

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

RUDÁ ARANHA

**Estudo do processamento de materiais compósitos com inserts impermeáveis
embebidos via RTM**

Campina Grande

2017

RUDÁ ARANHA

**Estudo do processamento de materiais compósitos com inserts impermeáveis
embebidos via RTM**

Dissertação apresentada à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Campina Grande - Campus I como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Análise e Projeto de Sistemas Termomecânicos

Orientador: Prof. Dr. Wanderley Ferreira de Amorim Júnior

Coorientador: Profa. Dra. Wilma Sales Cavalcanti

Campina Grande

2017

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

A662e

Aranha, Rudá.

Estudo do processamento de materiais compósitos com *inserts* impermeáveis embebidos via RTM / Rudá Aranha. – Campina Grande, 2018.

146 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2017.

"Orientação: Prof. Dr. Wanderley Ferreira de Amorim Júnior, Profª. Drª. Wilma Sales Cavalcanti".

Referências.

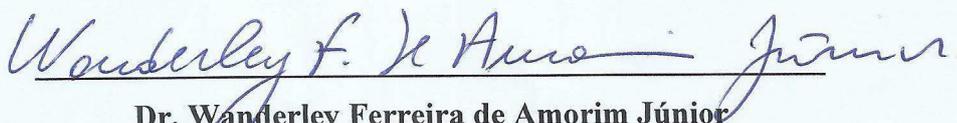
1. Materiais Compósitos. 2. RTM. 3. *Inserts* Embebidos. I. Amorim Júnior, Wanderley Ferreira de. II. Cavalcanti, Wilma Sales. III. Título.

CDU 621.1(043)

ESTUDO DO PROCESSAMENTO DE MATERIAIS COMPÓSITOS COM INSERTS
IMPERMEÁVEIS EMBEBIDOS VIA RTM

RUDÁ ARANHA

Dissertação Aprovada em 30/11/2017 pela Banca Examinadora constituída dos seguintes
membros:~



Dr. Wanderley Ferreira de Amorim Júnior

Orientador

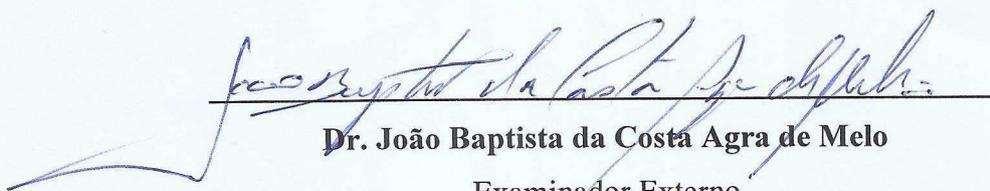
PPGEM/UAEM/CCT/UFCG



Dra. Wilma Sales Cavalcanti

Co-Orientadora

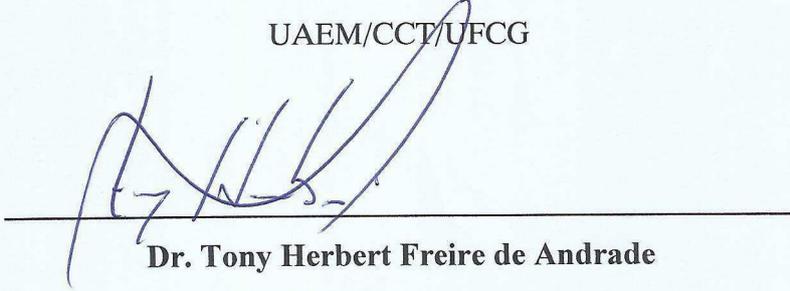
PPGEM/UAEM/CCT/UFCG



Dr. João Baptista da Costa Agra de Melo

Examinador Externo

UAEM/CCT/UFCG



Dr. Tony Herbert Freire de Andrade

Examinador Externo

UAEM/CCT/UFCG

Dedico este trabalho aos meus pais, Maria Luiza Candeia e Gervácio Batista Aranha, por todo incentivo, conselhos, paciência e, acima de tudo, por acreditarem neste que vos escreve.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Maria Luiza Candeia e Gervácio Batista Aranha por todo incentivo, apoio e paciência durante mais esta importante fase de minha vida.

Ao amigo e orientador Professor Wanderley Ferreira de Amorim Jr. Pela orientação, incentivo, paciência e confiança demonstrados durante a realização deste trabalho.

A amiga e orientadora Professora Wilma Sales Cavalcanti pela orientação, incentivo e conselhos durante a realização deste trabalho.

Aos professores João Baptista da Costa Agra de Melo e Tony Herbert Freire de Andrade por aceitarem fazer parte da banca examinadora deste trabalho.

Aos professores Carlos José de Araújo, Antônio Gilson Barbosa de Lima, Antônio Almeida Silva, Yoge Jerônimo da Costa e Manassés da Costa Agra Melo por todo auxílio durante o trabalho.

A João Victor, Mário, Gilberto e Cândido pela ajuda durante a realização das atividades referentes ao projeto.

A professora Nadja Maria da Silva Oliveira Brito por nos ceder o espaço no NUTES-UEPB para realização dos ensaios mecânicos e Fábio Kayk por realizar os ensaios.

A Walter Belarmino, Francisco Neto, Bruno Miranda e Neto Braga, companheiros de LPI pela ajuda e amizade durante este trabalho.

A Daniel e Sergio da Stratus Aeronaves, Tulio Porto do LCTF-UFCG e Eduardo Oliveira por toda a ajuda durante este trabalho.

Aos Funcionários e colegas da unidade acadêmica de Engenharia Mecânica da UFCG por todo apoio durante esta caminhada.

A tia Djane e tia Celina; aos meus primos Walber, Mariama, Ravi e Jusciene; Ao meu quase irmão Vagner, Fátima e Guesto que estão no meu coração como familiares mesmo sem possuir ligação sanguínea; e a todos os demais familiares que sempre me apoiaram e torceram pelo meu sucesso.

Aos Meus Amigos Haniel, Eduardo, Rodolfo gordo, Doda, Bibi, Lonan, Vinicius, Alberto, André, Sara, Heitor, Lito, Breno, Yasser, Pereira, Neves, doido Iran e Rodolfo Ramos por sempre me apoiarem nos bons e maus momentos, por todo incentivo e, acima de tudo, por sempre acreditarem em mim.

Por último e não menos importante, a todos aqueles cujo o nome não apareceu nesta lista, mas que de alguma forma contribuíram para realização e conclusão deste trabalho.

RESUMO

ARANHA, Rudá. **Estudo do processamento de materiais compósitos com inserts impermeáveis embebidos via RTM**. 2017. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.

Os materiais compósitos são sinônimos de boas propriedades mecânicas associadas a baixo peso estrutural com vasta aplicação na área da engenharia. A partir dos avanços tecnológicos e da necessidade de desenvolvimento de novos materiais, torná-los multifuncionais surge como interesse imediato. O método mais simples para conferir multifuncionalidade a um compósito é através da introdução de *inserts* nos compósitos antes de sua fabricação, conferindo-os as mais variadas características, sendo importante entender as consequências geradas a partir do uso dos *inserts* no processamento das placas. O estudo experimental do escoamento de resina através da pré-forma e os efeitos recorrentes devido à adição dos *inserts* impermeáveis aos compósitos durante o processo de Moldagem por Transferência de Resina (RTM) são os objetivos deste trabalho. Neste trabalho, foram utilizados reforço de tecido de fibra de vidro e matriz de resina poliéster na composição de placas de material compósito com dimensões de $250 \times 250 \times 14 \text{ mm}^3$ com 1 e 9 *inserts* impermeáveis de polietileno com dimensões de $50 \times 50 \times 4 \text{ mm}^3$, processadas pelos métodos de RTM Light e VARTM para futura aplicação estrutural e/ou balística. Como esperado, a introdução de *inserts* na pré-forma causou distúrbio no escoamento da resina durante os processamentos, sendo evidenciadas regiões superficiais em algumas das placas, acima dos *inserts*, onde as fibras não foram molhadas. Ao fim dos processamentos foram observadas variações nas espessura das placas, sendo esta uma consequência da compactação das fibras devido à presença dos *inserts*. Também foi identificada a movimentação dos *inserts* quando os pontos de entrada e saída foram posicionados em planos diferentes no molde. Tal movimentação foi evitada a partir da fixação dos *inserts* em uma tela antes do processamento. Com o corte das placas, regiões ricas em resina próximas às laterais dos *inserts* foram observadas, sendo esta uma consequência do mecanismo de afastamento das fibras devido à presença dos *inserts*. Assim, 4 zonas foram identificadas nos compósitos com *inserts* impermeáveis embebidos. Por fim, nos ensaios de flexão em 3 pontos, falhas de delaminação por cisalhamento tipo II foram identificadas nos corpos de prova.

Palavras-chaves: Materiais compósitos, RTM, Inserts embebidos.

ABSTRACT

ARANHA, Rudá. **Study of the processing of composite materials with embedded impermeable inserts by RTM**. 2017. 146 p. Dissertation (Master of Mechanical Engineering) – Sciences and Technology Center, Federal University of Campina Grande, Campina Grande, 2017.

Composite materials are synonymous with good mechanical properties associated with low structural weight and have a great variety of applications in the engineering area. Taking into account technological advances and the necessity to develop new materials, make them multifunctional appears as immediate interest. The simplest method to confer multifunctionality to a composite is through the introduction of inserts into the composites, giving them the most varied characteristics. It is important to understand how these inserts will affect the fabrication process and the structural characterization of the material. The experimental analysis of the flow through the preform and the effects due to the addition of the impermeable inserts to the composite during the process of Resin Transfer Molding (RTM) are the objectives of this work. In this work, reinforcement of glass fiber fabric and polyester resin matrix was used in the composition of $250 \times 250 \times 14 \text{ mm}^3$ composite materials sheets with 1 and 9 polyethylene impermeable inserts with dimensions of $50 \times 50 \times 4 \text{ mm}^3$, processed by the RTM Light and VARTM methods for future structural and/or ballistic application. As expected, introduction of inserts into the preform caused disturbances in resin flow during processing, with surface regions in some of the plates above the inserts where the fibers were not wetted. At the end of the processing, variations in the thickness of the plates were observed, being this a consequence of the fiber compaction due to the presence of the inserts. The movement of the inserts was also identified when the resin inlet and outlet were positioned on different planes in the mold. the inserts movimentation was prevented from attaching the inserts to a mesh before the processing. With the cutting of the plates, resin-rich regions close to the sides of the inserts were observed, which is a consequence of the mechanism of fiber spacing due to the presence of the inserts. Thus, 4 zones were identified in the composites with embedded impermeable inserts. Finally, in the 3-point bending tests, delamination failures for shear mode II were identified in the specimens.

Keywords: Composite Materials, RTM, Embedded inserts.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Desenho de um material compósito (fibras dispostas de forma contínua no interior de uma matriz polimérica)	22
Figura 2 – Fatores de influência em materiais compósitos	22
Figura 3 – Classificação e disposição dos reforços nos materiais compósitos	23
Figura 4 – Fibras de vidro: a) Manta com fibras curtas dispostas aleatoriamente; b) Tecido com fibras direcionadas e entrelaçadas ortogonalmente	24
Figura 5 – Ligações de uma resina poliéster	25
Figura 6 – Técnicas de fabricação de materiais compósitos: (a) laminação manual, (b) laminação por projeção e (c) enrolamento filamentar	28
Figura 7 – Peça de transporte público coreano fabricado por RTM	30
Figura 8 – Processo de moldagem por transferência de resina	31
Figura 9 – Processos de fabricação de compósitos de acordo com o tipo de pressão utilizada	32
Figura 10 – Ilustração do processo de RTM Light	33
Figura 11 – Ilustração do processo de VARTM	34
Figura 12 – Molde para processamento por RTM: (a) parte inferior do molde, (b) travamento do molde realizado com grampos tipo-C	36
Figura 13 – Fluxo retilíneo de resina no processo de RTM	39
Figura 14 – Fluxo radial de resina no processo de RTM	40
Figura 15 – Esquematização da compactação de um tecido semelhante a que ocorre no processo de RTM	41
Figura 16 – Esquematização da distribuição do escoamento através dos filamentos	42
Figura 17 – Representação esquemática do fluxo da resina líquida através da pré-forma	43
Figura 18 – Processamento de compósito com <i>insert</i> embebido	47
Figura 19 – Desenho do <i>insert</i> e seus principais parâmetros de dimensionamento	48
Figura 20 – Simulação de processamento de compósito com <i>insert</i> embebido	49
Figura 21 – influência da variação das dimensões do <i>insert</i> na formação de vazios: (a) razão do comprimento do insert (W_{ins}) pelo comprimento do molde (W) e (b) variação da largura do insert (L_{ins}) pela largura do molde (L)	49
Figura 22 – influência da variação da posição do <i>insert</i> na formação de vazios	50

Figura 23 – Fluxo de frente de escoamento em pré-forma com um <i>insert</i> impermeável embebido	50
Figura 24 – Placas de material compósito com <i>inserts</i> de cobre embebidos após ensaio de flexão	51
Figura 25 – Placas de material compósito com <i>inserts</i> de tira de cobre embebida . .	52
Figura 26 – Ensaio de tração estática em compósitos com <i>inserts</i> de tira de cobre .	53
Figura 27 – Fotos raios-X dos <i>inserts</i> de cobre (a) 20% do limite do esforço de tração; (b) 35% do limite do esforço de tração; (c) 50% do limite do esforço de tração; (d) 65% do limite do esforço de tração	53
Figura 28 – Aumento da descolagem de corpo de prova ensaiado a 50% da UTS: (a) recém fabricado; (b) 1000 ciclos; (c) 2000 ciclos; (d) 3000 ciclos; (e) 4000 ciclos; (f) 5000 ciclos – início da descolagem; (g) 5300 ciclos – aumento da descolagem; (h) 5500 ciclos - falha	54
Figura 29 – Alinhamento das imagens de ultrassom e raios-X do compósito com <i>insert</i> de tira de cobre embebido	55
Figura 30 – Esquemas do efeito do fluxo de borda	55
Figura 31 – Parede do molde (a) sem e (b) com fenômeno de <i>race-tracking</i>	56
Figura 32 – Micrografia de um compósito onde houve o fenômeno de efeito de borda: (a) Fibras dispostas em 90°/0° e (b) 0°/90°	57
Figura 33 – Evolução ao longo dos anos de veículos de combate dos EUA e da extinta União Soviética	58
Figura 34 – Avanço na produção de veículos blindados para calibre .50	59
Figura 35 – Processamento de compósito CIA via VARTM com bolsa de vácuo . .	60
Figura 36 – Molde com superfície transparente para visualização do escoamento entre os <i>inserts</i>	60
Figura 37 – Exemplo de estrutura CIA	61
Figura 38 – Cerâmica balística com face arredondada	62
Figura 39 – Rampa blindada utilizada em veículo militar	62
Figura 40 – Sequência de fabricação de rampa blindada para veículo militar	63
Figura 41 – Ensaio de flexão realizado numa estrutura CIA	63
Figura 42 – Sequência de eventos de falha em viga CIA	64
Figura 43 – Desenvolvimento do mecanismo de shear-lag	64
Figura 44 – Micrografia de falha em compósitos com <i>insert</i> de lítio embebido . . .	65

Figura 45 – Base do molde de polietileno de alta densidade: (a) desenho e dimensionamento no <i>software</i> Inventor e (b) peça fabricada	67
Figura 46 – Influência do diâmetro do furo de injeção de resina na frente de escoamento	68
Figura 47 – Tampa do molde de vidro: (a) desenho no <i>software</i> Inventor e (b) peça fabricada	68
Figura 48 – Moldura de polietileno: (a) desenho no <i>software</i> Inventor e (b) peça fabricada	69
Figura 49 – Moldura e dispositivo de vedação de borracha: (a) desenho no <i>software</i> Inventor e (b) peça fabricada	69
Figura 50 – Ilustração do molde desenvolvido para o processamento de materiais compósitos	70
Figura 51 – a) máquina de RTM fabricada pela empresa Transtécnica Ltda, b) regulador da pressão de injeção de resina, c) recipiente do catalisador, d) cursor para regulagem para porcentagem de catalisador a ser misturado na resina e e) campânula do solvente	72
Figura 52 – Cabeçote de injeção de resina da máquina de RTM	72
Figura 53 – Medidor de "batidas" do pistão de injeção da Máquina de RTM	73
Figura 54 – Sistema adaptado para o processamento por VARTM	74
Figura 55 – Primeira concepção de placa de material compósito com 1 <i>insert</i> : (a) modelo de <i>insert</i> usado nos processamentos e (b) Primeira concepção de placa de material compósito com <i>insert</i> impermeável posicionado no centro da pré-forma	77
Figura 56 – Segunda concepção de placa de material compósito com nove <i>inserts</i> impermeáveis posicionados na pré-forma	78
Figura 57 – planejamento de corte para as placas com (a) 1 <i>insert</i> e (b) 9 <i>inserts</i> .	80
Figura 58 – Pontos de medição da espessura das placas: (a) placas com 1 <i>insert</i> e (b) placas com 9 <i>inserts</i>	81
Figura 59 – Ensaio de Flexão de 3-pontos segundo a norma ASTM D7264	82
Figura 60 – Máquina universal de ensaios SHIMADZU® AGS-X	83
Figura 61 – <i>Insert</i> posicionado na pré-forma	84
Figura 62 – Esquematização do processamento da placa PLR-1	85
Figura 63 – Placa PRL-1: (a) vista superior e (b) vista inferior	85
Figura 64 – Compactação dos tecidos pelo mecanismo denominado de <i>Nest</i>	86

Figura 65 – Seções transversais da placa PRL-1: (a) seção 2 e (b) seção 3	87
Figura 66 – Esquema de medição da variação da espessura das fibras da placa PRL-1	87
Figura 67 – Variação da espessura das fibras da placa PRL-1	88
Figura 68 – Percentual de decréscimo da espessura devido à contração das fibras da placa PRL-1 em relação à espessura do molde	88
Figura 69 – Esquematização do processamento da placa PVR-1	90
Figura 70 – Sequência de escoamento do processamento da placa PVR-1: (a) $t= 0$ s, (b) 60 s, (c) 120 s, (d) 180 s, (e) 240 s e (f) 2179 s	90
Figura 71 – Placa PVR-1: (a) vista superior e (b) vista inferior	91
Figura 72 – Seções transversais da placa PVR-1: (a) seção 2 e (b) seção 3	92
Figura 73 – Esquema de medição da variação da espessura das fibras da placa PVR-1	92
Figura 74 – Variação da espessura das fibras da placa PVR-1	93
Figura 75 – Percentual de decréscimo da espessura devido à contração das fibras da placa PVR-1 em relação à espessura do molde	93
Figura 76 – Esquematização do processamento da placa PVR-2	94
Figura 77 – Sequência de escoamento do processamento da placa PVR-2: (a) $t= 0$ s, (b) 60 s, (c) 120 s, (d) 180 s, (e) 240 s e (f) 1010 s	95
Figura 78 – Placa PVR-2: (a) vista superior e (b) vista inferior	95
Figura 79 – Seções transversais da placa PVR-2 após os cortes: (a) seção 2 e (b) seção 3	96
Figura 80 – Esquema de medição da variação da espessura das fibras da placa PVR-2	97
Figura 81 – Variação da espessura das fibras da placa PVR-2	97
Figura 82 – Percentual de decréscimo da espessura devido à contração das fibras da placa PVR-2 em relação à espessura do molde	98
Figura 83 – Malha com 9 <i>inserts</i> posicionados na pré-forma	99
Figura 84 – Esquematização do processamento da placa PVR-3	100
Figura 85 – Sequência de escoamento do processamento da placa PVR-3: (a) $t= 0$ s, (b) 60 s, (c) 120 s, (d) 180 s, (e) 240 s e (f) 390 s	100
Figura 86 – Placa PVR-3: (a) vista superior e (b) vista inferior	101
Figura 87 – Tipos de fluxo de resina no processamento de material compósito com <i>insert</i> embebido: (a) esquematização dos fluxos laterais e transversal e (b) Formação do vazio abaixo do <i>insert</i> devido ao bloqueio do fluxo transversal	102

Figura 88 – Tipos de fluxo de resina no processamento da placa PVR-3: (a) esquematizações dos fluxos laterais e transversal e (b) Formação do <i>dry-spot</i> acima dos <i>inserts</i> devido ao bloqueio do fluxo transversal	102
Figura 89 – Seções transversais da placa PVR-3 após os cortes: (a) seção 2, (b) seção 3 e (c) seção 4	103
Figura 90 – Esquema de medição da variação da espessura das fibras da placa PVR-3	104
Figura 91 – Variação da espessura das fibras da placa PVR-3	105
Figura 92 – Percentual de decréscimo da espessura devido à contração das fibras da placa PVR-3 em relação à espessura do molde	105
Figura 93 – Esquematização do processamento da placa PVR-4	106
Figura 94 – Sequência de escoamento do processamento da placa PVR-4: (a) $t=0$ s, (b) 60 s, (c) 120 s, (d) 180 s, (e) 240 s e (f) 485 s	107
Figura 95 – Placa PVR-4: (a) vista superior e (b) vista inferior	107
Figura 96 – Seções transversais da placa PVR-4 após os cortes: (a) seção 2, (b) seção 3 e (c) seção 4	108
Figura 97 – Esquema de medição da variação da espessura das fibras da placa PVR-4	109
Figura 98 – Variação da espessura das fibras da placa PVR-4	109
Figura 99 – Percentual de decréscimo da espessura devido à contração das fibras da placa PVR-4 em relação à espessura do molde	110
Figura 100 – Esquematização do processamento da placa PVR-5	111
Figura 101 – Placa PVR-5: (a) vista superior e (b) vista inferior	111
Figura 102 – Seções transversais da placa PVR-5 após os cortes. (a) seção 2, (b) seção 3 e (c) seção 4	112
Figura 103 – Esquema de medição da variação da espessura das fibras da placa PVR-5	113
Figura 104 – Variação da espessura das fibras da placa PVR-5	113
Figura 105 – Percentual de decréscimo da espessura devido à contração das fibras da placa PVR-5 em relação à espessura do molde	114
Figura 106 – Esquematização do processamento da placa PVR-6	115
Figura 107 – <i>Inserts</i> posicionados na tela a fim de evitar movimentação	115
Figura 108 – Sequência de escoamento do processamento da placa PVR-6: (a) $t=0$ s, (b) 60 s, (c) 120 s, (d) 180 s e (e) 240 s	116
Figura 109 – Placa PVR-6: (a) vista superior e (b) vista inferior	116

Figura 110–Seções transversais da placa PVR-6 após os cortes: (a) seção 2, (b) seção 3 e (c) seção 4	117
Figura 111–Esquema de medição da variação da espessura das fibras da placa PVR-6	118
Figura 112–Variação da espessura das fibras da placa PVR-6	119
Figura 113–Percentual de decréscimo da espessura devido à contração das fibras da placa PVR-6 em relação à espessura do molde	119
Figura 114–Regiões ricas em resina na lateral dos <i>inserts</i> : (a) seção com 1 <i>insert</i> e (b) seção com 3 <i>inserts</i>	120
Figura 115–Esquematização do mecanismo de afastamento das fibras e formação de regiões ricas em resina devido a presença do <i>insert</i> no compósito	121
Figura 116–Medição dos comprimentos das regiões triangulares ricas em resina das placas: (a) seção com 1 <i>insert</i> e (b) seção com 3 <i>inserts</i>	121
Figura 117–Esquematização da vista superior das placas com destaque para as regiões ricas em resina: (a) Placa com 1 <i>insert</i> e (b) placa com 9 <i>inserts</i>	123
Figura 118–Diferentes zonas identificadas nas placas processadas	123
Figura 119–Corpos de prova selecionados para realização dos ensaios de flexão em 3 pontos	124
Figura 120–Diagrama Força x Deslocamento do ensaio de flexão em 3 pontos no cp1	125
Figura 121–ensaio de flexão em 3 pontos realizado no cp1	125
Figura 122–Diagrama Força x Deslocamento do ensaio de flexão em 3 pontos no cp2	126
Figura 123–cp2 ao fim do ensaio de flexão em 3 pontos	126
Figura 124–Diagrama Força x Deslocamento do ensaio de flexão em 3 pontos nos corpos de prova com 1 <i>insert</i>	127
Figura 125–Ensaio de flexão no cp5: (a) início da delaminação por cisalhamento entre a interface fibra/matriz e o <i>insert</i> e (b) aumento da delaminação por cisalhamento e propagação da trinca até a borda do corpo de prova	128
Figura 126–Diagrama Força x Deslocamento do ensaio de flexão em 3 pontos no cp6	128
Figura 127–Ensaio de flexão em 3 pontos realizado no cp6	129
Figura 128–Análise fotográfica do corpo de prova com 1 <i>insert</i> submetido ao ensaio de flexão	130
Figura 129–Falhas identificadas no corpo de prova com 1 <i>insert</i> submetido ao ensaio de flexão em 3 pontos	130

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Materiais comumente usados em projetos de moldes	37
Tabela 2 – Influência da porosidade no valor da permeabilidade no escoamento retilíneo	43
Tabela 3 – Propriedades compressivas dos compósitos com variação nas dimensões do <i>insert</i>	52
Tabela 4 – Atividades realizadas pré-processamento, durante o processamento e pós-processamento dos compósitos	75
Tabela 5 – Nomenclatura dos experimentos em relação ao tipo de processamento utilizado	78
Tabela 6 – Características da placa fabricada por RTM Light	79
Tabela 7 – Características da placa fabricada por VARTM	79
Tabela 8 – Nomenclatura das seções de acordo a região das placas	80
Tabela 9 – Nomenclatura dos corpos de prova utilizados nos ensaios de flexão	82
Tabela 10 – Medições da variação da espessura das fibras ao longo da placa PRL-1	88
Tabela 11 – Medições da variação da espessura das fibras ao longo da placa PVR-1	93
Tabela 12 – Medições da variação da espessura das fibras ao longo da placa PVR-2	97
Tabela 13 – Medições da variação da espessura das fibras ao longo da placa PVR-3	104
Tabela 14 – Medições da variação da espessura das fibras ao longo da placa PVR-4	109
Tabela 15 – Medições da variação da espessura das fibras ao longo da placa PVR-5	113
Tabela 16 – Medições da variação da espessura das fibras ao longo da placa PVR-6	118
Tabela 17 – Medições do comprimento da região triangular rica em resina das placas	122
Tabela 18 – Efeito das regiões triangulares ricas em resina nas placas	122
Tabela 19 – Características dos cp1 e cp2	124
Tabela 20 – Valores médios da carga e deslocamento para os cp3, cp4 e cp5	127

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	<i>Objetivo geral</i>	20
1.2	<i>Objetivos específicos</i>	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	<i>Materiais Compósitos</i>	21
2.1.1	Fase dispersa	23
2.1.2	Fase matriz	24
2.1.3	Interface fibra/matriz	26
2.2	<i>Processamento dos materiais compósitos</i>	27
2.3	<i>Modelagem por Transferência de Resina (RTM)</i>	29
2.3.1	RTM tradicional	32
2.3.2	RTM Light	33
2.3.3	VARTM	34
2.4	<i>Molde</i>	35
2.5	<i>Permeabilidade</i>	38
2.5.1	Métodos de fluxo	39
2.5.2	Compressibilidade das fibras	41
2.5.3	Porosidade	41
2.5.4	Modelo físico-matemático	44
2.6	<i>Materiais Compósitos Multifuncionais com Inserts Embebidos</i>	46
2.6.1	Fenômeno de <i>race-tracking</i>	55
2.6.2	Estrutura de materiais compósitos CIA	57
3	MATERIAIS E MÉTODOS	66
3.1	<i>Materiais</i>	66
3.2	<i>Métodos</i>	66
3.2.1	Projeto do molde	66
3.2.2	Processos de Fabricação	71
3.2.3	Atividades de processamento dos compósitos por RTM	74
3.2.4	Planejamento dos processamentos das placas	76

3.2.5	Planejamento de processamento para RTM Light e VARTM	78
3.2.6	Plano de corte das placas	79
3.2.7	Análise de homogeneidade dimensional das placas	81
3.2.8	Caracterização mecânica por ensaio de flexão	81
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	84
4.1	<i>Estudos do Processamento dos Compósitos por RTM Light</i>	84
4.2	<i>Estudo do Processamento dos Compósitos por VARTM</i>	89
4.2.1	Processamento da placa PVR-1	89
4.2.2	Processamento da placa PVR-2	94
4.2.3	Processamento da placa PVR-3	98
4.2.4	Processamento da placa PVR-4	106
4.2.5	Processamento da placa PVR-5	110
4.2.6	Processamento da placa PVR-6	114
4.3	<i>Estudo dos efeitos da presença dos inserts embebidos em compósitos .</i>	120
4.4	<i>Ensaio de flexão em 3 pontos</i>	124
4.4.1	Ensaio nos corpos de prova tipo viga	124
4.4.2	Ensaio nos corpos de prova com 1 <i>insert</i> de acordo com a norma ASTM D7264	127
4.4.3	Ensaio nos corpos de prova com 3 <i>inserts</i> de acordo com a norma ASTM D7264	128
4.4.4	Análises do mecanismo de fratura em compósito com <i>insert</i> embebido	129
5	CONCLUSÕES	131
	Referências¹	132
	 ANEXOS	 138
	Anexo A – Resina e Catalisador	139
	Anexo B – Molde	142
B.1	<i>Base</i>	142

¹ De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6023.

<i>B.2</i>	<i>Tampa</i>	143
<i>B.3</i>	<i>Moldura</i>	144
	Anexo C – Máquina de RTM	145
	Anexo D – Ensaio de Flexão	146

1 INTRODUÇÃO

O conceito de materiais compósitos envolve a combinação de dois ou mais materiais diferentes que atuam como uma unidade, visando obter um conjunto de propriedades que não são apresentadas por nenhum dos componentes isoladamente (MENDONÇA, 2005). Com a grande gama de materiais disponíveis para engenharia, faz-se cada vez mais necessário o desenvolvimento de materiais especializados para aplicações específicas como materiais multifuncionais. Possuem excelentes propriedades mecânicas, resistência à fadiga, leveza, além de considerável resistência a ataques químicos. Os Materiais compósitos são normalmente utilizados nas indústrias aeronáutica, aeroespacial e naval, com alguma utilização na indústria automotiva, construção civil, isolamento térmico, e vibro-acústico, recreação e lazer, e mais recentemente, as pesquisas estão direcionadas para a área militar, mais especificamente de blindagem balística.

A Moldagem por Transferência de Resina (RTM) é um conhecido processo de fabricação de materiais compósitos que consiste em injetar uma resina líquida no meio fibroso em um molde fechado pertencente à categoria de moldagem líquida (LM) (GARAY, 2016). Com a crescente utilização de materiais compósitos, o processamento por RTM surge como uma excelente alternativa, aumentando a produtividade além de viabilizar a redução de custos, uma vez que métodos tradicionais como laminação manual *hand lay-up* e laminação à pistola *spray-up* já não satisfazem as atuais necessidades de produção (CAVALCANTI, 2014).

Composite integral armor (CIA) são estruturas compostas por várias camadas como cerâmica, borracha e compósitos poliméricos distribuídos numa sequência para se obter uma performance balística e estrutural superior (MAHDI et al., 2003). Normalmente as estruturas CIA são fabricadas através do processo de laminação manual de múltiplas etapas *multi-step*, onde cada camada da estrutura é processada separadamente. O desenvolvimento de estruturas CIA se deu através da necessidade de produção de veículos militares com estrutura leve e ao mesmo tempo com alto desempenho balístico por parte do governo americano. No processamento por Moldagem Líquida, fazem-se necessários estudos acerca da fabricação da estrutura CIA em única etapa *single-step*, ou seja, a pré-forma é composta por todas as camadas da estrutura onde a injeção é feita em uma única etapa.

Ao se tentar um processamento de várias camadas em única etapa, a estrutura fabricada é caracterizada como um material compósito multifuncional, cuja ideia geral é de inserir componentes impermeáveis *inserts*, para além de um material compósito tradicional composto por matriz e fase dispersa. Com a inserção de componentes impermeáveis, obtém-se uma placa híbrida (com componentes permeáveis e impermeáveis), dificultando a frente de escoamento do fluido de preencher o molde por completo de maneira uniforme. Tais componentes servem tanto para aperfeiçoar as propriedades inerentes dos compósitos quanto para adicionar funcionalidades ao material (LAWRENCE et al., 2007).

1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem por objetivo geral o estudo e fabricação de compósitos com *inserts* embebidos pelo método de RTM para futuras aplicações estruturais e/ou balísticas.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

A fim de atingir o objetivo geral, alguns objetivos específicos foram listados:

- Projeto conceitual e fabricação de um molde para processamento por RTM;
- Estudo preliminar dos escoamentos linear e radial do fluido através de objetos inseridos *inserts* no interior do molde e estudo da influência exercida pelos *inserts* nos compósitos processados;
- Estudo e desenvolvimento de um compósito com múltiplos *inserts* impermeáveis embebidos;
- Caracterização mecânica das placas produzidas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

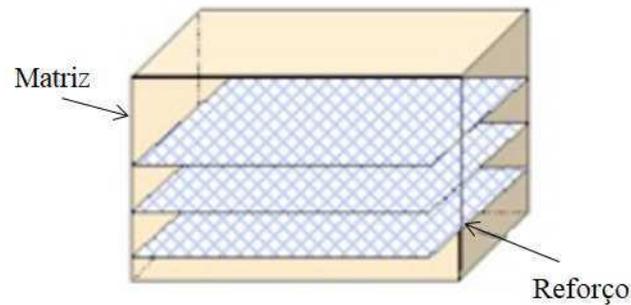
2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

Com o avanço tecnológico, principalmente no século XX, houve uma necessidade de desenvolvimento de novas ligas e materiais a fim de atender a demanda produzida por tais avanços. A partir desse contexto, os materiais compósitos ganham destaque principalmente por serem materiais leves e possuir boas propriedades mecânicas. Embora a utilização em larga escala de materiais compósitos esteja datada para o início do Século XX, é sabido que a civilização egípcia em 2000 a.C. usava um tipo de tijolo constituído de barro reforçado por palha vegetal picotada para construções urbanas; onde o barro é um material barato, de características mecânicas pobre, porém de fácil produção e moldagem, e a palha, material fibroso e resistente é encarregado de manter o barro agregado e de adicionar resistência a ele.

A grande diversidade e abrangência dos materiais compósitos faz com que os mesmos possuam uma grande variedade de aplicações. A princípio, quando passou a ser utilizado em larga escala, sua aplicação era restrita as indústrias aeronáutica e aeroespacial (NUNES; SILVA, 2016) devido ao seu elevado custo de fabricação, porém, com o avanço tecnológico, o desenvolvimento de novas ligas e principalmente com o barateamento nos custos e no desenvolvimento de novas técnicas de fabricação, os materiais compósitos passaram a ser usados em outras áreas. A indústria naval (RIBEIRO, 2013), indústria automotiva (KIM; LEE, 2002), construção civil (BERTINI, 2002; HARRIS, 2009; ALMEIDA et al., 2011), isolante térmico (SARTORI, 2009), isolante vibro-acústico (GHINET; ATALLA, 2006; TOURINHO, 2013) e a indústria militar (SILVA, 2014a) são algumas das mais variadas aplicações dos materiais compósitos. Atualmente seu crescimento está ligado ao mercado de próteses, novos equipamentos de lazer, nano compósitos e no uso de materiais inteligentes.

É definido como material compósito a combinação de dois ou mais materiais diferentes em escala macroscópica formando uma unidade, como meio de obter um novo material cujas propriedades não são apresentadas individualmente em nenhum dos materiais iniciais (Figura 1), onde cada material utilizado possui fases distintas, denominadas de fase matriz e fase dispersa (ROSSEL; CAIRNS, 2004; MENDONÇA, 2005; AMORIM-JR., 2007; CAVALCANTI, 2014). Alguns autores consideram a interface fibra-matriz com uma terceira fase dos materiais compósitos (VERA, 2012).

Figura 1 – Desenho de um material compósito (fibras dispostas de forma contínua no interior de uma matriz polimérica)

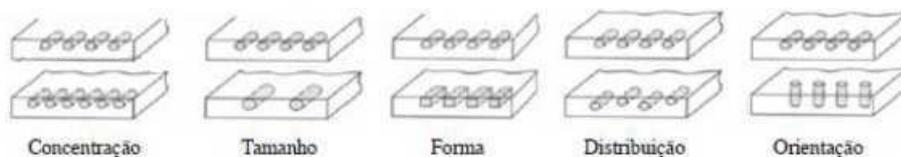


Fonte: Adaptado de <https://quimicamentefacil.wordpress.com/2014/11/03/compositos/>

Ao se adicionar o reforço à matriz, obtém-se o aumento da resistência, diminuição da fragilidade, proteção contra degradação, aumento da condutividade térmica, etc. Por exemplo, o concreto que apresenta uma boa resistência à compressão e baixa resistência à tração, podendo formar um compósito com o aço, que tem boa resistência à tração (SILVA, 2014b). Tais características não seriam possíveis de se obter individualmente, ou seja, sem a união dos materiais, uma vez que a matriz estabiliza o reforço, mantendo sua disposição geométrica, bem como o protegendo dos efeitos causados pelo ambiente externo.

A partir da década de 1970 houve uma maior frequência na utilização de fibras, contínuas ou não, como materiais de reforço em compósitos. E os materiais compósitos de matriz polimérica reforçados com fibra passam a ser amplamente utilizados, sendo considerados ótimos materiais de engenharia (ALVES et al., 2004). A utilização de materiais compósitos, a partir da aplicação de polímeros e de fibras, pode possibilitar uma excelente combinação de rigidez, resistência à tração, resistência à flexão e baixo peso, além de resistência à corrosão e à fadiga química quando comparados com metais mais tradicionais como o aço (HAN et al., 2000; CARNEIRO; TEIXEIRA, 2008). Lembrando que a obtenção de tais características nos materiais vai depender de alguns fatores, como as propriedades dos materiais constituintes, orientação do reforço, geometria e disposição do reforço, fração volumétrica, etc. A Figura 2 ilustra alguns desses fatores citados.

Figura 2 – Fatores de influência em materiais compósitos



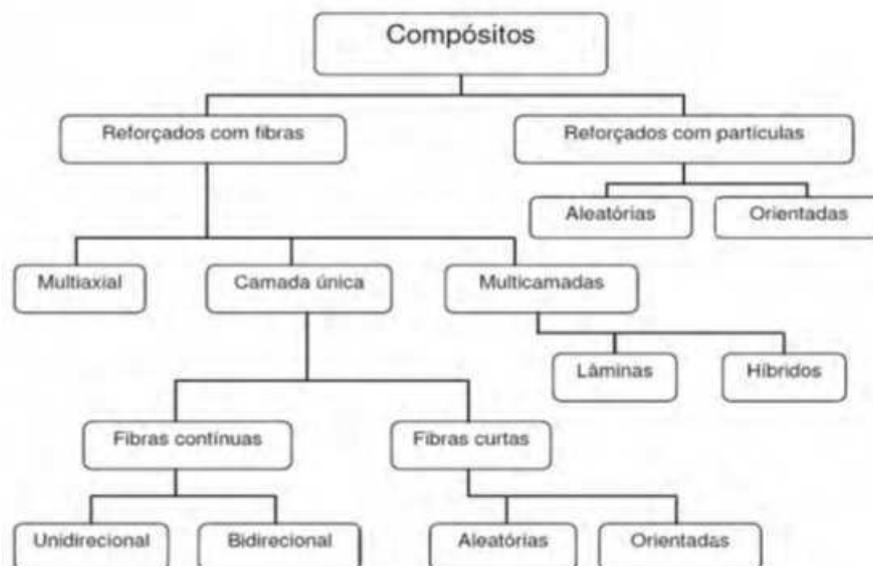
Fonte: Callister (2000)

Em contrapartida, a temperatura de serviço (abaixo de 200°C) dos compósitos é baixa se comparada com a maioria dos materiais metálicos tradicionais, sendo considerada essa sua pior desvantagem (CAVALCANTI, 2014). Outras desvantagens estão relacionadas aos susceptíveis danos aos quais os compósitos estão sujeitos, que vão desde o processo de fabricação, manuseio, transporte, exposição aos efeitos ambientais, entre outros.

2.1.1 Fase dispersa

A fase dispersa, também chamada de reforço, é responsável por fornecer as características mecânicas aos materiais compósitos: rigidez, resistência à tração, cisalhamento, ruptura, etc. Dentre os vários materiais usados na fase dispersa, destacam-se as fibras, sintéticas ou naturais, por possuírem resistência elevada e um baixo peso (ALMEIDA, 2009). Os tipos de arranjos dos reforços são mostrados na Figura 3.

Figura 3 – Classificação e disposição dos reforços nos materiais compósitos



Fonte: Garay, 2016

De acordo com a Figura 3, os compósitos podem ser reforçados por fibras ou partículas. As fibras sintéticas mais utilizadas em materiais compósitos são de vidro, carbono e aramida (kevlar). Fibras naturais (sisal, coco, curauá, etc.) vêm ganhando destaque há alguns anos por virem de fontes renováveis, dando ênfase aos projetos sustentáveis (CARVALHO, 2005; SILVA, 2010; JAFELICE, 2013). Fatores como tipo de carregamento e esforços, propriedades necessárias do produto e conhecimento do

desempenho de tal produto vão definir qual material vai se adequar mais ao projeto, vale salientar que o custo financeiro e método de fabricação também devem ser lembrados. Por possuir um ótimo custo/benefício, as fibras de vidro têm se apresentado como uma das melhores opções para fabricação de materiais compósitos. A Figura 4 mostra os tipos de fibras de vidro comumente usadas.

Figura 4 – Fibras de vidro: a) Manta com fibras curtas dispostas aleatoriamente; b) Tecido com fibras direcionadas e entrelaçadas ortogonalmente



Fonte: Adaptado de Almeida, 2009

Os reforços dos compósitos laminados são fibras dispostas em várias direções, podendo ser uma manta disposta de forma aleatória como mostrado na Figura 4(a), ou tecidos entrelaçados como mostrado na Figura 4(b). Além disso, as propriedades mecânicas das mantas são influenciadas pelo comprimento das fibras, sua disposição, etc. As fibras curtas, quando dispostas aleatoriamente, têm um comportamento isotrópico enquanto que as fibras longas são mais resistentes e têm uma maior rigidez. As fibras de vidro possuem classificação específica de acordo com sua composição e necessidade de aplicação, sendo as fibras de vidro tipo C assim chamadas por possuir uma maior resistência química, as fibras de vidro tipo E possuem uma maior resistência elétrica e as fibras de vidro tipo S uma maior resistência mecânica.

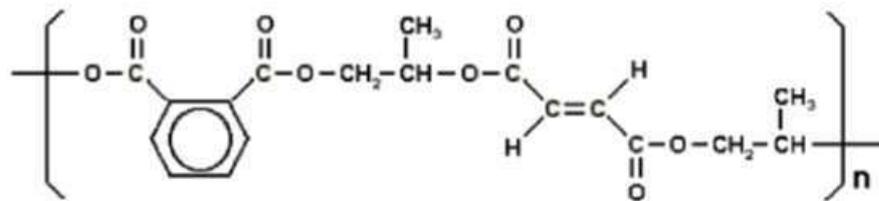
2.1.2 Fase matriz

Conforme visto anteriormente, a fase matriz tem como função estabilizar as fibras, conservando sua disposição geométrica, além de protegê-las dos efeitos produzidos pelo ambiente externo, sendo normalmente divididas em matrizes metálicas (alumínio, níquel,

titânio), cerâmicas (alumina, carbetto de silício, nitreto de silício) e as matrizes poliméricas (termoplásticas e termorrígidas) que serão usadas nesse trabalho.

Os materiais poliméricos têm origem orgânica e são constituídos por cadeias de unidades repetidas unidas umas as outras por ligações covalentes. As unidades que formam as cadeias e que se repetem são chamadas de meros, que por sua vez, quando ligadas em grandes números, formam os polímeros. O polímero mais simples (polietileno) nada mais é do que cadeias de hidrocarbonetos, ou seja, apenas átomos de hidrogênio e carbono. À medida que outros átomos como oxigênio e nitrogênio, por exemplo, são adicionados às cadeias formadas por hidrogênio e carbono, variações de polímeros são obtidas. A Figura 5 mostra as ligações de uma resina poliéster semelhante a que foi usada nesse trabalho.

Figura 5 – Ligações de uma resina poliéster



Fonte: Cavalvanti, 2014

Embora as resinas termoplásticas possuam uma maior dificuldade de impregnação e adesão quando comparadas com as resinas termorrígidas (ALMEIDA, 2009), se destacam por possuírem boas características mecânicas como elevada tenacidade e baixa densidade, além de outras características relacionadas ao baixo custo de produção, elevado volume de produção, fundem e fluem sob efeito de temperatura e possuem propriedades físicas reversíveis, existindo a possibilidade de reciclagem. Um exemplo de matriz termoplástica é o policloreto de vinila (PVC).

Já as matrizes termorrígidas se solidificam por meio de agentes de cura (catalisadores, endurecedores e aceleradores) ou por temperatura, formando ligações cruzadas entre as cadeias poliméricas, proporcionando propriedades mecânicas superiores quando comparadas com as matrizes termoplásticas, além de ampla vida útil, porém, sem possibilidade de reciclagem por serem infusíveis e insolúveis após a solidificação (CAVALCANTI, 2014).

É sabido que o material compósito é a união do reforço e da matriz, sendo o estágio final do material atingido pela solidificação da matriz, considerando que esta seja termorrígida. O processo de solidificação das matrizes termorrígidas é chamado de cura e é um processo complexo onde há mudança nas propriedades químicas e físicas

de uma formulação resina/endurecedor, sendo reações irreversíveis acompanhadas pela ação do calor e condições variadas de vácuo, de forma que o entendimento do mecanismo e o conhecimento da taxa de cura da mesma são necessários para que a relação entre processamento e morfologia, além das propriedades e a durabilidade do termorrígido puro e, por consequência, do compósito final sejam compreendidas (COSTA et al., 1999).

A gelificação e a vitrificação são os dois fenômenos macroscópicos mais importantes que ocorrem durante o tempo de cura de sistemas termorrígidos. Na gelificação ou tempo de gel, o sistema se transforma de líquido viscoso em gel elástico, isso ocorre devido à formação de uma rede com peso molecular infinito onde a taxa de cisalhamento devido à viscosidade transforma-se de um valor próximo a zero em um valor tendendo a infinito, originando um comportamento visco elástico do fluido, é o momento onde é possível fazer a manipulação da resina em estado líquido, considerando que houve a adição de um catalisador à resina. Após a gelificação, o processo de cura continua mais lentamente porque há um aumento da densidade das ligações cruzadas, tornando o sistema mais restrito, além de aumentar a temperatura de transição vítrea, atingindo a temperatura máxima após a gelificação ter sido concluída, também conhecida por pico exotérmico, e melhorar as propriedades mecânicas do material (COSTA et al., 1999). A vitrificação é o processo no qual a reação química é resfriada durante o ciclo de cura, sendo que a resina não atinge o estado de cura total. Após o processo de cura ter terminado, o material está pronto para ser desmoldado.

2.1.3 Interface fibra/matriz

Se tratando de materiais compósitos, um ponto bastante relevante é a interface fibra/matriz, uma vez que ela desempenha um papel importante nas propriedades mecânicas e físicas dos materiais ao ser responsável por fazer a transferência da carga da matriz para as fibras (TITA et al., 2002), em outras palavras, quanto maior a adesão proporcionada pela interface fibra/matriz, melhor serão as características e o desempenho mecânico do material compósito em questão. Do mesmo jeito que se não houver adesão entre a fibra e a matriz, o material em questão não pode ser caracterizado como um compósito, pois não vai estar se comportando como uma unidade e sim como dois materiais independentes com características distintas.

Há vários meios de se obter uma boa interface fibra/matriz nos compósito. Encaixe mecânico das cadeias da matriz em rugosidades existentes na superfície da fibra, atração eletrostática, força de Van der Waals e formação de ligações químicas mais fortes são alguns desses meios (CAVALCANTI, 2014). A força de adesão na interface fibra/matriz existe através do trabalho termodinâmico de adesão relacionado às energias das superfícies da fibra e da matriz (SANTOS; GARCIA, 2009). Sob a aplicação de uma tensão, a ligação fibra/matriz cessa nas extremidades da fibra. Para melhorar a adesão na interface fibra/matriz, alguns tratamentos são sugeridos na literatura como meio de intensificar a adesão fibra/matriz (OLIVEIRA et al., 2017), tais como: tratamentos químicos, mecânicos, etc.

2.2 PROCESSAMENTO DOS MATERIAIS COMPÓSITOS

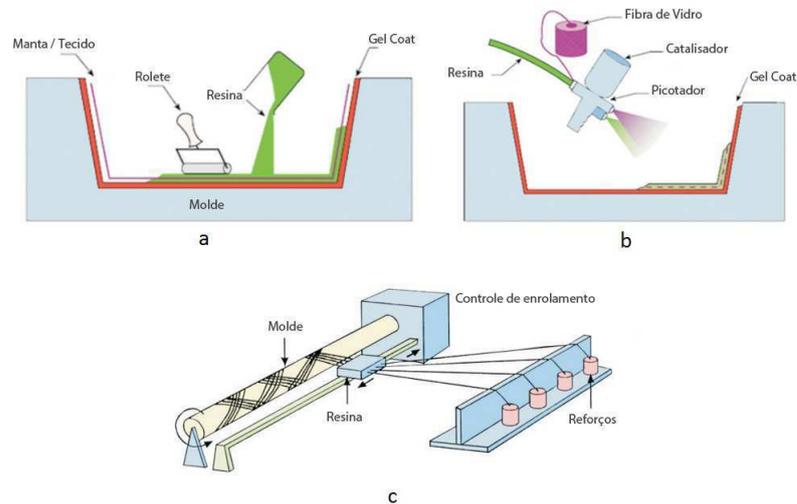
Com a grande possibilidade de aplicações, além das elevadas propriedades mecânicas específicas, os materiais compósitos passaram a ter uma demanda maior, tornando indispensável conseguir conciliar a produção em massa dos materiais a um baixo custo financeiro.

Assim sendo, as técnicas de fabricação desses materiais como laminação manual *hand lay-up*, laminação por projeção *Spray-up* e enrolamento filamentar *filament winding* são técnicas muito tradicionais, consideradas até arcaicas, não produzindo peças com características e acabamento adequado quando comparado com processos mais sofisticados, além de ser apropriadas apenas para peças de geometria simples normalmente em pequena escala de produção.

A laminação manual consiste na utilização de um molde onde o reforço é impregnado pela matriz polimérica através de roletes que são utilizados para garantir um bom molhamento das fibras pela resina enquanto o excesso de ar é retirado, ilustrado na Figura 6(a). A laminação por projeção é uma evolução da laminação manual, sendo os seus meios de produção bastante semelhantes, onde a diferença está na possibilidade de produção em larga escala, uma vez que se utiliza de uma pistola de *spray* que vai injetar ao mesmo tempo a resina e a fibra picotada, podendo controlar a fração volumétrica de injeção, ilustrado na Figura 6(b). O enrolamento filamentar, é um processo mais recomendado

para peças em formatos cilíndricos ou esféricos, utilizando-se de mandril e fios de fibra impregnados com resina, mostrado na Figura 6(c).

Figura 6 – Técnicas de fabricação de materiais compósitos: (a) laminação manual, (b) laminação por projeção e (c) enrolamento filamentar



Fonte: CPIC Fiberglass (adaptado de http://br.cpicfiber.com/processos_lista.asp?categoria=Produtos&subcategoria=Pr)

Outros métodos empregados para fabricação de materiais compósitos são os processos por pultrusão, prensagem e em autoclave. Porém são considerados de elevado custo de produção, uma vez que o primeiro método necessita de uma máquina que faz uma impregnação prévia do reforço em uma banheira de resina, passando posteriormente por uma ferramenta aquecida que vai moldar a peça e promover a cura da resina, a parte curada ajuda a tracionar as fibras e conseqüentemente impregná-las (MARTINEZ, 2011). O segundo se utiliza de um molde que vai dar forma à peça através de pressão, como mostrado por Sousa (2012) que estudou o método de fabricação de materiais compósitos por metalurgia do pó via moagem de alta energia e sinterização a vácuo, ou seja, dependendo das características ou dimensões peça, o custo de equipamento é muito elevado. E por último, o método em autoclave que garante as melhores propriedades do laminado, consistindo no empilhamento de camadas pré-impregnadas, chamadas *prepegs*, em uma câmara e posteriormente aplicados altos valores de pressão ao mesmo tempo em que energia e vácuos são aplicados como meio de reduzir a quantidade de vazios e tempo de cura do sistema (MARTINEZ, 2011). Por proporcionar as melhores propriedades aos laminados de material compósito, o método de autoclave é o mais utilizado pela indústria espacial.

Além dos vários métodos de processamentos já citados, um que vem ganhando visibilidade e destaque ao longo dos anos é o Processamento por Moldagem de Líquido

Liquid Molding Process, sendo chamado também de Moldagem Líquida (LM) por alguns autores, que engloba um vasto grupo de processos, todos partindo do mesmo princípio: resina é injetada em um molde que vai estar preenchido por fibras secas chamadas de pré-forma, tal injeção é feita através de combinação de pressão e/ou vácuo. Após a injeção, a peça passa pelo processo de cura ainda dentro molde, para só então poder ser retirada.

Fração volumétrica de fibras e a arquitetura da pré-forma fibrosa têm influência sobre o processamento e propriedades mecânicas do material, ou seja, o aumento da fração volumétrica das fibras pode acarretar em melhores propriedades mecânicas do material, entretanto, requerem maiores pressões de injeção, o que pode afetar as propriedades do componente final moldado (GARAY, 2016). As maiores dificuldades observadas durante a moldagem é a formação de vazios, pela entrada e deficiência na retirada de ar ou não impregnação completa das fibras, afetando diretamente as propriedades dos compósitos. Para evitar os vazios, um bom projeto do molde, levando em consideração a entrada de resina e saídas de ar, bem como os parâmetros de injeção de resina e frente de fluxo se fazem necessários nesses processos.

Fazem parte do Processamento por Moldagem de Líquido os processos de *Structural Reaction Injection Molding* (SRIM), *Reinforced Reaction Injection Molding* (RRIM), *High Speed Resin Transfer Molding* (HSRTM), *Vacuum-Assisted Resin Injection* (VARI), *Thermal Expansion Resin Transfer Molding* (TERTM), *Seemann's Composites Resin Infusion Molding Process* (SCRIMP), *Resin Transfer Molding* (RTM), etc (AMORIM Jr., 2007). Nesse projeto será abordada a fabricação de materiais compósitos com *inserts* impermeáveis embebidos via processo de RTM com foco na validação do método de fabricação de tais placas e análise do escoamento do fluido em meio híbrido poroso/não poroso.

2.3 MODELAGEM POR TRANSFERÊNCIA DE RESINA (RTM)

Dentre os processos que compõem o Processamento por Moldagem de Líquido, um dos mais utilizados é o processo por Moldagem por Transferência de Resina ou RTM. A primeira abordagem ao processo de RTM foi na década de 1940, mais precisamente em 1946 pelas forças navais norte americanas, onde botes de 28 pés de comprimento foram fabricados utilizando o método de injeção à vácuo, com peças feitas de fibra de vidro e

resina poliéster (POTTER, 1999). De início, o processo de RTM não obteve muito sucesso, uma vez que sua aplicação na indústria aeronáutica e aeroespacial, utilizando-se de injeção à vácuo especificamente, se apresentou problemático e impróprio devido à complexidade das peças. Durante a década de 1950, as pesquisas relacionadas ao RTM foram escassas, limitando-se a algumas patentes. Porém nas décadas seguintes de 1960 e 1970, houve um grande crescimento nas pesquisas e no uso do processo de RTM, sendo inclusive usado, dessa vez com sucesso, nas indústrias aeronáutica e aeroespacial.

Devido aos baixos custos de fabricação comparado com outros métodos, além da possibilidade de produção de peças complexas e bom acabamento, permitindo, consequentemente, peças com boas propriedades mecânicas, faz do processo de RTM uma excelente alternativa na produção de materiais compósitos para a indústria automotiva (Figura 7), uma vez que o uso de materiais compósitos para a produção de partes automotivas estruturais pode reduzir o peso total do automóvel e a emissão de CO₂ em 40% e 20%, respectivamente (GOURICHON et al., 2006).

Figura 7 – Peça de transporte público coreano fabricado por RTM

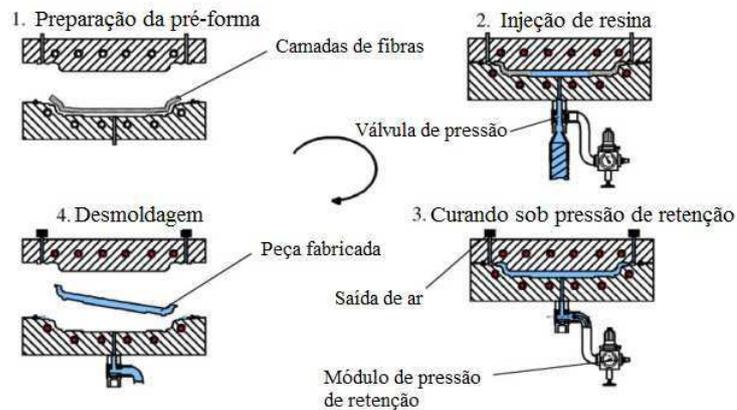


Fonte: Kim; Lee, 2002

O processo de RTM por ser uma variante do grupo de Moldagem Líquida, parte da mesma premissa de funcionamento: a pré-forma fibrosa seca é preparada e posicionada em um molde com entrada(s) de resina e saída(s) de ar, este é fechado fazendo com que a pré-forma seja comprimida, obtendo-se a fração volumétrica das fibras desejada. Em seguida, uma resina termorrígida líquida pré-catalisada é injetada no molde, preenchendo-o e impregnando as fibras. Após a cura, o molde é aberto e a peça é retirada (Fig 8). É

provável que após a desmoldagem, a peça fabricada precise passar por usinagem a fim de melhorar o acabamento.

Figura 8 – Processo de moldagem por transferência de resina



Fonte: Adaptado de Schmachtenberg et al., 2005

Uma característica do RTM é a baixa pressão de injeção. Amorim Jr. (2007) diz que a pressão de injeção varia de 0,1 bar até 1,7 bar, já Garay (2016), coloca que a pressão de injeção do RTM é normalmente entre 1 bar e 10 bar, e ainda completa dizendo que pressões acima dessa faixa podem causar arraste das fibras *fiber wash*, deflexão do molde e formação de vazios no material fabricado. Outras características desse processo são:

- Possibilidade de produção de peças de grande tamanho;
- Boa tolerância dimensional;
- Baixo custo de equipamentos para produção (molde e equipamentos necessários para injeção);
- Capacidade de produzir peças com *inserts*;
- Pequenos ciclos de tempo de produção;
- Possibilidade de automação do processo;
- Pode operar com vários tipos de resina;
- Capacidade de variação da fração volumétrica dos compósitos;
- Baixa emissão de solventes (opera com molde fechado), causando baixo impacto ambiental.

O processo de RTM vai mais afundo do que apenas injetar resina no molde, para uma correta aplicação do processo, várias atividades devem ser executadas e alguns cuidados devem ser tomados. Por esse motivo, O processo de RTM possui três etapas

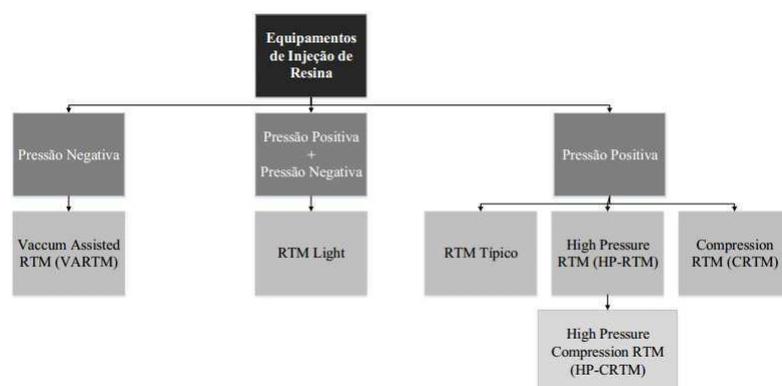
distintas de execução. Antes de injetar resina no molde para a produção das placas, há a necessidade de preparação do molde e da pré-forma para a injeção, em outras palavras, primeiramente deve-se preparar o molde, a pré-forma, o sistema de injeção, dentre outras atividades, que vamos chamar de atividades de pré-processamento. A segunda etapa consiste na injeção propriamente dita, além de outras atividades, e vamos chamá-la de atividades realizadas durante o processamento. Por último, ocorre o processo de cura e, posteriormente, a desmoldagem da peça, entre outras atividades, assim, vamos chamar essa etapa de atividades pós-processamento. Tanto a primeira quanto a segunda etapas serão exploradas com mais detalhes durante a seção 3.2.3 deste mesmo trabalho.

2.3.1 RTM tradicional

O modelo tradicional de RTM consiste na utilização de um sistema de injeção de resina com pressão positiva. Porém, algumas variações no processo de RTM surgiram a partir de mudanças no sistema de injeção original como: no tipo de molde, variação na pressão, etc. Tais mudanças foram implantadas ao longo dos anos como meio de melhorar a qualidade, tanto do processamento quanto da peça final, reduzir custos.

Assim sendo, dependendo da variação do processo RTM utilizado, pode haver a necessidade da instalação de outros componentes de auxílio, tais como: bomba de vácuo, prensa hidráulica e até mesmo modificar o princípio de acionamento (hidráulico, elétrico ou pneumático) (PARNAS et al., 1994; HALME, 2002; AMORIM-JR., 2007; SILVA, 2010). Desta forma, é interessante uma divisão nos métodos de injeção de acordo com o sentido da pressão utilizada e seus referidos processos (Figura 9).

Figura 9 – Processos de fabricação de compósitos de acordo com o tipo de pressão utilizada

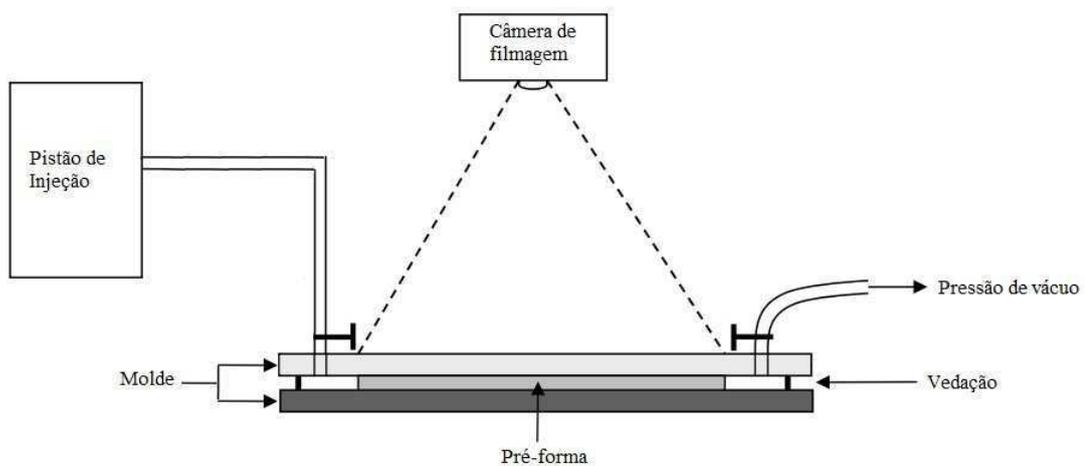


Pela Figura 9, vê-se que além do RTM tradicional, três variações dele se utilizam apenas da pressão positiva de injeção, são os HP-RTM, HP-CRTM e CRTM, ou seja, não há nenhum dispositivo ligado à saída do molde. O HP-RTM e o HP-CRTM utilizam altos valores de pressão durante a injeção de resina, porém o HP-CRTM utiliza uma prensa na parte superior do molde para comprimir as fibras após a injeção para aumentar a impregnação da resina às mesmas, e o CRTM se utiliza do mesmo princípio de compressão da parte superior do molde do processo de HP-CRTM, porém, sem a utilização de altos valores de pressão de injeção. Há ainda outros dois processos que utilizam variações no método de injeção (VARTM e RTM Light), adicionando pressão de vácuo ou pressão negativa ao sistema (valor abaixo da pressão atmosférica), caso do RTM light, que usa tanto pressão positiva quanto pressão negativa, e utilizando apenas pressão de vácuo para fazer a injeção de resina, que é o caso do VARTM, que não se utiliza de nenhum sistema para gerar pressão positiva para injeção. São exatamente esses dois últimos métodos que serão estudados mais afundo neste trabalho.

2.3.2 RTM Light

O RTM Light (Figura 10), é um processo mais recente quando comparado com as outras variações do RTM tradicional.

Figura 10 – Ilustração do processo de RTM Light



Fonte: Adaptado de Gourichon et al., 2005

De acordo com Garay (2010), o RTM light utiliza pressão positiva e pressão a vácuo simultaneamente para a injeção, distinguindo do processo convencional de RTM, ou seja, nesse processo há um equipamento responsável por injetar resina no molde com pressão

positiva e outro que vai gerar pressão negativa responsável pela retirada de ar e vedação do molde. Ambas as pressões possuem baixos valores, próximo a 0,7 bar para a pressão positiva de injeção e 0,6 bar para a pressão a vácuo (GOURICHON et al., 2006).

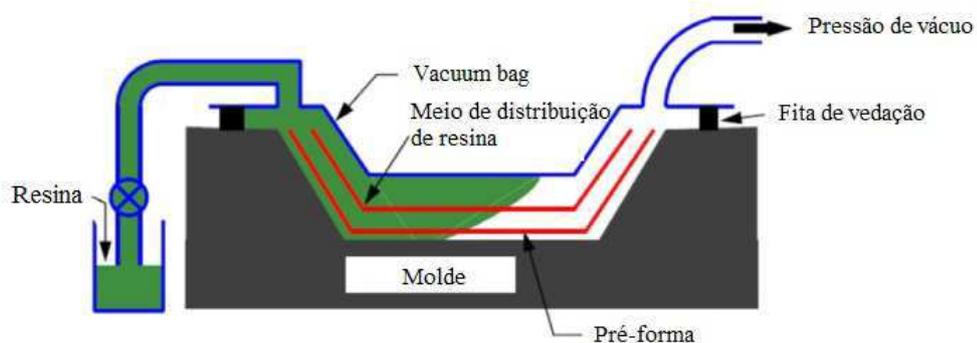
Como esse processo é feito sob baixa pressão, o molde não costuma sofrer deformação e apresenta boa durabilidade, além de possuir baixo custo ao ser comparado com o de outros processos, podendo ser fabricados a partir de materiais alternativos e sem a necessidade de grande espessura ou de reforço estrutural.

É aparentemente um processo simples, porém os principais parâmetros do processo (pressão de injeção e vácuo, eficiência da vedação do molde e matérias primas) devem ser bem definidos para obtenção de êxito em sua execução (GARAY, 2016). Comparado com o RTM tradicional, possui a vantagem de baixo custo dos equipamentos e molde, mas esbarra na impossibilidade de fabrico de peças com alta fração volumétrica, já que seus equipamentos não foram projetados para suportar pressões elevadas.

2.3.3 VARTM

Vacuum Assisted Resin Transfer Molding ou VARTM é um processo que utiliza apenas pressão vacuométrica como método de infusão de resina no molde, utilizando-se de um equipamento específico para realizar tal atividade (Figura 11). A pressão a vácuo é também a responsável pela retirada de ar do molde e, em alguns casos, ajuda no fechamento do molde, sendo um dos dispositivos de vedação do sistema.

Figura 11 – Ilustração do processo de VARTM



Fonte: Adaptado de Kuentzer et al. (2007)

É possível perceber na Figura 11 que nesse processo, o reservatório com a resina pré-catalisada é vinculado à entrada ou entradas do molde, visto que dependendo das

dimensões e complexidade da peça, pode haver mais de uma entrada, e fica aberto para o meio para que sofra os efeitos da pressão atmosférica. O equipamento que gera a pressão a vácuo (compressor) fica diretamente ligado à(s) saída(s) de ar do molde. Quando o sistema entra em funcionamento, o equipamento vai gerar uma pressão a vácuo, que implica em um gradiente de pressão, fazendo com que o ar seja retirado de dentro do molde primeiramente para que depois haja o escoamento de resina do reservatório para o interior do molde e posteriormente para as saídas do molde (MIRANDA, 2015).

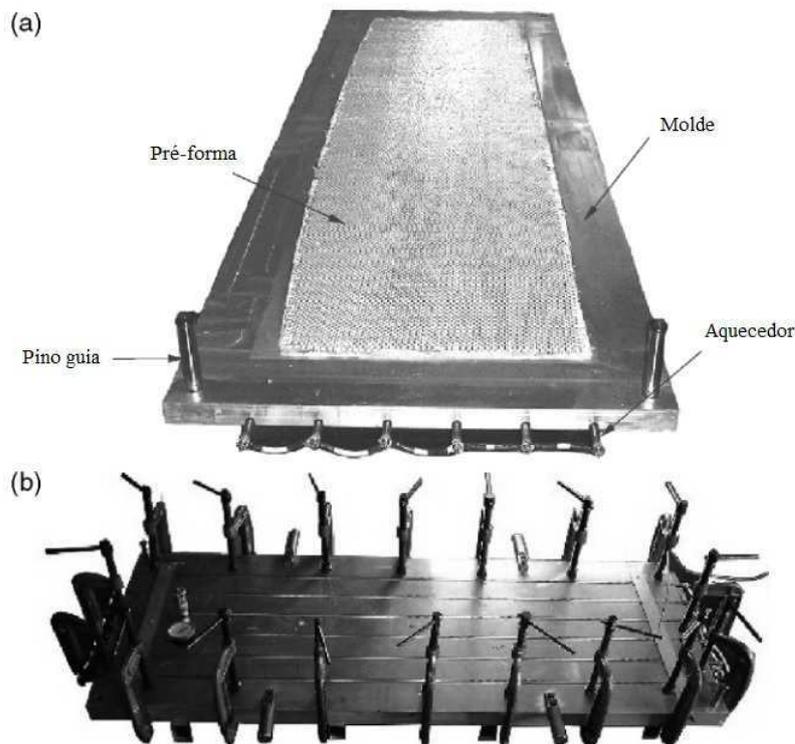
Algumas vantagens como baixo custo de processo e projeto do molde, fazem o processo de VARTM ser atrativo quando comparado com processos como laminação manual e autoclave. Boas propriedades mecânicas, baixo teor de vazios, elevado teor de fibras e por utilizar molde fechado, não há emissão de estireno para o meio, reduzindo danos ao ambiente e à saúde (GARAY, 2010).

2.4 MOLDE

Para que haja sucesso na execução do processo de RTM, apenas a escolha da matriz polimérica, o tipo de reforço ou os parâmetros de injeção não são o bastante. O molde utilizado é de suma importância para se obter êxito no processo de fabricação das peças, sendo ele o responsável pela produtividade e qualidade da peça final.

Ao se projetar um componente, uma das primeiras e mais importantes considerações a serem feitas é a de qual material usar. Para se projetar um molde, a premissa é a mesma, sendo os metais e os polímeros, os tipos de materiais preferidos para esse tipo de concepção. De acordo com Thorvaldsen (2012), o molde é uma ferramenta usada para dar forma a uma substância. No mundo dos compósitos, o molde é uma ferramenta onde será feita a laminação da peça, ou seja, o laminado vai ter a exata aparência do molde em pelo menos um dos lados. Sloan (2011) diz que a qualidade da peça produzida é dada pelo molde, de modo que a forma e o acabamento da peça final não podem ter uma qualidade superior que a do molde. A Figura 12 ilustra um molde usado no processo de RTM, aberto com a pré-forma posicionada e fechado com grampos tipo C.

Figura 12 – Molde para processamento por RTM: (a) parte inferior do molde, (b) travamento do molde realizado com grampos tipo-C



Fonte: Adaptado de Kim; Lee, 2002

Em moldes fechados vão existir duas partes básicas, a parte inferior normalmente fixa, também chamada de fêmea e a parte superior que normalmente possui certa mobilidade, também chamada de macho. É importante salientar que é comum utilizar materiais diferentes nas partes superior e inferior do molde, sendo a utilização de um material translúcido em pelo menos uma das partes, um meio de analisar e estudar parâmetros essenciais como escoamento de resina dentro do molde, tempo de preenchimento e permeabilidade. O bom projeto das partes do molde é uma boa maneira de controlar as dimensões da peça.

Um dos maiores desafios para a escolha do material do molde é a expansão térmica, pois existem várias técnicas de cura para diferentes materiais. Alguns são curados em temperatura ambiente, é o caso desse projeto. Em outras técnicas, por exemplo, o processo de cura é feito em 60°C, mas esse valor pode chegar até a 500°C, exigindo diferentes características para o molde e seu material (THORVALDSEN, 2012).

Abaixo, na Tabela 1 apresentada por Miranda (2015), estão listados alguns dos materiais mais usados para fabricação de moldes e algumas características relevantes a

qual foram dadas pontuações de 1 a 10, sendo 1 o menor valor e 10 o maior valor para determinada característica.

Tabela 1 – Materiais comumente usados em projetos de moldes

Materiais	Custo	Condutividade Térmica	Durabilidade	Qualidade superficial
Aço	10	5	8	10
Alumínio	8	10	6	7
Níquel	9	5	10	10
Laminado po- limérico	5	4	5	7

Fonte: Miranda, 2015

Com o material do molde escolhido, é possível definir outros parâmetros importantes do mesmo, como as dimensões, posicionamento e número de entradas de resina e saídas do molde, além do tipo de vedação a ser adotado. Amorim Jr. (2007) coloca que em sistemas de RTM mais sofisticados, o molde possui um sistema de aquecimento e controle de temperatura para melhorar e deixar uniforme o escoamento de resina e molhabilidade das fibras, além de um mecanismo de cura por toda extensão do mesmo. Porém, há muitas dificuldades em utilizar tais sistemas e vários cuidados devem ser tomados. Dessa forma, nenhum sistema de aquecimento e controle de temperatura do molde foi adotado nesse projeto.

A introdução de resina no molde pode ser feita de duas maneiras: ponto(s) de injeção ou por entrada em forma de filme. Assim sendo, a escolha do tipo de injeção do molde, bem como a quantidade de pontos de entrada, disposição e dimensões, vai depender do tipo da peça, sua geometria, permeabilidade da pré-forma e características da resina (AMORIM Jr., 2007).

Além das entradas de resina, as saídas de ar também devem ser projetadas. No RTM tradicional, o ar é retirado do molde com o avanço da resina. No VARTM e no RTM Light, o ar é retirado do molde antes de resina ser injetada no mesmo, utilizando-se de pressão a vácuo. Independente de ser RTM tradicional, VARTM ou RTM Light, as saídas de ar devem ser projetadas de forma que o ar não fique aprisionado dentro do molde, evitando a perda das propriedades mecânicas das peças projetadas.

Quando a pré-forma é montada e o molde é fechado, o ar começa a ser retirado do interior do molde ao mesmo tempo em que a resina começa a ser injetada, sendo esse o princípio básico do processo de RTM. Mas vale lembrar que a pré-forma deve estar isolada

do meio no momento da injeção, evitando a entrada de ar e vazamento de resina do molde, necessitando do desenvolvimento de um sistema de vedação e travamento do molde. Os métodos mais comuns de vedação dos moldes são através de *o-ring*, silicone ou borracha, já o sistema de travamento do molde é feito através de grampos tipo C ou parafusos.

2.5 PERMEABILIDADE

Quando a fabricação de materiais compósitos está relacionada com algum processo de moldagem líquida, nesse projeto em específico, o processo de RTM, um dos parâmetros mais importantes a serem estudados é a dinâmica do fluido no interior do molde. É sabido que quanto melhor for a adesão na interface fibra/matriz, melhores serão as propriedades dos materiais compósitos fabricados, e para que a fibra tenha uma boa adesão com a matriz, além de reagirem bem entre si, é de grande importância que as fibras sejam completamente “molhadas” pela resina líquida durante o processo de fabricação, diminuindo assim a quantidade de vazios da peça e evitando *dry-spots*.

A formação de vazios em RTM é influenciada por alguns fatores: Bolhas existentes na resina durante a injeção, formação de vazios durante a impregnação e crescimento do vazio durante a cura da peça fabricada (LEE et al., 2002). Amorim Jr. (2007) coloca que a molhabilidade das fibras dependem do tempo de contato e da energia superficial existente entre a fibra e a matriz. Então, além de fatores já citados para a otimização do processo de RTM, como interação fibra/matriz, pressões de injeção e de vácuo, geometria e posicionamento dos pontos de injeção de resina e de saída de ar, além das características da resina, a permeabilidade do meio fibroso surge como um fator de extrema importância para o estudo e otimização deste processo de fabricação. Pode-se afirmar ainda que se a resina e os parâmetros de processamento forem mantidos constantes, a permeabilidade torna-se a principal variável do processo de RTM.

Permeabilidade é a resistência ao escoamento de um fluido em meio fibroso, sendo ela uma propriedade do material (AMORIM Jr. 2007; GARAY, 2016). Em outras palavras, é a partir da permeabilidade que se tem uma indicação sobre a facilidade com a qual o fluido escoar através dos poros do material. Como já dito, a molhabilidade e impregnação das fibras pela resina, vão influenciar diretamente nas propriedades mecânicas do material, sendo responsáveis pela obtenção do máximo rendimento do mesmo. Uma técnica utilizada

para facilitar a impregnação das fibras e conseqüentemente obtenção de maiores valores da permeabilidade no meio poroso é molhar as fibras previamente *pre-wetted* à injeção. Amico e Lekakou (2001) coloca em sua pesquisa que um aumento na permeabilidade foi observado para peças cuja pré-forma foi previamente molhada quando comparadas com peças cuja pré-forma estava seca.

Outros fatores de relevância para a permeabilidade em processamento por RTM são:

- Método de fluxo de resina líquida;
- Compressibilidade das fibras;
- Viscosidade do fluido;
- Porosidade;
- Fração volumétrica.

2.5.1 Métodos de fluxo

Em RTM, duas metodologias de fluxo são utilizadas para injetar resina no molde: retilínea e radial. O método de fluxo retilíneo é uma maneira mais simples de determinar a permeabilidade do meio poroso, pois a medição é feita na direção do fluxo de maneira unidimensional (Figura 13).

Figura 13 – Fluxo retilíneo de resina no processo de RTM

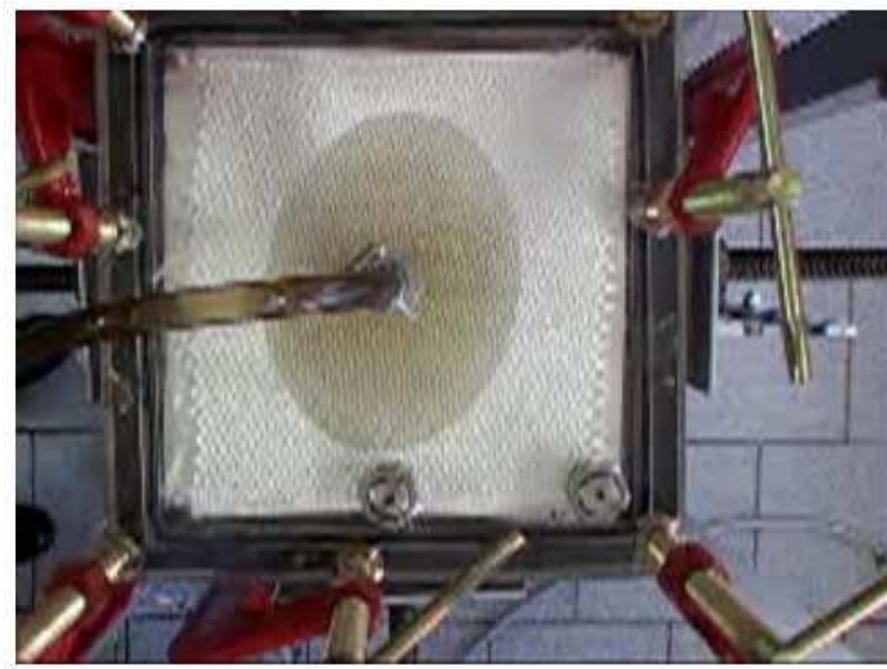


Fonte: Adaptado de Gourichon et al., 2005

Pela Figura 13 percebe-se que a frente de escoamento retilínea possui um fluxo unidimensional que segue constante até o total preenchimento do molde, com o ponto de entrada localizado próximo a uma das paredes do molde.

Já no método radial, a medição da permeabilidade é mais complexa que no método retilíneo por se tratar de um estudo bidimensional, porém, possui as vantagens de poder determinar simultaneamente as componentes da permeabilidade e entender os caminhos do fluxo nos reforços (Fig 14).

Figura 14 – Fluxo radial de resina no processo de RTM



Fonte: Amorim Jr., 2007

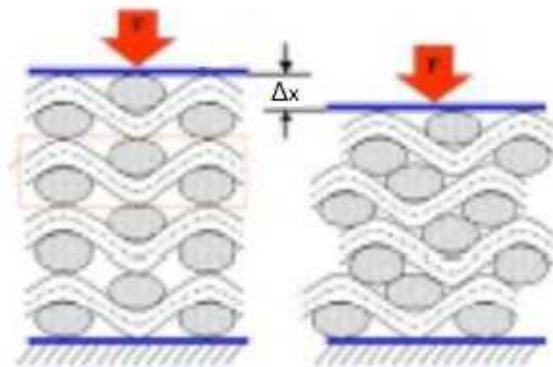
A Figura 14 mostra que a entrada de resina no fluxo radial está posicionada no centro do molde, fazendo com que o escoamento seja bidimensional. Embora não possua um local específico, os pontos de saída de ar normalmente ficam posicionados em um plano diferente dos pontos de entrada de resina.

De acordo com Amico (2001) é preferível se utilizar no processo de RTM o método de injeção com fluxo retilíneo ao invés do método de injeção com fluxo radial por causa de fatores determinantes como simplicidade da montagem, além de ser um método mais confiável e mais fácil de obter resultados satisfatórios.

2.5.2 Compressibilidade das fibras

A compressibilidade das fibras é um fator de grande influência no valor da permeabilidade, uma vez que ela pode alterar a porosidade da pré-forma. A Figura 15 mostra que ao se comprimir as fibras, há um fechamento dos poros, e conseqüentemente, uma diminuição no valor da permeabilidade.

Figura 15 – Esquematização da compactação de um tecido semelhante a que ocorre no processo de RTM



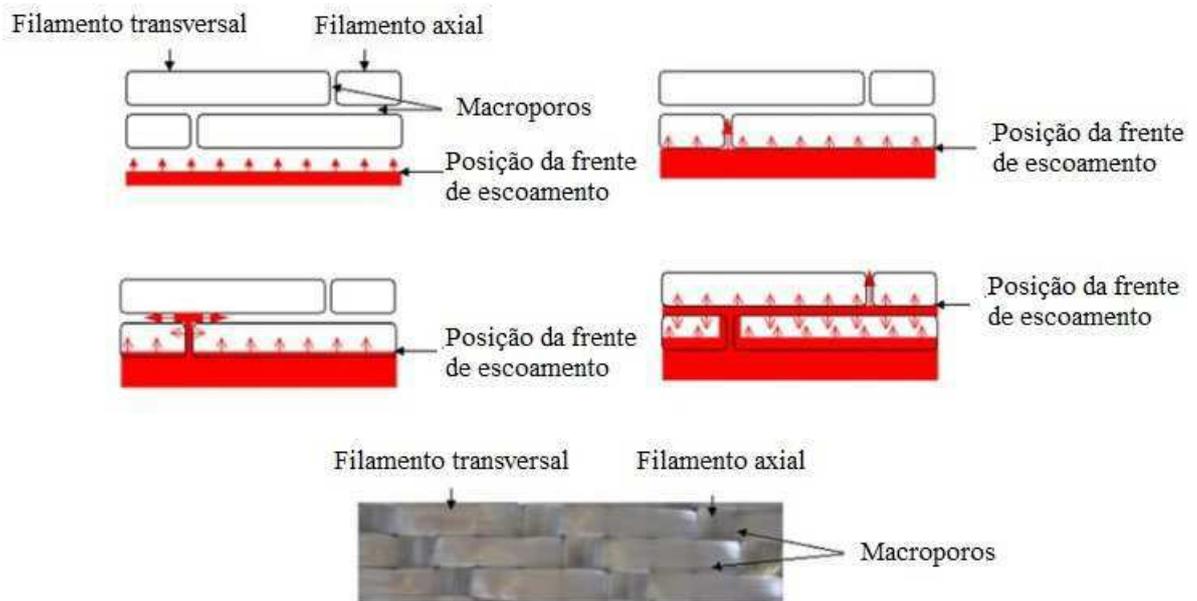
Fonte: Amorim Jr., 2007

É importante ressaltar que no processo de RTM, o tipo da fibra e o número de camadas utilizadas na pré-forma vão ser fatores determinantes na compressibilidade das fibras. Fibras unidirecionais, bidirecionais e aleatórias possuem compressibilidades diferentes (AMORIM Jr., 2007 et al.).

2.5.3 Porosidade

Normalmente as fibras usadas na fabricação de materiais compósitos possuem uma arquitetura complexa com relação ao escoamento de um fluido através delas. Os tecidos utilizados como material de reforço possuem diferentes tipos de entrelaçamentos entre as fibras, e estas últimas são constituídas de várias microfibras. Um meio poroso é uma fase sólida contínua que possui muitos espaços vazios, ou poros, em seu interior (Fig 16).

Figura 16 – Esquematização da distribuição do escoamento através dos filamentos

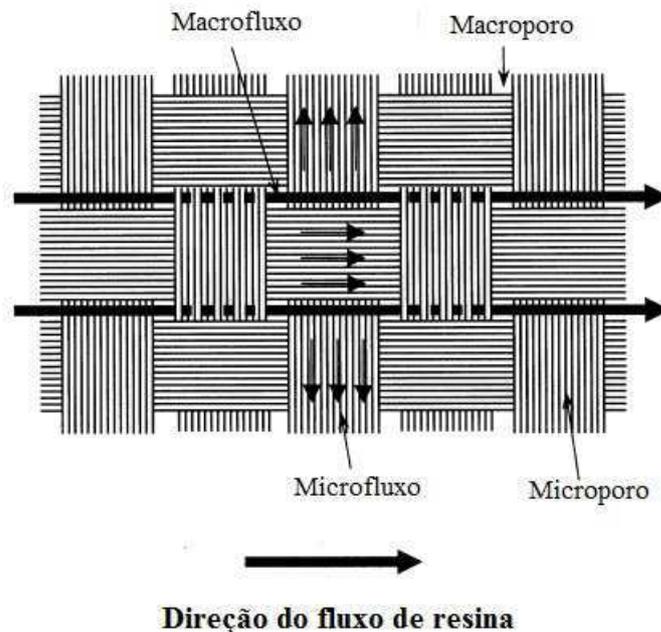


Fonte: Adaptado de Gourichon et al., 2005

A Figura 16 ilustra o escoamento em meio poroso e as dificuldades encontradas pelo fluido durante o processo. Assim sendo, nos tecidos utilizados no processo de RTM existem dois tipos de regiões de escoamento conhecidos como rede porosa, uma região com baixa resistência ao escoamento, constituindo os espaços entre as fibras, chamada de macroporos e uma região com alta resistência ao escoamento, constituindo os espaços entre os filamentos, chamados de microporos. Autores como Rodrigues (2004) consideram uma terceira região de escoamento em meio poroso chamada de mesoporos, porém, como meio de simplificar o entendimento acerca do assunto, apenas os dois primeiros grupos são considerados, e ainda coloca que enquanto os macroporos têm maior influência na resistência e permeabilidade, os microporos exercem maior influência na retração e fluência do escoamento.

Uma vez que duas regiões de escoamento são consideradas, vão existir dois tipos de fluxo de resina durante o processo: o macrofluxo, que é o escoamento de resina entre os macroporos do tecido e o microfluxo, sendo ele o escoamento entre os microporos do tecido (Fig 17).

Figura 17 – Representação esquemática do fluxo da resina líquida através da pré-forma



Fonte: Adaptado de Lee et al., 2002

Lee (2002) observou em seu estudo que a resina líquida escoava através dos macroporos pelo diferencial de pressão existente no molde e o escoamento através dos microporos ocorre pela pressão capilar. Assim, pode-se concluir que se a pressão capilar for alta, os microporos vão ser mais rapidamente preenchidos que os macroporos.

Lekakou et al. (1996) mostra em sua pesquisa a influência que a porosidade exerce na permeabilidade para o escoamento retilíneo (Tabela 2).

Tabela 2 – Influência da porosidade no valor da permeabilidade no escoamento retilíneo

Nº de camadas	Porosidade, ε	Vazão (constante)($m^3 \cdot s^{-1}$)	Permeabilidade(m^2)
5 (secas)	0,50	$6,76 \times 10^{-7}$	$3,601 \times 10^{-9}$
10 (secas)	0,48	$6,76 \times 10^{-7}$	$1,306 \times 10^{-9}$
15 (secas)	0,44	$6,76 \times 10^{-7}$	$1,060 \times 10^{-9}$
1 (pre-molhadas)	0,55	$67,6 \times 10^{-7}$	$1,496 \times 10^{-8}$
2 (pre-molhadas)	0,55	$67,6 \times 10^{-7}$	$1,307 \times 10^{-8}$
3 (pre-molhadas)	0,46	$27,04 \times 10^{-7}$	$5,908 \times 10^{-9}$
			$5,792 \times 10^{-9}$

Fonte: Adaptado de Lekakou et al., 1996

Existem duas maneiras de alterar o valor da porosidade em RTM: a primeira é modificando a espessura do molde e mantendo constante o número de camadas de fibra na pré-forma, a segunda é manter a espessura do molde constante e variar o número

de camadas na pré-forma, alterando a fração volumétrica. Qualquer que seja o meio utilizado, a porosidade da pré-forma será modificada e conseqüentemente, os valores da permeabilidade também serão.

2.5.4 Modelo físico-matemático

O modelo físico-matemático comumente utilizado para o estudo do escoamento de um fluido em meio poroso é a Lei de Darcy (Equação 1), proposta pelo cientista Henry Darcy em 1856.

$$u_x = \frac{Q_x}{A} = -\frac{K}{\mu} \frac{dP}{dx} \quad (1)$$

Onde:

u_x = velocidade superficial do fluido ($\frac{m}{s}$);

Q = vazão volumétrica do fluido ($\frac{m^3}{s}$);

A = área da secção transversal da cavidade do molde normal à direção do fluxo (m^2);

$\frac{dP}{dx}$ = gradiente de pressão do fluido sobre a amostra ($\frac{Pa}{m}$);

μ = viscosidade do fluido (cP);

K = Permeabilidade do meio poroso (m^2).

Vários autores (AMICO; LEKAKOU, 2001; LEE et al., 2002; SCHMACHTENBERG et al., 2005; AMORIM-JR., 2007; GARAY, 2016) utilizam a Lei de Darcy como base para o estudo inicial da permeabilidade em meio poroso em processamentos via RTM, sendo ela bastante presente na literatura de fluidodinâmica do meio poroso. Ao analisar a Eq. 1 percebe-se que a velocidade do fluido é proporcional ao gradiente de pressão e inversamente proporcional à viscosidade do fluido, uma vez que o escoamento ocorre devido a fatores como pressões de injeção e de vácuo, e tem sua fluidez dificultada pela viscosidade do mesmo. Amorim Jr. (2007) diz que é válido ressaltar que algumas considerações devem ser feitas acerca da Lei de Darcy no processo de RTM e algumas hipóteses devem ser respeitadas:

- O fluido é newtoniano, incompressível e seu processo de cura não é iniciado até o total preenchimento do molde;
- A viscosidade é constante;
- A pressão ou vazão são constantes;
- Baixo valor do número de Reynolds ($Re < 0,1$);
- Microporos são ignorados, conseqüentemente, microfluxo também é;
- O material poroso é indeformável e não há movimento do mesmo;
- As Forças gravitacionais e capilares são ignoradas.

Sobre o ultimo tópico, Amico (2001) diz que no processo de RTM, a pressão capilar não deve ser desconsiderada a não ser que ela seja desprezível quando comparada com a pressão de injeção. Lee (2002) explica que pelo escoamento da resina no processo de RTM ser em meio poroso, a velocidade do fluido deve corresponder àquela nos canais formados pelos poros, sendo chamada de velocidade intersticial (v_x). Assim, pela Equação 2 é possível visualizar a velocidade superficial u_x em função da porosidade (ε).

$$u_x = v_x \varepsilon \quad (2)$$

Logo,

$$u_x = \frac{dx}{dt} \varepsilon \quad (3)$$

Substituindo (3) em (1) e integrando pelo método de separação de variáveis, tem-se:

$$x^2 = \frac{2K}{\varepsilon \mu} P t \quad (4)$$

Onde: x = distância unidimensional percorrida pelo fluido (m);

ε = porosidade;

P = pressão de injeção constante de resina (Pa);

t = tempo de injeção (s).

A Equação 4 é a principal equação derivada da lei de Darcy para determinação da permeabilidade com frente de fluxo retilíneo para o método de RTM utilizando-se de um sistema com pressão constante. Porém, como neste trabalho a pré-forma é híbrida, com partes permeáveis e impermeáveis, onde as fibras são o meio poroso permeável e os *inserts* são impermeáveis, o uso da Equação 4 tem de ser feito com cuidado, uma vez que ela deve ser usada em uma pré-forma completamente porosa.

A porosidade (ε) é obtida a partir da fração volumétrica (V_f) da pré-forma (Equação 5):

$$\varepsilon = 1 - V_f \quad (5)$$

Já a fração volumétrica das fibras pode ser obtida pela Equação 6, proposta por Amorim Jr. (2007) apud Ferreira (1994).

$$V_f = W_f \frac{\rho_c}{\rho_f} \quad (6)$$

Onde:

W_f = fração de massa das fibras;

ρ_c = densidade do compósito;

ρ_f = densidade da fibra.

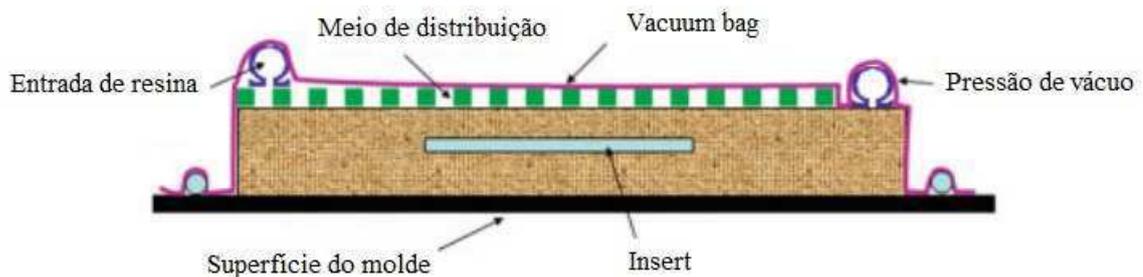
2.6 MATERIAIS COMPÓSITOS MULTIFUNCIONAIS COM INSERTS EMBEBIDOS

O estudo de materiais compósitos foi iniciado na primeira metade do Século XX, de lá pra cá muitos avanços foram feitos, muitas pesquisas realizadas e muitas teorias acerca do assunto foram validadas. Até o presente momento os estudos sobre os compósitos obtiveram êxito ao produzir materiais com boas propriedades mecânicas, nas mais variadas áreas de aplicação, com custo de fabricação viável e, acima de tudo, desenvolver métodos com boa capacidade de produção. Ainda assim, muito sobre esse assunto há de ser estudado. No Século XXI, por exemplo, o foco está em aumentar a utilidade dos materiais compósitos, fazendo destes, materiais multifuncionais. A variedade de compósitos multifuncionais é grande, e a maneira mais comum para se conseguir tal classificação é inserir componentes para além da fibra ou da matriz polimérica que é a composição mais comum em materiais compósitos.

De acordo com Lawrence et al. (2007), esses componentes adicionais servem tanto para aperfeiçoar as propriedades inerentes dos compósitos, quanto para adicionar funcionalidades ao material, ou seja, um *insert* colocado na pré-forma pode tanto melhorar uma propriedade já existente do material, quanto conferir uma nova funcionalidade àquele material. Alguns exemplos seriam *inserts* aplicados para proteção contra interferência eletromagnética ou EMI shielding (CHIZARI et al., 2017), camadas de material cerâmico para aplicações com chamas (HANU et al., 2004), Compósitos com *inserts* de metal para aplicação automotiva (GEBHARDT; FLEISCHER, 2014), etc.

Pelo ponto de vista do escoamento, *inserts* são classificados como permeáveis ou impermeáveis. Os *inserts* permeáveis normalmente não vão interferir na infusão de resina no pré-molde, uma vez que a resina vai conseguir atravessá-lo. Já os *inserts* impermeáveis vão bloquear o escoamento de resina, fazendo com que a mesma tenha que encontrar outros caminhos para fluir. Sendo assim, cuidados devem ser tomados ao se utilizar *inserts* impermeáveis embebidos na pré-forma. Nesse projeto, a pré-forma é composta pelas camadas de fibra e *inserts* dispostos entre as camadas de fibra. A Figura 18, adaptada de Lawrence et al. (2007), faz uma demonstração teórica do processamento de compósito com o *insert* posicionado no meio da pré-forma pelo método de modelagem por transferência de resina com bolsa de vácuo (vacuum bag RTM).

Figura 18 – Processamento de compósito com *insert* embebido



Fonte: Adaptado de Lawrence et al., 2007

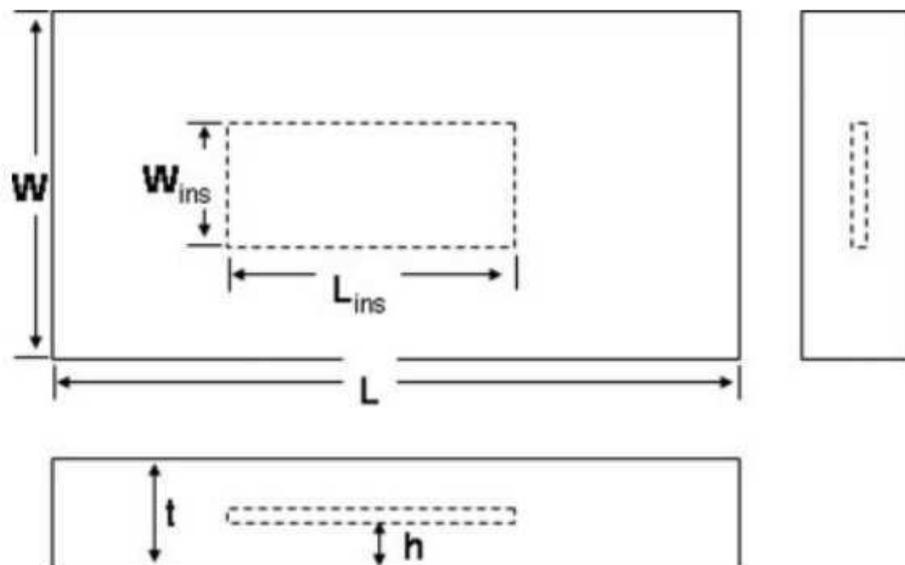
Note que a Figura 18 apresenta um processo muito próximo dos processos adotados nesse trabalho, uma vez que sua diferença consiste no uso de uma bolsa de vácuo ao invés de um componente rígido na parte superior do molde. Porém, o que realmente chama atenção na Figura 18 é a presença do *insert* que, nessa composição, vai dificultar o preenchimento de resina na região oposta ao plano da injeção. Lawrence et al. (2007) desenvolveu uma pesquisa sobre o estudo de vazios ao se introduzir um objeto dentro

uma pré-forma composta por tecido de fibras e constatou que a variação nas dimensões do *insert* teve influência na criação de vazios próximo ao *insert*. Lawrence et al. (2007) também utiliza de um meio de distribuição *distribution media*, mostrado na Figura 18, sendo um material com alta permeabilidade posicionado entre a pré-forma e a bolsa de vácuo com a finalidade de agilizar o processamento

A utilização desse meio de distribuição permite um fácil escoamento da resina, cruzando toda a superfície da pré-forma para então escoar através da espessura da mesma, reduzindo o tempo de injeção e preenchimento do molde no processamento por VARTM. Entretanto, o sucesso do processamento independe da utilização desse meio de distribuição.

Ao se dimensionar os *inserts* a serem introduzidos na pré-forma alguns cuidados deve ser tomados. Lawrence et al. (2007) em seu trabalho não especifica uma espessura para os *inserts*, diz apenas que devem ser suficientemente "finos". Na Figura 19 é possível ver o desenho do *insert* e os parâmetros mais importantes no seu dimensionamento: comprimento do molde (W), comprimento do insert (W_{ins}), largura do molde (L), largura do *insert* (L_{ins}), espessura do molde (t) e altura do posicionamento do *insert* entre as camadas na pré-forma (h).

Figura 19 – Desenho do *insert* e seus principais parâmetros de dimensionamento

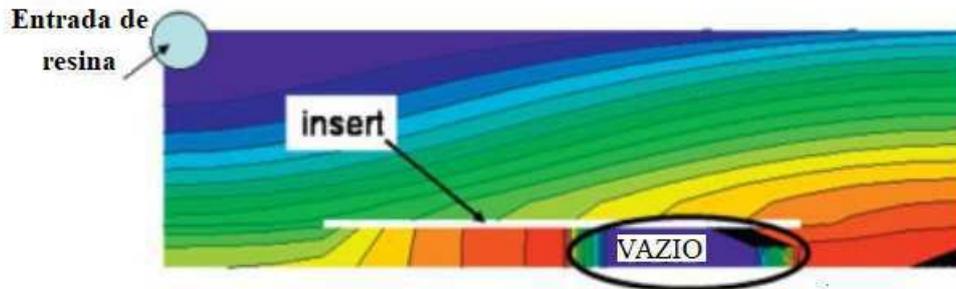


Fonte: Lawrence et al., 2007

Quando a infusão de resina na placa tem início, o escoamento tende a ser bloqueado pelo *insert*, criando regiões na placa onde não há o molhamento das fibras pela resina e

resultando em peças defeituosas. Lawrence et al. (2007) fez uma simulação mostrando a intensidade do escoamento na pré-forma e a formação do vazio (Figura 20).

Figura 20 – Simulação de processamento de compósito com *insert* embebido

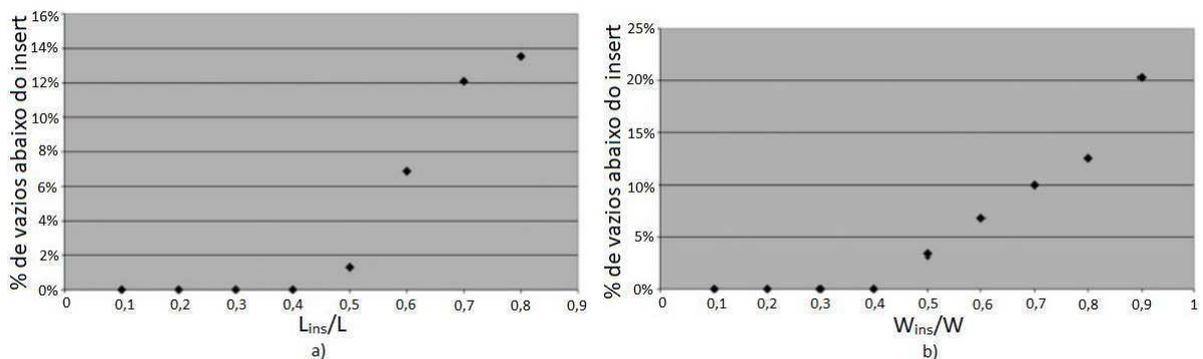


Fonte: Adaptado de Lawrence et al., 2007

Note pela Figura 20 que um vazio devido ao bloqueio do escoamento causado pela presença do *insert* no molde.

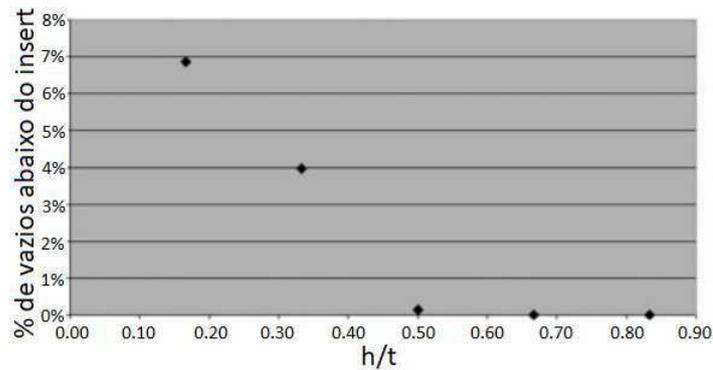
Lawrence et al. (2007) também fez análises por simulação da influência da variação das dimensões e do posicionamento dos *inserts* na formação de vazios na peça, mostrado nas Figuras 21 e 22.

Figura 21 – influência da variação das dimensões do *insert* na formação de vazios: (a) razão do comprimento do insert (W_{ins}) pelo comprimento do molde (W) e (b) variação da largura do insert (L_{ins}) pela largura do molde (L)



Fonte: Adaptado de Lawrence et al., 2007

Figura 22 – influência da variação da posição do *insert* na formação de vazios

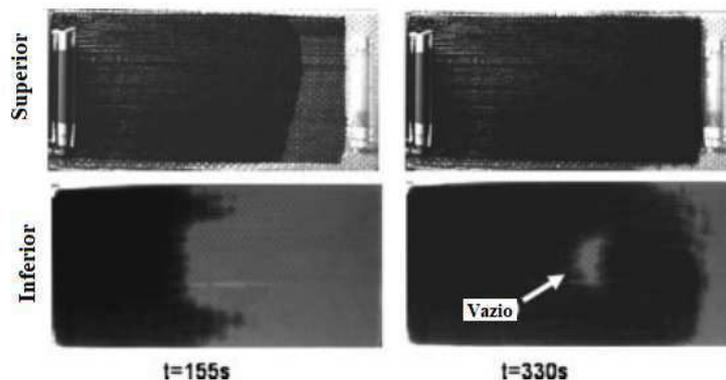


Fonte: Adaptado de Lawrence et al., 2007

É notável que ao se aumentar a razão do comprimento, mostrado na Figura 21(a) ou da largura, mostrado na Figura 21(b), do *insert* em relação à pré-forma, houve aumento na porcentagem de vazios abaixo do *insert*. Do mesmo jeito que quanto mais distante o *insert* é posicionado do ponto de injeção, maior é a porcentagem de vazios formados abaixo do mesmo (Figura 22).

Por fim, Lawrence et al. (2007) montou um experimento como meio de comparação e validação dos resultados, com pré-forma composta por 8 camadas de fibra de vidro e um *insert* posicionado entre as camadas 2 e 3, onde o fluxo da frente de escoamento do experimento é mostrado na Figura 23.

Figura 23 – Fluxo de frente de escoamento em pré-forma com um *insert* impermeável embebido

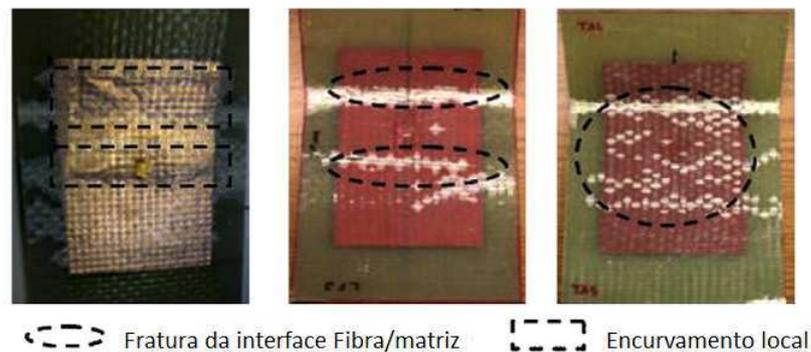


Fonte: Adaptado de Lawrence et al., 2007

Na Figura 23 é possível perceber que houve formação de vazio na área do *insert* oposta ao ponto de injeção, criando uma região na superfície do molde onde não houve molhabilidade completa das fibras, corroborando com os resultados encontrados na simulação.

Adu-Obaid e Yarlagadda (2008) desenvolveu um projeto semelhante a esse, analisando o comportamento mecânico de materiais compósitos de fibra de vidro fabricados pelo processo de VARTM com *inserts* de cobre embebidos em ensaios de tração, compressão e flexão. A escolha do cobre como material do *insert* se deu como uma tentativa de melhorar as propriedades de condutividade do compósito, uma vez que o cobre é conhecido por possuir ótimas propriedades condutivas. Assim, dois tipos de compósitos com *inserts* embebidos foram fabricados, no primeiro o *insert* não possuía compatibilidade química com a resina, já o segundo possuía compatibilidade química através de tratamento, de modo que o comportamento mecânico de cada compósito pudesse ser analisado (Figura 24).

Figura 24 – Placas de material compósito com *inserts* de cobre embebidos após ensaio de flexão



Fonte: Adaptado de Adu-obaid e Yarlagadda, 2008

Adu-Obaid e Yarlagadda (2008) ainda coloca que a pobre adesão entre o cobre e o compósito nas amostras sem tratamento (Copper-AS), foi o principal motivo da redução dos valores das propriedades mecânicas encontrado nas amostras do compósito com *insert* embebido quando comparado com as amostras do compósito sem o *insert*, embora as propriedades de condutividade tenham melhorado.

Lembrando que as propriedades mecânicas de um compósito vão depender diretamente da qualidade da interface fibra/matriz, ou para esse caso, interface fibra/matriz/*insert*. Uma vez que é observada uma interface de baixa qualidade entre os componentes, é esperado que os compósitos processados apresentem propriedades mecânicas pobres.

Adu-Obaid e Yarlagadda (2008) concluiu que nos ensaios de tração, a presença de *inserts* causou uma pequena redução no módulo e na tensão elástica, mas houve um aumento na resistência e na tensão de falha. Já a variação nas dimensões e tratamento químico dos *inserts* não causaram variação nos resultados quando as amostras foram submetidas a

esforços trativos. Por outro lado, quando submetidas a esforços de compressão, as amostras foram fortemente afetadas pela variação nas dimensões dos *inserts*, apresentando uma baixa nas propriedades de resistência e tensão no momento da falha de 20% e 8%, respectivamente, causadas pela baixa adesão entre a superfície do cobre e o compósito, acarretando em uma descolagem, depois delaminação e culminou em uma falha por encurvamento (Tabela 3).

Tabela 3 – Propriedades compressivas dos compósitos com variação nas dimensões do *insert*

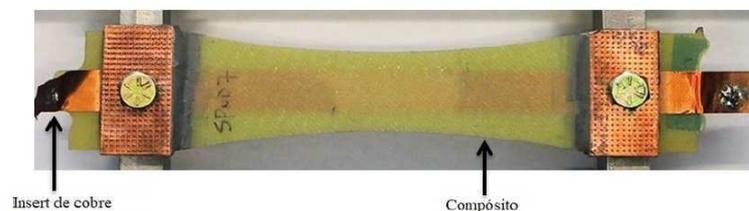
Tipo de cobre	% de área do <i>insert</i>	σ (MPa)	$\varepsilon \times 10^{-6}$	E_{com} (GPa)
Copper-AS	0	367±25	13,410±2156	28,0±1,5
Copper-AS	0,9	349±20	13,165±1024	28,6±1,3
Copper-AS	3,6	274±50	10,072±2331	28,1±1,3
Copper-AS	14,3	288±34	10,805±1377	27,6±0,9
Copper-AS	57	306±20	11,714±2324	28,9±4,2
Copper-T	57	366±25	13,395±1410	28,8±4,8

Fonte: Adaptado de Adu-obaid e Yarlagadda, 2008

Por fim, Adu-Obaid e Yarlagadda (2008) disse que ao se fazer um tratamento químico superficial nas amostras de cobre (Copper-T), a adesão entre os componentes melhorou e as propriedades mecânicas dos corpos de prova obtidas quando submetidas aos ensaios de flexão foram semelhantes às encontradas nos compósitos sem *inserts*, mas com uma região elástica maior, enquanto nas amostras que não foram tratadas, os resultados mostraram propriedades mecânicas bem abaixo dos compósitos sem *inserts*.

(KIM et al., 2006) estudou as falhas por fadiga e delaminação em tiras de cobre embebidas em compósitos de fibra de vidro/EPÓXI (Figura 25).

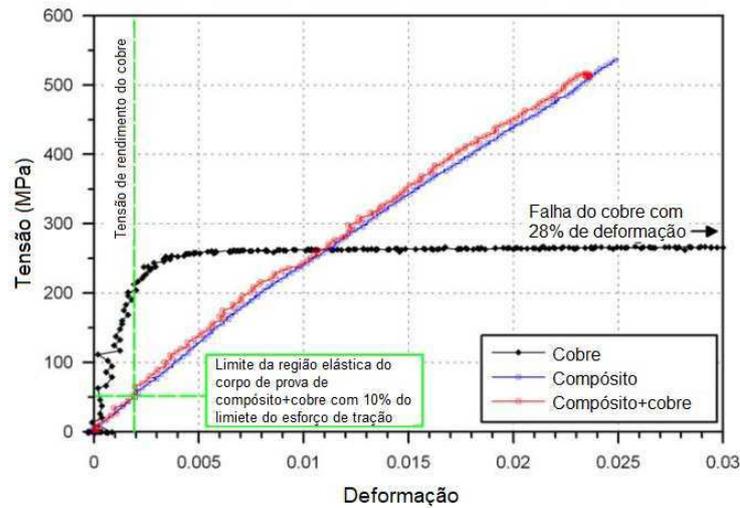
Figura 25 – Placas de material compósito com *inserts* de tira de cobre embebida



Fonte: Kim et al., 2006

A inserção do cobre se deu para a fabricação de um compósito multifuncional com características elétricas e estruturais aplicadas em estruturas de aeronaves. Inicialmente, Kim et al. (2006) fez um ensaio de tração estática (Figura 26) comparando os resultados entre os compósitos com e sem *inserts*.

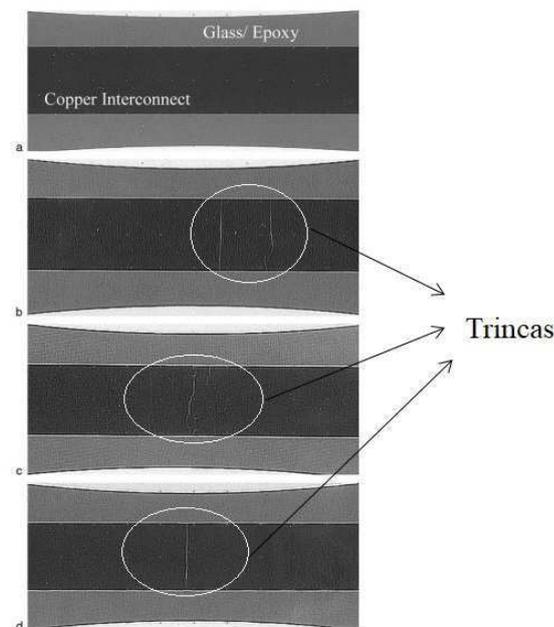
Figura 26 – Ensaio de tração estática em compósitos com *inserts* de tira de cobre



Fonte: Adaptado de Kim et al., 2006

É possível ver na Figura 26 que ambos os compósitos apresentam comportamento semelhante, embora a falha do compósito com *insert* tenha ocorrido com um carregamento um pouco menor. Ensaios de fadiga também foram realizados por Kim et al. (2006) com carga cíclica aplicada, mostrado na Figura 27.

Figura 27 – Fotos raios-X dos *inserts* de cobre (a) 20% do limite do esforço de tração; (b) 35% do limite do esforço de tração; (c) 50% do limite do esforço de tração; (d) 65% do limite do esforço de tração

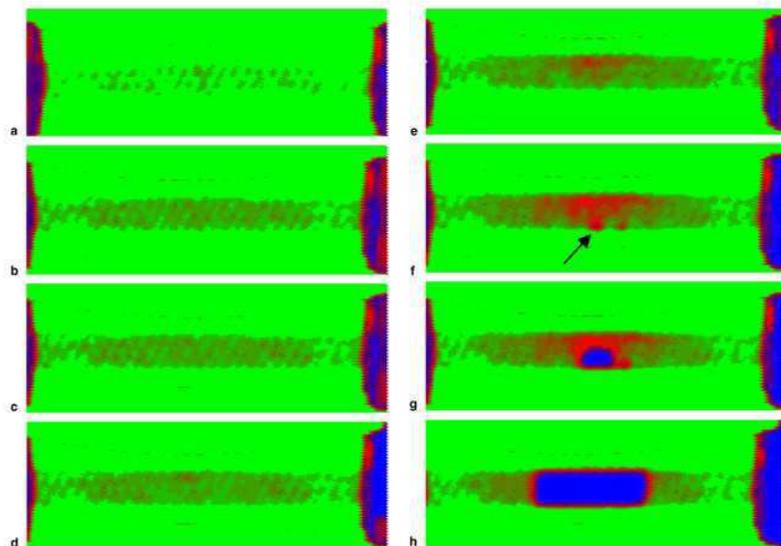


Fonte: Adaptado de Kim et al., 2006

É possível perceber na Figura 27 (a) que com um carregamento de 20% do limite do esforço de tração (Ultimate Tensile Strength – UTS), não houve formação de trinca. A Figura 27 (b) mostra duas trincas ao longo da largura do *insert* quando o carregamento foi de 35% da UTS. Na Figura 27 (c) é possível ver múltiplas trincas no *insert* para um carregamento de 50% da UTS. Na Figura 27 (d) uma trinca ao longo da largura do *insert* é visível quando o carregamento foi de 65% da UTS.

Por fim, Kim et al. (2006), utilizando-se do corpo de prova submetido ao carregamento de 50% da UTS, mostra que o processo de falha por delaminação a medida que o número de ciclos é aumentado (de 0 até 5500 ciclos), mostrado na Figura 28.

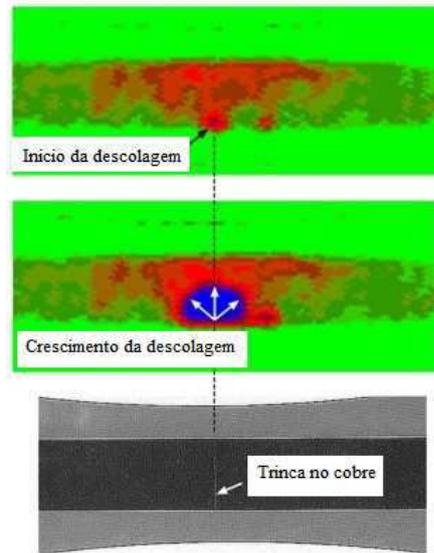
Figura 28 – Aumento da descolagem de corpo de prova ensaiado a 50% da UTS: (a) recém fabricado; (b) 1000 ciclos; (c) 2000 ciclos; (d) 3000 ciclos; (e) 4000 ciclos; (f) 5000 ciclos – início da descolagem; (g) 5300 ciclos – aumento da descolagem; (h) 5500 ciclos - falha



Fonte: Kim et al., 2006

A Figura 29 mostra que a falha por delaminação ocorre exatamente onde foram detectadas as trincas no *insert*, sendo elas as responsáveis pela descolagem entre o *insert* e o compósito.

Figura 29 – Alinhamento das imagens de ultrassom e raios-X do compósito com *insert* de tira de cobre embebido

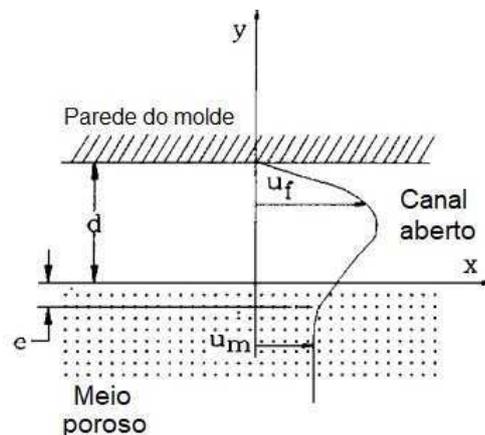


Fonte: Kim et al., 2006

2.6.1 Fenômeno de *race-tracking*

Quando a pré-forma é montada no molde, as regiões próximas as paredes do molde ou de *inserts* podem possuir fração volumétrica menor que nas demais regiões da pré forma. Tais regiões possuem baixa resistência para o fluxo de escoamento de resina, fazendo com que a resina escoe ao longo do percurso de maior permeabilidade, ou seja, o fenômeno é causado pelos canais com alta permeabilidade devido ao baixo teor de fibras na região, o qual promove caminhos de baixa resistência ao escoamento do fluido (SOZER et al., 2012). Esse fenômeno é chamado de *race-tracking* (Figura 30).

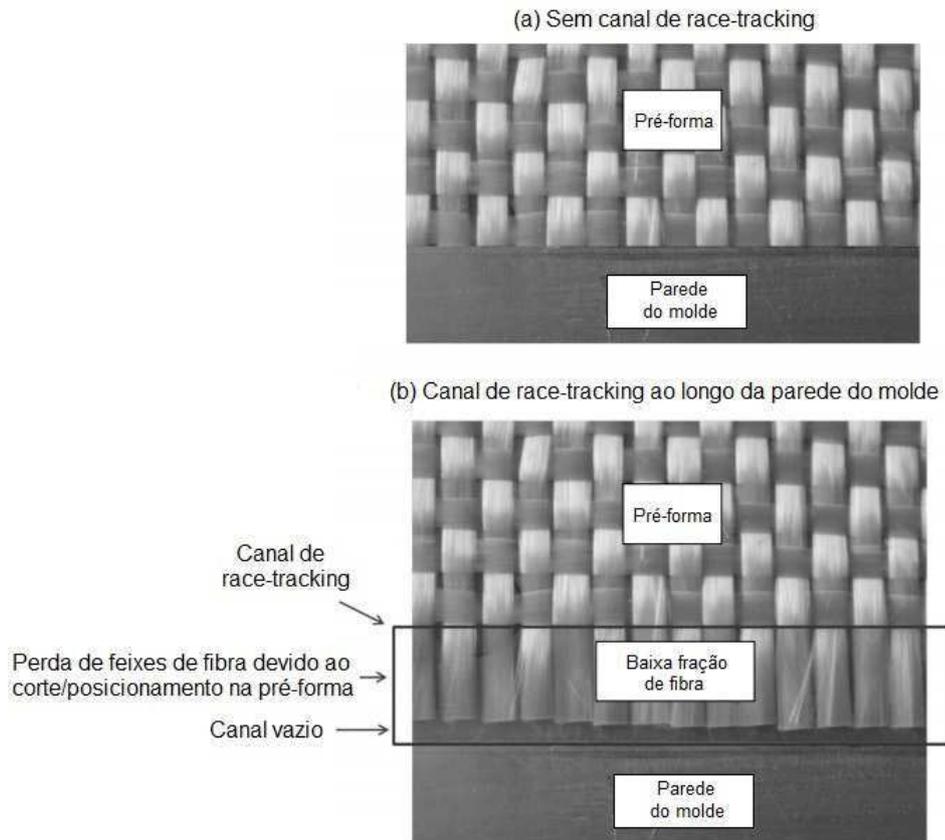
Figura 30 – Esquemas do efeito do fluxo de borda



Fonte: Adaptado de Hamammi et al., 1998

De acordo com Hammami et al. (1998) o desenvolvimento do fenômeno ao longo das paredes do molde ocorre devido à falta de feixes de fibras que podem ter sido expelidos das camadas durante o corte ou posicionamento das mesmas na pré-forma, ou ainda, a fibra ter sido cortada em dimensões menores que as do molde, criando espaços onde vai existir um escoamento mais fácil da resina, ilustrado na Figura 31.

Figura 31 – Parede do molde (a) sem e (b) com fenômeno de *race-tracking*



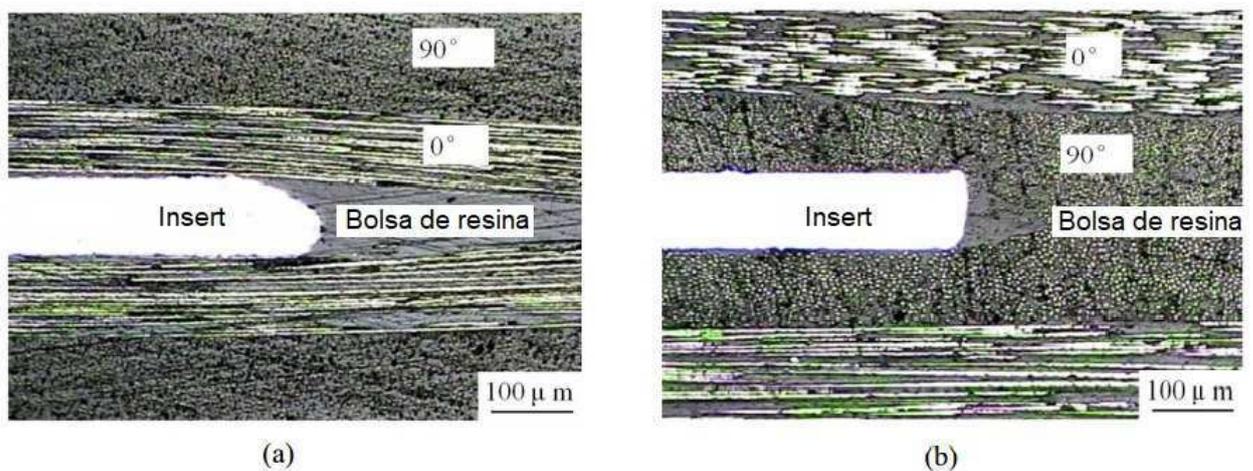
Fonte: Adaptado de Sozer et al., 2012

A Figura 31 mostra a parede do molde com e sem *race-tracking* ao longo da interface da pré-forma. Mesmo possuindo dimensões mínimas em algumas situações, esses espaços, ilustrados na Figura 31(b), podem criar um caminho preferencial para o escoamento da resina, podendo impedir o total preenchimento do molde ou criando áreas com excesso de resina, chamado de efeito de borda (*edge effect*) ou fenômeno de *race-tracking*.

Sendo assim, os *inserts* posicionados na pré-forma vão causar uma deformação nas camadas de fibra, tornando o local próximo às paredes dos *inserts* numa área sem a presença de fibras, onde o fenômeno do efeito de borda é desenvolvido. Desta forma, em tais áreas vai haver apenas a presença de resina ou a formação de possíveis vazios.

Xiao et al. (2016) em seu trabalho estudou o comportamento de compósitos com *inserts* de lítio para fins estruturais e de armazenamento de energia, fabricados pelo método de prensa quente à vácuo (Vacuum Hot Press Technique). Após o processamento, Xiao et al.(2016) analisou as peças por meio de micrografia, visualizando regiões próximas dos *inserts* ricas em resina, sem a presença de fibras. A Figura 32 ilustra uma análise micrográfica de um material compósito com *insert* embebido onde o efeito de borda se desenvolveu gerando uma área próxima ao *insert* com excesso de resina e sem a presença de fibras.

Figura 32 – Micrografia de um compósito onde houve o fenômeno de efeito de borda: (a) Fibras dispostas em $90^\circ/0^\circ$ e (b) $0^\circ/90^\circ$



Fonte: Adaptado de Xiao et al., 2016

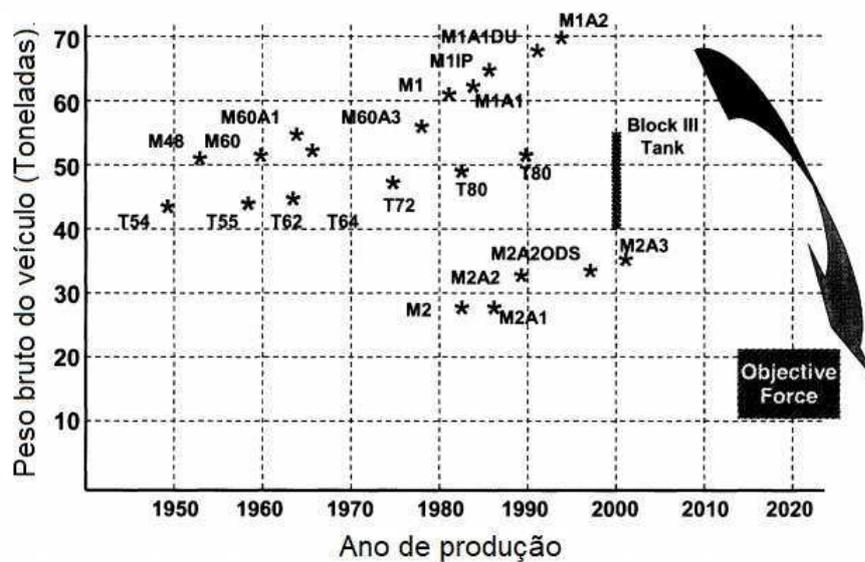
Pela Fig. 32 é possível perceber que as regiões ricas em resina que Xiao et al. (2016) chamou de bolsas de resina. Quando a disposição das fibras foi de $90^\circ/0^\circ$ da superfície para o centro, a região rica em resina formada foi maior do que quando a disposição das fibras foi $0^\circ/90^\circ$.

2.6.2 Estrutura de materiais compósitos CIA

Materiais poliméricos, como poliéster, poliamida, aramida, polietileno e polipropileno, vem sendo largamente utilizados na indústria de material bélico, podendo ser tanto utilizado na blindagem rígida quanto blindagem flexível. Silva (2014), por exemplo, mostra o comportamento balístico de materiais compósitos de matriz polimérica e reforço de fibra natural em blindagem multicamada. Mais recentemente pesquisas sobre blindagem CIA

(composite integral armor) passam a ser desenvolvidas a partir da necessidade de produção de veículos de blindados cada vez mais leves (Figura 33). Os compósitos usados nesse tipo de estrutura estão na classe dos compósitos multifuncionais.

Figura 33 – Evolução ao longo dos anos de veículos de combate dos EUA e da extinta União Soviética



Fonte: Adaptado de Fink, 2000

Uma blindagem CIA é uma estrutura com várias camadas com baixo peso específico, como cerâmica, borracha e compósitos poliméricos, posicionados numa sequência precisa para proporcionar um desempenho balístico e estrutural superior, sendo capazes de executar várias funções simultâneas (WANG et al., 2013). Além da capacidade de proteção balística, Kelkar e Vaidya (1999) diz que outras funcionalidades são vistas, como: capacidade de múltiplos impactos, auxílio ao carregamento estrutural, proteção contra o fogo, baixa visibilidade em radares, fácil reparo e capacidade de sobrevivência.

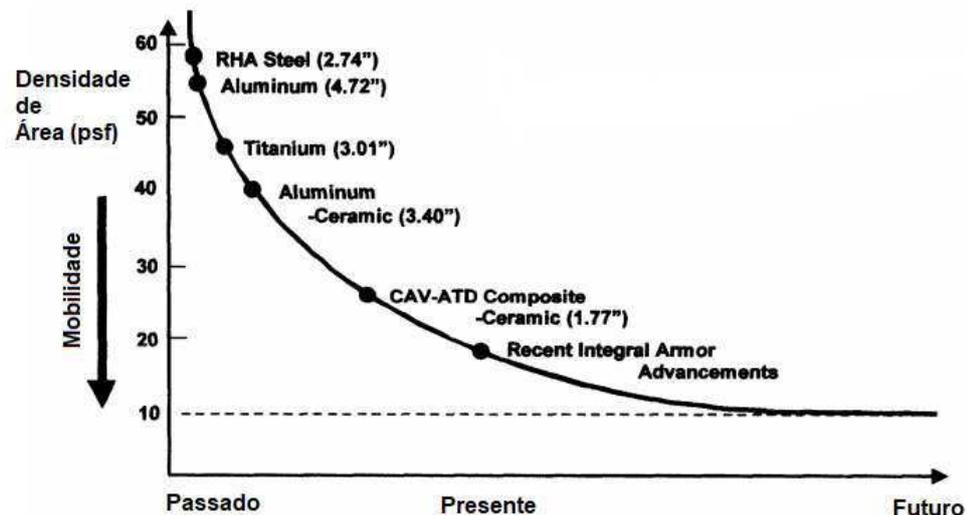
A primeira aplicação das estruturas CIA se deu na década de 1980 quando os EUA passaram a fabricar o veículo de infantaria de batalha Bradley com uma estrutura composta por fibra de vidro e resina poliéster substituindo o alumínio (FINK, 2000). Posteriormente, no mesmo veículo, foram adicionadas placas de material cerâmico à estrutura, surgindo, assim, uma das primeiras estruturas CIA. A utilização de materiais cerâmicos como materiais de proteção se deu ao longo de décadas devido à sua baixa densidade, alta dureza e resistência à compressão. Wang et al. (2013) coloca que quando um projétil impacta uma cerâmica, sua ponta é quebrada, diminuindo sua massa e energia.

Porém, seu comportamento frágil e sua baixa resistência à tração causam falha e impedem que as cerâmicas absorvam uma quantidade significativa de energia.

Na década de 1990 o programa Composite Armored Vehicles (CAV) surgiu no EUA com a finalidade de construir veículos de combate resistentes e leves a partir do aperfeiçoamento das estruturas CIA existentes. Ainda na década de 1990, assim como os EUA, a Índia passa a estudar a utilização de placas cerâmicas com finalidade balística em veículos leves de combate em um programa semelhante ao CAV.

A Figura 34 mostra o avanço ao longo da história na produção de veículos blindados para calibre .50.

Figura 34 – Avanço na produção de veículos blindados para calibre .50



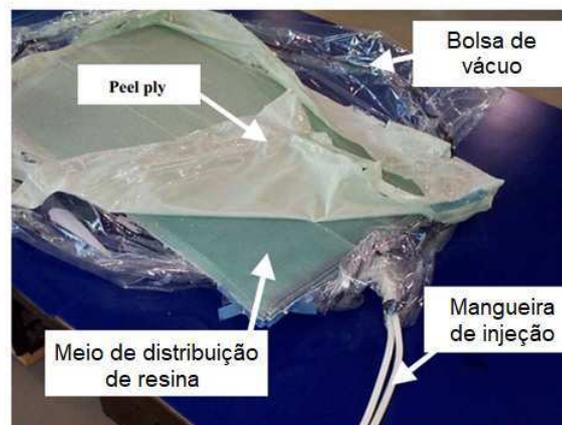
Fonte: Fink, 2000

De acordo com Walsh e Fink (2001), o método de fabricação dos compósitos tem custo maior que os materiais que compõem a estrutura compósita em si. Normalmente a fabricação dos compósitos CIA é feita em múltiplas etapas, cada camada é fabricada separadamente e sua união é feita camada por camada, sendo a laminação manual o método mais utilizado para esse tipo de processamento, com um sistema a vácuo auxiliando na cura das peças. Porém, alternativas de fabricação têm surgido e um método de processamento que vem ganhando espaço nesse meio é o VARTM. Mahdi et al. (2003) coloca que o processo de VARTM tem mostrado uma significativa redução nos custos de produção de estruturas CIA quando comparados com outros processos. O processo de VARTM também abre espaço para a possibilidade de fabricação das estruturas CIA em apenas uma etapa, ou seja, todas as camadas dos diferentes materiais posicionadas no molde formando a

pré-forma. (LEE et al., 2007) diz que a fabricação de compósito CIA pelo método de múltiplas etapas (multi-step), aumenta os custos, poluição e tolerâncias dimensionais da estrutura, além de introduzir defeitos da interface.

Campbell et al. (2003) diz que a maneira mais comum de se fabricar compósitos CIA é utilizando bolsa de vácuo (Figura 35), pois ao se usar apenas superfícies rígidas, problemas podem surgir durante o processamento, sendo o fenômeno de *race-tracking* o maior deles. O *race-tracking* faz com que os padrões de fluxo mudem drasticamente, podendo aprisionar o ar, formando vazios nas peças fabricadas.

Figura 35 – Processamento de compósito CIA via VARTM com bolsa de vácuo



Fonte: Adaptado de Walsh e Fink, 2001

Walsh e Fink (2001) explica a importância da utilização de material transparente para visualização do escoamento permitindo análises e mostrando parâmetros como viscosidade, pressão de injeção, níveis de vácuo, posição dos pontos de entrada e saída e efeitos do material, além de ser possível observar a infiltração do fluido através dos espaços entre os *inserts* (36).

Figura 36 – Molde com superfície transparente para visualização do escoamento entre os *inserts*

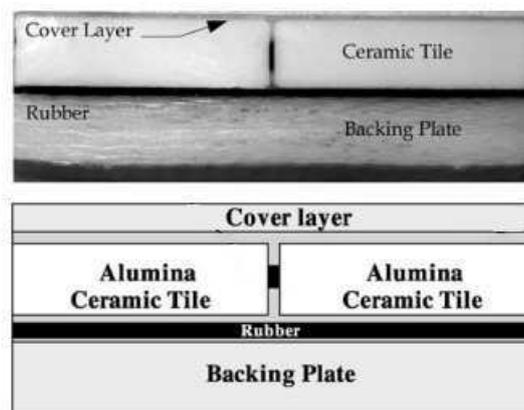


Fonte: Walsh e Fink, 2001

Ainda na Figura 36 é possível ver que o escoamento da resina se desenvolve através dos canais formados entre os *inserts* e que há regiões na superfície do molde que a resina não conseguiu atingir, formando zonas secas.

Uma estrutura CIA é comumente composta, como já dito, por camadas de cerâmica, borracha e compósitos poliméricos, onde existe uma camada de cobertura (cover layer) que vai ser um compósito polimérico, seguida de uma camada de cerâmica, uma camada de borracha e uma placa de apoio (backing plate) que será outro compósito polimérico (Figura 37).

Figura 37 – Exemplo de estrutura CIA



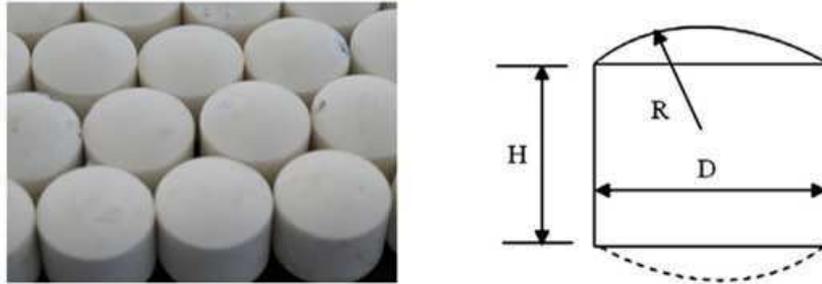
Fonte: Mahdi et al., 2003

A camada de cerâmica nada mais é que pequenas partes de cerâmicas interligadas (ceramic tiles) em uma malha vazada, normalmente com formato hexagonal. A utilização da camada de borracha entre a camada de cerâmica e a placa de apoio ocorre como meio de aumentar as capacidades de múltiplos impactos e a tolerância ao dano estrutural, impedindo a transmissão de energia para a camada de apoio, preservando-a de maiores danos. Gama et al. (2001) mostram experimentalmente que ao aumentar a espessura da camada de borracha, há uma diminuição da deflexão dinâmica da placa de apoio, concluindo que a camada de borracha deve ser o mais fina possível. Porém, nem todas as composições de estrutura CIA usam a camada de borracha, não sendo utilizada nas primeiras concepções desse tipo de estrutura. Gama et al. (2001) estudou compósitos CIA com camada de espuma de alumínio ao invés da borracha.

Wang et al.(2013) estudou o comportamento de algumas estruturas como camada de fundo (back layer) em uma estrutura balística multicamadas, por trás da cerâmica, e mostra que a utilização de uma estrutura sanduíche foi a que obteve melhores resultados.

Wang et al.(2013) ainda se utiliza de camadas cerâmicas com faces onduladas ao invés da tradicional superfície plana para tentar melhorar as propriedades balísticas do material (Figura 38).

Figura 38 – Cerâmica balística com face arredondada



Fonte: Wang et al., 2013

O projeto de Lee et al. (2007) consistiu na concepção de uma rampa blindada (Integral Armored Ramp) para veículo militar, a qual é composta por cobertura de *spall*, cerâmica balística, camada de borracha e placa compósita, sendo baseada na tecnologia de compósito híbrido como meio de atingir propriedades multifuncionais como proteção balística, desempenho estrutural e interferência eletromagnética (Electro Magnetic Interference – EMI shielding), mostrada na Figura 39.

Figura 39 – Rampa blindada utilizada em veículo militar



Fonte: Lee et al., 2007

O desenvolvimento da rampa é feito de modo que o material cerâmico vai conferir propriedades estruturais, e quando montado em uma estrutura multicamadas também vai possuir propriedades balísticas, conferindo proteção ao veículo e diminuindo a densidade de área. A Figura 40 mostra a sequência de fabricação da rampa balística para veículo militar.

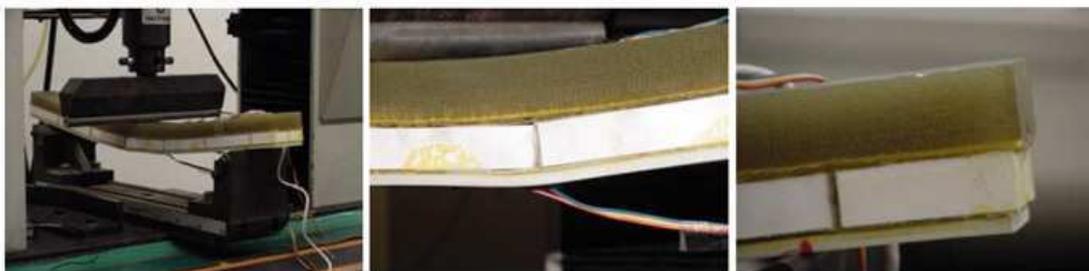
Figura 40 – Sequência de fabricação de rampa blindada para veículo militar



Fonte: Lee et al., 2007

Amorim Jr. (2002) diz que a resistência à flexão é uma característica fundamentais para uma estrutura CIA. Outros autores (DAVILA et al., 1996; MAHFUZ et al., 2000; LEE et al., 2007) em seus trabalhos também utilizam ensaios de flexão e impacto com arma de gás como forma de caracterizar mecanicamente o compósito CIA. A Figura 41 ilustra um ensaio de flexão de três pontos em uma estrutura de material compósito CIA.

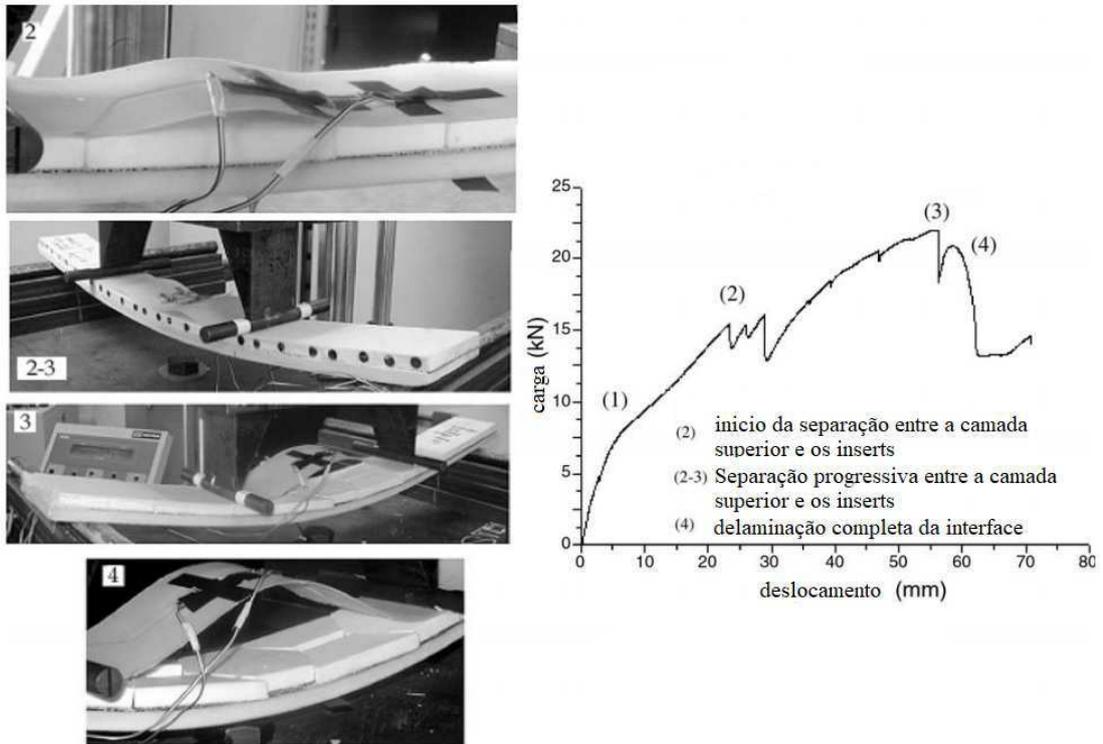
Figura 41 – Ensaio de flexão realizado numa estrutura CIA



Fonte: Lee et al., 2007

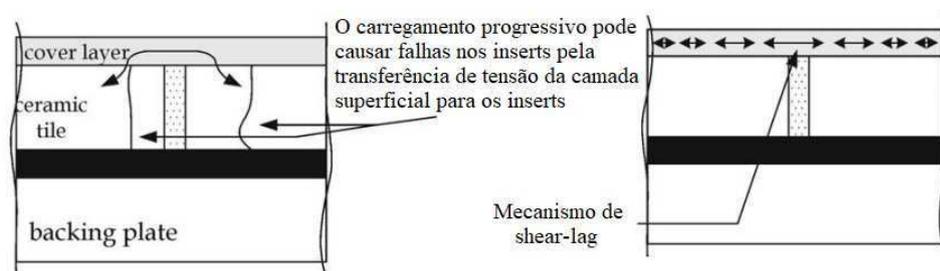
Mahdi et al. (2003) realizaram ensaios de flexão em 4 pontos em Vigas CIA com *inserts* de cerâmica embebidos via VARTM com bolsa de vácuo (Figura 42) e afirma que a resposta não linear do comportamento da viga obtida para uma carga de 7,5 kN pode ser associado à fratura sofrida pela resina presente nos locais ricos em resina *Resin-filled gaps* próximos aos *inserts*, ou seja, nas regiões onde são formadas as regiões ricas em resina. As demais quedas nas cargas foram causadas pela delaminação entre a camada superior das fibras e os *inserts*.

Figura 42 – Sequência de eventos de falha em viga CIA



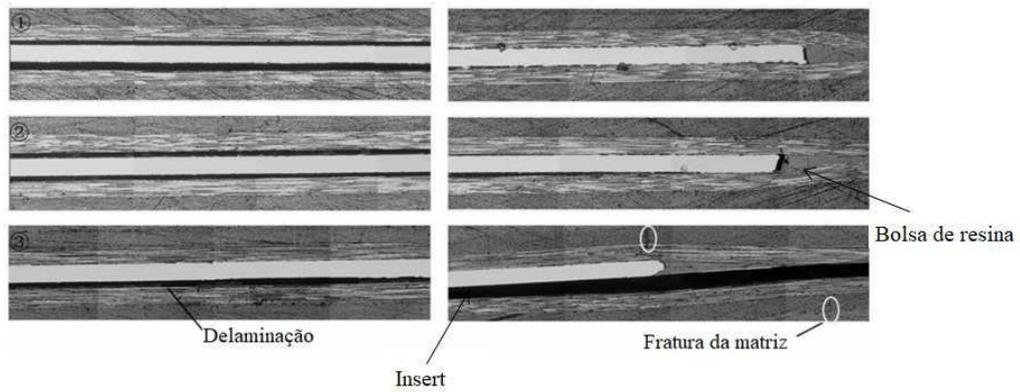
Mahdi et al. (2003) ainda diz que a fratura evidenciada nas regiões ricas em resina foram resultado do processo de transferência de tensão entre a camada superior das fibras e os *inserts*. A transferência de tensão ocorre da camada superior para os *inserts* através das regiões ricas em resina, em um processo chamado de mecanismo de cisalhamento shear-lag (Figura 43).

Figura 43 – Desenvolvimento do mecanismo de shear-lag



Xiao et al. (2016) demonstrou através de micrografia que ao submeter os compósitos com *inserts* de lítio à ensaios de flexão (Figura 44), ocorreu delaminação entre os *inserts* e as fibras e a falha por cisalhamento ocorre com a propagação da trinca pela região rica em resina.

Figura 44 – Micrografia de falha em compósitos com *insert* de lítio embebido



Fonte: Adaptado de Xiao et al., 2016

Xiao et al. (2016) ainda diz que é possível evitar tais falhas através de melhoria da adesão entre os *inserts* e a interface fibra/matriz.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esse capítulo foi dividido em duas partes, onde na primeira parte são apresentados os materiais e na segunda parte os métodos utilizados para fabricação de placas de materiais compósitos com *inserts* embebidos pelo método de RTM.

3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados para o processamento das placas compósitas deste trabalho foram:

- Matriz: Resina poliéster insaturada ortofitálica 10316-10 IBX com viscosidade entre 250 a 350cp, fabricada pela empresa IBEX Químicos e Compósitos Ltda. e distribuída por Vinicius Uchoa Ltda. (ANEXO A);
- Catalisador: Catalisador peróxido de metil-etil-cetona (P-MEK), BUTANOX M-50 IBX, usado numa proporção de 1% do volume de resina, fabricado pela empresa IBEX Químicos e Compósitos Ltda. e distribuído por Vinicius Uchoa Ltda. localizada na cidade de Campina Grande na Paraíba;
- Reforço: Tecido básico de fibra de vidro-E, com gramatura de 600 g/m² fornecido pela Redelease®;
- Desmoldante: Álcool Polivinílico (PVA) verde fornecido pela Redelease® e Cera Tecglaze® N a base de carnaúba;
- Outros: Cola de silicone.

Informações mais detalhadas sobre a resina e o catalisador usados neste trabalho podem ser encontrados no Anexo A.

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Projeto do molde

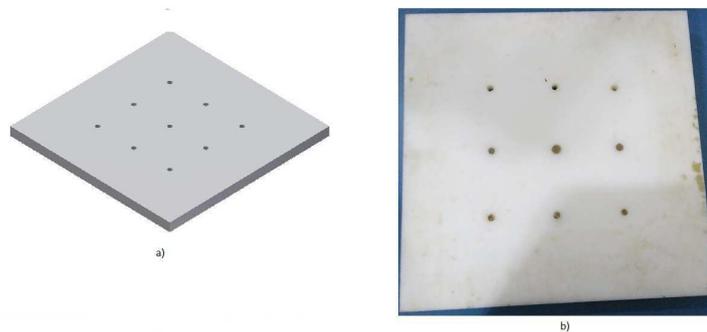
O processamento por RTM e suas variações operam a partir da injeção de resina em molde fechado, sendo assim, uma das etapas desse trabalho foi o projeto e concepção do molde a ser utilizado no processamento das placas de materiais compósitos. Para tal,

vários trabalhos foram estudados e seus respectivos moldes foram analisados (HEDLEY, 1994; HUMBERT, 1996; GAMA et al., 2001; LEE et al., 2002; CAIRNS; ROSSEL, 2004; AMORIM-JR., 2007; THORVALDSEN, 2012; OLIVEIRA et al., 2013; MIRANDA, 2015) como meio de auxílio à concepção do molde usado neste trabalho.

Todos os trabalhos acima citados têm em comum o uso de um molde com pelo menos uma face transparente necessária para utilização do método de análise de escoamento por uso de imagem. Esse método consiste em posicionar câmeras para filmagem do processamento do compósito com a finalidade de analisar e adquirir dados sobre o escoamento. Desta forma, ficou decidido que ao menos uma das faces do molde seria de um material transparente. Para o desenho e dimensionamento do molde foi usado o *software* Autodesk Inventor versão para estudante 2013.

Uma placa de polietileno de alta densidade (PEAD) de 500x500x25 mm^3 forma a base do molde (Figura 45).

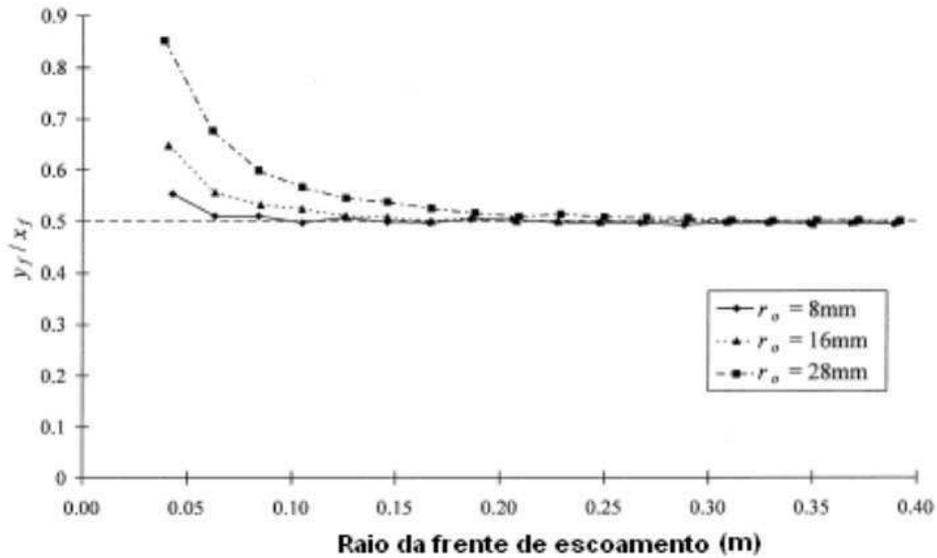
Figura 45 – Base do molde de polietileno de alta densidade: (a) desenho e dimensionamento no *software* Inventor e (b) peça fabricada



Fonte: Elaborado pelo autor

A princípio, tanto os pontos de injeção quanto os pontos de saída foram posicionados na base do molde. Sendo assim, nove furos foram feitos na base para dar versatilidade na hora de escolher o *lay-up* de injeção e a disposição dos pontos de injeção de resina e saída de ar, podendo fazer mudanças entre um processamento e outro. Amorim Jr. (2007) apud Chen et al. (2001) mostram a influência que o diâmetro do furo de injeção de resina exerce na permeabilidade e chegaram à conclusão que quanto maior o diâmetro do furo da injeção, maior será sua influência na frente de escoamento e, conseqüentemente, maior será o tempo antes que esta frente se torne estável (Figura 46).

Figura 46 – Influência do diâmetro do furo de injeção de resina na frente de escoamento

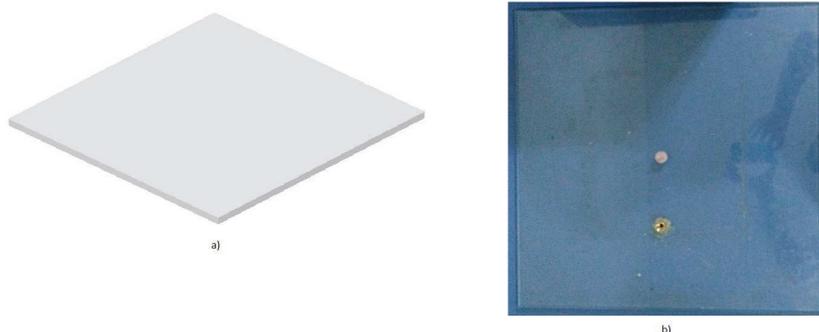


Fonte: Amorim Jr., 2007 apud Chen et al., 2001

A Figura 46 apresenta um gráfico usado para frente de fluxo radial, onde y_f/x_f é a razão entre os valores dos semi-eixos da elipse formada pela frente de escoamento nas direções y e x, e está em função do raio mínimo necessário para estabilização da frente de escoamento. Assim, ficou decidido que o diâmetro dos pontos de entrada e saída usados neste trabalho seriam de $\frac{1}{4}$ " (6,35 mm aproximadamente). Dependendo do *lay-up* adotado no momento da fabricação, alguns destes pontos de entrada ou saída não seriam utilizados no processamento, dessa forma, alguns tampões foram usados para vedar esses furos não utilizados.

A parte superior do molde, ou tampa superior, foi fabricada utilizando vidro como material e possui dimensões de $500 \times 500 \times 10 \text{ mm}^3$ (Figura 47).

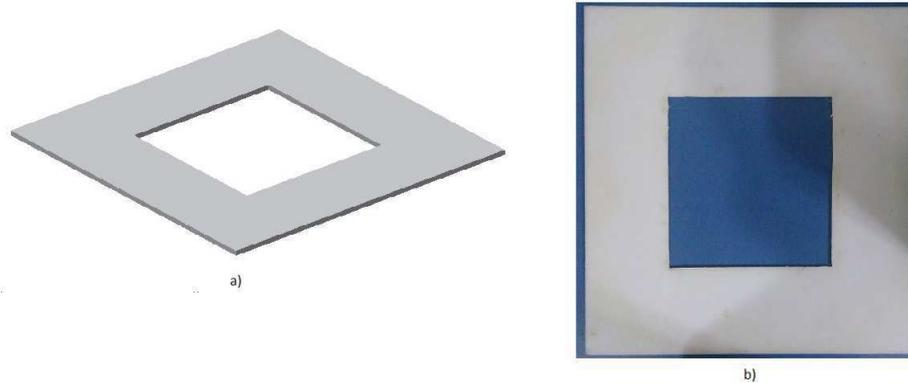
Figura 47 – Tampa do molde de vidro: (a) desenho no *software* Inventor e (b) peça fabricada



Fonte: Elaborado pelo autor

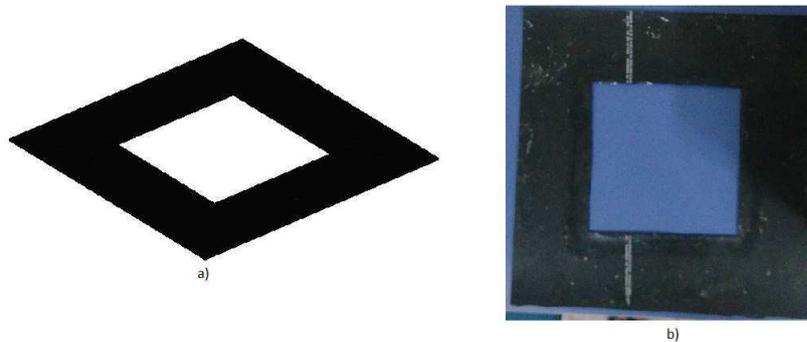
Para o espaçamento ou moldura (local onde é posicionada a pré-forma) foram utilizadas uma placa também de polietileno com dimensões de $500 \times 500 \times 6 \text{ mm}^3$ (Figura 48) e duas borrachas de dimensões $500 \times 500 \times 3,5 \text{ mm}^3$ (Figura 49), posicionadas uma acima e outra abaixo da placa de polietileno. As borrachas por serem maleáveis, foram utilizadas também como dispositivo de vedação do molde.

Figura 48 – Moldura de polietileno: (a) desenho no *software* Inventor e (b) peça fabricada



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 49 – Moldura e dispositivo de vedação de borracha: (a) desenho no *software* Inventor e (b) peça fabricada



Fonte: Elaborado pelo autor

A princípio, o travamento do molde seria feito por parafusos e porcas que iriam transpassar o molde, porém como o material escolhido para a tampa foi o vidro, material muito frágil, chegou-se à conclusão que seria mais interessante não fazer furos na peça, independente deste ser temperado ou não, como forma de preservá-la. Assim, ficou decidido, que o travamento seria feito utilizando-se de grampos do tipo-C, seguindo o exemplo dos trabalhos de Amorim Jr. (2007) e Lee et al. (2002). Os desenhos referentes ao molde se encontram na seção de Anexos (Anexo B) deste trabalho.

A Figura 50 ilustra o molde usado neste trabalho.

Figura 50 – Ilustração do molde desenvolvido para o processamento de materiais compósitos



Fonte: Elaborado pelo autor

A base de apoio usada para o molde foi projetada por Miranda (2015) para um molde semelhante ao deste trabalho, porém utilizado para outro processamento. O uso dessa base de apoio neste projeto logrou êxito por possuir dimensões semelhantes ao do molde, com possibilidade de fixação de ambos, base e molde.

O polietileno de alta densidade foi o material escolhido tanto para base como para o espaçador do molde por possuir características como fácil usinagem, baixo custo, fácil transporte e manuseio devido ao baixo peso do material, além de sua disponibilidade no mercado local quando comparado com outros materiais comumente usados em moldes. As baixas pressões de injeção e de vácuo nos processos de VARTM e RTM Light foi outro fator determinante para a escolha do material. A escolha do polietileno de alta densidade se mostrou acertada uma vez que ele resistiu ao pico exotérmico da resina, não reagiu com a mesma e nenhuma deformação foi percebida durante o processamento.

A escolha do vidro como material da tampa se deu a partir da necessidade de um material transparente, como já dito. A princípio, a primeira escolha de material para a tampa foi o acrílico, porém, devido à dificuldade de usinagem de uma peça de acrílico com as especificações desejadas no mercado local, o vidro se tornou o escolhido. A escolha do vidro foi acertada, uma vez que o material não sofreu deformação, tendo uma fácil limpeza após a injeção e continuou translúcido depois da execução de vários processamentos, além

de não reagir com a resina, não necessitando da aplicação de desmoldante, diferente do acrílico.

O espaçamento do molde foi constituído por duas borrachas e uma placa de polietileno, esta última posicionada entre as borrachas formando assim a espessura da pré-forma. A ideia para utilização da borracha como complemento da moldura se deu pela sua versatilidade, sendo também o principal dispositivo de vedação do sistema, tornando o projeto do espaçamento como um todo mais simples, uma vez que normalmente os sistemas mais comuns de vedação nos moldes utilizam o-ring, necessitando um projeto e usinagem mais complexa do material usado na moldura.

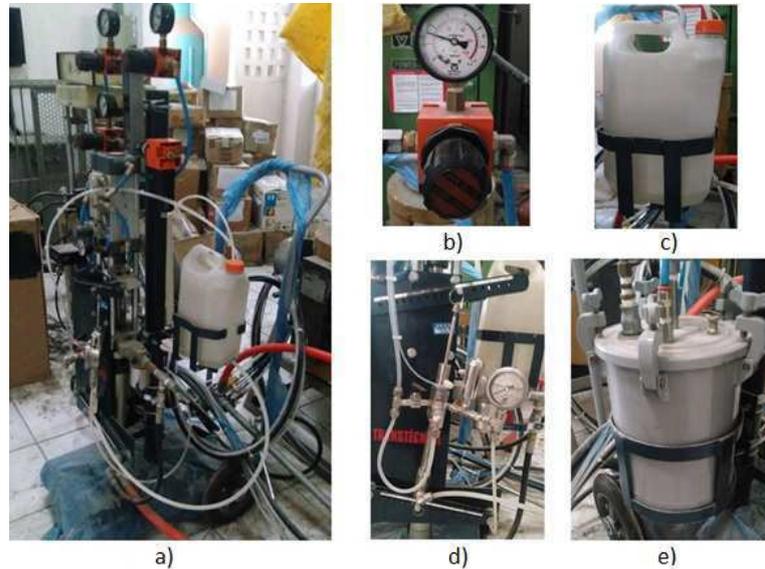
3.2.2 Processos de Fabricação

Nesse projeto, a fabricação das placas de material compósito foi feita utilizando dois diferentes tipos de processamento: VARTM e RTM Light, sendo eles variações do processo de RTM tradicional.

3.2.2.1 Sistemas de injeção de resina e retirada de ar do molde

O processamento das placas foi feito por RTM Light, o qual utiliza pressão positiva para injeção de resina e pressão negativa para retirada do ar do molde. A resina injetada é pré-catalisada e no processo de RTM light utilizou-se como sistema de injeção a máquina industrial de RTM (Fig 51), fabricada pela empresa *Transtécnica Ltda.*

Figura 51 – a) máquina de RTM fabricada pela empresa Transtécnica Ltda, b) regulador da pressão de injeção de resina, c) recipiente do catalisador, d) cursor para regulagem para porcentagem de catalisador a ser misturado na resina e e) campânula do solvente



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 51(b) mostra o regulador de pressão de injeção de resina. A Figura 51(c) ilustra o recipiente de armazenamento do catalisador. Nas Figuras 51(d) e 51(e) são possíveis ver o cursor com regulagem para a porcentagem de catalisador a ser misturado na resina antes da injeção e a campânula onde o solvente responsável pela limpeza do cabeçote ficou armazenado, respectivamente. Tanto a resina quanto o catalisador seguem em mangueira diferentes e sua mistura só é feita no cabeçote em destaque na Figura 52, nas proporções previamente definidas.

Figura 52 – Cabeçote de injeção de resina da máquina de RTM



Fonte: Elaborado pelo autor

A máquina de RTM funciona através de um sistema pneumático e de acordo com o fabricante, a cada “batida” do pistão, cerca de 160g de resina é injetada no molde. A máquina possui um medidor analógico (Figura 53) que faz a contagem do número de batidas do pistão de injeção.

Figura 53 – Medidor de “batidas” do pistão de injeção da Máquina de RTM



Fonte: Elaborado pelo autor

Por usar um sistema pneumático, o funcionamento da máquina de RTM se dá através de um compressor. Sendo o compressor da marca Schulz Pratic air modelo CSL 20/200, o escolhido de acordo com as necessidades da máquina. Tal compressor possui uma pressão de operação máxima de 125 Psi (aproximadamente 862 kPa), reservatório de 183 litros e 5 Cv (cavalos) de potência.

O dispositivo responsável por gerar a pressão de vácuo utilizada durante os processamentos foi o compressor de modelo EMI 45 HER da marca Embraco, possuindo $\frac{1}{8}$ Cv de potência comumente usado em equipamentos de refrigeração.

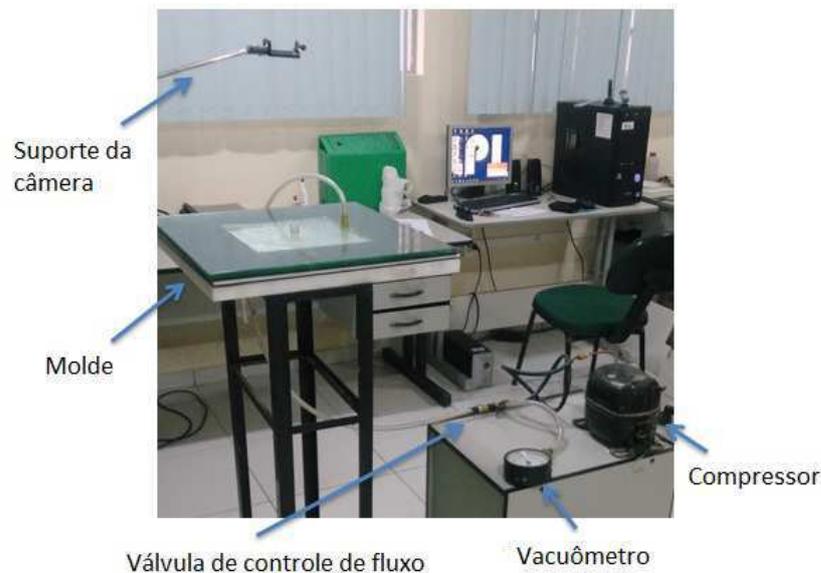
Para o uso correto da máquina de RTM, um treinamento foi dado pelo instrutor da empresa fabricante, onde uma série de cuidados devem ser tomados antes e depois da injeção de resina no molde, sendo de grande importância a limpeza interna da máquina após a injeção. Tanto as atividades pré-injeção quanto as atividades pós-injeção relacionadas à máquina estão no ANEXO C.

3.2.2.2 Sistema de injeção usando apenas pressão de vácuo

Após o processamento da primeira placa achou-se por bem desenvolver um sistema mais simples para o processamento das placas futuras. Os motivos que levaram a essa decisão são abordados no tópico 4.1 deste trabalho.

O sistema adaptado para o processamento por VARTM consiste na ligação em linha do compressor de modelo EMI 45 HER, antes usado apenas para retirada de ar do molde, com um vacuômetro e uma válvula de controle de fluxo por mangueiras de $\frac{1}{4}$ " de diâmetro até o molde (Figura 54).

Figura 54 – Sistema adaptado para o processamento por VARTM



Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.3 Atividades de processamento dos compósitos por RTM

Para realizar o processamento de materiais compósitos por RTM, a execução de três etapas se faz necessária: atividades de pré-processamento, durante o processamento e pós-processamento. As atividades do processamento dos compósitos desenvolvidas nesse trabalho são apresentadas na Tabela 4.

Como pode ser notado na Tabela 4, dezoito atividades são necessárias para a fabricação de uma única placa, consumindo um tempo considerável para a operacionalização no processamento dos compósitos. Amorim Jr. (2007) coloca que o bom planejamento de tais atividades é o principal fator de controle da taxa de produção do processamento.

As atividades de pré-processamento têm início com o corte das fibras feito com estilete, seguido da pesagem das mesmas. Depois foi feito o corte dos *inserts* com serra manual, seguido da pesagem dos mesmos. Segue com a aplicação dos desmoldantes na superfície da base do molde. Primeiramente, a cera de carnaúba foi aplicada e o polimento realizado, sendo repetido o processo cinco vezes, depois, duas camadas de PVA

Tabela 4 – Atividades realizadas pré-processamento, durante o processamento e pós-processamento dos compósitos

ATIVIDADES		ETAPAS
1	Corte e pesagem das fibras	Pré-processamento
2	Corte e pesagem dos <i>inserts</i>	
3	Aplicação dos desmoldantes no molde	
4	Montagem e posicionamento do molde (base, tampa, moldura e borrachas)	
5	Montagem da pré-forma	
6	Fechamento do molde	
7	Preparação e fixação das mangueiras de injeção e vácuo	Durante o processamento
8	Ligar o compressor	
9	Verificar possíveis vazamentos	
10	Ajuste das pressões de injeção e vácuo	
11	Montagem do sistema de filmagem	
12	Pesagem da resina e do catalisador	
13	Mistura da resina com o catalisador	
14	Injeção de resina no molde	
15	Cura da resina	Pós processamento
16	Desmoldagem da placa	
17	Limpeza dos bicos de injeção e descarga	
18	Limpeza do molde	

Fonte: Elaborado pelo autor

foram aplicadas com intervalos de 20 minutos entre as aplicações. Após a aplicação dos desmoldantes, a montagem do molde foi realizada. Uma borracha foi posicionada acima da base do molde, depois a moldura foi posicionada acima da primeira borracha, por último uma segunda borracha foi posicionada acima da moldura e entre cada camada. Então, a pré-forma foi posicionada no molde e este foi fechado com a tampa de vidro posicionada e os grampos tipo "C" foram colocados.

Durante o processamento, as mangueiras foram conectadas no molde de acordo com o *lay-up* escolhido, o compressor foi ligado e possíveis vazamentos foram verificados. Tanto as mangueiras quanto os bicos de injeção foram de baixo custo devido à possibilidade de descarte, principalmente se tratando das mangueiras, e foram adquiridas no mercado local, sendo todos de $\frac{1}{4}$ " (6,35 mm aproximadamente). As pressões de injeção e vácuo foram ajustadas e o ar retirado do molde. O sistema de filmagem foi montado, sendo esta última feita com um celular fixado em um suporte. A resina e o catalisador foram pesados

em suas devidas proporções e misturadas manualmente, sendo adicionado catalisador na resina na proporção de 1%. Após a mistura, a resina começava a ser injetada no molde. As mangueiras e os recipientes de resina usados durante o processamento eram descartáveis.

Após o processamento, foi iniciado o processo de cura da resina ainda com o molde fechado. Ao fim da cura da resina, o molde foi aberto e a desmoldagem da placa recém-fabricada foi feita, estando ela pronta para análise. No final de todas as atividades, foi realizada a limpeza dos bicos de injeção com uma furadeira de bancada, bem como limpeza manual do molde, podendo o ciclo de atividades ser reiniciado.

3.2.4 Planejamento dos processamentos das placas

O planejamento dos experimentos foi realizado com base em fatores previamente expostos como sendo de grande importância no processamento dos compósitos. Amorim Jr. (2007) em sua pesquisa diz que além de fatores já conhecidos como o número de camadas de fibra na pré-forma e pressão de injeção de resina; outros fatores observados durante os experimentos possuem grande influência no escoamento, na impregnação das fibras através da resina e, conseqüentemente, no fabrico das placas de materiais compósitos. Outros fatores foram observados ao longo dos experimentos realizados e discutidos no capítulo 4 deste trabalho. São eles:

- Método de fluxo de injeção (linear ou radial);
- Distribuição das entradas e saídas através de mudanças no *lay-up* de injeção;
- Variação da porosidade da pré-forma devido à compactação das fibras pela presença dos *inserts* no molde;
- Escolha da quantidade e disposição dos *inserts* dentro do molde.

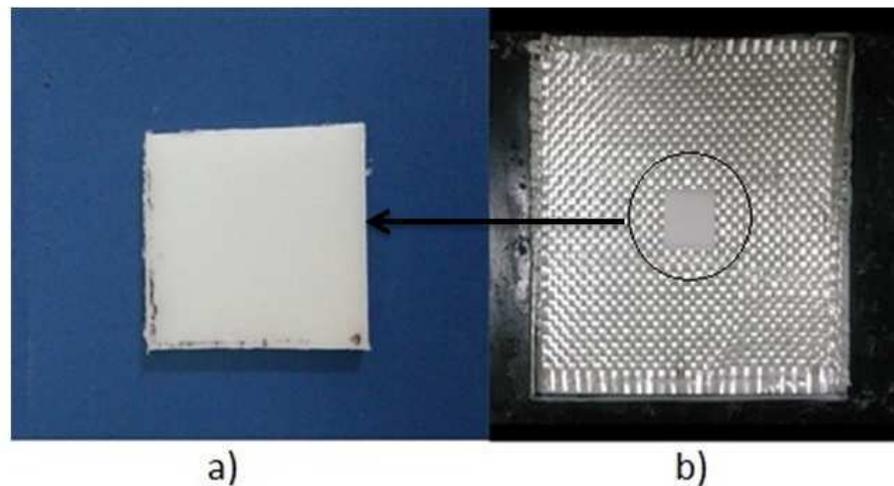
Assim, ao longo desta pesquisa, algumas mudanças foram feitas entre as placas produzidas a fim de corrigir os problemas na medida com a qual foram observados durante os experimentos.

Quanto à utilização dos *inserts*, Lawrence et al.(2007) estudou os vazios em peças de material compósito com *inserts* impermeáveis embebidos e optou por usar na pré-forma um único *insert* de formato retangular, de fácil usinagem e, embora não especifique o valor exato, com baixa espessura. O autor ressalta ainda que os fatores mais importantes para o dimensionamento dos *inserts* são o comprimento, largura e o posicionamento do mesmo

na pré-forma. É sabido que quanto maior for o *insert* e quanto mais distante do ponto de entrada de resina ele estiver, maior será a possibilidade de formação de vazios na peça fabricada.

Dessa forma, os *inserts* usados neste projeto possuem dimensões de $50 \times 50 \times 4 \text{ mm}^3$ e foram posicionados no centro da pré-forma, sendo a primeira concepção das placas com *inserts* impermeáveis embebidos, ou seja, entre as camadas de fibra centrais da pré-forma. A Figura 55 mostra o tipo de *insert* utilizado nesse trabalho e ele posicionado na pré-forma antes da injeção.

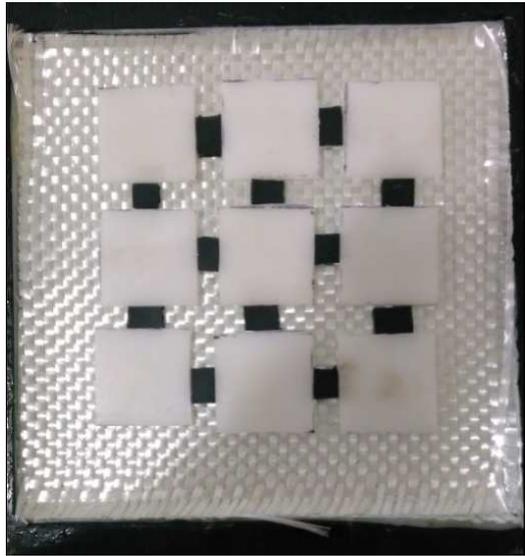
Figura 55 – Primeira concepção de placa de material compósito com 1 *insert*: (a) modelo de *insert* usado nos processamentos e (b) Primeira concepção de placa de material compósito com *insert* impermeável posicionado no centro da pré-forma



Fonte: Elaborado pelo autor

A primeira concepção das placas continha apenas um *insert* posicionado no centro da pré-forma, e essa concepção foi usada nas três primeiras placas fabricadas neste trabalho. A partir da quarta placa, a pré-forma passou a ser composta por nove *inserts* também dispostos entre as camadas de fibra centrais, como forma de se estudar o processamento de uma estrutura multifuncional com múltiplos *inserts*, sendo esta a segunda concepção de placas de materiais compósitos. Na Figura 56 é possível visualizar os nove *inserts* posicionados na pré-foma.

Figura 56 – Segunda concepção de placa de material compósito com nove *inserts* impermeáveis posicionados na pré-forma



Fonte: Elaborado pelo autor

Ainda na Figura 56, é possível ver pequenas partes de borracha usados para dar espaçamento entre os *inserts* de forma unidimensional.

3.2.5 Planejamento de processamento para RTM Light e VARTM

Como meio de facilitar o entendimento e identificação dos experimentos realizados durante esta pesquisa, uma nomenclatura para as placas foi aplicada. A Tabela 5 mostra a nomenclatura dada a cada experimento de processamento das placas pelos métodos de RTM Light e VARTM, respectivamente.

Tabela 5 – Nomenclatura dos experimentos em relação ao tipo de processamento utilizado

Nomenclatura	Preprocessamento
PRL	RTM Light
PVR	VARTM

Fonte: Elaborado pelo autor

Durante o planejamento de processamento das placas fez-se necessário determinar alguns fatores de maior relevância e especificá-los para cada experimento realizado. São eles: número de camadas de fibra na pré-forma, valores das pressões positivas e negativas usada nos processamento, tipo de injeção de cada processamento, *lay-up* especificando o número e disposição dos pontos de entrada e saída, número de *inserts* na pré-forma

e volume de resina disposto no recipiente para injeção. As Tabelas 6 e 7 mostram tais características para cada placa fabricada por RTM Light e VARTM, respectivamente.

Tabela 6 – Características da placa fabricada por RTM Light

Experimento	Nº de camadas	Pressão positiva	Pressão a vácuo	Tipo de injeção	<i>Lay-up</i>	Nº de <i>inserts</i>	Volume de resina
PRL-1	16	2,5 bar	0,8 bar	Linear	1 entrada e 1 saída	1	6 L

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 7 – Características da placa fabricada por VARTM

Experimento	Nº de camadas	Pressão positiva	Pressão de vácuo	Tipo de injeção	<i>Lay-up</i>	Nº de <i>inserts</i>	Volume de resina
PVR-1	16	1,01325 bar	0,8 bar	Linear	1 entrada e 1 saída	1	1 L
PVR-2	14	1,01325 bar	0,5 bar	Linear	1 entrada e 3 saídas	1	1 L
PVR-3	10	1,01325 bar	0,4 bar	Linear	1 entrada e 3 saídas	9	1 L
PVR-4	10	1,01325 bar	0,4 bar	Radial	1 entrada e 1 saída	9	1 L
PVR-5	10	1,01325 bar	0,4 bar	Linear	1 entrada e 3 saídas	9	1 L
PVR-6	10	1,01325 bar	0,4 bar	Linear	1 entrada e 3 saídas	9	1 L

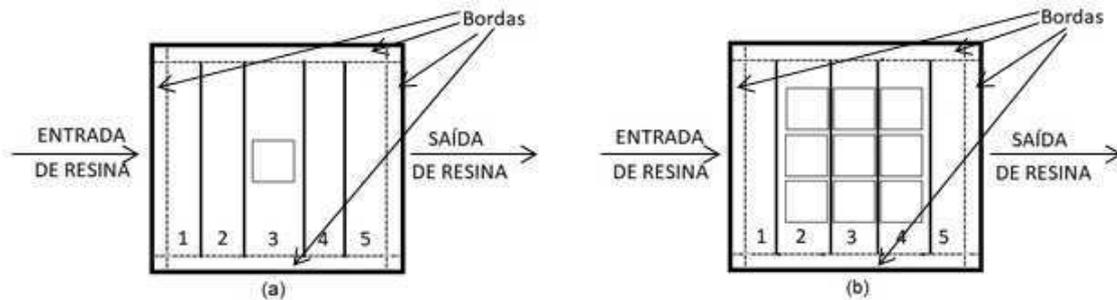
Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.6 Plano de corte das placas

A partir da necessidade de um estudo mais aprofundado das placas fabricadas, um procedimento de corte das mesmas foi realizado. Os cortes das placas foram pensados para

evitar que os *inserts* fossem cortados como forma de entender o escoamento da resina próximo às paredes dos *inserts* (Figura 57). As placas posteriormente foram cortadas uma segunda vez para retirada dos corpos de provas utilizados nos ensaios mecânicos, seguindo a norma de flexão ASTM D7264.

Figura 57 – planejamento de corte para as placas com (a) 1 *insert* e (b) 9 *inserts*



Fonte: Elaborado pelo autor

Algumas seções mostradas na Figura 57 foram nomeadas para facilitar as análises realizadas nas placas e a nomenclatura usada para identificar cada seção é mostrada na Tabela 8.

Tabela 8 – Nomenclatura das seções de acordo a região das placas

Placas	Seções		
	2	3	4
PRL-1	PRL-1-A1	PRL-1-A2	PRL-1-A3
PVR-1	PVR-1-A1	PVR-1-A2	PVR-1-A3
PVR-2	PVR-2-A1	PVR-2-A2	PVR-2-A3
PVR-3	PVR-3-A1	PVR-3-A2	PVR-3-A3
PVR-4	PVR-4-A1	PVR-4-A2	PVR-4-A3
PVR-5	PVR-5-A1	PVR-5-A2	PVR-5-A3
PVR-6	PVR-6-A1	PVR-6-A2	PVR-6-A3

Fonte: Elaborado pelo autor

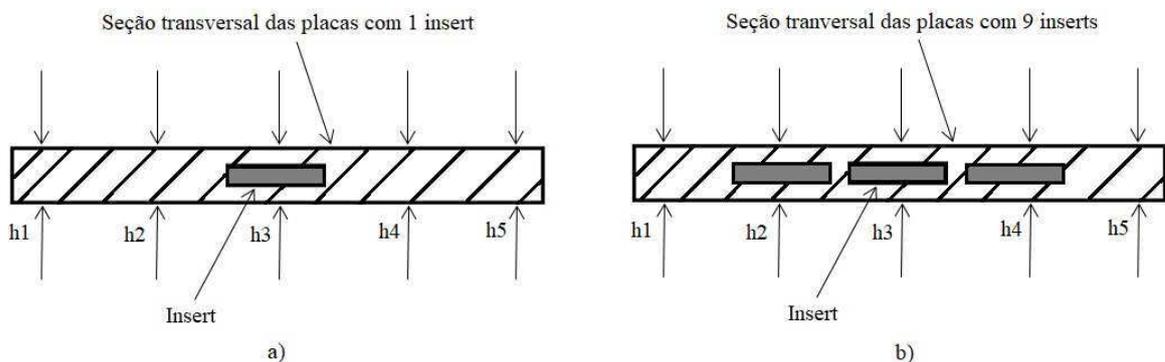
Os cortes das placas foram realizados, primeiramente, na empresa Stratus Aeronaves, utilizando-se de uma serra tico-tico de bancada, posteriormente os cortes foram realizados numa serra de bancada localizada na oficina mecânica do curso de Engenharia Elétrica da UFCG, gerando um bom acabamento, necessitando apenas de lixamento pós-corte para retirada de pequenas rebarbas.

3.2.7 Análise de homogeneidade dimensional das placas

É de grande necessidade a análise dimensional das placas produzidas do modo a identificar possíveis variações dimensionais ao longo das mesmas. Lembrando que para a obtenção de melhores propriedades mecânicas das placas, variações dimensionais das mesmas devem ser evitadas. Após os cortes das placas, medições das espessuras ao longo das seções obtidas do corte de cada placa foram realizadas.

As medidas de espessura das placas foram obtidas através de um paquímetro analógico da marca Vonder®. Para as medições das espessuras, um processo de medição foi desenvolvido. Tal procedimento consistiu em que cada seção escolhida para medição das placas foram marcados 5 pontos (h1, h2, h3, h4 e h5), com distância de 40 mm entre um ponto e outro, ilustrado na Figura 58.

Figura 58 – Pontos de medição da espessura das placas: (a) placas com 1 *insert* e (b) placas com 9 *inserts*



Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.8 Caracterização mecânica por ensaio de flexão

Dentre os vários métodos de caracterização mecânica disponíveis, o ensaio flexão de 3 pontos foi o escolhido como forma de analisar os materiais sob o estado de tensão compressivas e trativas, além de estudar os materiais quanto às falhas por delaminação.

Os ensaios de flexão realizados foram divididos em duas etapas. Na primeira etapa os ensaios foram realizados em corpos de prova do tipo viga, onde um dos corpos de prova possuía inserts e o outro não, com dimensões de $190 \times 68 \times 14 \text{ mm}^3$. Já a segunda etapa dos ensaios foi realizada com corpos de prova com dimensões de $152 \times 13 \times 14 \text{ mm}^3$, seguindo as

recomendações da norma ASTM D7264 que apresenta a metodologia para obtenção das propriedades de flexão de compósitos de matriz polimérica, possui.

A nomenclatura utilizada nos corpos de prova ensaiados, chamados de cp, foram divididos por serem tipo viga ou por se adequarem à norma ASTM D7264 e quanto ao número de *inserts* dos mesmos, mostrados na Tabela 9.

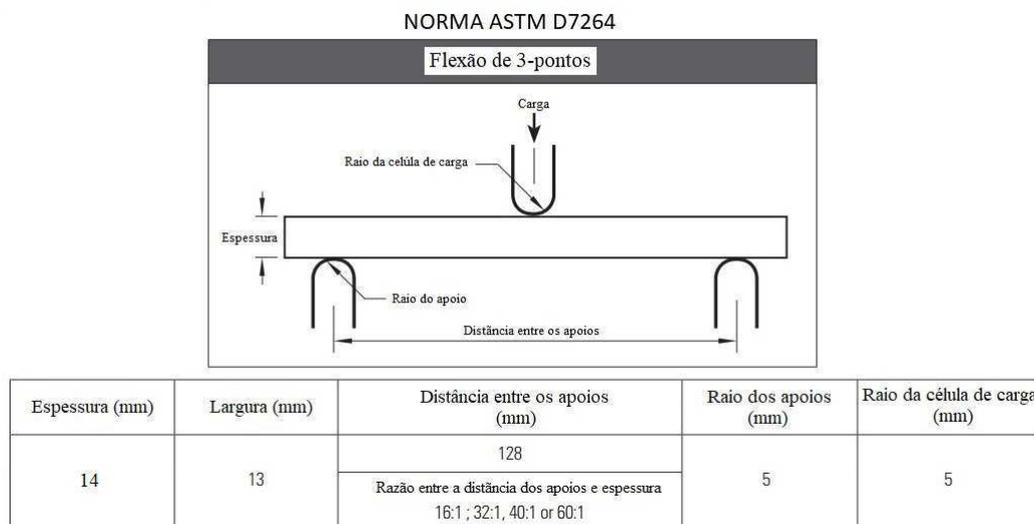
Tabela 9 – Nomenclatura dos corpos de prova utilizados nos ensaios de flexão

	classificação	Nº de <i>inserts</i>
cp1	viga	3
cp2	viga	0
cp3	ASTM	1
cp4	ASTM	1
cp5	ASTM	1
cp6	ASTM	3

Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 59 apresenta um diagrama para o ensaio de flexão em 3-pontos.

Figura 59 – Ensaio de Flexão de 3-pontos segundo a norma ASTM D7264



Fonte: Adaptado da norma ASTM D7264

Os ensaios foram realizados utilizando uma taxa de deslocamento de 1 mm/min, sem pré-carga em uma máquina universal de ensaios SHIMADZU® AGS-X com célula de carga de 50 kN, pertencente ao Núcleo de Tecnologias Estratégicas em Saúde (NUTES) da UEPB (Figura 60). No total, foram realizados 6 ensaios de flexão de 3-pontos.

Figura 60 – Máquina universal de ensaios SHIMADZU® AGS-X



Fonte: Elaborado pelo autor

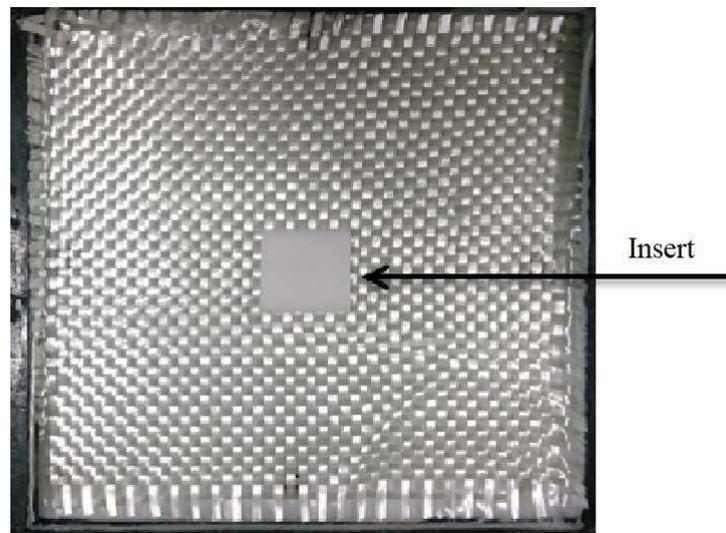
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresentará os estudos relacionados ao processamento dos materiais compósitos com *inserts* impermeáveis embebidos via RTM.

4.1 ESTUDOS DO PROCESSAMENTO DOS COMPÓSITOS POR RTM LIGHT

Neste trabalho, a fabricação de materiais compósitos teve início a partir do processo de RTM Light com o sistema de injeção sendo composto pela máquina industrial da marca Transtécnica *Ltda*, dando origem à primeira placa chamada de PRL-1, ver Tabela 6 no tópico 3.2.4. A placa PRL-1 possuiu uma pré-forma composta por 16 camadas de tecido de fibra de vidro, onde cada camada possui dimensões de $250 \times 250 \text{ mm}^3$ e 1 *insert* com $50 \times 50 \times 4 \text{ mm}^3$ posicionado no centro do molde entre as camadas 8 e 9 (Figura 61).

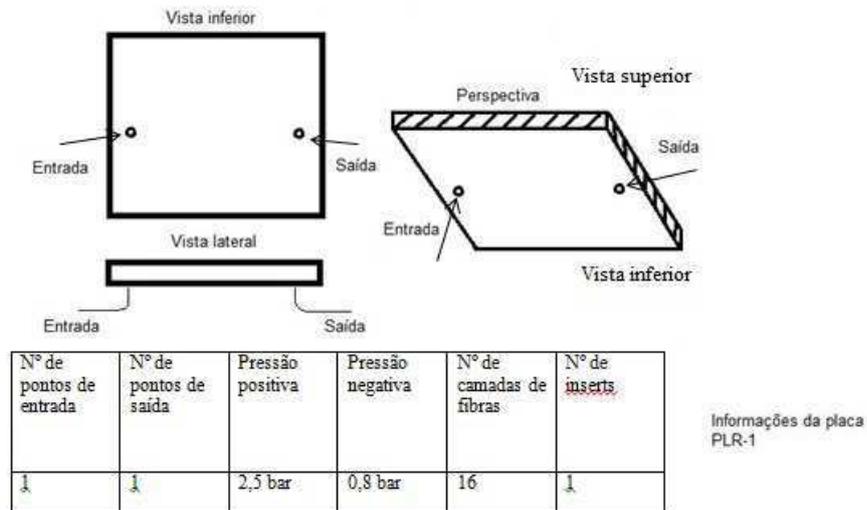
Figura 61 – *Insert* posicionado na pré-forma



Fonte: Elaborado pelo autor

A princípio o *lay-up* para a fabricação da primeira placa foi com 1 ponto de entrada de resina e 1 ponto de saída de ar, usando o método de frente de fluxo retilínea no plano inferior do molde, ou seja, tanto o ponto de entrada quanto o de saída estavam localizados na base do molde, onde o sentido da injeção contrário ao da gravidade, ilustrado na Figura 62.

Figura 62 – Esquemática do processamento da placa PLR-1

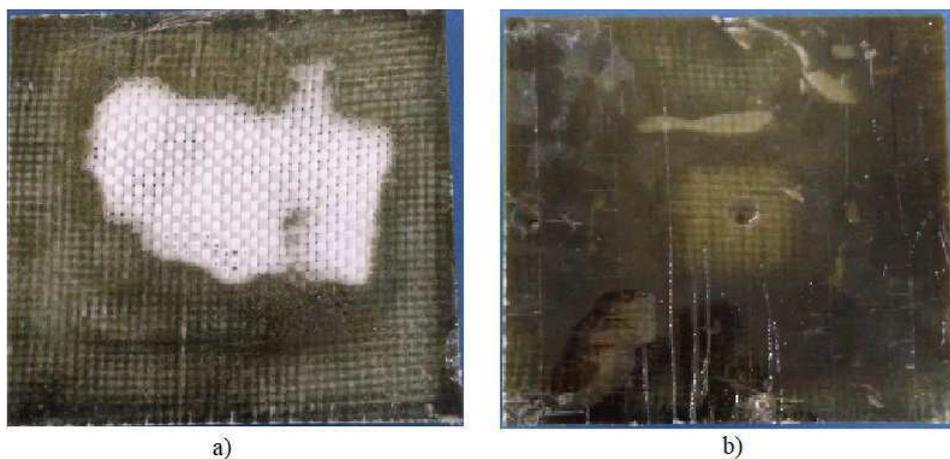


Fonte: Elaborado pelo autor

A pressão positiva usada pela máquina de RTM foi de 2,5 bar, como indicado pelo fabricante como sendo ideal para pequenas placas, já a pressão de vácuo usada foi uma pressão constante de 0,8 bar, máxima produzida pelo compressor EMI 45HER.

O processamento da placa PLR-1 foi realizado seguindo os parâmetros indicados na Figura 62. Após o processamento e desmoldagem da placa PRL-1 terem sido concluídos, as análises da mesma puderam ser realizados (Figura 63).

Figura 63 – Placa PRL-1: (a) vista superior e (b) vista inferior



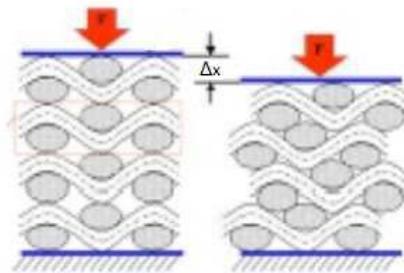
Fonte: Elaborado pelo autor

Pela Figura 63, percebe-se que o processamento não logrou êxito, uma vez que a resina não conseguiu atingir o centro do molde, com o escoamento da resina ocorrendo da borda para o centro. Na Figura 63(a), referente à vista superior da placa, vê-se uma

área considerável localizada no centro, onde as fibras não foram molhadas pela resina, caracterizada como “região seca”, chamada de *dry-spot*.

Algumas hipóteses puderam ser levantadas sobre a formação de *dry spot* na placa PRL-1. A porosidade da pré-forma esteve muito baixa devido ao elevado número de camadas somado ao *insert* com relação à espessura do espaçador usado, dificultando o escoamento da resina. Essa dificuldade do escoamento da resina por essa pré-forma pode ser explicada pelo mecanismo de compactação do tecido conhecido como *Nest* (Figura 64). Amorim Jr. (2007) apud Chen et al. (2001) afirmam que o principal mecanismo de compactação atuante durante a compressibilidade dos tecidos planos no interior do molde é denominado de *Nest*, consistindo na junção dos picos e vales dos tecidos durante o empilhamento das camadas.

Figura 64 – Compactação dos tecidos pelo mecanismo denominado de *Nest*



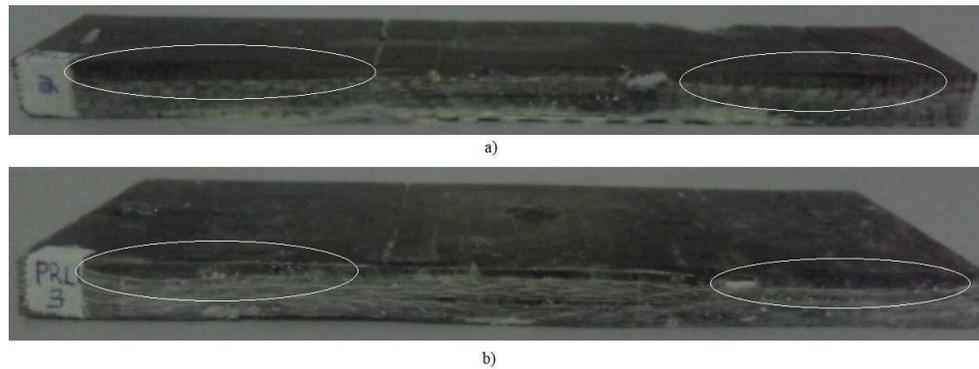
Fonte: Amorim Jr., 2007

A segunda hipótese é que o *lay-up* de injeção utilizado com 1 ponto de entrada e 1 ponto de saída não foi eficaz, uma vez que a resina não conseguiu atingir o centro do molde.

Liu et al.(1996) coloca que devido à presença de *inserts*, nervuras, núcleos ou heterogeneidades na pré-forma, o fluxo de resina no molde pode ramificar e fundir em torno dos *inserts* ou áreas de baixa permeabilidade. Assim sendo, se a frente de fluxo se fundir na ausência de um respiradouro, o ar fica aprisionado e forma manchas secas nessas áreas. Liu et al. (1996) ainda diz que o projeto e a localização da(s) entrada(s) e saída(s) de resina no molde podem influenciar no aparecimento de *dry-spots* na peça fabricada.

Após as análises iniciais, a placa PRL-1 passou pela etapa de corte a fim de se estudar a influência dos *inserts* no fluxo de resina. A Figura 65 mostra duas seções transversais da placa PRL-1 após o corte.

Figura 65 – Seções transversais da placa PRL-1: (a) seção 2 e (b) seção 3

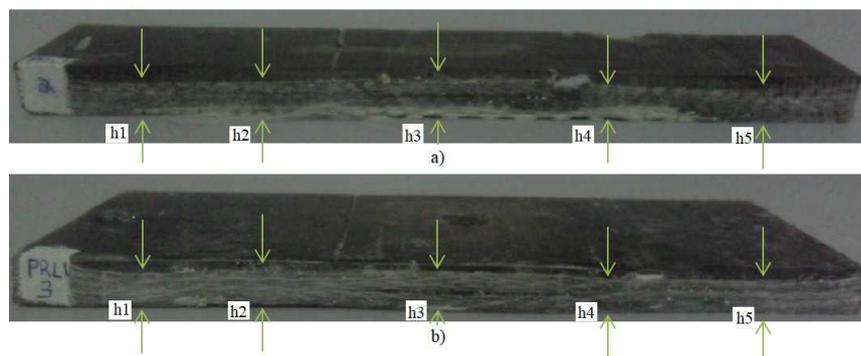


Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 65(a) ilustra a seção 2 da placa PRL-1 que não possui *insert*, chamada de PRL-1-A1, enquanto a Figura 65(b) ilustra a seção 3 da placa PRL-1 onde o *insert* estava localizado, chamada de PRL-1-A2 como determinado na Tabela 8 presente no tópico 3.2.5. Ao se analisar a Figura 65 percebe-se que em certas áreas das superfícies das seções existem zonas ricas em resina, em destaque, sendo esta a consequência de um fenômeno conhecido como *flow on the top*. Gebart e Strömbeck (2000) afirmam que esse fenômeno se assemelha ao fenômeno de *race-tracking* por se tratar de uma região rica em resina sem fibras. Assim, surgiu a hipótese que o desenvolvimento do fenômeno de *flow on the top* ocorreu devido a uma possível compactação das fibras durante o processamento.

A Figura 66 apresenta medições da variação de espessura realizadas nas seções PRL-1-A1 e PRL-1-A2.

Figura 66 – Esquema de medição da variação da espessura das fibras da placa PRL-1



Fonte: Elaborado pelo autor

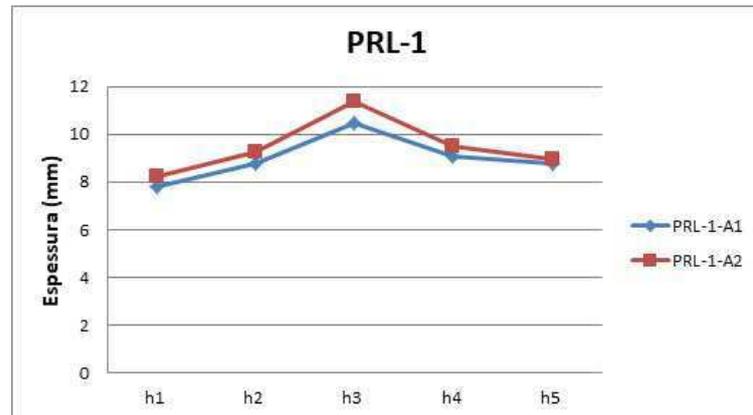
Os resultados das medições da variação da espessura realizadas nas seções PRL-1-A1 e PRL-1-A2 ilustrada na Figura 66 foram dispostos na Tabela 10, gerando o gráfico de variação da espessura ilustrado na Figura 67.

Tabela 10 – Medições da variação da espessura das fibras ao longo da placa PRL-1

Amostra	h1(mm)	h2(mm)	h3(mm)	h4(mm)	h5(mm)
PRL-1-A1	7,80	8,75	10,45	9,10	8,75
PRL-1-A2	8,25	9,25	11,35	9,50	8,95

Fonte: Elaborado pelo autor

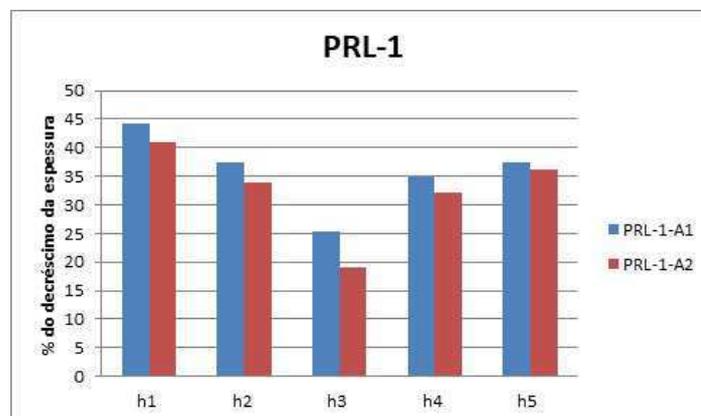
Figura 67 – Variação da espessura das fibras da placa PRL-1



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 67 mostra uma variação da espessura das fibras de aproximadamente 8 mm próximo às bordas (h1 e h5) e 11 mm na parte onde o *insert* estava localizado (h3). Sabendo-se que a espessura do espaçamento do molde é de 14 mm, ficou comprovada a existência de um decréscimo entre a espessura final da placa e a espessura do espaçamento do molde, sendo os valores deste decréscimo em porcentagem de espessura ilustrados na Figura 68.

Figura 68 – Percentual de decréscimo da espessura devido à contração das fibras da placa PRL-1 em relação à espessura do molde



Fonte: Elaborado pelo autor

A partir das análises da Tabela 10 e Figuras 66, 67 e 68, foi confirmado que a hipótese de que houve variação da espessura das fibras devido à compactação das mesmas durante o processamento, sendo responsável pelo desenvolvimento do fenômeno de *flow on the top*. A partir do resultado das medições, foi possível concluir que a compactação das fibras ocorreu do centro para as bordas da placa PRL-1, mostrando a influência do *insert* na variação da espessura da placa, alterando a porosidade da pré-forma nas zonas afetadas e, conseqüentemente, variando a permeabilidade ao longo da placa. É interessante citar também que a seção PRL-1-A1, a qual não possui *insert*, também foi afetada pela compactação das fibras, levantando a hipótese que o efeito gerado pelo *insert* se estende para além de sua presença. Essa compactação é causada provavelmente devido ao uso das pressões positivas e de vácuo.

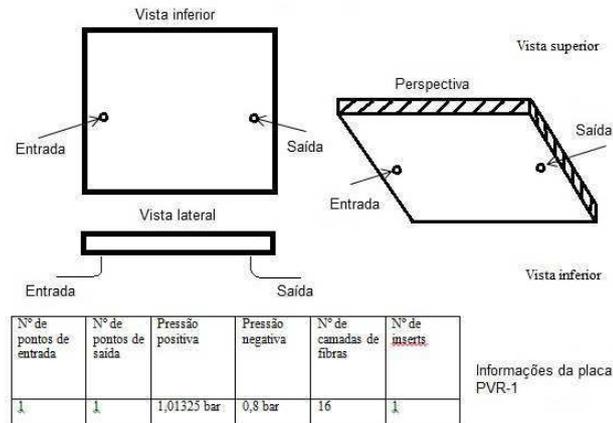
Ao fim da atividade de fabrico da placa PRL-1 achou-se por bem desenvolver um sistema mais simples para o processamento das placas futuras. Como apenas protótipos estavam sendo fabricados, com intervalos de tempo consideráveis para ajustes entre as atividades, concluiu-se como sendo desnecessário o uso de uma máquina industrial projetada para produções em larga escala para o desenvolvimento de tais atividades, já que para sua operação eram necessários 5 litros de resina e 8 litros de solvente, este último utilizado para limpeza.

4.2 ESTUDO DO PROCESSAMENTO DOS COMPÓSITOS POR VARTM

4.2.1 Processamento da placa PVR-1

A placa PVR-1 foi a primeira usando o processo de VARTM. Os mesmos parâmetros da placa PRL-1 foram utilizados como uma forma de comparação entre os processos RTM Light e VARTM Figura 69. Assim, a pré-forma da placa PVR-1 possuía 16 camadas de tecido de fibra de vidro, um *insert*, com um *lay-up* de injeção composto por um ponto de entrada e um ponto de saída localizados na base do molde.

Figura 69 – Esquemática do processamento da placa PVR-1

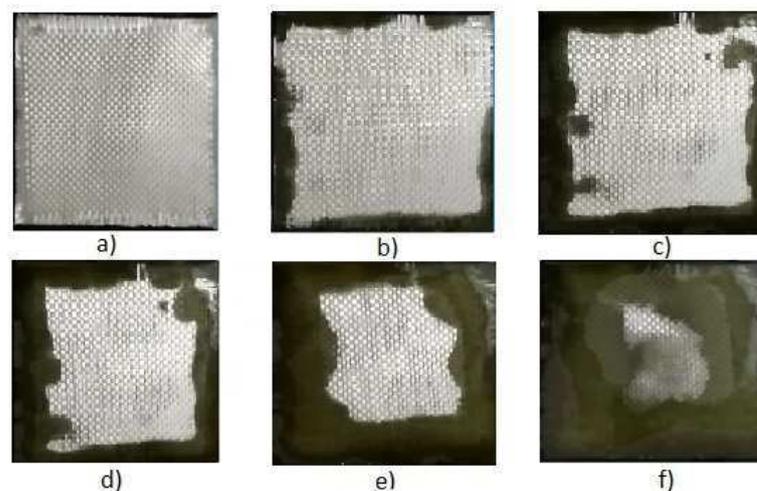


Fonte: Elaborado pelo autor

A diferença para o processo da placa PLR-1 ficou a cargo da quantidade de resina usada durante a injeção, que passou de 6 litros (quantidade recomendada para uso da máquina industrial) para 1 litro e das pressões de injeção usadas, uma vez que a pressão usada na placa PVR-1 foi 1,01325 bar, com o recipiente de resina aberto ao meio atmosférico. A pressão de vácuo também foi igual nos dois processamentos, igual a 0,8 bar.

Durante o processamento desta placa, a filmagem foi realizada com o intuito de analisar a frente de fluxo de resina. A Figura 70 ilustra o avanço da frente de fluxo durante o processamento da PVR-1, onde as Figuras 70(a), (b), (c), (d) e (e) mostram o avanço da frente de escoamento nos instantes 0 até 240 s, com uma foto feita a cada 60 s; e a Fig 70(f) mostra o instante final do escoamento .

Figura 70 – Sequência de escoamento do processamento da placa PVR-1: (a) $t= 0$ s, (b) 60 s, (c) 120 s, (d) 180 s, (e) 240 s e (f) 2179 s

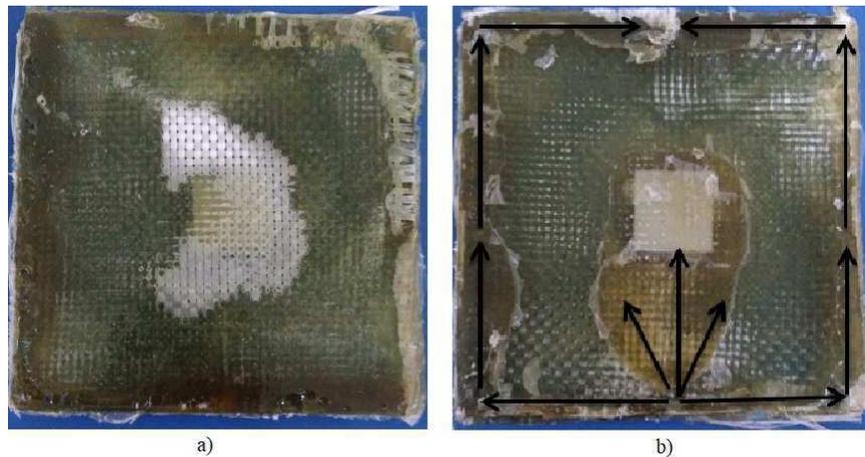


Fonte: Elaborado pelo autor

Ao analisar a imagem do processamento, ilustrada na Figura 70, é possível perceber que o escoamento ocorreu, assim como na placa PRL-1, das bordas para o centro do molde, evidenciando a dificuldade da resina escoar através da pré-forma devido à baixa porosidade da mesma, além de ser possível dizer que houve o desenvolvimento do fenômeno de *race-tracking* nas paredes do molde. Ao final do processamento, ilustrado na Figura 70 (f), é possível perceber que não houve o completo preenchimento do molde, sendo evidenciada a presença de uma zona seca ao centro da placa, sendo este um resultado semelhante ao encontrado na placa PRL-1.

Com o processo de cura finalizado, uma análise visual da placa PVR-1 foi realizada. A Figura 71 mostra a placa PVR-1 após o processamento ser finalizado.

Figura 71 – Placa PVR-1: (a) vista superior e (b) vista inferior

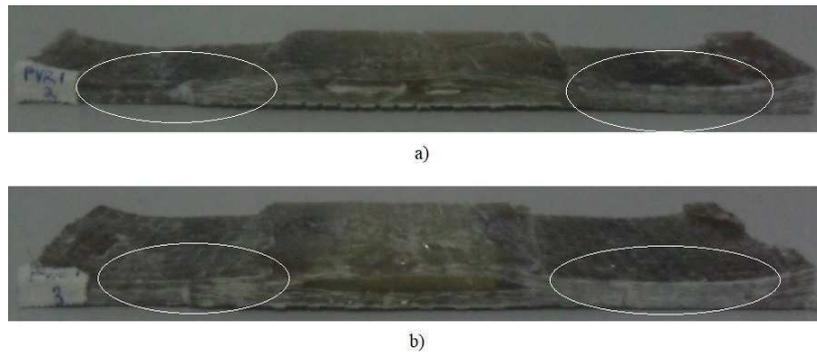


Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 71(a) apresenta uma zona seca, semelhante à identificada na placa PRL-1, onde não houve molhamento das fibras no centro do molde. Sendo mais uma vez levantada as hipóteses que o mecanismo do tipo *Nest* compactou as fibras com auxílio da pressão de vácuo e que o *lay-up* de injeção utilizado com 1 ponto de entrada e 1 ponto de saída não foi eficaz, uma vez que a resina não conseguiu atingir o centro do molde, confirmando o que foi dito por Liu et al. (1996).

Após as análises iniciais, a placa PVR-1 passou pela etapa de corte a fim de se estudar a influência dos *inserts* no fluxo de resina. A Figura 72 ilustra o corte transversal de duas seções da placa PVR-1.

Figura 72 – Seções transversais da placa PVR-1: (a) seção 2 e (b) seção 3

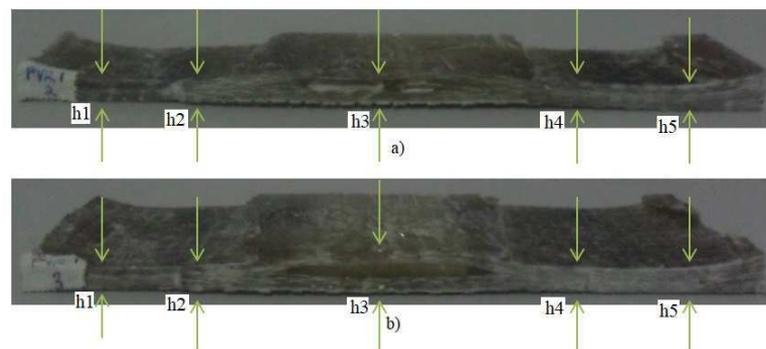


Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 72(a) ilustra a seção 2 da placa PVR-1 que não possui *insert*, chamada de PVR-1-A1, enquanto a Figura 72(b) ilustra a seção 3 da placa PVR-1 onde o *insert* estava localizado, chamada de PVR-1-A2, como determinado na Tabela 8 presente no tópico 3.2.5. Fazendo a análise visual das Figura 72 percebe-se que houve compactação das fibras do centro das peças para as bordas devido à presença do *insert*, sendo este um resultado semelhante ao obtido na placa PRL-1. Porém, não foi identificado o desenvolvimento do fenômeno de *flow on the top*.

Medições nas amostras PVR-1-A1 e PVR-1-A2, esquematizadas na Figura 73, foram feitas como forma de analisar a possível variação da espessura das fibras ao longo da placa PVR-1.

Figura 73 – Esquema de medição da variação da espessura das fibras da placa PVR-1



Fonte: Elaborado pelo autor

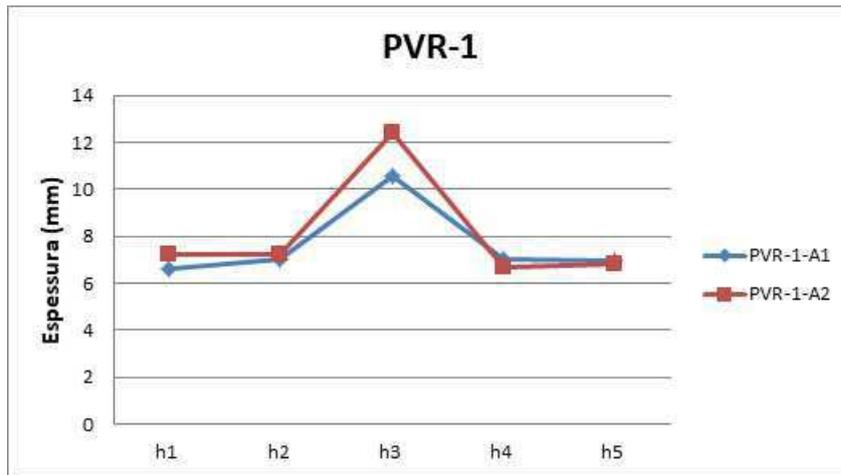
Os resultados das medições da variação da espessura das fibras esquematizado na Figura 73 foram dispostos na Tabela 11, gerando o gráfico de variação da espessura ilustrado na Figura 74 e o decréscimo entre a espessura final da placa e a espessura do espaçamento do molde, ilustrados na Figura 75.

Tabela 11 – Medições da variação da espessura das fibras ao longo da placa PVR-1

Amostra	h1(mm)	h2(mm)	h3(mm)	h4(mm)	h5(mm)
PVR-1-A1	6,60	7,05	10,60	7,05	6,95
PVR-1-A2	7,20	7,25	12,40	6,70	6,80

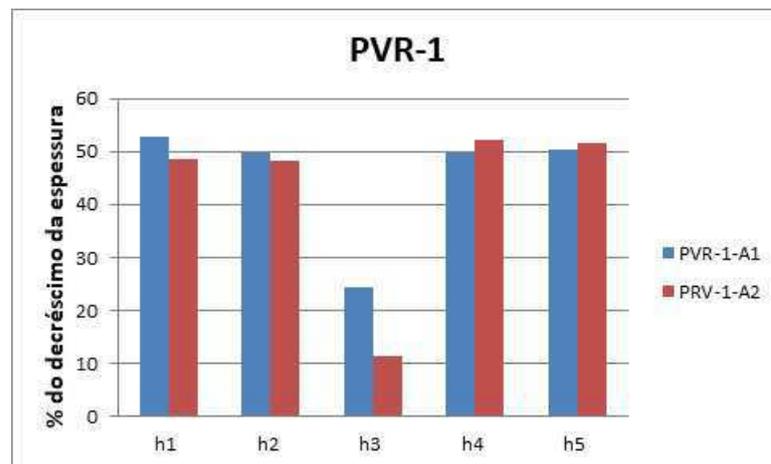
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 74 – Variação da espessura das fibras da placa PVR-1



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 75 – Percentual de decréscimo da espessura devido à contração das fibras da placa PVR-1 em relação à espessura do molde



Fonte: Elaborado pelo autor

A partir das análises da Tabela 11 e 73, 74 e 75, a hipótese que a compactação das fibras em torno do *insert* devido ao efeito da pressão negativa de vácuo durante o processamento da placa PRV-1 foi confirmado, e que mesmo na seção PVR-1-A1 onde não há presença do *insert*, as fibras também sofreram compactação, sendo estes resultados semelhantes aos encontrados na placa PRL-1.

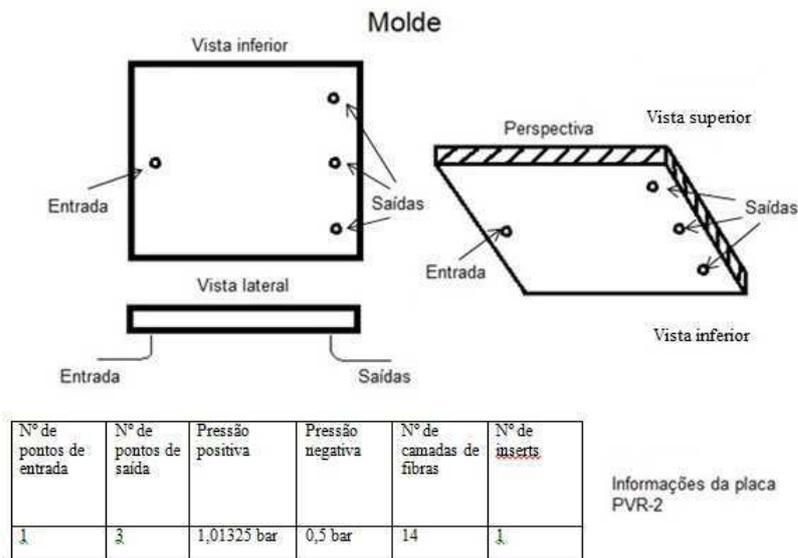
4.2.2 Processamento da placa PVR-2

Para o processamento da placa PVR-2 algumas modificações foram realizadas. Com a hipótese do fechamento dos poros devido à contração das fibras pelo fenômeno de *Nest*, achou-se por bem diminuir o número de camadas de fibra para 14 neste processamento com a finalidade de aumentar a porosidade da pré-forma.

Outra modificação feita foi com relação ao *lay-up* de injeção, agora possuindo 1 ponto de entrada e 3 pontos de saída em linha, numa tentativa de aperfeiçoar a retirada de ar do molde e evitar a formação dos *dry-spots* identificados nas placas PRL-1 e PVR-1. A pressão de vácuo também foi alterada, diminuindo de 0,8 bar para 0,5 bar a fim de aumentar a vazão da resina durante o processamento.

Os demais parâmetros do processamento da placa PVR-2 foram iguais aos usados na placa PVR-1: Método de frente de fluxo retilínea, pressão positiva de 1,01325 bar e 1 *insert*. A esquematização do processamento da placa PVR-2 está ilustrada na Figura 76.

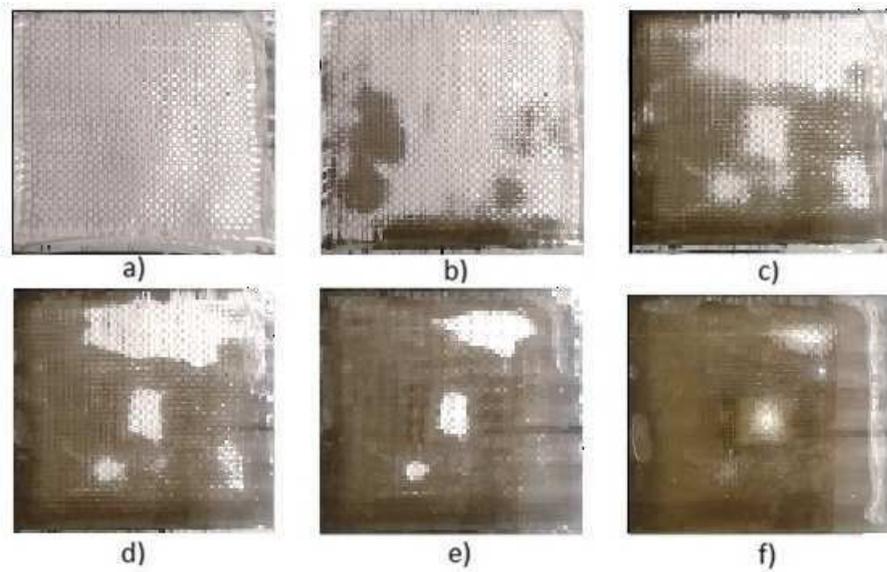
Figura 76 – Esquematização do processamento da placa PVR-2



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 77 ilustra o avanço da frente de fluxo durante o processamento da PVR-2.

Figura 77 – Sequência de escoamento do processamento da placa PVR-2: (a) $t= 0$ s, (b) 60 s, (c) 120 s, (d) 180 s, (e) 240 s e (f) 1010 s

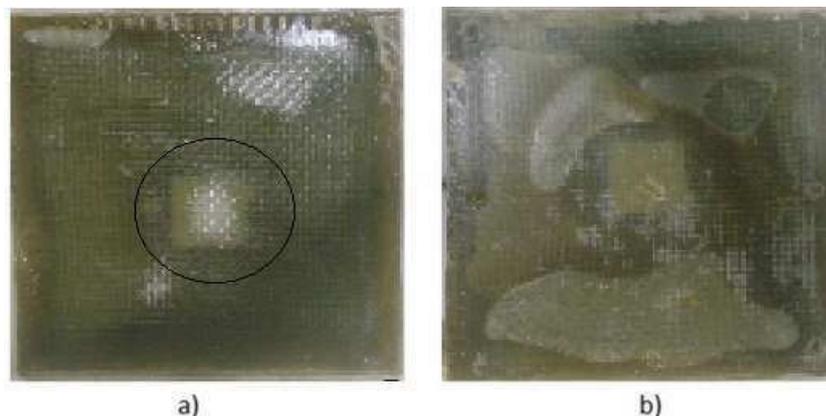


Fonte: Elaborado pelo autor

A análise da Figura 77 mostra que o escoamento da resina durante o processamento não ocorreu das bordas para o centro como nos processamento das placas PRL-1 e PRV-1. Com as mudanças realizadas no processamento, a resina conseguiu escoar através da pré-forma antes do desenvolvimento do *race-tracking* nas paredes do molde. Assim, a decisão de baixar o número de camadas de fibra para este processamento logrou êxito, uma vez que com a diminuição do número de camadas, era esperado que a porosidade da pré-forma fosse maior.

Com o processo de cura finalizado, uma análise visual da placa PVR-2 foi realizada. A Figura 78 mostra a placa PVR-2 após o processamento ser finalizado.

Figura 78 – Placa PVR-2: (a) vista superior e (b) vista inferior

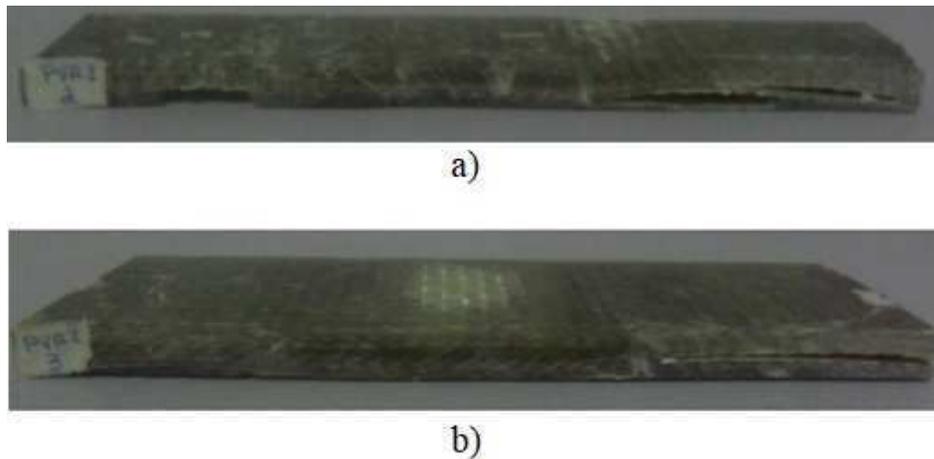


Fonte: Elaborado pelo autor

Foi observado que houve uma diminuição significativa no tamanho da zona seca no centro da placa, quando comparada com as placas PRL-1 e PVR-1, embora ela não tenha sido completamente eliminada, sendo este o resultado da modificação do *lay-up* de injeção. Porém, Lawrence et al. (2007) afirma que ao se introduzir um *insert* na pré-forma, este se for impermeável, vai bloquear o escoamento de resina podendo formar vazios e/ou zonas secas acima dos *inserts*. Assim, surgiu a hipótese que a zona seca da placa PVR-2 foi uma consequência da presença do *insert*.

Após as análises iniciais, a placa PVR-2 passou pela etapa de corte a fim de se estudar a influência dos *inserts* no fluxo de resina. A Figura 79 ilustra duas seções da placa PVR-2 após o corte.

Figura 79 – Seções transversais da placa PVR-2 após os cortes: (a) seção 2 e (b) seção 3

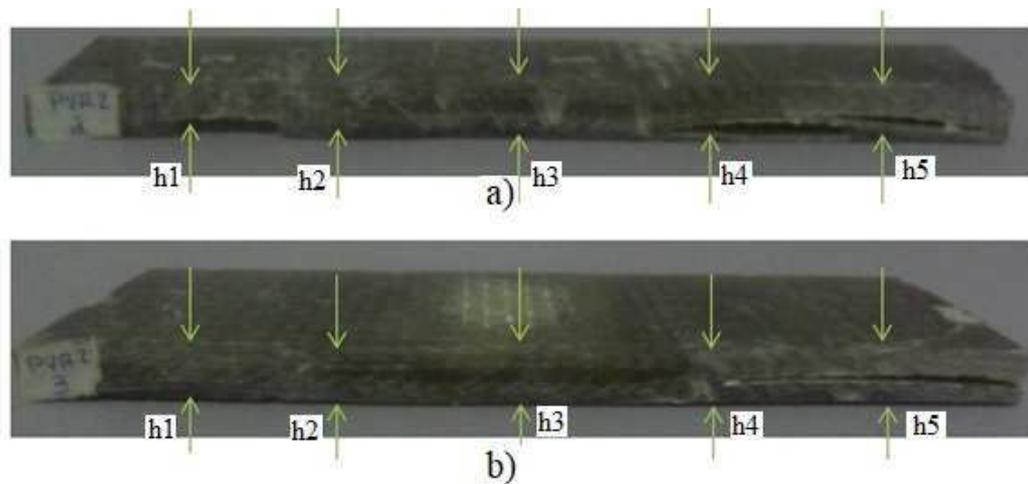


Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 79(a) ilustra a seção 2 da placa PVR-2 que não possui *insert*, chamada de PVR-2-A1, enquanto a Figura 79(b) ilustra a seção 3 da placa PVR-2 onde o *insert* estava localizado, chamada de PVR-2-A2, como determinado na Tabela 8 presente no tópico 3.2.5. Pela Figura 79 percebe-se que houve contração das fibras do centro da peça para as bordas durante o processamento devido à presença do *insert*.

Medições nas amostras PVR-2-A1 e PVR-2-A2, esquematizadas na Figura 80, foram feitas como forma de analisar a variação da espessura das fibras ao longo da placa PVR-2.

Figura 80 – Esquema de medição da variação da espessura das fibras da placa PVR-2



Fonte: Elaborado pelo autor

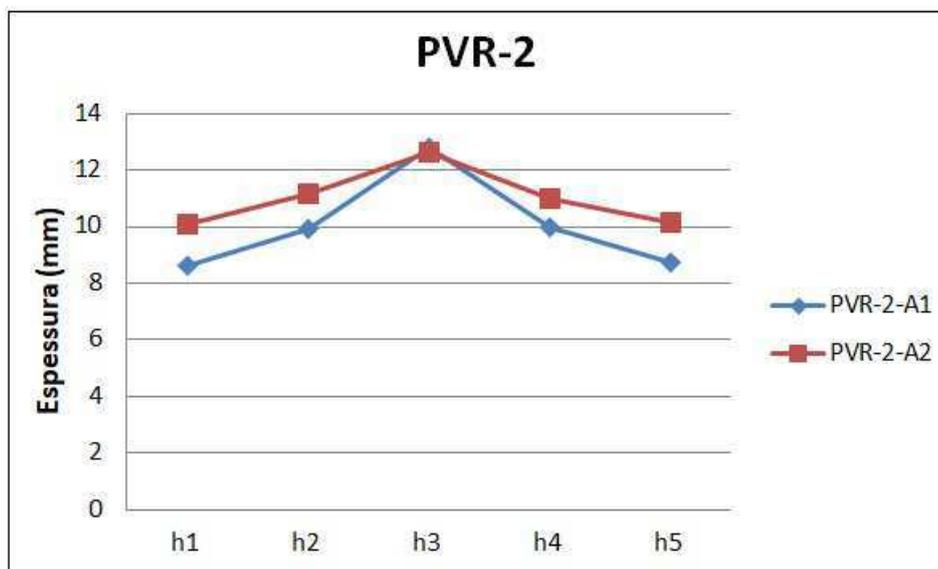
Os resultados das medições da variação da espessura das fibras esquematizado na Figura 80 foram dispostos na Tabela 12, gerando o gráfico de variação da espessura ilustrado na Figura 81 e o decréscimo entre a espessura final da placa e a espessura do espaçamento do molde, ilustrados na Figura 82.

Tabela 12 – Medições da variação da espessura das fibras ao longo da placa PVR-2

Amostra	h1(mm)	h2(mm)	h3(mm)	h4(mm)	h5(mm)
PVR-2-A1	8,60	9,90	12,80	9,95	8,75
PVR-2-A2	10,10	11,15	12,60	11,00	10,15

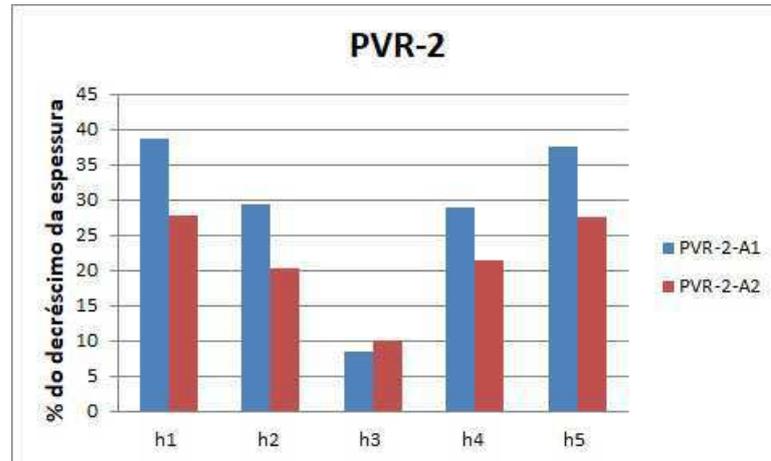
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 81 – Variação da espessura das fibras da placa PVR-2



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 82 – Percentual de decréscimo da espessura devido à contração das fibras da placa PVR-2 em relação à espessura do molde



Fonte: Elaborado pelo autor

A partir das análises da Tabela 12 e Figuras 80, 81 e 82, houve variação na espessura devido à compactação das fibras da placa PVR-2, porém as variações foram menores quando comparadas com as placas PRL-1 e PVR-1, sendo esta uma provável consequência das mudanças com relação ao número de camadas de fibra, *lay-up* de injeção e pressão de vácuo, efetuadas para este processamento. Mesmo com a redução da variação da espessura das fibras, valores significativos de decréscimo de até 38% com relação ao espaçador do molde foram identificados.

Mesmo com resultados melhores obtidos a partir das modificações do processamento da placa PVR-2 quando comparada com as placas PRL-1 e PVR-1, chegou-se a conclusão que a fabricação de um compósito com um *insert* embebido em tais dimensões e condições de processamento é inviável. Desta forma, passou-se a usar pré-formas com 9 *inserts* embebidos a fim de evitar ou diminuir o efeito de compactação das fibra evidenciados nas placas PRL-1, PVR-1 e PVR-2.

4.2.3 Processamento da placa PVR-3

A placa PVR-3 foi a primeira processada com o posicionamento de 9 *inserts* na pré-forma. A disposição dos *inserts* antes do processamento é ilustrada na Figura 83.

Figura 83 – Malha com 9 *inserts* posicionados na pré-forma



Fonte: Elaborado pelo autor

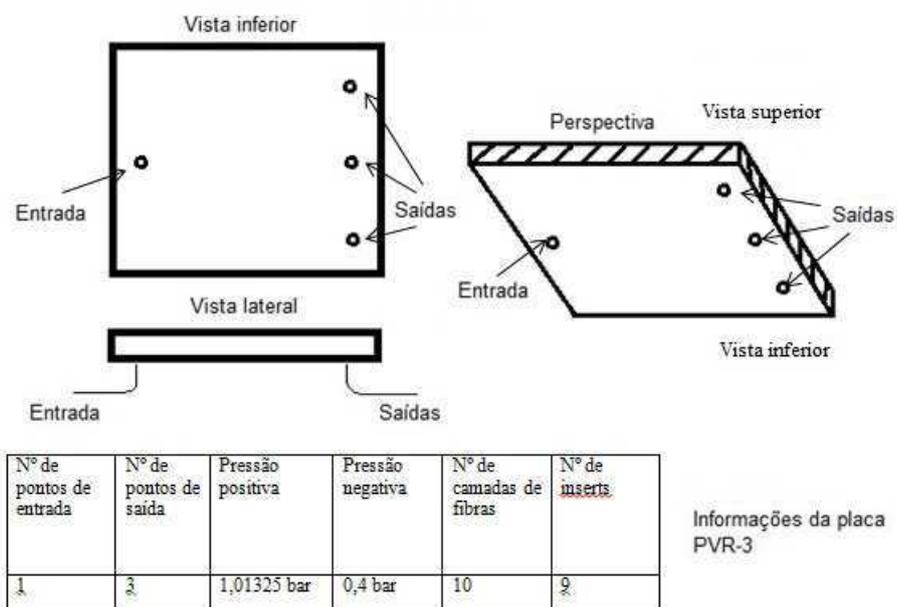
Note pela Figura 83 que os *inserts* foram dispostos na pré-forma com uma certa distância entre si se assemelhando a uma malha e sua separação foi feita através de pequenos pedaços de borracha, sendo este o mesmo procedimento utilizado por Mahdi et al. (2003) para fabricação de compósitos CIA. A utilização das partes de borracha ocorreram como forma de dar espaçamento constante entre os *inserts*.

Com o aumento do número de *inserts*, alguns ajustes no processamento da placa PVR-3 foram realizados baseado nas experiências da fabricação das placas PRL-1, PVR-1 e PVR-2.

A primeira mudança significativa foi nova redução no número de camadas de fibra da pré-forma, esta última agora sendo composta por 10 camadas. Com a utilização de 9 *inserts* era esperado uma resistência ainda maior para o escoamento da resina no meio fibroso devido à contração das fibras pela pressão de vácuo. Além dos problemas enfrentados com fechamento dos poros nas placas PRL-1, PVR-1 e PVR-2, ficou decidido pela redução do número de camadas com a finalidade de reduzir a fração volumétrica e aumentar a porosidade da pré-forma.

Outra mudança realizada foi a diminuição da pressão de vácuo, de 0,5 para 0,4 bar. Os demais parâmetros foram mantidos os mesmos do processamento da placa PVR-2 com pressão positiva de 1,01325 bar, *lay-up* de injeção com 1 ponto de entrada e 3 pontos de saída em linha e método de frente de fluxo retilínea. A esquematização do processamento da placa PVR-3 está ilustrada na Figura 84.

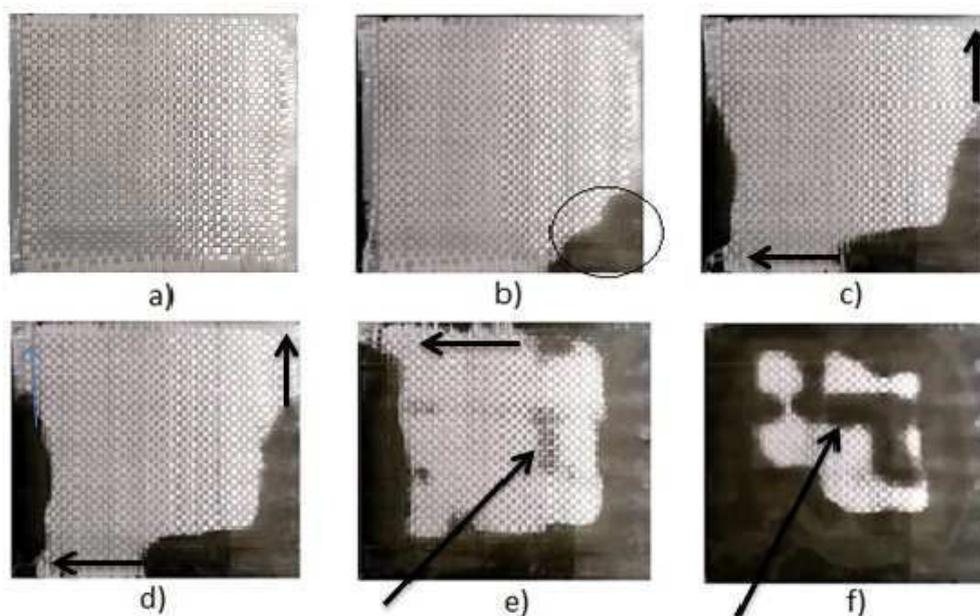
Figura 84 – Esquemática do processamento da placa PVR-3



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 85 ilustra o avanço da frente de fluxo durante o processamento da PVR-3.

Figura 85 – Sequência de escoamento do processamento da placa PVR-3: (a) $t=0$ s, (b) 60 s, (c) 120 s, (d) 180 s, (e) 240 s e (f) 390 s



Fonte: Elaborado pelo autor

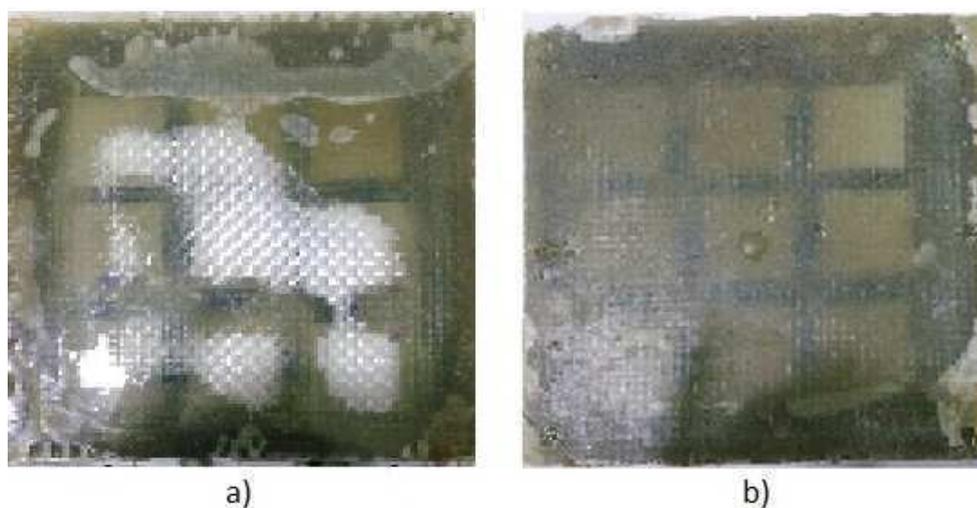
A Figura 85 mostra que utilização do maior número de *inserts* fez com que o escoamento voltasse a ocorrer das bordas para o centro, sendo evidente tal escoamento nas Figuras 85(b), 85(c) e 85(d). Na Figura 85(e) é possível visualizar que a resina começa a

conseguir vencer as dificuldades impostas pelo meio poroso e os *inserts* surgindo na parte superior do molde.

Assim, surgiu a hipótese que o aumento do número de *inserts* foi o responsável pela dificuldade encontrada pela resina em penetrar no meio poroso. De acordo com Lawrence et al. (2007), a presença dos *inserts*, por serem impermeáveis, tende a bloquear o fluxo de resina, além de contrair as camadas de fibra, fechando os poros, dificultando o escoamento da mesma no meio poroso. Na Figura 85(f) é possível visualizar que o escoamento ocorreu entre os *inserts*. Devido à distância entre os *inserts* na montagem da pré-forma, canais foram formados, e foram por esses canais que o escoamento ocorreu.

Com o processo de cura finalizado, uma análise visual da placa PVR-3 foi realizada. A Figura 86 mostra a placa PVR-3 após o processamento ser finalizado.

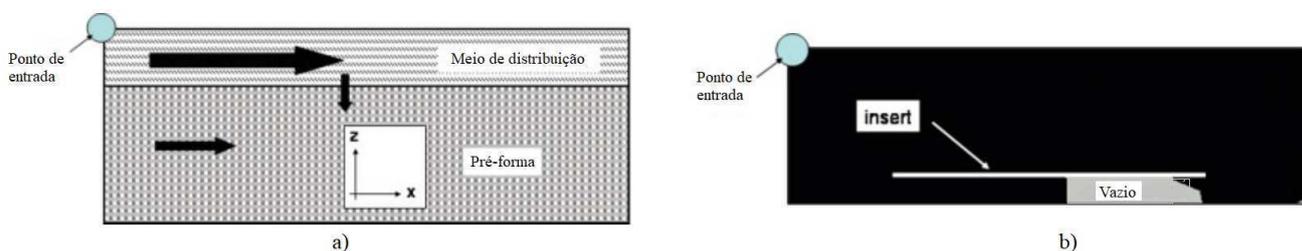
Figura 86 – Placa PVR-3: (a) vista superior e (b) vista inferior



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 86(a), referente à vista superior da placa, vê-se que embora o escoamento tenha se desenvolvido pelos canais entre os *inserts*, uma zona de *dry-spot* foi formada no centro da placa. Lawrence et al. (2007) diz que os *inserts* vão dificultar o escoamento da resina, devido ao bloqueio do fluxo transversal, esquematizado na Figura 87.

Figura 87 – Tipos de fluxo de resina no processamento de material compósito com *insert* embebido: (a) esquematização dos fluxos laterais e transversal e (b) Formação do vazio abaixo do *insert* devido ao bloqueio do fluxo transversal

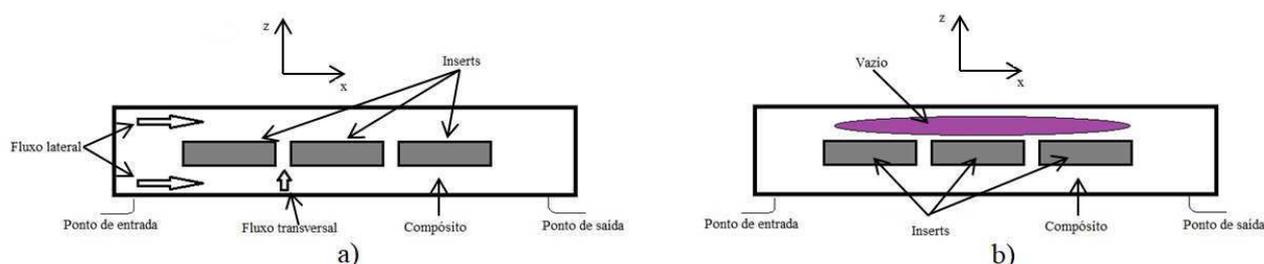


Fonte: Adaptado de Lawrence et al., 2007

Lawrence et al. (2007) destaca na Figura 87(a) a existência de três tipos de fluxo de resina internos durante o processamento, sendo dois fluxos laterais, um no meio de distribuição (região de alta permeabilidade) com grande velocidade e outro no meio poroso, mais lento devido a baixa permeabilidade do meio, o terceiro fluxo é o transversal, sendo este último o mais lento dos três. Com a presença do *insert*, o fluxo transversal será bloqueado pelo *insert*, fazendo com que o fluxo lateral do meio poroso seja o único responsável pelo preenchimento da região abaixo do *insert*, causando a formação do vazio ilustrado na Figura 87(b).

A Figura 88 esquematiza os tipos de fluxo de resina da placa PVR-3, seguindo o exemplo de Lawrence et al. (2007).

Figura 88 – Tipos de fluxo de resina no processamento da placa PVR-3: (a) esquematizações dos fluxos laterais e transversal e (b) Formação do *dry-spot* acima dos *inserts* devido ao bloqueio do fluxo transversal



Fonte: Elaborado pelo autor

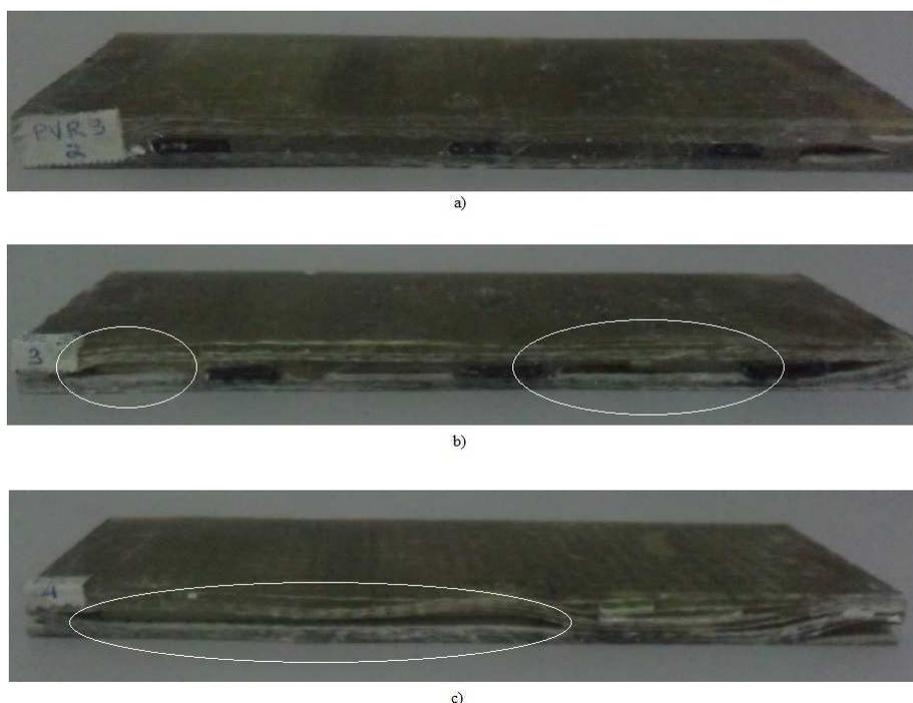
A Figura 88(a) ilustra os fluxos lateral e transversal da placa PVR-3. Assim como no trabalho de Lawrence et al. (2007) os *inserts* vão bloquear o fluxo transversal dos

inserts, sendo o fluxo lateral o responsável pelo preenchimento da região acima dos *inserts*, resultando no *dry-spot* evidenciado na Figura 86 e demonstrada na Figura 88(b).

Além da influência dos *inserts* outra hipótese surgiu para a formação do *dry-spot* na placa PVR-3, foi a de que o *lay-up* de injeção com 1 ponto de entrada e 3 pontos de saídas foi ineficaz, uma vez que ambos os pontos, entrada e saída, estavam localizados no mesmo plano, ou seja, na base do molde.

Após as análises iniciais, a placa PVR-3 passou pela etapa de corte a fim de se estudar a influência dos *inserts* no fluxo de resina. A Figura 89 ilustra três seções da placa PVR-3 após o corte.

Figura 89 – Seções transversais da placa PVR-3 após os cortes: (a) seção 2, (b) seção 3 e (c) seção 4



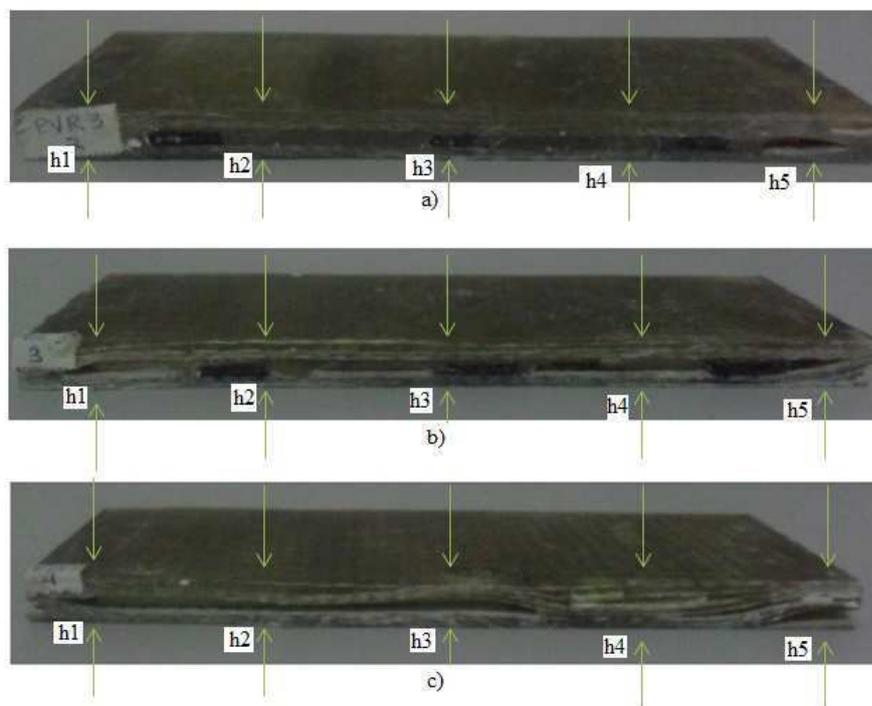
Fonte: Elaborado pelo autor

As Figuras 89(a), 89(b) e 89(c) ilustram as seções 2 (PVR-3-A1), 3 (PVR-3-A2) e 4 (PVR-3-A3), respectivamente, onde em cada amostra possui 3 *inserts*, como determinado na Tabela 8 presente no tópico 3.2.5.

É importante ressaltar as zonas em destaque nas Figuras 89(b) e 89(c) onde houve ausência de resina, confirmando a hipótese que mesmo com a redução do número de camadas, a adição de *inserts* bloqueou o escoamento da resina, além de causar o fechamento dos poros. As zonas onde houve ausência de resina são os canais entre os *inserts*.

Medições nas seções PVR-3-A1, PVR-3-A2 e PVR-3-A3, esquematizadas na Figura 90, foram feitas como forma de analisar a variação da espessura das fibras ao longo da placa PVR-3.

Figura 90 – Esquema de medição da variação da espessura das fibras da placa PVR-3



Fonte: Elaborado pelo autor

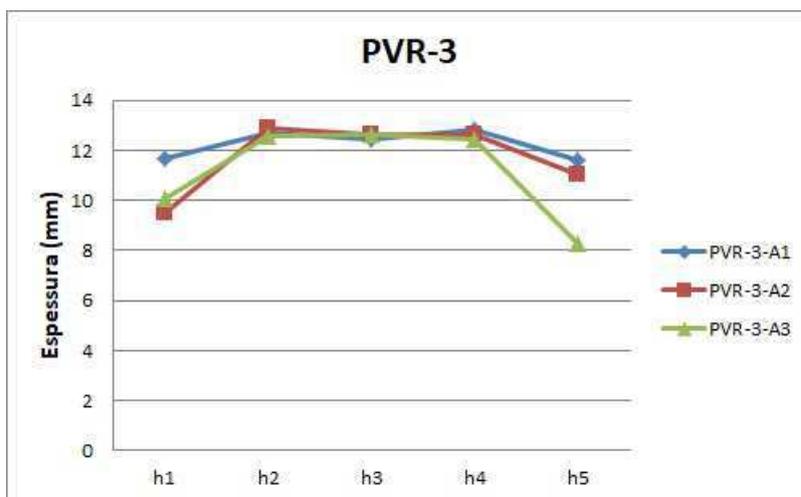
Os resultados das medições da variação da espessura das fibras esquematizado na Figura 90 foram dispostos na Tabela 13, gerando o gráfico de variação da espessura ilustrado na Figura 91 e o decréscimo entre a espessura final da placa e a espessura do espaçamento do molde, ilustrados na Figura 92.

Tabela 13 – Medições da variação da espessura das fibras ao longo da placa PVR-3

Amostra	h1(mm)	h2(mm)	h3(mm)	h4(mm)	h5(mm)
PVR-2-A1	11,70	12,70	12,45	12,85	11,60
PVR-2-A2	9,50	12,90	12,65	12,60	11,05
PVR-2-A3	10,05	12,55	12,60	12,45	8,30

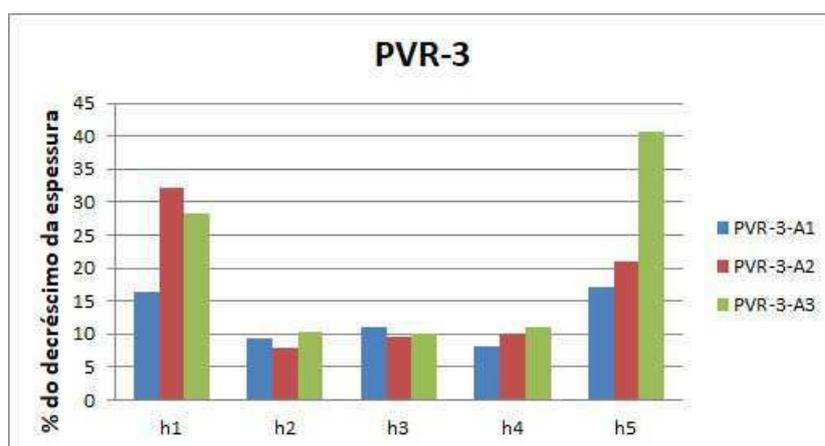
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 91 – Variação da espessura das fibras da placa PVR-3



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 92 – Percentual de decréscimo da espessura devido à contração das fibras da placa PVR-3 em relação à espessura do molde



Fonte: Elaborado pelo autor

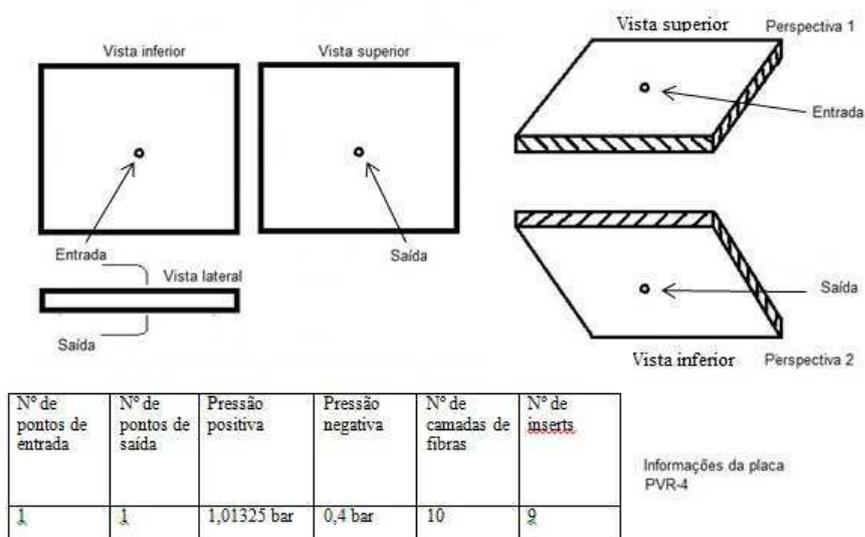
A partir das análises da Tabela 13 e Figuras 90, 91 e 92, ficou constatada a variação de espessura das fibras devido à compactação das mesmas. As espessuras sofreram pequena variação nas regiões onde havia a presença dos *inserts* (pontos h2, h3, h4), com decréscimos de aproximadamente 10%. Porém, ao se aproximar das bordas (pontos h1 e h5), a variação da espessura foi maior, com decréscimos de até 40%, sendo esta uma consequência da utilização de múltiplos *inserts* na pré-forma.

4.2.4 Processamento da placa PVR-4

A partir da hipótese que o *lay-up* de injeção utilizado até o momento foi ineficaz por estar posicionando os pontos de entrada e saída no mesmo plano, a opção pela mudança foi realizada para o processamento da placa PVR-4. Sendo assim, o novo *lay-up* proposto consistia em mudar os planos dos pontos de entrada e saída, onde 1 ponto de entrada ficou localizado na parte central da base do molde e 1 ponto de saída foi colocado na parte central da tampa. Desta forma, o método de fluxo de resina também foi alterado, que até então era retilíneo, passou a ser radial. Os demais parâmetros foram os mesmo usados no processamento da placa PVR-3, 10 camadas de fibra de vidro, 9 *inserts*, pressão positiva com valor de 1,01325 bar e pressão de vácuo com valor de 0,4 bar.

A esquematização do processamento da placa PVR-4 está ilustrada na Figura 93.

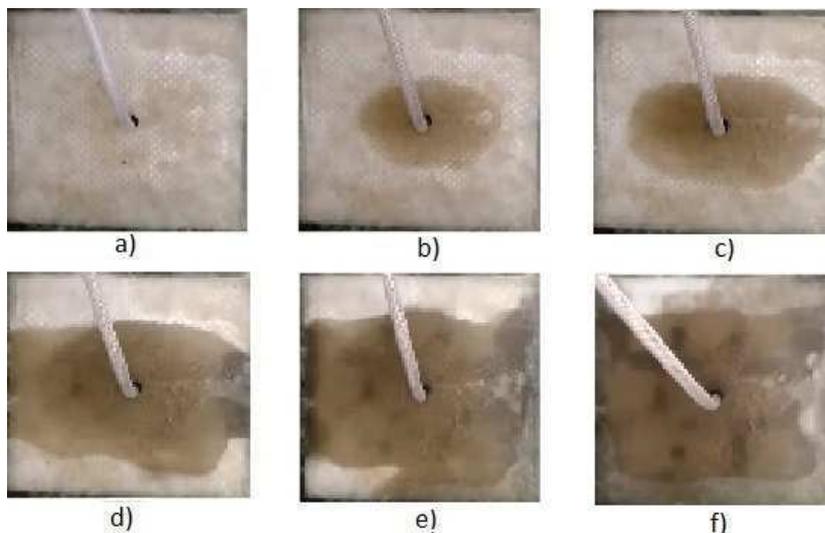
Figura 93 – Esquematização do processamento da placa PVR-4



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 94 ilustra o avanço da frente de fluxo durante o processamento da PVR-4.

Figura 94 – Sequência de escoamento do processamento da placa PVR-4: (a) $t= 0$ s, (b) 60 s, (c) 120 s, (d) 180 s, (e) 240 s e (f) 485 s

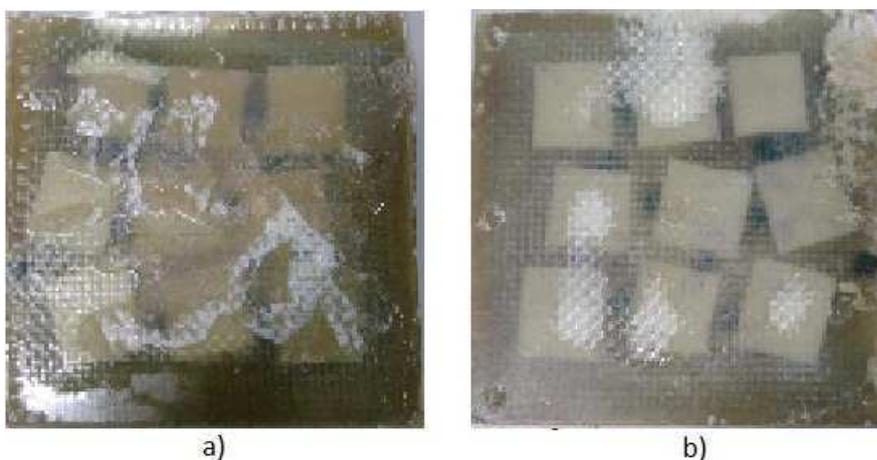


Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 94 é possível ver que o escoamento assume o formato de elipse no método de fluxo radial até atingir as paredes do molde. Gauvin et al. (1996) diz que por causa da natureza anisotrópica das fibras, é natural que a frente de escoamento assumira um formato elíptico.

Com o processo de cura finalizado, uma análise visual da placa PVR-4 foi realizada. A Figura 95 mostra a placa PVR-4 após o processamento ser finalizado.

Figura 95 – Placa PVR-4: (a) vista superior e (b) vista inferior



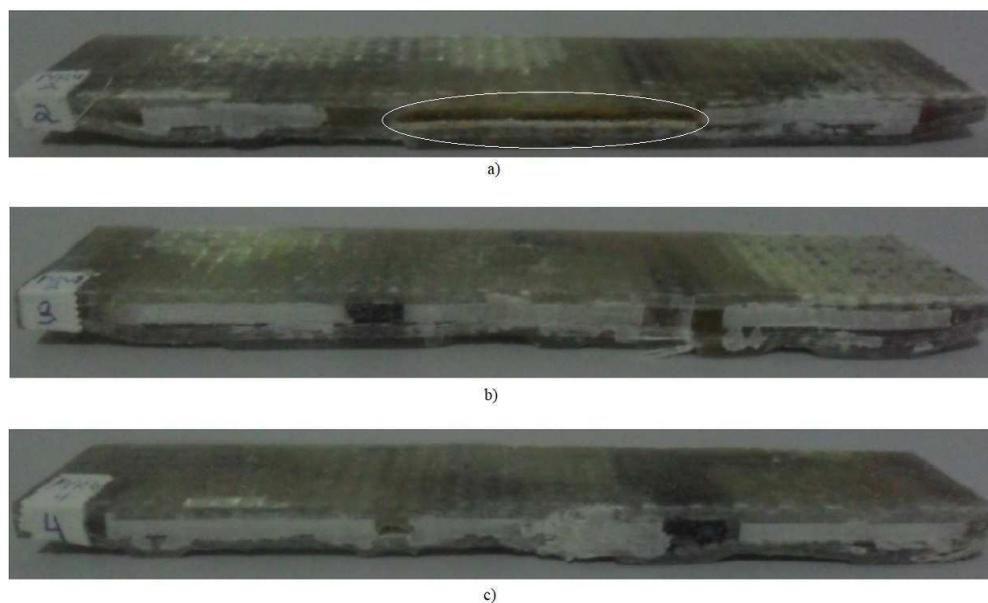
Fonte: Elaborado pelo autor

Foi observado que a partir das mudanças realizadas no *lay-up* de injeção, posicionando os pontos de entrada e saída em planos diferentes e mudando a metodologia de

fluxo de resina, foi constatada a movimentação dos *inserts* ao fim do processamento, onde todos os *inserts* se moveram de suas posições iniciais

Após as análises iniciais, a placa PVR-4 passou pela etapa de corte a fim de se estudar a influência dos *inserts* no fluxo de resina. A Figura 96 ilustra três seções da placa PVR-4 após o corte.

Figura 96 – Seções transversais da placa PVR-4 após os cortes: (a) seção 2, (b) seção 3 e (c) seção 4



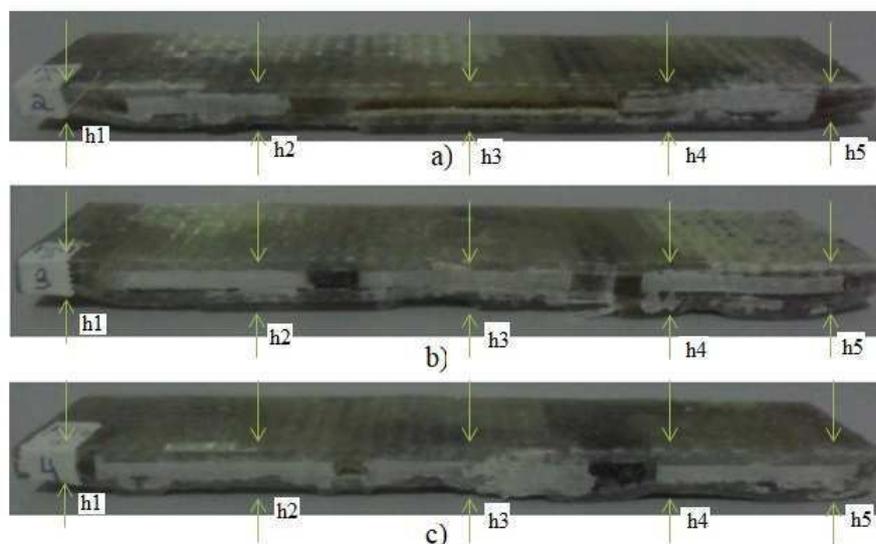
Fonte: Elaborado pelo autor

As Figuras 96(a), 96(b) e 96(c) ilustram as seções 2 (PVR-4-A1), 3 (PVR-4-A2) e 4 (PVR-4-A3), respectivamente, onde em cada amostra possui 3 *inserts*, como determinado na Tabela 8 presente no tópico 3.2.5.

Percebe-se, em destaque, na Figura 96(a) a existência de uma região onde houve ausência de resina nos canais entre os *inserts*, reforçando a hipótese que o número elevado de *inserts* impediu a resina de escoar para certas regiões da placa, sendo este um resultado semelhante ao encontrado na placa PVR-3.

Medições nas seções PVR-4-A1, PVR-4-A2 e PVR-4-A3, esquematizadas na Figura 97, foram feitas como forma de analisar a variação da espessura das fibras ao longo da placa PVR-4.

Figura 97 – Esquema de medição da variação da espessura das fibras da placa PVR-4



Fonte: Elaborado pelo autor

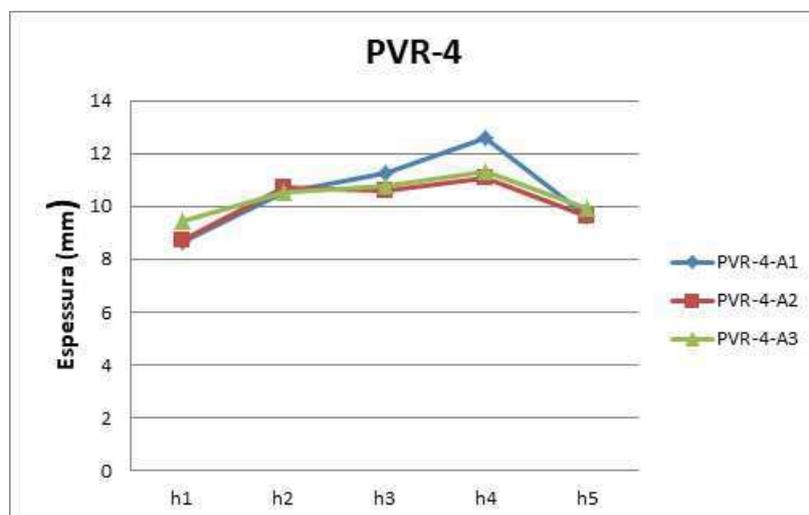
Os resultados das medições da variação da espessura das fibras esquematizado na Figura 97 foram dispostos na Tabela 14, gerando o gráfico de variação da espessura ilustrado na Figura 98 e o decréscimo entre a espessura final da placa e a espessura do espaçamento do molde, ilustrados na Figura 99.

Tabela 14 – Medições da variação da espessura das fibras ao longo da placa PVR-4

Amostra	h1(mm)	h2(mm)	h3(mm)	h4(mm)	h5(mm)
PVR-2-A1	8,65	10,50	11,25	12,60	9,65
PVR-2-A2	8,70	10,70	10,60	11,05	9,65
PVR-2-A3	9,45	10,55	10,75	11,30	9,90

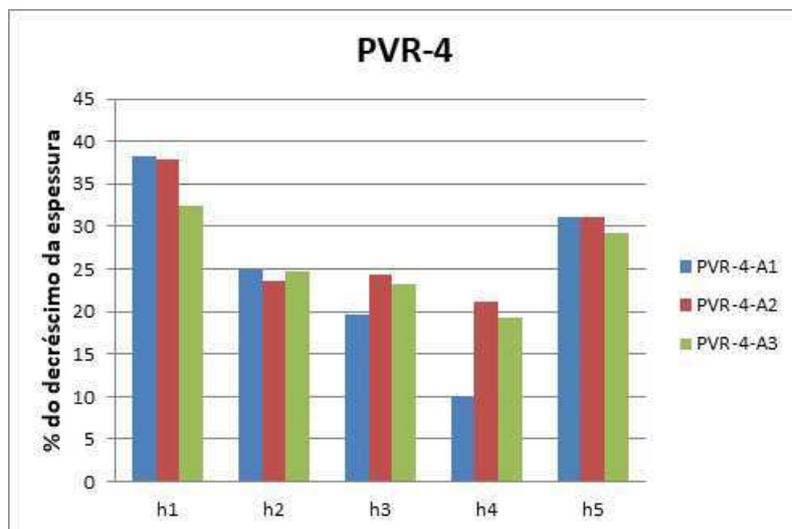
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 98 – Variação da espessura das fibras da placa PVR-4



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 99 – Percentual de decréscimo da espessura devido à contração das fibras da placa PVR-4 em relação à espessura do molde



Fonte: Elaborado pelo autor

A partir das análises da Tabela 14 e Figuras 97, 98 e 99, ficou constatada que houve variação da espessura das fibras devido à compactação das mesmas. Foi percebido ainda uma variação maior nas bordas da placa, regiões sem a presença dos *inserts*. Porém, a compactação das fibras foi maior em todas as regiões da placa PVR-4 quando comparado com a placa PVR-3, com decréscimos de aproximadamente 38% da espessura nas bordas e 24% no centro da placa, mesmo com a presença dos *inserts* nessa última região. É provável que tal aumento na variação se deu devido à mudança realizada no *lay-up* de injeção e método de frente de fluxo, sendo estas as únicas diferenças entre os processamentos das placas PVR-3 e PVR-4.

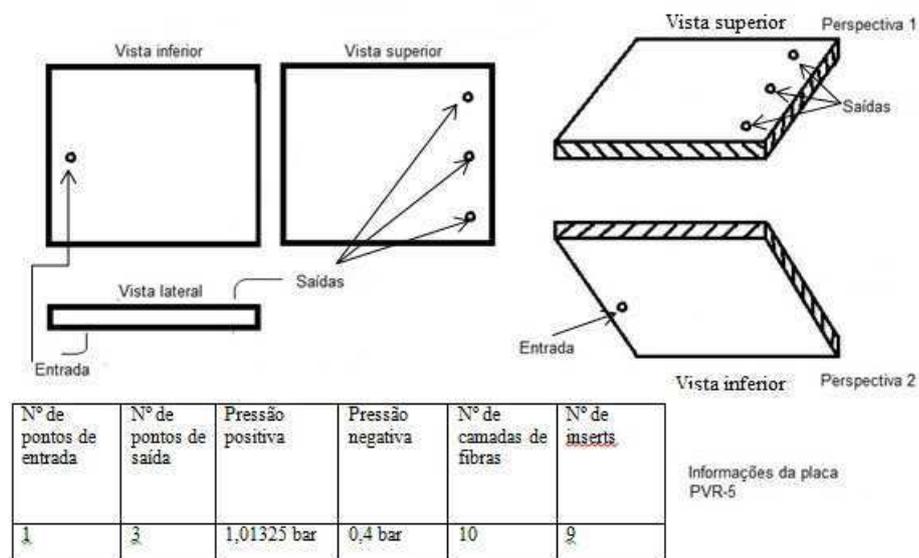
4.2.5 Processamento da placa PVR-5

Como no processamento da placa PVR-4 houve movimentação nos *inserts* devido à mudança do *lay-up* de injeção, optou-se por fazer mais uma mudança no *lay-up* para o processamento da placa PVR-5, voltando a utilizar o método de fluxo retilíneo de resina, porém mantendo os pontos de entrada e saída posicionados em planos diferentes. Assim, o novo *lay-up* foi composto por 1 ponto de entrada posicionado na base do molde e 3 pontos de saída em linha posicionados na tampa do molde. Os demais parâmetros foram os mesmo usados nos processamentos das placas PVR-3 e PVR-4, 10 camadas de fibra de

vidro, 9 *inserts*, pressão positiva com valor de 1,01325 bar e pressão de vácuo com valor de 0,4 bar.

A esquematização do processamento da placa PVR-5 está ilustrada na Figura 100.

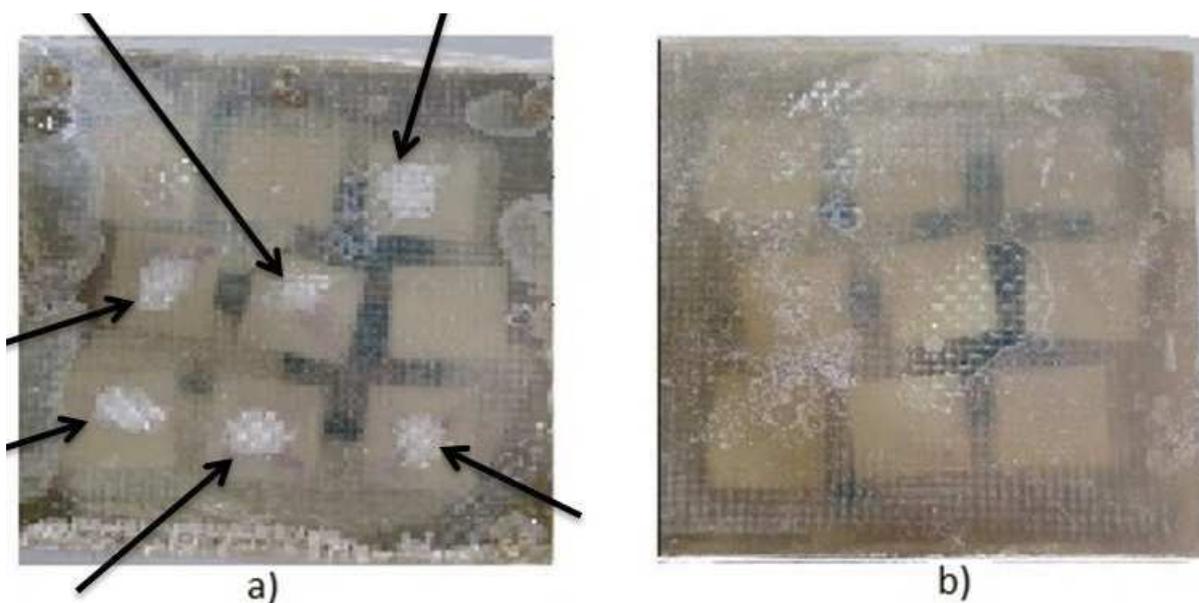
Figura 100 – Esquematização do processamento da placa PVR-5



Fonte: Elaborado pelo autor

Com o processo de cura finalizado, uma análise visual da placa PVR-5 foi realizada. A Figura 101 mostra a placa PVR-5 após o processamento ser finalizado.

Figura 101 – Placa PVR-5: (a) vista superior e (b) vista inferior

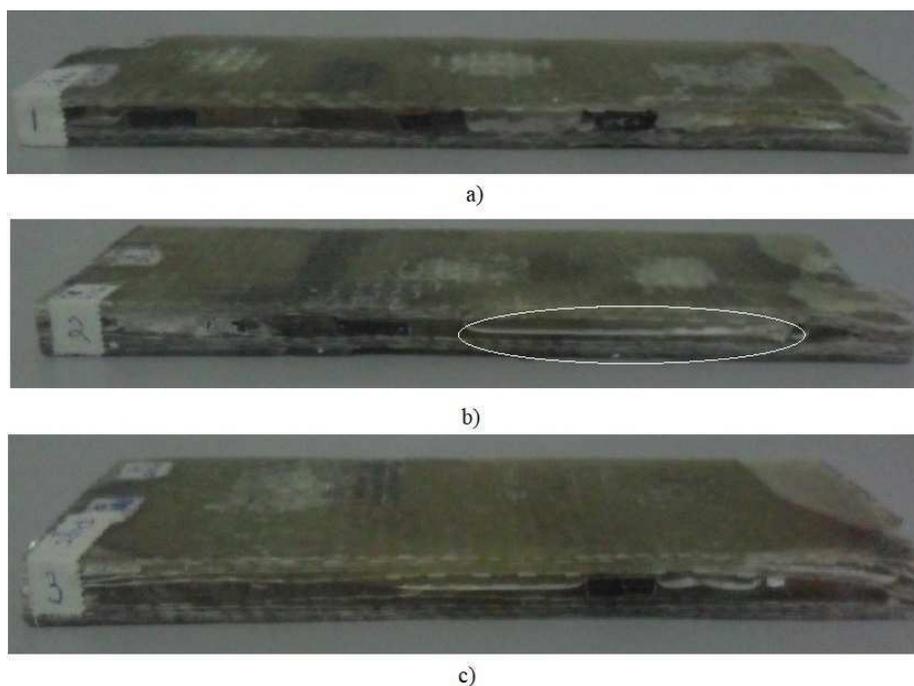


Fonte: Elaborado pelo autor

Pela Figura 101 vê-se que assim como na placa PVR-4, no processamento da placa PVR-5 a movimentação dos *inserts* não conseguiu ser evitada pela mudança no *lay-up* de injeção, além de áreas secas evidenciadas acima dos *inserts*, em destaque na 101(a), corroborando com os resultados de Lawrence et al. (2007).

A Figura 102 ilustra três seções da placa PVR-5 após o corte.

Figura 102 – Seções transversais da placa PVR-5 após os cortes. (a) seção 2, (b) seção 3 e (c) seção 4

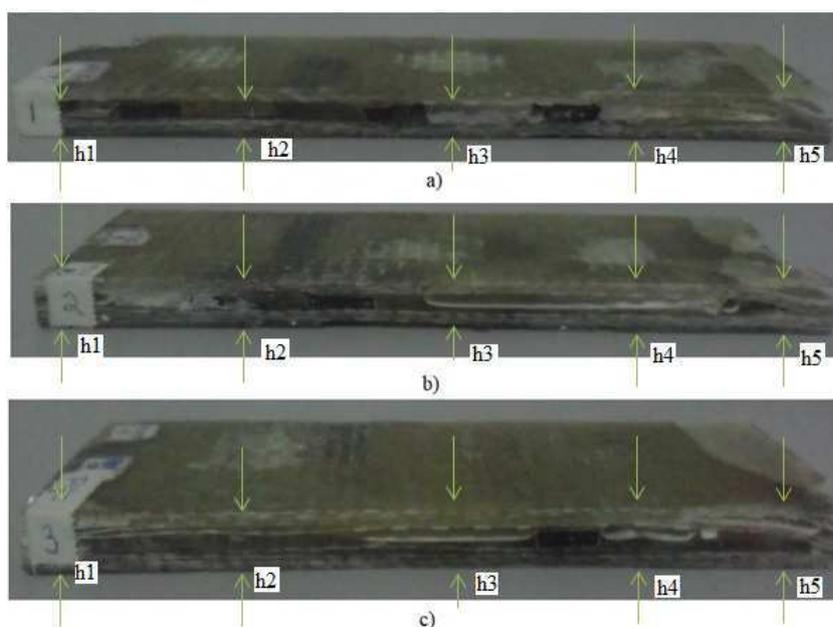


Fonte: Elaborado pelo autor

As Figuras 102(a), 102(b) e 102(c) ilustram as seções 2 (PVR-5-A1), 3 (PVR-5-A2) e 4 (PVR-5-A3), respectivamente, onde em cada amostra possui 3 *inserts*, como determinado na Tabela 8 presente no tópico 3.2.5. Na Figura 102 percebe-se que houve variação da espessura das fibras, além da formação de regiões com ausência de resina foram identificadas nos canais formados entre os *inserts*.

Medições nas seções PVR-5-A1, PVR-5-A2 e PVR-5-A3, esquematizadas na Figura 103, foram feitas como forma de analisar a variação da espessura das fibras ao longo da placa PVR-5.

Figura 103 – Esquema de medição da variação da espessura das fibras da placa PVR-5



Fonte: Elaborado pelo autor

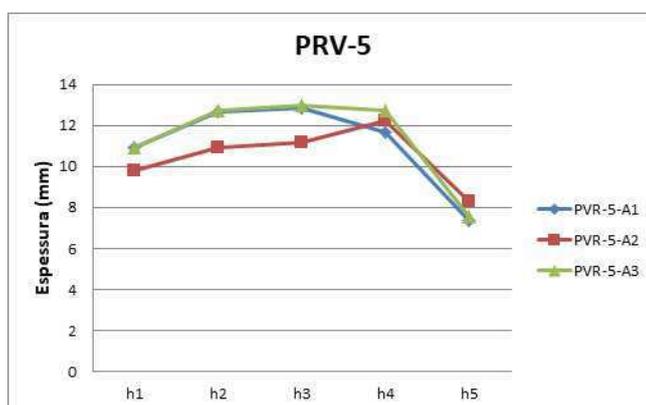
Os resultados das medições da variação da espessura das fibras esquematizado na Figura 103 foram dispostos na Tabela 15, gerando o gráfico de variação da espessura ilustrado na Figura 104 e o decréscimo entre a espessura final da placa e a espessura do espaçamento do molde, ilustrados na Figura 105.

Tabela 15 – Medições da variação da espessura das fibras ao longo da placa PVR-5

Amostra	h1(mm)	h2(mm)	h3(mm)	h4(mm)	h5(mm)
PVR-2-A1	10,95	12,65	12,85	11,65	7,35
PVR-2-A2	9,80	10,95	11,20	12,20	8,30
PVR-2-A3	10,95	12,70	12,95	12,75	7,55

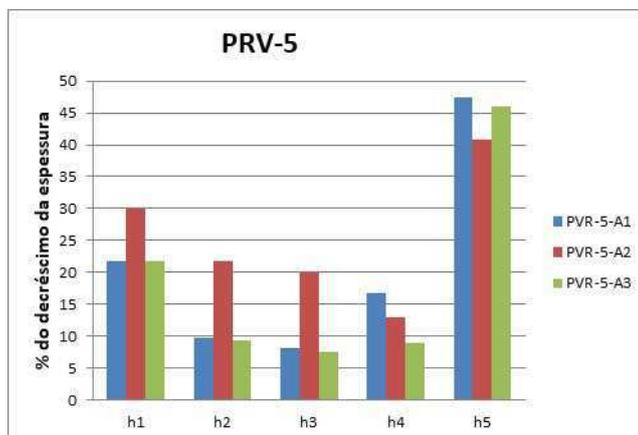
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 104 – Variação da espessura das fibras da placa PVR-5



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 105 – Percentual de decréscimo da espessura devido à contração das fibras da placa PVR-5 em relação à espessura do molde



Fonte: Elaborado pelo autor

As análises da Tabela 15 e Figuras 103, 104 e 105, confirmam que houve variação na espessura das fibras ao longo da placa PVR-5.

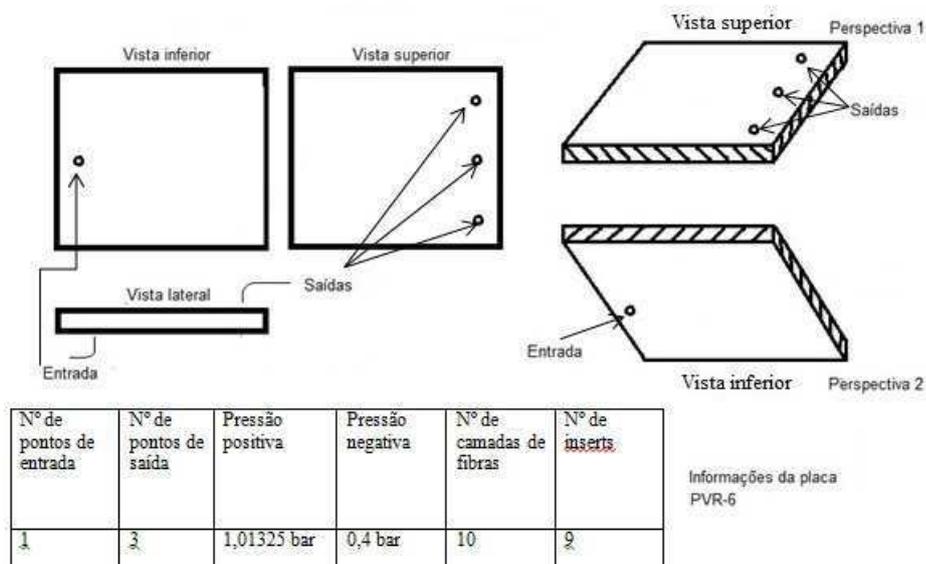
Outro ponto interessante a ser destacado é que nos pontos h5 de cada seção, o efeito da compactação das fibras foi bem maior que na borda onde foram medidos os pontos h1, tendo um decréscimo de até 47%, enquanto nos pontos h1, o decréscimo máximo foi de 30%. Assim surgiu a hipótese de que a causa de tal diferença tenha sido devido à movimentação dos *inserts* observados na Figura 101, os mesmos se aproximaram da borda referente aos pontos h1, minimizando os efeitos da compactação das fibras, ou seja, quanto mais próximos das bordas os *inserts* forem posicionados, menor será o efeito da compactação das fibras naquela região.

4.2.6 Processamento da placa PVR-6

Os parâmetros de injeção da placa PVR-6 foram mantidos os mesmos da placa PVR-5, uma vez que tais parâmetros foram aprovados para o processamento de novas placas, sendo impedir a movimentação dos *inserts*, o principal objetivo do processamento da placa PVR-6. Assim, a pré-forma da placa PVR-6 foi composta por 10 camadas de fibra de vidro e 9 *inserts*, com pressão positiva de 1,01325 bar e pressão negativa de 0,4 bar, além de um método de fluxo retilíneo com 1 ponto de entrada e 3 pontos de saídas em linha posicionados em planos diferentes.

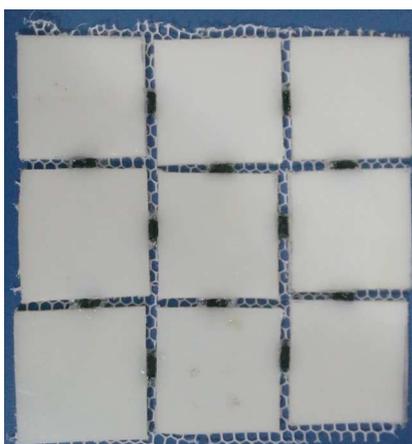
A esquematização do processamento da placa PVR-6 está ilustrada na Figura 106.

Figura 106 – Esquemática do processamento da placa PVR-6



Fonte: Elaborado pelo autor

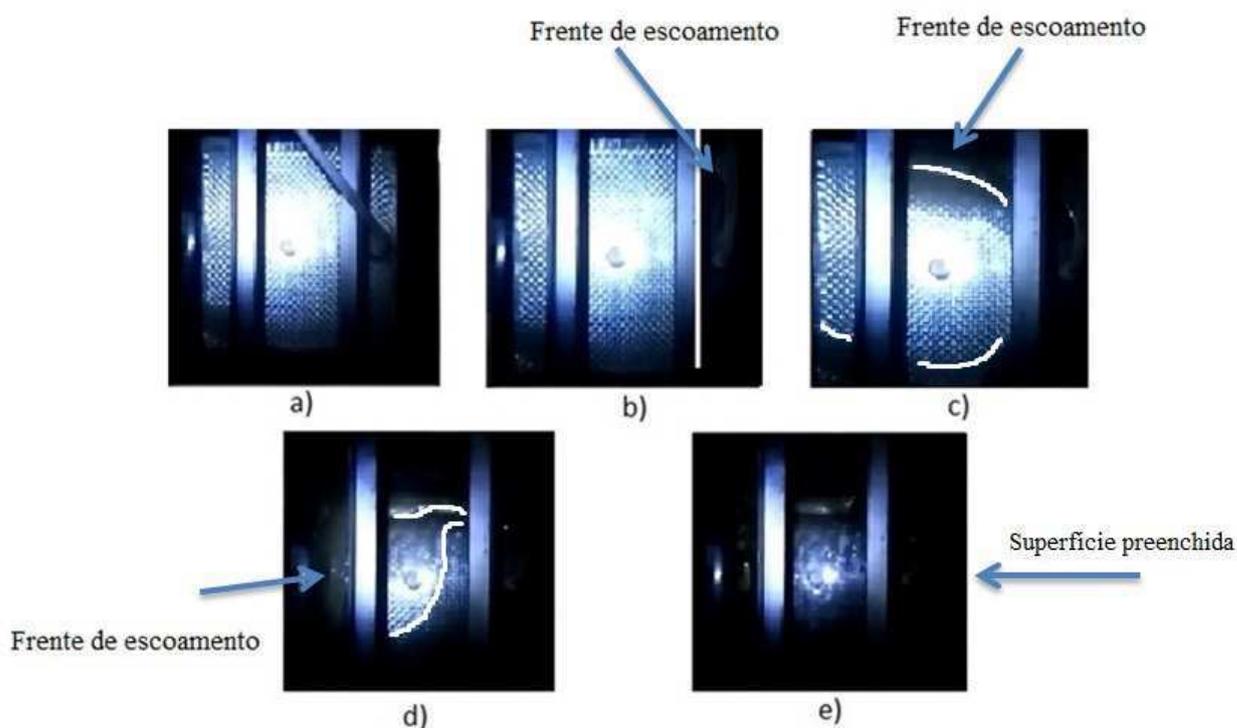
Para impedir a movimentação dos *inserts*, algumas modificações na disposição dos mesmo na pré-forma foram realizadas. A primeira foi diminuir a distância entre os *inserts*, utilizando peças de borracha para separação com dimensões menores. Assim a distância entre um *insert* e outro foi de 0,5mm. A segunda mudança, e mais importante, foi a utilização de uma tela onde os *inserts* foram colados com cola de silicone (Figura 107).

Figura 107 – *Inserts* posicionados na tela a fim de evitar movimentação

Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 108 ilustra o avanço da frente de fluxo durante o processamento da PVR-6.

Figura 108 – Sequência de escoamento do processamento da placa PVR-6: (a) $t= 0$ s, (b) 60 s, (c) 120 s, (d) 180 s e (e) 240 s



Fonte: Elaborado pelo autor

Pela Figura 108 é possível perceber que o avanço de resina começa de maneira uniforme, porém na Figura 108(c) o escoamento começa a se desenvolver pelas bordas do molde, antes de seguir para o centro do molde, sendo o centro do molde o último ponto a ser atingido pela resina.

A Figura 109 mostra a placa PVR-6 após o processamento e cura serem finalizadas.

Figura 109 – Placa PVR-6: (a) vista superior e (b) vista inferior

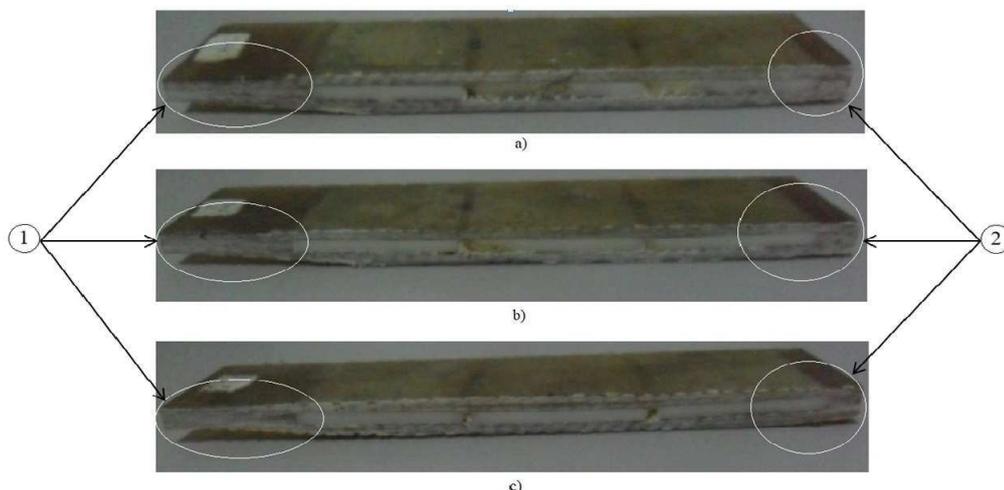


Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 109 percebe-se que as modificações realizadas surtiram efeito. Nenhuma zona seca foi identificada visualmente nas superfícies da placa PVR-6 e não houve movimentação de nenhum *insert*. Assim, conclui-se que a utilização da tela logrou êxito em impedir a movimentação dos *inserts* durante o processamento, sendo este o primeiro protótipo deste trabalho. É possível perceber ainda na Figura 109 que os *inserts* foram posicionados um pouco mais próximos de uma das bordas como forma de comprovar a hipótese que quanto mais próximo das bordas os *inserts* estiverem, menor será o efeito de contração sofrido pelas fibras durante o processamento próximo da mesma.

A Figura 110 mostra três seções da placa PVR-6 após o corte.

Figura 110 – Seções transversais da placa PVR-6 após os cortes: (a) seção 2, (b) seção 3 e (c) seção 4



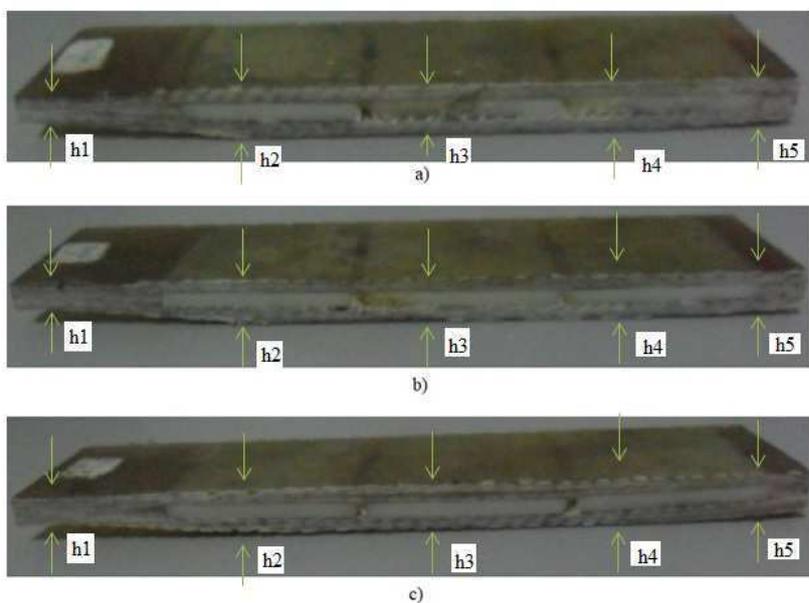
Fonte: Elaborado pelo autor

As Figuras 102(a), 102(b) e 102(c) ilustram as seções 2 (PVR-6-A1), 3 (PVR-6-A2) e 4 (PVR-6-A3), respectivamente, onde em cada amostra possui 3 *inserts*, como determinado na Tabela 8 presente no tópico 3.2.5.

Na Figura 110 é possível perceber a diferença da variação da espessura das fibras em cada uma das bordas de cada seção. Tal diferença se deu devido ao posicionamento dos *inserts* mais próximos de uma das bordas destacado em (2) na Figura 110, onde os efeitos da compactação das fibras foram minimizados, enquanto em (1), os efeitos de compactação foram intensificados. A utilização de *inserts* mais próximos entre si melhorou o preenchimento da placa, evitando áreas com ausência de resina nos canais entre os *inserts*.

Medições nas seções PVR-6-A1, PVR-6-A2 e PVR-6-A3, esquematizadas na Figura 111, foram feitas como forma de analisar a variação da espessura das fibras ao longo da placa PVR-6.

Figura 111 – Esquema de medição da variação da espessura das fibras da placa PVR-6



Fonte: Elaborado pelo autor

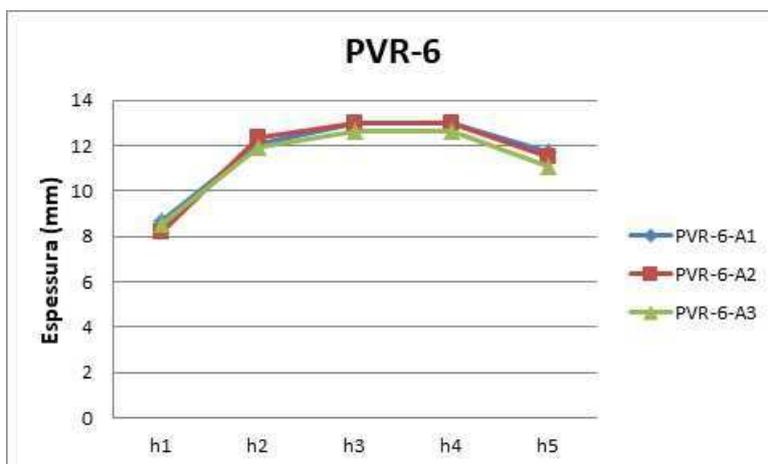
Os resultados das medições da variação da espessura das fibras esquematizado na Figura 111 foram dispostos na Tabela 16, gerando o gráfico ilustrado na Figura 112 e o decréscimo entre a espessura final da placa e a espessura do espaçamento do molde, ilustrados na Figura 113.

Tabela 16 – Medições da variação da espessura das fibras ao longo da placa PVR-6

Amostra	h1(mm)	h2(mm)	h3(mm)	h4(mm)	h5(mm)
PVR-2-A1	8,70	11,10	12,95	12,95	11,75
PVR-2-A2	8,20	11,35	12,95	12,95	11,50
PVR-2-A3	8,55	10,95	11,60	12,65	11,05

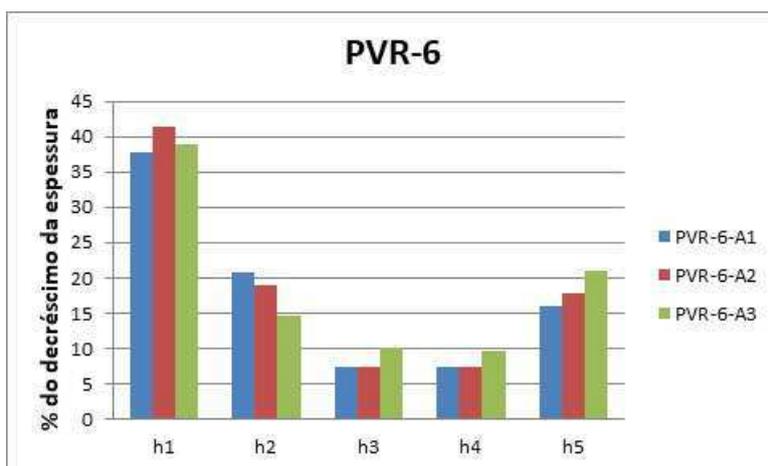
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 112 – Variação da espessura das fibras da placa PVR-6



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 113 – Percentual de decréscimo da espessura devido à contração das fibras da placa PVR-6 em relação à espessura do molde



Fonte: Elaborado pelo autor

As análises da Tabela 16 e Figuras 111, 112 e 113, confirmam uma maior contração nos pontos h1, em uma das bordas, com decréscimos de até 40%, enquanto na outra borda (pontos h5) a contração das fibras foi menor devido à presença dos *inserts*.

Devido às características apresentadas após o processamento, a placa PVR-6 foi considerada o protótipo final deste projeto de pesquisa.

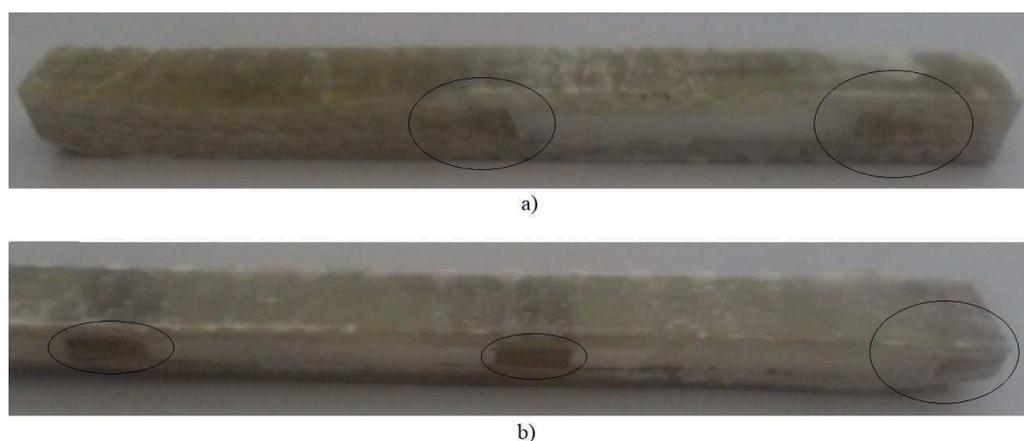
4.3 ESTUDO DOS EFEITOS DA PRESENÇA DOS INSERTS EMBEBIDOS EM COMPÓSITOS

Com a etapa das análises iniciais do processamento concluídas, achou-se por bem a realização de estudos mais aprofundados acerca das características internas e da influência exercida pelos *inserts* nos compósitos processados.

Assim, cortes transversais foram realizados nas seções das placas. Os cortes transversais foram feitos em regiões onde havia a presença de *inserts*, sendo estes últimos cortados no processo, uma vez que no primeiro corte realizado nas placas, o corte dos *inserts* foi evitado.

A Figura 114 ilustra as seções transversais das placas com 1 e 3 *inserts*.

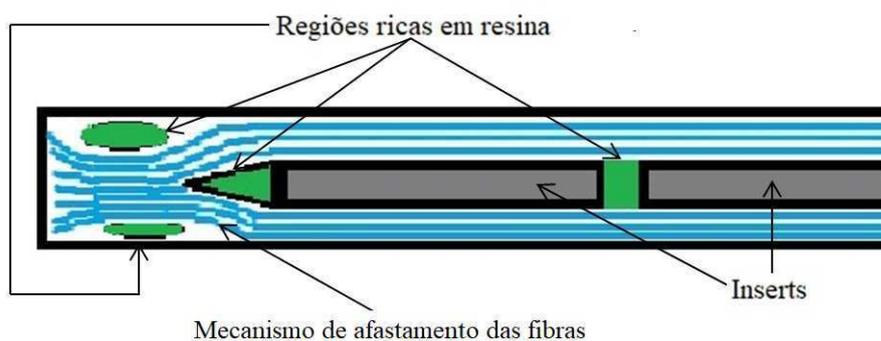
Figura 114 – Regiões ricas em resina na lateral dos *inserts*: (a) seção com 1 *insert* e (b) seção com 3 *inserts*



Fonte: Elaborado pelo autor

Analisando a Figura 114 é possível perceber a existência de regiões ricas em resina, onde não há a presença de fibras, próximas as paredes dos *inserts* e entre um *insert* e outro, em destaque. Assim, surgiu a hipótese que a formação de tais regiões foram consequência do afastamento das fibras devido à presença dos *inserts*, acarretando no desenvolvimento do fenômeno de *race-tracking* nas laterais dos *inserts*, esquematizado na Figura 115 .

Figura 115 – Esquematização do mecanismo de afastamento das fibras e formação de regiões ricas em resina devido a presença do *insert* no compósito



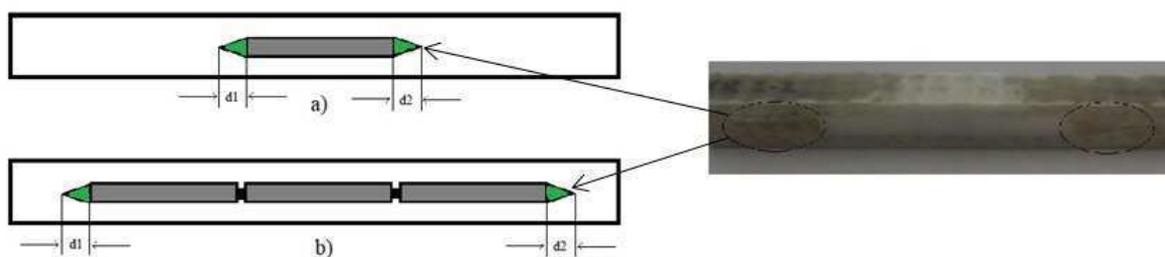
Fonte: Elaborado pelo autor

É importante salientar, nas Figuras 114 e 115, o formato triangular da região rica em resina na parede do *insert* próximo da borda devido ao fenômeno chamado de mecanismo de afastamento das fibras pela presença do insert, sendo este um resultado semelhante ao obtido por Xiao et al.(2016).

Pelas Figuras 114 e 115 é possível concluir ainda que a compactação das fibras próximo das bordas das placas é uma consequência do afastamento das fibras devido à presença do *insert* e da utilização da pressão de vácuo durante os processamentos.

A Figura 116 o esquema de medições do comprimento das regiões em formato de triângulo ricas em resina.

Figura 116 – Medição dos comprimentos das regiões triangulares ricas em resina das placas: (a) seção com 1 *insert* e (b) seção com 3 *inserts*



Fonte: Elaborado pelo autor

Para tais medições foram designados dois termos, d_1 e d_2 , onde d_1 é o comprimento referente ao triângulo da esquerda, enquanto d_2 é o comprimento referente ao triângulo da esquerda.

A tabela 17 mostra os valores obtidos a partir das medições realizadas, com d_m sendo o valor do comprimento médio entre as distâncias d1 e d2 de cada placa e d_x é o comprimento médio total dos triângulos de todas as placas.

Tabela 17 – Medições do comprimento da região triangular rica em resina das placas

	d_m (mm)	d_x (mm)
PVR-1	9,94	
PVR-2	15,55	
PVR-4	14,19	
PVR-5	12,31	
PVR-6	17,62	
Média Total		13,92

Fonte: Elaborado pelo autor

Ao se dividir o comprimento médio de todas as placas (d_x) pelo comprimento de cada *insert* (L_i) e multiplicar por 100, é possível descobrir o efeito médio em termos de porcentagem (E_m) que um *insert*, baseado em suas próprias dimensões, exerce na formação de regiões ricas em resina das placas (Equação 7).

$$E_m = \frac{d_x}{L_i} \times 100 \quad (7)$$

O resultado do cálculo da Equação 7 é mostrado na Tabela 18

Tabela 18 – Efeito das regiões triangulares ricas em resina nas placas

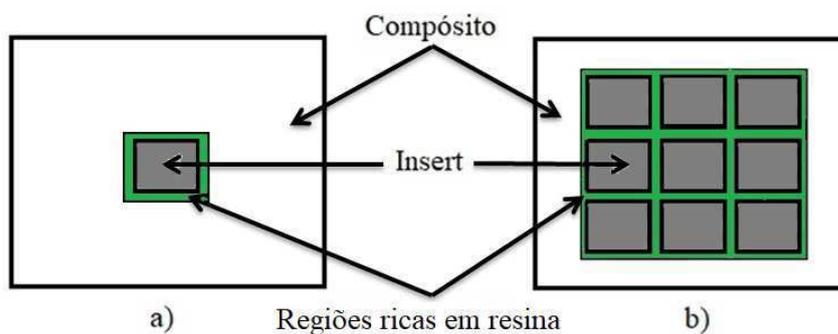
d_x (mm)	E_m (%)
13,92	27,84

Fonte: Elaborado pelo autor

com o resultado da Tabela 18 foi possível concluir que para *inserts* com dimensões de $50 \times 50 \times 4 \text{ mm}^3$ embebidos em uma placa com dimensões de $250 \times 250 \times 14 \text{ mm}^3$, o efeito médio gerado vai ser de 27,84% do comprimento do *insert* nas seções transversais medidas, ou seja, o comprimento de cada região triangular vai ser em média 27,84% do comprimento do *insert*.

A partir das evidências dos efeitos gerados pela presença dos *inserts* observadas nas Figuras 114, 115 e 116, concluiu-se que as regiões ricas em resina são formadas em torno dos *inserts*, ou seja, em todas as laterais do *inserts*, incluindo os canais entre um *insert* e outro, esquematizado na Figura 117.

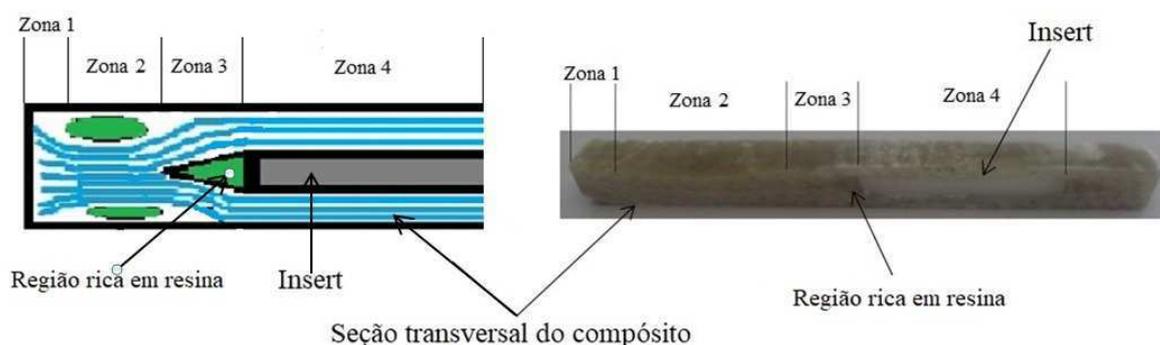
Figura 117 – Esquemática da vista superior das placas com destaque para as regiões ricas em resina: (a) Placa com 1 *insert* e (b) placa com 9 *inserts*



Fonte: Elaborado pelo autor

Por fim, a Figura 118 ilustra quatro diferentes zonas originadas devido à presença do *insert* e da pressão de vácuo, identificadas a partir de análises nas placas processadas.

Figura 118 – Diferentes zonas identificadas nas placas processadas



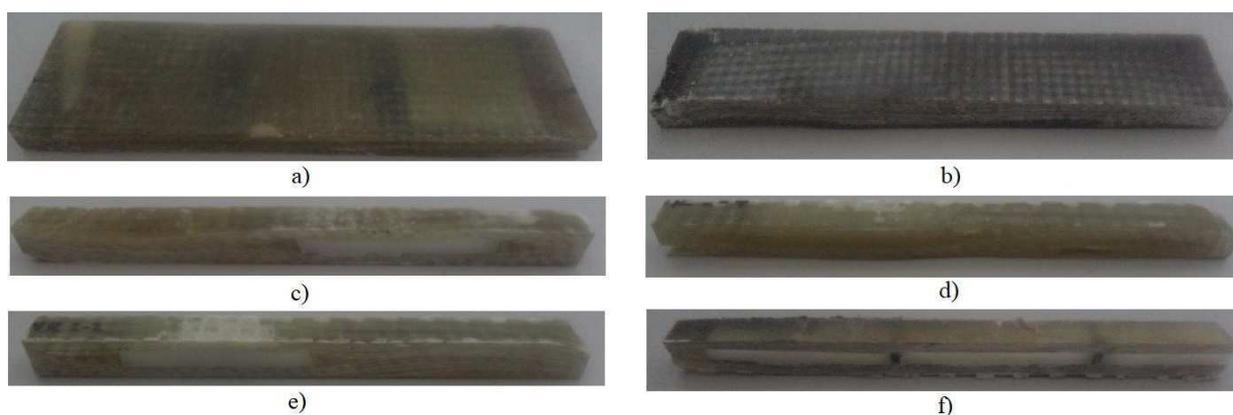
Fonte: Elaborado pelo autor

Analisando a Figura 118 concluiu-se que na zona 1 está localizada nas bordas das placas, onde as fibras não sofreram os efeitos da compactação. A zona 2 é a que sofre os maiores efeitos de compactação das fibras devido à presença dos *inserts* e da utilização da pressão de vácuo, formando regiões ricas em resina na superfície das placas. Na zona 3 há o afastamento das fibras devido à presença dos *inserts* e formação de regiões ricas em resinas próximas as laterais dos insert. A zona 4 é aquela onde há a presença do *insert*.

4.4 ENSAIOS DE FLEXÃO EM 3 PONTOS

Os ensaios de flexão em 3 pontos ocorreram como descrito no tópico 3.2.9 deste trabalho. A Figura 119 ilustra os corpos de prova escolhidos para a realização dos ensaios de flexão em 3 pontos.

Figura 119 – Corpos de prova selecionados para realização dos ensaios de flexão em 3 pontos



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 119(a) ilustra o corpo de prova tipo viga com 3 *inserts*, chamado de cp1. A Figura 119(b) ilustra os corpos de prova tipo viga sem *inserts*, chamado de cp2. As Figuras 119(c), 119(d) e 119(e) ilustram os corpos de prova com 1 *insert* que seguem as recomendações da norma ASTM D7264, chamados de cp3, cp4 e cp5, respectivamente. A Figura 119(f) ilustra o corpo de prova com 3 *inserts* que segue as recomendações da norma ASTM D7264, chamado de cp6.

4.4.1 Ensaios nos corpos de prova tipo viga

Primeiramente foram realizados ensaios nos cp1 e cp2, cuja as características estão dispostas na Tabela 19, como forma de comparar o comportamento do corpo de prova com *inserts* (cp1) com o corpo de prova sem *inserts* (cp2).

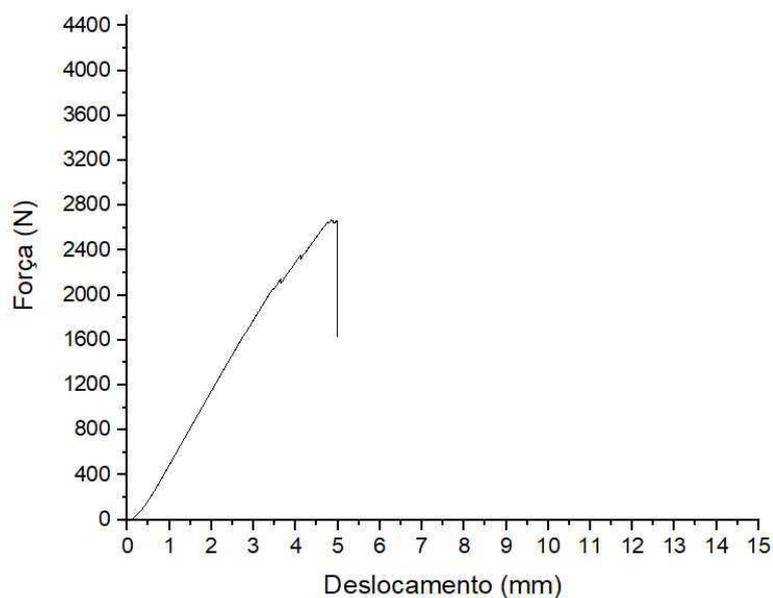
Tabela 19 – Características dos cp1 e cp2

	<i>N</i> ^o de camadas	<i>N</i> ^o de <i>inserts</i>	Processo
cp1	10	3	VARTM
cp2	16	0	RTM Light

Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 120 ilustra o resultado do ensaio de flexão em 3 pontos realizado no cp1 a partir de diagrama Força x Deslocamento.

Figura 120 – Diagrama Força x Deslocamento do ensaio de flexão em 3 pontos no cp1



Fonte: Elaborado pelo autor

Analisando o gráfico apresentado na Figura 120 é possível perceber que o carregamento máximo aplicado ao cp1 durante o ensaio foi de aproximadamente 2 kN para um deslocamento de aproximadamente 3,5 mm, apresentando um comportamento aparentemente frágil. A Figura 121 ilustra o cp1 durante o ensaio de flexão em 3 pontos.

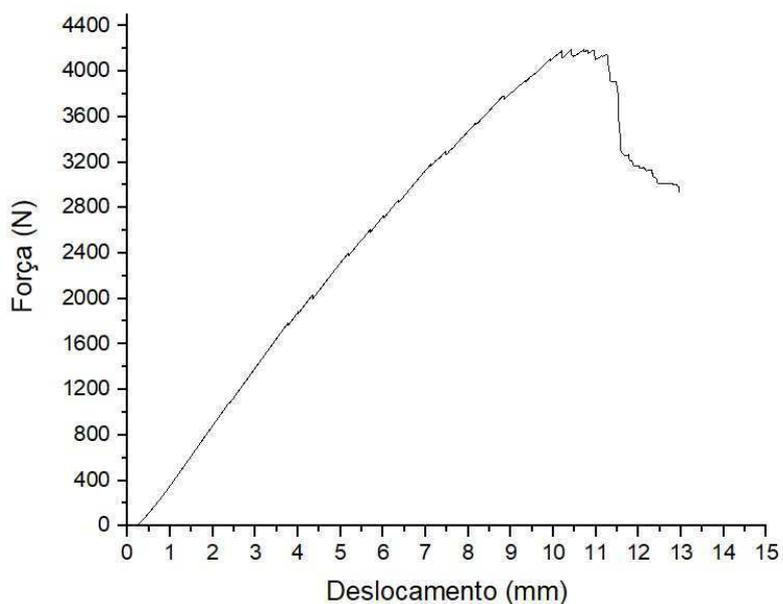
Figura 121 – ensaio de flexão em 3 pontos realizado no cp1



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 122 ilustra o resultado do ensaio de flexão em 3 pontos realizado no cp2 a partir de diagrama Força x Deslocamento.

Figura 122 – Diagrama Força x Deslocamento do ensaio de flexão em 3 pontos no cp2

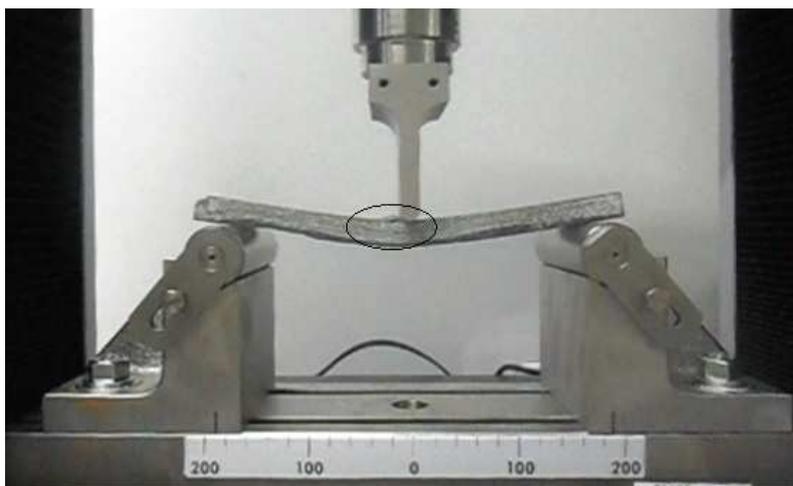


Fonte: Elaborado pelo autor

Analisando o gráfico apresentado na Figura 122 é possível perceber que a carga máxima aplicada ao cp2 durante o ensaio foi de aproximadamente 4,2 kN para um deslocamento máximo de aproximadamente 11 mm.

A Figura 123 ilustra o cp2 durante o ensaio de flexão em 3 pontos.

Figura 123 – cp2 ao fim do ensaio de flexão em 3 pontos



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 123 foi possível identificar uma pequena falha por delaminação das fibras, em destaque.

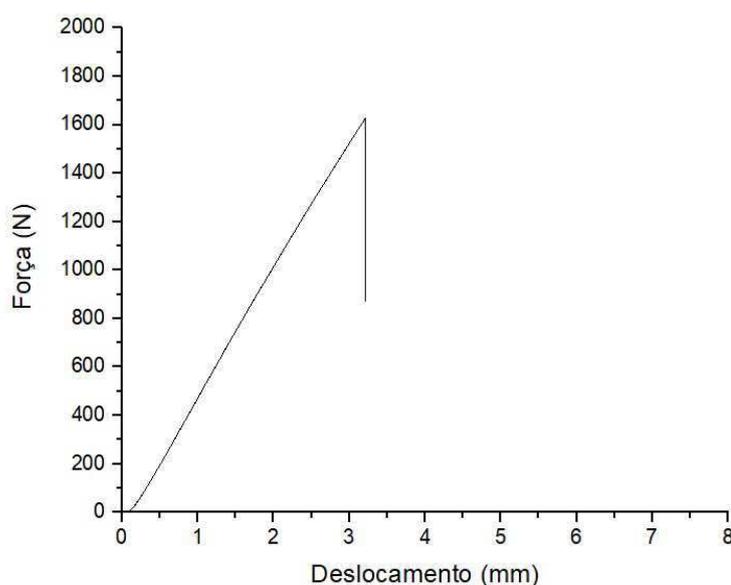
Comparando os resultados dos ensaios dos cp1 e cp2 é possível perceber que a carga máxima aplicada cp1 (compósito sem *inserts*) foi de 52,38% da carga máxima aplicada ao cp2 (compósito com 1 *insert* embebido).

4.4.2 Ensaios nos corpos de prova com 1 *insert* de acordo com a norma ASTM D7264

Após a realização dos ensaios nos cp1 e cp2, foram realizados ensaios nos cp3, cp4 e cp5, sendo esses os corpos de prova que seguiam a ASTM D7264 e possuíam 1 *insert*.

A Figura 124 mostra o diagrama Força x Deslocamento que representa os ensaios nos compósitos com 1 *insert*.

Figura 124 – Diagrama Força x Deslocamento do ensaio de flexão em 3 pontos nos corpos de prova com 1 *insert*



Fonte: Elaborado pelo autor

A análise da Figura 124 mostra que a curva apresentou, assim como os corpos de prova tipo viga, o comportamento de material frágil. A média das forças (F_m) e deslocamento (d_m) para os cp3, cp4 e cp5 foram calculados e sendo apresentados na Tabela 20.

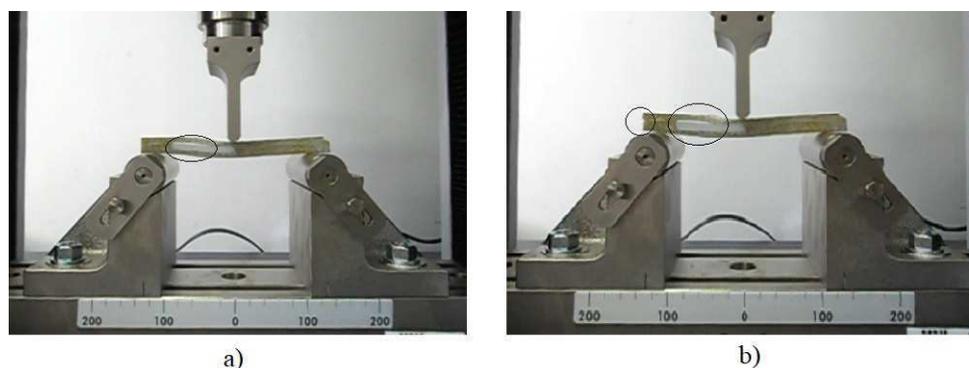
Tabela 20 – Valores médios da carga e deslocamento para os cp3, cp4 e cp5

F_m (KN)	d_m (mm)
$1,318 \pm 0,311$	3,19

Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 125 ilustra o cp5 durante o ensaio de flexão em 3 pontos.

Figura 125 – Ensaio de flexão no cp5: (a) início da delaminação por cisalhamento entre a interface fibra/matriz e o *insert* e (b) aumento da delaminação por cisalhamento e propagação da trinca até a borda do corpo de prova



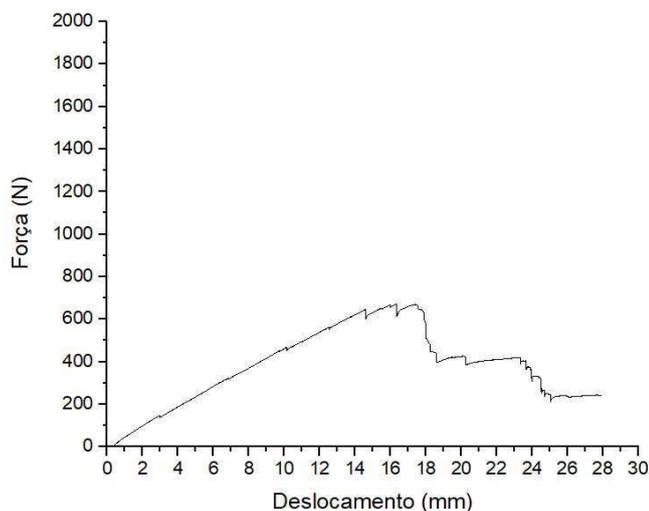
Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 125(a) é possível perceber o início da falha por delaminação do corpo de prova devido à tensão de cisalhamento, onde há uma descolagem entre o *insert* e a camada superior das fibras, em destaque. Os mecanismos de falha nos corpos de prova observados nos ensaios de flexão em 3 pontos são abordados mais a fundo no tópico 4.4.4 deste trabalho.

4.4.3 Ensaios nos corpos de prova com 3 *inserts* de acordo com a norma ASTM D7264

Por últimos foi realizado o ensaio no cp6, sendo este um corpo de prova que possuía 3 *inserts* e seguiu a norma ASTM D7264. A Figura 126 mostra os resultados referentes ao ensaio de flexão em 3 pontos realizado no cp6.

Figura 126 – Diagrama Força x Deslocamento do ensaio de flexão em 3 pontos no cp6

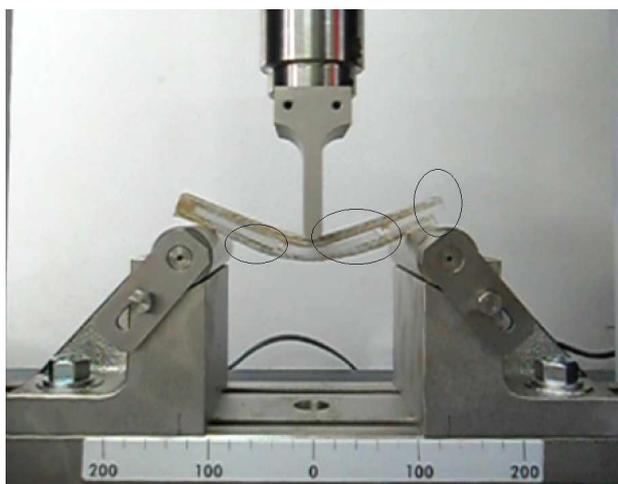


Fonte: Elaborado pelo autor

Analisando o gráfico apresentado na Figura 126 é possível perceber que a carga máxima aplicada ao cp6 durante o ensaio foi de aproximadamente 0,66 kN para um deslocamento máximo de aproximadamente 28 mm, e diferente dos demais corpos de prova, o cp6 apresentou comportamento de material dúctil, com grande deformação após a carga máxima ter sido atingida.

A Figura 127 ilustra o cp6 durante o ensaio de flexão em 3 pontos.

Figura 127 – Ensaio de flexão em 3 pontos realizado no cp6



Fonte: Elaborado pelo autor

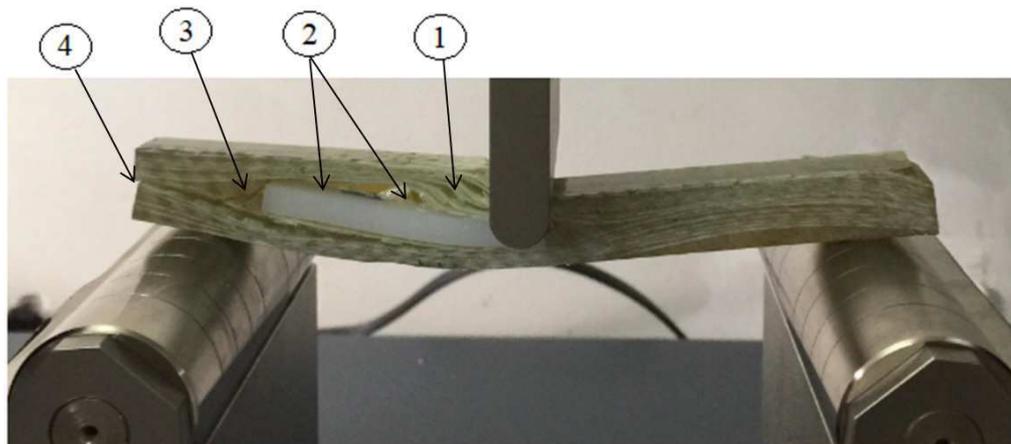
Na Figura 127 é possível ver que, assim como nos corpos de prova com 1 *insert* embebido, houve falha por delaminação devido à tensão cisalhante entre a interface fibra/matriz e os 3 *inserts*, em destaque.

Os resultados mais detalhados dos ensaios de flexão realizado estão dispostos no ANEXO D deste trabalho.

4.4.4 Análises do mecanismo de fratura em compósito com *insert* embebido

A Figura 128 ilustra o corpo de prova com 1 *insert* submetido ao ensaio de flexão em 3 pontos.

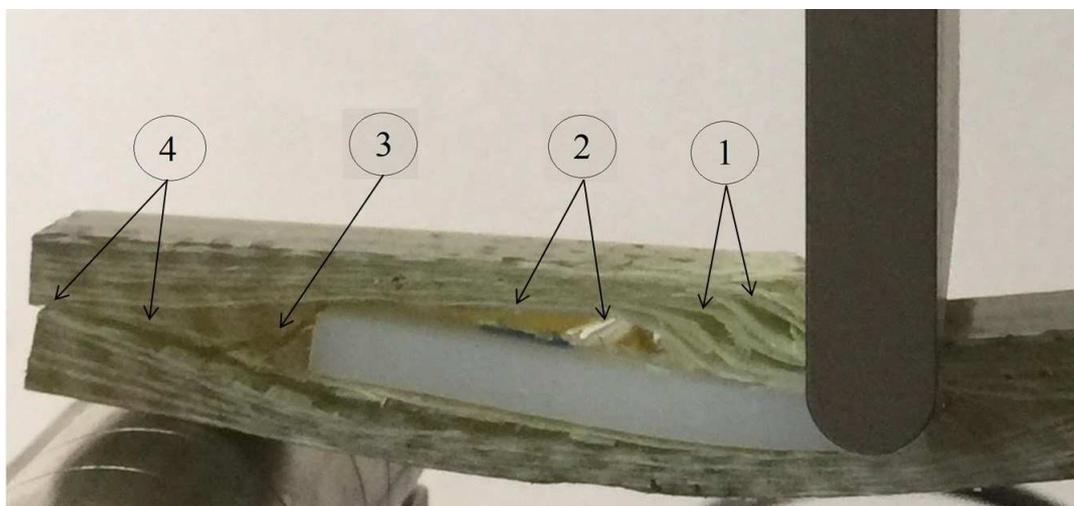
Figura 128 – Análise fotográfica do corpo de prova com 1 *insert* submetido ao ensaio de flexão



Fonte: Elaborado pelo autor

Analisando a Figura 128 foi possível identificar quatro tipos de falhas diferentes ao longo do corpo de prova, ilustradas com mais detalhes na Figura 129.

Figura 129 – Falhas identificadas no corpo de prova com 1 *insert* submetido ao ensaio de flexão em 3 pontos



Fonte: Elaborado pelo autor

Foi possível perceber pela Figura 129 que em (1) houve delaminação por tensão de cisalhamento tipo II (Mode II: in-plane shear) nas camadas superiores das fibras. Em (2) foi possível perceber a descolagem entre a interface fibra/matriz e o *insert*. Em (3) houve fratura através da espessura da região rica em resina formada pelo afastamento das fibras. Por fim, em (4), houve mais uma vez delaminação por tensão de cisalhamento tipo II com propagação da trinca da região rica em resina até a borda do corpo de prova.

5 CONCLUSÕES

Analisando os resultados obtidos a partir do processamento de materiais compósitos com *inserts* impermeáveis embebidos, foi possível concluir que:

- Não é possível a fabricação de placas de material compósito com 1 *insert* embebido sem que haja variação na espessura das mesmas, uma vez que há compactação das fibras em torno do *insert* devido à pressão de vácuo;
- A utilização de um número maior de *inserts* embebidos na pré-forma diminui a compactação das fibras devido à pressão de vácuo, gerando uma menor variação na espessura das placas;
- Para evitar a movimentação dos *inserts* foi proposto uma metodologia de colagem dos *inserts* em uma tela utilizando-se de cola de silicone, tal metodologia logrou êxito;
- Quanto mais próximo das bordas os *inserts* foram posicionados, menores foram os efeitos de compactação sofridos pelas fibras devido à pressão de vácuo, do mesmo jeito que quanto mais distante os *inserts* foram posicionados das bordas, maiores foram os efeitos de compactação sofridos pelas fibras devido à pressão de vácuo;
- A compactação das fibras é uma consequência da presença dos *inserts* na placa e da utilização da pressão de vácuo durante os processamentos;
- A presença dos *inserts* causou afastamento das fibras em torno dos mesmos criando regiões ricas em resina nas placas processadas;
- A presença dos *inserts* vão gerar quatro zonas distintas. A zona 1 que é a borda da placa, onde as fibras não sofreram os efeitos de compactação; a zona 2 que é afetada pela compactação das fibras; a zona 3 onde existe o afastamento das fibras e formação das regiões ricas em resina e a zona 4, sendo aquela a qual o *insert* está posicionado;
- No ensaio de flexão em 3 pontos, foi possível identificar quatro tipos de falhas nos corpos de provas: delaminação por tensão de cisalhamento tipo II nas camadas superiores das fibras, posicionadas acima dos *inserts*; descolagem entre a interface fibra/matriz e os *inserts*; fratura através da espessura da região rica em resina; e delaminação por tensão de cisalhamento tipo II com propagação da trinca da região rica em resina até a borda do corpo de prova.

REFERÊNCIAS¹

- ADU-OBAID, A.; YARLAGADDA, S. Structural performance of the glass fiber-vinyl ester composites with interlaminar copper inserts. *Composites: Part A*, v. 39, p. 195–203, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 51 e 52.
- ALMEIDA, A.; CORREIA, J. R.; BRANCO, F. A.; GONILHA, J. A. Comportamento estrutural de painéis sanduíche compósitos para aplicações na indústria da construção. *Mecânica Experimental*, v. 19, p. 79–90, 2011. Citado na página 21.
- ALMEIDA, M. I. A. *Comportamento Estrutural de Painéis Sanduíche Compósitos para Aplicações na Indústria da Construção*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Técnica de Lisboa, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 25.
- ALVES, A. L. S.; NASCIMENTO, L. F. C.; SUAREZ, J. C. M. Comportamento balístico de compósito de polietileno de altíssimo peso molecular: Efeito da radiação gama. *Polímeros Ciência e Tecnologia*, v. 14, n. 2, p. 105–111, 2004. Citado na página 22.
- AMICO, S.; LEKAKOU, C. An experimental study of the permeability and capillary pressure in resin-transfer moulding. *Composites Science and Technology*, Elsevier, v. 61, n. 13, p. 1945–1959, 2001. Citado 2 vezes nas páginas 39 e 44.
- AMORIM-JR., W. F. *Processamento de Placa Espessa de Compósito Através de Moldagem por Transferência de Resina*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007. Citado 4 vezes nas páginas 21, 32, 44 e 67.
- BERTINI, A. A. *Estruturas Tipo Sanduíche com Placas de Argamassa Projetada*. Tese (Doutorado) — Escola de Engenharia de São Carlos, 2002. Citado na página 21.
- CAIRNS, D. S.; ROSSEL, S. M. *Fluid flow modeling of resin transfer molding for composite material wind turbine blade structures*. [S.l.], 2004. Citado na página 67.
- CALLISTER, W. *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. [S.l.]: Grupo Gen-LTC, 2000. Citado na página 22.
- CAMPBELL, J.; RIGAS, E.; HENZ, B.; TACKITT, K.; WALSH, S. Understanding resin flow behavior during the manufacture of multifunctional armor. In: SAMPE; 1999. *INTERNATIONAL SAMPE SYMPOSIUM AND EXHIBITION*. [S.l.], 2003. p. 839–848. Citado na página 60.
- CARNEIRO, L. A. V.; TEIXEIRA, A. M. A. J. Propriedades e características dos materiais compósitos poliméricos aplicados na engenharia de construção. *Revista Militar de Ciência e Tecnologia*, v. 3, 2008. Citado na página 22.
- CARVALHO, R. F. *Compósitos de fibras de sisal para uso em reforço de estruturas de madeira*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2005. Citado na página 23.
- CAVALCANTI, A. M. S. *Desenvolvimento do Processamento de Compósitos por Moldagem de Transferência de Resina*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Campina Grande, 2014. Citado 5 vezes nas páginas 19, 21, 23, 25 e 27.

¹ DE ACORDO COM A ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6023.

CHEN, B.; LANG, E. J.; CHOU, T.-W. Experimental and theoretical studies of fabric compaction behavior in resin transfer molding. *Materials Science and Engineering: A*, Elsevier, v. 317, n. 1-2, p. 188–196, 2001. Citado na página 67.

CHIZARI, K.; ARJMAND, M.; LIU, Z.; SUNDARARAJ, U.; THERRIault, D. Three-dimensional printing of highly conductive polymer nanocomposites for emi shielding applications. *Materials Today Communications*, Elsevier, v. 11, p. 112–118, 2017. Citado na página 47.

COSTA, M. L.; REZENDE, M. C.; PARDINI, L. C. Métodos de estudo da cinética de cura de resinas epóxi. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 2, p. 37–44, 1999. Citado na página 26.

DAVILA, C. G.; SMITH, C.; LUMBAN-TOBING, F. *Analysis of thick sandwich shells with embedded ceramic tiles*. [S.l.], 1996. Citado na página 63.

FERREIRA, D. *Comportamento Mecânico de Blindagens Compósitas Leves*. Dissertação (Mestrado) — Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 1994. Citado na página 46.

FINK, B. K. Performance metrics for composite integral armor. *Journal of thermoplastic composite materials*, TECHNOMIC PUBLISHING CO., INC. 851 New Holland Avenue, Box 3535, Lancaster, Pennsylvania 17604, USA, v. 13, n. 5, p. 417–431, 2000. Citado na página 58.

GAMA, B. A.; BOGETTI, T. A.; FINK, B. K.; YU, C.-J.; CLAAR, T. D.; EIFERT, H. H.; JR, J. W. G. Aluminum foam integral armor: a new dimension in armor design. *Composite Structures*, Elsevier, v. 52, n. 3-4, p. 381–395, 2001. Citado 2 vezes nas páginas 61 e 67.

GARAY, A. C. *Efeito da Adição de Carbonato de Cálcio em Compósitos Poliméricos Moldados por RTM e RTM Light*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 35.

GARAY, A. C. *Propriedades Mecânicas de Compósitos Estruturas Sanduíche Moldadas por RTM Light e Simulação Numérica da Infiltração*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016. Citado 5 vezes nas páginas 19, 29, 31, 34 e 44.

GAUVIN, R.; TROCHU, F.; LEMENN, Y.; DIALLO, L. Permeability measurement and flow simulation through fiber reinforcement. *Polymer composites*, Wiley Online Library, v. 17, n. 1, p. 34–42, 1996. Citado na página 107.

GEBART, R.; STRÖMBECK, L. Principles of liquid composite molding. *Processing of Composites*, Hanser Gardner Publications, p. 358–387, 2000. Citado na página 87.

GEBHARDT, J.; FLEISCHER, J. Experimental investigation and performance enhancement of inserts in composite parts. *Procedia CIRP*, Elsevier, v. 23, p. 7–12, 2014. Citado na página 47.

GHINET, S.; ATALLA, N. Vibro-acoustic behaviors of flat sandwich composite panels. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, Citeseer, v. 30, n. 4, p. 473–493, 2006. Citado na página 21.

GOURICHON, B.; BINETRUY, C.; KRAWCZAK, P. Experimental investigation of high fiber tow count fabric unsaturation during rtm. *Composites Science and Technology*, Elsevier, v. 66, n. 7-8, p. 976–982, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 34.

HALME, J. *Development testing of a composite wing rib*. Dissertação (Mestrado) — Helsinki University of Technology, 2002. Citado na página 32.

HAMMAMI, A.; GAUVIN, R.; TROCHU, F. Modeling the edge effect in liquid composites molding. *Composites Part A: applied science and manufacturing*, Elsevier, v. 29, n. 5-6, p. 603–609, 1998. Citado na página 56.

HAN, K. K.; LEE, C. W.; RICE, B. P. Measurements of the permeability of fiber preforms and applications. *Composites science and Technology*, Elsevier, v. 60, n. 12-13, p. 2435–2441, 2000. Citado na página 22.

HANU, L.; SIMON, G.; MANSOURI, J.; BURFORD, R.; CHENG, Y. Development of polymer-ceramic composites for improved fire resistance. *Journal of materials processing technology*, Elsevier, v. 153, p. 401–407, 2004. Citado na página 47.

HARRIS, D. K. Use of a sandwich plate system in a virginia bridge. 2009. Citado na página 21.

HEDLEY, C. W. *Mold filling parameters in resin transfer molding of composites*. 1994. Citado na página 67.

HUMBERT, D. R. *Modeling of resin transfer molding of composite materials with oriented unidirectional plies*. Dissertação (Mestrado) — Montana State University-Bozeman, 1996. Citado na página 67.

JAFELICE, D. A. *Caracterização de Compósitos de Polipropileno Reciclado e Fibra de Coco*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2013. Citado na página 23.

KELKAR, A. D.; VAIDYA, U. Low cost manufacturing of composite integral armor using resin transfer and resin infusion molding processes. In: *Proceedings of Fifth International Conference on Flow Processes in Composite, 12th-14th July*. [S.l.: s.n.], 1999. Citado na página 58.

KIM, H.; PARK, M.; HSIEH, K. Fatigue fracture of embedded copper conductors in multifunctional composite structures. *Composites science and technology*, Elsevier, v. 66, n. 7-8, p. 1010–1021, 2006. Citado na página 52.

KIM, P. J.; LEE, D. G. Surface quality and shrinkage of the composite bus housing panel manufactured by rtm. *Composite Structures*, Elsevier, v. 57, n. 1-4, p. 211–220, 2002. Citado na página 21.

KUENTZER, N.; SIMACEK, P.; ADVANI, S. G.; WALSH, S. Correlation of void distribution to vartm manufacturing techniques. *Composites Part A: applied science and manufacturing*, Elsevier, v. 38, n. 3, p. 802–813, 2007. Citado na página 34.

LAWRENCE, J. M.; FREY, P.; OBAID, A. A.; YARLAGADDA, S.; ADVANI, S. G. Simulation and validation of resin flow during manufacturing of composite panels containing embedded impermeable inserts with the vartm process. *Polymer composites*, Wiley Online Library, v. 28, n. 4, p. 442–450, 2007. Citado na página 20.

LEE, C. H.; KIM, C. W.; YANG, S. U.; KU, B. M. A development of integral composite structure for the ramp of infantry fighting vehicle. 2007. Citado 2 vezes nas páginas 60 e 63.

LEE, G.-W.; LEE, N.-J.; JANG, J.; LEE, K.-J.; NAM, J.-D. Effects of surface modification on the resin-transfer moulding (rtm) of glass-fibre/unsaturated-polyester composites. *Composites Science and Technology*, Elsevier, v. 62, n. 1, p. 9–16, 2002. Citado 3 vezes nas páginas 38, 44 e 67.

LEKAKOU, C.; JOHARI, M.; NORMAN, D.; BADER, M. Measurement techniques and effects on in-plane permeability of woven cloths in resin transfer moulding. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Elsevier, v. 27, n. 5, p. 401–408, 1996. Citado na página 43.

LIU, B.; BICKERTON, S.; ADVANI, S. G. Modelling and simulation of resin transfer moulding (rtm)—gate control, venting and dry spot prediction. *Composites Part A: applied science and manufacturing*, Elsevier, v. 27, n. 2, p. 135–141, 1996. Citado na página 86.

MAHDI, S.; GAMA, B.; YARLAGADDA, S.; JR, J. G. Effect of the manufacturing process on the interfacial properties and structural performance of multi-functional composite structures. *Composites Part A: applied science and manufacturing*, Elsevier, v. 34, n. 7, p. 635–647, 2003. Citado na página 19.

MAHFUZ, H.; ZHU, Y.; HAQUE, A.; ABUTALIB, A.; VAIDYA, U.; JEELANI, S.; GAMA, B.; GILLESPIE, J.; FINK, B. Investigation of high-velocity impact on integral armor using finite element method. *International journal of impact engineering*, Elsevier, v. 24, n. 2, p. 203–217, 2000. Citado na página 63.

MARTINEZ, C. B. *Estudo da influência do ciclo de cura nas propriedades mecânicas de compósitos fabricados pelo processo de infusão de resina*. 2011. Citado na página 28.

MENDONÇA, P. T. R. *Materiais compostos e estruturas-sanduíche: projeto e análise*. [S.l.]: Manole, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 21.

MIRANDA, B. M. *Desenvolvimento de um Equipamento de Modelagem por Transferência de Resina para Uso Laboratorial*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Campina Grande, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 67.

NUNES, J.; SILVA, J. Sandwiched composites in aerospace engineering. In: *Advanced Composite Materials for Aerospace Engineering*. [S.l.]: Elsevier, 2016. p. 129–174. Citado na página 21.

OLIVEIRA, F. de; SILVA, C. G. da; RAMOS, L. A.; FROLLINI, E. Phenolic and lignosulfonate-based matrices reinforced with untreated and lignosulfonate-treated sisal fibers. *Industrial crops and products*, Elsevier, v. 96, p. 30–41, 2017. Citado na página 27.

OLIVEIRA, I. R. de; AMICO, S. C.; SOUZA, J. v.; LUZ, F. F.; BARCELLA, R.; LIMA, A. G. B. de. Resin transfer molding process: a numerical investigation. In: *TRANS TECH PUBL. Defect and Diffusion Forum*. [S.l.], 2013. v. 334, p. 193–198. Citado na página 67.

PARNAS, R. S.; SALEM, A. J.; SADIQ, T. A.; WANG, H.-P.; ADVANI, S. G. The interaction between micro-and macro-scopic flow in rtm preforms. *Composite structures*, Elsevier, v. 27, n. 1-2, p. 93–107, 1994. Citado na página 32.

POTTER, K. D. The early history of the resin transfer moulding process for aerospace applications. *Composites Part A: applied science and manufacturing*, Elsevier, v. 30, n. 5, p. 619–621, 1999. Citado na página 30.

RIBEIRO, M. L. *Damage and progressive failure analysis for aeronautic composite structures with curvature*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2013. Citado na página 21.

RODRIGUES, C. S. *Efeito da adição de cinza de casca de arroz no comportamento de compósitos cimentícios reforçados por polpa de bambu*. Tese (Doutorado) — PUC-Rio, 2004. Citado na página 42.

ROSSEL, S. M.; CAIRNS, D. S. *Fluid flow modeling of resin transfer molding for composite material wind turbine blade structures*. [S.l.], 2004. Citado na página 21.

SANTOS, J. A.; GARCIA, R. B. Estudo da adesão interfacial resina epóxi/fibra de carbono por medidas de ângulo de contato. *Revista Publica*, v. 3, n. 2, 2009. Citado na página 27.

SARTORI, A. P. *Desenvolvimento e Caracterização de Compósitos Sanduíche para Isolamento Térmico*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Caxias do Sul, 2009. Citado na página 21.

SCHMACHTENBERG, E.; HEIDE, J. S. Z.; TÖPKER, J. Application of ultrasonics for the process control of resin transfer moulding (rtm). *Polymer testing*, Elsevier, v. 24, n. 3, p. 330–338, 2005. Citado na página 44.

SILVA, H. S. P. *Desenvolvimento de Compósitos Poliméricos com Fibras de Carauá e Híbridos com Fibras de Vidro*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 32.

SILVA, I. C. *Comportamento Balístico de Compósitos EPÓXI – Fibra Natural em Blindagem Multicamada*. Tese (Doutorado) — Instituto Militar de Engenharia, 2014. Citado na página 21.

SILVA, I. L. A. *Propriedades e Estruturas de Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibras Contínuas de Juta*. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 2014. Citado na página 22.

SLOAN, J. Proper mold care: Mandatory. *Composites Technology*, p. 24–29, 2011. Citado na página 35.

SOUSA, M. M. S. *Estudo do Processo de Fabricação de Compósitos de Matriz Metálica da Liga de Alumínio AA6160 por Metalurgia do Pó via Moagem de Alta Energia e Sinterização a Vácuo*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, 2012. Citado na página 28.

SOZER, E.; SIMACEK, P.; ADVANI, S. Resin transfer molding (rtm) in polymer matrix composites. In: *Manufacturing techniques for polymer matrix composites (PMCs)*. [S.l.]: Elsevier, 2012. p. 245–309. Citado na página 55.

THORVALDSEN, N. *Requirements for Designing Moulds for Composite Components*. Dissertação (Mestrado) — Norwegian University of Science and Technology, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 67.

TITA, S. P.; PAIVA, J. d.; FROLLINI, E. Resistência ao impacto e outras propriedades de compósitos lignocelulósicos: matrizes termofixas fenólicas reforçadas com fibras de bagaço de cana-de-açúcar. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, SciELO Brasil, v. 12, n. 4, p. 228–239, 2002. Citado na página 26.

TOURINHO, A. M. C. *Estudo do Comportamento Vibro-Acústico de Materiais Compósitos e Estruturas Sanduíche para Aplicações em Ensaaios Não Destrutivos*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília, 2013. Citado na página 21.

VERA, R. V. *Estruturas aeronáuticas de interior em compósito natural: fabricação, análise estrutural e de inflamabilidade*. 2012. Citado na página 21.

WALSH, S. M.; FINK, B. K. Achieving low cost composite processes through intelligent design and control. *Proc RTO-MP-069 (II)*, p. 7–11, 2001. Citado na página 59.

WANG, Q.; CHEN, Z.; CHEN, Z. Design and characteristics of hybrid composite armor subjected to projectile impact. *Materials & Design*, Elsevier, v. 46, p. 634–639, 2013. Citado na página 58.

XIAO, Y.; QIAO, W.; FUKUDA, H.; HATTA, H. The effect of embedded devices on structural integrity of composite laminates. *Composite Structures*, Elsevier, v. 153, p. 21–29, 2016. Citado na página 57.

Anexos

Anexo A – RESINA E CATALISADOR

RESINA POLIÉSTER



COMPOSITES POLYLITE® 10 316

DESCRIÇÃO

Resina poliéster insaturada, totalmente polimerizável, baixa viscosidade, tixotrópica, pré-acelerada.

APLICAÇÕES

Piscinas, banheiras, peças automotivas, caixas d'água e acessórios reforçados com fibras de vidro, moldados em processo aberto (laminação manual ou a pistola).

CARACTERÍSTICAS

- Excepcional característica de molhabilidade das fibras de vidro;
- Excelente resistência às bolhas osmóticas;
- Rápido ciclo de cura em baixas temperaturas;
- Reduz o consumo de MEK-P em baixas temperaturas.

PROPRIEDADES

CARACTERÍSTICAS	MÉTODO DE ANÁLISE	10316-05			10316-10			10316-20		
Viscosidade Brookfield à 25°C sp 3:60 rpm (CP)	PP01 - 124	200 a 250	250 a 350	300 a 400						
Índice de Tixotropia	PP01 - 124	1,30 a 2,10	1,30 a 2,10	1,30 a 2,10						
Teor sólido – Método Reichhold (%)	PP01 - 519	55 a 63	55 a 63	--						
Densidade a 25°C (g/cm3)	PP01 - 106	1,07 a 1,11	1,07 a 1,11	--						
Índice de Acidez (mgKOH/g)	PP01 - 003	30 máximo	30 máximo	30 máximo						
* Curva Exotérmica à 25°C - Tempo de gel (minutos) - Intervalo simples (minutos) - Temperatura máxima (°C)	PP01 – 296	5 a 7 8 a 14 140 a 180	10 a 15 8 a 13 152 a 180	20 a 25 9 a 18 152 a 180						

CARACTERÍSTICAS	MÉTODO DE ANÁLISE	10316-30
Viscosidade Brookfield à 25°C sp3:60 rpm (cP)	PP01 - 124	250 a 350
Teor de Sólidos – Método Reichhold (%)	PP01 - 519	55 a 63
Índice de Tixotropia	PP 01 - 124	1,3 a 2,1
Índice de Acidez (mgKOH/g)	PP 01 - 003	30 máximo
Curva exotérmica a 25°C * - Tempo de gel (minutos) - Intervalo simples (minutos) - Temperatura máxima (°C)	PP 01 - 296	30 a 35 10 a 22 140 a 180

As informações aqui citadas são de caráter geral com o propósito de auxiliar nossos clientes a determinar se os nossos produtos são adequados às suas aplicações. Os nossos produtos são recomendados para clientes industriais. Nós recomendamos aos nossos clientes que inspecionem e avaliem tecnicamente o desempenho dos nossos produtos em suas próprias condições, para aprovação prévia à sua comercialização. Nós garantimos que nossos produtos atenderão às especificações técnicas aqui descritas. Nada aqui contido deverá constituir qualquer outra garantia expressa ou implícita, incluindo qualquer garantia de comerciabilidade ou adequação a um propósito específico e nenhuma proteção de qualquer lei ou patente poderá ser inferida. Todos os direitos à patente são reservados. A exclusiva remediação para todas as reivindicações fundamentadas se limitarão à reposição dos nossos materiais e em nenhum evento seremos responsáveis por danos especiais, incidentais ou consequentes.

REICHOLD**[BOLETIM TÉCNICO]**

* 100,0 g de Resina + 1,0 mL de Peróxido de Metil Etil Cetona

PROPRIEDADES DA RESINA NA APLICAÇÃO (*):

CARACTERÍSTICAS	MÉTODO DE ANÁLISE	VALORES TÍPICOS
Resistência Máxima à Tração (MPa)	PP 09 – 035	40
Módulo de Elasticidade em Tração (MPa)	PP 09 – 035	3000
Elongação Máxima (%)	PP 09 – 035	1,0
Resistência Máxima à Flexão (MPa)	PP 09 – 039	45
Módulo de Elasticidade em Flexão (MPa)	PP 09 – 039	3300
Dureza Barcol	PP 09 – 034	35
Contração Linear	PP 09 – 050	2,0
Temperatura de termodistorção	PP 09 – 030	85
Resistência ao Impacto J/M	PP 09 – 078	14

(*) resina sem reforço de fibras de vidro

Sistema de Catálise: MEK-P

Pós Cura: 48 h à 60°C

ARMAZENAGEM

Para garantia de estabilidade e manutenção das propriedades, este produto deve ser armazenado em local coberto e seco, longe de fontes de calor e da exposição ao sol, em temperatura ambiente de 25°C ou menor. A embalagem deve ser mantida fechada. A inobservância destas condições poderá modificar as características originais do produto e a redução do tempo de vida útil.

EMBALAGEM

Esta resina encontra-se disponível em tambor de 225 kg ou granel.

ESTABILIDADE

Sob as condições recomendadas de armazenamento, a estabilidade do POLYLITE® 10 316 será de 4 meses, após a data de fabricação.

SEGURANÇA

As instruções sobre manuseio e precauções, recomendadas para o uso desta resina, estão contidas na "Folha de Informações de Segurança de Produtos Químicos". Queira solicitá-la, caso haja interesse em utilizar o produto descrito.

CATALISADOR

AkzoNobel Ltda.
Site Itupeva**Certificado de Análise**

DATA : 29/08/2016

CLIENTE : IBEX QUIMICOS E COMPOSITOS LTDA
 PRODUTO : BUTANOX M-50
 NOTA FISCAL : 21166
 LOTE : 1606427218
 QUANTIDADE (Kg) : 960,000
 OBSERVAÇÃO : 3

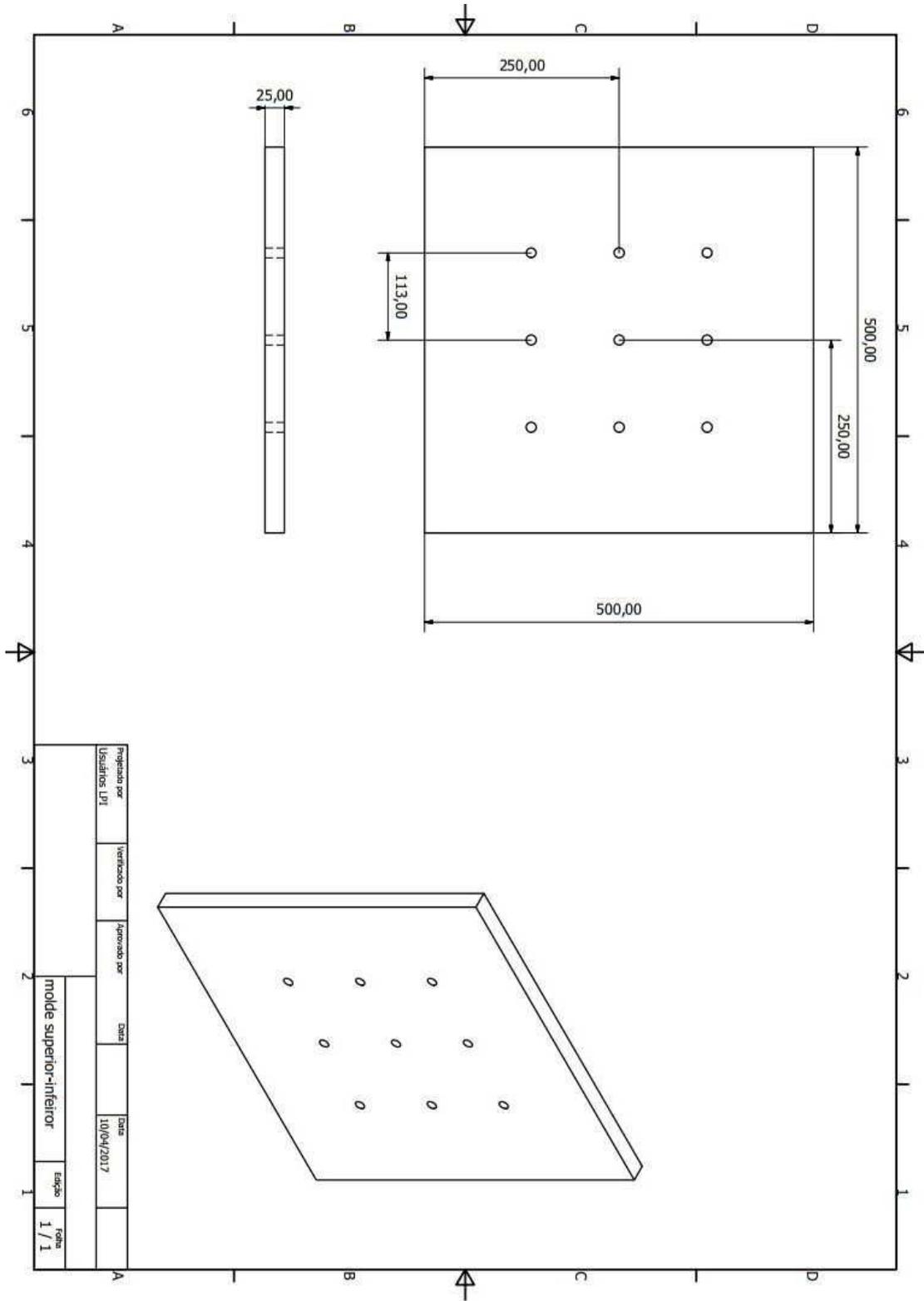
FABRICAÇÃO : 12/07/2016
 VALIDADE : 08/01/2017

Controle	Unidade	Especificação		Método	Resultado
		Mín.	Máx.		
Aspecto	Visual	Líquido límpido		Visual	Líquido límpido
Oxigenio ativo total	%	8,8000	9,0000	PCIO.001/00-0	9

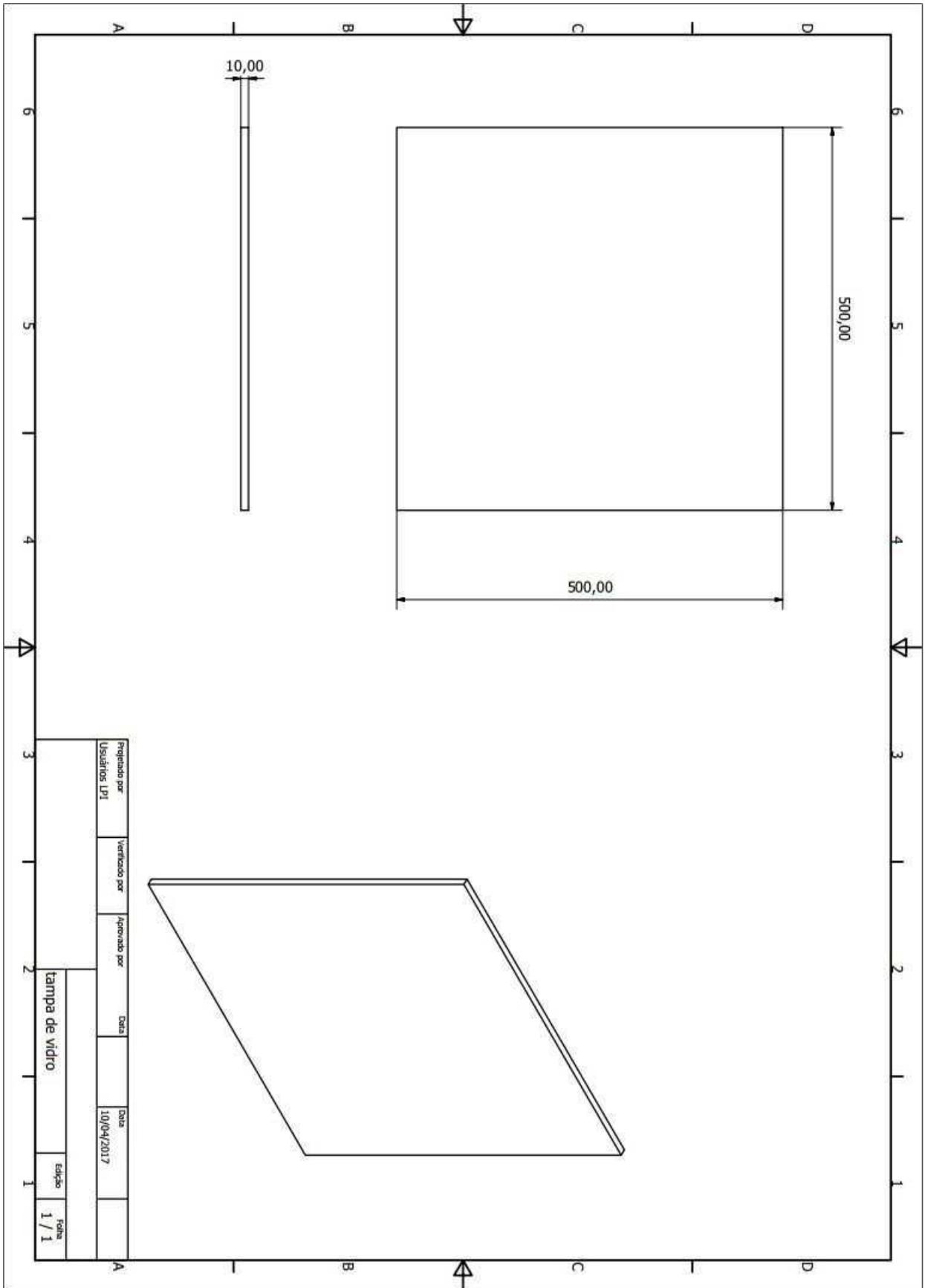
Este certificado foi emitido por computador e produzido sem assinatura. Os resultados foram validados através de sistema informatizado de controle da qualidade.
 O site de Itupeva é certificado pela ISO 9001, OSHAS 18001 e ISO 14001.

Anexo B – MOLDE

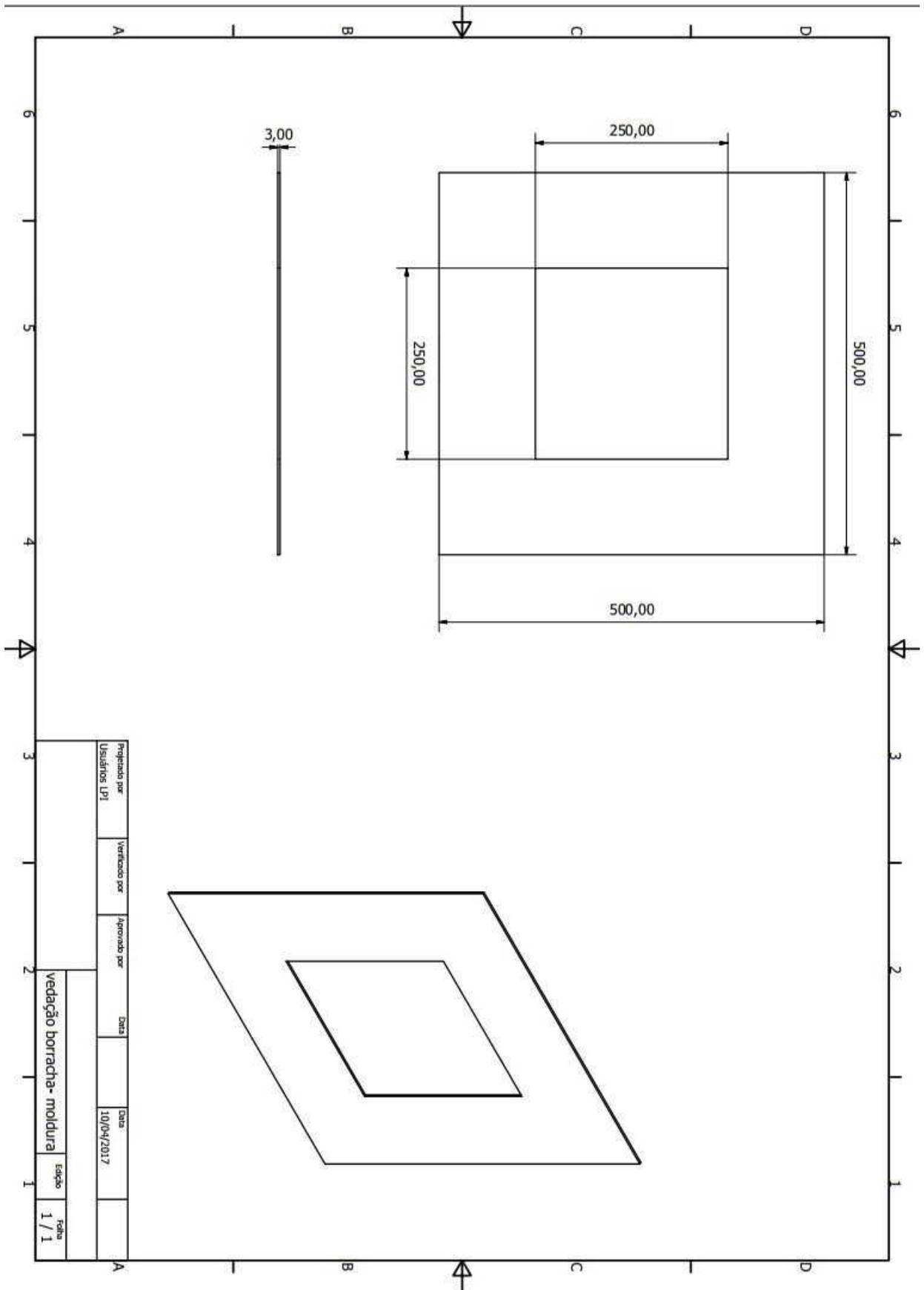
B.1 BASE



B.2 TAMPA



B.3 MOLDURA



Anexo C – MÁQUINA DE RTM

ATIVIDADES PRÉ-PROCESSAMENTO

- Verificar e abastecer se necessário, os recipiente de resina, catalisador e solvente;
- Ligar o compressor e esperar ele disparar;
- Abrir a pressão da máquina (liga-desliga);
- Verificar as pressões de injeção de resina, solvente e ar de secagem;
- Retirar o pino do cursor e fazer o bombeamento manual até 120psi (catalisador);
- Verificar se tem ar na mangueira do catalisador (se tiver abrir a válvula na máquina até que o ar saia);
- Verificar a porcentagem de catalisador no cursor (deixar acima de 1%);
- Zerar o contador após o bombeamento manual (cada batida da máquina injeta 160g de resina);
- Sempre que for verificar o solvente, o fazer com a máquina desligada (sem pressão), retirar a pressão do recipiente do solvente antes de abrir;
- Sempre que for desligar tirar a pressão da resina e do catalisador na máquina, depois soltar o pino do cursor do catalisador;
- Sempre limpar o filtro depois de injetar;
- No fim, fazer a limpeza do bico de injeção e depois fazer a limpeza interna.

ATIVIDADES PÓS-PROCESSAMENTO (LIMPEZA DA MÁQUINA)

- Iniciar limpando o bico de injeção (tiner + ar de secagem);
- Liberar o ar da injeção de resina (abrir e fechar) e do catalisador;
- Desconectar o cursor do catalisador;
- Ligar o retorno de resina no cabeçote;
- Colocar p captador de resina no balde de solvente, logo depois colocar o de retorno e deixar por 10 minutos;
- Retirar os bicos e guardar;
- Limpar o filtro no solvente.

Anexo D – ENSAIOS DE FLEXÃO

Nome	Máx_Deslocamento	Máx_Força
Parâmetros	Cálculo de áreas completas	Cálculo de áreas completas
Unidade	mm	N
1_1	4.84948	2671.12
Média	4.84948	2671.12
DesvioPadrão	--	--
Faixa	0.00000	0.00000

cp1

Nome	Máx_Deslocamento	Máx_Força
Parâmetros	Cálculo de áreas completas	Cálculo de áreas completas
Unidade	mm	N
1_1	10.7257	4193.95
Média	10.7257	4193.95
DesvioPadrão	--	--
Faixa	0.00000	0.00000

cp2

Nome	Máx_Deslocamento	Máx_Força
Parâmetros	Cálculo de áreas completas	Cálculo de áreas completas
Unidade	mm	N
1_1	3.15631	1006.81
Média	3.15631	1006.81
DesvioPadrão	--	--
Faixa	0.00000	0.00000

cp4

Nome	Máx_Deslocamento	Máx_Força
Parâmetros	Cálculo de áreas completas	Cálculo de áreas completas
Unidade	mm	N
1_1	3.21867	1629.42
Média	3.21867	1629.42
DesvioPadrão	--	--
Faixa	0.00000	0.00000

cp5

Nome	Máx_Deslocamento	Máx_Força
Parâmetros	Cálculo de áreas completas	Cálculo de áreas completas
Unidade	mm	N
1_1	16.3590	672.126
Média	16.3590	672.126
DesvioPadrão	--	--
Faixa	0.00000	0.00000

cp6