz polimérica, amplamente utilizado em uma variedade de aplicações comerciais (por exemplo, barcos, cascos de embarcações, etc.). Além disso, o processo VARTM é aplicado em diferentes indústrias, tais como: automotiva, aeroespacial e militares. O processo baseia-se na utilização de um único molde rígido (placa de ferro) que é colocado para cima com pré-formas de fibra de reforço e fechado numa bolsa de vácuo, impermeável ao ar. A resina é infiltrada no pré-molde usando uma pressão de vácuo (Figura 2.14). Por último, o molde rígido é aquecido a uma dada temperatura (dependente da resina) e mantido nessa temperatura durante um período de tempo

suficiente para garantir uma cura completa do pré-impregnados com resina (Grujicic et al., 2003).

O processo VARTM oferece várias vantagens sobre outros processos de fabricação de compósitos de matriz de polimérico, tais como: (a) um baixo custo de processo, (b) um baixo nível de emissões de produtos químicos orgânicos voláteis, (c) a flexibilidade de processamento, (d) baixo teor de vazios, e (e) um potencial para a fabricação do volume relativamente grande (área superficial de $\sim 150\text{-}200\text{ m}^2$) e a espessura da peça de compósito de 0,1-0,15 m, contendo um grande teor de fibra de reforço (75-80% em peso).

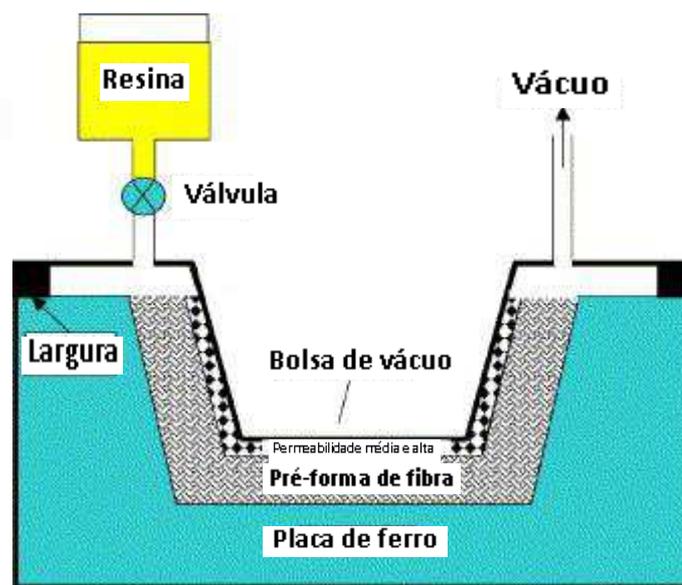


Figura 2.14 - Esquema do processo VARTM (Grujicic et. al., 2003).

2.2.6 Processo de moldagem de compósito por infusão de resina de seemann (SCRIMP)

Na moldagem de compósito por infusão de resina de Seemann (SCRIMP) (Figura 2.15), utiliza-se um molde em apenas um lado da peça e a pressão de vácuo para infusão da resina. O reforço fibroso é colocado no molde logo após a aplicação do desmoldante. E em seguida, o reforço é colocado sobre uma camada de material fino que não adere a resina para facilitar a desmoldagem da peça. Por fim, é colocado um meio distribuidor que na verdade é um material de alta permeabilidade que faz com que a velocidade do fluxo da resina na superfície aumente e conseqüentemente possibilita que haja fluxo na direção transversal e, logo após coloca-se a bolsa de vácuo. Uma vantagem desse processo é a utilização de apenas

um lado do molde, o que reduz o custo. E as desvantagens incluem a dificuldade de automatização do processo e o fato de que o lado da peça moldado pela bolsa de vácuo não tem um bom acabamento superficial (Alves, 2006).

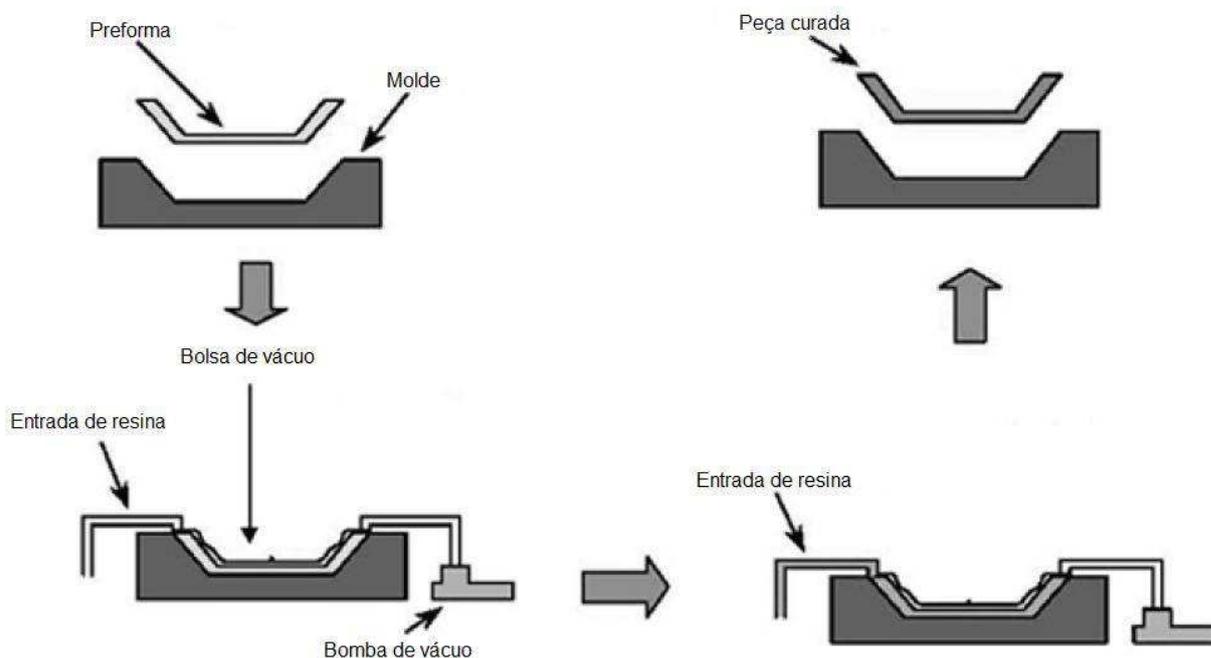


Figura 2.15 - Esquema do Processo SCRIMP (Oliveira, 2010).

2.3 Escoamento em meios porosos

2.3.1 Características gerais de meios porosos

Pode-se definir meio poroso sendo um meio sólido que contém poros, isto é, espaços vazios, podendo haver vários caminhos de conexão (Filho, 2004). De acordo com essa descrição, são exemplos de meios porosos: rochas porosas, agregados fibrosos como tecidos e filtros, e partículas catalíticas contendo micro-poros (Barros, 2008).

O meio poroso é uma porção de espaço ocupada por matéria heterogênea e multifásica, onde pelo menos uma das fases não é sólida, e a outra pode ser líquida ou gasosa. A parte sólida é chamada de matriz sólida e o espaço restante é denominado espaço vazio. A área de contato entre a fase sólida e a fluida do meio é geralmente considerável e os poros são

normalmente estreitos se comparados às dimensões do sólido. Uma representação esquemática de um meio poroso é dada na Figura 2.16.

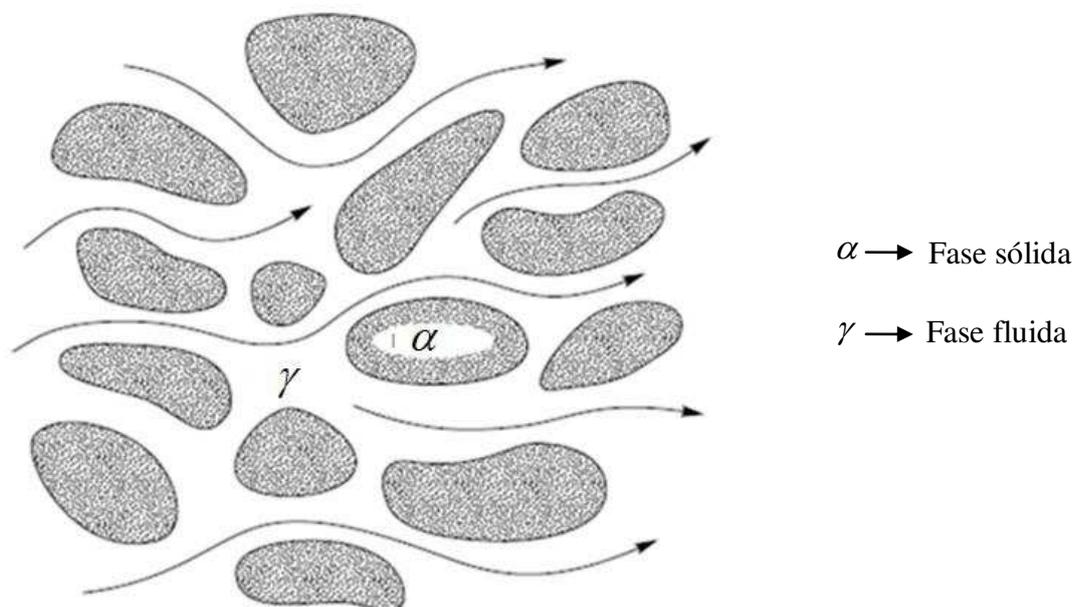


Figura 2.16 - Representação esquemática de um meio poroso (Vafai, 2005).

Um meio poroso pode apresentar poros interconectados ou não. Caso os poros estejam interconectados, a parte sólida do meio poroso representa a fase dispersa. Outra classificação baseia-se na distribuição espacial dos poros, ou dos grãos ou fibras, ou distribuídos ordenadamente ou de maneira aleatória, sendo a última representativa de grande maioria dos meios porosos reais.

Meios porosos podem ser encontrados em uma variedade de campos de aplicação, incluindo células a combustível, tecidos funcionais, filtragens, isolamento térmico, ciências médicas, fenômenos de transporte biológicos (Shin e Dong, 2011), construção civil, aeronáutica (Zhu, 2001).

Diferentes parâmetros afetam o fluxo do fluido no meio poroso, tais como, porosidade e permeabilidade. Como já observado, o meio poroso possui discontinuidades, que são chamadas de vazios ou poros. Porosidade (ε) é a medida de espaço vazio em um meio poroso

(Figura 2.17), dada pela razão entre o volume de poros (v_p) e volume total (v_t) (Equação (2.1)).

$$\varepsilon = \frac{V_p}{V_t} \quad (2.1)$$

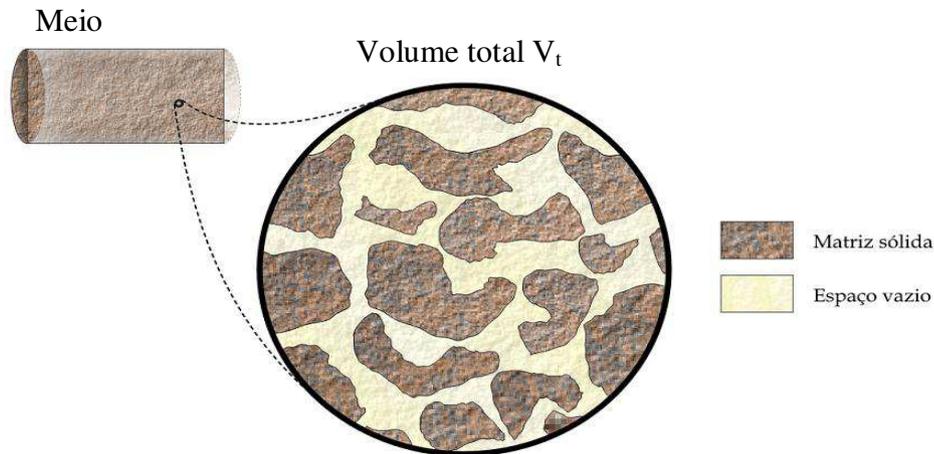


Figura 2.17 - Volume total em um meio poroso (Hurtado, 2005).

Assim, no sistema RTM, quando se subtrai o v_p da peça, tem-se o volume vazio no reforço fibroso, ou seja, a porosidade. Esta indicará a quantidade máxima de resina que a peça final terá.

A permeabilidade do meio poroso pode ser determinada experimentalmente, utilizando-se a declividade da reta posição da frente de fluxo versus tempo de injeção ($X_{ff}^2 \times t$) em uma infiltração retilínea ou ainda através de outras técnicas, como a estudada por Morren et al. (2008), que utilizou um sistema de sensores elétricos para a determinação da permeabilidade (k). A infiltração retilínea é uma medida simples e prática para se determinar a permeabilidade na direção do fluxo unidirecional (Garay, 2010).

A palavra infiltração indica, em geral, o conjunto de fenômenos de movimento de um fluido através de um meio permeável ou poroso, por exemplo, um meio constituído pelos grãos de um terreno arenoso ou argiloso.

Os movimentos de infiltração são frequentes na Engenharia Civil, podendo-se citar os que ocorrem através de: barragens de terra ou de encostamento, solos naturais nas

circunvizinhanças de poços freáticos e artesianos e filtros das estações de tratamento de água para abastecimento público.

Devido à extrema complexidade do sistema de condutos xz pelos vazios de um meio poroso por onde o fluido se movimenta não é conveniente o uso de um tratamento microscópico para descrever tal movimento. É preferível descrever o movimento no seu aspecto global, em termos de grandezas médias. A velocidade de infiltração v é a razão entre a vazão (Q) do fluido e a área (A) normal à direção do movimento, ou seja:

$$v = \frac{Q}{A} \quad (2.2)$$

2.2.3 Fluxo da resina e o processo RTM

No processo RTM, o escoamento da resina se dá através de um reforço fibroso seco até que todo o molde seja preenchido, ocorrendo a impregnação nas fibras. Independente delas serem uma pré-forma, tecido ou manta, em uma moldagem de RTM considera-se o sistema como um meio poroso fibroso ou simplesmente, um meio poroso (Luz, 2011).

Modelar o fluxo de resina num meio poroso (processo RTM) não é uma tarefa fácil. A modelagem é complexa envolvendo as equações de conservação da massa, quantidade de movimento e a Lei de Darcy. A solução desta equação pode ser obtida de forma analítica (com severas simplificações) ou numérica, via softwares comerciais ou códigos desenvolvidos pelo próprio usuário.

Conforme a Figura 2.18, observa-se que os fenômenos de transporte como fluxo, calor e massa são influenciados pela microestrutura do meio poroso (Vafai, 2005). Na prática usam-se as propriedades médias do volume elementar para representar o comportamento macroscópico do sistema poroso.

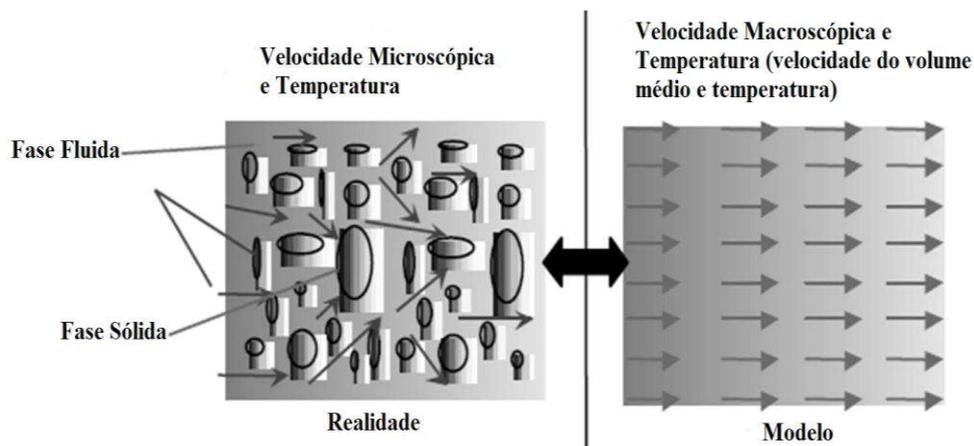


Figura 2.18 - Visão macroscópica e microscópica do campo de velocidade e temperatura no meio poroso (Vafai, 2005).

O engenheiro ou projetista ao se deparar com um problema tem à sua disposição três elementos de análise: experimentação em laboratório, métodos analíticos e métodos numéricos.

A experimentação em laboratório remete aos parâmetros reais do processo, porém pode ter um alto custo ou não ser possível de ser realizada. No entanto ambas têm um papel importante no que diz respeito à validação dos métodos numéricos (Luz, 2011).

Os métodos analíticos apresentam muitas limitações, pois só podem ser aplicados em problemas cujas hipóteses simplificativas não os desviam demasiadamente do fenômeno físico real e em geometrias simples. No entanto têm um papel importante no que diz respeito à validação dos métodos numéricos.

Por fim o método numérico (ou simulação computacional) praticamente não apresenta restrições, podendo ser utilizado para resolver problemas complicados, com contornos definidos em geometrias complexas e gerar resultados em um relativamente curto período de tempo, tornando-se mais rápida e econômica em relação aos outros métodos. O método numérico deve resolver uma ou mais equações diferenciais, substituindo as derivadas existentes na equação por expressões algébricas que envolvem a função incógnita. As técnicas numéricas para a resolução de problemas complexos de engenharia e de física têm sido utilizadas para obter resultados satisfatórios, especialmente devido ao desenvolvimento de

computadores de alto desempenho e de grande capacidade de armazenamento (Gonçalves, 2007).

Para a aplicação dos modelos e equações apresentados, faz-se necessário o uso de softwares para a resolução. Em modelagens por RTM, softwares de simulação computacional ou programas de simulação são usados para prever o perfil de injeção de resina e, assim, avaliar tempo de preenchimento, além de determinar pontos de injeção e de saída de resina. Por isso, alguns parâmetros devem ser conhecidos como viscosidade da resina, permeabilidade do reforço, pressão de injeção e geometria da peça.

De acordo com o universo de softwares comerciais que podem ser utilizados para modelar o processo de RTM pode-se citar o PAM-RTM da ESI Group, o RTM-WORX da Polywork e o LIMS da *University of Delaware*, que são aplicativos específicos para RTM, e também os softwares genéricos de CFD (*Computational Fluid Dynamics*), como o ANSYS CFX e o FLUENT, ambos da ANSYS e o ABAQUS/CFD da ABAQUS, os quais são ferramentas de simulação de problemas de mecânica dos fluidos e transferência de calor, capazes de trabalhar com geometrias complexas e simular o avanço e a cura da resina dentro do molde. O software é utilizado para prever o perfil de injeção de resina e, assim, avaliar o tempo de infiltração (que deve ser inferior ao tempo de gel da resina), pontos de impregnação deficiente e determinar pontos de injeção e de saída de resina/ar (Tan et al., 2007).

O PAM-RTM é uma ferramenta que possibilita e facilita a aplicação de malhas em 2D, mesmo nos casos onde se deseja estudar um comportamento 3D. Ou seja, em um primeiro momento pode-se pensar em uma malha 3D que possua uma quantidade maior de elementos e de informações sobre a geometria e que poderá gerar resultados mais precisos em uma simulação numérica. Os estudos de Ngo et al., (2004) e Wong et al., (2006), comprovam que a eficácia da aplicação de malhas 2D para geometrias simples e regulares, como é o da geometria analisada neste estudo. Este software com as simplificações no processamento de casos com malhas 2D, pode apresentar resultados compatíveis aos casos 3D, e com menor custo, pois é possível realizar a simulação em computadores de menor desempenho (Endruweit et al., 2011).

A modelagem matemática utilizada pelo software comercial PAM-RTM, em especial, não é explicitado na literatura e não há dados precisos sobre este assunto. No manual do software são apresentadas apenas simulações que envolvem a resolução da Lei de Darcy, utilizando-se elementos finitos não-conformes, que somente aceitam malhas com elementos triangulares e tetraedros. Com base nessas informações, pode-se supor que se utiliza volumes finitos com o emprego da técnica de Rede de Análise de Fluxo (FAN). A suposição do emprego de volumes finitos será melhor abordada na sessão de Métodos de Discretização, já o emprego do FAN pode ser inicialmente evidenciado pelo trabalho de Phelan (1997).

Vários autores tais como: Comas-Cardona et al. (2005) e Endruweit et al. (2011) utilizaram o PAM-RTM para simular o preenchimento do molde através de um fluxo transiente baseado na Lei de Darcy usando elementos finitos lineares não-conformes e incorporando o acompanhamento da frente de fluxo durante o processo de injeção.

Souza et al. (2011) utilizaram esta metodologia para avaliar o fluxo de massa da resina através das faces dos volumes e para reconstruir a geometria da frente de fluxo.

Machado et al. (2009) utilizaram o software Composite RTM Process 2 para simular a infiltração de resina poliéster carregada com CaCO_3 em reforços de fibra de vidro em fluxo retilíneo e radial. Este software foi desenvolvido pelo Pôle de Plasturgie de L'Est. de Saint-Avoid, França, para análise do fluxo de resina no processo de RTM para geometrias 2D. Os autores obtiveram resultados que se mostraram dentro de uma faixa de erro esperada, mostrando que o fluxo pode ser descrito tanto analítica quanto numericamente. Hiller et al. (2006), avaliaram a influência da magnitude da pressão positiva de injeção da resina (0,4, 0,8 ou 2,4 bar) e efeito da degasagem da resina por sonificação nas propriedades mecânicas (tração, flexão e impacto) de compósitos de resina poliéster reforçados com fibras de vidro. O procedimento empregado para a degasagem mostrou-se eficaz e o controle do teor de vazios foi importante para a manutenção das propriedades mecânicas (isto é, a resistência) dos compósitos.

2.2.4 Filtração

Fenômenos de filtração têm sido extensivamente estudados em vários campos industriais, tais como: tratamento de água, recuperação de poço de petróleo, ou na indústria de

papel. Referente à filtração de resina carregada de partículas através de uma pré-forma fibrosa, durante os processos de compósitos, alguns modelos e investigações também têm sido publicados. Modelos de filtração foram baseadas em abordagens macroscópicas cinética de acoplamento de retenção para a conservação de massa. Chohra et al. 2006 utilizaram um modelo geométrico e probabilístico para representar a retenção de partículas na direção da espessura durante o processo de infusão.

Ultimamente, estudos experimentais têm-se centrado na filtração de nano-partículas em reforços fibrosos. Assim, ambos, os estudos experimentais e teóricos têm sido publicados sobre estes assuntos específicos.

2.2.4.1 Filtração em meios porosos

O fluxo de suspensões através de meios porosos é um fenômeno natural que pode ser realizado por retenção no interior de um leito profundo poroso. A filtração de partículas de reforço pode abrandar a frente do fluxo de resina e levar ao preenchimento incompleto do molde. Filtração das partículas é um fenômeno complexo que depende de uma combinação das condições de processamento, tais como a pressão de injeção ou a taxa de fluxo e direção de fluxo. Por exemplo, Erdal et al.1999, formulou uma equação de evolução para a concentração de partículas durante a infusão de resina e filtração cinética preenchido com partículas, considerando re-suspensão de partículas. Usando esses modelos para meios porosos em única escala, eles realizaram simulações de fluxo de impregnação para geometrias complexas e relataram que a geometria irregular do molde influencia grandemente a taxa local de filtração. Lefevre et al. 2007, argumentam que a função de retenção adequada precisa ser introduzida para explicar a sua observação experimental de perfis típicos de concentração de partículas.

Alguns fabricantes muitas vezes misturam resina e carga para fins específicos. Certas cargas diminuem o custo total da peça, e melhoram as suas propriedades. Duas classes de partículas devem se distinguir (Levrefe et al., 2009):

- ✓ Partículas nano-escala, para os quais o conteúdo de preenchimento é geralmente mantido baixo.
- ✓ Partículas micro-escala (por exemplo, carbonato de cálcio), para as quais o conteúdo de preenchimento pode variar desde uma pequena porcentagem até 40% em volume ou mais.

Ao lidar com resina preenchida de partículas em processos de LCM induz-se um aumento da viscosidade e possível filtração das partículas no molde em meio fibroso. Ambos os fenômenos retardam a fluidez da resina e aumentam o tempo do ciclo de produção ou no pior dos casos causam o entupimento do reforço de fibra. Para esse tipo de aplicação, um mínimo de 30% em volume de agente de enchimento é a geralmente necessário (Levrefe et al., 2009).

CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Os experimentos, para obtenção dos compósitos o usando processo RTM, foram realizados no Laboratório de Materiais Poliméricos - LAPOL, pertencente ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - (PPGEM) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - (UFRGS). Essa etapa do estudo fez parte do Doutorado Sanduíche realizado no primeiro semestre de 2011, dentro de um programa Nacional de Cooperação Acadêmica – Ação Novas Fronteiras (PROCAD-NF) entre a Universidade Federal de Campina Grande/Programa de Pós-graduação em Engenharia de Processos (UFCG/PPGEP), a Universidade Federal do Rio Grande do Sul/ Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (UFRGS/PPGEM) e a Universidade Federal do Rio Grande do Norte/Programa de Pós-graduação em Engenharia Química (UFRN/PPGEQ), financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

3.1 Material

Para os experimentos, foram usados os seguintes materiais:

- Resina poliéster ortoftálica UCEFLEX 5518 Elekeiroz, com as características descritas na Tabela 3.1;
- Mantas de fibra de vidro (gramatura: 450 g/m²), Fabricante: OCV Capivari

Fibras de Vidro LTDA, Tipo E (Figura 3.1). Foram usadas mantas de fibra de vidro nas seguintes condições: $\%V_f = 30\%$ (6 camadas ~130 g), 24% (5 camadas ~105 g) e 19% (4 camadas ~83 g);

- Carga de carbonato de cálcio comercial utilizada nos seguintes teores: 0%, 10%, 20%, 30% e 40%. A granulometria média do carbonato de cálcio foi de 38 μm e 75 μm (10% e 40%).

Tabela 3.1- Característica da resina poliéster (Garay, 2010).

Propriedades	Norma	Unidades	Valores
Viscosidade Brookfield a 25 °C	ASTM D - 2196	cP	90 – 120
Densidade (25 °C)	ASTM D – 1475	g/cm^3	1,07 – 1,19
Índice de acidez	ASTM D – 1639	mg KOH/g	30, máxima



Figura 3.1-Manta de fibra de vidro após corte.

3.2 Procedimento experimental

3.2.1 Resina com carga

Os experimentos foram realizados com diferentes teores de carbonato de cálcio (Tabela 3.2). O procedimento utilizado na mistura da resina com o CaCO_3 foi: colocou-se um Becker de 200 ml em uma balança e em seguida adicionou-se a resina até 250 g. Logo após, adicionou-se o carbonato de cálcio (CaCO_3) até o teor que se desejava fazer o experimento

(0%, 10%, 20%, 30% ou 40% em massa). Em seguida, fez-se manualmente, uma pré-dispersão do carbonato e, por fim, colocou-se a mistura num agitador mecânico (400 rpm) para homogeneização.

3.2.2 O molde

Para o processamento por RTM, não é suficiente apenas especificar a resina, o tipo de reforço e a arquitetura das fibras. É necessário também esboçar o desenho do molde (Figura 3.2) já que, em última análise, é o mesmo que determina a produtividade e a qualidade da peça. Quando um molde é bem projetado pode-se garantir uma peça bem acabada. No molde utilizado, os canais de entrada e de saída de fluido possui um raio interno de 2,29 mm.

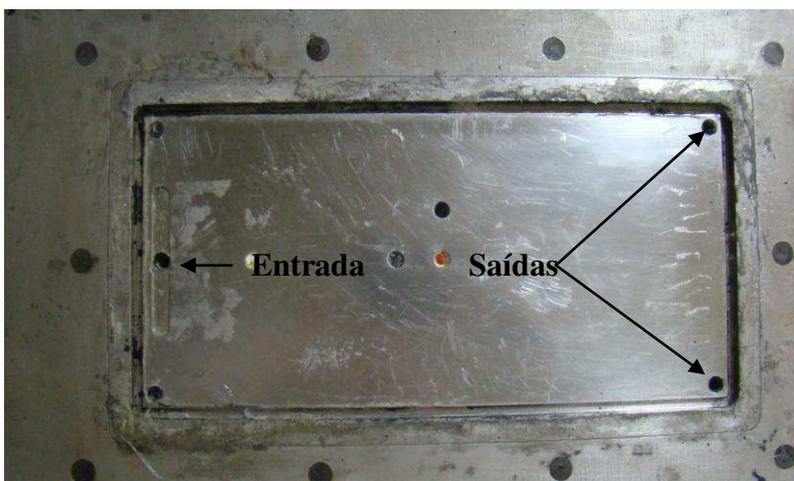


Figura 3.2 - Molde inferior antes da colocação do reforço.

A injeção da resina na pré-forma foi realizada em um molde de aço inox (cavidade: $320 \times 150 \times 3,6$ mm) com a parte superior em vidro reforçado para possibilitar a visualização do avanço da frente de fluxo do fluido.

Na Figura 3.3 é possível ver detalhadamente o posicionamento da pré-forma na cavidade do molde. No caso desta ilustração, utilizando 6 camadas de manta de fibra de vidro.

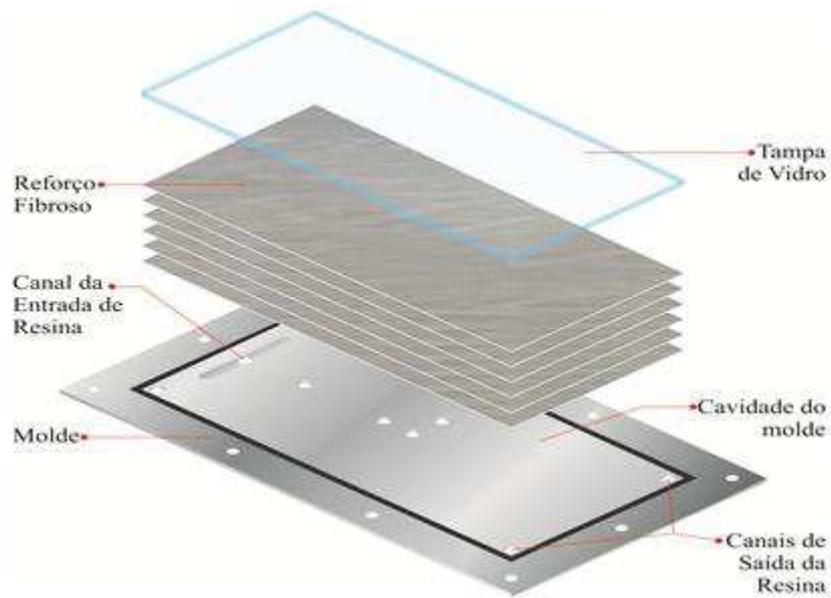


Figura 3.3 - Ilustração do posicionamento do reforço fibroso no sistema RTM UFRGS/LAPOL.

3.2.3 A pré-forma

Para a realização dos experimentos, as fibras de vidro foram cortadas nas dimensões do molde (150 x 320 mm) e dispostas conforme apresentado na Figura 3.4, ou seja, tomando a forma da geometria selecionada.



Figura 3.4 - Pré-forma no interior do molde.

A fração volumétrica de fibra (V_f) estimada é basicamente determinada pelas dimensões do molde, massa do reforço fibroso que foi utilizada e a densidade do mesmo, definida por:

$$V_{f \text{ estimado}} = \frac{1000 m_f}{\rho_f} \times \frac{1}{V} \quad (3.1)$$

onde m_f é a massa de reforço fibroso (g), ρ_f a massa específica da fibra de vidro ($0,001\text{g/mm}^3$) e V o volume do molde a ser utilizado (mm^3).

3.2.4 Equipamento de injeção da resina (Processo RTM)

Foram realizadas infiltrações retilíneas no molde retangular citado. As infiltrações foram realizadas com resina poliéster em um reforço fibroso composto por fibras de vidro. Na Figura 3.5, tem-se uma visão geral do aparato experimental RTM disponível no LAPOL/UFRGS e de alguns dos seus componentes. Dentre eles, inclui-se: (a) vaso de pressão, (b) molde superior em vidro reforçado, (c) molde inferior em aço, (d) controlador eletrônico de pressão (druck), (e) transdutores de pressão calibrado, (f) sistema de aquisição de dados e (g) câmera digital.

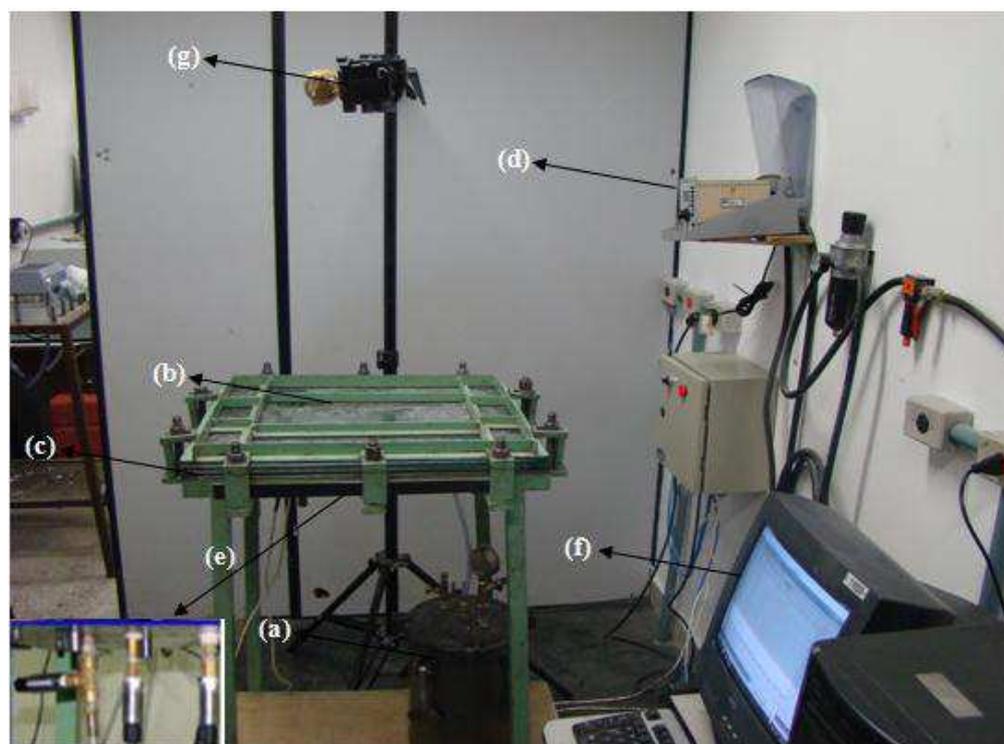


Figura 3.5 - Aparato experimental RTM: (a) vaso de pressão, (b) molde superior em vidro reforçado, (c) molde inferior em aço, (d) controlador eletrônico de pressão, (e) transdutores de pressão calibrados, (f) sistema de aquisição de dados e (g) câmera digital.

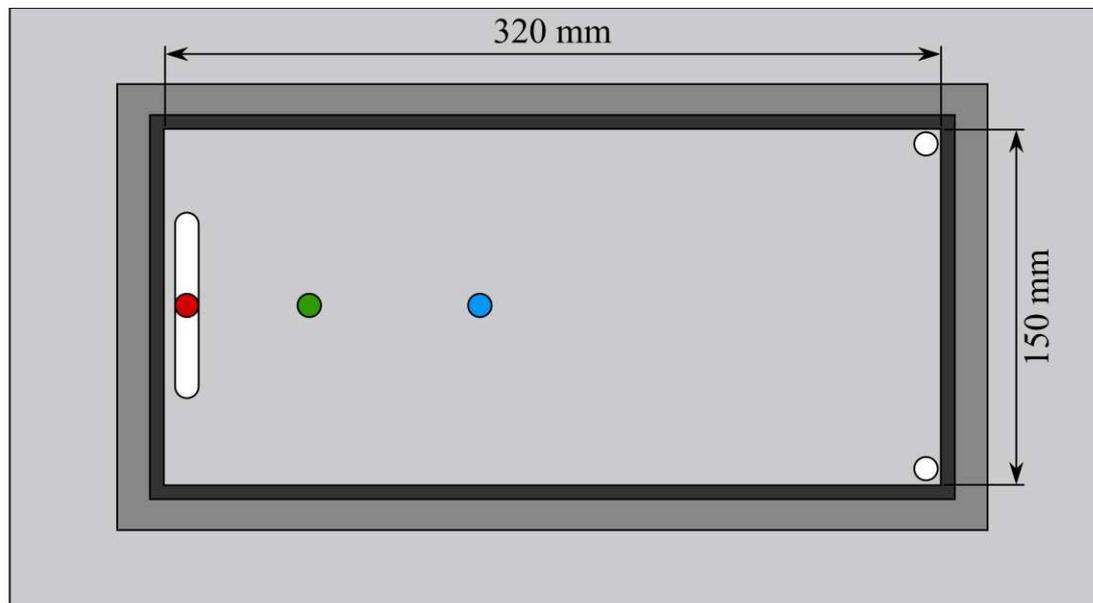
3.2.5 Descrição dos experimentos

Inicialmente fez-se a limpeza do molde, e a pesagem das mantas de fibra de vidro para controlar e calcular o V_f . Em seguida, fez-se o posicionamento das mantas no molde, colocou-se resina com ou sem carbonato de cálcio no recipiente cilíndrico (Becker) dentro do vaso de pressão e então o molde foi fechado. Depois preparou-se o sistema de aquisição de dados de pressão de injeção da resina e de temperatura do molde. Após estes procedimentos, fez-se o fechamento das válvulas e o preparo da máquina fotográfica e do cronômetro para registrar a posição da frente de fluxo e o tempo de preenchimento. Posteriormente a pressão de trabalho foi pré-ajustada no druck. Abriu-se a válvula de pressão e iniciou-se a aquisição de dados e a injeção de resina no molde, dando início à infiltração de resina nas fibras com a formação da frente de fluxo (Figura 3.6).



Figura 3.6 - Sequencia esquemática do experimento no RTM: (a) limpeza do molde, (b) pesagem da manta fibra de vidro para calcular V_f , (c) posicionamento da manta no molde, (d) pesagem da resina, (e) pesagem do carbonato de cálcio, (f) agitação mecânica e (g) fechamento do molde, (h) preparo do programa de aquisição de dados, (i) fechamento das válvulas, (j) preparo da máquina fotográfica para registrar o tempo e a posição de injeção da resina, (l) ajuste da pressão de injeção e (m) injeção de resina no molde .

Foram utilizados três transdutores de pressão no molde, conforme mostrado na Figura 3.7. É importante salientar que a pressão aumenta com o tempo para todos eles e, como eles estão colocados em diferentes pontos do molde ao longo da linha média de preenchimento, tendem a diferentes platôs (valor no qual a pressão de injeção passa a ser considerada constante) que diminuem do vermelho para azul.



● Transdutor de Pressão 1 ● Transdutor de Pressão 2 ● Transdutor de Pressão 3

Figura 3.7 - Desenho esquemático da distribuição dos transdutores de pressão no molde de RTM.

As pressões foram pré-ajustada em todos os experimentos para 0,25, 0,50 ou 0,75 bar. A pressão real, usada para o estudo numérico, foi obtida pela leitura dos transdutores de pressão e calculada através do valor médio entre 88,4% e 93,06% da pressão máxima, após a estabilização do sistema. A Tabela 3.2 apresenta dados de todos os casos analisados neste estudo.

Tabela 3.2 - Condições experimentais para os diferentes sistemas estudados.

Caso	%CaCO ₃ em massa	V _f (%)	Pressão Setup (bar)	Pressão Experimental (bar)	Temperatura (°C)
A1	0	19	0,25	0,203	18,7
A2	40		0,25	0,213	20,3
A3	0	24	0,25	0,218	18,5
A4	10		0,25	0,189	18,7
A5	20		0,25	0,191	19,3
A6	30		0,25	0,218	19,7
A7	40		0,25	0,212	20,1
A8	0	30	0,25	0,221	19,2
A9	10		0,25	0,209	19,0
A10	20		0,25	0,218	21,7
A11	30		0,25	0,215	18,1
A12	40		0,25	0,212	19,0
A13	0		0,50	0,459	19,5
A14	10		0,50	0,454	18,8
A15	20		0,50	0,450	19,7
A16	30		0,50	0,451	19,9
A17	40		0,50	0,451	18,8
A18	0		0,75	0,701	18,7
A19	10		0,75	0,702	18,1
A20	20	0,75	0,698	19,9	
A21	30	0,75	0,695	20,3	
A22	40	0,75	0,701	20,1	
A23	10, 38 μm	30	0,25	0,229	18,5
A24	40, 38 μm		0,25	0,203	18,3
A25	10, 75 μm		0,25	0,202	18,8
A26	40, 75 μm		0,25	0,200	18,6

3.2.5 Determinação das propriedades do meio fibroso e resina

a) Viscosidade da mistura carbonato de cálcio/resina

A viscosidade é uma propriedade de líquidos e gases que se caracteriza pela medida da resistência ao escoamento que um fluido oferece quando se encontra sujeito a um esforço tangencial. Esta propriedade do fluido é muito importante no que se refere ao processo de

moldagem por RTM. As medidas de viscosidade da mistura resina poliéster/CaCO₃, foram obtidas através de um viscosímetro de modelo Brookfield HBDV-II+C/P com o Spindle S51 e na faixa de temperatura entre 18 e 25 °C

b) Massa específica da mistura carbonato de cálcio/resina

Para a determinação da densidade da mistura de resina com carbonato de cálcio (10, 20, 30 e 40%), utilizou-se a regra das misturas, de acordo com a Equação 3.3:

$$\rho_m = \rho_R \% V_R + \rho_{CaCO_3} \% V_{CaCO_3} \quad (3.3)$$

onde: ρ_m é a massa específica da mistura (g/cm³); ρ_R é a massa específica da resina (g/cm³); V_R é a fração volumétrica da resina (g), v_R é o volume da resina (cm³); m_R é a massa da resina (g); v_{Total} é o volume total (cm³);

$\left(V_R = \frac{v_R}{v_{Total}}, v_R = \frac{m_R}{\rho_R} \text{ e } v_{Total} = v_R + v_{CaCO_3} \right)$;

ρ_{CaCO_3} é a massa específica do carbonato de cálcio e v_{CaCO_3} é a fração volumétrica do carbonato de cálcio v_{CaCO_3} é o volume da resina (cm³); m_{CaCO_3} é a massa do carbonato de cálcio

(g); $\left(v_{CaCO_3} = \frac{v_{CaCO_3}}{v_{Total}}, v_{CaCO_3} = \frac{m_{CaCO_3}}{\rho_{CaCO_3}} \text{ e } v_{Total} = v_R + v_{CaCO_3} \right)$ (Levy Neto e Pardini, 2006).

c) Permeabilidade do meio poroso

Define-se permeabilidade como sendo a facilidade com que um fluido escoar pelo meio poroso ou, em outras palavras, é uma medida da condutividade de fluidos no meio. A permeabilidade para o escoamento horizontal e linear de um fluido incompressível de viscosidade μ através de uma amostra de comprimento L, área transversal A é definida de acordo com a Equação (3.4):

$$k = \frac{q \mu}{A \left(\frac{\Delta P}{L} \right)} \quad (3.4)$$

onde q é a vazão volumétrica (m³/s) e ΔP é o diferencial de pressão entre as duas extremidades da amostra (Pa).

Podemos definir permeabilidade em três tipos, a saber:

- ✓ *Permeabilidade absoluta* que independe do fluido injetado; é uma propriedade somente do meio. Ainda assim, alguns fatores podem afetar o valor da permeabilidade medida, dentre eles: uso de gás como fluido para medida de permeabilidade, Reação rocha fluido e sobrecarga.
- ✓ *Permeabilidade efetiva* é uma medida realizada quando o meio poroso está saturado com pelo menos dois fluidos. Quando dois fluidos escoam juntos pelo meio, a “facilidade” com que cada um deles escoam é prejudicada pela presença do outro fluido. Desta forma, a permeabilidade efetiva (sempre menor que a absoluta) varia de acordo com a saturação dos fluidos no meio poroso. Quanto maior for a presença de um fluido, maior será a permeabilidade efetiva do mesmo.
- ✓ *Permeabilidade relativa* é simplesmente uma forma adimensional (normalizada) de quantificar a permeabilidade efetiva. É definido como a razão entre a permeabilidade efetiva e a absoluta.

A permeabilidade do meio poroso no trabalho em questão, foi determinado de duas maneiras:

- ✓ *Analiticamente* através da Equação (3.5) abaixo;

$$t_{ff} = \frac{\mu \varepsilon}{2 k P_{inj}} x_{ff}^2 \quad (3.5)$$

- ✓ *Numericamente* comparando as posições da frente de fluxo predita e experimental até atingir um erro quadrático mínimo (erro quadrático mínimo = diferença entre a estimativa e o valor real elevado ao quadrado, ou seja, $e = (X_e - X_r)^2$).

Para um melhor entendimento na determinação da permeabilidade do meio poroso, na Figura 3.8, observa-se a frente de fluxo experimental para um escoamento retilíneo.

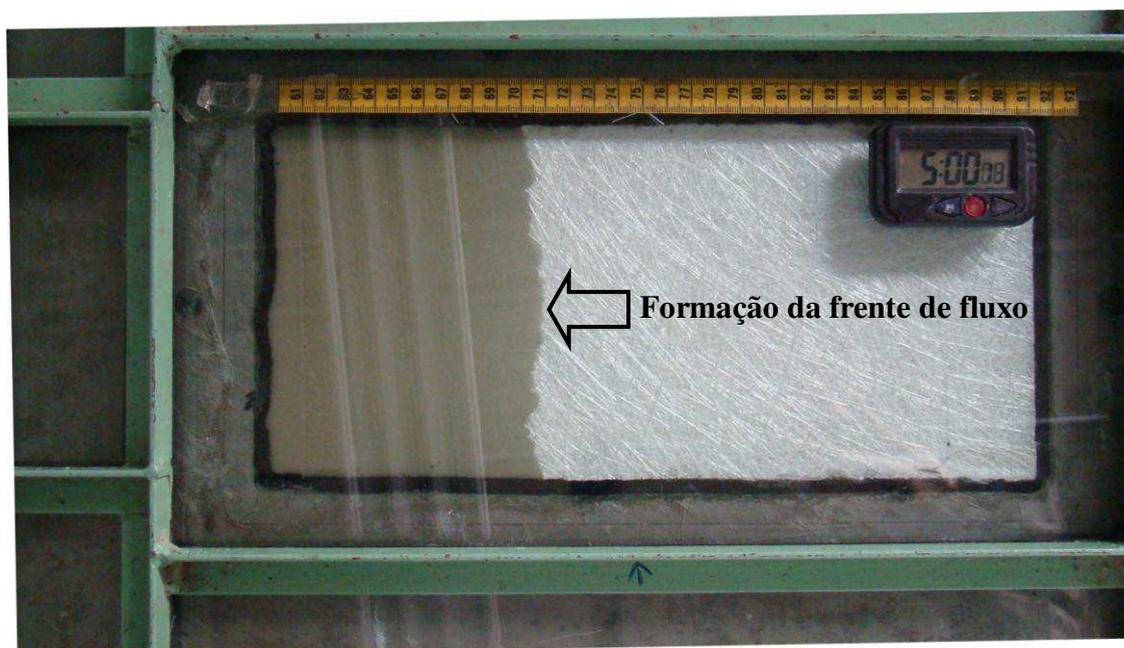


Figura 3.8 - Determinação da permeabilidade através do escoamento retilíneo.

d) Mobilidade da mistura

Define-se mobilidade de um fluido como sendo a relação entre sua permeabilidade efetiva e a sua viscosidade. Pode ser representada da seguinte forma:

$$\gamma = \frac{k}{\mu} \quad (3.6)$$

Sendo assim, a mobilidade da mistura (resina+CaCO₃, o fluido deslocado) é dada por

$\gamma_m = \frac{\kappa_m}{\mu_m}$. Assim como a permeabilidade efetiva, a mobilidade também depende da saturação.

e) Granulometria

Para a realização da análise granulométrica por peneiramento do carbonato de cálcio, utilizou-se o processo que visa definir, quais faixas pré-estabelecidas de tamanho de partículas, e qual a percentagem em peso que cada fração possui em relação à massa total da amostra em análise.

As amostras para este ensaio foram preparadas fazendo-se uma dispersão dos pós em álcool isopropílico, agitando em um ultrassom por 60s. O equipamento utilizado foi um granulômetro a laser da marca CILAS modelo 1180, do Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER) da UFRGS.

Por último, analisou-se a seção transversal do compósito moldado, para determinar a espessura de cada lâmina do laminado, através do microscópio óptico da marca Carl Zeiss modelo AX10.

CAPÍTULO 4 - METODOLOGIA TEÓRICA

O capítulo inicia descrevendo os fundamentos teóricos referentes à dinâmica dos fluidos em meios porosos, incluindo a lei de Darcy como equação de conservação da massa. Logo após, o assunto passa a ser o uso da Análise computacional através do PAM-RTM. São apresentados ainda, os ambientes para simulação com suas respectivas entrada e saída para as etapas de pré e pós-processamento.

4.1 Fluxo em meios porosos e a Lei de Darcy

No processo RTM, a resina flui através de um reforço fibroso, considerado como um meio poroso. Neste caso, o fluxo de resina é governado pela lei de Darcy, que indica que a taxa de fluxo de resina por unidade de área é diretamente proporcional ao gradiente de pressão e inversamente proporcional à viscosidade da resina. A constante de proporcionalidade é chamada de permeabilidade do meio poroso. Ela é independente do fluido, mas depende da direção das fibras que formam o reforço (se o meio poroso não é isotrópico). O reforço está inicialmente seco, e a resina deve preencher toda a cavidade. Forças capilares de atração ou repulsão agem na frente do fluxo. Estas forças, que dependem da tensão superficial da resina e da sua capacidade de aderir à superfície das fibras, tem o efeito de reduzir ou aumentar a pressão na frente de fluxo da resina. No entanto, elas são considerados como suficientemente pequenas em relação ao campo de pressão em RTM de modo que podem ser normalmente negligenciados por modelos numéricos.

Em 1856, Darcy divulgou em Dijon, França, o primeiro trabalho experimental referente ao escoamento em meios porosos, como resultado de suas observações sobre o fluxo de água através de meios arenosos de várias espessuras. Darcy verificou que a velocidade média, referente à área total do leito, é diretamente proporcional à pressão motora e inversamente proporcional à espessura do meio. Este princípio ficou perpetuado como “Lei de Darcy” e se aplica a uma única fase fluida percolando um meio poroso em escoamento lento.

Esse experimento foi realizado em um filtro homogêneo de altura h , limitado por seções planas de mesma área superficial A . O filtro foi preenchido com um líquido incompressível. Manômetros abertos foram então colocados para medir a pressão nos pontos inferior e superior do filtro, fornecendo as alturas h_1 e h_2 , respectivamente. Pela variação das várias quantidades envolvidas, Darcy deduziu a seguinte relação:

$$Q = -kA \frac{(h_2 - h_1)}{h} \quad (4.1)$$

onde Q é o volume total de fluido que atravessa o filtro por unidade de tempo e k é uma constante que depende das propriedades do fluido e do meio poroso. A Equação (4.1) é conhecida como Lei de Darcy. O sinal negativo na expressão para Q indica que o escoamento é na direção oposta à direção de pressão crescente (Figura 4.1).

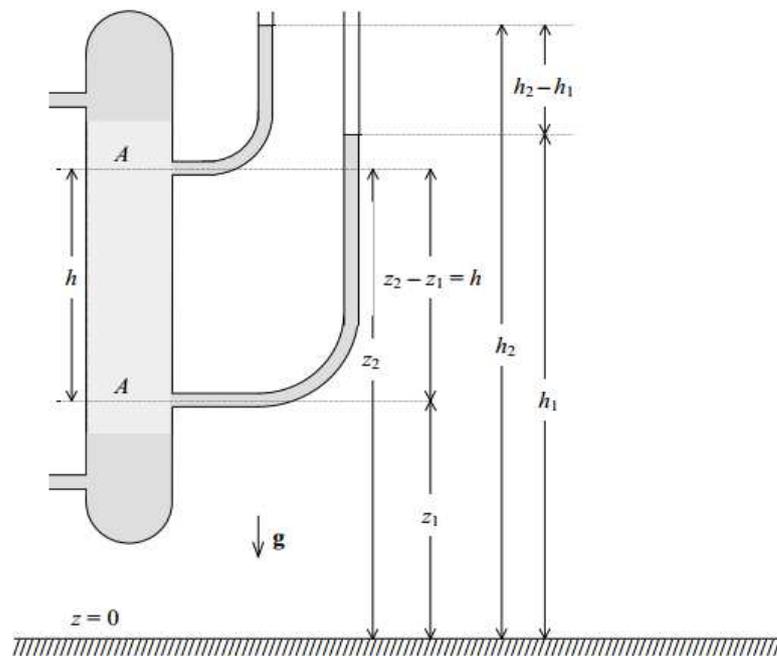


Figura 4.1 – Esquema do experimento da filtração de Darcy.

A Lei de Darcy pode ser reescrita em função da pressão e da massa específica do líquido. No ponto superior do filtro (com elevação z_2), a pressão é $p_2 = \rho g (h_2 - z_2)$, e no ponto inferior (com elevação z_1), a pressão é $p_1 = \rho g (h_1 - z_1)$. Como $z_2 - z_1 = h$, aplicando na Equação (4.1) obtém-se:

$$Q = -kA \left[\frac{(p_2 - p_1)}{\rho g h} + 1 \right] \quad (4.2)$$

introduzindo-se uma nova constante $k' = \frac{k}{\rho g}$ e supondo ρg constante, obtém-se:

$$Q = -k' A \left[\frac{(p_2 - p_1) + \rho g h}{h} \right] \quad (4.3)$$

A Lei de Darcy, em sua forma original, Equação (4.3), é de utilidade restrita. A primeira tarefa é elucidar o significado físico da constante k' . Esta constante depende tanto das características geométricas do meio poroso quanto das propriedades físicas do fluido em questão. Nutting (1930) e, depois, Wyckoff et al. (1933) consideraram que esta constante pode ser escrita como

$$k' = \frac{k}{\mu} \quad (4.4)$$

onde μ é a viscosidade dinâmica do fluido e k é a permeabilidade específica do meio poroso. Como o vetor velocidade do fluido \vec{v} pode ser definido por

$$\vec{v} = \frac{Q}{A} \quad (4.5)$$

e a lei de Darcy toma a forma

$$\vec{v} = -\frac{k}{\mu} \left(\frac{p_2 - p_1 + \rho g h}{h} \right) \quad (4.6)$$

A Equação (4.6) pode ser generalizada na forma diferencial e vetorial, fazendo-se h tender a zero.

$$\vec{v} = -\frac{k}{\mu} (\nabla p - \rho \vec{g}) \quad (4.7)$$

onde \vec{g} é o vetor na direção da gravidade e com a magnitude da aceleração da gravidade. No caso mais geral, a pressão na Equação (4.7) pode ser a soma da pressão estática com a pressão capilar. Considerando desprezíveis os efeitos capilares e gravitacionais, pode-se escrever:

$$\vec{v} = -\frac{1}{\mu} k \nabla p \quad (4.8)$$

onde \vec{v} é o vetor velocidade do fluido e ∇p é o gradiente de pressão.

4.2 Modelagem matemática

4.2.1 A Equação da conservação

A equação de conservação da massa para um fluido escoando é dada por:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (4.9)$$

Para descrever o fluxo de um fluido incompressível (massa específica constante), a equação da continuidade (conservação da massa) pode ser escrita, como:

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (4.10)$$

Substituindo a Equação (4.8) na Equação (4.10), obtém-se:

$$\nabla \cdot \left(-\frac{1}{\mu} k \nabla p \right) = 0 \quad (4.11)$$

Para o caso de k e μ constantes, a Equação (4.11) assume a forma:

$$\nabla^2 p = 0 \quad (4.12)$$

onde, por exemplo, em coordenada cartesiana, numa abordagem bidimensional transiente, $p=p(x,y,t)$.

As condições iniciais e de contorno usadas para solução da Equação (4.12), são dadas por:

- ✓ $p = p_0$ no ponto de injeção;
- ✓ $\frac{\partial p}{\partial n} = 0$ nas paredes do molde (n é a direção normal à parede), e
- ✓ $p = p_f$ na linha da frente da resina, onde p é a pressão, que é normalmente considerada zero (manométrica).

4.2.2 Fluxo retilíneo através de um molde retangular

Na infiltração retilínea, o fluido é introduzido por uma porta de entrada na extremidade do molde, com fluxo limitado pelos lados paralelos, em direção aos pontos de ventilação na outra extremidade. Considerando a pressão de injeção (P_{inj}) constante, o tempo (t_f) requerido para frente de fluxo do fluido alcançar uma posição (x_f) particular dentro do molde, pode ser obtido a partir da manipulação da Equação (4.13).

Para um fluxo unidimensional global de um líquido Newtoniano e incompressível

$$u_x = \frac{Q_x}{A} = -\frac{k}{\mu} \frac{dP}{dx} \quad (4.13)$$

e

$$u_x = \varepsilon v_x = \varepsilon \frac{dx}{dt} \quad (4.14)$$

sendo Q_x a vazão volumétrica (m^3/s), A a área da seção transversal da cavidade do molde normal à direção; u_x a velocidade superficial ou a velocidade baseada numa cavidade de molde vazia, v_x velocidade da frente de fluxo; ε a porosidade da pré-forma; dP/dx o gradiente de pressão do fluido ao longo do reforço e x a distância na direção do deslocamento da frente de fluxo.

Como pode ser inferido da Equação (4.14), o gradiente de pressão (dP/dx) é virtualmente infinito quando a infiltração inicia (dx muito pequeno) e, com o progresso da infiltração, esse gradiente diminui e, por conseguinte, a velocidade da frente de fluxo diminui com o tempo.

Para um fluxo retilíneo, que apresenta velocidade do fluido igual à zero nas direções y e z , pode-se escrever a Equação (4.11) como segue:

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{k}{\mu} \frac{dp}{dx} \right) = 0 \quad (4.15)$$

Integrando a Equação 4.15, tem-se:

$$\frac{k}{\mu} \frac{dP}{dx} = C_1 \quad (4.16)$$

onde C_1 é a constante de integração. Isolando o gradiente de pressão no primeiro membro da Equação (4.16), e em seguida integrando os dois membros, obtêm-se:

$$P = \frac{\mu}{k} C_1 x + C_2 \quad (4.17)$$

sendo C_2 a segunda constante de integração. Logo, na Equação (4.17) o x assume duas condições,

$$\begin{cases} x = 0 \Rightarrow P = P_{inj} \Rightarrow C_2 = P_{inj} \\ x = x_{ff} \Rightarrow P = 0 \end{cases} \quad (4.18)$$

Então, substituindo as condições anteriores na Equação (4.17), obtém-se:

$$\frac{\mu}{k} C_1 x_{ff} + P_{inj} = 0 \quad (4.19)$$

Em seguida, isolando a constante C_1 da Equação (4.19) e substituindo na Equação (4.17), tem-se:

$$C_1 = - \frac{P_{inj} k}{x_{ff} \mu} \quad (4.20)$$

$$P = \frac{\mu}{k} \left(- \frac{P_{inj} k}{x_{ff} \mu} \right) x + P_{inj} \quad (4.21)$$

Com isso, obtém-se a Equação (4.22), o que implica que, se a viscosidade do fluido que infiltra um reforço isotrópico (k constante) permanece constante, existe uma distribuição linear de pressão entre o ponto de injeção e a frente do fluxo de acordo com:

$$P = P_{inj} \left(1 - \frac{x}{x_{ff}} \right) \quad (4.22)$$

onde P_{inj} é a pressão de injeção da resina, x_{ff} é a posição da frente de fluxo e, por definição, a pressão é igual a zero na frente de fluxo.

Substituindo a equação (4.22) na Equação (4.16) e derivando a Equação resultante e substituindo na Equação (4.13) e usando a Equação (4.14), resulta na Equação (4.17), dada por:

$$v_x = \frac{k P_{inj}}{\mu \varepsilon x_{ff}} \quad (4.23)$$

Da Equação (4.23), duas possibilidades de condições experimentais podem ser usadas para manter o fluxo retilíneo: pressão de injeção constante ou vazão de injeção constante. Neste trabalho será usado somente o primeiro caso.

Desde que $v_x = \frac{dx}{dt}$, pode-se escrever:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{k}{\mu \varepsilon} \frac{P_{inj}}{x} \quad (4.24)$$

Separando-se as variáveis e integrando, obtém-se:

$$\int_0^{x_{ff}} x dx = \int_0^{t_{ff}} \frac{k P_{inj}}{\mu \varepsilon} dt \quad (4.25)$$

dando com resultado,

$$\frac{x_{ff}^2}{2} = \frac{k P_{inj}}{\mu \varepsilon} t_{ff} \quad (4.26)$$

De onde obtém-se o tempo necessário para um fluido atingir certa posição definida no molde, que é dado por:

$$t_{ff} = \frac{\mu \varepsilon}{2 k P_{inj}} x_{ff}^2 \quad (4.27)$$

4.3 Análise computacional

4.3.1 A malha numérica

Para as simulações numéricas no PAM-RTM foram utilizadas malhas 2D. O molde utilizado na simulação tem dimensões de 320 × 150 mm e sua geometria (malha) está representada na Figura 4.2. A malha dessa figura possui 41005 elementos (20739 nós), com refinamento próximo à região de injeção.

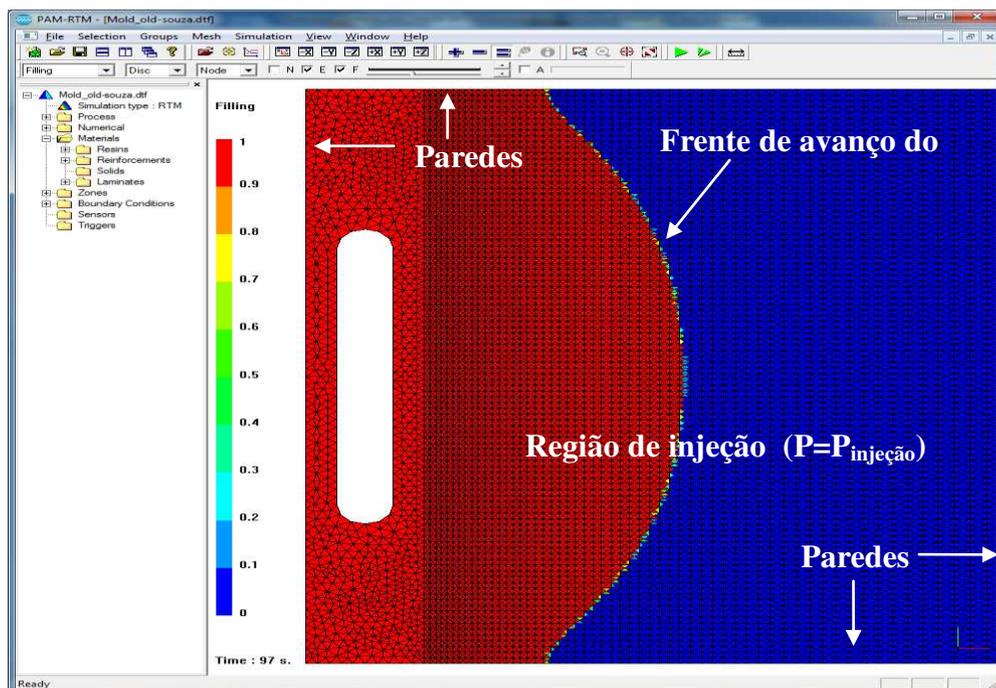


Figura 4.2 - Malha 2D utilizada nas simulações computacionais com o PAM-RTM.

4.3.2 Criação do modelo no PAM-RTM

O PAM-RTM é um software comercial dedicado ao estudo das moldagens por RTM, logo, não se faz necessário realizar adaptações ou implementar um sistema de carregamento de variáveis. Todos os dados do caso a ser estudado são preenchidos em campos pré-determinados. O layout do software, para o caso 40% CaCO₃, é apresentado na Figura 4.3, com detalhe para o menu-guia lateral, onde estão localizados os conjuntos dos campos para preenchimento das especificações de cada caso.

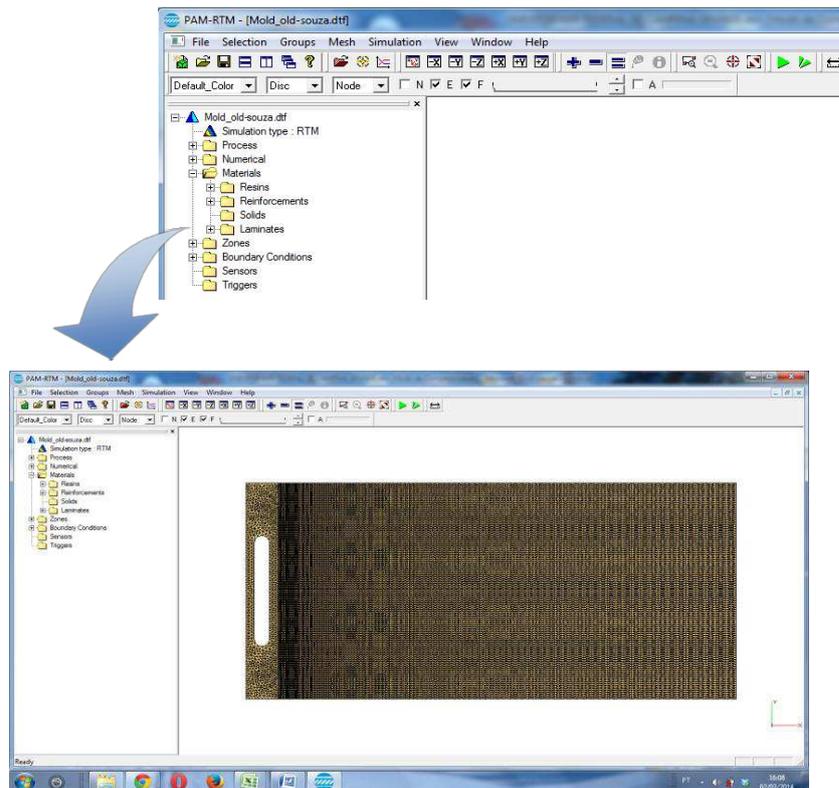


Figura 4.3 - Esboço do software PAM-RTM com detalhe no menu-guia lateral.

Para dar início ao processo de setup no PAM-RTM para cada caso, utilizou-se de uma malha 2D. Em seguida, foi adicionado um novo fluido no campo Materials > Resins, chamado de resina poliéster; nele foram inseridos os dados de massa específica e viscosidade do fluido, observado na Figura 4.4 (a). Em seguida foi adicionado um novo reforço fibroso no campo Materials > Reinforcements, chamado de fibra de vidro; nele foram inseridos os dados referentes à permeabilidade do reforço fibroso, sendo este considerado isotrópico, como observado na Figura 4.4 (b).

Em sequência, foram inseridos os parâmetros de processo, tais como tempo máximo de injeção (tempo a partir do qual a simulação é encerrada, mesmo que não haja o preenchimento completo do molde) e especificação da gravidade, observada na Figura 4.4 (c). Após, foram inseridos os parâmetros da simulação, as variáveis que se deseja calcular (isto é, pressão, tempo de preenchimento e velocidade) e o período de amostragem desejado, observado na Figura 4.4 (d).

Nas Figuras 4.5 e 4.6, observa-se a malha com uma zona de enchimento e criação do grupo de entrada. Nesta etapa é informado ao PAM-RTM que estas zonas possuem uma espessura de 3,6 mm (espessura da cavidade do molde), indicando este valor no campo Zone > Thickness, que também pode ser observado na Figura 4.5. Na zona wall, que são as paredes internas da cavidade do molde, determina-se a condição de velocidade zero. A zona enchimento contém apenas uma entrada, como observado na Figura 4.6.

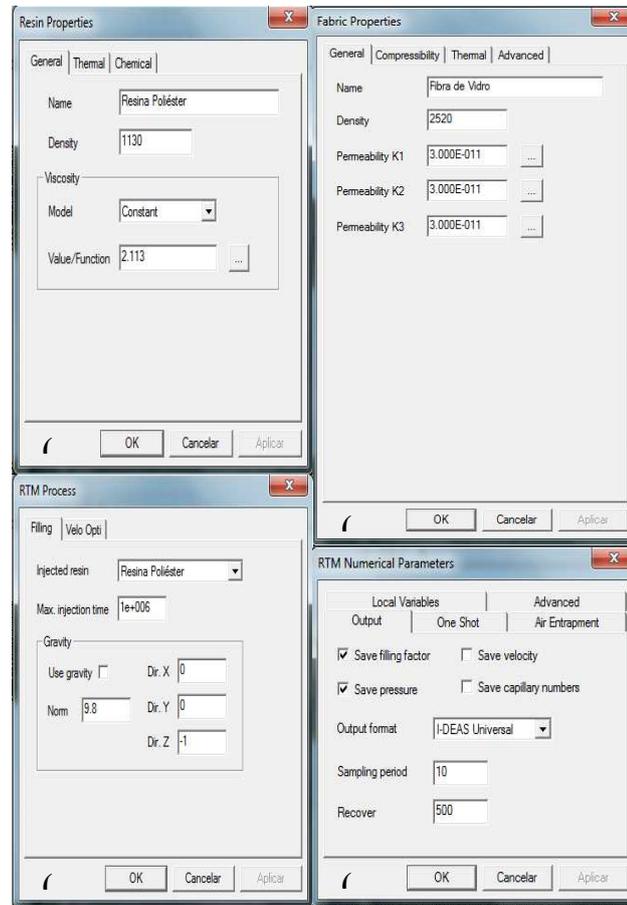


Figura 4.4 - Preenchimento dos campos das propriedades no PAM-RTM para o caso $V_f = 30\%$, $P = 0,5$ bar e 40% de CaCO_3 . Propriedades da resina (a), propriedades do reforço (b), parâmetros do processo (c) e parâmetros numéricos (d).

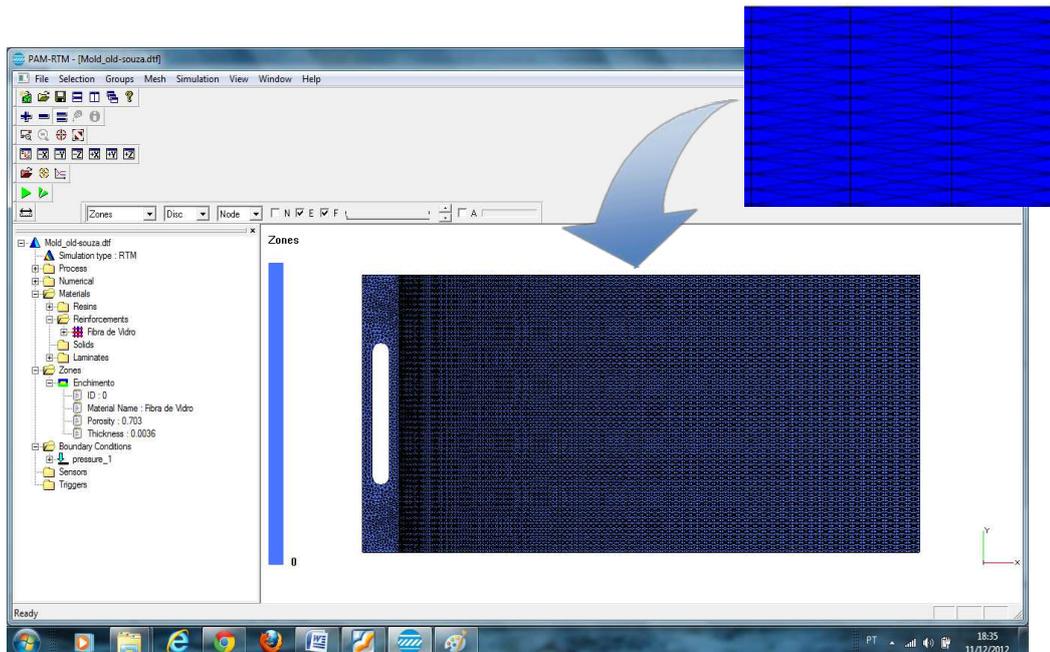


Figura 4.5 - Malha 2D em uma zona.

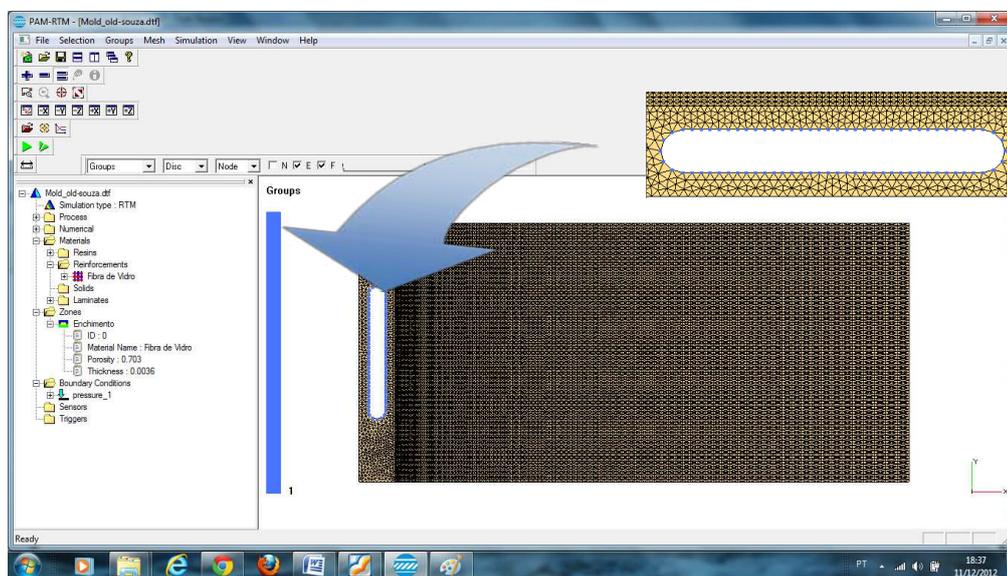


Figura 4.6 - Criação do grupo de entrada.

Por fim, implementou-se as condições de contorno de pressão. Para o grupo saída, foi atribuída a condição de abertura, com pressão nula. Para o grupo entrada atribuiu-se os valores da pressão experimental, variando com o tempo. Para isto, foi preenchido o campo de pressão variável com os dados experimentais, observados na Figura 4.7 (a). Na Figura 4.7 (b) é apresentado o gráfico gerado pelo PAM-RTM com estes dados carregados.

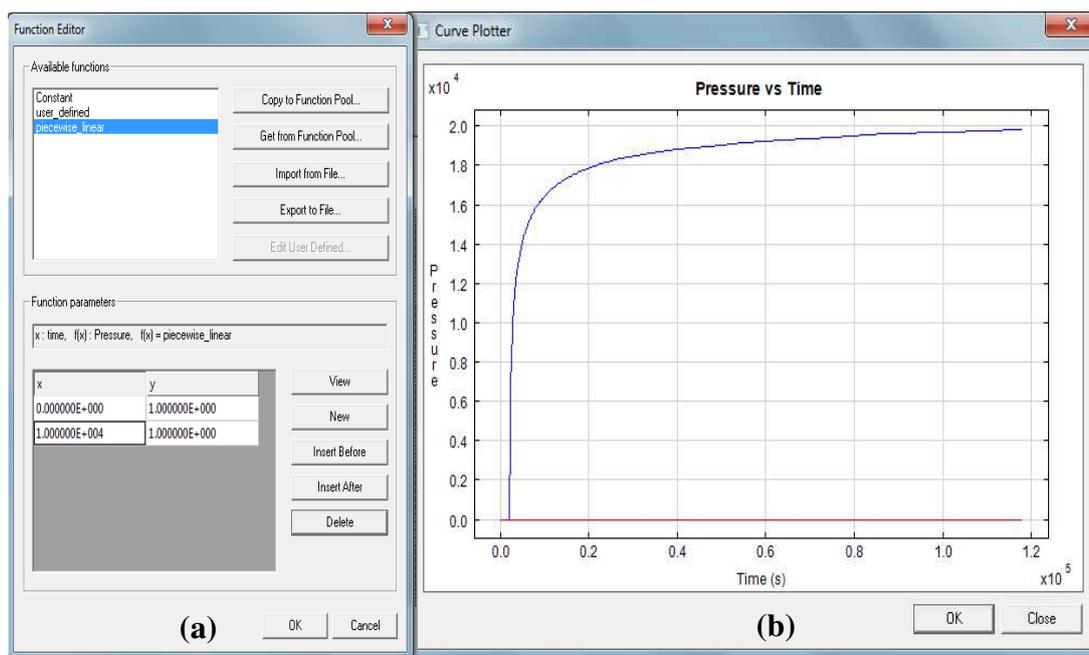


Figura 4.7 - Preenchimento dos valores de P_{inj} para o caso $V_f = 30\%$, $P = 0,5$ bar e 40% $CaCO_3$ no PAM-RTM (a) e o gráfico gerado (b).

Finalizando a etapa de pré-processamento, os modelos foram carregados e processados em um Computador com processador Intel (R) Core (TM) i3 CPU M330 @ 2,13 GHz, 4 GB de memória RAM e 250 GB de memória física (HD). Por fim, os dados gerados no processamento foram carregados no próprio PAM-RTM, conforme apresentado na Figura 4.8.

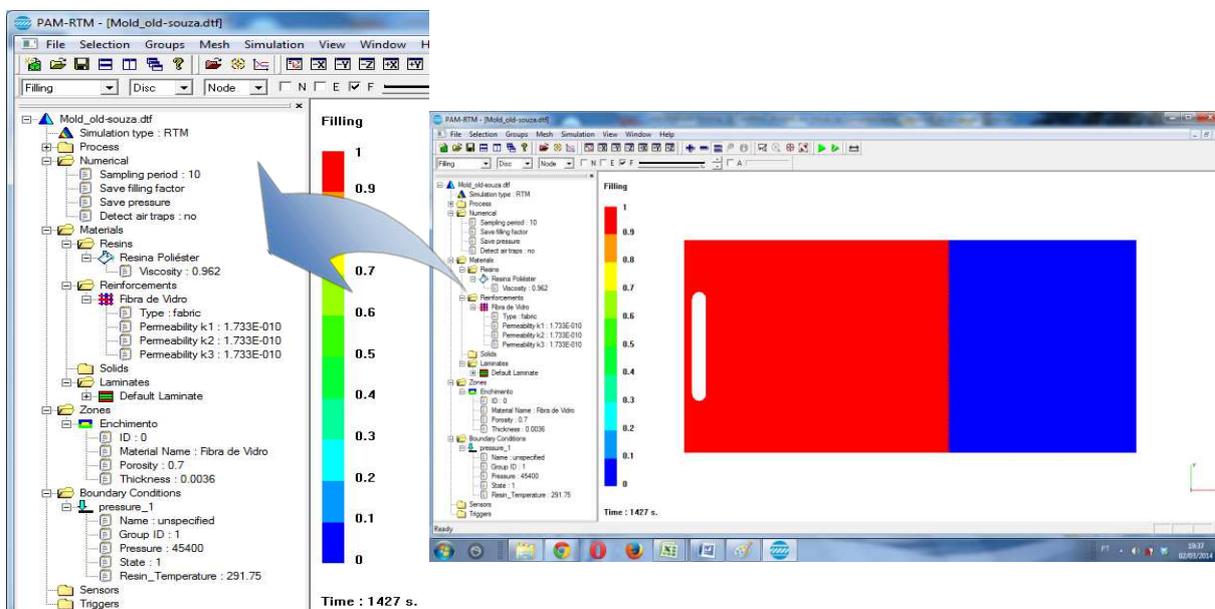


Figura 4.8 - Interface do PAM-RTM carregada com os resultados para o caso $V_f = 30\%$, $P = 0,5$ bar e 40% $CaCO_3$.

4.3.3 Teste de independência de Malha

A independência de malha é obtida quando resultados obtidos para uma simulação efetuada em uma certa malha não variam significativamente de outra simulação efetuada em uma malha com maior refino, ou seja, quando um refino na malha empregada não representa significativas mudanças nos resultados.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos para independência de malha para o sistema particular estudado.

CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos experimentalmente e numericamente. O capítulo começa com os efeitos do teor de CaCO_3 na resina, logo após, o efeito da variação da pressão de injeção (P_{inj}) e por fim o efeito do teor de fibra. E finalmente, foram comparados os resultados experimentais com os numéricos, para validar os dados desta pesquisa.

5.1 Efeito do teor de CaCO_3 na resina

5.1.1 Propriedades do meio fibroso, da mistura e do compósito

a) Granulometria do CaCO_3

Foram utilizadas nos experimentos CaCO_3 com duas granulometrias médias diferentes.

A Tabela 5.1 mostra os valores que representam a distribuição de tamanho da partícula do CaCO_3 com uso de uma peneira $38 \mu\text{m}$. A Figura 5.1 apresenta a curva de distribuição de tamanho da partícula. Analisando esses valores, observa-se uma grande concentração de partículas em torno dos $10\text{-}80 \mu\text{m}$ com seu respectivo percentual de $53,3\%$. A amostra analisada apresenta um tamanho médio de $15,83 \mu\text{m}$.

Tabela 3.1 - Distribuição de tamanho de partículas do CaCO₃ (Amostra 1, 38 μm).

Amostra	Diâmetro			Diâmetro médio (μm)
	< 1 μm	1 ≤ d _p ≤ 10 μm	10 ≤ d _p ≤ 80 μm	
CaCO ₃	8%	38,7%	53,3%	15,83

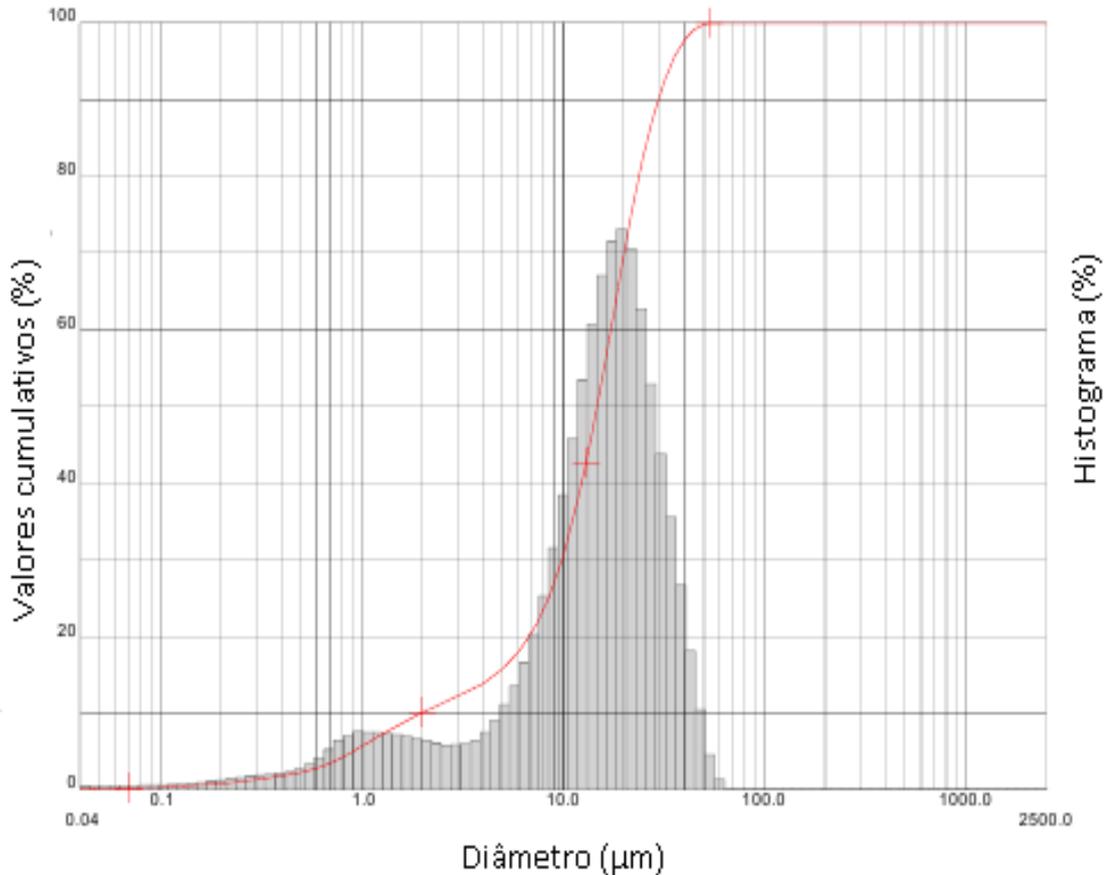


Figura 5.1 - Curva de distribuição de tamanho da partícula do CaCO₃ (Amostra 1, 38 μm).

No segundo caso, a Tabela 5.2 apresenta os resultados do tamanho da partícula do CaCO₃ com uso de uma peneira de 75 μm. A Figura 5.2 ilustra a curva de distribuição do tamanho da partícula. Pode-se observar com clareza através da distribuição granulométrica, que ocorre uma maior concentração de partículas na faixa de 10 a 80 μm, de 66%. A amostra analisada apresenta um tamanho médio de 21,78 μm.

Tabela 4.2 - Distribuição de tamanho de partículas do CaCO₃ (Amostra 2, 75 μm).

Amostra	Diâmetro			Diâmetro médio (μm)
	< 1 μm	1 ≤ d _p ≤ 10 μm	10 ≤ d _p ≤ 80 μm	
CaCO ₃	6%	28%	66%	21,78

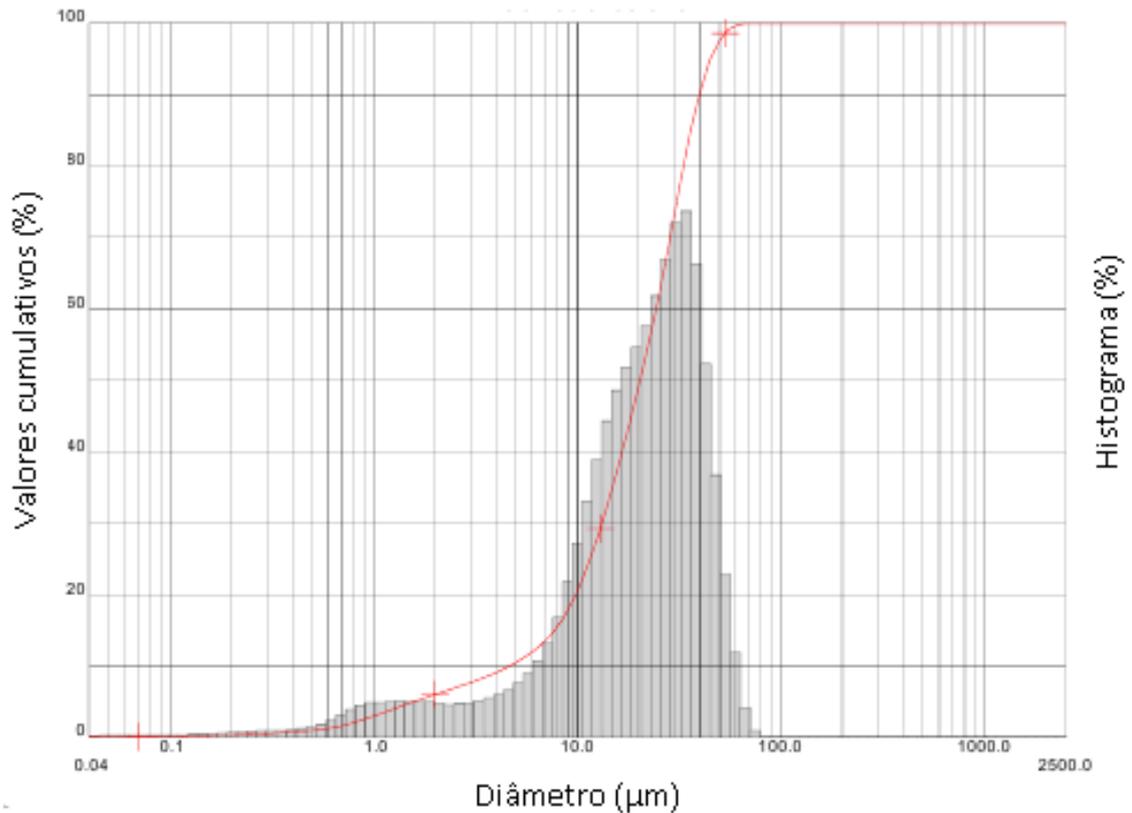


Figura 5.23 - Curva de distribuição de tamanho da partícula do CaCO_3 (Amostra 2, 75 μm).

b) Viscosidade da mistura resina/ CaCO_3

O primeiro resultado a ser discutido, como base nos experimentos realizados é o aumento da viscosidade. Na Figura 5.3, tem-se a viscosidade da mistura resina/ CaCO_3 em função do teor de CaCO_3 . Nos teores de interesse deste estudo, 0, 10, 20, 30 e 40 % de CaCO_3 , o fluido apresentou as viscosidades de 330, 962, 1414, 1749 e 2113 cP, respectivamente. Observa-se que, com a presença de carga na resina poliéster existe um aumento em sua viscosidade. Este resultado está de conformidade com Lefevre et al. (2009), ao realizar uma investigação experimental da filtração de partículas durante a injeção em uma peça de compósito. Conforme seus experimentos, observou-se que esse aumento (viscosidade), resulta em dificuldades do fluido preencher completamente o molde. Verifica-se que a adição de CaCO_3 aumenta o atrito entre as moléculas, diminuindo a fluidez da resina e aumentando a viscosidade do sistema.

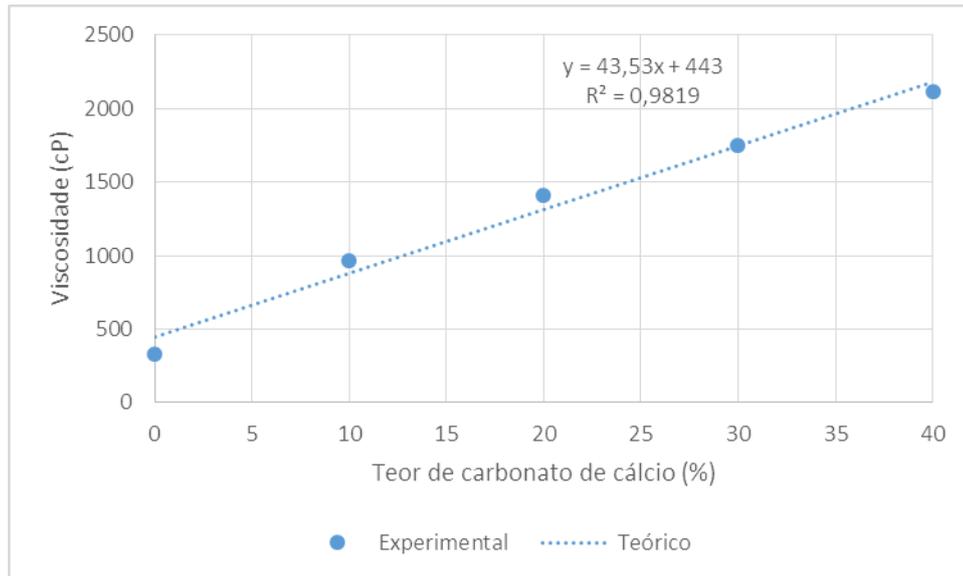


Figura 5.4 - Viscosidade da resina versus teor de CaCO_3 .

A partir dos dados experimentais de viscosidade, pode-se ajustar uma equação linear a estes dados. Conforme o modelo ajustado foi possível calcular o desvio (S), variância (S^2) e o coeficiente de determinação (R^2). Os resultados mostram que, o valor de R^2 ficou próximo de 1, indicando uma boa concordância do modelo em relação aos dados coletados. O desvio e a variância da diferença entre os dados observados e preditos foi de 3,54% e 6,9%, respectivamente. Isto mostra que o modelo ajustado, explica bem a relação entre os dados observados e preditos.

c) Massa específica da mistura

A Figura 5.4 ilustra o comportamento da massa específica da mistura para diferentes teores de CaCO_3 . Os resultados indicam que, como esperado, com o aumento do teor de CaCO_3 há um aumento na massa específica do compósito final (Nagy, 1998), pois o CaCO_3 possui uma massa específica mais elevada ($2,82 \text{ g/cm}^3$) e a resina poliéster ($1,19 \text{ g/cm}^3$). Este aumento da massa específica na mistura é uma característica muitas vezes não desejada, principalmente no setor automobilístico. No entanto, em alguns setores, como a da construção civil, um aumento de peso nesta faixa de massa específica não tem importância significativa. As principais funções do CaCO_3 na mistura são aumentar a rigidez e reduzir o custo (Fiber center, 2014).

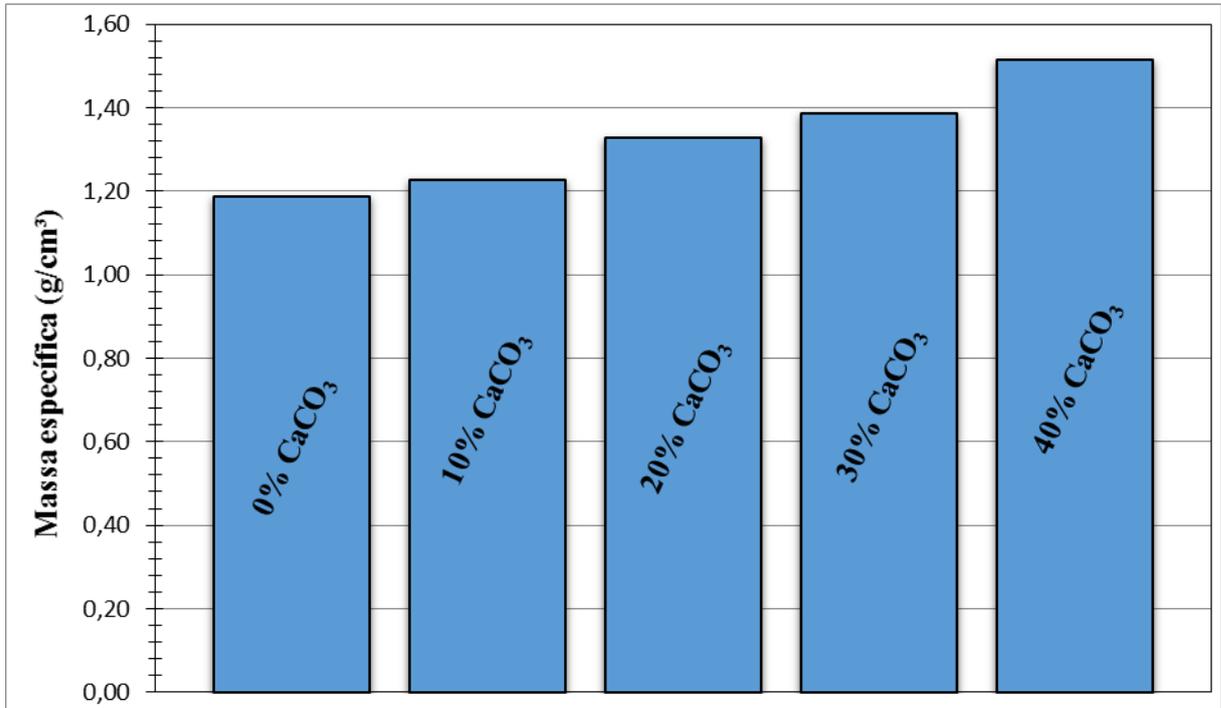


Figura 5.5 - Variação da massa específica da resina com adição do CaCO₃.

5.2 Efeito da variação da pressão de injeção ajustada

✓ Casos A1 e A2: $V_f=19\%$ e $P = 0,25$ bar

O efeito da pressão na mistura (resina + CaCO₃) ilustrado na Figura 5.5, revela que a pressão (experimental) no bocal de injeção em função do tempo de processo, ocorre na fase inicial de preenchimento do molde, até que a pressão estabilize. Vê-se também que o tempo gasto para a pressão atingir um valor permanente (ajustado no equipamento) é maior para o caso A1 (resina pura). Quando utiliza-se resina pura, não ocorre obstrução do fluxo no meio fibroso e a resina tem mais facilidade de escoar no meio, então, para manter a vazão constante, necessita-se aumentar a pressão de injeção. Já para o caso A2 (40% de CaCO₃), o comportamento da pressão é diferente; à medida que adiciona-se carga, existe uma maior dificuldade do fluido escoar no meio, uma vez que as partículas vão se aglomerando na frente do fluxo, e a medida que vai aumentando essa quantidade de partículas no leito maior será a dificuldade do fluido escoar, com isso, necessita-se uma maior pressão para manter a mesma vazão. Em ambos os casos, quando a pressão atinge um valor constante, a velocidade do escoamento decresce, e com ele, a vazão volumétrica do fluido.

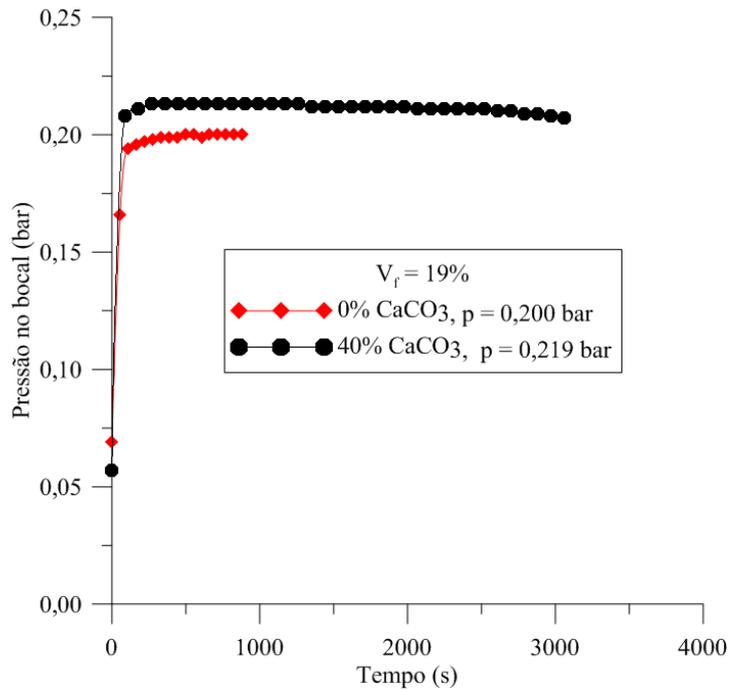


Figura 5.6 - Pressão de injeção versus tempo de processo ($P = 0,25$ bar, $V_f = 19\%$).

✓ **Casos A3 – A7: $V_f=24\%$ e $P = 0,25$ bar**

A variação da pressão de injeção ao longo do tempo para os casos A3 a A7 é apresentada na Figura 5.6. Verifica-se que a pressão máxima obtida está em torno de 80% do valor pré-ajustado de 0,25 bar, depois de um determinado tempo do processo decorrido. Observa-se também que o tempo necessário para que a pressão atinja um valor constante é mais elevado para os casos A4 (10% CaCO₃) e A5 (20% CaCO₃) na resina. De acordo com a Figura 5.6, observa-se que as pressões dos casos A3 (resina pura) e A6 (30% CaCO₃) e também A4 e A5 são aproximadamente iguais. Para cada caso, quando a pressão está variando, a vazão volumétrica de fluido é a mesma. Contudo, a área de filtração da resina varia conforme carbonato de cálcio penetra no meio fibroso, devido a obstrução dos canais de escoamento, pelas partículas de CaCO₃.

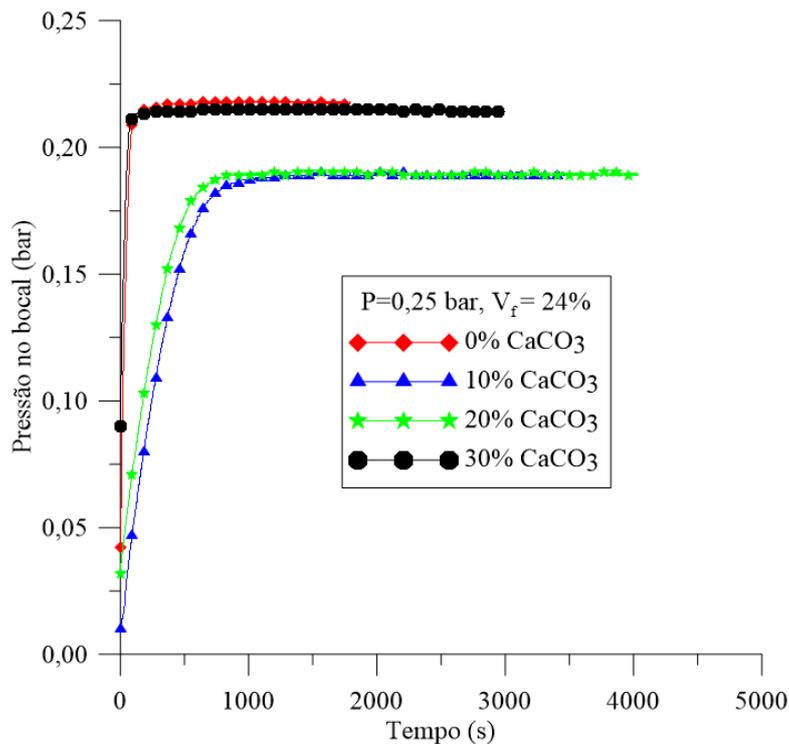


Figura 5.7 - Pressão de injeção versus o tempo de processo ($P = 0,25$ bar, $V_f = 24\%$).

✓ Casos A8 – A22: $V_f=30\%$ e $P = 0,25; 0,50$ e $0,75$ bar

Nas Figuras 5.7 a 5.9 ilustra-se a pressão no bocal de injeção em função do tempo de processo. Vê-se que a pressão máxima obtida se aproxima do valor pré-ajustado em cada caso (0,25, 0,50 e 0,75 bar) após um tempo inicial. Vê-se também que o tempo gasto para a pressão atingir um valor constante é maior para processo com pressão mais elevada, independente do teor de carbonato de cálcio e, para uma pressão de injeção fixada, o tempo para se atingir uma pressão constante cresce com o aumento do teor de carbonato de cálcio na resina. Pode-se observar ainda, através dos experimentos que, para o caso de resina pura, nas três pressões, o tempo de preenchimento do molde é menor. Isto se dá pelo fato da ausência de partículas no meio fibroso e com isso existe uma maior facilidade do fluido escoar.

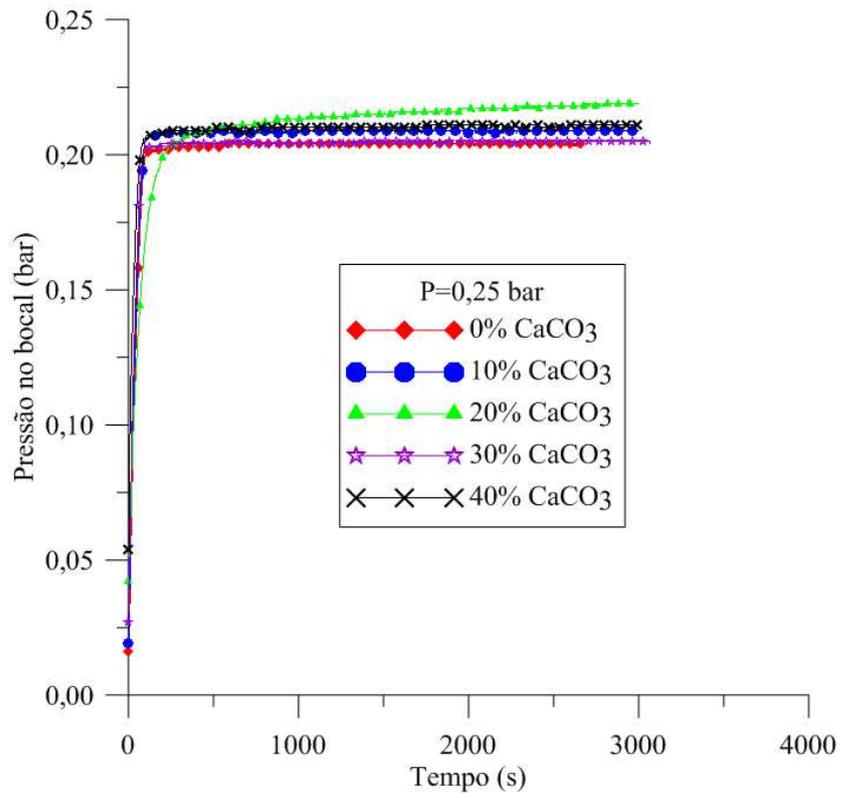


Figura 5.8 - Pressão de injeção versus tempo de processo ($P=0,25$ bar, $V_f=30\%$).

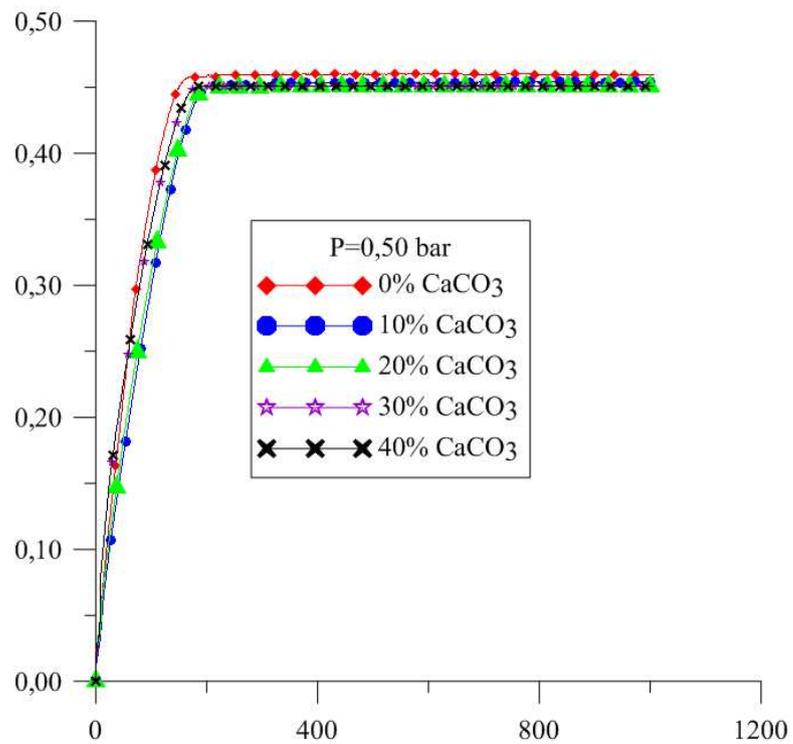


Figura 5.9 - Pressão de injeção versus tempo de processo ($P=0,50$ bar, $V_f=30\%$).

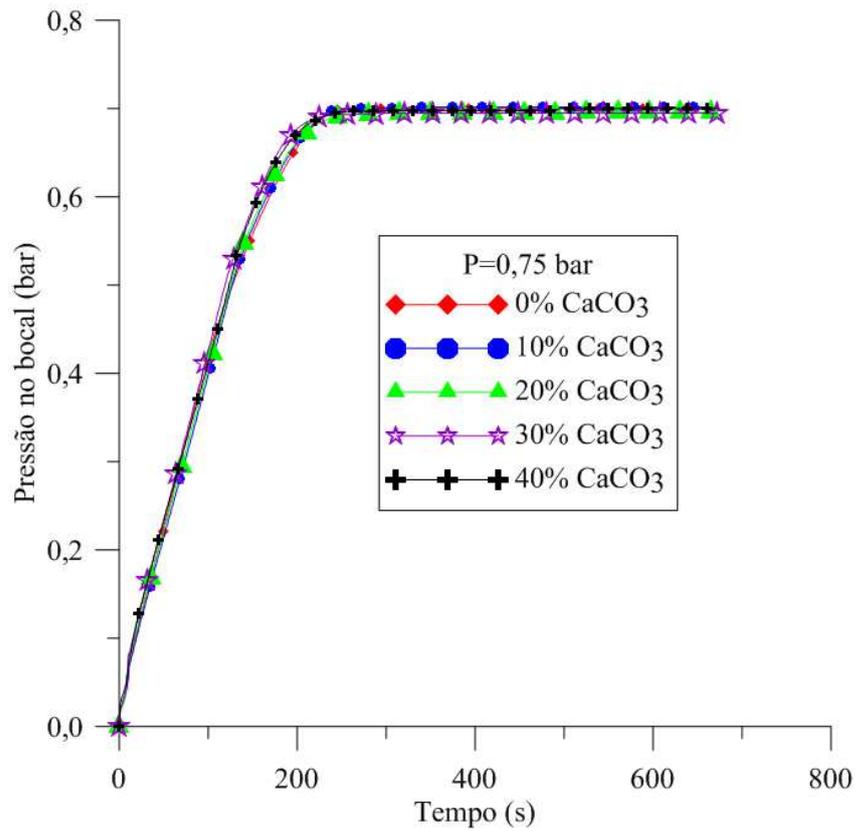


Figura 5.10 - Pressão de injeção versus tempo de processo ($P=0,75$ bar, $V_f=30\%$).

✓ **Casos A23 – A26: $V_f=30\%$, $P = 0,25$ bar, 38 e $75\mu\text{m}$**

A Figura 5.10 mostra a pressão no bocal de injeção em função do tempo de processo para o $V_f =30\%$ com granulometria de $75\mu\text{m}$. Observa-se que a pressão máxima obtida em ambos os casos está em torno de 80% do valor pré-ajustado, após um tempo de processo. Esta perda de pressão provavelmente seja devido ao equipamento utilizado no experimento.

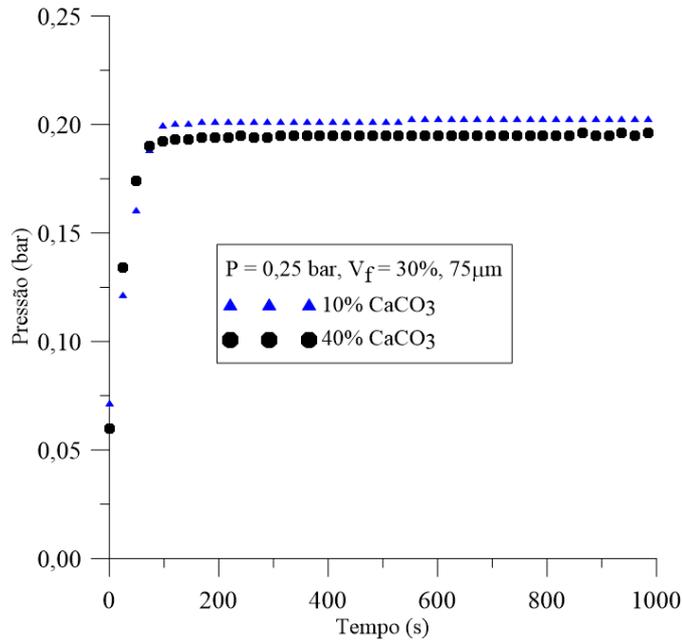


Figura 5.11 - Pressão de injeção versus tempo de processo ($P = 0,25$ bar, $V_f = 30\%$, $75\mu\text{m}$).

5.3 Efeito do teor de fibra

a) Pré-forma com 4 camadas de manta de fibra de vidro (Casos A1 e A2: $V_f = 19\%$ e $P = 0,25$ bar)

A Tabela 5.3 apresenta os resultados da permeabilidade e viscosidade em função do teor de carbonato de cálcio inserido na resina poliéster em um reforço de fibra de vidro. Verifica-se que a adição de CaCO_3 , altera os valores da permeabilidade e aumenta a viscosidade. Devido ao aumento do teor de CaCO_3 na resina, dois fatores pode-se observar: primeiro alteração na viscosidade da resina e segundo diminuição em sua porosidade, devido ao aumento de partículas no meio fibroso. Nota-se que quanto maior a viscosidade de um determinado sistema de resina, ou seja, do fluido, maior será o tempo para a impregnação total do reforço (Prado, 2009). Mesmo assim, a permeabilidade calculada foi maior já que a viscosidade e a porosidade tem influência sobre o escoamento do fluido.

Pode-se perceber através dos experimentos realizados por infiltração de fluido no processo RTM, que as permeabilidades efetiva obtidas foram diferentes em ambos os casos A1 e A2 (Figura 5.11). Para o caso A1 (resina pura) foi obtido uma permeabilidade de $6,58 \times 10^{-10} \text{ m}^2$, enquanto que, para o caso A2 (resina com 40% de CaCO_3) seu valor foi de $12 \times 10^{-10} \text{ m}^2$. Esta oscilação se deu por conta da adição de carbonato de cálcio na resina poliéster, que

provocou uma alteração em sua viscosidade. Contudo, a presença de partícula de CaCO_3 entre as fibras reduz a porosidade global do reforço e, assim, impede o escoamento da resina, portanto esperava-se uma diminuição da permeabilidade. Assim, a permeabilidade não é um parâmetro apropriado para avaliar o escoamento da resina na presença de cargas.

Tabela 5.3 - Dados obtidos para cada experimento realizado ($V_f = 19\%$).

	Caso A1	Caso A2
Teor de CaCO_3 (% massa/massa)	0	40
Viscosidade (cP)	330	2113
Pressão de injeção máxima (bar)	0,203	0,213
Permeabilidade experimental ($\times 10^{-10} \text{ m}^2$)	6,58	12,00
Permeabilidade numérica ($\times 10^{-10} \text{ m}^2$)	7,30	12,00
Tempo total de preenchimento do molde (s)	843	-
Tempo de travamento (s)	-	1254
Posição da frente de fluxo (m)	0,32	0,197

A mobilidade é um parâmetro mais apropriado para escoamento em meio fibroso, pois leva em consideração o efeito do aumento da viscosidade da resina, e a variação na permeabilidade do meio. A presença de partícula de CaCO_3 entre as fibras reduz a porosidade global do reforço e, assim, impede o escoamento da resina.

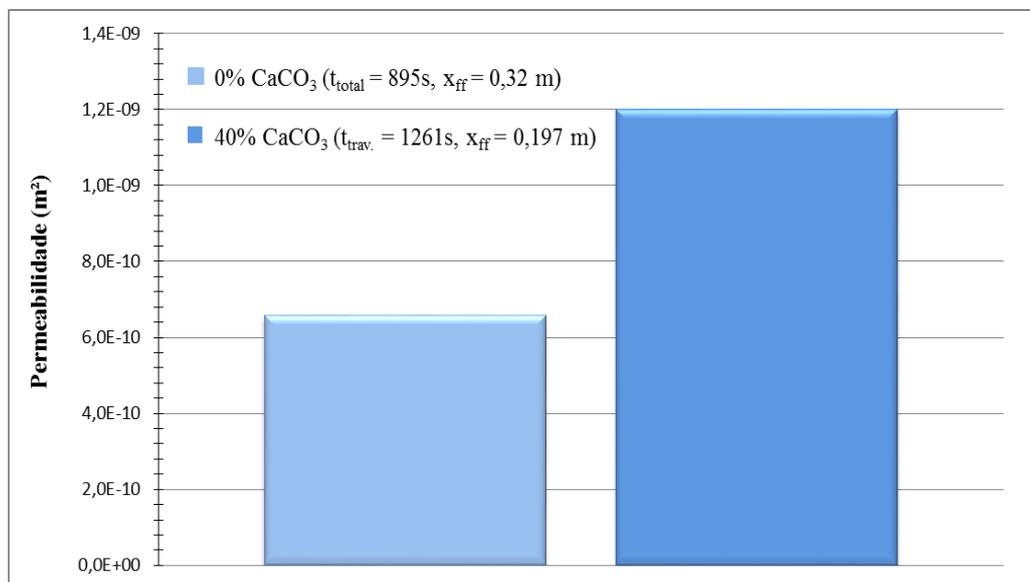


Figura 5.12 - Permeabilidade do reforço em função do teor de CaCO_3 na resina ($V_f = 19\%$, $P = 0,25 \text{ bar}$).

Nas Figuras 5.12 e 5.13, observa-se o avanço da frente de escoamento durante a injeção da resina para os casos A1 e A2, respectivamente. O perfil retilíneo da frente de fluxo foi alcançado, aproximadamente, na metade do comprimento do molde. Inicialmente, perto da região de injeção, o escoamento tem características 2-D e uma frente circular (radial) se forma na direção preferencial do escoamento. Quando a resina alcança a parede do molde, de geometria retangular, o gradiente de pressões torna-se praticamente linear na direção do escoamento e o avanço da resina passa gradativamente a ter características de um escoamento linear. Pode-se observar que para o caso A1 (resina pura), devido à ausência de partículas o fluido tem mais facilidade de escoar dentro de um meio fibroso, ou seja, ocorre uma maior mobilidade.

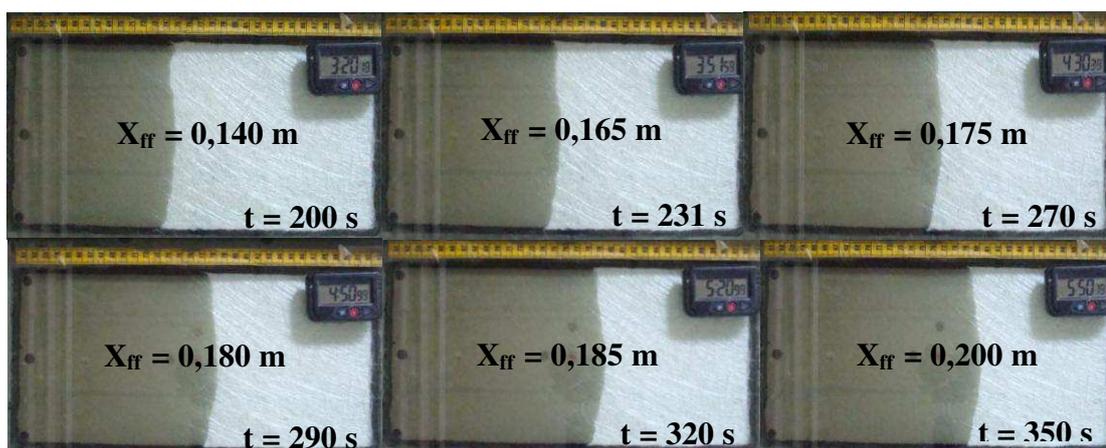


Figura 5.13 - Avanço da frente de fluxo durante a infiltração retilínea (0% CaCO_3 , $P = 0,25$ bar, $V_f = 19\%$).

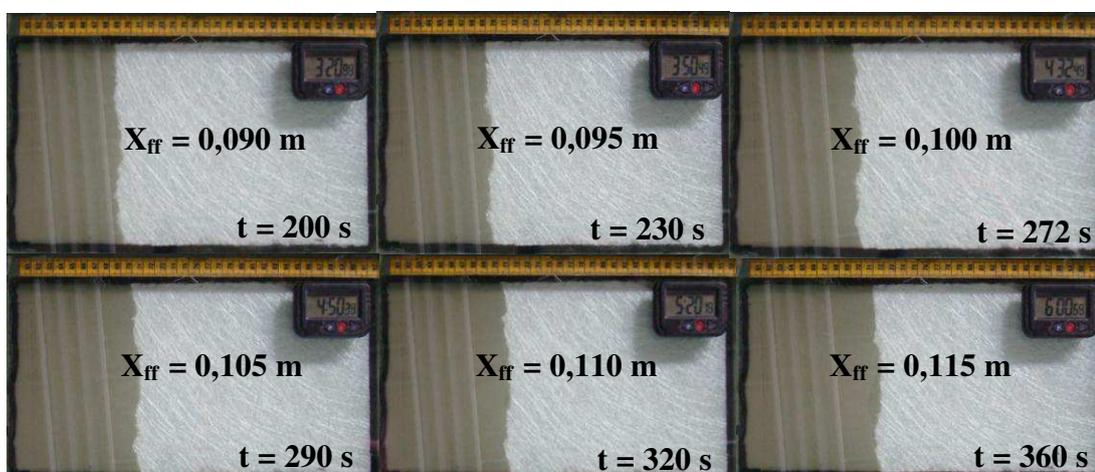


Figura 5.14 - Avanço da frente de fluxo durante a infiltração retilínea (40% CaCO_3 , $P = 0,25$ bar, $V_f = 19\%$).

A Figura 5.14 mostra a posição da frente de fluxo (x_{ff}^2) em função do tempo para os casos A1 e A2. Observa-se que a velocidade de preenchimento diminui com o aumento do teor de CaCO_3 na resina, devido a quantidade de partículas que vai obstruindo o meio fibroso, por conseguinte, é necessário mais tempo para preencher o molde.

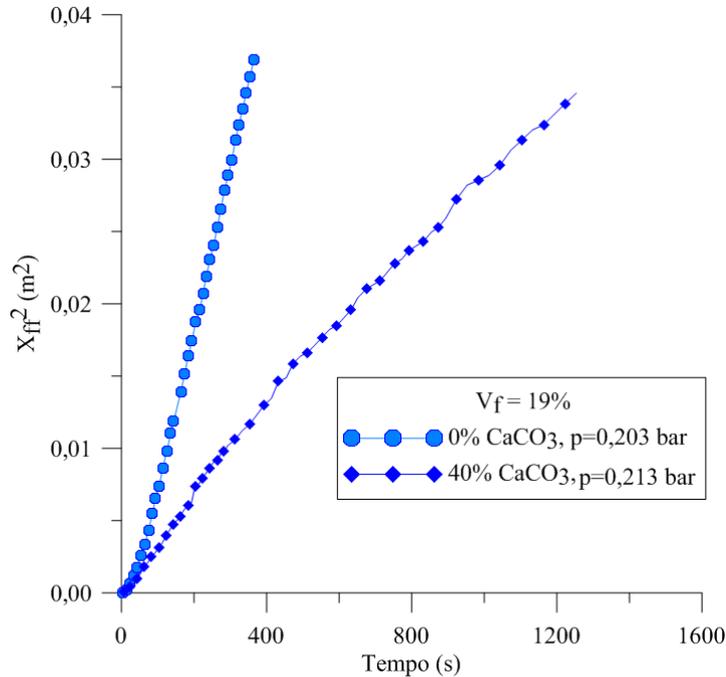


Figura 5.15 - Posição da frente de fluxo versus tempo de preenchimento ($P=0,25$ bar, $V_f=19\%$).

b) Pré -forma com 5 camadas de manta de fibra de vidro (Casos A3 - A7: $V_f=24\%$ e $P = 0,25$ bar)

A Tabela 5.4 apresenta os resultados da permeabilidade do meio para diferentes teores de carbonato de cálcio inseridos na resina poliéster, obtidas nos experimentos realizados a pressão de injeção constante. Pode-se observar que a adição de CaCO_3 altera os valores da permeabilidade e da viscosidade. Percebe-se também que os tempos finais de preenchimento do molde com adição de carbonato de cálcio na resina são normalmente maiores para uma pressão de injeção ajustada.

Com relação à influência do CaCO_3 , observa-se na Tabela 5.4, que, para os casos A4 e A6, foram obtidos as maiores permeabilidades do reforço. Entretanto, é importante ressaltar que o aumento da viscosidade do fluido impregnante, se dá pelo fato do aumento de teor de

carbonato de cálcio adicionado na resina poliéster. Assim, quanto mais carga na resina, maior será a dificuldade de infiltração da resina no meio poroso. Isto foi verificado nos experimentos com a presença de carga. Esperava-se que a permeabilidade do meio poroso sem a presença de CaCO_3 fosse maior, o que não ocorreu. Isto é devido a variação de alguns parâmetros analisados tais como: viscosidade e porosidade. Assim, pode-se dizer que este parâmetro não é adequado para quantificar o grau de facilidade do fluido mover-se dentro do molde, na presença de carga particulada.

Tabela 5.4 - Dados experimentais de permeabilidade do meio, viscosidade da resina e tempo de preenchimento ($V_f=24\%$).

Casos	CaCO_3 (% massa)	Permeabilidade experimental ($\times 10^{-10} \text{m}^2$)	Permeabilidade numérica ($\times 10^{-10} \text{m}^2$)	Tempo total de preenchimento do mole (s)	Tempo de travamento (s)	Pressão de injeção máxima (bar)
A3	0	2,87	3,37	1758	-	0,218
A4	10	7,73	6,20	2984	-	0,189
A5	20	5,62	3,30	-	614	0,191
A6	30	6,10	7,20	-	718	0,218
A7	40	3,02	7,00	-	554	0,212

Nos experimentos realizados por Garay (2010), observou-se uma permeabilidade de aproximadamente $2,81 \times 10^{-10} \text{m}^2$, para o caso A5. Para obtenção dos ajustes das permeabilidades numéricas, utilizou-se o software PAM-RTM. Neste trabalho foi obtido uma permeabilidade ajustada numericamente de $6,81 \times 10^{-10} \text{m}^2$ que corresponde a três vezes, aproximadamente, o valor citado por Garay, com a mesma massa de CaCO_3 . Analisando a Figura 5.15, pode-se notar que, com $V_f = 24\%$, ocorreu uma variação na permeabilidade para os diferentes teores de carbonato de cálcio. Isto é, quando trabalhamos com resina pura (caso A3), de início temos uma viscosidade e uma porosidade, e obtemos a permeabilidade do meio. Mas, ao adicionarmos cargas (CaCO_3) na resina, ocorre uma mudança em sua viscosidade e também sua porosidade diminui, devido à presença de partículas no meio. Para os demais casos estudados, essa oscilação nas permeabilidades são consequência da presença de partículas no meio fibroso, isto é, com o aumento do teor de carbonato de cálcio na resina, as permeabilidades não será mais a do meio e sim permeabilidades efetivas.

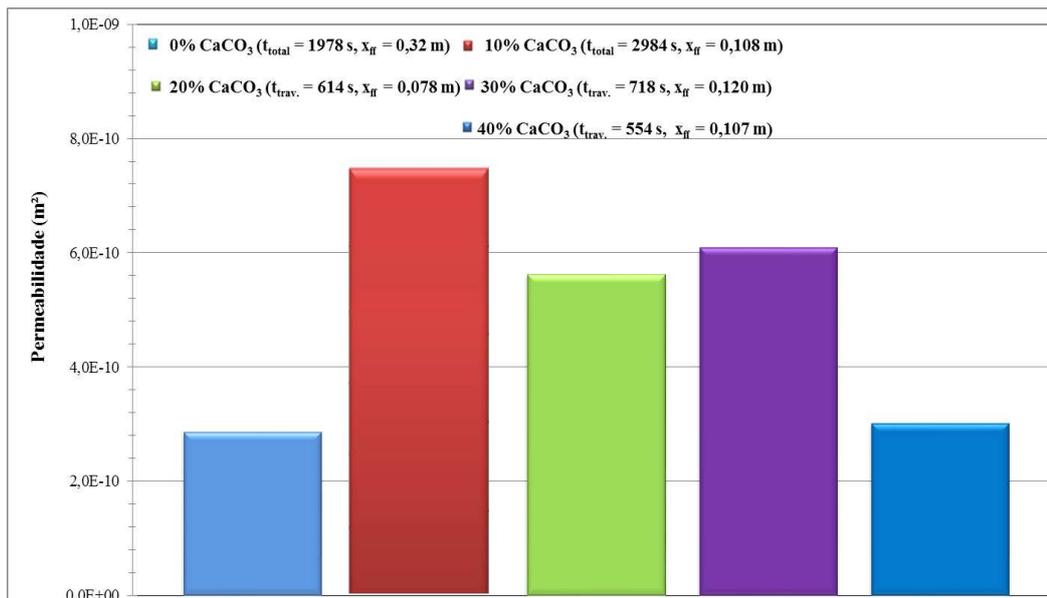


Figura 5.16 - Permeabilidade do reforço em função do teor de CaCO₃ na resina (V_f = 24%, P = 0,25 bar).

As Figuras 5.16 e 5.17 mostram o avanço da frente de fluxo dentro do molde para o caso A3 e para o caso A7, respectivamente, em diferentes momentos, com uma pressão de injeção ajustada de 0,25 bar. A Figura 5.27 mostra a posição da frente de fluxo em função do tempo para todos os casos estudados.

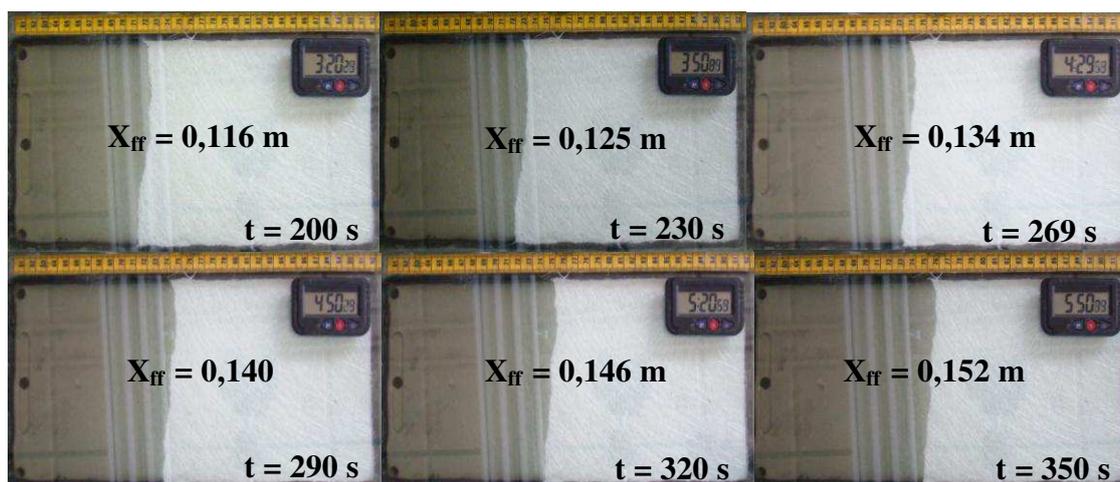


Figura 5.17 - Avanço da frente de fluxo durante a infiltração retilínea (0% CaCO₃, P= 0,25 bar, V_f = 24%).

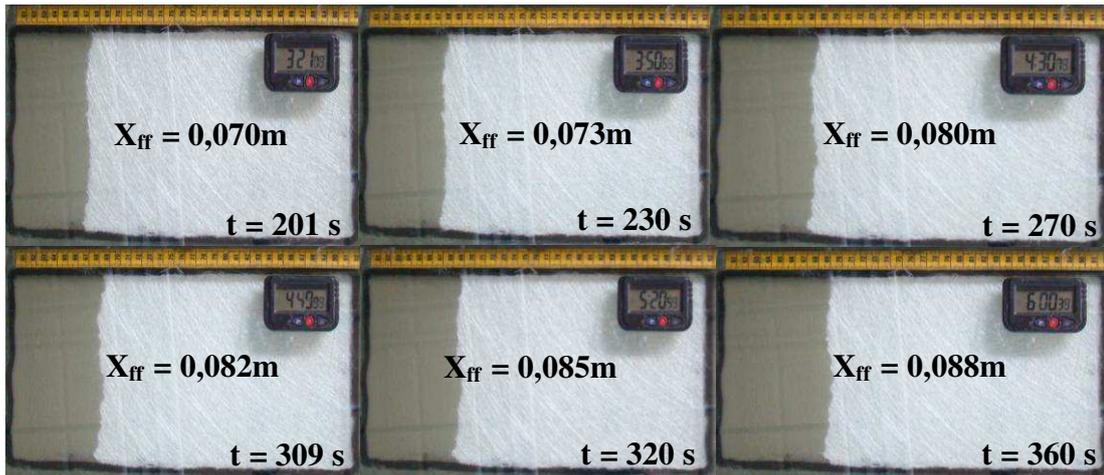


Figura 5.18 - Avanço da frente de fluxo durante a infiltração retilínea (40% CaCO₃, P = 0,25 bar, V_f = 24%).

Nesta Figura 5.18, observa-se que a velocidade de preenchimento do molde diminui com o aumento do teor de CaCO₃ na resina, por conseguinte, é necessário mais tempo para preencher o molde. A pressão de injeção ajustada tem também o seu efeito sobre o tempo total de preenchimento. Quanto maior for a pressão de injeção e menor o teor de CaCO₃ menor será o tempo total de preenchimento. Há ainda, o efeito do travamento do escoamento, pela presença das partículas de CaCO₃, que propicia um efeito de alterar a viscosidade e porosidade do meio poroso, e com isto altera a velocidade de escoamento do fluido, que é dependente da pressão de injeção e tem, pois, um efeito em cascata.

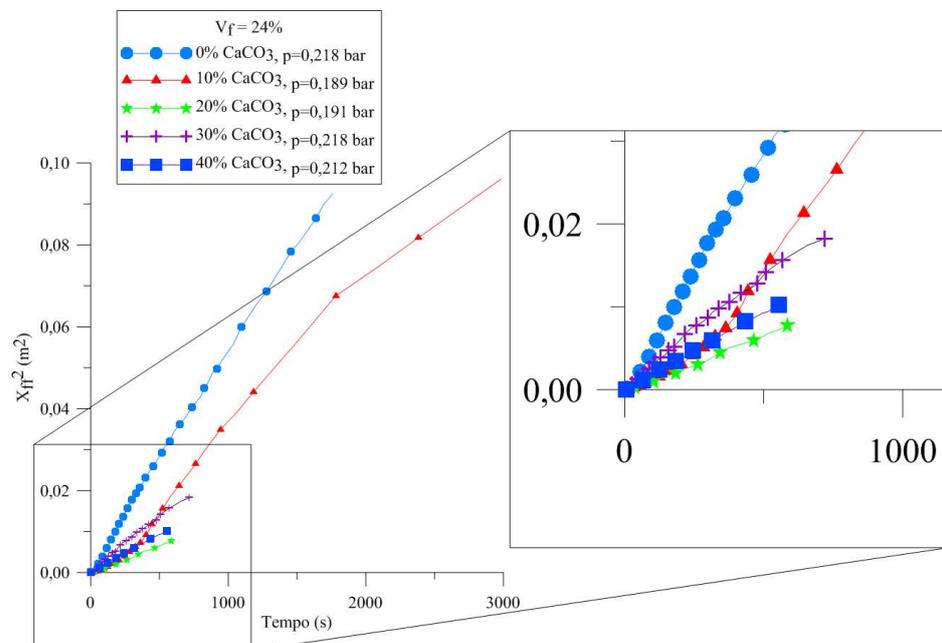


Figura 5.19 - Posição da frente de fluxo versus tempo de preenchimento para diferentes teores de CaCO₃ (P = 0,25 bar, V_f = 24%).

Na Figura 5.19, observa-se a posição da frente de fluxo versus tempo de preenchimento do molde, para os casos A3 e A7. Nesta figura comparam-se a diferença entre o máximo e mínimo valor da quantidade de CaCO_3 para uma pressão de injeção de 0,25 bar. Verifica-se que, para o caso A3, o percentual de aumento da posição da frente de fluxo no tempo de aproximadamente 600s, foi de 66,7% mais rápido em relação ao caso A7. Pode-se observar que, com o aumento do teor de CaCO_3 na resina, tem-se uma maior dificuldade no escoamento meio fibroso.

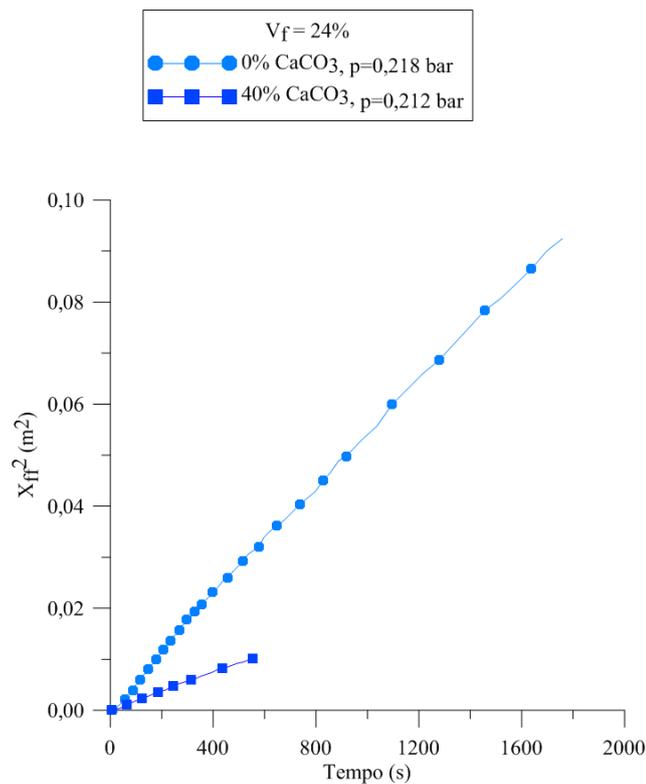


Figura 5.20 - Posição da frente de fluxo versus tempo de injeção ($P = 0,25$ bar, $V_f = 24\%$).

c) Pré -forma com 6 camadas de manta de fibra de vidro (Casos A8 – A22: $V_f = 30\%$ e $P = 0,25; 0,50$ e $0,75$ bar)

A Tabela 5.5 apresenta os resultados da permeabilidade em função do teor de carbonato de cálcio inserido na resina poliéster obtidos para diferentes pressões de injeção em um reforço de fibra de vidro com $V_f = 30\%$. Verifica-se que a adição de CaCO_3 , altera os valores da permeabilidade, independente da pressão. Devido a variação das propriedades do reforço fibroso percebe-se também que os tempos finais de preenchimento do molde, são

normalmente diferentes e diminuem com aumento de pressão de injeção e aumentam com o teor de CaCO₃.

Pode-se observar através da Tabela 5.5 que, os casos (A8, P=0,25 bar), (A13, P=0,50 bar) e (A18, P=0,75 bar) com resina pura, independente da pressão exercida sobre o fluido, há uma facilidade maior do fluido escoar no meio fibroso, pois não existem obstrução na direção do escoamento. Por outro lado, para os casos (A9 - A12, P=0,25 bar), (A14 - A17, P=0,50 bar) e (A20 - A22, P=0,75 bar), com adição de carbonato de cálcio (carga) na resina poliéster, obteve-se um aumento da viscosidade, as partículas vão preenchendo os espaços vazios, e com isto dificultando a passagem da resina. Quanto maior a quantidade de partículas na resina, maior será a dificuldade do fluido escoar no meio fibroso. Entretanto, é importante ressaltar que com aumento da viscosidade e o aumento de cargas na resina ocorre diferenças nas permeabilidades do reforço, o que a priori não deveria ocorrer. Assim, está permeabilidade é um valor efetivo, não sendo um parâmetro apropriado para quantificar a facilidade do fluido escoar no molde.

Tabela 5.5 - Dados de permeabilidade aparente para cada experimento realizado ($V_f = 30\%$).

Caso	Teor de CaCO ₃ (% massa/massa)	Pressão de injeção máxima (bar)	Permeabilidade experimental $\times 10^{-10}$ (m ²)	Permeabilidade numérica ($\times 10^{-10}$ m ²)	Tempo total de preenchimento do molde (s)	Tempo de travamento (s)
A8	0	0,221	2,61	2,70	1978	-
A9	10	0,209	4,83	4,80	-	470
A10	20	0,218	4,54	2,40	-	374
A11	30	0,215	2,66	4,30	-	593
A12	40	0,212	2,10	4,20	-	678
A13	0	0,459	2,51	3,00	870	-
A14	10	0,454	2,96	3,20	-	655
A15	20	0,450	3,29	3,30	-	404
A16	30	0,451	2,52	2,80	-	545
A17	40	0,451	0,98	1,10	-	105
A18	0	0,701	3,29	3,20	576	-
A19	10	0,702	2,87	3,30	1436	-
A20	20	0,698	2,12	2,30	-	657
A21	30	0,695	1,64	2,10	-	735
A22	40	0,701	1,05	1,70	-	265

Como observado nos casos anteriores para $V_f = 19\%$ e 24% , uma grande diferença nas permeabilidades ocorreu para o caso com $V_f = 30\%$ (Figuras 5.20 a 5.22), nas diferentes pressões de 0,25, 0,50 e 0,75 bar. Aparentemente o efeito das partículas sobre o valor da permeabilidade diminuiu com o aumento da pressão de injeção.

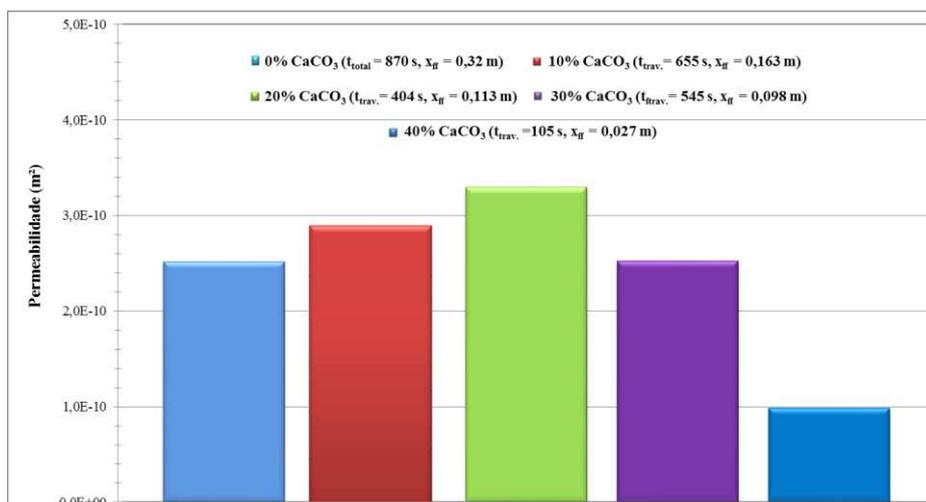


Figura 5.21 - Permeabilidade do reforço em função do teor de CaCO₃ na resina (P = 0,25 bar, V_f = 30%).

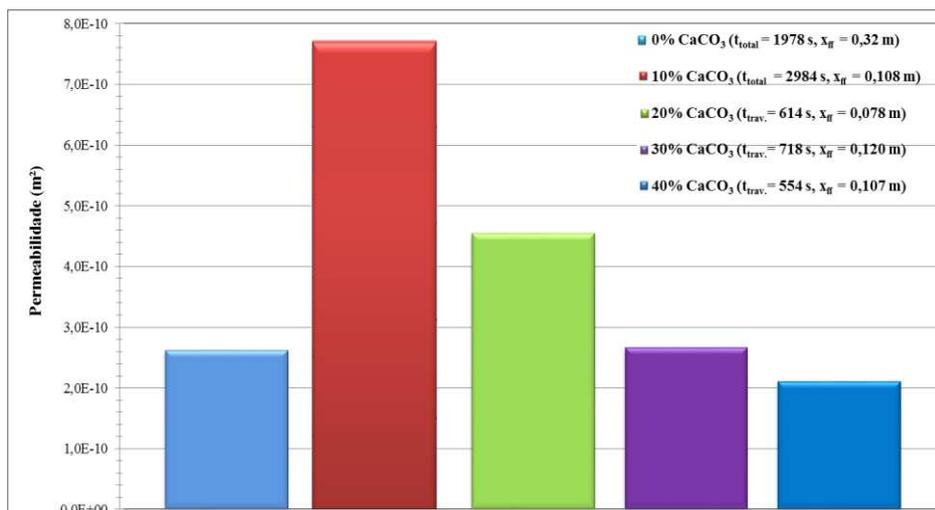


Figura 5.22 - Permeabilidade do reforço em função do teor de CaCO₃ na resina (P = 0,50 bar, V_f = 30%).

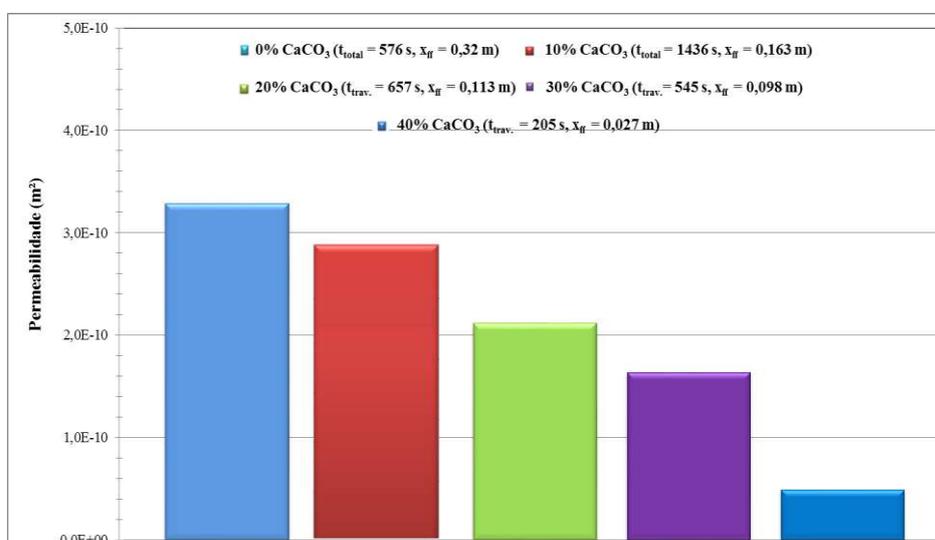


Figura 5.23 - Permeabilidade do reforço em função do teor de CaCO₃ na resina (P = 0,75 bar, V_f = 30%).

Imagens da posição da frente de fluxo em função do tempo, estão apresentadas nas Figuras 5.23 e 5.24 para uma pressão de 0,25 bar, nas Figuras 5.25 e 5.26 para pressão de 0,50 bar e nas Figuras 5.27 e 5.28 para pressão de 0,75 bar. Nestas figuras, vê-se que a velocidade de escoamento diminui com o aumento do teor de CaCO_3 , como consequência tem-se um tempo maior para preenchimento do molde. A pressão de injeção também afeta o tempo de preenchimento do molde. Quanto maior a pressão de injeção e menor teor de CaCO_3 , menor o tempo para se atingir uma determinada posição no molde.

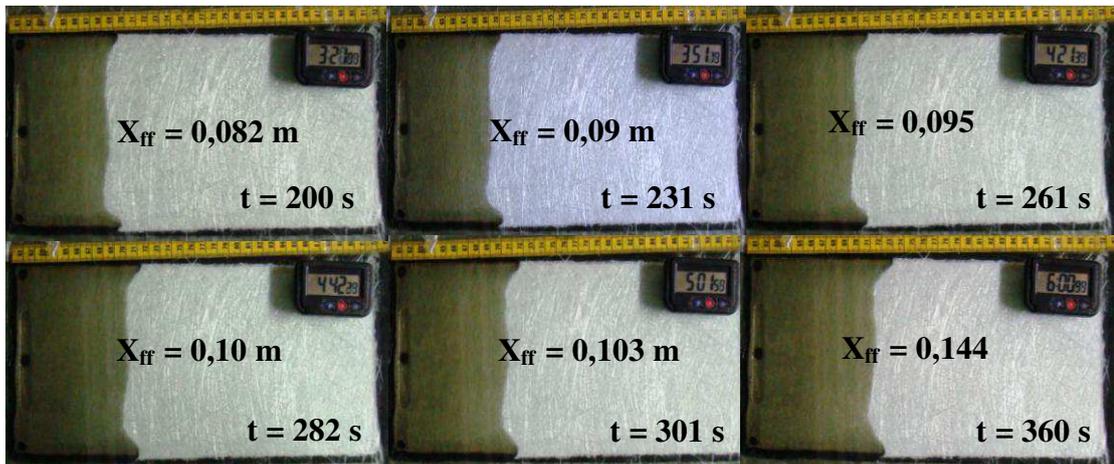


Figura 5.24 - Avanço da frente de fluxo durante a infiltração retilínea (0% CaCO_3 , $P = 0,25$ bar, $V_f = 30\%$).

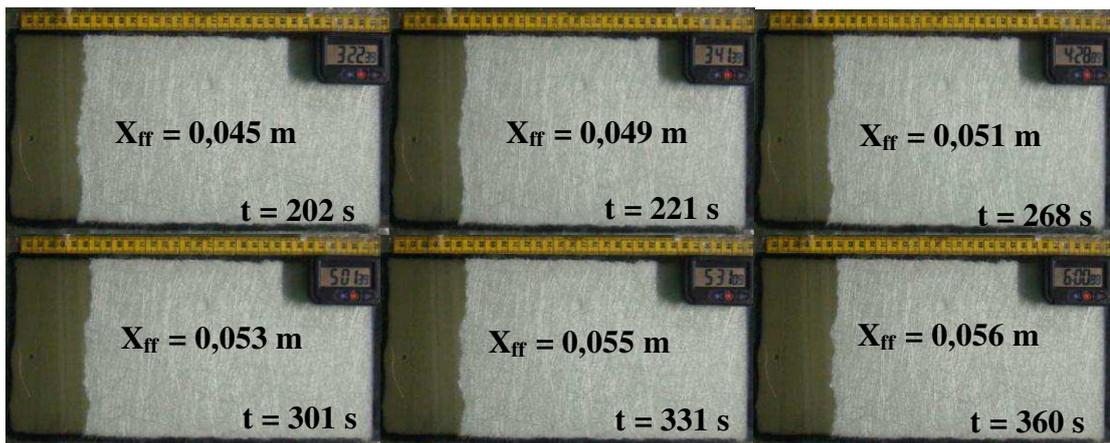


Figura 5.25 - Avanço da frente de fluxo durante a infiltração retilínea (40% CaCO_3 , $P = 0,25$ bar, $V_f = 30\%$).

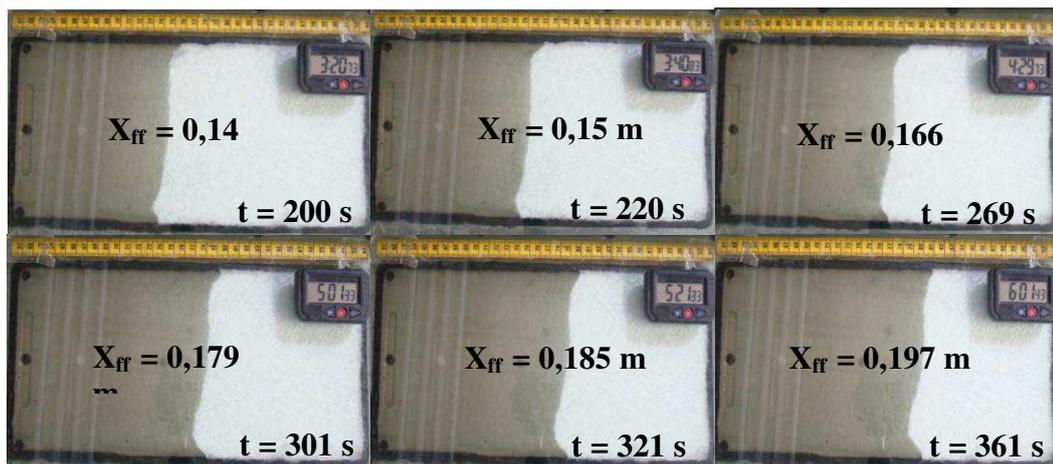


Figura 5.26 - Avanço da frente de fluxo durante a infiltração retilínea (0% CaCO_3 , $P = 0,50$ bar, $V_f = 30\%$).

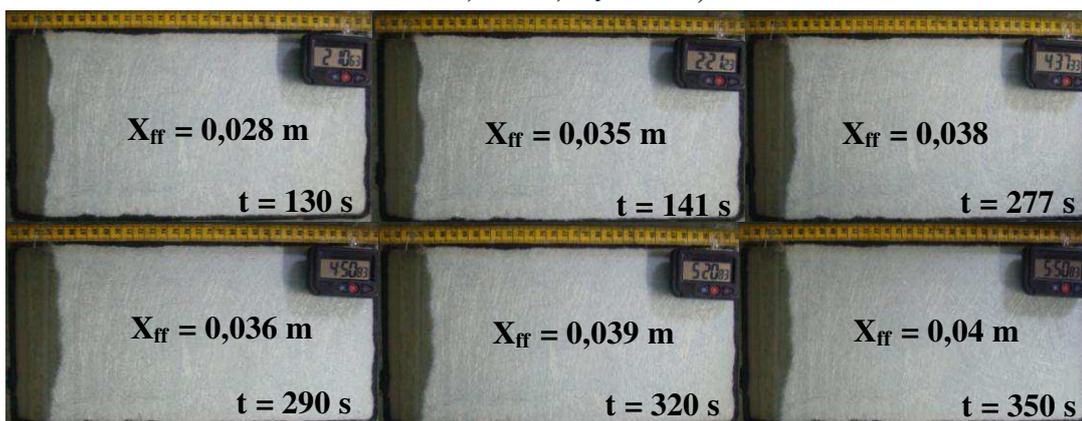


Figura 5.27 - Avanço da frente de fluxo durante a infiltração retilínea (40% CaCO_3 , $P = 0,50$ bar, $V_f = 30\%$).

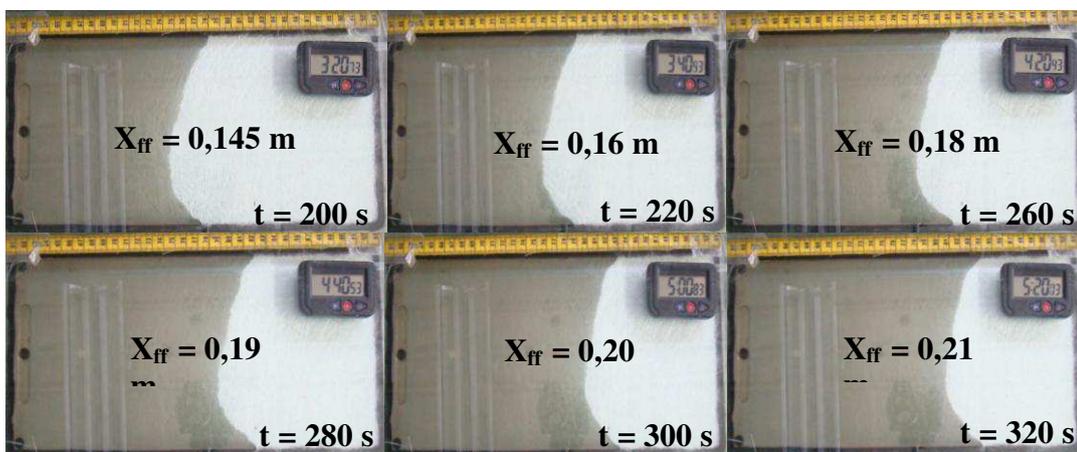


Figura 5.28 - Avanço da frente de fluxo durante a infiltração retilínea (0% CaCO_3 , $P = 0,75$ bar, $V_f = 30\%$).

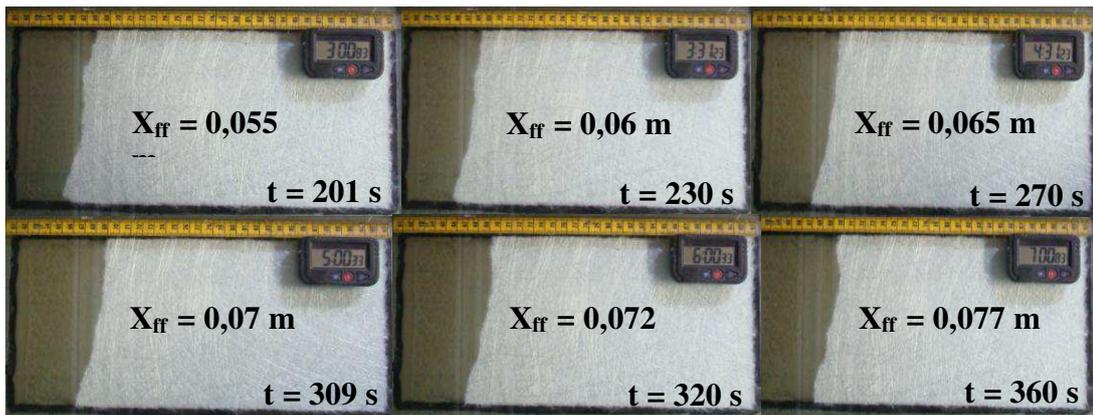


Figura 5.29 - Avanço da frente de fluxo durante a infiltração retilínea (40% CaCO₃, P = 0,75 bar, V_f = 30%).

Quando todas as posições da frente de fluxo são plotadas em função do tempo, produz-se os gráficos como o apresentado nas Figuras 5.29 a 5.31. Nestas Figuras, vê-se claramente que a velocidade do preenchimento diminui com o aumento do teor de CaCO₃, isto é devido à presença de partículas de CaCO₃ entre as fibras, diminuindo os vazios do meio fibroso e dificultando o fluxo da resina (Nordlund et al., 2007; Carvalho e Cavalcanti, 2006) e como consequência tem-se um tempo maior para preenchimento do molde.

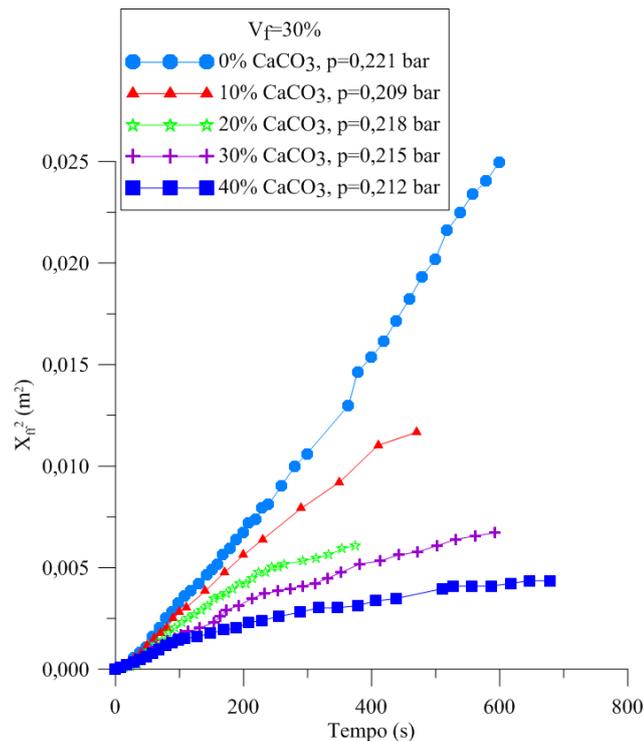


Figura 5.30 - Posição da frente de fluxo versus tempo de injeção (P = 0,25 bar, V_f=30%).

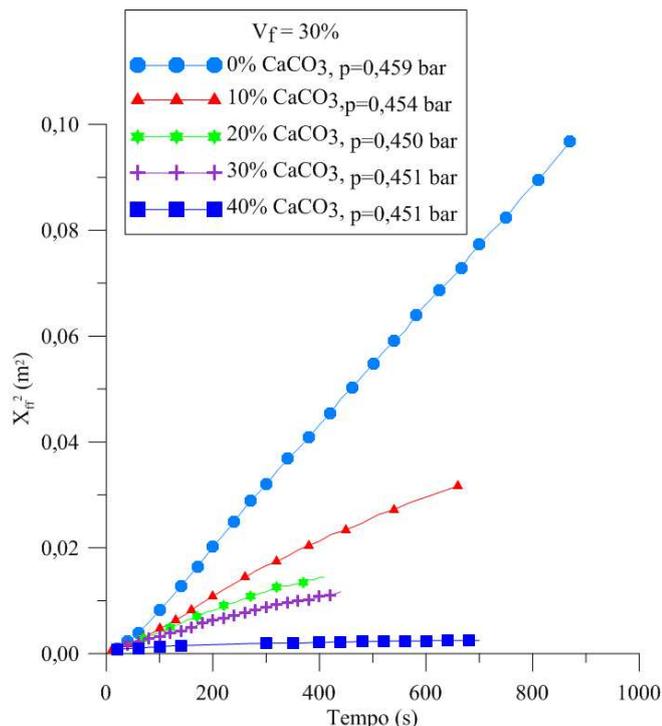


Figura 5.31 - Posição da frente de fluxo versus tempo de injeção ($P = 0,50$ bar, $V_f=30\%$).

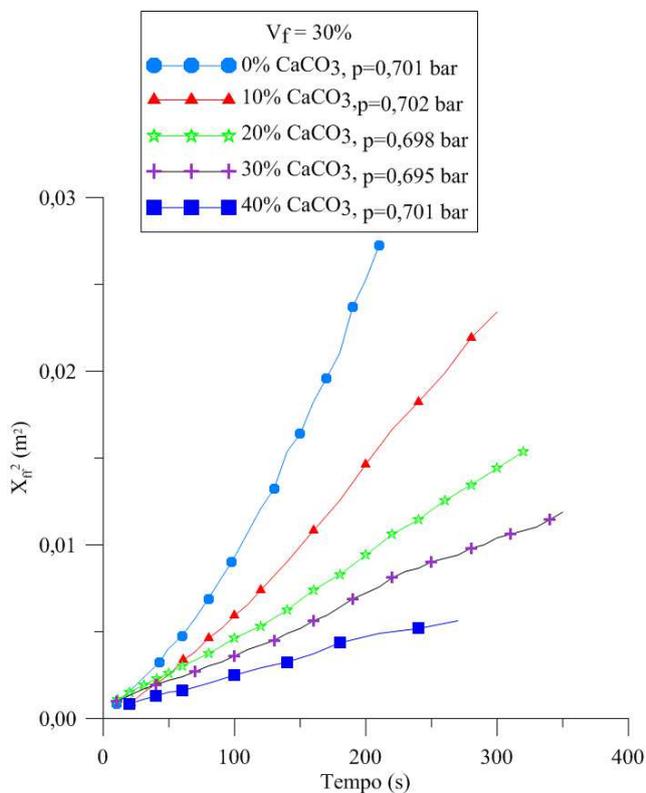


Figura 5.32 - Posição da frente de fluxo versus tempo de injeção ($P = 0,75$ bar, $V_f=30\%$).

Pode-se ainda investigar a magnitude da diferença das posições para diferentes pressões de injeção (com V_f constante), como mostra as Figuras 5.32 a 5.34. Verifica-se

claramente o efeito do teor de CaCO_3 no avanço da resina em qualquer pressão de trabalho. A partir desta análise pode-se dizer que, com o adicionamento de carga na resina, existe uma maior obstrução dos poros e, conseqüentemente, um maior tempo de preenchimento do molde. Observa-se na Tabela 5.6, o percentual de aumento da posição da frente de fluxo no tempo de aproximadamente 200s, para os casos A8, A13 e A18, medidas experimentalmente, em cada pressão.

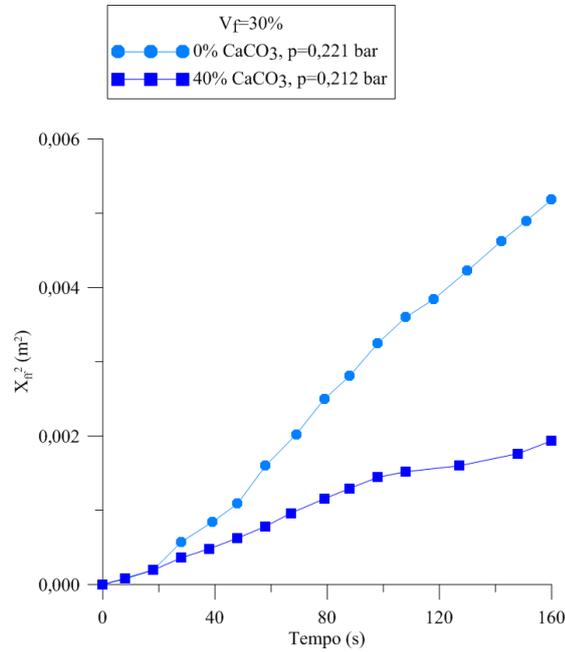


Figura 5.33 - Posição da frente de fluxo versus tempo de injeção ($P = 0,25$ bar, $V_f = 30\%$).

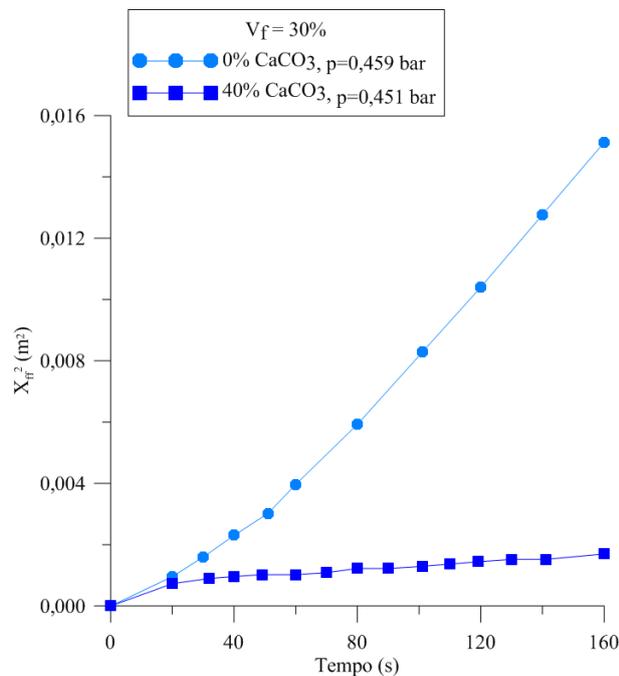


Figura 5.34 - Posição da frente de fluxo versus tempo de injeção ($P = 0,50$ bar, $V_f = 30\%$).

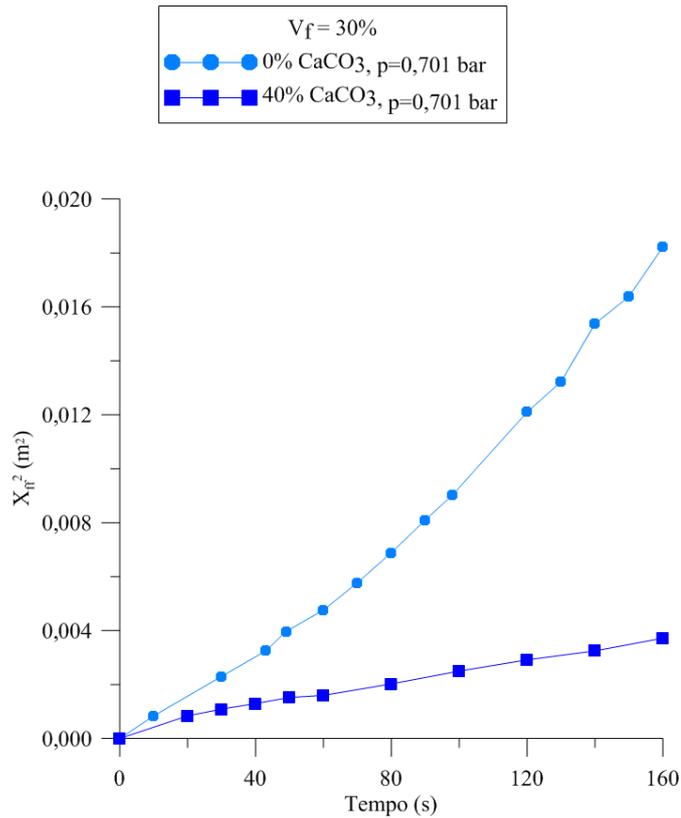


Figura 5.35 - Posição da frente de fluxo versus tempo de injeção ($P = 0,75$ bar, $V_f=30\%$).

Tabela 5.6 - Diferença de posição da frente de fluxo nas condições para os casos A8, A13 e A18 para diferentes pressões de injeção e aproximadamente de $t = 160$ s.

Pressão de injeção ajustada (bar)	Diferença da posição da frente de fluxo (m ²)	Percentual de aumento da posição da frente de fluxo (%)
0,25	0,005184	13,5
0,50	0,015129	39,3
0,75	0,018225	47,2

d) Pré-forma com 6 camadas de manta de fibra de vidro (Casos A23 - A26: $V_f = 30\%$, $P = 0,25$ bar, $38 \mu\text{m}$ e $75 \mu\text{m}$).

As cargas minerais utilizadas em compósitos apresentam, na maioria, granulometria inferior a $45 \mu\text{m}$, sendo que à medida que se torna mais fina, aumenta-se a área de superfície específica, que corresponde à área exposta das partículas que irão interagir com o polímero. Os resultados obtidos através dos experimentos realizados são apresentados na Tabela 5.7.

Os resultados das medidas de permeabilidade para os casos de granulometria 38 e 75 μm com pressão constante (0,25 bar) estão apresentados nas Figuras 5.35 e 5.36, respectivamente. Pode-se verificar que a permeabilidade foi menor com tamanho de partículas 38 μm (caso A23) em relação ao caso A25, ambos com 10% CaCO_3 . Para os casos A24 e A26 com 40% CaCO_3 , ocorreu o inverso em relação a permeabilidade; isto se dá pelo fato do aumento significativo da viscosidade e também a diminuição do tamanho de poros quando as partículas preenchem os poros. Em todos os casos o molde não foi preenchido completamente, no entanto, conforme os resultados obtidos para o tempo de travamento, verificou-se uma maior facilidade da resina escoar no molde para o caso com partículas de 75 μm .

Tabela 5.7 - Dados de permeabilidade para cada experimento realizado com carbonato de cálcio com diferentes granulometrias.

Granulometria	38 μm		75 μm	
	A23	A24	A25	A26
Casos	A23	A24	A25	A26
Teor de CaCO_3 (% massa/massa)	10	40	10	40
Pressão de injeção máxima (bar)	0,229	0,203	0,202	0,200
Permeabilidade numérica ($\times 10^{-10} \text{ m}^2$)	2,50	3,60	3,33	3,32
Permeabilidade experimental ($\times 10^{-10} \text{ m}^2$)	2,94	3,64	3,33	3,32
Tempo de preenchimento (s)	-	-	-	-
Tempo de travamento (s)	550	380	625	570
Posição de travamento (m)	0,30	0,21	0,29	0,21
Viscosidade (cP)	962	2113	962	2113

Observando-se os resultados, nota-se que a permeabilidade obtida para o casos A24 e A26 é maior em relação ao caso sem peneiramento (caso A12) e é similar ao reportado por Garay (2010) para o caso de granulometria 75 μm , que obteve aproximadamente $2,8 \times 10^{-10} \text{ m}^2$.

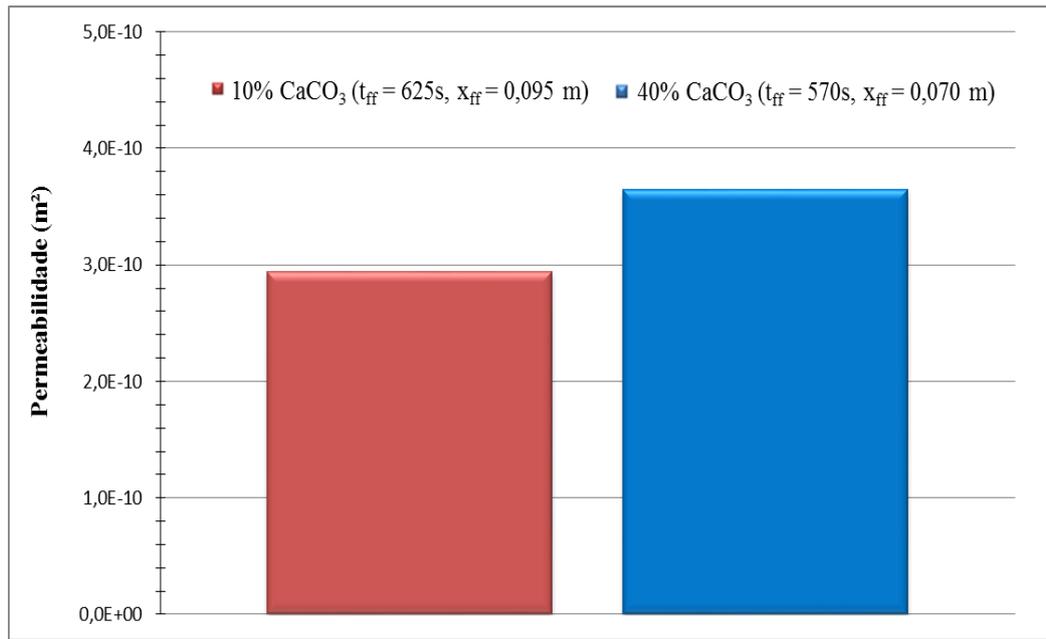


Figura 5.36 - Permeabilidade do reforço em função do teor de CaCO₃ na resina (P = 0,25 bar, V_f = 30%, 38µm).

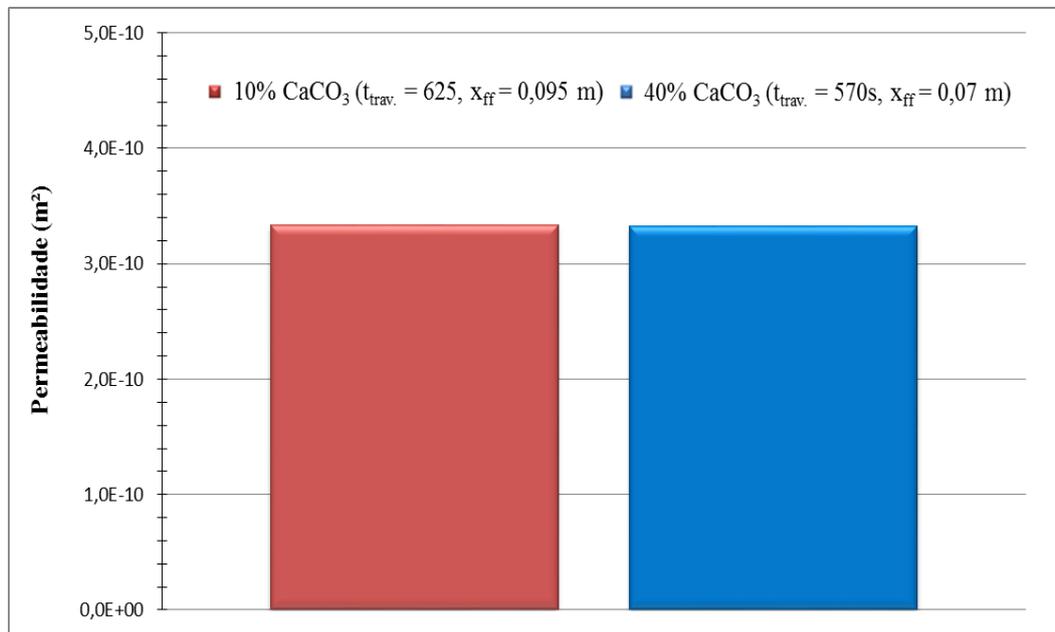


Figura 5.37 - Permeabilidade do reforço em função do teor de CaCO₃ na resina (P = 0,25 bar, V_f = 30%, 75µm).

Observa-se claramente, na Tabela 5.8, a diferença entre as permeabilidades para os casos com e sem separação granulométrica. Nota-se que a permeabilidade obtida para o caso A9 (10% CaCO₃) é maior em relação aos casos com peneiramento (A23 e A25) ambos com o mesmo teor de carbonato de cálcio. Isso acontece pelo fato de que sem peneiramento existem partículas finas e grossas que serão infiltradas juntamente com a resina, afetando sua

viscosidade de forma moderada. Com isso, haverá uma maior facilidade do fluido escoar no meio fibroso. Enquanto que, para os casos com peneiramento, as maiores partículas foram eliminadas, por isso, o meio será menos permeável. Observou-se que o resultado obtido através do experimento com granulometria 38 μm está bem próximo (~96%) ao resultado reportado por Garay (2010), que obteve aproximadamente $2,8 \times 10^{-10} \text{ m}^2$. Para um percentual de CaCO_3 de 40%, o comportamento foi inverso, evidenciando mais uma vez que a permeabilidade não é um parametro adequado para se avaliar o fluxo com carga particulada. A mobilidade é o parâmetro correto.

Tabela 5.8 - Resultados de permeabilidade para os casos com e sem peneiramento do CaCO_3 .

	Sem peneiramento		Classificação			
			Abertura da peneira			
			38 μm		75 μm	
Casos	A9	A12	A23	A24	A25	A26
Teor de CaCO_3 (% massa/massa)	10	40	10	40	10	40
Permeabilidade experimental ($\times 10^{-10} \text{ m}^2$)	4,83	2,10	2,94	3,64	3,33	3,32
Viscosidade (cP)	962	2113	962	2113	962	2113

É importante obter informações do tamanho das partículas, pois, conforme citado na revisão da literatura, a distribuição granulométrica pode influenciar no processamento e nas propriedades mecânicas dos compósitos. As Figuras 5.37 a 5.40 mostram o avanço da posição da frente de fluxo em função do tempo para os casos de injeção de resina com 10 e 40% de CaCO_3 para as granulometrias de 38 μm e 75 μm . Nestas figuras, vê-se que a velocidade e o tempo de preenchimento do molde são menores para a granulometria de 75 μm . Com isso, entende-se que, com o excesso de partículas grossa o fenômeno de filtração torna-se mais importante (Cardoso, 2011). Neste caso, deve-se verificar o teor de CaCO_3 . Este comportamento foi visível apenas em teores mais elevados de CaCO_3 . Assim pode-se dizer que, para baixos teores de CaCO_3 , uma granulometria menor (com peneiramento), isto é, partículas de menores diâmetros, dificultam o fluxo da resina. Quando a quantidade de partículas aumenta consideravelmente, o aumento da viscosidade e o excesso de partículas grossas (sem peneiramento) dificultam consideravelmente o fluxo de resina.

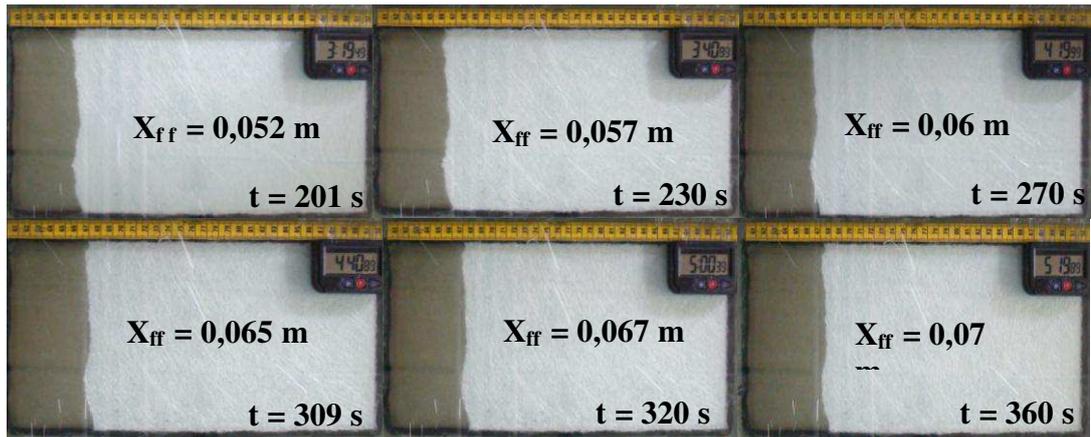


Figura 5.38 - Avanço da frente de fluxo durante a infiltração retilínea (10% CaCO_3 , $P = 0,25$ bar, $V_f = 30\%$ e granulometria de $38\mu\text{m}$).

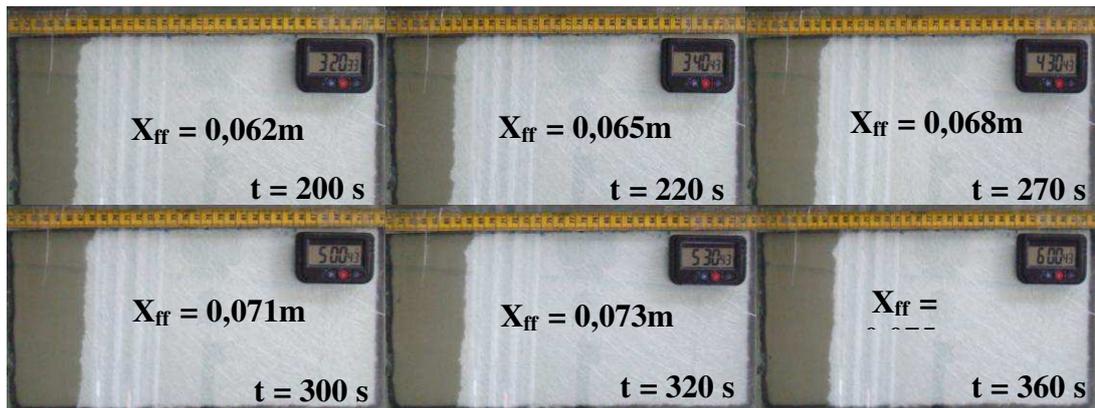


Figura 5.39 - Avanço da frente de fluxo durante a infiltração retilínea (40% CaCO_3 , $P = 0,25$ bar, $V_f = 30\%$ e granulometria de $38\mu\text{m}$).

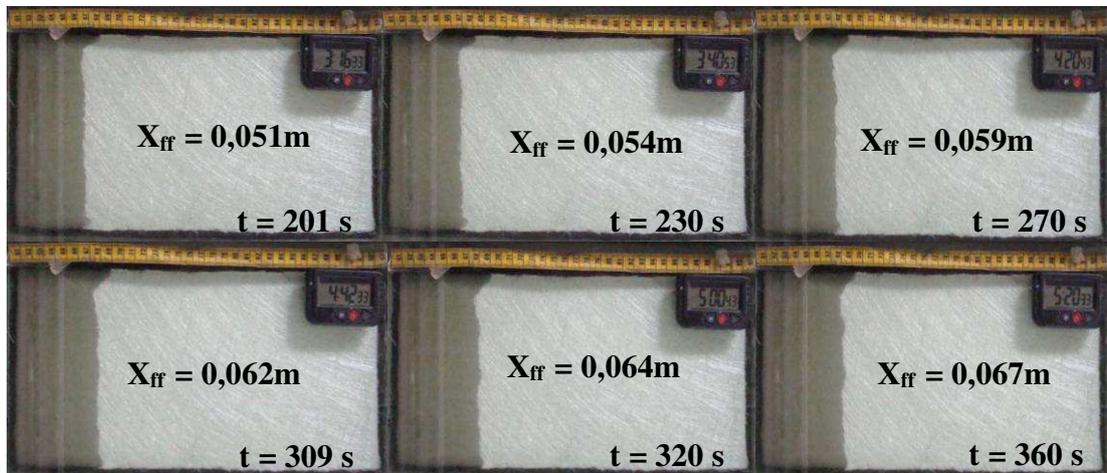


Figura 5.40 - Avanço da frente de fluxo durante a infiltração retilínea (10% CaCO_3 , $P = 0,25$ bar, $V_f = 30\%$ e granulometria $75\mu\text{m}$).

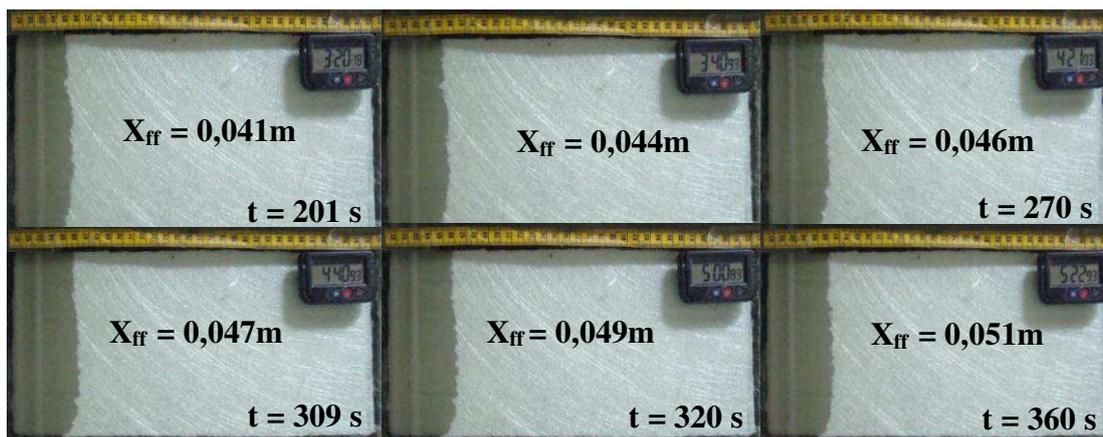


Figura 5.41 - Avanço da frente de fluxo durante a infiltração retilínea (40% CaCO₃, P = 0,25 bar, V_f = 30% e granulometria 75µm).

A Figura 5.41 mostra a posição da frente de fluxo em função do tempo de preenchimento do molde para os casos com granulometria 38 e 75 µm, respectivamente. Pode-se notar que com 10% CaCO₃ na resina, em ambos os casos, este flui mais facilmente do que com 40% CaCO₃ (Cunha, 2011). Com maior granulometria, as partículas tendem a ser retida um pouco mais no meio fibroso, porque os diâmetros dos poros são pequenos em relação ao das partículas. Percebe-se para os casos com granulometrias 38 e 75 µm, um comportamento bem similar da frente de fluxo devido aos diâmetros médio das partículas, estão bastante próximos (15,83 e 21,78 µm).

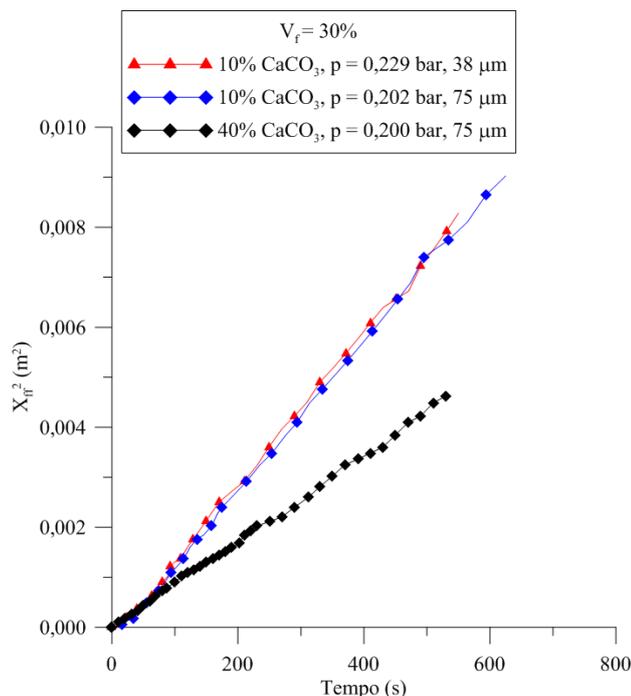


Figura 5.42 - Posição da frente de fluxo versus tempo de injeção (P = 0,25 bar, V_f = 30%, 38 e 75 µm).

d) Mobilidade

✓ Casos A1 e A2: $V_f=19\%$ e $P = 0,25$ bar (Tab. 3.2)

Na Figura 5.42, observa-se que, quanto maior a quantidade de carbonato de cálcio (partículas) na resina, maior será a dificuldade da resina mover-se dentro do molde, ou seja, menor a mobilidade do fluido. Isto ocorre devido ao aumento da viscosidade da mistura e diminuição dos espaços vazios (ou seja, alteração na permeabilidade), quando as partículas começam a preencher os poros. Assim, o fluido terá uma maior dificuldade de mover-se dentro do molde.

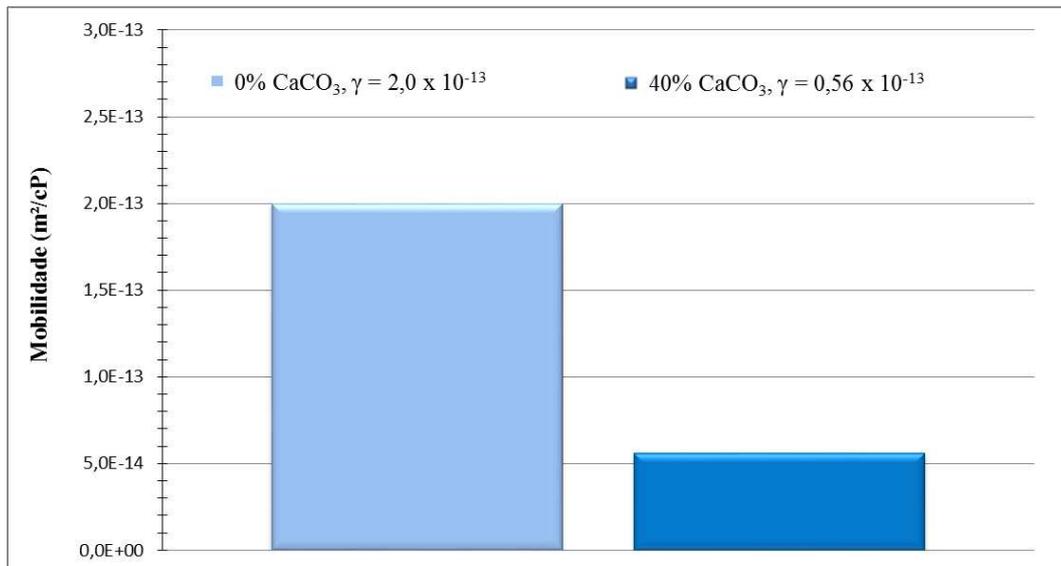


Figura 5.43 - Teor de carbonato de cálcio versus mobilidade ($P = 0,25$ bar, $V_f = 19\%$).

✓ Casos A3 - A7: $V_f=24\%$ e $P = 0,25$ bar (Tab. 3.2)

Como pode ser visto na Figura 5.6, quando o teor de carbonato de cálcio na resina é de 0%, a mobilidade é igual a $8,69 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{cP}$ e quando é de 40% esta é reduzida a $1,42 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{cP}$. A partir deste gráfico, é possível verificar que o escoamento é mais rápido para o caso de resina pura. Isto é devido à ausência de partículas no meio poroso, com isso, há uma maior facilidade do fluido escoar. Com fração volumétrica constante, em ambos os casos, quando a mistura fluida escoar no meio fibroso, há obstrução nos poros impedindo o

escoamento do fluido. Com isso, a quantidade de vazio diminui, reduzindo a porosidade e, a permeabilidade.

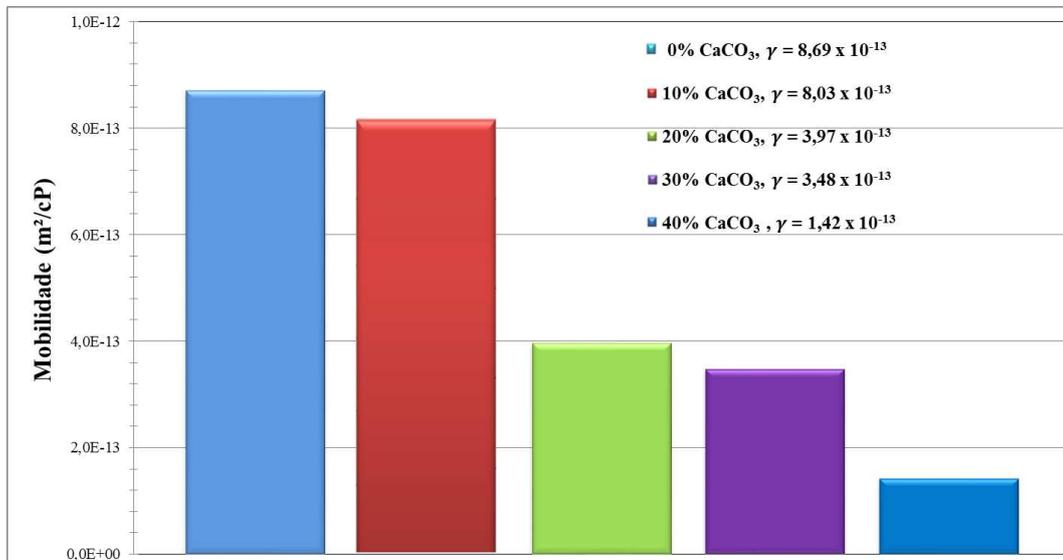


Figura 5.44 - Mobilidade versus teor de carbonato de cálcio ($P = 0,25$ bar, $V_f = 24\%$).

✓ Casos A8 – A22: $V_f = 30\%$ e $P = 0,25; 0,50$ e $0,75$ bar (Tab. 3.2)

Para ilustrar, nas Figuras 5.44 a 5.46, com suas respectivas pressões de 0,25, 0,50 e 0,75 bar, apresenta-se a mobilidade da fase fluida versus teor de carbonato de cálcio na resina. Pode-se observar que, como comentado anteriormente, há uma variação da mobilidade em todos os casos estudados, sendo que quanto menor o teor de CaCO₃ na resina maior a sua mobilidade. Observa-se que, no escoamento do fluido para os casos A8, A13 e A18 (resina pura), independente da pressão de injeção, o fluido move-se mais rápido em todos os casos, pois, sem a presença de partículas no molde o fluido escoar livremente. Para o caso A18, com maior pressão de injeção o fluido escoar mais rapidamente, ou seja, uma maior mobilidade. Um efeito inverso pode ser verificada com a presença de CaCO₃, isto é, quando a pressão de injeção aumenta, a mobilidade diminui.

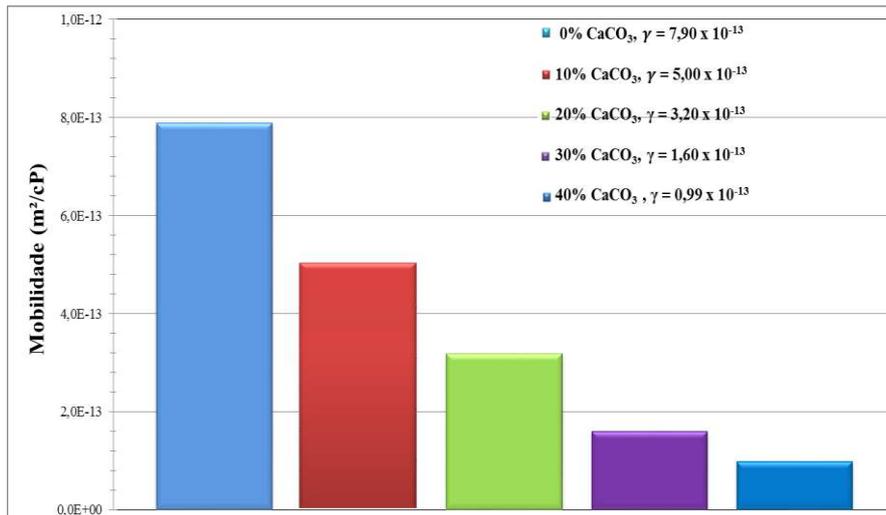


Figura 5.45 - Mobilidade versus teor de carbonato de cálcio ($P = 0,25$ bar, $V_f = 30\%$).

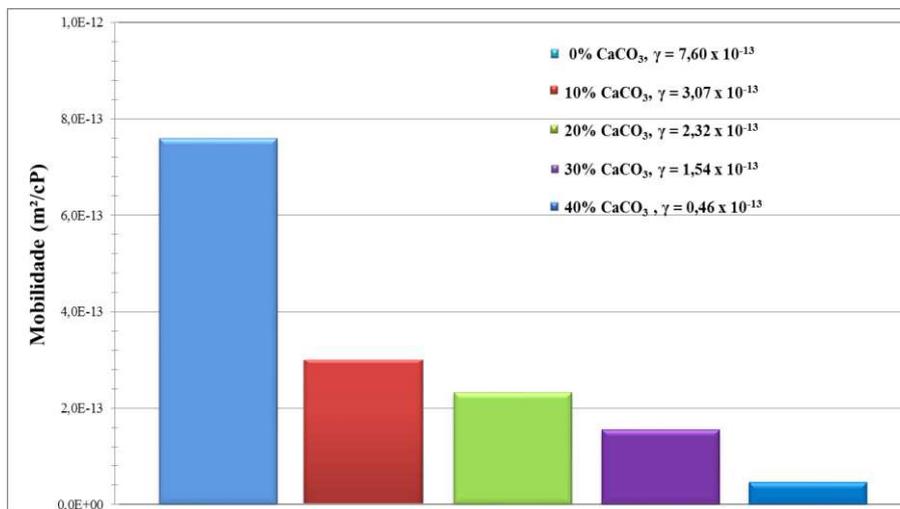


Figura 5.46 - Mobilidade versus teor de carbonato de cálcio ($P = 0,50$ bar, $V_f = 30\%$).

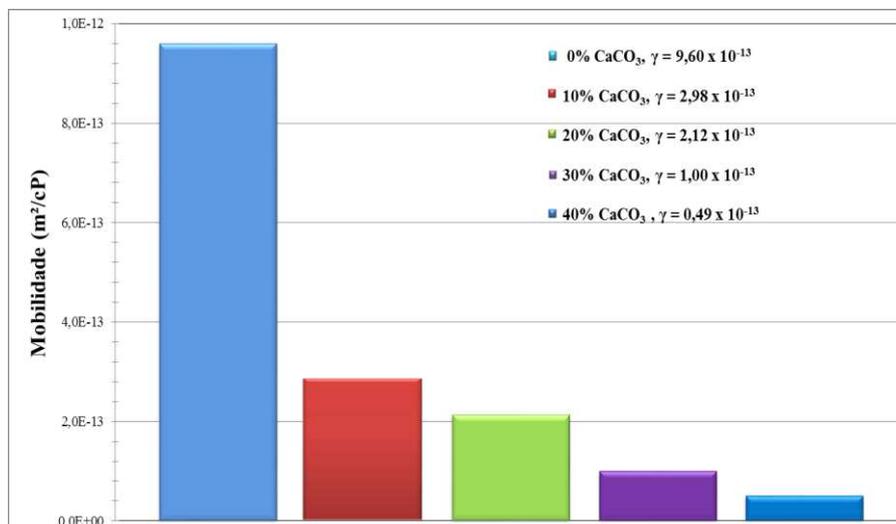


Figura 5.47 - Mobilidade versus teor de carbonato de cálcio ($P = 0,75$ bar, $V_f = 30\%$).

✓ Casos A23 – A26: $V_f=30\%$, $P = 0,25$ bar, $38 \mu\text{m}$ e $75 \mu\text{m}$

Pode-se observar nas Figuras 5.47 e 5.48 a mobilidade do fluido versus teor de Carbonato de Cálcio na resina. Com granulometria $75 \mu\text{m}$, existe uma maior mobilidade em relação àquela obtida com CaCO_3 e com granulometria de $38 \mu\text{m}$. Quanto menor for a granulometria da partícula menor será a mobilidade e eficiência de deslocamento da mistura (resina + CaCO_3), uma vez que, o fluido injetado terá uma menor fluidez.

Comparando-se os casos A23 (10% CaCO_3 , $38 \mu\text{m}$) e A24 (40% CaCO_3 , $38 \mu\text{m}$) (A25 e A26 com 10% e 40% CaCO_3 , $75 \mu\text{m}$, respectivamente), percebe-se claramente, que o tempo de preenchimento do molde é menor para o A23. Com isso, entende-se que, com o excesso de partículas finas, a quantidade de bolhas de ar diminui, criando vazios pequenos entre eles, o que resulta em poros menores, dificultando, assim, o fluxo de fluido.

Nas experiências realizadas pelos Lefevre et al. (2007), ao trabalhar com resina cheias de partículas em processos de LCM, ou autores levantam dois problemas importantes durante a fase de impregnação: aumento da viscosidade da resina e filtração possível das partículas do pré-molde fibroso. Ambas as questões contribuem para reduzir a velocidade do fluxo da resina e pode ser responsável por manchas secas, falta de saturação dos cabos de fibras e tempo de ciclo de produção.

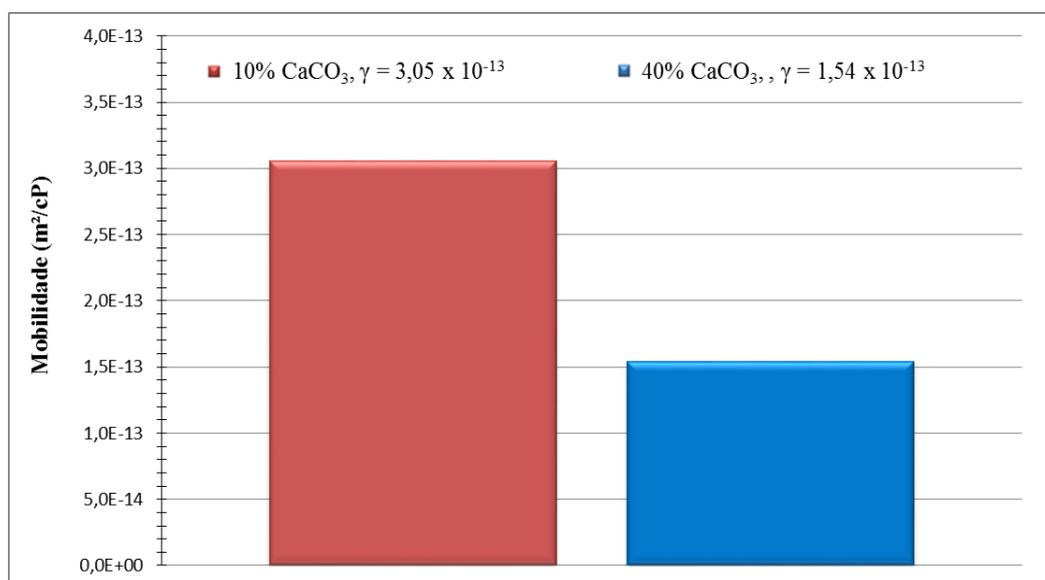


Figura 5.48 - Mobilidade versus teor de carbonato de cálcio ($P = 0,25$ bar, $V_f = 30\%$, $38 \mu\text{m}$).

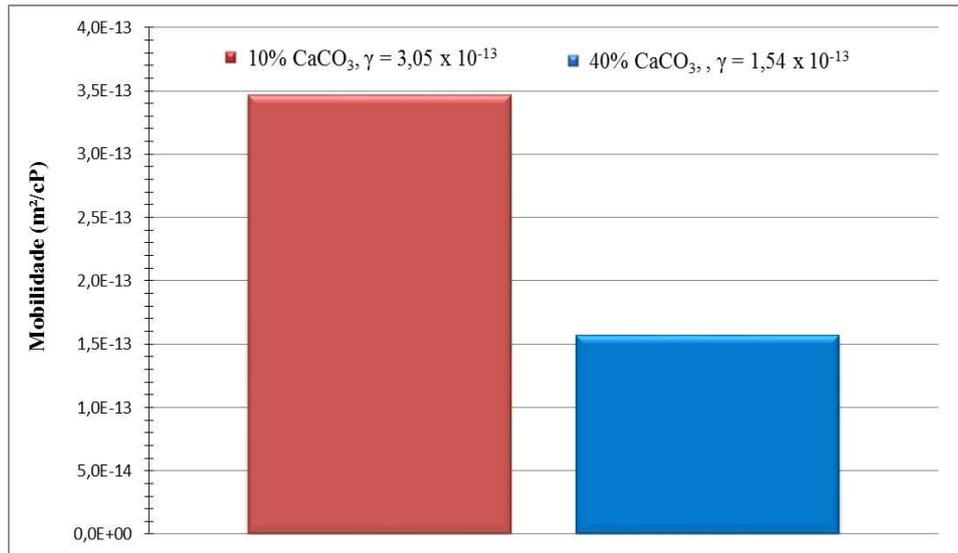


Figura 5. 49 - Mobilidade versus teor de carbonato de cálcio ($P = 0,25$ bar, $V_f = 30\%$, $75 \mu\text{m}$).

d) Análise da microestrutura do compósito via MO (Microscopia Óptica)

Com a análise por MO do compósito (Figura 5.50), foi possível comprovar o impedimento do molhamento do meio, devido a adição do carbonato de cálcio na resina. Ocorreu uma heterogeneidade no meio poroso, ou seja, observou-se áreas ricas em resina e área em que a resina não penetrou nas fibras. Isto não é ideal para formação do compósito.

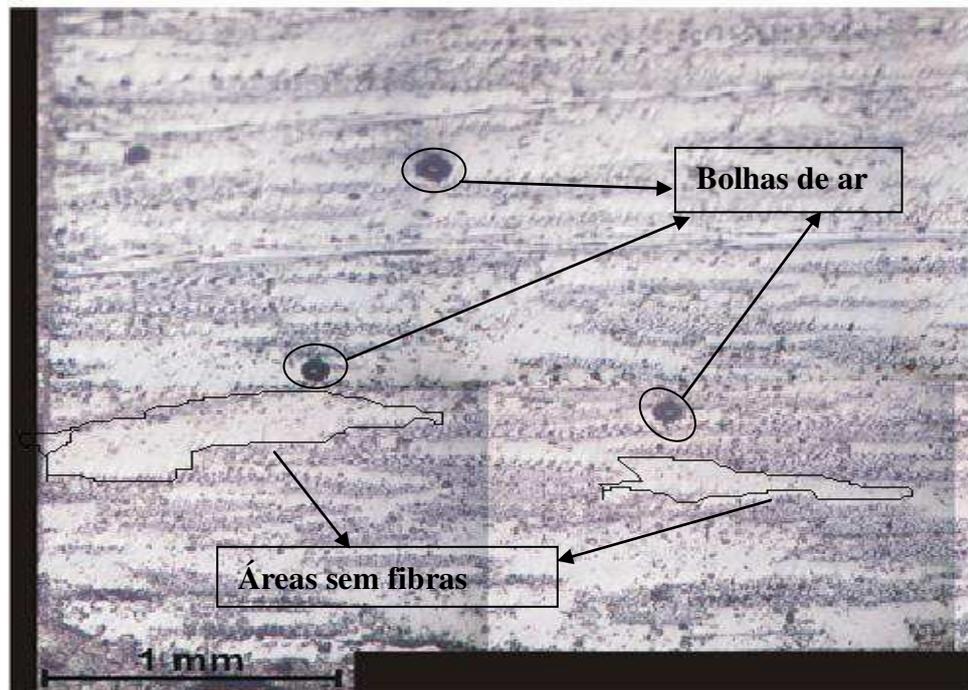


Figura 5.50 - Micrografia óptica da secção cortada do compósito produzido (40% de CaCO_3 , $P = 0,25$ bar e $V_f = 30\%$).

5.3.4 Pré-forma com diferentes camadas de fibra de vidro: Avaliação do efeito do teor de fibra

Na Figura 5.50 ilustra-se a posição da frente de fluxo em função do tempo de injeção para três frações volumétricas do meio fibroso. Como pode ser visto, a inclinação da reta de ajuste de $X_{ff}^2 \times \text{tempo}$ para o $V_f = 19\%$ é a maior que para o V_f de 24 e 30%. Então, é possível verificar que a permeabilidade para o $V_f = 19\%$ é a maior, pois quanto maior a inclinação da reta, maior é a sua permeabilidade e, portanto menor o tempo de preenchimento do meio fibroso.

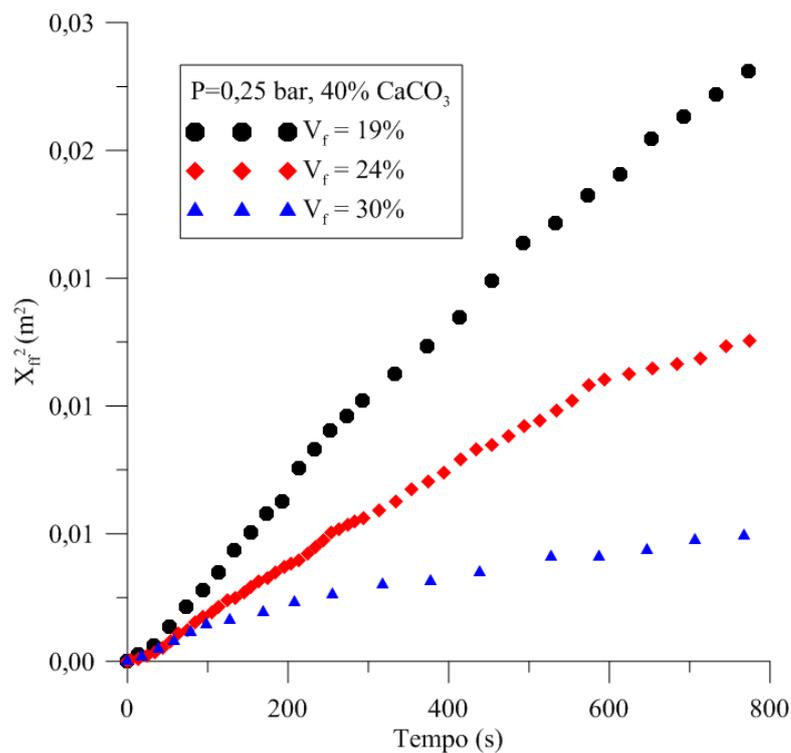


Figura 5.51 - Posição da frente de fluxo versus tempo para o caso $P = 0,25$ bar e 40% de $CaCO_3$.

Estes resultados são similares aos encontrados na literatura (Pomeroy et al., 2007; Gill et al., 2009; Garay, 2010). Segundo estes autores, quanto menor a fração volumétrica do meio fibroso, maior o volume de canais livres na manta para a sua impregnação e com isso maior a permeabilidade (Figura 5.51). Pode-se notar uma grande diferença de permeabilidade experimental para $V_f = 19$ e 30% , refletindo, obviamente no tempo de preenchimento, praticamente $82,5\%$ maior.

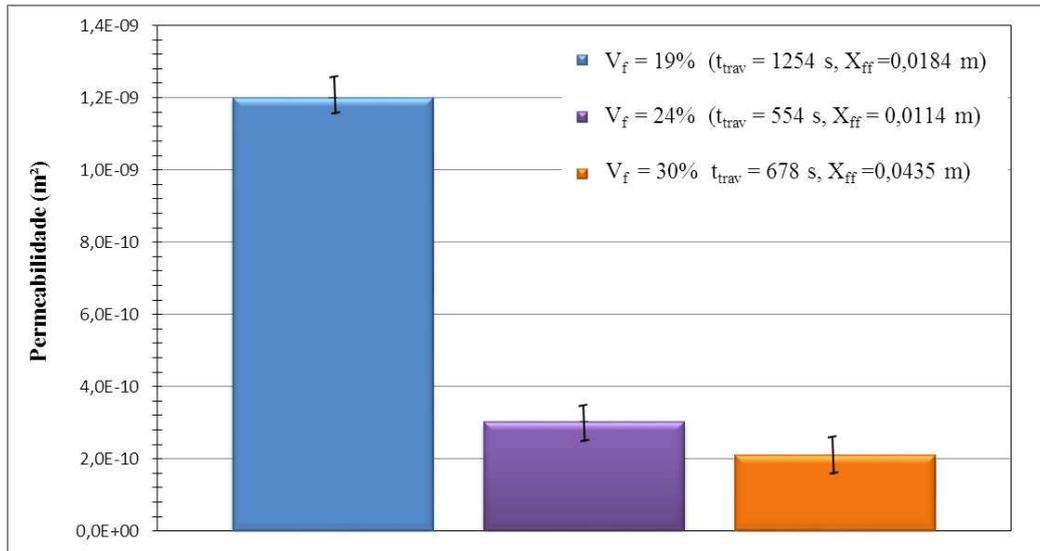


Figura 5.52 - Variação da permeabilidade experimental do meio fibroso com adição de 40% de $CaCO_3$ na resina ($P = 0,25$ bar).

5.3 Resultados Numéricos

5.3.1 Domínio computacional e as condições de contornos

O domínio computacional utilizado na simulação numérica consiste basicamente de um molde de aço com dimensões 320 x 150 mm e também sua entrada e saídas com suas respectivas dimensões, 4,58 mm e 67 mm, conforme é possível observar na Figura 5.52.

A metodologia empregada baseia-se no modelo PAM-RTM, que permite simular computacionalmente o comportamento do fluido no interior do molde, de uma forma muito próxima à realidade, pois por ser multifásico permite a observação de como ocorre a interação entre resina e $CaCO_3$ em todo o domínio computacional.

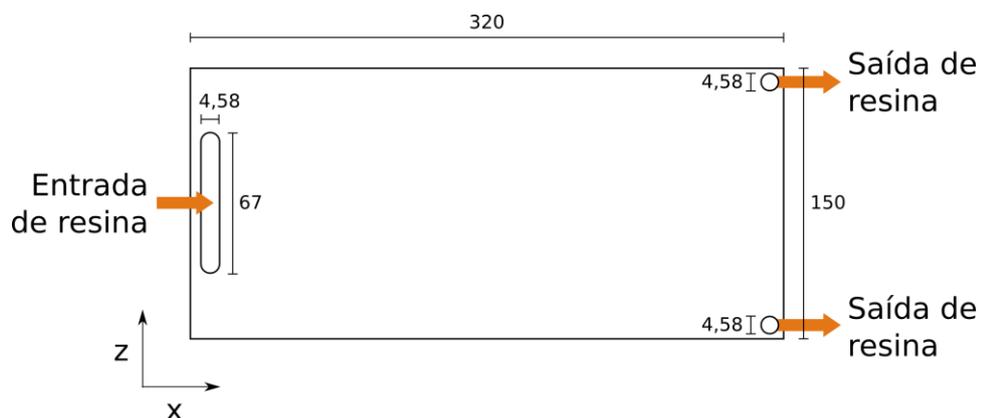


Figura 5.53 - Representação esquemática do domínio computacional.

Como é possível observar na Figura 5.52, na parte inicial, denominada de pressão de entrada, é aplicada a condição de contorno de pressão atmosférica e na condição de contorno denominado parede é considerada uma pressão manométrica (pressão nula). No que diz respeito saída, é imposta a condição de contorno semelhante a utilizada nas paredes do molde, que consiste em aplicar ao mesmo uma pressão da frente de fluxo. Estas condições de contorno para o software estão representadas nos Apêndices.

5.3.2 Teste de independência de malha

Neste momento será apresentado um estudo de refinamento de malha feito para a solução obtida pelo software utilizado nesse trabalho. A geometria contorno do problema pode ser observado na Figura 5.53. Foi utilizado o tempo total de preenchimento do molde e o campo de pressão como parâmetro de comparação dos resultados. Convém salientar que a pressão de injeção nas paredes e na frente de fluxo do molde foi considerado zero.

Os resultados de tempo de preenchimento e campo de pressões nas diferentes malhas. Nota-se que a independência de malha discordam em 1,22% e 2,70%, respectivamente, para as malhas de 7077 elementos e 41005 elementos, portanto pode-se considerar que a malha de 41005 é independente de refino de malha, admitindo-se que se pode tolerar o percentual de diferença apresentado. A comparação dos perfis do tempo de preenchimento e campo de pressões ao longo do eixo X é representada nas Figuras 5.53 e 5.54.

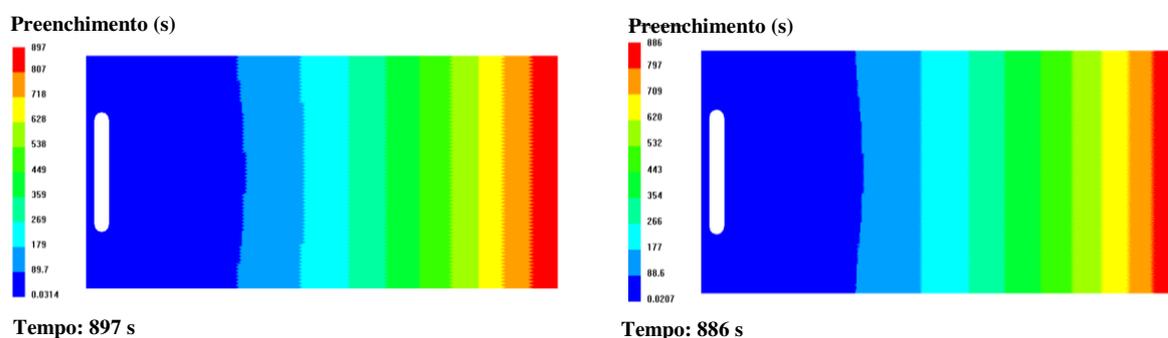


Figura 5.54 – Tempo de preenchimento para malhas de: (a) 7077 elementos e (b) 41005 elementos.

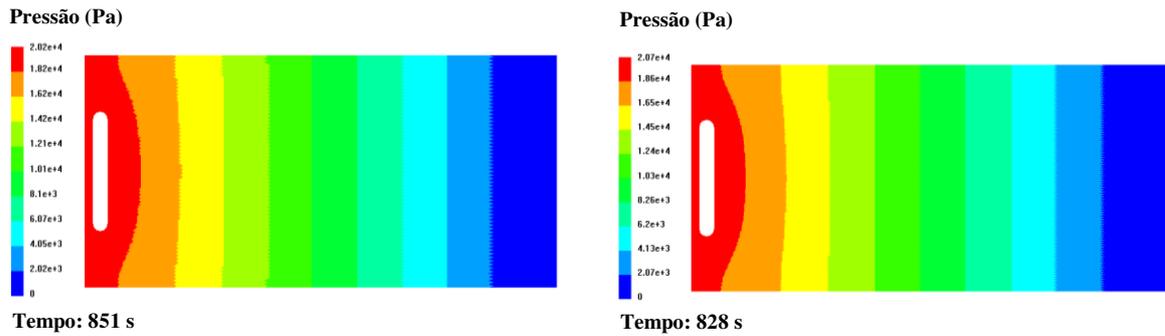


Figura 5.55 – Campo de pressão para malhas de: (a) 7077 elementos e (b) 41005 elementos.

5.3.3 Pré-forma com 4 camadas de manta de fibra de vidro (Casos A1 e A2: $V_f = 19\%$, $P = 0,25$ bar)

Para validar a simulação obtida com PAM-RTM, os resultados do avanço da frente de fluxo nos casos A1 e A2 durante a injeção da resina foram comparados com os dados experimentais, como mostra as Figuras 5.55 e 5.56. Também na simulação o perfil plano da frente de fluxo ocorreu em comprimento aproximadamente na metade do molde, e inicialmente, na região próxima da porta de injeção, o escoamento teve características 2D, com frente de fluxo de formato anelar (radial). Quando a diferença de pressão se torna linear, a frente de fluxo tende a tornar-se retilínea (1D). Na Tabela 5.9 estão mostrados os erros obtidos durante a comparação com os dados experimentais. Verifica-se uma excelente concordância entre os resultados.

Tabela 5.9 - Resultados experimental e numérico do tempo de preenchimento.

Teor de CaCO_3 (%)	Tempo de preenchimento (s)			Posição da frente de fluxo (m)		
	Experimental	Numérico	Erro	Experimental	Numérico	Erro
0	883	887	0,40%	0,320	0,320	0,0%
40	1261	1231	2,30%	0,197	0,197	0,0%

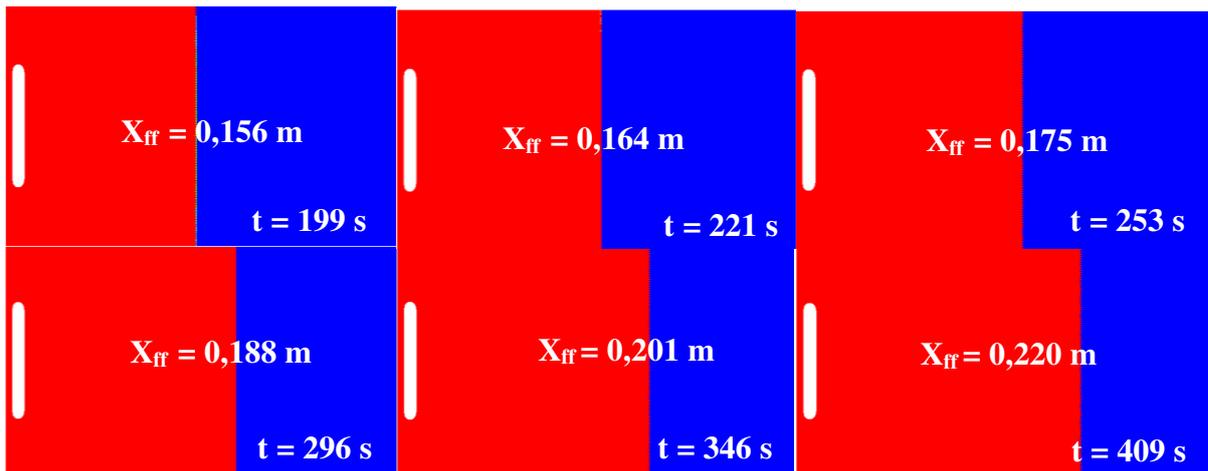


Figura 5.56 - Perfil de infiltração de resina para reforço de fibra de vidro em diferentes tempos de preenchimento ($P = 0,25$ bar, $V_f = 19\%$, $0\% \text{ CaCO}_3$).

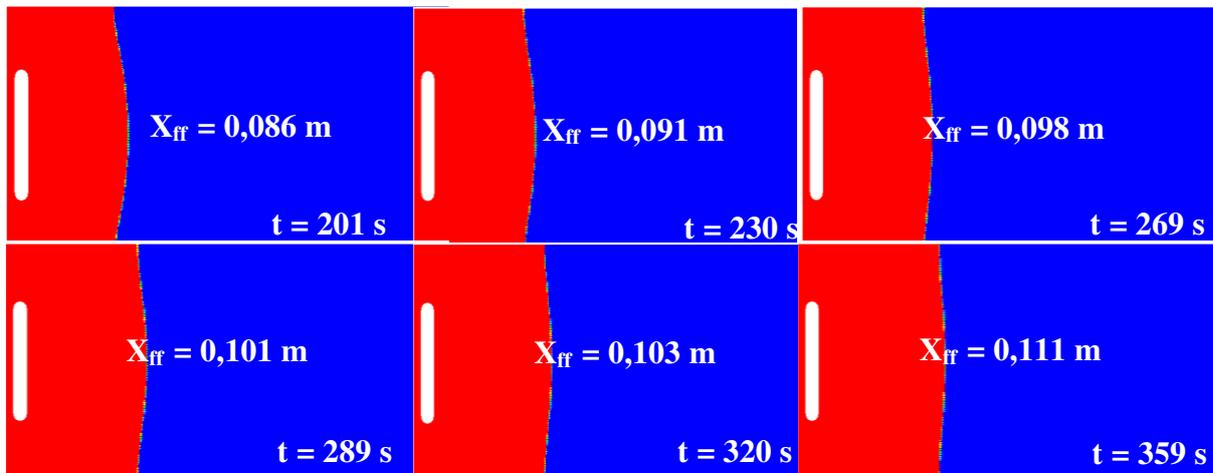


Figura 5.57 - Perfil de infiltração de resina para reforço de fibra de vidro em diferentes tempos de preenchimento ($P = 0,25$ bar, $V_f = 19\%$, $40\% \text{ CaCO}_3$).

As Figuras 5.57 e 5.58 mostram as posições da frente de fluxo experimental e numérica em função do tempo, para os casos A1 e A2, evidenciando que a solução numérica usando o PAM-RTM está em boa concordância com os resultados experimentais. Um razoável erro é observado na região não linear (próxima do ponto de injeção). A diferença deve-se provavelmente à característica 2D da montagem experimental em que a injeção é realizada através da parte inferior do molde, enquanto na solução numérica uma pressão prescrita é especificado no orifício de injeção. Além disso, a permeabilidade foi determinado a partir do fluxo 1D retilíneo ($t > 100$ s) (Luz, 2011; Garay, 2010; Luz et al., 2012).

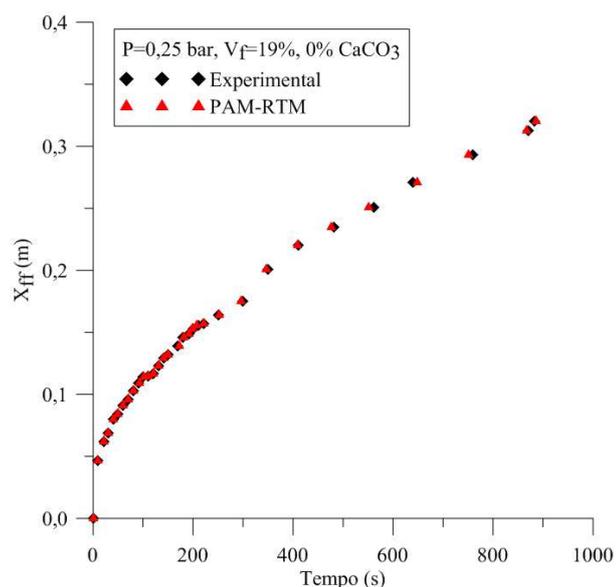


Figura 5.58 - Posição da resina no molde versus tempo de injeção ($P = 0,25$ bar, $V_f = 19\%$, 0% CaCO_3).

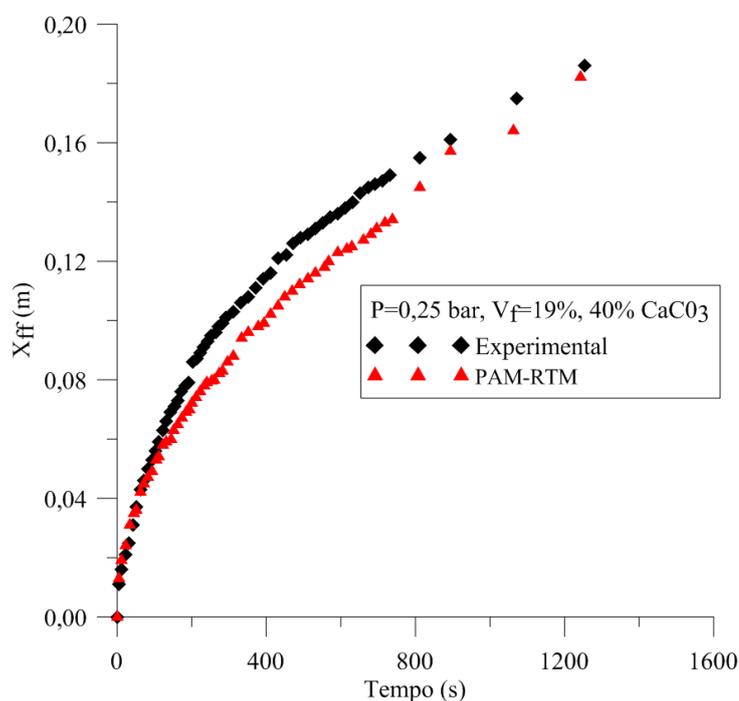


Figura 5.59 - Posição da resina no molde versus tempo de injeção ($P = 0,25$ bar, $V_f = 19\%$, 40% CaCO_3).

Comparando-se os resultados do PAM-RTM com os experimentais, observa-se a influência da adição de carbonato de cálcio no tempo de preenchimento do molde. Percebe-se que, quanto maior o teor de CaCO_3 na resina, maior o tempo de preenchimento. O resultado mostra que a solução numérica (PAM-RTM) apresenta boa concordância com a solução experimental (Figura 5.59).

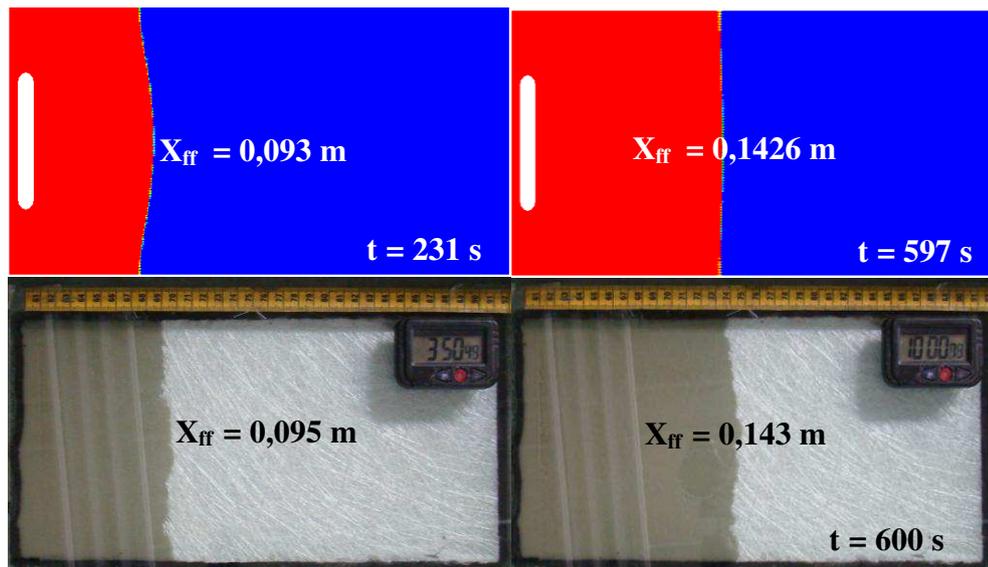


Figura 5.60 - Comparação da frente de fluxo predita (PAM-RTM) e experimental em dois tempos de processo ($P = 0,25$ bar, $V_f = 19\%$, 40% CaCO_3).

A Figura 5.60 ilustra o comportamento da pressão no interior da pré-forma para os tempos de preenchimento $t = 867\text{s}$ (0% CaCO_3) e $t = 885\text{s}$ (40% de CaCO_3). Observa-se uma variação do campo de pressão com o teor de CaCO_3 . Percebe-se que a pressão de injeção obtida pela solução numérica PAM-RTM se aproxima dos resultados experimentais obtidos para ambos os casos. Pode-se ver que a maior pressão ocorre no ponto de injeção (ou seja, no início da injeção da resina) e menor pressão é verificada na parte de ventilação (pontos de saída), como esperado, porque as pressões máxima e mínima correspondem a condições de contorno para o problema físico estudado.

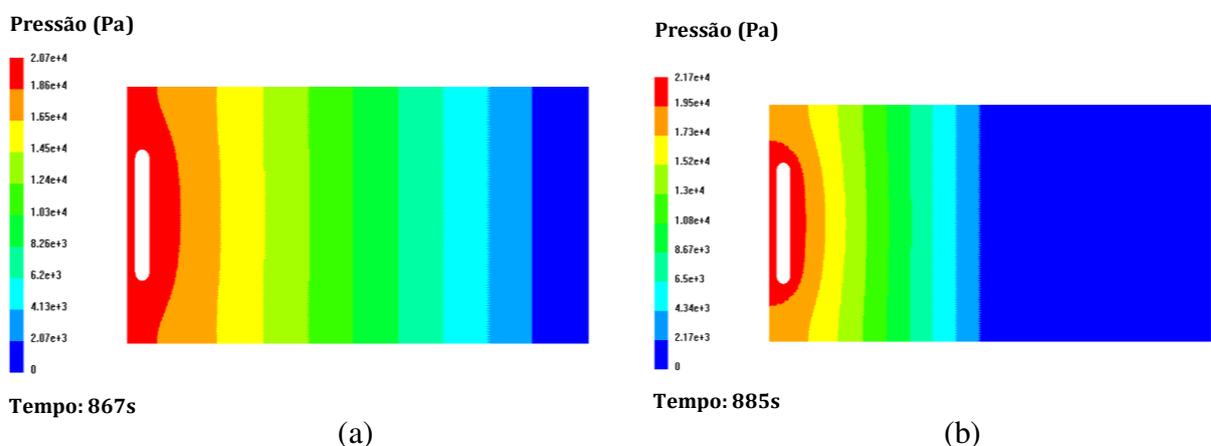


Figura 5.61 - Campo de pressão obtido com PAM-RTM: $P = 0,25$ bar, $V_f = 19\%$, (a) 0% CaCO_3 , (b) 40% CaCO_3 .

5.3.4 Pré-forma com 5 camadas de manta de fibra de vidro (Casos A3 - A7: $V_f = 24\%$, $P = 0,25$ bar)

Pode-se notar, que as áreas que formam um semicírculos vermelhas (mais escuras) são as regiões onde a manta de fibra de vidro já está totalmente impregnada, enquanto as áreas azuis (mais claras) representam as regiões onde ainda está seco.

A Tabela 5.10 apresenta os resultados experimentais comparados com a solução numérica usando PAM-RTM. A partir da análise desta tabela, pode-se ver que um bom ajuste foi obtido em todos os casos simulados.

Tabela 5.10 - Resultados experimental e numérico do tempo de preenchimento e posição da frente de fluxo.

Teor de CaCO_3 (%)	Tempo de preenchimento (s)			Posição da frente de fluxo (m)		
	Experimental	Numérico	Erro	Experimental	Numérico	Erro
0	1758	1756	0,1%	0,32	0,32	0,0%
10	2984	3065	0,2%	0,32	0,32	0,0%
30	614	618	0,6%	0,09	0,10	10,0%
20	718	718	0,0%	0,14	0,14	0,0%
40	554	556	0,3%	0,13	0,12	7,6%

Para validar a simulação obtida com PAM-RTM, resultados da posição da frente de fluxo, em diferentes momentos foram comparados com os dados experimentais (Figuras 5.16 e 5.17), tal como mostrado nas Figuras 5.61 e 5.62. Ao comparar numericamente e experimentalmente a posição da frente de fluxo ao longo do escoamento no meio fibroso em diferentes tempos de processamento (Figuras 5.61 e 5.62). Pode-se observar que, os resultados obtidos para o caso de 0% CaCO_3 , com a solução do PAM-RTM está em boa concordância com os resultados experimentais. Para o caso de 40% CaCO_3 ocorreu um erro de aproximadamente de 1,82%.

Nota-se na Figura 5.65 uma simulação preenchida com resina + CaCO_3 . O resultado mostra a posição de fluxo experimental e numérico da frente de fluxo como uma função do tempo para o caso de 30% CaCO_3 . Erros são observados na região não linear (próxima da seção de injeção). A diferença deve-se provavelmente a não homogeneidade do reforço fibroso. Neste caso, a injeção é realizada através da parte inferior do molde, enquanto na

solução numérica foi especificado pressão prescrita na fronteira do orifício de injeção. Além disso, a permeabilidade foi determinada com base no fluxo 1D retilínea ($t > 190s$) (Rudd et al., 1997; Machado et al., 2009; Destephen et al., 1996).

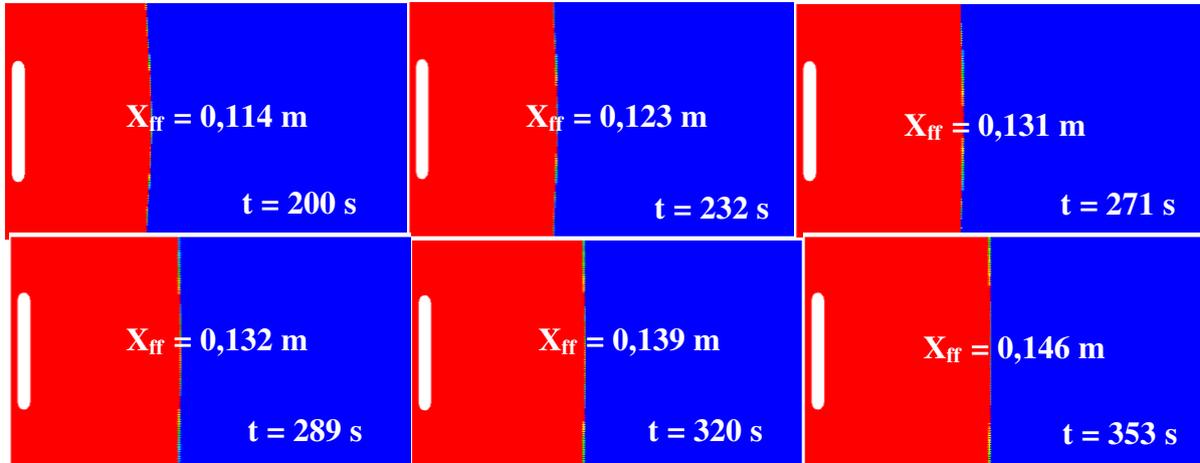


Figura 5.62 - Perfil de infiltração de resina para reforço de fibra de vidro em diferentes tempos de preenchimento ($P = 0,25$ bar, $V_f = 24\%$, 0% $CaCO_3$).

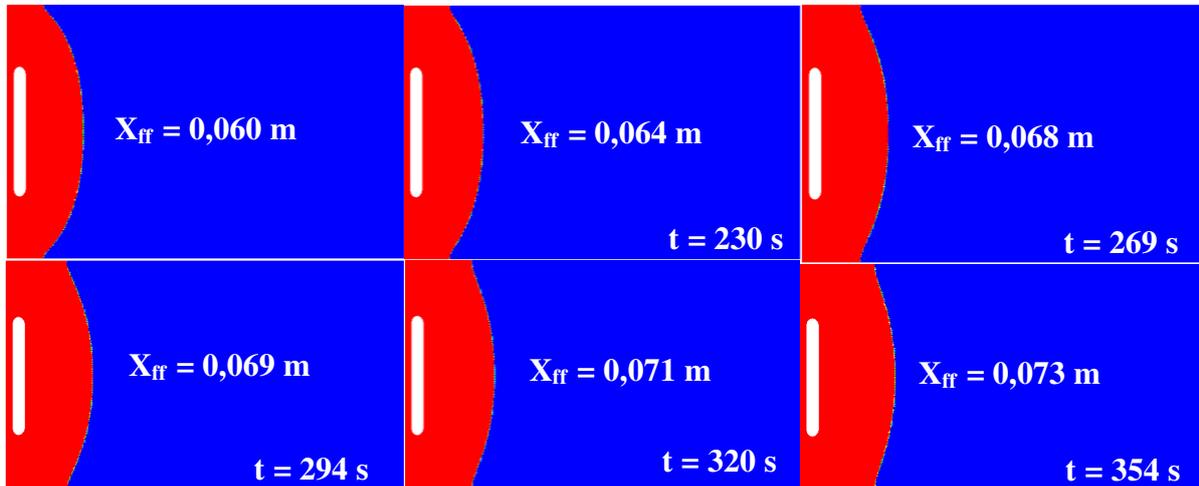


Figura 5.63 - Perfil de infiltração de resina para reforço de fibra de vidro em diferentes tempos de preenchimento ($P = 0,25$ bar, $V_f = 24\%$, 40% $CaCO_3$).

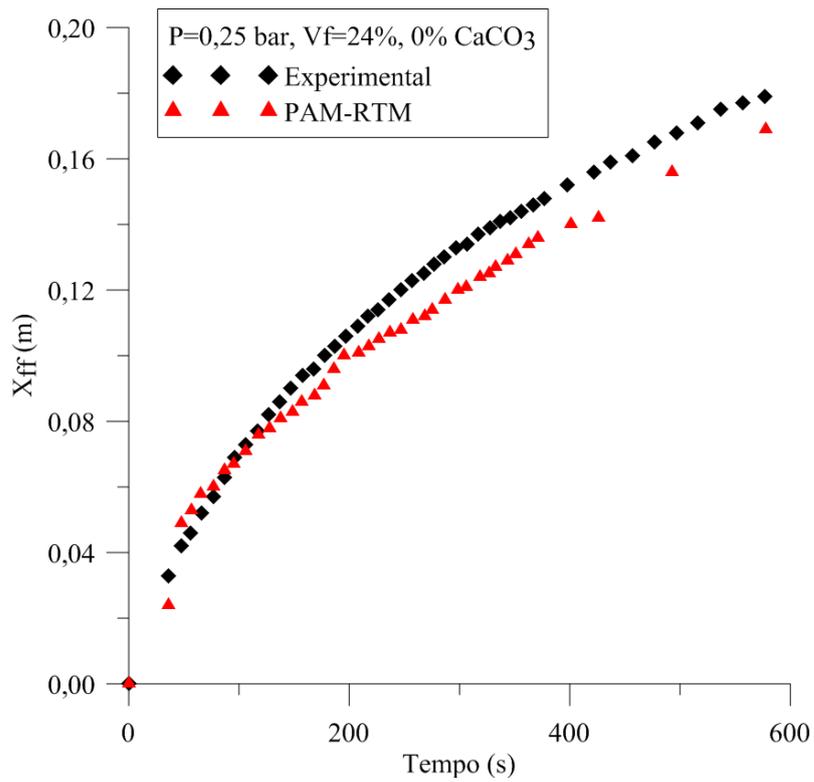


Figura 5.64 - Posição da resina no molde versus tempo de injeção ($P = 0,25$ bar, $V_f = 24\%$, 0% CaCO_3).

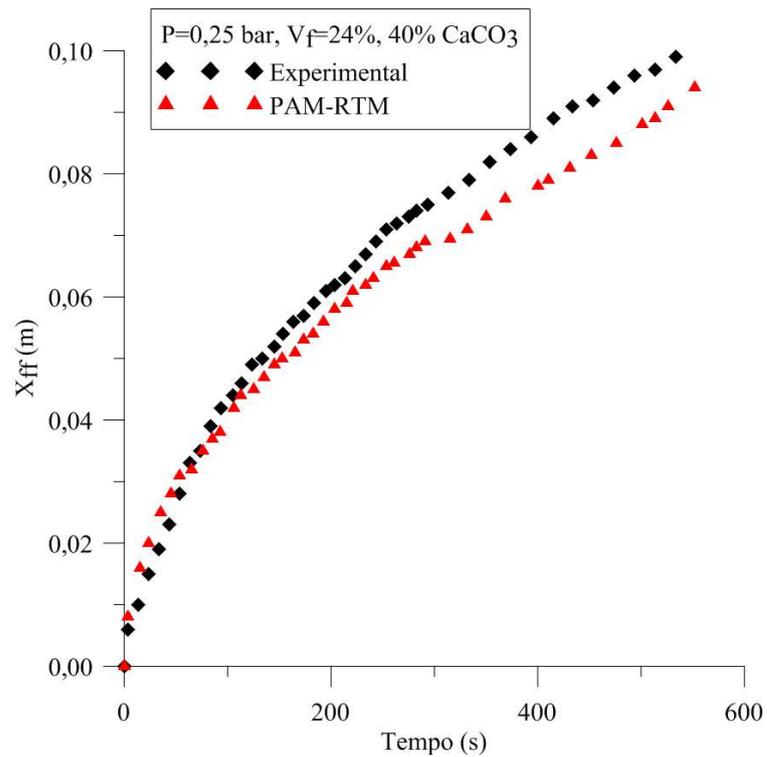


Figura 5.65 - Posição da resina no molde versus tempo de injeção ($P = 0,25$ bar, $V_f = 24\%$, 40% CaCO_3).

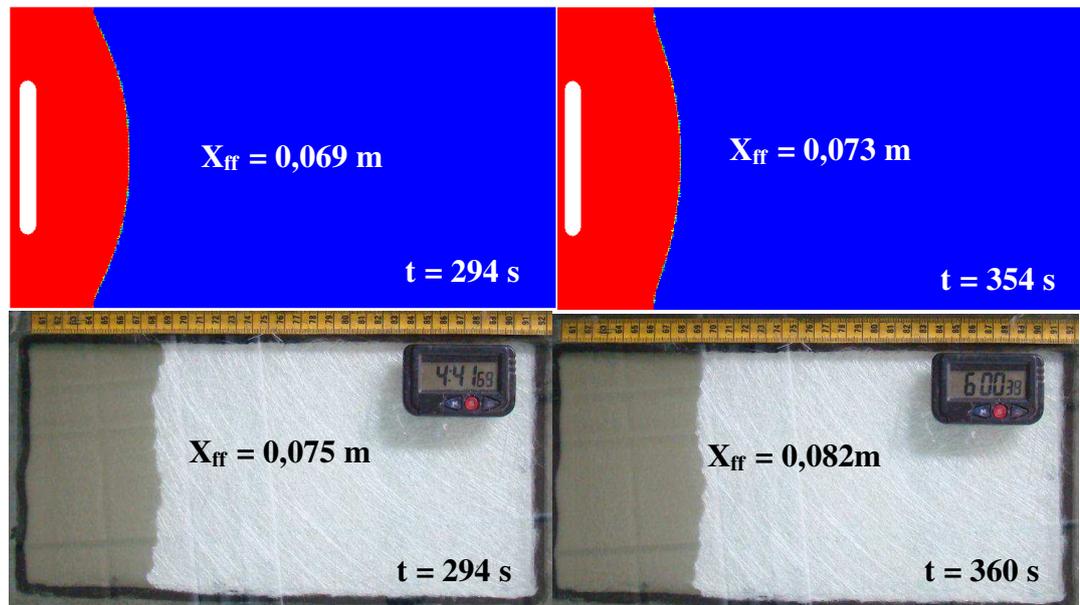


Figura 5.66 - Comparação da posição da frente de fluxo em dois tempos ($P = 0,25$ bar, $V_f = 24\%$, 40% CaCO_3), (a e b) PAM-RTM e (c e d) Experimental.

Na Figura 5.66 ilustrado o comportamento da pressão no interior do pré-molde em diferentes tempos de preenchimento $t=1607\text{s}$ (0% CaCO_3), $t = 1569\text{s}$ (10% CaCO_3), $t = 1577\text{s}$ (20% CaCO_3), $t = 107\text{s}$ (30% CaCO_3) e $t = 1577\text{s}$ (40% CaCO_3), respectivamente. Verifica-se que a pressão de injeção obtida pela solução numérica PAM-RTM aproxima dos resultados experimentais obtidos para as diferentes condições de trabalho.

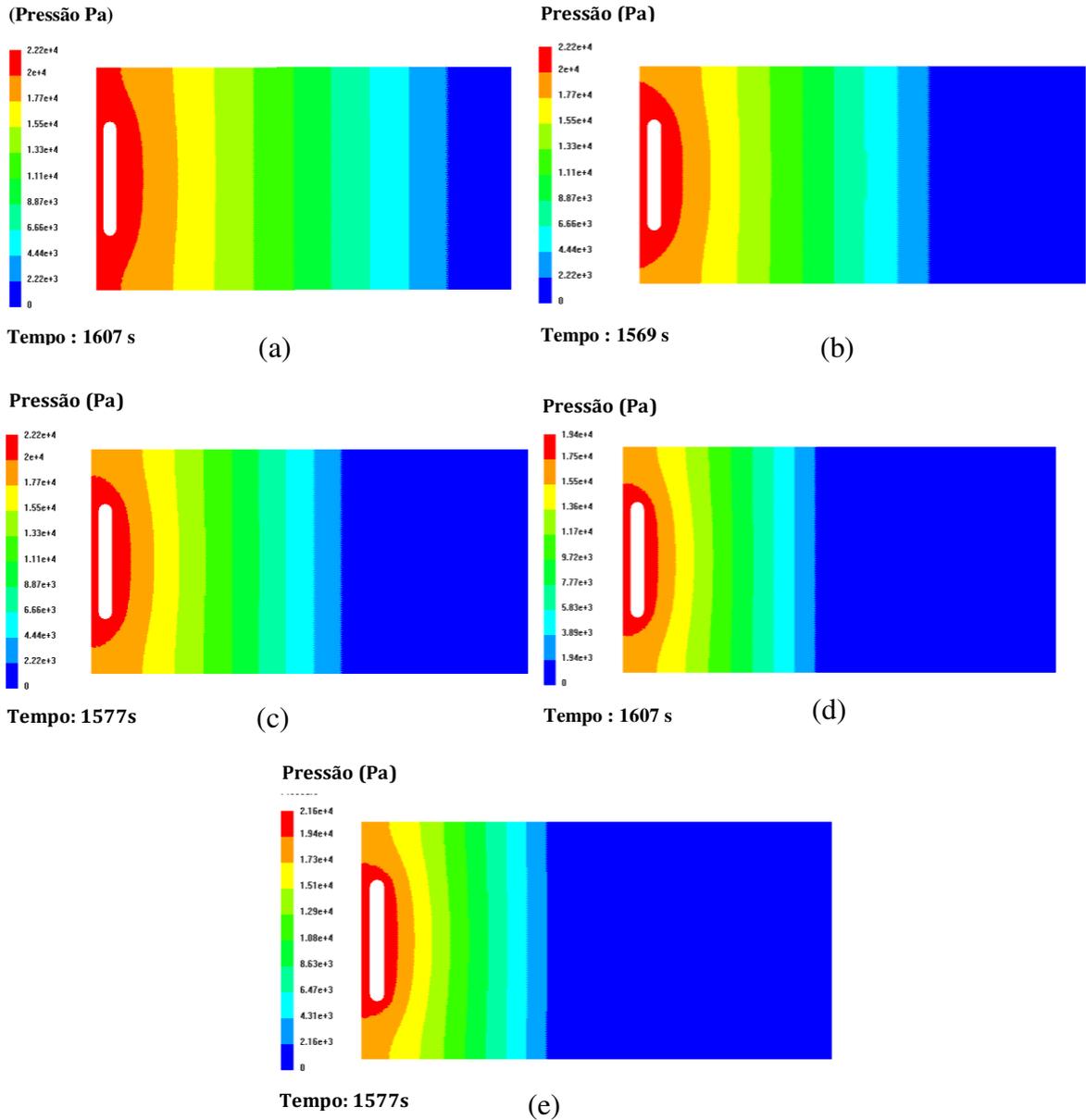


Figura 5.67 - Pressão de injeção obtida através do software PAM-RTM: $P = 0,25$ bar, $V_f = 24\%$, (a) 0 % CaCO_3 ; (b) 10 % CaCO_3 ; (c) 20 % CaCO_3 ; (d) 30 % CaCO_3 ; (e) 40 % CaCO_3 .

5.3.5 Pré-forma com 6 camadas de manta de fibra de vidro (Casos A8 – A22: $V_f = 30\%$, $P = 0,25$; 0,50 e 0,75 bar)

Os tempos de processamento para cada caso simulado no PAM-RTM estão apresentados na Tabela 5.11. O tempo de preenchimento do molde é diretamente afetado pela pressão de injeção (Luz, 2011). Portanto, a aplicação da pressão variável no modelo computacional é fundamental para que uma simulação reproduza fielmente o processo experimental, especialmente quando o tempo requerido para atingir a pressão estável for

comparável ao tempo requerido para o fluido encher completamente o molde (Luz, 2011). Nas Figuras 5.67 a 5.72, observa-se a posição da frente de fluxo com o tempo de preenchimento em diferentes pressões (0,25; 0,50 e 0,75 bar). Observa-se que as frentes de fluxo obtidas nos experimentos avançam em formas retangulares (Figuras 5.66, 5.68 e 5.70), e nas simulações o mesmo comportamento é observado quando a resina se aproxima da metade do molde. Isto ocorre porque nas simulações se considera uma distribuição homogênea das fibras de vidro, o que nem sempre acontece experimentalmente.

Tabela 5.11 - Resultados experimental e numérico do tempo de preenchimento e posição da frente de fluxo.

Pressão (bar)	Teor de CaCO ₃ (%)	Tempo de preenchimento (s)			Posição da frente de fluxo (m)		
		Experimental	Numérico	Erro	Experimental	Numérico	Erro
0,25	40	4560	4507	1,00%	0,11	0,12	8,3%
	30	4860	4836	0,04%	0,15	0,16	8,3%
	20	7200	7119	1,10%	0,14	0,15	8,3%
	10	8280	8758	5,40%	0,32	0,32	0,0%
	0	3120	3102	0,50%	0,32	0,32	0,0%
0,50	40	6060	6151	1,40%	0,08	0,08	0,0%
	30	9540	8749	8,20%	0,19	0,19	0,0%
	20	12840	11899	7,30%	0,27	0,26	5,0%
	10	4320	4320	0,00%	0,32	0,32	0,0%
	0	995	997	0,20%	0,32	0,32	0,0%
0,75	40	3000	3026	0,85%	0,11	0,11	0,0%
	30	7260	6583	9,30%	0,27	0,25	7,4%
	20	10200	10978	7,00%	0,28	0,26	7,1%
	10	1691	1692	0,05%	0,32	0,32	0,0%
	0	674	677	0,40%	0,32	0,32	0,0%

Nas Figuras 5.67 a 5.72 tem-se a posição da frente de fluxo em diferentes tempos de processamento obtido através do software comercial PAM-RTM, para dois teores de carbonato de cálcio (0 e 40%) nas pressões de 0,25, 0,50 e 0,75 bar. Observa-se que a frente de fluxo é mais rápida quando não se utiliza carbonato de cálcio na resina. Já para o caso 40% CaCO₃, existe uma maior dificuldade de impregnação da mistura no meio fibroso. Isto ocorre devido a presença de partículas de CaCO₃ entre as fibras, ocasionando uma diminuição de vazios do meio fibroso e dificultando o fluxo de resina. Com isso, um maior tempo de processamento será requerido para o preenchimento do molde.

Os resultados numéricos mostram, ainda, a influência da pressão de injeção no tempo de preenchimento do molde. Verifica-se que quanto maior for a pressão de injeção, menor será o tempo para preenchimento do molde. No caso em que utilizou-se 40% CaCO₃ na resina, foram obtidas pequenas diferenças no tempo de preenchimento do meio fibroso (Figuras 5.67, 5.69 e 5.71).

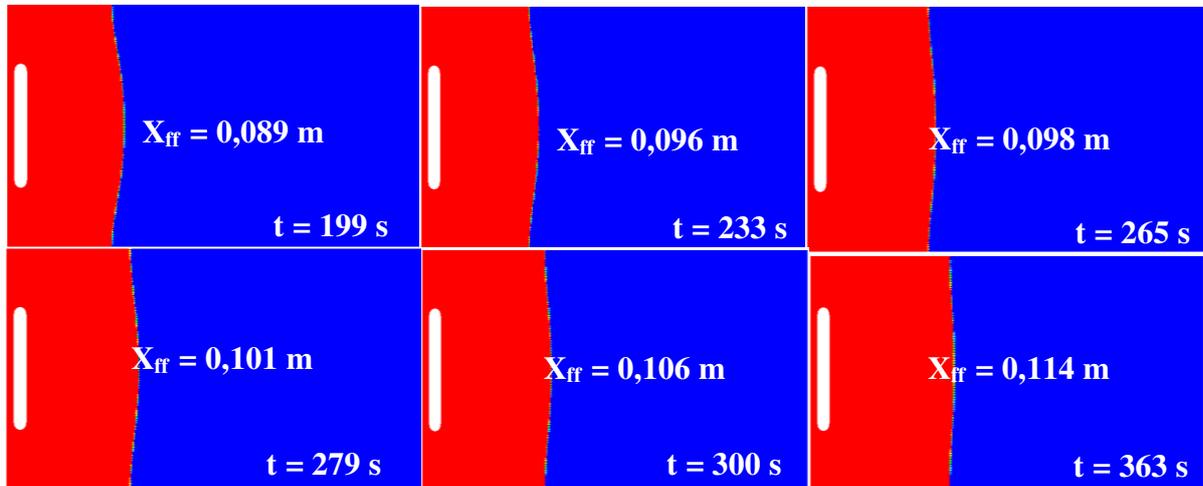


Figura 5.68 - Perfil de infiltração de resina para reforço de fibra de vidro em diferentes tempos de preenchimento ($P = 0,25 \text{ bar}$, $V_f = 30\%$, $0\% \text{ CaCO}_3$).

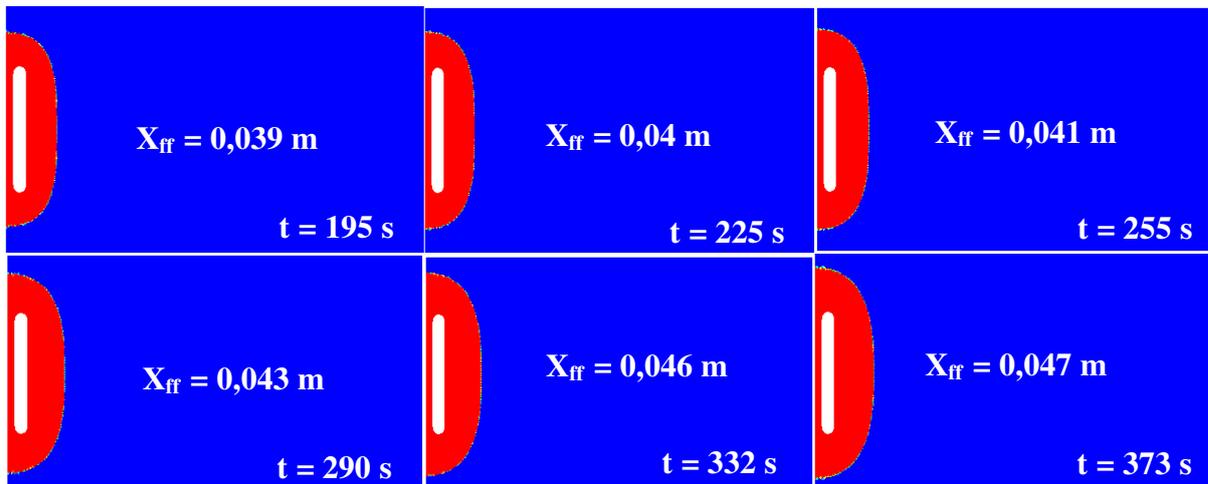


Figura 5.69 - Perfil de infiltração de resina para reforço de fibra de vidro em diferentes tempos de preenchimento ($P = 0,25 \text{ bar}$, $V_f = 30\%$, $40\% \text{ CaCO}_3$).

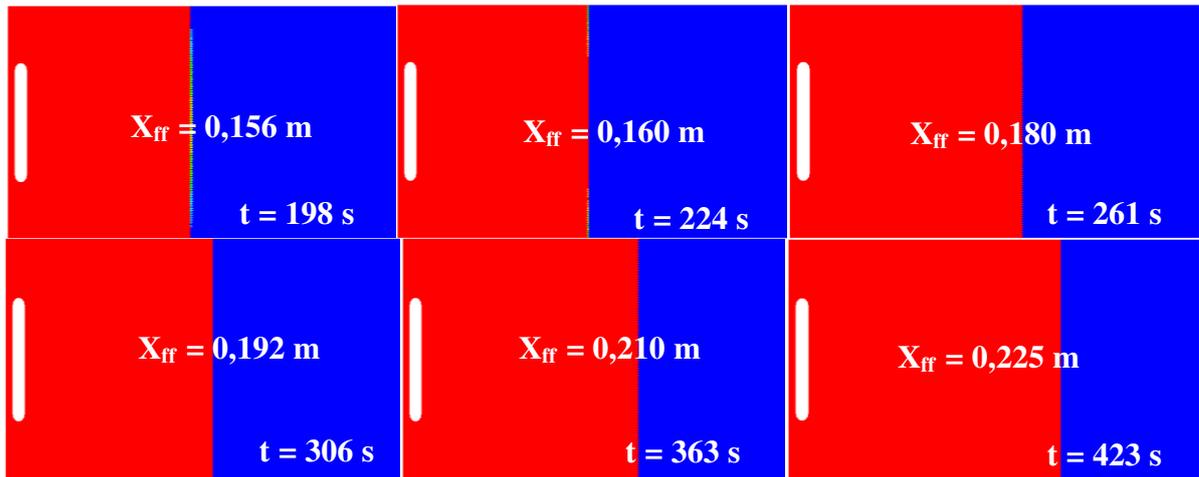


Figura 5.70 - Perfil de infiltração de resina para reforço de fibra de vidro em diferentes tempos de preenchimento ($P = 0,50 \text{ bar}$, $V_f = 30\%$, $0\% \text{ CaCO}_3$).

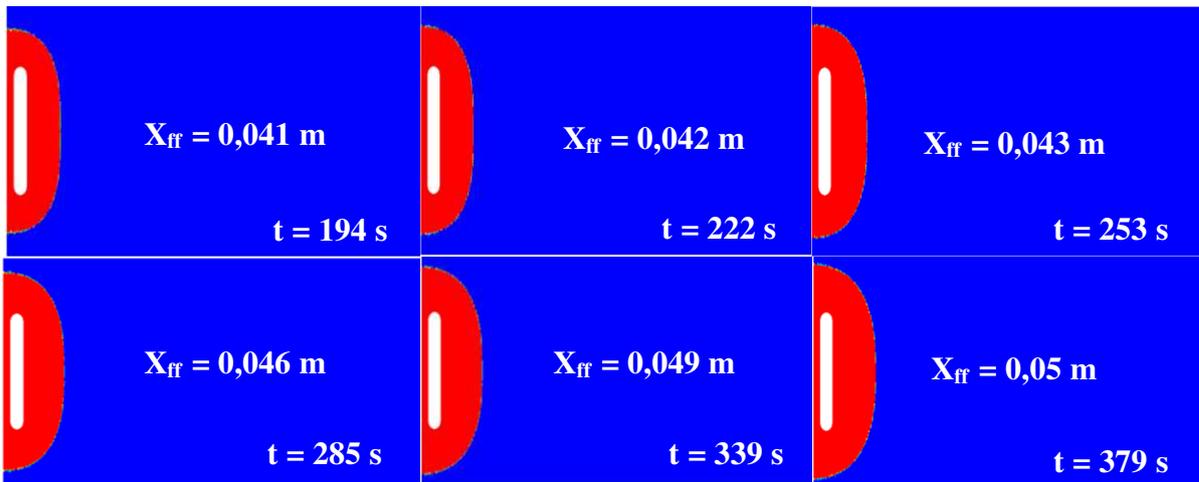


Figura 5.71 - Perfil de infiltração de resina para reforço de fibra de vidro em diferentes tempos de preenchimento ($P = 0,50 \text{ bar}$, $V_f = 30\%$, $40\% \text{ CaCO}_3$).

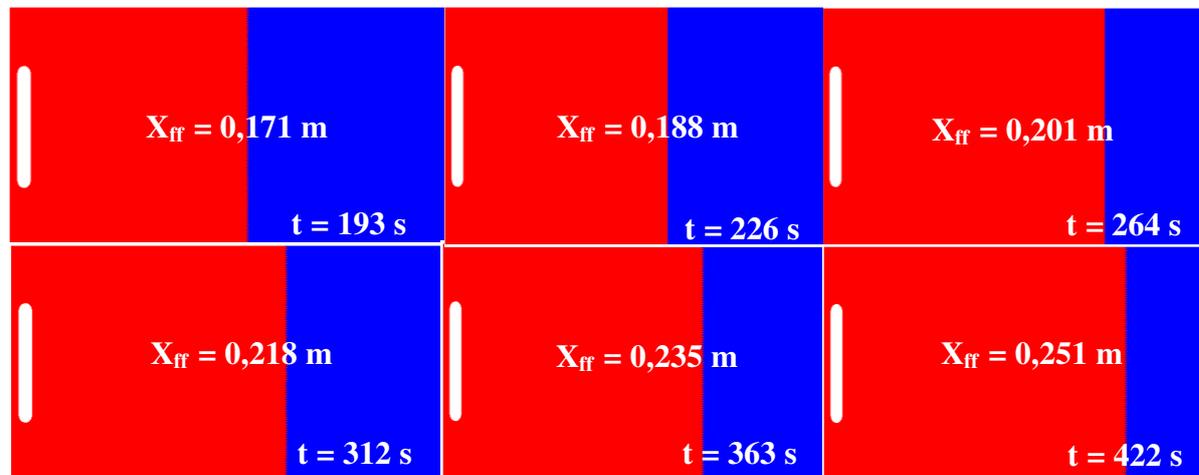


Figura 5.72 - Perfil de infiltração de resina para reforço de fibra de vidro em diferentes tempos de preenchimento ($P = 0,75 \text{ bar}$, $V_f = 30\%$, $0\% \text{ CaCO}_3$).

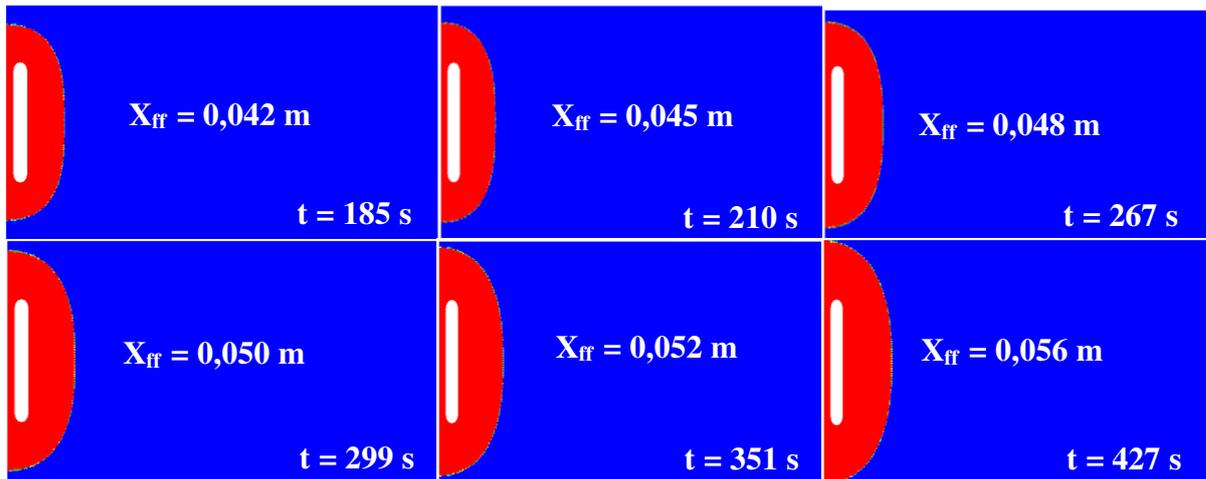


Figura 5.73 - Perfil de infiltração de resina para reforço de fibra de vidro em diferentes tempos de preenchimento ($P = 0,75$ bar, $V_f = 30\%$, 40% CaCO_3).

As Figuras 5.73 a 5.78 mostram as posições da frente de fluxo experimentais e numéricas em função do tempo, para os casos da resina com 0 e 40% de CaCO_3 nas pressões de injeção de 0,25, 0,50 e 0,75 bar. Comparando-se os resultados numéricos e experimentais, verifica-se que ocorreu uma melhor concordância para pressão de 0,25 bar. A diferença deve-se provavelmente à característica 2D da montagem experimental em que a injeção é realizada através da parte inferior do molde, a condição de pressão prescrita especificada nas fronteiras do orifício de injeção e a presença do CaCO_3 na resina. Aparentemente, a presença do CaCO_3 proporciona uma posição do fluxo de resina não linear com a pressão de injeção. Vale salientar que as dimensões do molde são 0,32 x 0,15m.

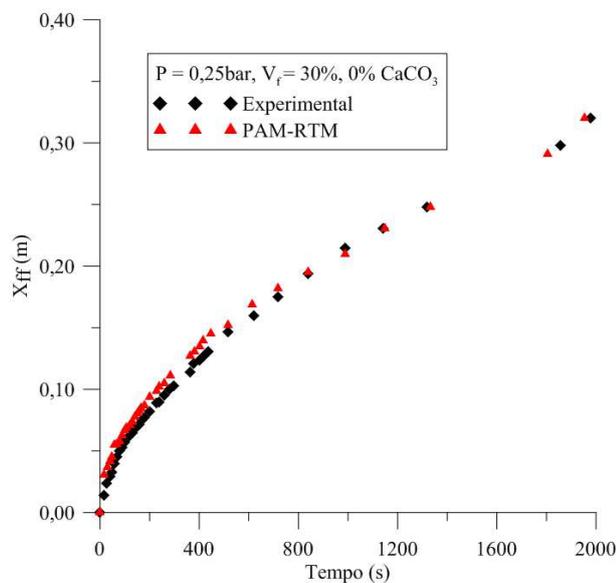


Figura 5.74 - Posição da resina no molde versus tempo de injeção ($P = 0,25$ bar, $V_f = 30\%$, 0% CaCO_3).

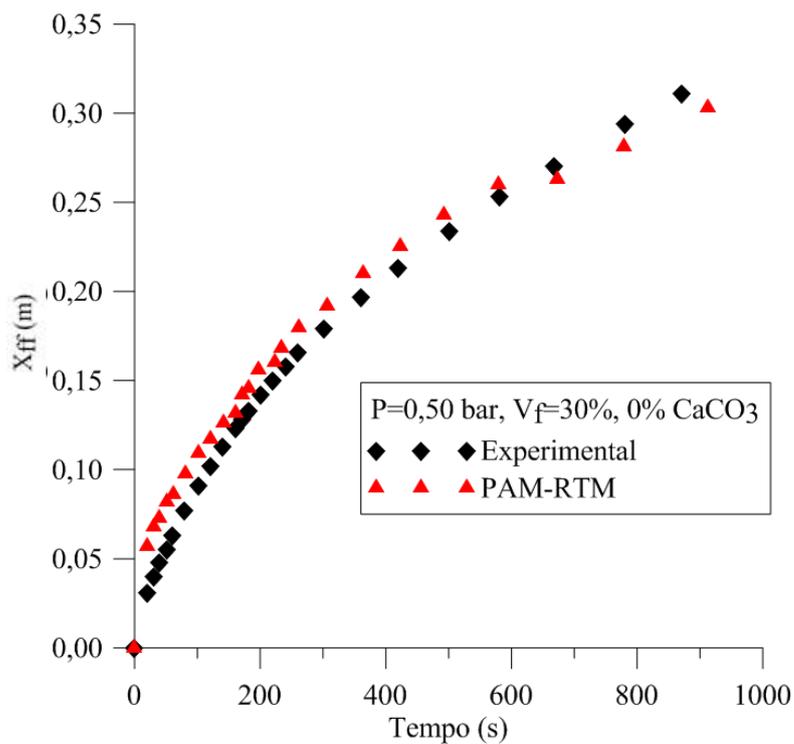


Figura 5.75 - Posição da resina no molde versus tempo de injeção ($P = 0,50 \text{ bar}, V_f = 30\%, 0\% \text{ CaCO}_3$).

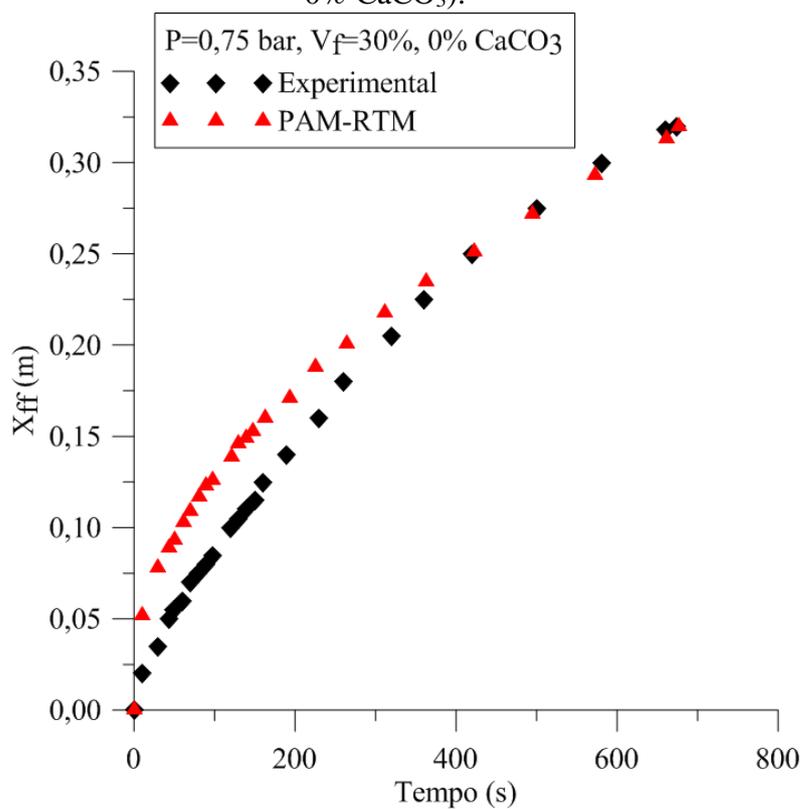


Figura 5.76 - Posição da resina no molde versus tempo de injeção ($P = 0,75 \text{ bar}, V_f = 30\%, 0\% \text{ CaCO}_3$).

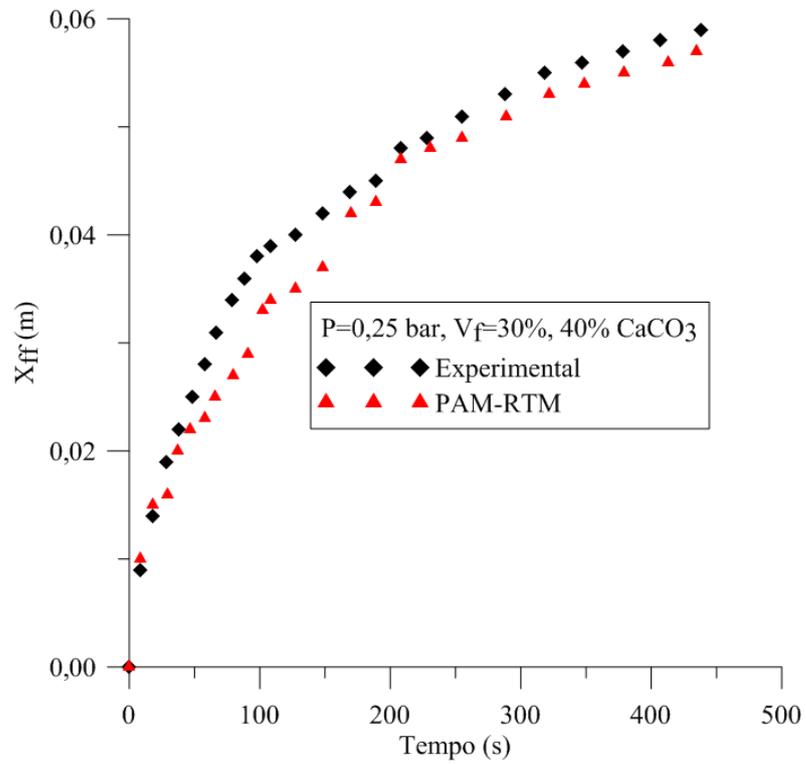


Figura 5.77 - Posição da resina no molde versus tempo de injeção (P = 0,25 bar, V_f = 30%, 40% CaCO₃).

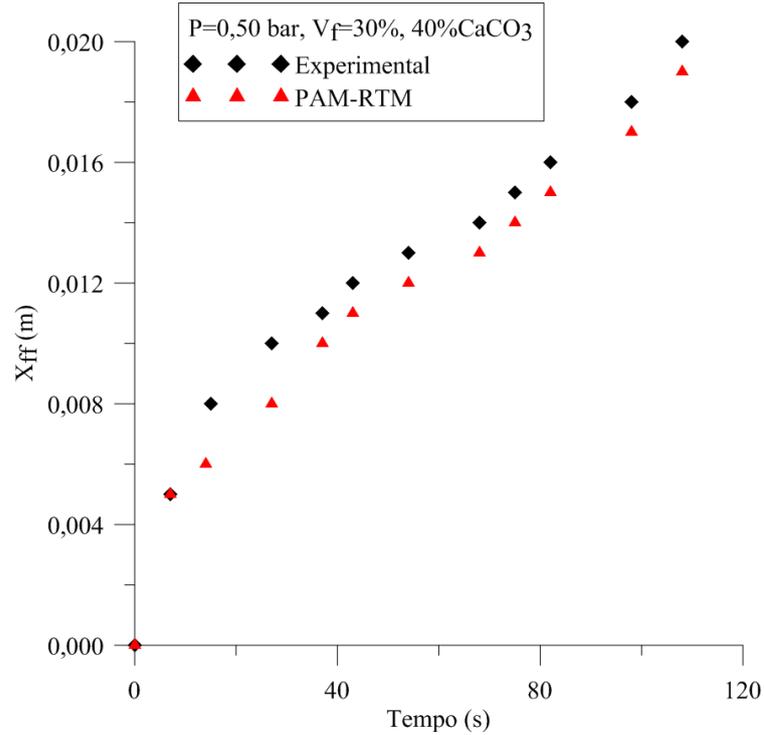


Figura 5.78 - Posição da resina no molde versus tempo de injeção (P = 0,50 bar, V_f = 30%, 40% CaCO₃).

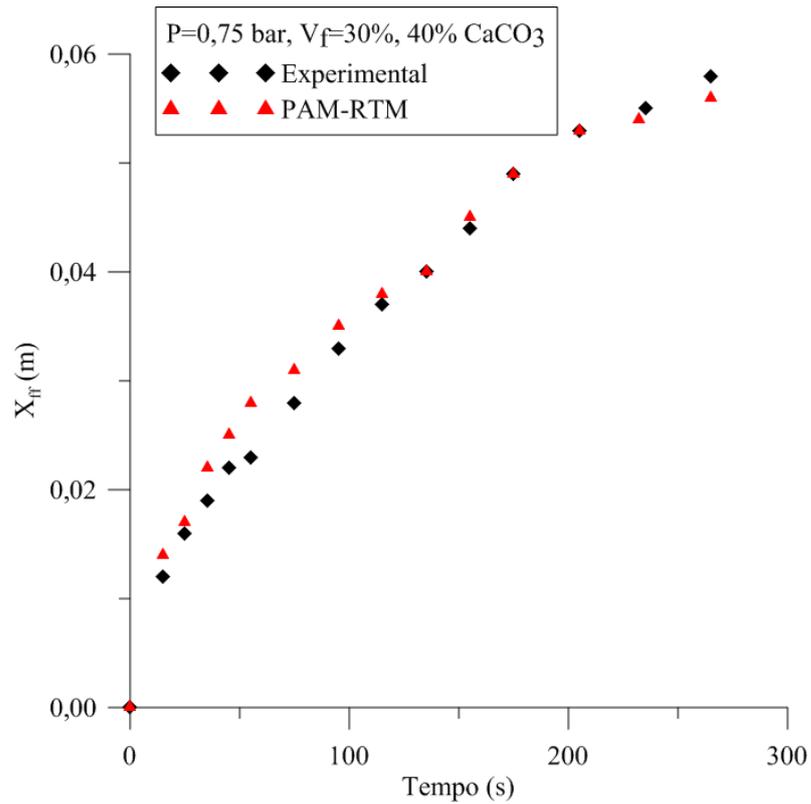


Figura 5.79 - Posição da resina no molde versus tempo de injeção ($P = 0,75$ bar, $V_f = 30\%$, 40% CaCO_3).

De forma geral, pode-se perceber que os resultados obtidos na solução numérica e experimentais, tiveram boa concordância, o que pode ser confirmado na Figura 5.79, onde consta uma comparação da posição da frente de fluxo da resina com 40% CaCO_3 em dois tempos de processo.

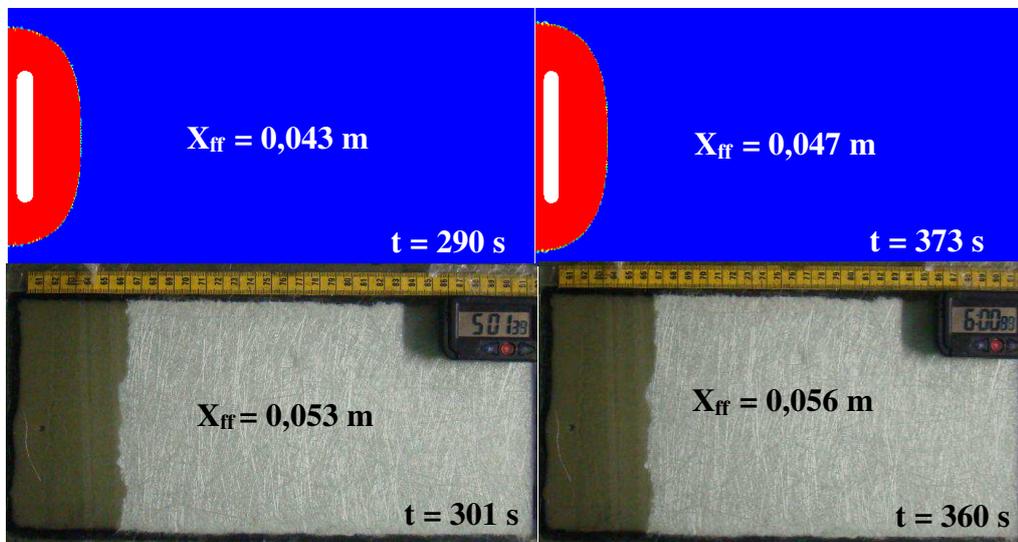


Figura 5.80 - Comparação da posição da frente de fluxo em dois tempos do processo ($P = 0,25$ bar, $V_f = 30\%$, 40% CaCO_3), (a) e (b) PAM-RTM e (c) e (d) Experimental.

As Figuras 5.80 a 5.82 representa o comportamento da pressão no interior da pré-forma para diferentes tempos de preenchimento em todos os casos estudados (0, 10, 20, 30 e 40% CaCO_3), com seus respectivos tempos. Percebe-se que, a pressão de injeção obtida pela solução numérica PAM-RTM, se aproxima dos resultados experimentais obtidos para ambos os casos.

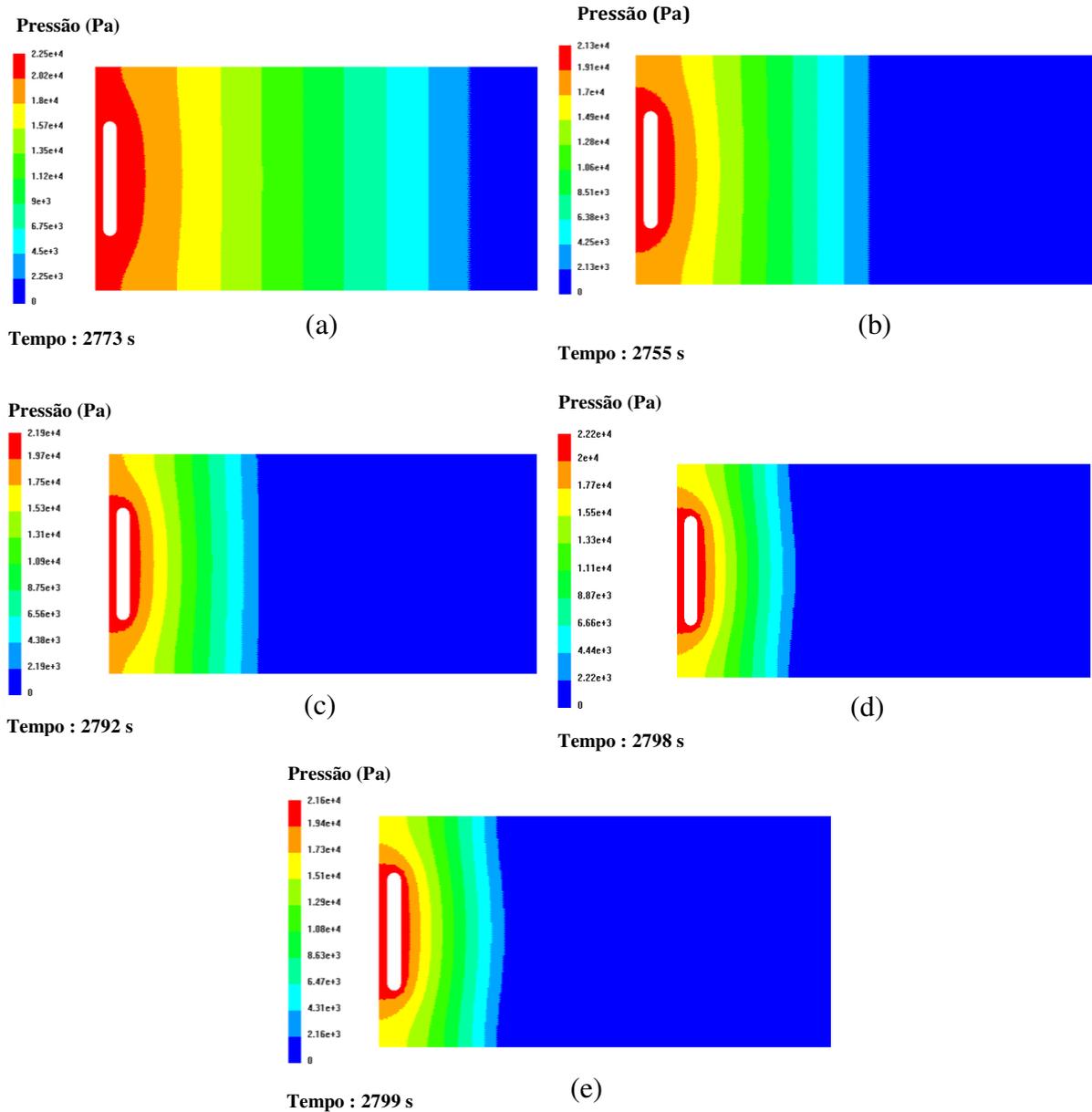


Figura 5.81 - Pressão de injeção obtida através do software PAM-RTM: $P = 0,25$ bar, $V_f = 30\%$, (a) 0 % CaCO_3 ; (b) 10 % CaCO_3 ; (c) 20 % CaCO_3 ; (d) 30 % CaCO_3 ; (e) 40 % CaCO_3 .

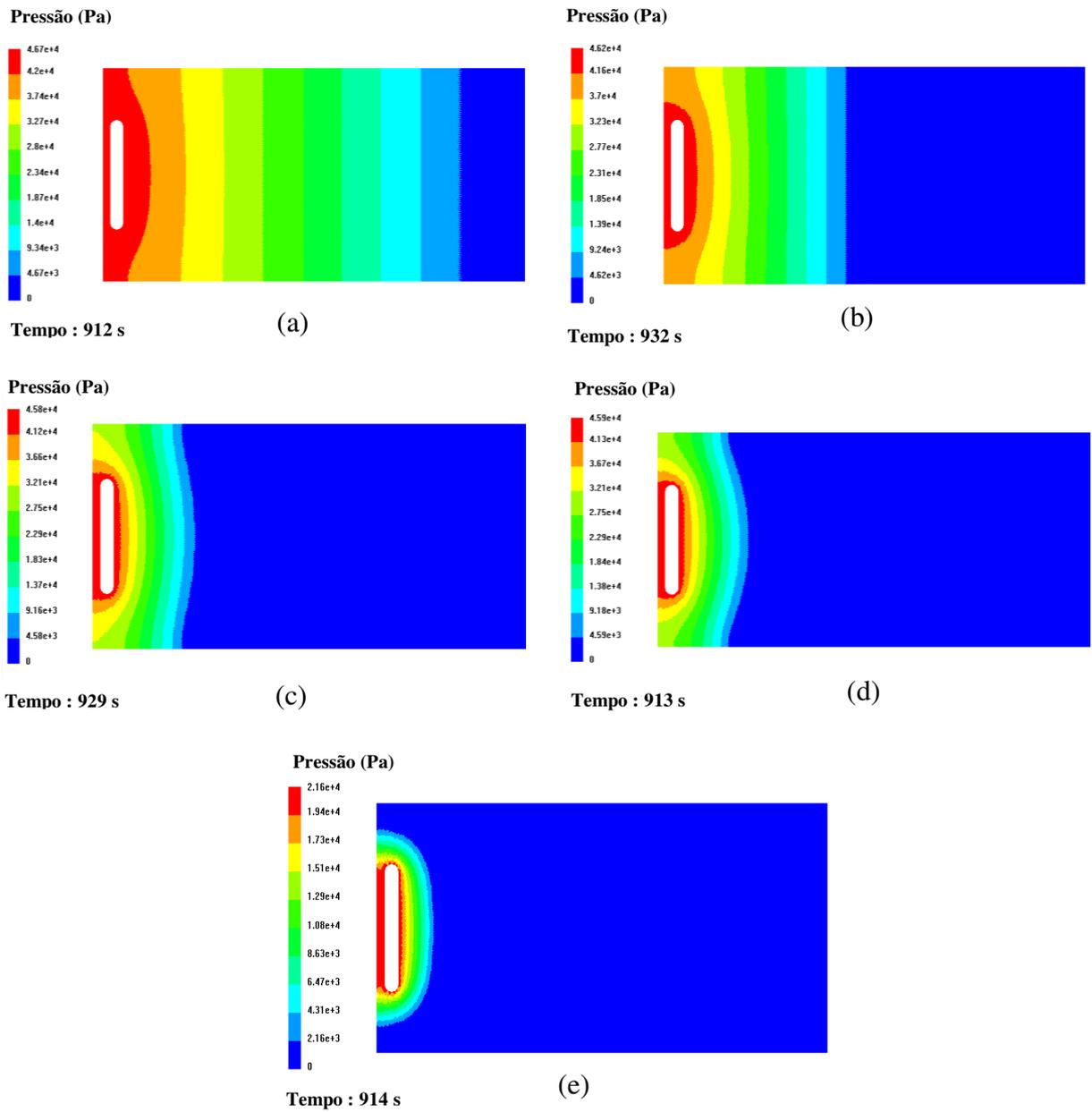


Figura 5.82 - Pressão de injeção obtida através do software PAM-RTM: $P = 0,50$ bar, $V_f = 30\%$, (a) 0 % CaCO_3 ; (b) 10 % CaCO_3 ; (c) 20 % CaCO_3 ; (d) 30 % CaCO_3 ; (e) 40 % CaCO_3 .

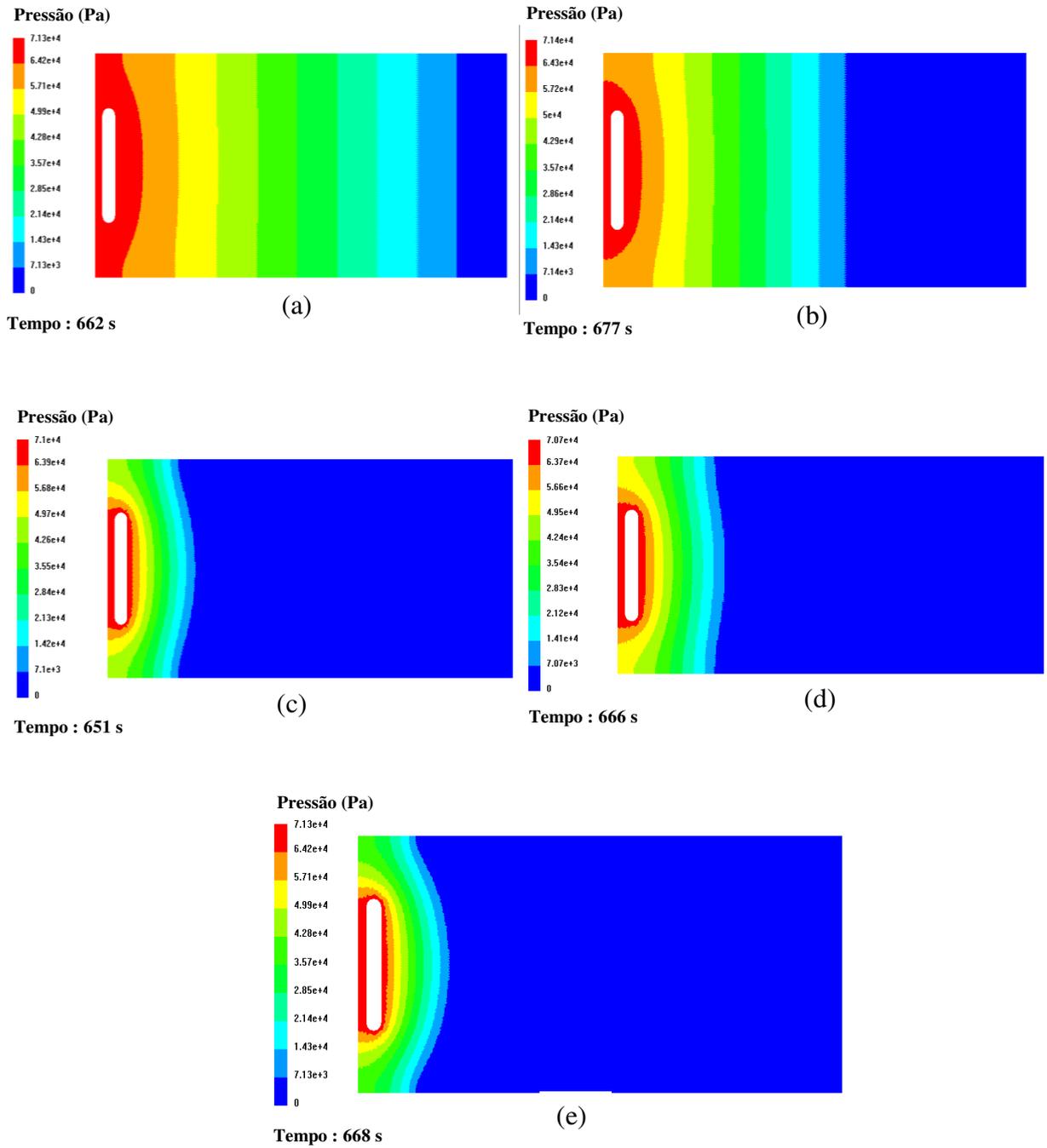


Figura 5.83 - Pressão de injeção obtida através do software PAM-RTM: $P = 0,75$ bar, $V_f = 30\%$, (a) 0 % CaCO₃; (b) 10 % CaCO₃; (c) 20 % CaCO₃; (d) 30 % CaCO₃; (e) 40 % CaCO₃.

5.3.6 Pré-forma com 6 camadas de manta de fibra de vidro (A23 – A26: $V_f=30\%$, $P = 0,25$ bar, $38 \mu\text{m}$ e $75 \mu\text{m}$)

Na Tabela 5.12 são apresentados os tempos de preenchimentos e a posição da frente de fluxo para os casos com resina contendo CaCO_3 que possam por peneiramento em malha de $38 \mu\text{m}$ e $75 \mu\text{m}$. Ao se comparar os tempos experimentais com os numéricos, observa-se que não ocorreram erros superiores a 10%, indicando uma forte relação entre a análise numérica das equações do meio poroso e o procedimento experimental.

Tabela 5.12 - Resultados experimental e numérico do tempo de preenchimento e posição da frente de fluxo.

Teor CaCO_3 (%)		Tempo de preenchimento (s)			Posição da frente de fluxo (m)		
		Experimental	Numérico	Erro	Experimental	Numérico	Erro
$38 \mu\text{m}$	40	9002	9206	2,2%	0,22	0,21	4,5%
	10	8400	8020	4,5%	0,31	0,31	0,0%
$75 \mu\text{m}$	40	7200	7506	4,0%	0,22	0,22	0,0%
	10	7260	7280	0,2%	0,27	0,25	7,4%

A posição da frente de fluxo em diferentes tempos de processamento para cada caso simulado no PAM-RTM (granulometria de 38 e $75 \mu\text{m}$) estão apresentados nas Figuras 5.83 a 5.86. O tempo médio de processamento do PAM-RTM foi de 8701s (aproximadamente 2,5 h), já no experimental o tempo médio foi de 2,4 h. Sabe-se que quanto maior o teor de carbonato de cálcio na resina tem-se um maior tempo de preenchimento do molde. Garay et al. (2011) utilizou manta de fibra de vidro-E para investigar a frente de fluxo para um mesmo tempo (300s). Observou-se que a frente de fluxo nas primeiras fotos é mais rápida que nas últimas, quando a resina possui um maior teor de CaCO_3 . Percebe-se que, para a granulometria de $75 \mu\text{m}$ a frente de fluxo é mais rápida em relação a $38 \mu\text{m}$, com isso, existe uma maior facilidade de escoamento do fluido no meio poroso.

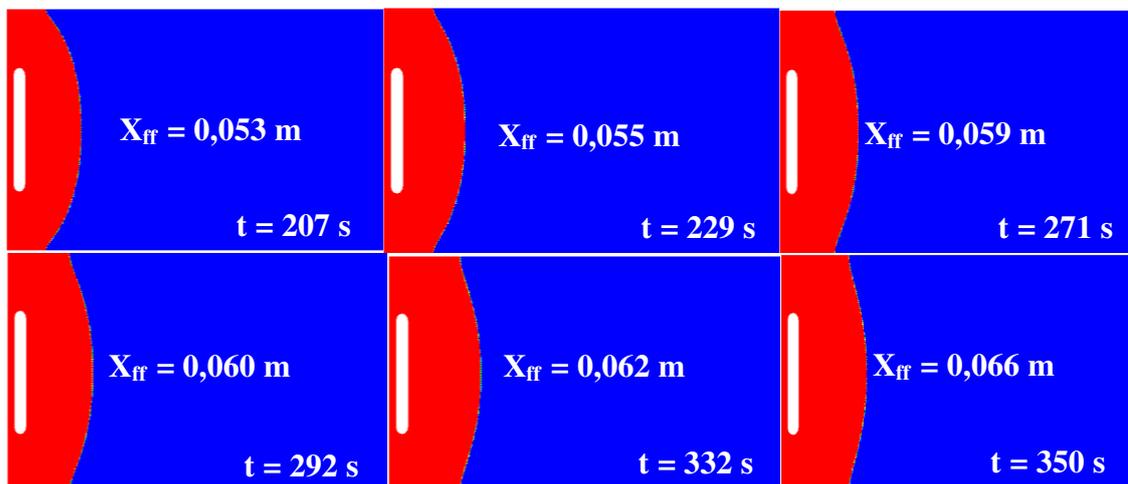


Figura 5.84 - Perfil de infiltração de resina em diferentes tempos de preenchimento ($P = 0,25$ bar, $V_f = 30\%$, $10\% \text{ CaCO}_3$, $38 \mu\text{m}$).

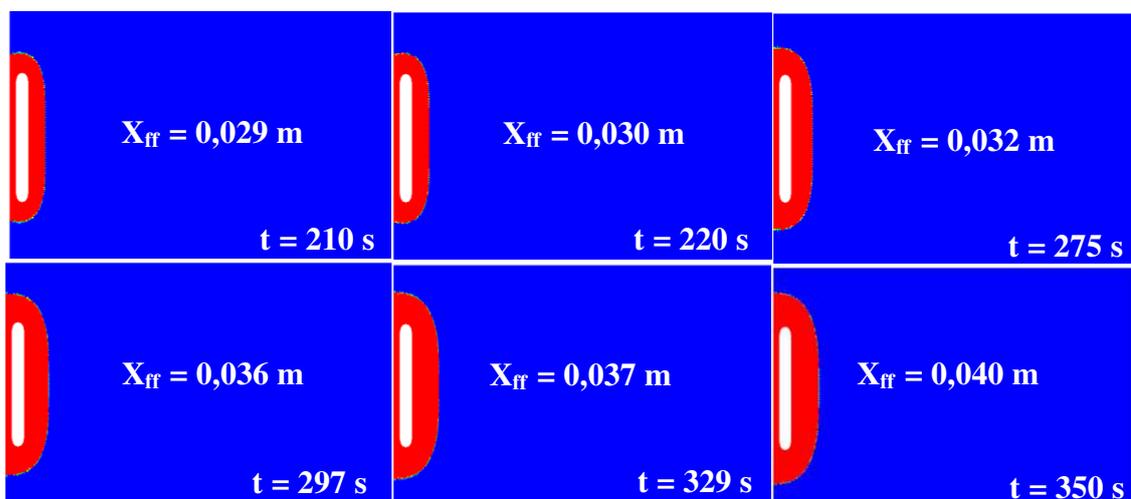


Figura 5.85 - Perfil de infiltração de resina em diferentes tempos de preenchimento ($P = 0,25$ bar, $V_f = 30\%$, $40\% \text{ CaCO}_3$, $38 \mu\text{m}$).

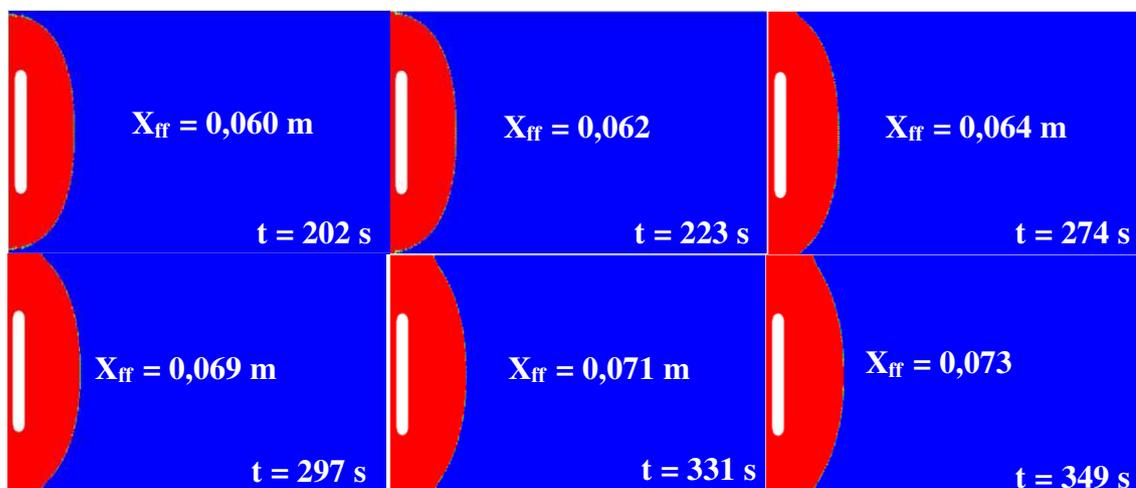


Figura 5.86 - Perfil de infiltração de resina em diferentes tempos de preenchimento ($P = 0,25$ bar, $V_f = 30\%$, $10\% \text{ CaCO}_3$, $75 \mu\text{m}$).

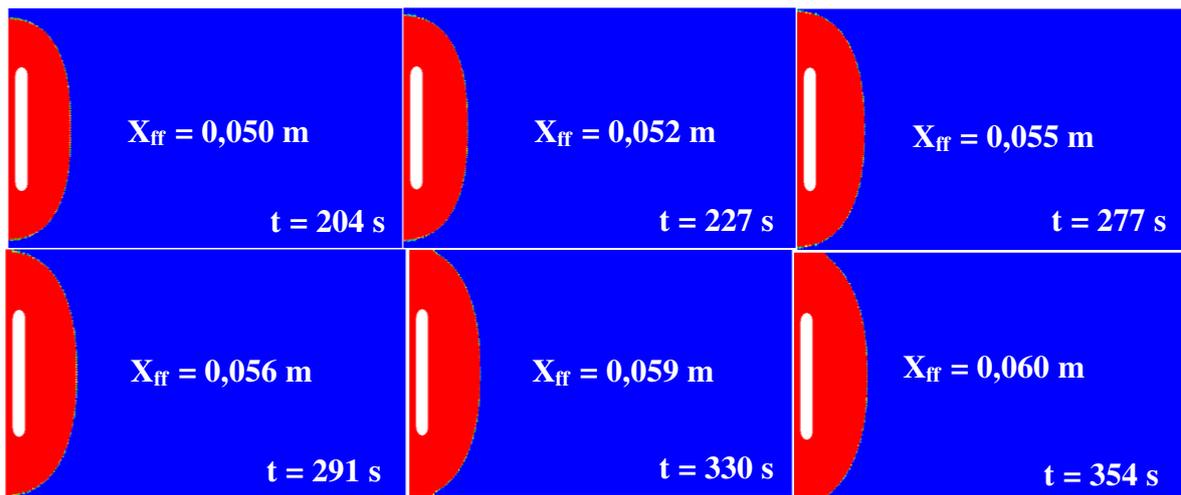


Figura 5.87 - Perfil de infiltração de resina em diferentes tempos de preenchimento ($P = 0,25$ bar, $V_f = 30\%$, 40% CaCO_3 , $75 \mu\text{m}$).

As Figuras 5.87 a 5.90 mostram a posição da frente de fluxo experimental e numérico em função do tempo para o caso de resina com 40% CaCO_3 com diferentes granulometria (38 e $75 \mu\text{m}$). Os resultados mostram que a solução numérica (PAM-RTM) está em boa concordância com os resultados experimentais.

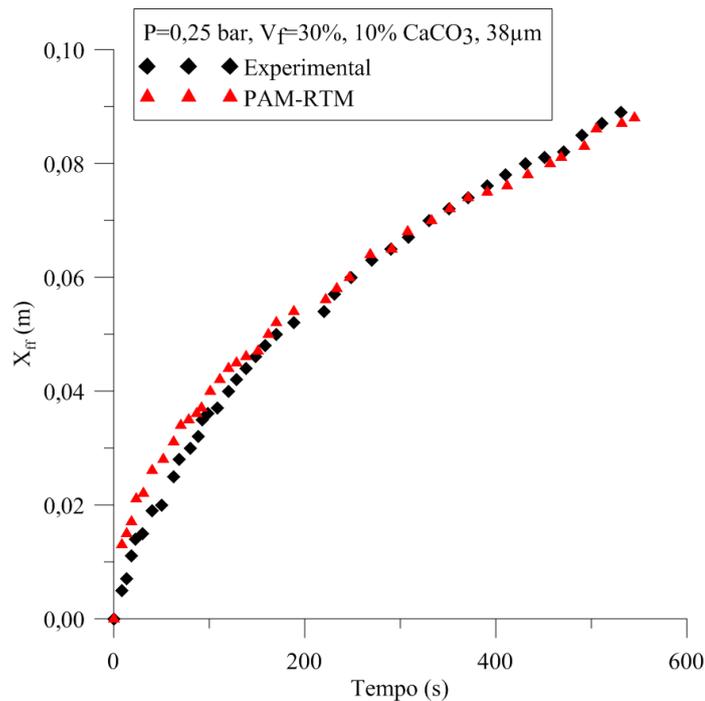


Figura 5.88 - Posição da resina versus tempo de injeção ($P = 0,25$ bar, $V_f = 30\%$, 10% CaCO_3 , $38 \mu\text{m}$).

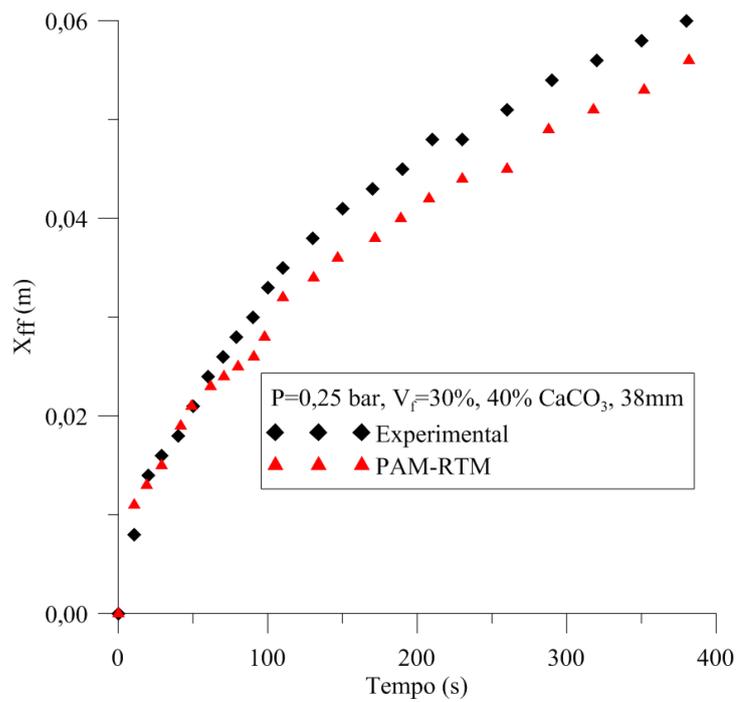


Figura 5.89 - Posição da resina versus tempo de injeção ($P = 0,25$ bar, $V_f = 30\%$, 40% CaCO_3 , 38 μm).

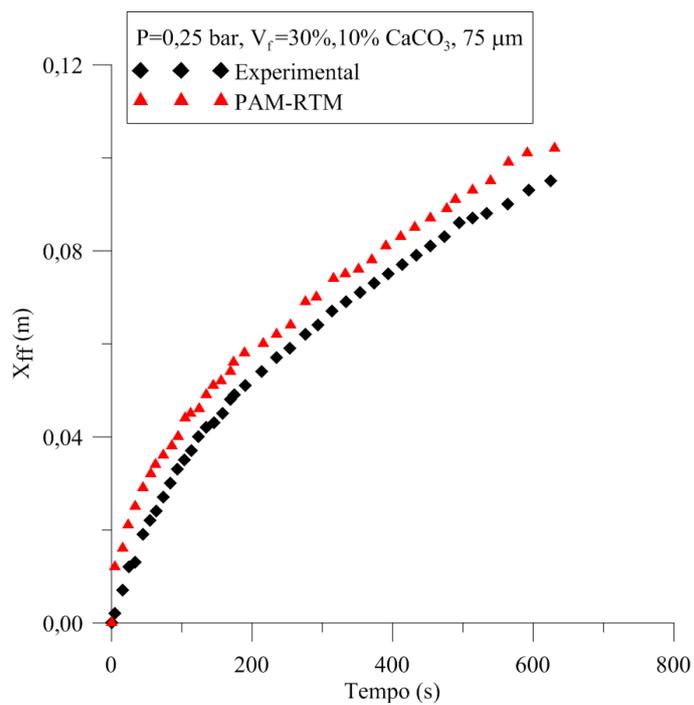


Figura 5.90 - Posição da resina versus tempo de injeção ($P = 0,25$ bar, $V_f = 30\%$, 10% CaCO_3 , 75 μm).

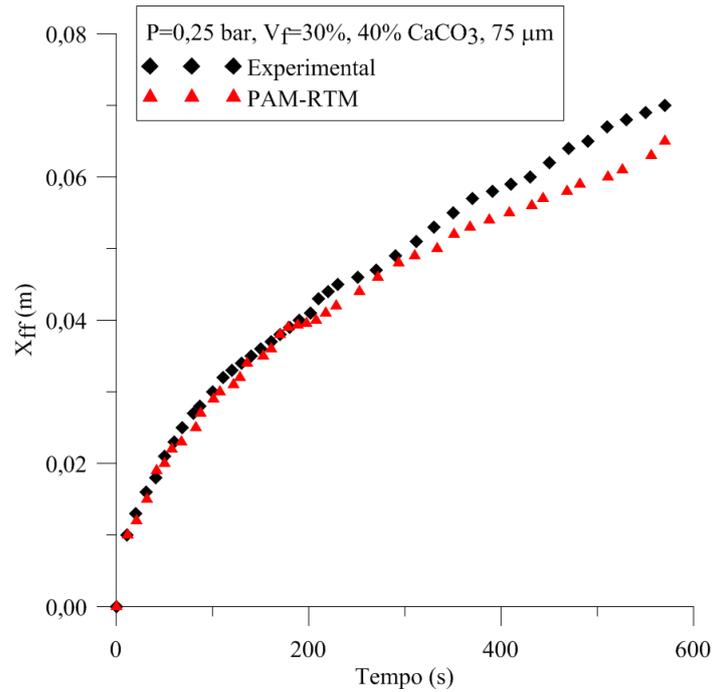


Figura 5.91 - Posição da resina versus tempo de injeção ($P = 0,25$ bar, $V_f = 30\%$, 40% CaCO_3 , $75 \mu\text{m}$).

Comparando os resultados numéricos (PAM-RTM) com os dados experimentais para os respectivos tempos de preenchimentos para resina com carga (40% CaCO_3 com granulometria $38\mu\text{m}$ e $75\mu\text{m}$) (Figuras. 5.91 e 5.92), pode-se observar o efeito da adição de carbonato de cálcio no tempo de enchimento, quanto maior a concentração de CaCO_3 na resina, maior é o tempo de enchimento. Isto é devido à presença de partículas de carbonato de cálcio entre as fibras, o que dificulta o fluxo da resina através do meio fibroso.

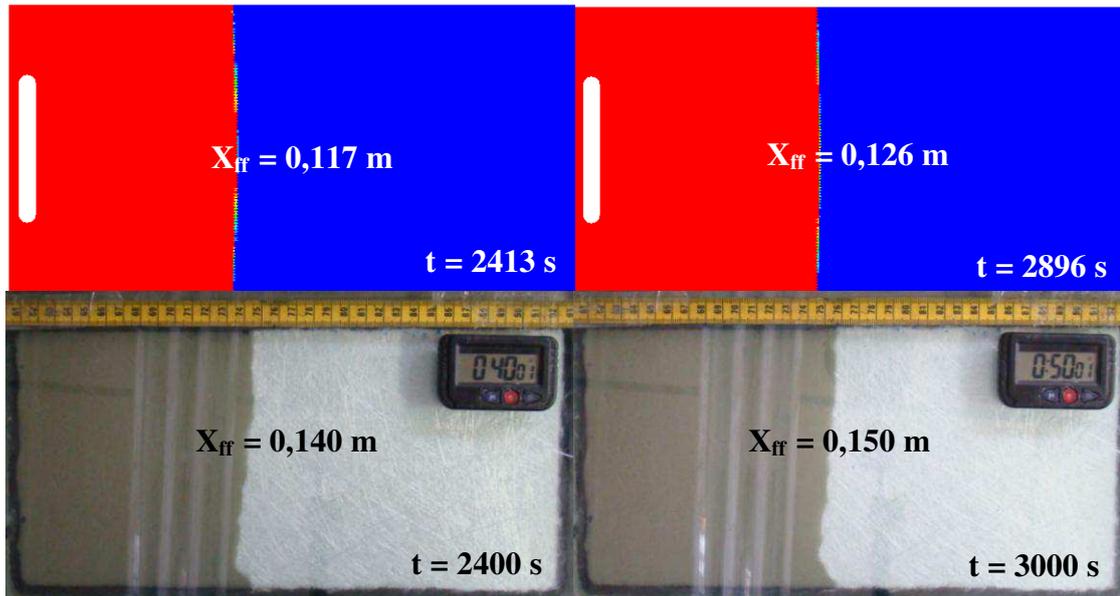


Figura 5.92 - Comparação da posição da frente de fluxo em dois tempos de processo ($P = 0,25$ bar, $V_f = 30\%$, 40% CaCO_3 , $38 \mu\text{m}$), (a) e (b) PAM-RTM e (c) e (d) Experimental.

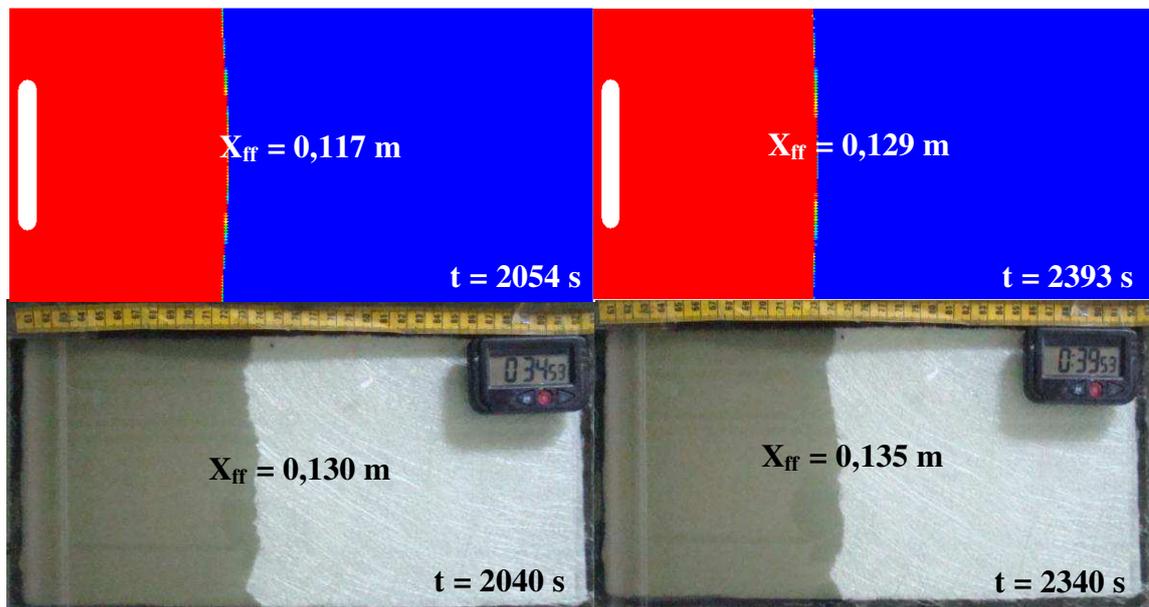


Figura 5.93 - Comparação da posição da frente de fluxo em dois tempos de processo ($P = 0,25$ bar, $V_f = 30\%$, 40% CaCO_3 , $75 \mu\text{m}$), (a) e (b) PAM-RTM e (c) e (d) Experimental.

Os resultados da distribuição de pressão obtidos pelo PAM-RTM em diferentes tempos de preenchimento $t = 8020\text{s}$ (10% CaCO_3 , $38 \mu\text{m}$), são apresentados nas Figuras 5.93 e 5.94. $t = 7896\text{s}$ (40% CaCO_3 , $38 \mu\text{m}$), $t = 12222\text{s}$ (10% CaCO_3 , $75 \mu\text{m}$) e $t = 11899\text{s}$ (40% CaCO_3 , $75 \mu\text{m}$), respectivamente. Verifica-se que a pressão de injeção obtida pela solução

numérica PAM-RTM aproxima dos resultados experimentais obtidos para os diferentes tamanho de partículas.

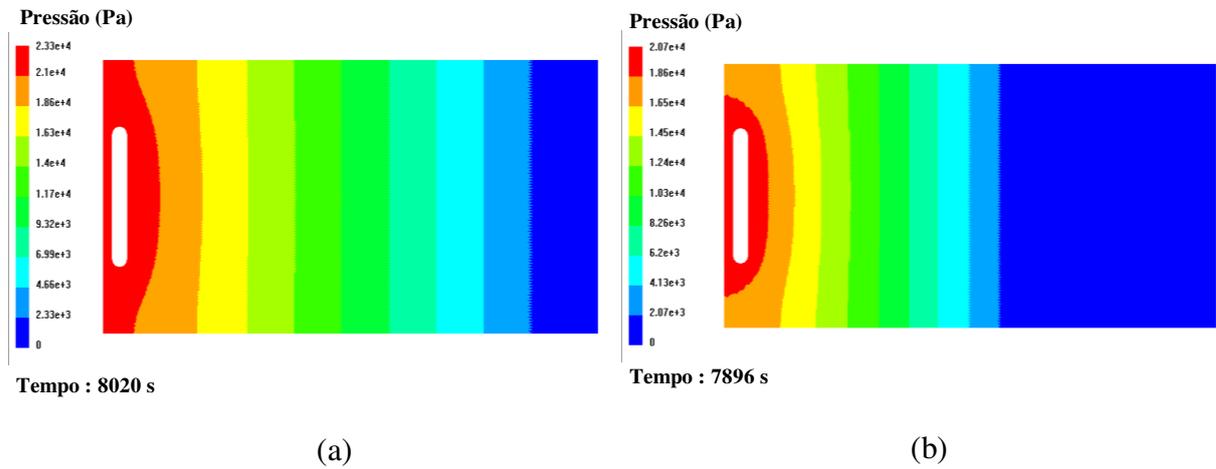


Figura 5.94 - Pressão de injeção obtida através do software PAM-RTM: $P = 0,25$ bar, $V_f = 30\%$, (a) 10% CaCO₃, (b) 40% CaCO₃, 38 μm .

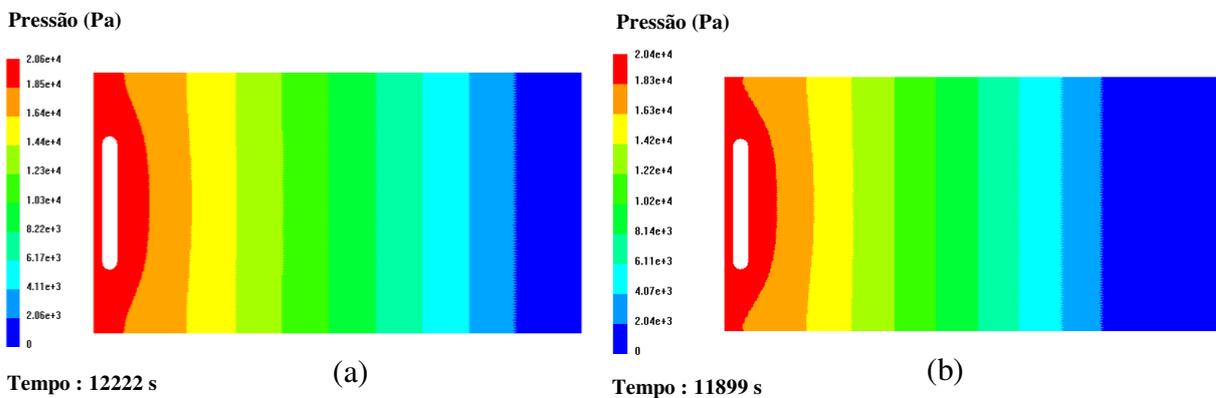


Figura 5.95 - Pressão de injeção obtida através do software PAM-RTM: $P = 0,25$ bar, $V_f = 30\%$, (a) 10% CaCO₃, (b) 40% CaCO₃, 75 μm .

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

6.1 Conclusões

Neste estudo, os resultados demonstram que o uso de CaCO_3 na resina poliéster torna mais difícil o preenchimento do meio fibroso numa moldagem RTM, uma vez que altera a viscosidade do fluido e a massa específica, modificando a permeabilidade da meio fibroso. O aumento da massa específica da mistura tem como consequência o aumento de peso do mesmo, sendo uma característica pouco desejada no material.

Nas análises granulométricas de 38 e $75\mu\text{m}$, os maiores diâmetros de partículas ficaram em torno dos $10\text{-}80\mu\text{m}$ com seus respectivos percentuais de 53,3 e 66. A amostra analisada apresenta um tamanho médio de $15,83\ \mu\text{m}$ e $21,78\ \mu\text{m}$, respectivamente. Verificou-se que, quanto maior as partículas, maior será a facilidade da infiltração da mistura do fluido (resina + CaCO_3) na formação do compósito, diminuindo o tempo de preenchimento do meio fibroso.

Com a análise por microscopia óptica (MO) foi possível comprovar a hipótese de formação de películas de poliéster sobre as fibras de vidro que impedem o molhamento dessas fibras pela resina, gerando regiões localizadas de vazios distribuídas por toda a área do compósito.

Pôde-se observar que, quanto maior a quantidade de carbonato de cálcio na resina, maior será a dificuldade do fluido desloca-se no meio fibroso.

Verificou-se que, com adição de carbonato de cálcio na resina poliéster, constatou-se um comportamento oscilante nas permeabilidades experimental e ajustada, e também na mobilidade. Observou-se ainda, que quanto menor for V_f , maior é a permeabilidade do meio.

A pressão de injeção tem também o seu efeito sobre o tempo de preenchimento. Quanto maior for a pressão de injeção, e menor teor do CaCO_3 , menor o tempo para completar o processo de preenchimento do molde.

E para a análise numérica com o modelo 2D, as equações utilizadas mostraram-se empregáveis no estudo do comportamento do fluxo do fluido em um processo de moldagem por RTM. Quanto maior for o V_f , menor será a permeabilidade, e a variação do teor de carbonato de cálcio na resina provocou alterações na permeabilidade. O tempo de preenchimento do molde é diretamente afetado pela pressão de injeção e pela adição de carbonato de cálcio. Com os experimentos realizados foi possível caracterizar o comportamento do fluido no meio fibroso proposto e assim ter dados suficientes para uma futura aplicação em uma análise numérica.

A análise numérica via PAM-RTM provou ser muito confiável, apresentando erros inferiores a 10% nas medidas dos valores do tempo de preenchimento e posição da frente de fluxo para os diversos casos em estudo.

Com a simulação numérica, foi possível ter um maior entendimento do comportamento do fluxo do fluido durante o processo RTM e observar os comportamentos que não seriam possíveis de serem observados apenas realizando os experimentos laboratoriais.

O PAM-RTM é ideal para um estudo focado apenas em processamento de materiais compósitos, apresentando uma interface objetiva, com um modelo dedicado, rápido processamento e erros relativamente pequenos em relação às determinações experimentais.

6.2 Etapa futuras

Como sugestão para futuros trabalhos propõe-se:

- ✓ Realizar experimento e simulações computacionais de RTM utilizando-se fibras naturais como reforço fibroso.

- ✓ Analisar computacionalmente o comportamento da frente de fluxo no processo RTM com resinas carregadas com diferentes teores e granulometria de CaCO_3 .

- ✓ Aplicar o modelo numérico do ANSYS CFX no processo RTM e comparar com os resultados obtidos via PAM-RTM.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABMACO, Site Associação Brasileira de Materiais Compósitos. Disponível em :<https://blogdoplastico.wordpress.com/tag/abmaco/>, 23/10/2013.

ABMACO, Site Associação Brasileira de Materiais Compósitos. Disponível em: <http://www.abmaco.org.br/>, 2009.

ABMACO, Site Associação Brasileira de Materiais Compósitos. Disponível em: <http://www.abmaco.org.br/>, 15/04/2007.

ALVES, A.L.S. **Processamento de Placas Compósitas pela Técnica de Moldagem por Infusão de Resina de Seemann**. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, UFRJ, Rio de Janeiro, 2006.

AZIZ, S.H.; ANELL, M.P.; CLARKE, S.J.; PANTENY, S.R. Modified polyester resins for natural fiber composites. **Composites Science and Technology**. v. 65, n. 4, p. 525-535, 2005.

BARROS A. R. F. Compósitos híbridos: desenvolvimento de configuração e efeito de umificação. 18° CBECiMat - **Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, Porto de Galinhas - PE, 2008, Brasil.

CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. São Paulo: LTC, P.359, 2002.

CARDOSO, M. I. B. **Estudo da influência do CaCO₃ nas propriedades do pelmd rotomoldado**. Dissertação (Mestrado). Instituto Superior Tupy, Sociedade Educacional de Santa Catarina- Joinville, 2011.

CARVALHO, L.H.; CAVALCANTI, W. Propriedades mecânicas de tração de compósitos poliéster/tecidos híbridos sisal/vidro. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**. v.16, n.1, p.7-33, 2006.

CHOHRA, M.; ADAVANI, S. G.; GOKCE, A.; YARLAGADDA, S. Modeling of filtration through multiple layers of dual scale fibrous porous media. **Polymer Composites**. v.27, n.5, p. 81-570, 2006.

COMAS-CARDONA, S.; BINETRUYA, P. G.; KRAWCZAKA, C. P. A generic mixed FE-SPH method to address hydro-mechanical coupling in liquid composite moulding processes. **Composites: Part A**, v.36, n.7, p.1004, 2005.

COUTINHO, B. G. **Modelagem Matemática em Coordenadas Generalizadas e Desenvolvimento de Simulador Computacional para Aplicação em Processos de Moldagem por Transferência de Resina**. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, UFCG, Campina Grande, 2013.

DANIEL, I.M; ISHAI, ORI. **Engineering Mechanics of Composite Materials**: Oxford University Press; 1994.

DESTEPHEN, J.A.; CHOI, K.J.; Modeling of filtration processes of fibrous filter media.

Science Technical. v.6, n.1, p.55-67, 1996.

ENDRUWEIT, A.; LONG, A.C. A model for the in-plane permeability of triaxially braided reinforcements. **Composites: Part A** v. 42, n.2, p.165, 2011.

ERDAL, M.; GUÇEN, S.; DANFORTH, S.C. Impregnation molding of particle-filled receramic polymers: process modeling. **Journal American Ceramics Society.** v.82, n.8 ,p.28-2017,1999.

Fiber Center, Disponível em: <http://www.fibercenter.com.br/produto/gel-coat/gel-coat-linha-gold>. Acesso, em 24/03/2014.

FILHO, O. T. S. **Dispersão térmica em meios porosos periódicos: um estudo numérico.** Tese de Doutorado em Modelagem Computacional, Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2004.

FONTOURA, C. M. **desenvolvimento de hélice de material compósito polimérico utilizando a moldagem por transferência de resina.** Dissertação (Mestrado). Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Matérias, Universidade Federal do Rio Grande do Sul-RS, 2009.

GARAY, A. C. **Efeito da adição de carbonato de cálcio em compósitos poliméricos moldados por RTM e RTM light.** Dissertação (Mestrado). Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Matérias, Universidade Federal do Rio Grande do Sul-RS, 2010.

GARAY, A. C.; HECK V.; ZATTERA, A. J.; SOUZA, J. A. E AMICO, S. C. Influência do carbonato de cálcio em processamento por RTM e RTM Light e propriedades de moldagem de compósitos. **Jornal de Plásticos Reforçados e Compósitos,** v.30, n. 14, p. 1213-1221, 2011.

GONÇALVES, N. D. F. **Método dos volumes finitos em malhas não estruturadas**. Dissertação (Mestrado). Engenharia de Matemática, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, 2007.

GREVE, L.; PICKETT, A.K. Delamination testing and modelling for composite crash simulation. **Composites Science and Technology**. v.66, n.6, p. 26-816, 2006.

GRUJICIC, M.; CHITTAJALLU, K. M.; WALSH, S. Optimization of the VARTM process for enhancement of the degree of devolatilization of polymerization by-products and solvents. **Journal of Materials Science**. n. 38, p. 1729-1739, 2003.

GILL, A.F.; ROBINSON, P.; PINHO, S. Effect of variation in fibre volume fraction on modes I and II delamination behaviour of 5HS woven composites manufactured by RTM. **Journal of Materials Science** v.38, . n.14,p.75-2368, 2009.

HAMESTER, M. R. R. **Caracterização do carbonato de cálcio obtido de cascas de mariscos e incorporação em polipropileno**. Dissertação (Mestrado). Instituto Superior Tupy, Sociedade Educacional de Santa Catarina- Joinville, 2010.

HAMIDI, Y. K.; AKTAS, L.; ALTAN, M. C.; Three-dimensional features of void morphology in resin transfer molded composites, **Composites Science and Technology**. v.65, n. 7-8, p.1306-1320, 2005.

HILLER, G. R.; FILLA JUNIOR, J. L.; SCHMIDT, T. M. E AMICO, S. C. Influência das condições de moldagem por transferência de resina (RTM) no comportamento mecânico de compósitos poliméricos. Foz do Iguaçu/PR. **17º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais (CBECiMat)**, p. 1-8, 2006.

HSIÃO, K. T.; LITTLE, R.; RESTREPO, O.; MINAIE, B. A study of direct cure kinetics characterization during liquid composite molding. **Composite Part A: Applied Science Manufacture**, v.37, n.6, p. 33-925, 2006.

HURTADO, F. S. V. **Uma formulação de volumes finitos baseada em elementos para simulação de deslocamento bifásico imiscível em meios porosos.** Dissertação (Mestrado). Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

JAGANATHANA, S.; VAHEDI, H. T.; POURDEYHIMI, B. A realistic approach for modeling permeability of fibrous media: 3-D imaging coupled with CFD simulation. **Chemical Engineering Science**, v.63, n.1, p.244, 2007.

JEC Composites, Disponível em: <http://www.jeccomposites.com/events/jec-europe-2012>
Acesso, em 15/11/2013.

JUNIOR, W. F. A. **Processamento de placa espessa de compósito através de moldagem por transferência de resina.** Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.

LAFONTAINE, P. HL-PaGR. **Material Characterization for the Modelling of Resing Transfer Molding.** 39th Annual Conference, Reinforced Plastics/Composites Institute, the Society of the Plastics Industry, 1984.

LEFEVRE, D.; COMAS-CARDONA, S.; BINÉTRUY, C.; KRAWCZAK, P. Modelling the flow of particle-filled resin through a fibrous preform in liquid composite molding technologies. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**. v.38, n.10, p. 63-2154, 2007.

LEFEVRE, D.; COMAS-CARDONA, S.; BINÉTRUY, C.; KRAWCZAK, P. Coupling filtration and flow during liquid composite molding: experimental investigation and simulation. **Composites Ciência e Tecnologia**. v.38, n.10, p. 63-2154, 2009.

LEWIN, M.M-M, A.; FRANK, R. Surface free energies of polymeric materials, additives and minerals. **Polymers for Advanced Technologies**. v.16, n.6, p. 412-429, 2005.

LIU, M. Y.; KANG, M. K.; THOMAS H. H.; A finite element analysis FF convection problems in RTM using internal nodes. **Composites: Part A**. v.31, p.373, 2000.

LIN, L.; DROCHON, B.; LI, L. e ALI, S. A.; Calcium carbonate to increase viscosity of polyacrylamide de fluids. **Unites States**. v.12, p.1-7, 2010.

LUZ, F. F. **Análise comparativa do escoamento de fluido em experimentos RTM utilizando Aplicativos comerciais**. Dissertação (Mestrado). Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Matérias, Universidade Federal do Rio Grande do Sul-RS, 2011.

LUZ, F. F.; AMICO, S. C.; SOUZA, J. A.; BARBOSA, E. S. E LIMA, A. G. B. Resin Transfer Molding Process: Fundamentals, Numerical Computation and Experiments in: Numerical Analysis of Heat and Mass Transfer in Porous Media, edited by J. M. P. Q. Delgado, Antonio Gilson Barbosa de Lima and Marta Vázquez da Silva, Springer, Heidelberg, p. 1-40, 2012.

MACHADO, G. P.; ROESE, P. B.; SCHMIDT, T. M.; SOUZA, J. A.; AMICO, S. C. **Simulação numérica da infiltração em processo de fabricação de compósitos por RTM**. 10º Congresso Brasileiro de Polímeros - CBPol, Foz do Iguaçu/PR. 10o Congresso Brasileiro de Polímeros - CBPol, p. 1-10, 2009.

MARDAL, K. A.; TAI, X. C; Winther, R. A robust finite element method for Darcy–stokes flow. **SIAM Journal of Numeric Analsys**. v.40, n. 5, p.1605, 2002.

MAZUMDAR, S. K. Composites manufacturing: materials, product and process engineering. p. 14 -16, 2002.

MORREN G.; BOSSUYT S.; SOL H. 2D permeability tensor identification of fibrous reinforcements for RTM using an inverse method. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**. v.39, n.9, p. 1530-1536, 2008.

MOREIRA, G. F. **Avaliação do efeito da adição de nano-partículas de carbonato de cálcio nas propriedades físico-mecânicas do polipropileno.** Dissertação (Mestrado). Ciência e Tecnologia de Matérias, Instituto Politécnico da Universidade Estadual do Rio de Janeiro-RJ, 2010.

NAGY, E. E. Enche de mármore branco: propriedades de sete cargas e dois resinas termofixas. **Journal of the American Institute for Conservation.** v.37, n.1, p.69-87, 1998.

NGO, N. D.; TAMMA, K. K. Complex three-dimensional microstructural permeability prediction of porous fibrous media with and without compaction. **Aerospace Sciences Meeting and Exhibit.** 2004.

NETO, F. L.; PARDINI, L. C. **Compósitos estruturais - ciência e tecnologia.** 1. ed. São Paulo 2006.

Nordlund M, Fernberg SP, Lundström TS. Particle deposition mechanisms during processing of advanced composite materials. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing.** v.38, n. 10, p. 2182-2193, 2007.

NUTTING, P. G. Physical analysis of oil sands. **American Association of Petroleum Geologists.** v.14, n.10, p.1337-1339, 1930.

OLIVEIRA, C. P. **Modelagem Numérica do Transporte de Resinas em Meio Poroso Aplicado ao Processo de RTM.** Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional) – Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, FURG, Rio Grande, 2010.

OLIVEIRA, I. R.; LIMA, A.G. B.; AMICO, S. C.; BEZERRA, V. M. F.; BARCELLA, R. Investigação da infiltração de reforços fibrosos com fluidos carregados em processo rtm. SAP – **Simpósio Argentino de Polímeros**, 15 a 18 de Novembro de 2011, Bahia Blanca, Argentina.

PHELAN JUNIOR, F. R. Simulation of the injection process in resin transfer molding. **Polymer Composites**. v.18, n.4, p.460, 1997.

POMEROY, R.; GROVE, S.; SUMMERSCALES, J.; WANG, Y.; HARPER, A. Measurement of permeability of continuous filament mat glass-fibre reinforcements by saturated radial airflow. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**. n.5, v.38, p.43-1439, 2007.

PORTO, J. S. **Modelagem Computacional do Processo de Moldagem por Transferência de Resina Aplicado à Engenharia Naval**. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional) – Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, FURG, Rio Grande, 2012.

PRADO, V. J. S. **Moldagem de compósitos pelo processo de infusão de resina: correlação de propriedades**. Dissertação (Mestrado). Engenharia Aeronáutica e Mecânica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica São José dos Campos-SP, 2009.

PSARRAS, G.C. Hopping conductivity in polymer matrix-metal particles composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**. n.10,v.37, p.532-1545, 2006.

REVISTA PLÁSTICO MODERNO, Disponível em: <http://www.plastico.com.br/plastico/>, 03/02/2014.

RESENDE, M. C. O Uso de Compósitos estruturais na indústria aeroespacial. **Polímeros**. v.10, n.2, p.1-6, 2000.

RUDD, C.D. LAC.; KENDALL K.N.; Mangin CGE. **Liquid Moulding Technologies**. SAE International. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 1997.

SCHMIDT, T.M., GOSS, T.M., AMICO, S.C. AND LEKAKOU, C., Permeability of Hybrid Reinforcements and Mechanical Properties of Their Composites Molded by Resin Transfer Molding, **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 28, n.23, p. 2839-2850, 2009.

SCHMACHTENBERG, E.; SCHULTE, Z. H. J.; Töpker J. Application of ultrasonics for the process control of Resin Transfer Moulding (RTM). **Polymer Testing**. v.24, n.3, p.8-330, 2005.

SGRICCIA, N.; HAWLEY. M.C.; MIRSA, M. Characterization of natural fiber surfaces and natural fiber composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**. v.39, n.10, p. 7-1632, 2008.

SHI, F; DONG, X. 3D Numerical simulation of filling and curing processes in non-isothermal RTM process cycle. **Finite Elements in Analysis and Design**. v.47, n.7, p.764, 2011.

SILVA, H. S. P. **Desenvolvimento de compósitos poliméricos com fibras curauá e híbridos com fibras de vidro**. Dissertação (Mestrado). Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Matérias, Universidade Federal do Rio Grande do Sul-RS, 2010.

STEENKAMER, D. A. **The influence of preform design and manufacturing issues on the processing and performance of resin transfer molded composites**. Ph D. Thesis, University of Delaware Center for Composite Materials, Delaware, Estados Unidos da América, 1994.

SOUZA, J. A.; ROCHA, L. A. O. ; AMICO, S. C.; VARGAS, J. V. C.; A numerical investigation of the resin flow front tracking applied to the rtm process. **Materials Research, received:** v.14, n.3, p. 1-18, 2011.

TAN, H.; ROY, T.; PILLAI, K.M. Variations in unsaturated flow with flow direction in resin transfer molding: An experimental investigation, **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v.38, n.8, p. 1872-1892, 2007.

TUNCOL, G.; DANISMAN, M. KAYANAR, A.; SOZER, E.M. Constraints on monitoring resin flow in the resin transfer molding (RTM) process by using thermocouple sensors. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**. v.38, n.5, p.86-1363, 2007.

VAFAI, K. **Handbook of Porous Media**, Second Edition. Taylor & Francis Group, LLC. Boca Raton, FL., 2005.

WAMBUA, P.; IVENS, J.; VERPOEST, I. Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics? **Composites Science and Technology**. v.63, n.9, p.642-1259, 2003.

WOODHEAD, L.H. **Handbook of polymer composites for engineers**. Cambridge: Publishing Limited; 1994.

WONG, C. C.; LONG, A. C.; SHERBURN, M.; ROBITAILLE, F.; HARRISON, P.; RUDD, C. D. Comparisons of novel and efficient approaches for permeability prediction based on the fabric architecture. **Composites Part A**, v.37, n.6, p.847, 2006.

WYCKOFF, R. D.; BOTSET, H. G. and MUSKAT, M. The mechanics of porous flow applied to water-flooding problems. **O Instituto Americano de Minas, Metalúrgica e Petroleum Engineers Inc. (AIME)**. v.103, n.1, p.219-249, 1933.

ZHU, J.; IMAM, A.; CRANE, R.; LOZANO, K.; KHABASESKU, V.N., BARRERA, E.V. Processing a glass fiber reinforced vinyl ester composite with nanotube enhancement of interlaminar shear strength. **Composites Science and Technology**. v.67, n.7, p.17-1509, 2007.

ZHU, Q. Y.; XIE, M. H.; YANG, J.; LI, Y. A fractal model for the coupled heat and mass transfer in porous fibrous media. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. v.54, n.7-8, p.1400-1409, 2001.

APÊNDICES

APÊNDICE A

Tabela A1: Dados experimentais para obtenção da densidade do compósito.

CaCO ₃ (%)	m_{CaCO_3}	ρ_{CaCO_3}	m_R	ρ_R	v_{CaCO_3}	v_R	V_{Total}	V_{CaCO_3}	V_R	ρ_c
p=0,25 bar; V _f =19%										
0	0	2,82	269,65	1,19	0,00	226,60	226,60	0,00	1,00	1,19
40	71,58	2,82	179	1,19	25,38	150,42	175,80	0,14	0,86	1,43
p=0,25 bar; V _f =24%										
0	0	2,82	269,72	1,19	0,00	226,66	226,66	0,00	1,00	1,19
10	24,2	2,82	245,5	1,19	8,58	206,30	214,88	0,04	0,96	1,26
20	46	2,82	221,3	1,19	16,31	185,97	202,28	0,08	0,92	1,32
30	58,52	2,82	192,02	1,19	20,75	161,36	182,11	0,11	0,89	1,38
40	71,72	2,82	178,61	1,19	25,43	150,09	175,53	0,14	0,86	1,43
p=0,25 bar; V _f =30%										
0	0	2,82	250,25	1,19	0,00	210,29	210,29	0,00	1,00	1,19
10	23	2,82	231,12	1,19	8,16	194,22	202,37	0,04	0,96	1,26
20	42,02	2,82	208,47	1,19	14,90	175,18	190,09	0,08	0,92	1,32
30	58,02	2,82	193,28	1,19	20,57	162,42	182,99	0,11	0,89	1,37
40	71,79	2,82	179,25	1,19	25,46	150,63	176,09	0,14	0,86	1,43
p=0,50 bar; V _f =30%										
0	0	2,82	250,45	1,19	0,00	210,46	210,46	0,00	1,00	1,19
10	25,25	2,82	225,45	1,19	8,95	189,45	198,41	0,05	0,95	1,26
20	40	2,82	200,02	1,19	14,18	168,08	182,27	0,08	0,92	1,32
30	45	2,82	150,41	1,19	15,96	126,39	142,35	0,11	0,89	1,37
40	100	2,82	150,32	1,19	35,46	126,32	161,78	0,22	0,78	1,55
p=0,75 bar; V _f =30%										
0	0	2,82	250,49	1,19	0,00	210,50	210,50	0,00	1,00	1,19
10	23,07	2,82	230,15	1,19	8,18	193,40	201,58	0,04	0,96	1,26
20	42,02	2,82	208,8	1,19	14,90	175,46	190,36	0,08	0,92	1,32
30	57,7	2,82	192,39	1,19	20,46	161,67	182,13	0,11	0,89	1,37
40	71,7	2,82	179,64	1,19	25,43	150,96	176,38	0,14	0,86	1,42

APÊNDICE B

Tabela B1- Dados de permeabilidade, viscosidade, densidade e mobilidade obtidas através dos experimentos.

CaCO ₃ (%)	Permeabilidade experimental (K, m ²)	Viscosidade (μ, cP)	Densidade (ρ, g/cm ³)	Mobilidade (Φ, m ² /cP)
p=0,25 bar; Vf=19%				
0	6,58 x 10 ⁻¹⁰	330	1,19	2,00E-13
40	12,00 x 10 ⁻¹⁰	2113	1,43	0,56E-13
p=0,25 bar; Vf=24%				
0	2,87 x 10 ⁻¹⁰	330	1,19	8,69E-13
10	7,73 x 10 ⁻¹⁰	962	1,26	8,03E-13
20	5,62 x 10 ⁻¹⁰	1414	1,32	3,97E-13
30	6,10 x 10 ⁻¹⁰	1713	1,38	3,48E-13
40	3,02 x 10 ⁻¹⁰	2113	1,43	1,42E-13
p=0,25 bar; Vf=30%				
0	2,610 x 10 ⁻¹⁰	330	1,19	7,900E-13
10	4,830 x 10 ⁻¹⁰	962	1,26	5,000E-13
20	4,540 x 10 ⁻¹⁰	1414	1,32	3,200E-13
30	2,660 x 10 ⁻¹⁰	1713	1,37	1,600E-13
40	2,100 x 10 ⁻¹⁰	2113	1,43	0,993E-13
p=0,50 bar; Vf=30%				
0	2,5100 x 10 ⁻¹⁰	330	1,19	9,960E-13
10	2,9600 x 10 ⁻¹⁰	962	1,26	2,980E-13
20	3,2900 x 10 ⁻¹⁰	1414	1,32	2,120E-13
30	2,5200 x 10 ⁻¹⁰	1713	1,37	1,000E-13
40	0,9800 x 10 ⁻¹⁰	2113	1,43	0,490E-13
p=0,75 bar; Vf=30%				
0	3,2900 x 10 ⁻¹⁰	330	1,19	7,600E-13
10	2,8700 x 10 ⁻¹⁰	962	1,26	3,070E-13
20	2,1200 x 10 ⁻¹⁰	1414	1,32	2,320E-13
30	1,6400 x 10 ⁻¹⁰	1713	1,37	1,540E-13
40	1,0500 x 10 ⁻¹⁰	2113	1,43	0,460E-13
p=0,25 bar; Vf=30%				
10, 38 μC	2,94 x 10 ⁻¹⁰	962	1,26	3,05E-13
40, 38 μC	3,64 x 10 ⁻¹⁰	2113	1,43	1,54E-13
10, 75 μC	3,33 x 10 ⁻¹⁰	962	1,26	3,46E-13
40, 75 μC	3,32 x 10 ⁻¹⁰	2113	1,43	1,57E-13

APÊNDICE C

Tabela C1 - Condições experimentais para os diferentes sistemas estudados sem travamento.

V_f (%) teórico	V_f (%) experimental	%CaCO ₃ em massa	%CaCO ₃ em massa experimental	Pressão Setup (bar)	Pressão Experimen tal (bar)	Temperatura (°C)	Tempo de moldage m (s)	Tempo até o trava - mento (s)
19	19,86	0	0,00	0,25	0,203	18,7	883	-
19	18,88	40	39,98	0,25	0,213	20,3	-	3420
24	24,28	0	0,00	0,25	0,218	18,5	1741	-
24	24,12	10	9,85	0,25	0,189	18,7	3420	-
24	24,43	20	20,57	0,25	0,191	19,3	-	12060
24	23,74	30	30,47	0,25	0,218	19,7	-	3000
24	23,84	40	39,9	0,25	0,212	20,1	-	3420
30	29,97	0	0,00	0,25	0,221	19,2	3120	-
30	30,04	10	9,95	0,25	0,209	19	-	8280
30	29,96	20	20,15	0,25	0,218	21,7	-	7200
30	29,68	30	30,01	0,25	0,215	18,1	-	4860
30	29,72	40	40,05	0,25	0,212	19	-	4560
30	29,92	0	0,00	0,50	0,459	19,5	995	-
30	30,08	10	10,08	0,50	0,454	18,8	4320	-
30	29,86	20	20,00	0,50	0,450	19,7	-	12840
30	30	30	29,94	0,50	0,451	19,9	-	9440
30	29,85	40	39,95	0,50	0,451	18,8	-	6060
30	30,06	0	0,00	0,75	0,701	18,7	674	-
30	29,93	10	10,02	0,75	0,702	18,1	1691	-
30	29,94	20	20,12	0,75	0,698	19,9	-	10200
30	30,05	30	29,99	0,75	0,695	20,3	-	7260
30	29,97	40	39,13	0,75	0,701	20,1	-	3000
30	29,74	10	9,98	0,25	0,229	18,5	-	8400
30	30,02	40	39,62	0,25	0,203	18,3	-	9000
30	30,03	10	10,00	0,25	0,202	18,8	-	7260
30	30,36	40	39,60	0,25	0,200	18,6	-	7200

APÊNDICE D

Tabela D1 - Condições experimentais para os diferentes sistemas estudados.

Casos	Tempo de moldagem (s)	Tempo até o travamento (s) velocidade igual a 0 m/s	Tempo até a velocidade da igual a 1 mm/s	Posição da frente de fluxo (m)
1	883	-	-	0,32
2	-	3420	1254	0,29
3	1758	-	-	0,32
4	2984	-	-	0,32
5	-	12060	614	0,26
6	-	3000	718	0,28
7	-	3420	554	0,19
8	3120	-	-	0,32
9	-	8280	470	0,31
10	-	7200	374	0,15
11	-	4860	593	0,14
12	-	4560	678	0,11
13	995	-	-	0,32
14	4320	-	-	0,32
15	-	12840	404	0,26
16	-	9440	545	0,28
17	-	6060	105	0,07
18	674	-	-	0,32
19	1691	-	-	0,32
20	-	10200	657	0,27
21	-	7260	735	0,26
22	-	3000	265	0,12
23	-	8400	550	0,30
24	-	9000	380	0,21
25	-	7260	625	0,29
26	-	7200	570	0,21

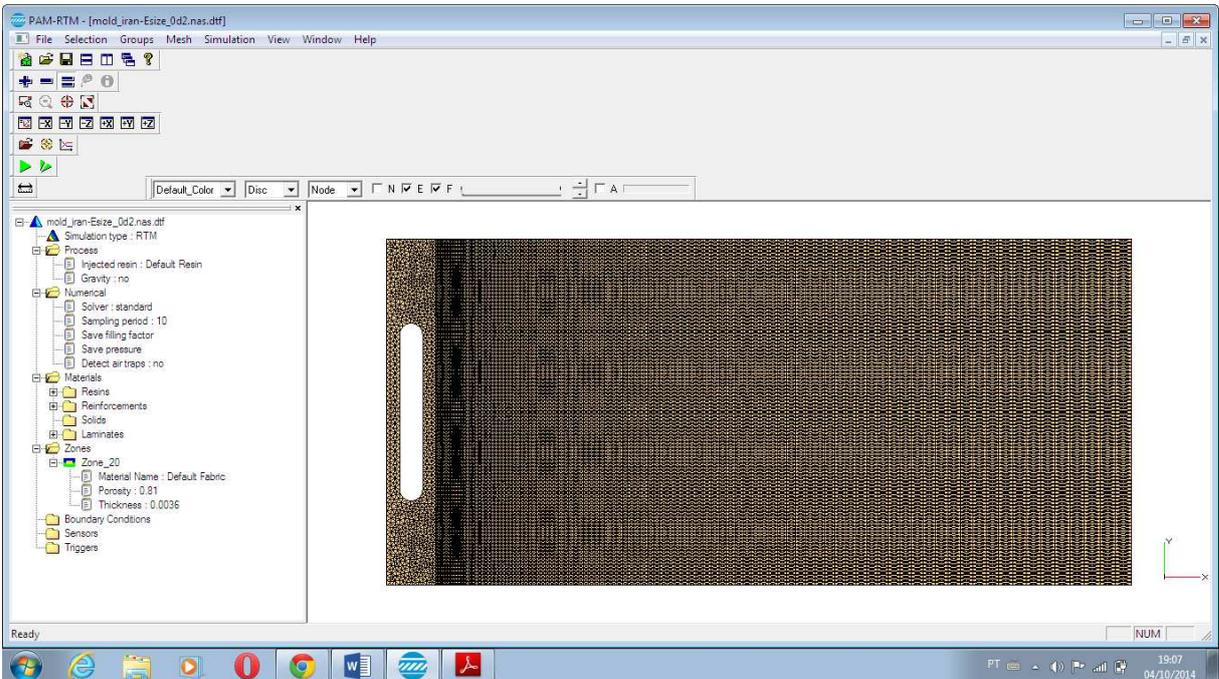
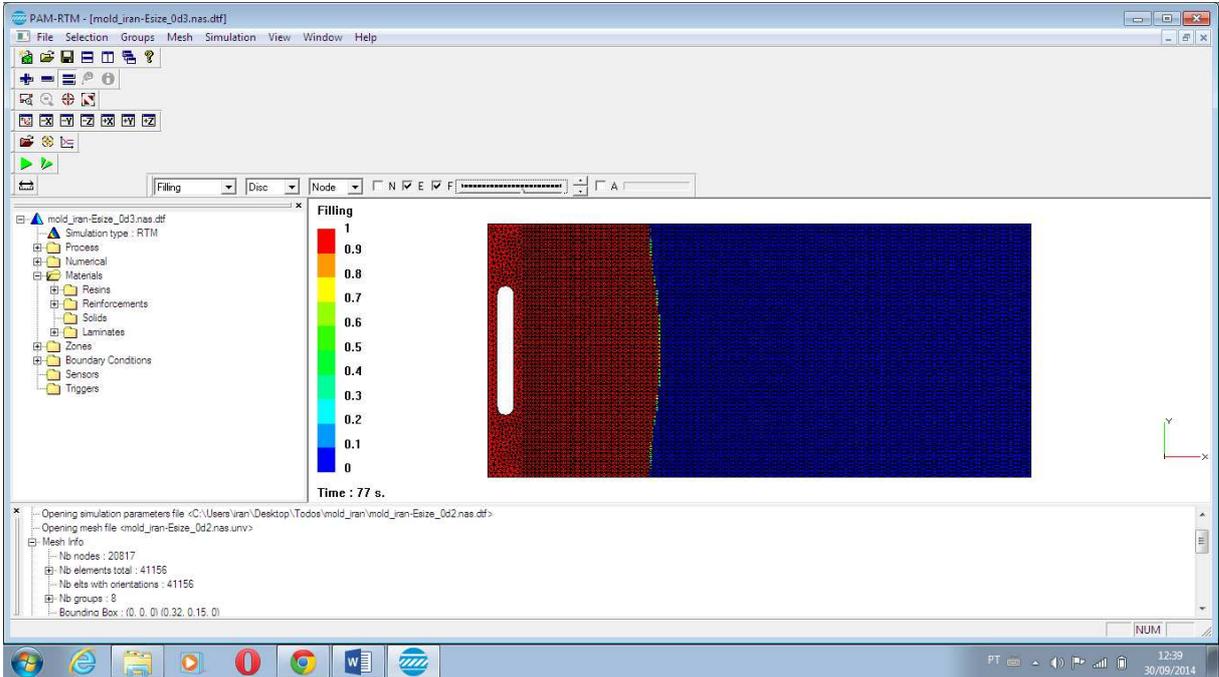
APÊNDICE E

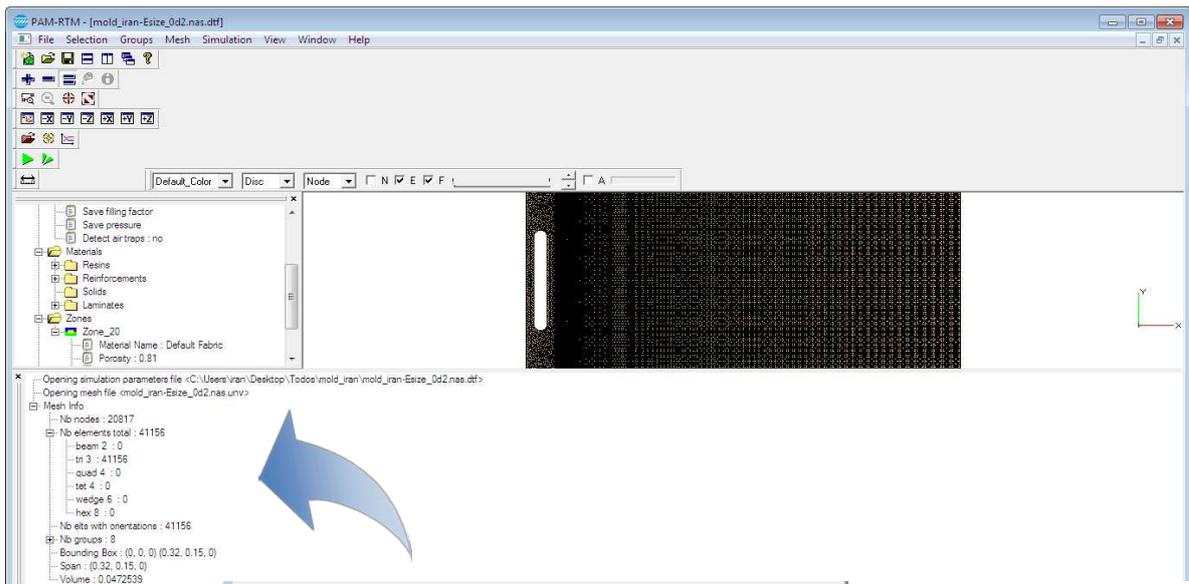
Tabela E1 - Condições experimentais para os diferentes sistemas estudados.

Caso	%CaCO ₃ em massa	V _f (%)	Pressão Setup (bar)	Pressão Experimental (bar)	Temperatura (°C)
A1	0	19	0,25	0,203	18,7
A2	40		0,25	0,213	20,3
A3	0	24	0,25	0,218	18,5
A4	10		0,25	0,189	18,7
A5	20		0,25	0,191	19,3
A6	30		0,25	0,218	19,7
A7	40		0,25	0,212	20,1
A8	0	30	0,25	0,221	19,2
A9	10		0,25	0,209	19,0
A10	20		0,25	0,218	21,7
A11	30		0,25	0,215	18,1
A12	40		0,25	0,212	19,0
A13	0		0,50	0,459	19,5
A14	10		0,50	0,454	18,8
A15	20		0,50	0,450	19,7
A16	30		0,50	0,451	19,9
A17	40		0,50	0,451	18,8
A18	0		0,75	0,701	18,7
A19	10		0,75	0,702	18,1
A20	20	0,75	0,698	19,9	
A21	30	0,75	0,695	20,3	
A22	40	0,75	0,701	20,1	
A23	10, 38 μm	30	0,25	0,229	18,5
A24	40, 38 μm		0,25	0,203	18,3
A25	10, 75 μm		0,25	0,202	18,8
A26	40, 75 μm		0,25	0,200	18,6

ANEXOS

ANEXO 1 – Análise dos resultados com a nova malha





```
..... Opening simulation parameters file <C:\Users\iran\Desktop\Todos\mold_iran\mold_iran-Esize_0d2.nas.dtf>
..... Opening mesh file <mold_iran-Esize_0d2.nas.unv>
Mesh Info
..... Nb nodes : 20817
..... Nb elements total : 41156
..... beam 2 : 0
..... tri 3 : 41156
..... quad 4 : 0
..... tet 4 : 0
..... wedge 6 : 0
..... hex 8 : 0
..... Nb elts with orientations : 41156
..... Nb groups : 8
..... Bounding Box : (0, 0, 0) (0.32, 0.15, 0)
..... Span : (0.32, 0.15, 0)
..... Volume : 0.0472539
```