

PROCESSAMENTO DE PLACA ESPESSA DE COMPÓSITO ATRAVÉS DE
MOLDAGEM POR TRANSFERÊNCIA DE RESINA

Wanderley Ferreira de Amorim Júnior

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS
EM ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS.

Aprovada por:

Prof. Fernando Luiz Bastian, Ph.D.

Prof^a. Verônica Maria de Araújo Calado, D.Sc.

Prof. Affonso Carlos Seabra da Silva Telles, Ph.D.

Prof^a. Rossana Mara da Silva Moreira Thiré, D.Sc.

Prof^a. Laura Hecker de Carvalho, Ph.D.

Prof^a. Bluma Guenther Soares, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

ABRIL DE 2007

AMORIM JÚNIOR, WANDERLEY
FERREIRA

Processamento de placa espessa de
compósito através de Moldagem por
Transferência de Resina [Rio de Janeiro] 2007

XXIII, 232p.29,7 cm (COPPE/UFRJ,
D.Sc., Engenharia Metalúrgica e de Materiais,
2007)

Tese – Universidade Federal do Rio de
Janeiro, COPPE

1. Compósitos

2. Processamento de Materiais Compósitos

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Wanderley e Joaquina, a minha Tia Lindomar, aos meus irmãos Rômulo, Tarcísio e Tibério e a minha futura esposa Helayne minha eterna gratidão pelo apoio, incentivo, dedicação e todo carinho e amor que um filho, irmão e noivo pode receber.

AGRADECIMENTOS

A DEUS pelo sopro da minha vida.

Ao amigo e orientador Fernando Luiz Bastian pela orientação, pela amizade e incentivo demonstrados durante toda a realização deste trabalho e principalmente pela oportunidade e confiança depositada em mim não só agora mas desde o mestrado.

A amiga e orientadora Verônica Maria de Araújo Calado pela orientação maternal, amizade, paciência e dedicação na correta coordenação deste trabalho.

Ao Major Consentino e ao Capitão Gustavo Queiroz do CTEx nosso preito de gratidão pelo apoio crucial e pela amizade durante toda a realização deste trabalho.

Ao professor Marco Antônio dos Santos (UFCG) por ter mim adotado desde da graduação e guiado minha carreira profissional.

Ao Engenheiro Sérgio e ao Major Pinho amigos em qualquer hora, lugar e situação o nosso preito de gratidão.

A todos os meus professores do Primário, Ginásio, Científico, Graduação e Pós – Graduação pela formação e direcionamentos. Em especial aos professores Tia Maria, Dona Teresinha do Primário, Ivan, Gláucio, Graça, Edilene do Ginásio, Garotinho, Marcos, Davi, Fernando Brasil, Félix, Hélio, Madalena do Científico, Walman (UFCG), Theóphilo (UFCG), Manassés (UFCG), Juscelino Maribondo (UFCG), Ricardo Cabral (UFCG), Carlos José (UFCG), Célio Albano (UFRJ), Luís Marcelo Tavares (UFRJ) e Tsuneharu (UFRJ).

Aos Engenheiros Mecânicos Mario, Ivan e o Técnico civil Francisco do CTEx pelo apoio, amizade e dedicação durante todo desenvolvimento deste trabalho.

Ao Major Aguiar e aos Capitães Brizola e Guimarães pelo apoio e amizade durante a realização deste trabalho.

A todos os funcionários e colegas do Grupo de Materiais e de todo o CTEx em especial aos Capitães Egbert, Cardoso, Rogério, Daniel, Abdala, a Tenente Andréa, aos funcionários Zé Luís, Ronílson, Valmir, Maria Luiza, José Vieira, Mineiro, Sargento Mota pelo apoio e amizade durante a realização deste trabalho.

Ao Major Yuan e família pela amizade e convivência durante toda a realização deste trabalho.

Ao funcionário Robson do Laboratório de Propriedades Mecânicas/COPPE pelo apoio e amizade na realização deste trabalho.

Ao amigo Carlos Jesus Luciano pelo apoio e amizade no desenvolvimento desse trabalho.

Aos amigos do CTEEx Sargento Assunção, Jorge Baraúna, Regina e família, Dona Rosa, Santos (Santinho), Francheschi, Massayoshi, Sargento Silveira.

Aos todos amigos da Ilha do Governador em especial a Dona Dorinha e todos os membros do Quiosque das Lamentações, César, Luís e família, Luís e família (Linar Papelaria), Anderson, Edgar e sua República, Íbis, Francisco Canindé e Roberto.

A todos os colegas do Laboratório de Materiais Compósitos e do Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da COPPE/UFRJ pela amizade e apoio, Rafael, Ana Angélica, Ana Beatriz, Camila, Bruna, Fabíola, Eliana, Marta, Marília, Renata, Felipe, João, Aline, Leonardo, Lucas, Célia, Bruno, Francisco, Tiago, Luís, Elias em especial, a Henrique, Ledjane, Camila, Patrícia, Rita, Andres e Marcelo.

A todos que de alguma forma, e mesmo não citados aqui, colaboraram para a realização e conclusão desta tese.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.).

PROCESSAMENTO DE PLACA ESPESSA DE COMPÓSITO ATRAVÉS DE MOLDAGEM POR TRANSFERÊNCIA DE RESINA

Wanderley Ferreira de Amorim Júnior

Abril/2007

Orientadores: Fernando Luiz Bastian

Verônica Maria de Araújo Calado

Programa: Engenharia Metalúrgica e de Materiais

O objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento da capacitação em processamento por RTM de compósitos espessos reforçados por fibras para fins estruturais e balísticos. A seguinte metodologia foi cumprida: desenvolvimento do processamento por RTM, caracterização mecânica, microestrutural e ensaio balísticos dos materiais compósitos produzidos. Os materiais usados nos experimentos foram: tecido de fibra de vidro (1100 g/m^2) e resina éster-vinílica DERA KANE 411-350 com catalisador Butanox e acelerador CoNaP. As preformas eram constituídas 22 a 40 camadas de fibra de vidro. Baseado nos experimentos realizados pode-se concluir que foi possível o projeto, desenvolvimento e a fabricação de um equipamento de RTM de concepção própria para a fabricação de placas compósitas espessas com 32 camadas de fibra de vidro (aproximadamente 25,4 mm) constituídas por tecidos de elevada gramatura e uma resina com uma viscosidade (350 cp), relativamente alta para RTM, fazendo uso apenas de pressão de vácuo. O estudo do sistema de injeção de resina e a quantidade de resina no interior desse sistema foram importantes para o real entendimento do processamento por RTM. Só foi possível a fabricação por RTM das placas compósitas com o seguinte número de camadas de fibra : 28, 30 e 32. A variação do número de camadas de fibra das placas produzidas por RTM controla não só o tempo de preenchimento do molde, conseqüentemente a taxa de produção, como a qualidade da interface fibra/matriz nos compósitos fabricados. A placa compósita de 30 camadas apresentou tempo de preenchimento intermediário entre as duas outras preformas (28 e 32 camadas), melhor qualidade da interface fibra/matriz e, conseqüentemente, maiores valores de resistência ao cisalhamento interlaminar.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

PROCESSING OF THICK COMPOSITE PLATE BY RESIN TRANSFER MOLDING PROCESS

Wanderley Ferreira de Amorim Júnior

Abril/2007

Advisors Fernando Luiz Bastian

Verônica Maria de Araújo Calado

Department: Metallurgical and Materials Engineering

The objective of this work was the development of thick composite plate for structural and ballistic applications using the RTM process. The following methodology was adopted: development of the RTM process for large thickness, ballistic tests, microstructural and mechanical properties characterization of the composite materials processed. The materials used in the experiments were: fiber glass fabric (1100 g/m^2) and vinylester resin DERA-KANE 411-350 with Butanox initiator and CoNaP accelerator. The preforms had 22 to 40 fiber glass reinforcement layers. An experimental RTM set-up was proposed and installed. It was possible to process a 25,4 mm thick composite plate with 32 high density fiber fabric layers (1100 g/m^2) and a relatively high viscosity resin system for RTM, making use only of vacuum pressure. By the experiments, we could conclude that the resin injection system and the variation of the amount of resin modified the fulfilling time of the preform and prevented the fulfilling of the preform in the experiments. It was not possible to prevent the phenomenon of race-tracking. The resin injection system and the variation of the amount of resin in the reservoir of injection influence the RTM process. It was only possible to process 28, 30 and 32 composite fiber layers. The fibre volume fraction of the composite manufactured by RTM controls the mold filling time and composite porosity. The composite with 30 layers presented less porosity, no variation in Interlaminar Shear Strength and lower filling time than the preform with 32 layers and greater filling time than the preform with 28 layers.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	
2.1 Processamento de materiais compósitos.....	3
2.2 Processamento por RTM.....	12
2.3 Permeabilidade e sua importância no processo por RTM	21
2.3.1 Modelo Físico-Matemático da Permeabilidade.....	32
2.3.2 Métodos de medição da permeabilidade.....	42
2.3.2.1 Métodos de Medição da Permeabilidade em Placa Fina.....	43
2.3.2.2 Métodos de Medição da Permeabilidade em Placa Espessa.....	52
2.4 Mecanismo de absorção de energia de impacto balístico pelo laminado polimérico.....	58
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS	
3.1 Materiais	68
3.2 Métodos.....	69
3.2.1 Processamento de Placas Compósitas.....	71
3.2.1.1 Processamento das placas compósitas por laminação manual, seguido do uso da bolsa de vácuo para o estudo da metodologia de ensaio balístico	72
3.2.1.2 Processamento das placas por SCRIMP para o estudo da metodologia de análise de dano por ultra-som.....	74
3.2.1.3 Processamento de placas compósitas por RTM	75
3.2.1.4 Planejamento de experimentos.....	77
3.2.2 Metodologias desenvolvidas e/ou usadas para o desenvolvimento do processamento por RTM.....	79
3.2.2.1 Estudo da cinética de cura e da viscosidade da resina utilizada no processamento por RTM.....	79
3.2.2.2 Estudo da permeabilidade de diferentes preformas de fibra de vidro tipo E.....	80
3.2.2.3 Estudo da influência da fração volumétrica de fibra da preforma.....	84
3.2.2.4 Metodologia de corte das placas compósitas por RTM.....	85
3.2.2.5 Caracterização microestrutural dos compósitos fabricados.....	87
3.2.2.6 Caracterização mecânica dos compósitos fabricados.....	87
3.2.2.7 Ensaio balístico dos materiais compósitos processados.....	98
3.2.2.8 Metodologia para análise do dano por delaminação e porosidade nas placas compósitas.....	99

3.2.3 Montagem, Projeto e Fabricação de Equipamentos e Dispositivos.....	102
3.2.3.1 Montagem do sistema de instrumentação para a fase de processamento.....	104
3.2.3.2 Projeto e fabricação do molde de injeção por RTM para estudo de permeabilidade.....	107
3.2.3.3 Projeto e fabricação de mesa para processamento e medição de permeabilidade radial.....	111
3.2.3.4 Projeto de conexão T para a fixação do sensor de pressão.....	114
3.2.3.5 Projeto e fabricação do molde de RTM para obtenção de placas de material compósito de 25,4 mm (1”) de espessura.....	115
3.2.3.6 Projeto do molde de RTM de múltiplas entradas e saídas	116
3.2.3.7 Projeto e fabricação do dispositivo de vácuo e de injeção de resina para molde de RTM	117
3.2.3.8 Projeto e fabricação do dispositivo para ensaio de cisalhamento interlaminar.....	121
3.2.3.9 Fabricação do dispositivo para ensaio de compressão.....	123
3.2.3.10 Equipamentos para uso no ensaio balístico das placas compósitas.....	124
3.2.3.11 Corte transversal dos projéteis 7,62 mm perfurante (AP) para impacto balístico nas placas processadas por RTM.....	126

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Desenvolvimento do processamento por RTM.....	130
4.1.1 Preparação da matriz polimérica para uso no processamento por RTM.....	130
4.1.2 Experimento preliminar da estação de processamento por RTM.....	132
4.1.3 Teste da estação de processamento por RTM: molde de múltiplas entradas e saídas.....	135
4.2 Fabricação de placas compósitas espessas por RTM	138
4.2.1 Definição da posição do ponto de injeção e de vácuo para o processamento por RTM.....	138
4.2.2 Processamento de placas compósitas por RTM	140
4.2.3 Estudo analítico do sistema de injeção de resina do processamento por RTM.....	143
4.2.4 Influência do sistema de injeção e da quantidade de resina no processamento por RTM.....	150
4.2.5 Influência do race-tracking no preenchimento da preforma.....	156
4.2.6 Processamento por RTM de placas compósitas com preformas de diferentes números de camadas	157
4.2.7 Cálculo da fração volumétrica de fibra e da densidade das placas compósitas processadas	164

4.2.8 Acabamento das placas compósitas processadas por RTM.....	166
4.2.9 Variação da espessura das placas compósitas processadas por RTM	170
4.2.10 Curva de infusão de resina no interior das preformas usadas.....	173
4.2.11 Resistência ao Cisalhamento Interlaminar de compósitos fabricados por Moldagem de Transferência de Resina.....	175
4.2.12 Cálculo de permeabilidade dos processamentos realizados por RTM.....	189
4.2.12.1 Cálculo da permeabilidade no plano dos processamentos realizados por RTM.....	189
4.2.12.2 Cálculo da Permeabilidade Transversal (Kt) dos processamentos realizados por RTM.....	202
4.3 Ensaio balístico dos materiais compósitos processados.....	205
4.3.1 Resultados do ensaio balístico nas placas fabricadas por laminação manual seguida de bolsa de vácuo.....	205
4.3.2 Resultados do uso dos equipamentos fabricados para ensaio balístico das placas de material compósito.....	206
4.3.3 Resultados do ensaio balístico da placa de 32 camadas fabricadas por RTM.....	207
4.4 Caracterização mecânica dos compósitos processados.....	212
4.4.1 Ensaio de tração dos materiais compósitos processados.....	212
4.4.2 Ensaio de compressão dos materiais compósitos processados.....	215
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES	
5.1 CONCLUSÕES.....	217
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	219
CAPÍTULO 6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	220

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Desenho de um compósito de arranjo de fibras contínuas no interior de uma matriz polimérica.

Figura 2.2 – (a) Esquema do processo de laminação manual. (b) Esquema de uma máquina de enrolamento filamentar.

Figura 2.3 - Vetores que comandam três importantes ramos industriais.

Figura 2.4 – Desenho de uma blindagem fabricada por LCM, mas especificamente o processamento por SCRIMP.

Figura 2.5 – Leme vertical do novo avião de combate da Força Aérea americana, o JSF (Joint Strike Fighter) fabricada por RTM.

Figura 2.6– Distribuição do mercado brasileiro segundo o tipo de processo de fabricação dos materiais compósitos.

Figura 2.7 – Esquema básico de processamento por RTM: injeção de resina em uma preforma (arranjo de fibras organizadas no formato da peça) no interior de um molde rígido.

Figura 2.8 – Um exemplo de uma blindagem integral multifuncional.

Figura 2.9 - Tipos de tecidos: (a) tecido básico; (b) sarja e (c) cetim.

Figura 2.10 – Molde aberto usado no processamento por RTM.

Figura 2.11- Sistema de aquecimento posicionado em uma das placas do molde.

Figura 2.12 - Diversas simulações de frente de fluxo com variações dos pontos de entrada

Figura 2.13 - Corte transversal em um molde por RTM.

Figura 2.14 – Esquema de um sistema de injeção de resina tipo campânula.

Figura 2.15 - Sistemas de injeção multicomponente de resina para processamento por RTM.

Figura 2.16 - Ciclo de processamento por RTM : preparação da preforma, posicionamento da preforma no interior do molde, fechamento e depois injeção da resina e desmoldagem.

Figura 2.17 - Desenho esquemático de um fluido escoando por um meio sólido.

Figura 2.18 - Diversas arquiteturas de tecido de reforço.

Figura 2.19- Geometria da arquitetura do tecido de fibra de vidro Syncoglas R420.

Figura 2.20 - (a) Tecido de cetim e (b) sarja; ambos apresentam marcante diferença na forma da frente de escoamento.

Figura 2.21 - Defeito em uma fibra.

Figura 2.22 – Compactação de um tecido semelhante a que ocorre no processamento por RTM.

Figura 2.23 - Tipos de tecido com diferentes compressibilidades.

Figura 2.24 - Esquema apresentando a natureza complexa da fibra do tecido de reforço: fibra e microfibras.

Figura 2.25 – Esquema de macroporos e microporos em fibras de um tecido de reforço.

Figura 2.26 - Aprisionamento de ar que pode ser responsável pela formação de vazios em compósitos fabricados por RTM.

Figura 2.27 – Deflexão de um molde de RTM devido à pressão hidráulica de injeção.

Figura 2.28 – Distribuição estatística da permeabilidade K_y de um tecido básico de fibra de vidro Syncoglas R420.

Figura 2.29 – Desenho básico que apresenta um meio poroso (preforma) sendo impregnado por uma resina.

Figura 2.30 - (a) Eixos x, y e z posicionados sobre uma placa fina e (b) vista superior da placa fina apresentando as únicas componentes do tensor K que são K_x e K_y .

Figura 2.31 - Fluxo semi-elíptico de resina no interior de um molde de placa espessa.

Figura 2.32 - Apresenta a variação de pressão com o avanço da frente de escoamento da resina no interior do compósito.

Figura 2.33 – Desenho esquemático do método de medição de fluxo paralelo

Figura 2.34– Desenho esquemático do método de medição de fluxo radial.

Figura 2.35 – Método de escoamento paralelo com medição da diferença de pressão.

Figura 2.36 - Método de medição de escoamento paralelo com medição da resistência elétrica

Figura 2.37 - Método Smartweave para medição de permeabilidade .

Figura 2.38 - Método de medição de permeabilidade por meio de placa eletrificada

Figura 2.39 - Método de escoamento radial de medição de permeabilidade com termistores.

Figura 2.40 - Método de escoamento radial para medição de permeabilidade com transdutores de pressão.

Figura 2.41 - Sistema de medição de permeabilidade usando gás.

Figura 2.42 - Método de medição de permeabilidade multicavidade de células de fluxo

Figura 2.43 - Método de medição radial por imagem para a permeabilidade

Figura 2.44 - Desenho básico para uso no modelo matemático proposto por Chan e Hwang para cálculo da permeabilidade.

Figura 2.45 - Parte estrutural do trem de pouso do helicóptero pesado NH-90 europeu fabricado por RTM.

Figura 2.46 – Método de medição da permeabilidade transversal.

Figura 2.47– Método de medição da permeabilidade transversal proposto por Drappier et al.[2002].

Figura 2.48 - Método de medição da permeabilidade transversal proposto por Loendersloot e Akkerman.

Figura 2.49 - Frente de escoamento de formato plano devido à presença das placas de alumínio alveolar.

Figura 2.50 - Termistores posicionados nos eixos x,y e z para medir a permeabilidade no plano e a permeabilidade transversal.

Figura 2.51 - (a) Desenho do sistema de espectroscopia de raio X para medição de permeabilidade transversal e (b) filmagem da frente de escoamento no interior da preforma.

Figura 2.52 - Curva espaço x tempo para a frente da resina na direção transversal apresentada por Saouab et al[2001].

Figura 2.53 - Delaminação é o dano na interface entre duas lâminas adjacentes.

Figura 2.54 – Gráfico que apresenta a tendência dos compósitos para absorver energia de impacto em degraus ou níveis.

Figura 2.55 - Mecanismos básicos absorção de energia em laminados de fibra de vidro sob impacto balístico.

Figura 2.56 - Gráfico referente à absorção de energia por laminados de fibra de vidro de várias espessuras quando submetidos ao impacto de projéteis de várias formas.

Figura 2.57- Gráfico da energia cinética absorvida por laminados de fibra de vidro e kevlar de várias espessuras quando impactados por projéteis que simulam fragmentos.

Figura 2.58 - Gráfico da velocidade no limite balístico de laminados kevlar de várias espessuras e tipos de matriz polimérica quando impactados por projéteis que simulam fragmentos.

Figura 2.59 - Corte transversal de placas de fibra de vidro impactadas balisticamente: (a)placa fina e (b) placa espessa.

Figura 2.60 - Desenho esquemático do dano balístico sofrido pelas (a) placa fina e (b) placa espessa.

Figura 3.1 - Tecido de fibra de vidro.

Figura 3.2 - Estrutura molecular da resina éster-vinílica.

Figura 3.3 - Fluxograma das atividades desenvolvidas neste trabalho de pesquisa

Figura 3.4 - Esquema do processo Seemann ou SCRIMP

de moldagem de compósito por infusão de resina.

Figura 3.5 – Placas de material compósito fabricadas por SCRIMP para o estudo da metodologia de análise de dano por ultra-som.

Figura 3.6 – Seqüência de atividades de molde aberto do processamento RTM desenvolvido.

Figura 3.7 - Esquema do método por Imagem da Permeabilidade Radial.

Figura 3.8 - Exemplo de filmagem do método por Imagem da Permeabilidade Radial.

Figura 3.9 – Variação da viscosidade da glucose de milho com a temperatura (25°C, 30°C, 35°C, 40°C, 45°C) e com diferentes diluições (10%, 20%).

Figura 3.10 - Gráfico de Número de camadas x Fração volumétrica de fibra, baseando-se na equação proposta por Luo et al.[2001].

Figura 3.11 – (a) Fresa vertical KONE KFF 30 e (b) corte de placa compósita por esta fresa.

Figura 3.12 – Esquema de dispositivo para ensaio de flexão curta em três pontos.

Figura 3.13 - Dispositivo usado nos ensaios de flexão curta em três pontos.

Figura 3.14 – Posição de retirada dos corpos de prova das placas compósitas processadas por RTM para uso no ensaio de resistência ao cisalhamento interlaminar.

Figura 3.15 - Tensão gerada no ensaio de flexão curta em três pontos é parabólica sendo zero nas extremidades e máxima no centro

Figura 3.16 – Máquina de ensaio de tração do LABEST/PEC/UFRJ.

Figura 3.17 – Corpo de prova Tipo 1 na máquina de ensaio de tração de 100ton.

Figura 3.18 – Corpo de prova de tração Tipo 1: aproximadamente 25, 4 mm de espessura e área de seção retangular constante.

Figura 3.19 – Corpo de prova Tipo 1 escorregando da garra da máquina de ensaio de tração de 100 ton.

Figura 3.20 – Corpo de prova Tipo 2 para teste do ensaio de tração.

Figura 3.21 – Corpo de prova Tipo 3 para o ensaio de tração.

Figura 3.22 – Corpo de prova Tipo 3 ensaiado na EMIC do Laboratório de Compósito/COPPE/UFRJ

Figura 3.23 – Esquema de retirada dos corpos de prova para ensaio de tração da placa compósita.

Figura 3.24 – Esquema da dimensão do corpo de prova de compressão.

Figura 3.25 - Ensaio de compressão do compósito na máquina de ensaio do LABEST/PEC/UFRJ.

Figura 3.26 - Esquema da bancada para ensaios balísticos.

Figura 3.27 - Projétil 7,62 mm (AP) perfurante.

Figura 3.28 - Esquema do método de pulso-eco por ultra-som.

Figura 3.29 – Fluxograma da metodologia de projeto adotada nesse trabalho de pesquisa.

Figura 3.30 - Fluxograma dos equipamentos e dispositivos projetados e/ou fabricados.

Figura 3.31 – Primeiro esquema testado para a montagem do sistema de instrumentação para o processamento por RTM.

Figura 3.32 – Segundo esquema testado para a montagem do sistema de instrumentação para o processamento por RTM.

Figura 3.33 – Terceiro esquema testado para a montagem do sistema de instrumentação para o processamento por RTM.

Figura 3.34 – Quarto esquema testado para a montagem do sistema de instrumentação para o processamento por RTM.

Figura 3.35 - Molde de injeção por RTM para estudo de permeabilidade: (a) molde aberto e (b) molde fechado.

Figura 3.36 – Simulação da deflexão da tampa superior do molde realizado com o programa ANSYS.

Figura 3.37 - Gráfico apresentado por Weitzenböck et al.[1999] para o dimensionamento do diâmetro do furo de injeção.

Figura 3.38 – Tubo oco de alumínio usado na estrutura tubular para fixação das câmeras de filmagem.

Figura 3.39 - Segundo protótipo do sistema de fixação para câmeras para uso na mesa de processamento.

Figura 3.40 - O sistema móvel para fixação do molde na mesa de processamento

Figura 3.41 - Mesa para processamento fabricada para uso no processamento por RTM.

Figura 3.42 - Técnica de desenho, conhecida como curva de interpenetração.

Figura 3.43 - Projeto da conexão T: a)corte transversal e b)vista superior.

Figura 3.44 - Conexão T projetada para uso no processamento RTM.

Figura 3.45 - Molde de 1” usado no processamento por RTM.

Figura 3.46 – Desenho de projeto do molde de múltiplas entradas e saídas.

Figura 3.47 – Primeiro bico de injeção projetado.

Figura 3.48 – Peça de polipropileno para o bico de injeção.

Figura 3.49 - Concepção do bico de injeção aprovado para uso no processamento por RTM.

Figura 3.50 - Bico de injeção aprovado para uso no processamento por RTM.

Figura 3.51 – Primeira concepção para o “vent” : (a) tampa inferior de acrílico do molde e (b) no detalhe a mangueira de vácuo introduzida diretamente no furo da tampa.

Figura 3.52 – Tampão em aço inox para uso no processamento por RTM.

Figura 3.53 – Esquema do dispositivo para ensaio de cisalhamento interlaminar

Figura 3.54 – Dispositivo para ensaio de cisalhamento interlaminar

Figura 3.55 – Cilindros de transferência de carga do dispositivo de ensaio de cisalhamento interlaminar após o tratamento de têmpera.

Figura 3.56 – Placa de compressão e as peças usadas na adaptação: anel de aço e suporte cilíndrico.

Figura 3.57 - Variação de direção do vetor velocidade.

Figura 3.58 – Esquema do equipamento para medir o desvio do projétil.

Figura 3.59 – Esquema da armadilha para projéteis.

Figura 3.60 - Representação de uma blindagem cerâmica + laminado polimérico.

Figura 3.61 - Projétil 7,62 mm perfurante com o seu núcleo duro de aço

Figura 3.62 – Esquema do perfil levantado do projétil 7,62 mm AP.

Figura 3.63 - Corte transversal do projétil 7,62 mm AP.

Figura 3.64 - Projétil tipo 3 usado nos ensaios balísticos.

Figura 4.1 - Espectro IR da resina Derakane 411-350.

Figura 4.2 - Imagens da frente de fluxo avançando no interior do molde.

Figura 4.3 - Perfil da pressão de injeção durante o experimento

Figura 4.4 - Perfil da pressão de vácuo durante o experimento.

Figura 4.5 – Duas vistas da estação de processamento por RTM.

Figura 4.6 - Sistema de instrumentação adotado no processamento por RTM.

Figura 4.7 – Vistas superior (a) e inferior (b) do molde de múltiplos pontos de injeção e de saída de resina.

Figura 4.8 - Primeiro esquema de lay-out a ser usado no processamento por RTM.

Figura 4.9 – Região não molhada da última camada da preforma.

Figura 4.10 - Segundo esquema de lay-out testado e aprovado para uso no processamento por RTM.

Figura 4.11 – Molhamento obtido na primeira (a) e na última (b) camadas da preforma do experimento com o molde com múltiplos pontos de injeção e saídas.

Figura 4.12 – Placa compósita colada na tampa superior do molde.

Figura 4.13 – Placa compósita processada : (a) vista superior (b) vista inferior da placa e (c) vista lateral.

Figura 4.14 - Preenchimento da placa compósita processada.

Figura 4.15 – Placa processada (a) vista superior e (b) vista inferior.

Figura 4.16 – Sistema de injeção tipo campânula.

Figura 4.17 – Esquema dos componentes do sistema de injeção de resina do processamento de RTM desenvolvido.

Figura 4.18 - Esquema proposto para a modificação do sistema de injeção de resina do processamento por RTM.

Figura 4.19 – Novo sistema de injeção de resina proposto a ser usado no processamento por RTM.

Figura 4.20 – Placa processada com sucesso por RTM: (a) vista superior e (b) vista inferior

Figura 4.21 – Filme de PVA retirado após o processamento por RTM.

Figura 4.22- Início do processo de injeção do experimento 3.

Figura 4.23 - Avanço da frente elíptica de escoamento da resina sobre a preforma no experimento 3.

Figura 4.24 - Parte superior da preforma do experimento 3 depois do preenchimento pela resina.

Figura 4.25 - Parte inferior da preforma do experimento 3 onde pode ser observado o surgimento dos primeiros sinais da resina, ponto A.

Figura 4.26 - Análise do escoamento no interior do molde baseando-se nos tempos R_1 e R_2 para os experimentos realizados.

Figura 4.27 - Análise do escoamento no interior do molde baseado no tempo de *race-tracking* para os experimentos realizados.

Figura 4.28 - Análise do escoamento no interior do molde baseado nos tempos R_1 , R_2 e de *race-tracking* para os experimentos realizados.

Figura 4.29 - Análise do escoamento no interior do molde baseando-se nos tempos R_1 , R_2 e de *race-tracking* para os experimentos realizados.

Figura 4.30 - Imagens da frente de escoamento avançando no interior do molde.

Figura 4.31 - Preenchimento da placa do experimento 2.

Figura 4.32 – Placa compósita com 22 camadas: (a) vista superior e (b) vista inferior da placa

Figura 4.33 – Vista lateral da placa compósita de 22 camadas.

Figura 4.34 – Placa compósita com 25 camadas: (a) vista superior e (b) vista inferior da placa.

Figura 4.35 – Vista lateral da placa compósita com 25 camadas.

Figura 4.36 – Placa compósita com 28 camadas: (a) vista superior e (b) vista inferior da placa

Figura 4.37 – Placa compósita com 30 camadas: (a) vista superior e (b) vista inferior da placa

Figura 4.38 – Placa compósita com 40 camadas: (a) vista superior e (b) vista lateral da placa

Figura 4.39 – Placa compósita com 38 camadas: (a) vista superior e (b) vista lateral da placa

Figura 4.40 – Placa compósita com 34 camadas: (a) vista superior, (b) vista lateral e (c) vista inferior da placa.

Figura 4.41 - Posições de retiradas das amostras da placa compósita de 32 camadas submetidas aos procedimentos da norma ASTM 3171.

Figura 4.42 - Superfície apresentada pelo lado do vácuo das placas compósitas de 22 (a) e 25 (b) camadas; ambas superfícies apresentam-se lisas ao toque.

Figura 4.43 – Superfície apresentada pelo lado do vácuo da placa compósita de 28 camadas

Figura 4.44 – (a) Superfície apresentada pelo lado da injeção da placa compósita de 28 camadas e (b) detalhe dessa superfície apresentando regiões lisas e não – lisas ao toque.

Figura 4.45 - (a) Superfície apresentada pelo lado da injeção da placa compósita de 30 camadas e (b) detalhe dessa superfície apresentando regiões lisas e não – lisas ao toque.

Figura 4.46 - (a) Superfície apresentada pelo lado do vácuo da placa compósita de 30 camadas e (b) detalhe dessa superfície apresentando regiões lisas e não – lisas ao toque.

Figura 4.47 - Superfícies do lado da injeção (a) e do vácuo (b) da placa compósita de 32 camadas.

Figura 4.48 – Esquema da célula unitária do tecido da preforma.

Figura 4.49 – Eixos x e y de indicação da direção de medição da espessura da placa

Figura 4.50 – Placa compósita de 28 camadas processada por RTM com pressão de injeção de 1,5 bar.

Figura 4.51 – Gráfico da variação da quantidade de resina do compósito com o número de camadas.

Figura 4.52 – Compactação de um tecido plano pelo mecanismo tipo “Nest”.

Figura 4.53 – Dano após o ensaio de cisalhamento interlaminar dos corpos de prova 3, 4 e 5 da placa compósita de 28 camadas.

Figura 4.54 – Dano após o ensaio de cisalhamento interlaminar do corpo de prova 3 da placa compósita de 30 camadas (30_3).

Figura 4.55 – Dano após o ensaio de cisalhamento interlaminar do corpo de prova 1 da placa compósita de 30 camadas.

Figura 4.56 - Superfície lateral do corpo de prova para ensaio ILSS retirado do compósito de 28 camadas da posição 3.

Figura 4.57 - Superfície lateral dos corpos de prova da placa compósita de 28 camadas.

Figura 4.58 - Superfície lateral dos corpos de prova da placa compósita de 32 camadas.

Figura 4.59 - Superfície lateral dos corpos de prova da placa compósita de 30 camadas.

Figura 4.60 – Gráfico da variação da densidade dos corpos de prova ensaiados por ILSS.

Figura 4.61 - Gráfico da variação de quantidade de resina dos corpos de prova ensaiados por ILSS.

Figura 4.62 - Gráfico da variação da Tensão Cisalhamento Interlaminar dos corpos de prova ensaiados por ILSS.

Figura 4.63 - Ajuste exponencial do gráfico do ensaio ILSS da placa compósita de 28 camadas.

Figura 4.64 - Ajuste exponencial do gráfico do ensaio ILSS da placa compósita de 32 camadas.

Figura 4.65 – Lateral da placa compósita de 32 camadas.

Figura 4.66 – Lateral da placa compósita de 30 camadas

Figura 4.67 – Avanço da frente de escoamento sobre a preforma de 25 camadas.

Figura 4.68 - Gráfico R1 x R2 do compósito com 25 camadas

Figura 4.69 - Imagens da frente de escoamento avançando no interior do molde do experimento de 28 camadas.

Figura 4.70 - Gráfico de convergência K1 x K2 x tempo do processamento da placa compósita de 28 camadas.

Figura 4.71 – Avanço da frente de escoamento sobre a preforma de 30 camadas, obtido pelo sistema automático de cálculo da permeabilidade.

Figura 4.72 – Avanço da frente de escoamento sobre a preforma de 30 camadas.

Figura 4.73-Gráfico de convergência $K_1 \times K_2 \times$ tempo do processamento de 30 camadas.

Figura 4.74 – Avanço da frente de escoamento sobre a preforma de 32 camadas

Figura 4.75 - Gráfico de convergência K_1 e K_2 pelo tempo desse experimento.

Figura 4.76 - O gráfico Tempo x F_a do processamento de 32 camadas

Figura 4.77 – O gráfico $R_1 \times R_2$ do processamento da placa compósita de 32 camadas.

Figura 4.78 – Avanço da frente de escoamento sobre a preforma de 32 camadas.

Figura 4.79 - Gráfico de convergência $K_1 \times K_2 \times$ tempo desse experimento.

Figura 4.80 - Gráfico Tempo x F_a do processamento de 32 camadas.

Figura 4.81 – Gráfico $R_1 \times R_2$ do processamento de 32 camadas.

Figura 4.82 – Efeito do fluxo de ar gerado por um secador de cabelo sobre um conjunto de pequenas bolas de isopor no interior de um bequer de vidro

Figura 4.83 - Efeito do fluxo de ar gerado por um secador de cabelo sobre um conjunto de pequenas bolas de isopor no interior de um bequer de vidro, tampado por uma camada de fibra de vidro.

Figura 4.84 - Dano balístico na placa 1 : (a)vista frontal e (b) vista posterior.

Figura 4.85 - Dano balístico na placa 2: (a)vista frontal e (b) vista posterior

Figura 4.86 - Placa compósita de 32 camadas processada por RTM depois de impactada balisticamente: (a) frontal (face de impacto) e (b) vista de trás da placa.

Figura 4.87 - Dano balístico causado pelo projétil 7,62AP na parte frontal (a) e na face de saída do projétil (b) na placa compósita .

Figura 4.88 - Dano balístico causado pelo projétil 7,62FMJ na parte frontal (a) e na face de saída do projétil (b) na placa compósita .

Figura 4.89 - Dano balístico causado pelo projétil 7,62SP na parte frontal (a) e na face de saída do projétil (b) na placa compósita .

Figura 4.90 - Esquema do mecanismo de penetração de um projétil sem ponta em uma placa compósita.

Figura 4.91 - Esquema do mecanismo de penetração de um projétil com ponta em uma placa compósita.

Figura 4.92 – Corte transversal do dano balístico sofrido pelo compósito causado pelo projétil 7,62 AP através da sua espessura.

Figura 4.93–Curva tensão versus deformação típica obtida nos ensaios de tração realizados.

Figura 4.94 – Fratura do corpo de prova compósito durante o ensaio de tração.

Figura 4.95 – Corpo de prova após o ensaio de tração

Figura 4.96 – Curva tensão versus deformação típica obtida nos ensaios de compressão realizados.

Figura 4.97 - Corpo de prova após o ensaio de compressão.

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Materiais de Moldes para RTM

Tabela 2.2 – Análise Comparativa Entre Diversos Métodos de Aquecimento do Molde

Tabela 2.3 – Variação da Permeabilidade com a Vazão da Resina

Tabela 2.4 – Variação da Permeabilidade com a Porosidade

Tabela 2.5 - Influência da Variação do Número de Camadas de uma Preforma no Valor da Permeabilidade no Plano

Tabela 2.6 – Métodos de Medição de Permeabilidade no Plano

Tabela 2.7 - Valores dos Principais Mecanismo Absorção de Energia de Impacto Balístico em Laminados de Fibra de Vidro.

Tabela 3.1 - Processamento de placas de material compósito para teste de metodologias

Tabela 3.2 – Fatores e níveis do planejamento de experimentos a ser realizado

Tabela 3.3 - Experimentos realizados com variação do sistema de injeção e quantidade de resina

Tabela 3.4 – Experimentos realizados com preformas com menos de 32 camadas de fibras

Tabela 3.5 – Experimentos realizados com preformas com mais de 32 camadas de fibras

Tabela 3.6 - Densidade do fluido de teste

Tabela 3.7 - Viscosidade (η) do fluido de teste

Tabela 3.8 - Métodos para avaliação das propriedades mecânicas de materiais compósitos

Tabela 3.9 - Tipos de corpos de prova fabricados e testados para o ensaio de tração

Tabela 3.10 - Tipos de projéteis seccionados

Tabela 4.1 - Formulações analisadas para uso na preparação da matriz polimérica

Tabela 4.2 - Formulação da resina selecionada para uso no processamento por RTM

Tabela 4.3 - Dureza Barcol da placa compósita processada

Tabela 4.4 – Cálculo da densidade das placas compósitas

Tabela 4.5 - Frações volumétricas de fibra dos compósitos

Tabela 4.6 – Acabamento das placas processadas por RTM.

Tabela 4.7 - Média das espessuras das placas processadas na direção x e y em mm

Tabela 4.8 – Comparação entre as placas de 28 camadas processadas por Pressão positiva e vácuo e pressão atmosférica e vácuo respectivamente

Tabela 4.9 – Variação da quantidade de resina na preforma com o número de camadas.

Tabela 4.10 – Comparação do tempo de race-tracking e de preenchimento das placas de 28 camadas e 30 camadas.

Tabela 4.11 - Quantidade de resina por placa compósita

Tabela 4.12 - Permeabilidade no plano do processamento da placa de 32 camadas

Tabela 4.13 - Permeabilidade no plano do processamento da placa de 32 camadas com o sistema de injeção tipo Campânula

Tabela 4.14 – Valores de K1 e K2 dos processamentos das placas de 32 camadas.

Tabela 4.15 - Resultados do Ensaio Balístico nas placas de material compósito

Tabela 4.16 – Desvio do projétil que transpassou o alvo

Tabela 4.17 - Resultados do método de velocidade residual obtidos durante o ensaio balístico da placa compósita de 32 camadas

Tabela 4.18 – Resultados do ensaio de tração dos corpos de prova retirados da placa compósita de 30 camadas.

Tabela 4.19 – Resultados do ensaio de compressão

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Devido às suas elevadas propriedades mecânicas específicas, os materiais compósitos estão enfrentando demandas novas, onde capacidade de produção em massa a um custo mais acessível se tornou indispensável. A Moldagem por Transferência de Resina ou RTM (Resin Transfer Molding) constitui um promissor processo de fabricação de materiais compósitos. Os materiais compósitos foram tradicionalmente empregados para aplicações aeroespaciais, em que os laminados são de espessura fina. Nos últimos anos, estruturas de materiais compósitos espessas e complexas estão sendo produzidas para as mais diversas aplicações industriais como infraestrutura civil, deques de pontes, peças de ônibus, etc. Porém, fabricar placas espessas de compósitos é um desafio tecnológico diferente do processamento de placas finas, devido à baixa condutividade térmica dos compósitos e o alto calor de reação de muitas resinas termorígidas.

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento da capacitação em processamento por RTM de compósitos espessos reforçados por fibras para fins estruturais e balísticos. Para alcançar os objetivos propostos, quatro linhas de ação principais foram seguidas: projeto e fabricação do equipamento para processamento por RTM, estudo do escoamento da resina através da preforma no interior do molde, caracterização mecânica e microestrutural e ensaio balísticos dos materiais compósitos produzidos.

O início das atividades se deu na concepção, projeto e fabricação do equipamento de RTM. O equipamento desenvolvido é de concepção própria, uma série de dispositivos foram projetados, desenvolvidos e fabricados.

O desenvolvimento do processamento por RTM exige trabalhos de otimização de materiais e processos. Dessa forma, a segunda etapa deste trabalho constituiu na realização de estudos voltados para o entendimento do processo de infusão da resina no interior da preforma e suas conseqüências para a produção dos compósitos. Uma série de estudos foram realizados: estudo da permeabilidade (no plano e transversal) de diferentes preformas de fibra de vidro do tipo E, variação da pressão de injeção de resina e a pressão de vácuo na saída de ar, influência do sistema de injeção de resina, da variação dos pontos de injeção de resina e de vácuo, estudo da influência da fração volumétrica da preforma no seu processamento, no acabamento e na compactação dos compósitos produzidos, variação da quantidade de resina no interior do sistema de injeção.

A terceira etapa constituiu-se na avaliação do compósito produzido pelo equipamento de RTM. Nessa etapa foram feitas a caracterização mecânica e microestrutural dos mesmos. A caracterização mecânica foi realizada por meio de ensaios de tração (ASTM D3039), compressão e de resistência interlaminar ao cisalhamento (ASTM D2344/2344M). A caracterização microestrutural dos compósitos fabricados foi realizada através de análise de imagens digitais e microscopia estereoscópica. A determinação da fração volumétrica de fibras, resina e vazios foi realizada com base nos procedimentos da Norma ASTM D 3171.

A quarta etapa correspondeu aos ensaios balísticos dos compósitos fabricados por RTM. Para a realização desses ensaios, uma série de atividades foram realizadas: desenvolvimento da metodologia de velocidade residual, preparação e fabricação de um projétil sem ponta, desenvolvimento de uma metodologia para análise de dano por delaminação decorrente do ensaio balístico, além de análises do dano balístico com auxílio de fotos digitais e microscopia estereoscópica.

Porém ao longo do desenvolvimento desse trabalho de pesquisa foi observado que dos ensaios mecânicos selecionados para serem realizados, o ensaio de resistência ao cisalhamento interlaminar era o único capaz de correlacionar propriedades mecânicas com qualidade do processamento dos compósitos e que não seria possível por meio de ensaios balísticos em tempo hábil chegar a mesma correlação. Portanto os ensaios balísticos realizados nesse trabalho tem um caráter inicial e exploratório dentro de uma perspectiva de fornecer subsídios teóricos e experimentais para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Processamento de materiais compósitos

Um material compósito é formado pela união de dois ou mais materiais de naturezas diferentes separados por uma interface, resultando em um material de performance superior quando comparado aos seus componentes separadamente. O material resultante pode ser um arranjo de fibras contínuas ou não, de um material resistente que são impregnadas por uma matriz polimérica, Figura 2.1. A fibra é o elemento constituinte que confere ao material compósito suas características mecânicas: rigidez, resistência à ruptura, etc. As fibras podem ser de vidro, de aramida (kevlar), de carbono, de boro, etc. As matrizes têm como função principal transferir as sollicitações mecânicas às fibras e protegê-las do ambiente externo. As matrizes podem ser resinas poliéster, epóxi, éster vinílico entre outras.

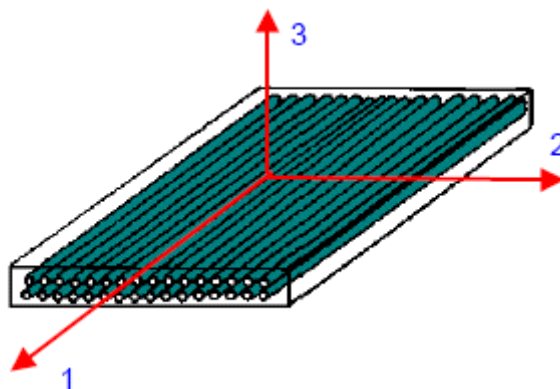


Figura 2.1 – Desenho de um compósito de arranjo de fibras contínuas no interior de uma matriz polimérica.

O interesse nos materiais compósitos está ligado a dois importantes fatores: performance e economia. O fator performance está ligado à procura por um melhor desempenho de componentes estruturais, sobretudo no que diz respeito às características mecânicas específicas. O desempenho dos compósitos como, por exemplo, elevada resistência e rigidez específicas, baixo coeficiente de expansão térmica, bom comportamento em fadiga, resistência a temperaturas extremas, à corrosão e ao desgaste, já foram testadas e aprovadas para diversas aplicações, sendo inclusive muitas vezes superior ao de estruturas metálicas convencionais. O custo de fabricação de algumas peças em material compósito pode ser também sensivelmente menor se comparado com os materiais metálicos, devido à sua melhor

flexibilidade de concepção e fabrico, integração de componentes, custos mais baixos de ciclo de vida do produto.

A aplicação dos materiais compósitos surgiu inicialmente na área aeronáutica devido à necessidade de diminuição de peso, preservando as propriedades mecânicas dos componentes estruturais. Uma grande variedade de peças em materiais compósitos pode ser encontrada nos aviões em substituição aos materiais metálicos, como por exemplo fuselagem, portas de trem de aterrissagem, portas internas, entre outras. Atualmente as aplicações de materiais compósitos vão desde um simples tabuleiro a aplicações biomédicas, passando pelas aplicações em mercados avançados como militar e espacial. Também substituem de forma crescente, os materiais tradicionais em aplicações de engenharia civil como a construção - reforço e reabilitação de pontes, reforço de pilares -, nos transportes e no setor de energia (pás e torres eólicas). Finalmente, espera-se que contribuam para resolver problemas específicos em novos e importantes nichos de mercado como próteses, novos equipamentos de lazer, nanocompósitos. Provavelmente o uso de materiais inteligentes será um dos nichos onde os materiais compósitos irão imperar nesse milênio.

O potencial de utilização dos materiais compósitos é enorme. No entanto, para que ele seja uma realidade, os projetistas, pesquisadores, os transformadores e outros possíveis usuários devem conhecer esses materiais para aproveitar as suas vantagens e ultrapassar as suas possíveis desvantagens.

Os materiais compósitos constituem um desafio a nossa imaginação para que surjam novas aplicações cada vez mais exigentes, quer de substituição quer de novos produtos. Porém, para que esse desafio seja bem sucedido, a imaginação tem de ser acompanhada de Pesquisa e Desenvolvimento e da componente econômico-financeira que permite validar opções e criar riqueza para a sociedade.

Apreciado pelas suas elevadas propriedades mecânicas específicas, os materiais compósitos estão enfrentando demandas novas, onde capacidade de produção em massa a um custo mais acessível se tornou indispensável. As técnicas de produção tradicionais tais como laminação manual (hand-lay-up), Figura 2.2(a), e enrolamento filamentar, Figura 2.2(b) podem ser consideradas de baixa produção ou apenas apropriada a geometrias relativamente simples, respectivamente.

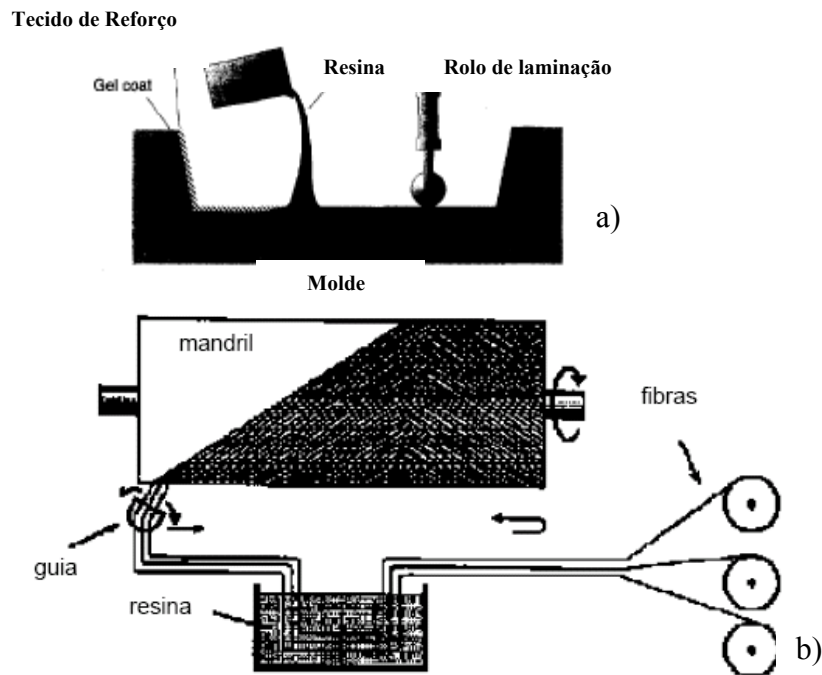


Figura 2.2 – (a) Esquema do processo de laminação manual. (b) Esquema de uma máquina de enrolamento filamental.

Outro método empregado para produção de materiais compósitos de alta performance é o processamento em autoclave. Porém, ele é considerado de elevado custo de produção, devido à necessidade de uso de gás inerte durante o processamento, armazenamento dos pre-pregs sob refrigeração, etc. Nos últimos anos os compósitos despertaram o interesse de diversos setores industriais, tais como a indústria automobilística, fazendo como que o foco de desenvolvimento dos compósitos mudasse, durante os anos 80 e 90, de “design for minimal Weight” (projeto para mínimo peso) para “design for cost” (projeto para mínimo custo). A Figura 2.3 apresenta os vetores que comandam as necessidades de três setores industriais que usam materiais compósitos, Bourban *et al.* [2001].

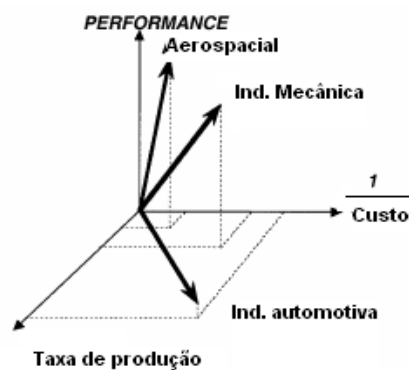


Figura 2.3 - Vetores que comandam três importantes ramos industriais.

Uma das formas de processamento de materiais compósitos que está começando a atingir requisitos de produção de indústria automobilística é o chamado Processamento por Moldagem de Líquido (Liquid Molding Process), que corresponde a uma família de processos que inclui: SRIM(Structural Reaction Injection Molding), RRIM(Reinforced Reaction Injection Molding), HSRTM(High Speed Resin Transfer Molding), VARI(Vacuum-Assisted Resin Injection), TERTM(Thermal Expansion Resin Transfer Molding), SCRIMP(Seemann's Composites Resin Infusion Molding Process), RTM(Resin Transfer Molding) entre outros. Todos são baseados no mesmo princípio: uma preforma seca de fibra é colocada em um molde, a resina é injetada sob alguma combinação de pressão e/ou vácuo e, depois da cura, a peça pode ser retirada. A Figura 2.4 apresenta o desenho de uma blindagem fabricada por LCM, mas especificamente o processamento por SCRIMP, Benjamin e Beckwith [1999].



Figura 2.4 – Desenho de uma blindagem fabricada por LCM, mas especificamente o processamento por SCRIMP.

Essa família de processos pode ter diversos graus de automatização. Os ciclos rápidos de cura são típicos. Um dos processos mais promissores da família “Liquid Composite Molding” (LCM) é a moldagem por transferência de resina ou RTM (“Resin Transfer Molding”). A Figura 2.5 mostra um leme vertical do novo avião de combate da Força Aérea americana fabricado pelo método RTM.

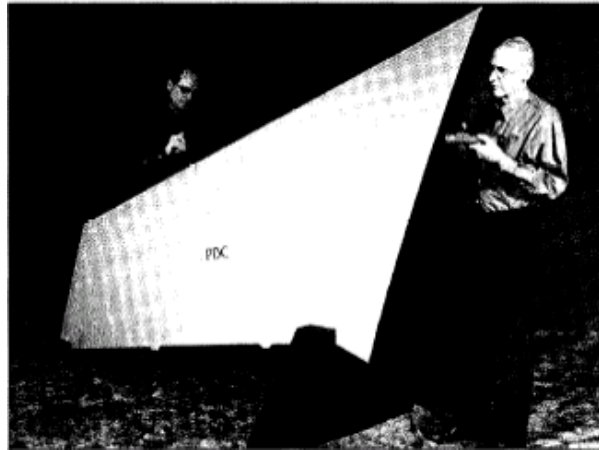


Figura 2.5 – Leme vertical do novo avião de combate da Força Aérea americana, o JSF (Joint Strike Fighter) fabricada por RTM.

O processo de RTM foi originalmente desenvolvido por volta de 1940, com pouco sucesso comercial. Esse desinteresse pelo processo durou até por volta de 1960 a 1970, quando então foi impulsionado pela indústria de teclado de computadores, funil para fertilizantes, etc. Nos últimos anos, o desenvolvimento do RTM foi impulsionado pela indústria aeroespacial, automotiva, esportes e biomédica. Atualmente, o processo por RTM está sendo considerado por todos os setores da indústria de compósitos para a fabricação de materiais compósitos com performance adequado e custos acessíveis, Potter [1999].

Segundo a Associação de Materiais Plásticos Compostos (Asplar), no Brasil dos mais de 1.600 fabricantes de peças de laminados de fibra de vidro em atividade, 74% empregam processos artesanais, como o spray up (56%) e hand lay up (18%) e apenas 6% usam o RTM, Figura 2.6.

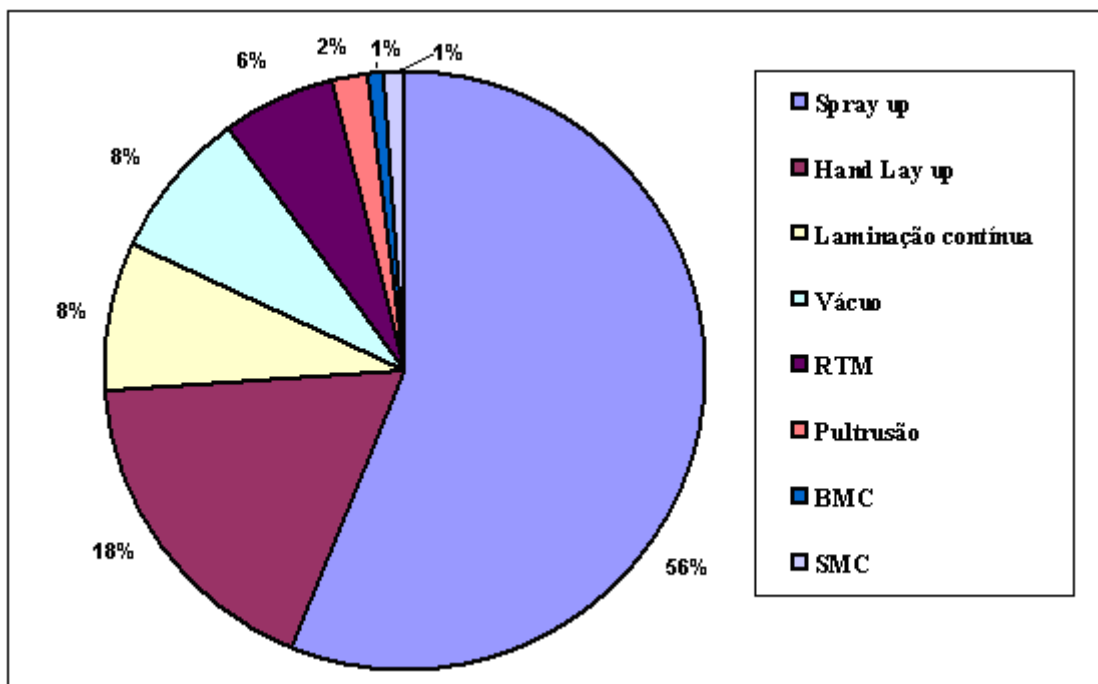


Figura 2.6– Distribuição do mercado brasileiro segundo o tipo de processo de fabricação dos materiais compósitos.

No processamento típico de RTM, a preforma (reforços no formato da peça) é inicialmente preparada e posicionada no molde. Esse é então fechado e a preforma é comprimida para obter-se a fração volumétrica desejada de fibras. Em seguida, a resina é injetada no molde e as fibras são impregnadas, ver Figura 2.7. Finalmente, depois da cura da resina, o molde é aberto e a peça retirada. Se necessário, a peça pode sofrer um tratamento de pós-cura para atingir o máximo de suas propriedades. O molde de RTM deve possuir pelo menos uma entrada, para injeção da resina, e uma saída, para permitir, durante a injeção da resina, a saída do ar existente no interior do molde. Em peças maiores, é comum, porém, a presença de várias entradas e saídas.

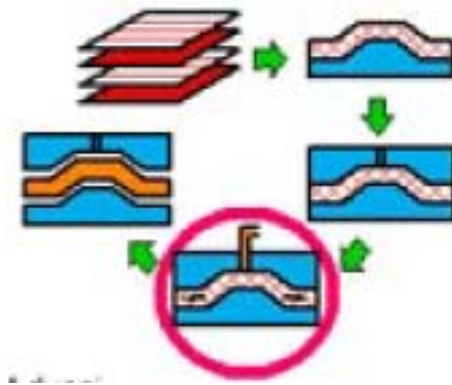


Figura 2.7 – Esquema básico de processamento por RTM: injeção de resina em uma preforma (arranjo de fibras organizadas no formato da peça) no interior de um molde rígido.

Existem diversas variações desse tipo de processamento; uma delas é o processamento por RTM assistido por vácuo, ou VARTM (“vacuum assisted” RTM). Nesse caso, uma bomba de vácuo é conectada à saída, gerando um maior gradiente de pressão e retirando ar da preforma.

Um dos maiores benefícios do processamento por RTM é a separação entre o processo de moldagem e o tipo de arquitetura dos tecidos da peça. Dessa forma, os tecidos podem ser colocados na direção e na ordem desejadas na preforma e depois são colocados dentro do molde para a injeção de resina e cura. Essas duas fases distintas, arranjo da arquitetura dos tecidos da preforma e injeção/cura de resina, permitem ao projetista desenvolver materiais para aplicações específicas, ou seja, para satisfazer condições locais e específicas de carregamento (“materials-by-design”). Um exemplo interessante que bem retrata essa situação é o projeto de laminados compósitos com propriedades previamente estabelecidas. Esse tipo de abordagem poderá ser muito útil para indústrias como a de processamento de materiais, petrolífera (integridade estrutural) e de manufaturados de alto valor agregado (automobilística e, principalmente, a aeronáutica).

Outros benefícios do processamento por RTM:

- o processo permite o uso das mais diversas arquiteturas, tipos de fibra e de tecidos para a produção de partes complexas.
- Habilidade de moldar peças de grande tamanho
- Integração de partes
- Uso de vários tipos de resina

- Baixa pressão de injeção (0 a 1,7 MPa)
- Diversos tipos de acabamentos superficiais da peça moldada
- Boa tolerância dimensional
- Baixo custo dos equipamentos para produção (molde e equipamento de injeção)
- Possibilidade de produzir peças com “inserts”
- Curtos ciclos de tempo de produção
- Possibilidade de automação do processo
- Baixa emissão de solventes (menor impacto ambiental)
- Possibilidade de produzir compósito com alta fração volumétrica de fibra

Todos esses atributos fazem do processamento por RTM uma das mais promissoras técnicas de fabricação de materiais compósitos.

Processamento de compósitos espessos por RTM

A Figura 2.8 apresenta o desenho de uma blindagem integral com os seus diversos componentes: cobertura de proteção com 4 mm de espessura, placas cerâmicas para proteção balística, camada de borracha para capacidade multitiro, laminado de fibra de vidro espesso para proteção balística e resistência estrutural, camada de proteção contra interferência eletromagnética e camada de proteção contra fogo.

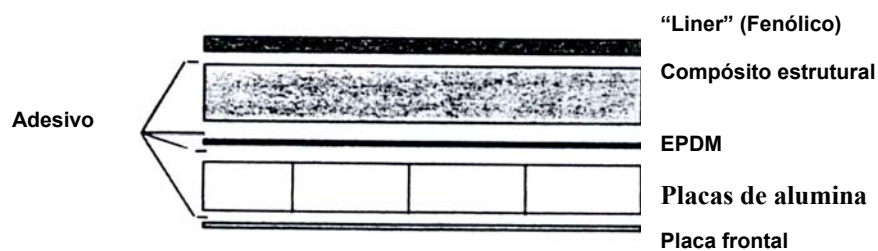


Figura 2.8 – Um exemplo de uma blindagem integral multifuncional.

Na fabricação de blindagem integral multifuncional, um laminado espesso de fibra de vidro pode ser usado como placa de apoio das cerâmicas, tendo como função proteção balística e estrutural. Os materiais compósitos foram tradicionalmente empregados para aplicações aeroespaciais, em que os laminados são de espessura fina. Porém, fabricar placas espessas de compósitos é um desafio tecnológico diferente do processamento de placas finas. Enquanto que no processamento de placas finas é razoável admitir que não há gradiente de

temperatura ao longo da espessura e que o calor gerado pela reação é dissipado rapidamente, no processamento de placa espessa essas asserções não podem ser admitidas.

Quando a espessura do compósito aumenta, passa a existir uma resistência à condução de calor ao longo dessa direção. Como um material compósito é anisotrópico, a distribuição de temperatura não é uniforme. A baixa condutividade térmica do compósito pode fazer com que a superfície do mesmo cure mais rápido do que o interior causando o aprisionamento de gases voláteis e um alto gradiente de temperatura. Esse último pode ser responsável por pontos de fratura do material sob tensão. Um problema mais sério devido à maior espessura do compósito é o pico térmico. A reação exotérmica durante a cura gera uma grande quantidade de calor em um curto período de tempo. Essa liberação de calor promove o aumento da velocidade de cura e altas temperaturas, que pode ser causar a degradação da matriz, dependendo do valor, Flores [2000].

O gradiente de temperatura e de grau de cura ao longo da espessura induzem a um gradiente de propriedades mecânicas que pode contribuir para a deformação do material (“process-induced strain gradients”). Outra consequência do aumento da espessura do compósito é o surgimento de tensões residuais devido à diferença de contração entre a superfície e o interior do compósito durante a cura, diminuindo o desempenho da peça.

Portanto, o processo de cura de compósitos espessos é um desafio tecnológico devido à baixa condutividade térmica e o alto calor de reação de muitas resinas termorígidas. Essa combinação de alta resistência térmica e grande fonte de calor no compósito durante a cura pode gerar: gradiente térmico, gradiente do grau de cura, gradiente de propriedades mecânicas, geração de tensões residuais e degradação da matriz polimérica. Conseqüentemente, o processamento por RTM de materiais compósitos espessos nas mais diversas aplicações de engenharia é um desafio tecnológico que deve ser enfrentado e vencido, Michaud [1998].

2.2 Processamento por RTM

Em uma primeira impressão, o processamento por RTM pode parecer um simples processo de duas etapas: preparo da preforma, seguido de injeção e cura da resina. Nada menos do que falso, já que ao se fabricar uma peça de material compósito por RTM, não se pode apenas se preocupar com o desempenho da mesma mas também a sua possibilidade de ser processada. Ou seja, não adianta apenas definir a arquitetura dos tecidos para suportar determinada carga, mas também simultaneamente definir qual a permeabilidade desse tecido para que a peça possa ser fabricada por RTM. Essa mesma análise deve ser feita na escolha da resina; a mesma deve ser selecionada tanto pela suas propriedades mecânicas como também pela sua viscosidade, que deve ser adequada para realização do processamento. Performance e processabilidade devem caminhar juntas no projeto de peças por RTM; a otimização desses dois parâmetros é necessária para se obter produtos de alta qualidade e econômicos. Portanto, deve-se conhecer os diversos elementos que compõem o processamento por RTM que são: resina, tecido de reforço, molde e equipamentos de processamento.

Resina

Em geral, as resinas selecionadas para RTM seguem os seguintes requisitos :

- a resina deve ter baixa viscosidade entre 50 a 500 cp;
- Tempo de gel adequado – não tão longo que diminua a produtividade e nem tão curto que impeça o completo molhamento das fibras;
- Longa capacidade de armazenamento;
- Boa compatibilidade e adesão com as fibras;
- Baixa volatilidade;
- Resistência a umidade e a solventes.

Portanto, os principais fatores para seleção de um sistema de resina são : viscosidade, interação fibra/resina (molhabilidade e adesão) e cinética de cura. A viscosidade e a cinética de cura são importantes no processamento por RTM porque ambas controlam o tempo de enchimento e conseqüentemente a taxa de produção. A interação fibra/resina está relacionada com a performance do compósito, Benjamin e Beckwith [1999].

Há numerosos tipos de resina avaliados para o processo por RTM como bismalimidas, epóxis, fenólicas, poliésteres e ésteres vinílicas. A escolha de qual resina usar é baseada, basicamente no custo, performance e capacidade de processamento.

Tecido de reforço

As preformas são constituídas basicamente por fibras e servem como esqueleto da peça a ser processada. As preformas para processos tipo RTM podem ser formadas por diferentes tipos de fibras e diferentes arquiteturas. A maioria dos compósitos é reforçada por tecidos. Os principais tipos de tecidos são: os tecidos básicos, as sarjas e os cetins. A diferença entre os tipos de tecidos está no entrelaçamento dos fios.

Nos tecidos básicos, um fio do urdume passa sobre um fio da trama e depois sob o fio seguinte da trama, ver Figura 2.9. São os mais estáveis, ou seja, mais resistentes à distorção, porém têm dificuldade de tomar formas complexas. Nas sarjas, um ou mais fios consecutivos do urdume passam sobre pelo menos dois fios consecutivos da trama. As sarjas são relativamente estáveis, têm mais facilidade de tomar formas complexas e são mais eficientes estruturalmente que os tecidos básicos. Nos cetins, um fio de urdume passa sobre três ou mais fios da trama e depois sob um fio da trama. O cetim é o tipo de tecido mais eficiente e com maior capacidade de tomar formas complexas.

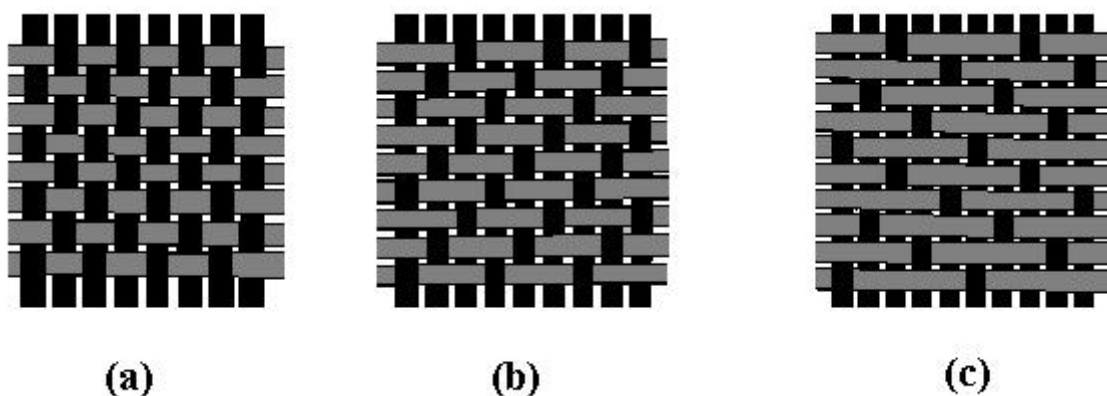


Figura 2.9 - Tipos de tecidos: (a) tecido básico; (b) sarja e (c) cetim.

A quantidade e o tipo de reforço são importantes, pois os mesmos comandam a resistência e rigidez do compósito. Em geral, as fibras selecionadas para RTM seguem os seguintes requisitos:

- Resistência mecânica e rigidez adequada
- Interação fibra/matriz – boa molhabilidade e adesão
- Permeabilidade adequada
- Conformabilidade
- Durabilidade

Uma variedade de fibras pode ser usada, tais como: fibras de vidro, de carbono, Kevlar e até em compósitos híbridos que utilizem mais de um tipo de fibra para aplicações específicas.

Molde

No desenho de uma peça fabricada por RTM, não é suficiente apenas especificar a resina, o tipo de reforço e a arquitetura das fibras. É necessário também o desenho do molde, Figura 2.10, já que, em última análise, é o mesmo que determina a produtividade e a qualidade da peça. Só um molde bem projetado pode garantir um máximo de produtividade e só um molde com um bom acabamento pode garantir uma peça bem acabada.



Figura 2.10 – Molde aberto usado no processamento por RTM.

A escolha do material a ser usado para fabricação do molde está relacionado diretamente com o número de peças que serão produzidas. Outros fatores devem ser considerados para a escolha do material: máxima pressão no interior do molde, temperatura do molde, acabamento superficial desejado, tamanho e geometria das partes.

Uma variedade de materiais pode ser usado, como aço, alumínio, níquel, resina epoxy e laminados epóxi/poliéster. A Tabela 2.1 apresenta uma genérica visão de alguns dos materiais usados na confecção do molde, Steenkamer [1994].

Tabela 2.1 – Materiais de Moldes para RTM

Materiais Usados	Custo	Condutividade Térmica	Durabilidade	Qualidade Superficial
Aço	10	5	10	10
Níquel	9	5	8	10
Alumínio	8	10	6	7
Laminado Polimérico	5	4	5	7

Obs.: Os números representam um pontuação : 10 consiste um valor alto e 1 consiste em um valor baixo.

Com o material definido do molde, podemos agora especificar outros possíveis componentes do mesmo, tais como uso ou não de sistema de aquecimento no molde, dimensão, número e posicionamento do sistema de entrada de resina e saída de ar ou vácuo e vedação do molde.

A Figura 2.11 apresenta esquematicamente a distribuição de um sistema de aquecimento por óleo, posicionado em uma das placas do molde RTM. A temperatura do molde é selecionada, baseando-se no conhecimento da reologia da resina, o que inclui: a relação entre o tempo, temperatura e viscosidade, temperatura de transição vítrea e calor de reação. Com essas informações, pode-se otimizar o processo de fabricação por RTM escolhendo a melhor temperatura que diminuiria a viscosidade durante o processamento, garantindo menores ciclos de produção, porém sem acelerar o processo de cura a ponto da resina começar a curar antes de preencher o molde e molhar todas as fibras.

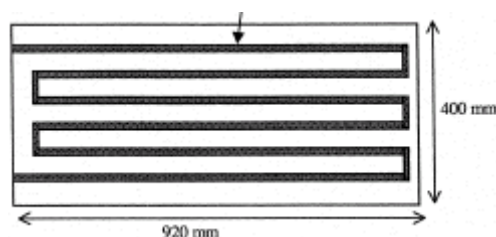


Figura 2.11- Sistema de aquecimento posicionado em uma das placas do molde.

Um dos problemas tecnológicos que surge ao se tentar controlar a temperatura do molde é a dificuldade de garantir uma temperatura constante na superfície do molde. A escolha do método de aquecimento depende da geometria da peça a ser produzida, da temperatura de cura da resina e da taxa desejada de aquecimento. Uma variedade de métodos está disponível, como : aquecimento por óleo, água e cartuchos elétricos; ver comparação na Tabela 2.2, Steenkamer [1994].

Tabela 2.2 – Análise Comparativa Entre Diversos Métodos de Aquecimento do Molde

Método de aquecimento	Temperatura de trabalho	Capacidade de aquecer rapidamente	Capacidade de esfriar o molde	Outros comentários
Óleo	< 260°C	Boa	Boa	Método de aquecimento mais flexível
Água	<100°C	Regular	Regular	Uso só de baixas temperaturas
Cartucho elétrico	>260°C	Excelente	Nenhuma	Não pode ser usado em geometrias complexas

Alguns cuidados devem ser tomados quando se usam moldes com controle de temperatura. Um deles é que a preforma deve ser colocada dentro do molde e deve-se esperar para que a mesma entre em equilíbrio térmico com o molde; evita-se assim que a preforma funcione como um sumidouro de calor. Há ainda a possibilidade de aquecer, a temperaturas diferentes, a metade de cima e a metade de baixo do molde, promovendo assim a cura da resina de uma das metades do molde para outra.

O termo entrada de resina se refere à maneira como a resina é introduzida no molde. Em geral, a resina introduzida pode ser feita por dois tipos de sistema: um ponto de injeção ou por uma entrada em forma de filme. A escolha do tipo, dimensões, posicionamento e quantidade de pontos de entrada depende da geometria da peça, da permeabilidade da

preforma e do tipo usado de resina. A Figura 2.12 apresenta a variação da frente de fluxo com a mudança da posição do ponto de entrada da resina.

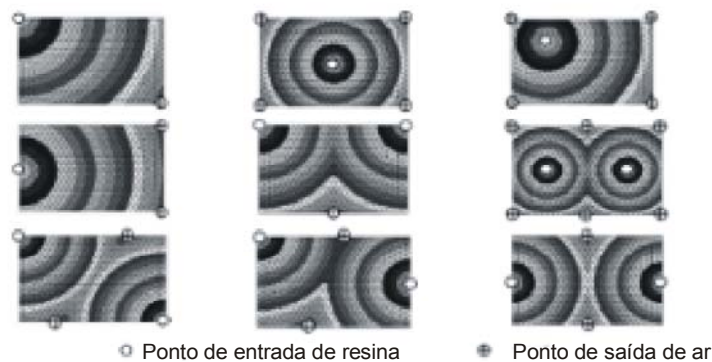


Figura 2.12 - Diversas simulações de frente de fluxo com variações dos pontos de entrada

O termo “saídas de ar” se refere à maneira como ar é removido da ferramenta. Com o avanço da resina, o ar é empurrado para fora do molde. Portanto, as saídas de ar devem ser colocadas de forma a não permitir o aprisionamento de ar. Em geral, são colocadas em pontos que são opostos ao fluxo da resina. São nos pontos de saída de ar que podem ser acopladas as linhas de vácuo, Liu *et al.* [1996].

Outra importante escolha é onde deve ficar a linha de partição do molde, ou seja, onde as metades do molde devem se separar. Em geral, a linha de partição depende da geometria da peça e da posição da entrada da resina e das saídas de ar. Mas o mais simples é o molde com apenas duas metades, conseqüentemente uma linha de partição.

Devido à baixa viscosidade da resina usada no processamento por RTM, é necessária a vedação na linha de partida do molde, no ponto de injeção e nos pontos de saída de ar. Vedação por meio de anéis de vedação (“O-ring”) de Viton ou silicone são os mais comuns, como pode ser visto na Figura 2.13. Cuidado deve ser tomado no momento de dimensionar os canais para o perfeito aproveitamento dos anéis de vedação, Steenkamer [1994].

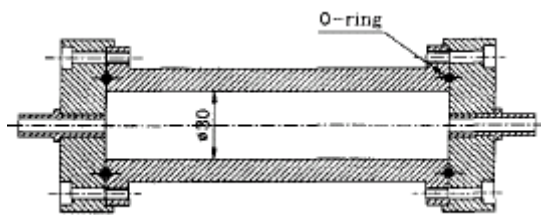


Figura 2.13 - Corte transversal em um molde por RTM.

Equipamentos de processamento

Uma das vantagens do processamento por RTM é o relativo baixo custo dos equipamentos envolvidos no processo. Os principais equipamentos são:

- aparatos de fechamento
- equipamento de injeção de resina
- sistema de vácuo: bomba de vácuo.

Aparatos de fechamento

Uma vez que a preforma está no interior do molde algum tipo de sistema de fechamento deve ser adotado, já que durante a injeção da resina a tendência do molde é abrir. Os critérios usados para selecionar o sistema de fechamento incluem:

- Área disponível para o sistema no molde
- Pressão de injeção
- Tempo do ciclo de produção
- Número de peças a serem feitas
- Uniformidade de espessura

Para moldes de pequeno tamanho, o sistema de fechamento periférico é usado, como os grampos tipo C. Um dos problemas de se usar sistemas de fechamento periférico é a possibilidade de deflexão da tampa do molde, o que pode causar não-uniformidade na espessura do compósito e alteração na fração volumétrica de fibra, podendo haver regiões ricas em resina.

Para moldes de grande tamanho, o grau de sofisticação aumenta, podendo ser usado desde sistemas hidráulicos a sistemas onde a parte superior do molde é aberta ou fechada pela

lateral como se fosse a abertura de um livro. Esses sistemas podem, se bem projetados, garantir uniformidade da força de fechamento.

Equipamento de injeção de resina

Um sistema de injeção para processamento por RTM deve cumprir as seguintes atividades básicas:

- Sistema de controle da quantidade a ser injetada
- Mistura da resina e de seus componentes
- Injeção da resina no molde

O sistema de injeção ideal inclui :

- Sistema de controle de vazão
- Ajuste da vazão
- Controle de temperatura em todos os elementos (tanque de alimentação, linhas, bombas, etc)
- Eficiente sistema de circulação e mistura da resina
- Facilidade de limpeza
- Possibilidade de serem usados vários tipos de sistemas de resina.
- Fácil manutenção.
- Degaseificação

Os sistemas de injeção de resina no processamento por RTM vão de uma simples campânula, com resina pressurizada com ar, ver Figura 2.14, a sistemas de injeção multicomponente com controle computadorizado de vazão.

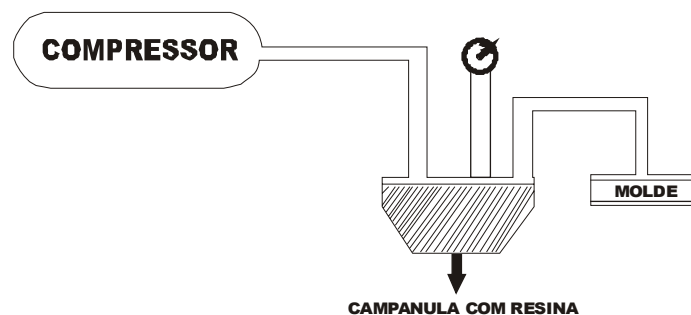


Figura 2.14 – Esquema de um sistema de injeção de resina tipo campânula.

O sistema de campânula é simples, de fácil manutenção, barato e se, bem utilizado, pode ser bastante eficiente. Não é o sistema recomendado para sistemas de resina com tempo de cura muito curto. Normalmente, utiliza-se ar ou nitrogênio para se pressurizar a resina; pode-se adaptar na campânula um sistema de controle de temperatura. Recomenda-se a mistura e degaseificação da resina antes de colocá-la na campânula.

Os sistemas de injeção multicomponente possuem dois ou mais tanques com válvulas de injeção cada, ver Figura 2.15. As válvulas injetam na quantidade e no tempo certo nos misturadores estáticos. Os misturadores estáticos homogenizam a mistura e injetam no molde. Quando o molde está completo, o sistema de injeção é desligado e são injetados solvente e ar no misturador estático para limpar o sistema, deixando pronto para fabricação de outra peça.

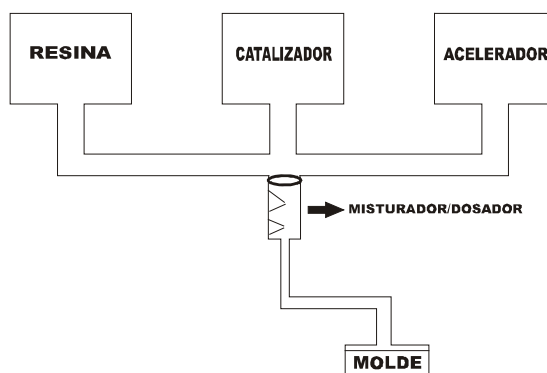


Figura 2.15 - Sistemas de injeção multicomponente de resina para processamento por RTM.

Os sistemas de injeção multicomponente têm como vantagens: praticamente qualquer tipo de resina pode ser processada, uso de altas pressões de injeção. Porém são equipamentos complexos, fabricados sob encomenda e caros.

A seleção entre o sistema de injeção de resina ideal e o necessário para um determinado processamento por RTM passa por um atenciosa análise do custo-benefício que o processamento RTM deve atingir para satisfazer requisitos de produção ou pesquisa.

2.3 Permeabilidade e sua importância no processo por RTM

Todas as operações do processamento por RTM podem ser divididas em duas categorias independentes, ver Figura 2.16: operações de molde aberto (“open mold operation”) como limpeza do molde, aplicação de desmoldante, carregamento do molde com a preforma, e operações com o molde fechado (“closed mold operation”), que consiste na injeção e processo de cura da resina. Considera-se a fase de injeção independente da fase de cura já que geralmente a segunda fase só começa com o término da primeira, Shojaei *et al.* [2003].

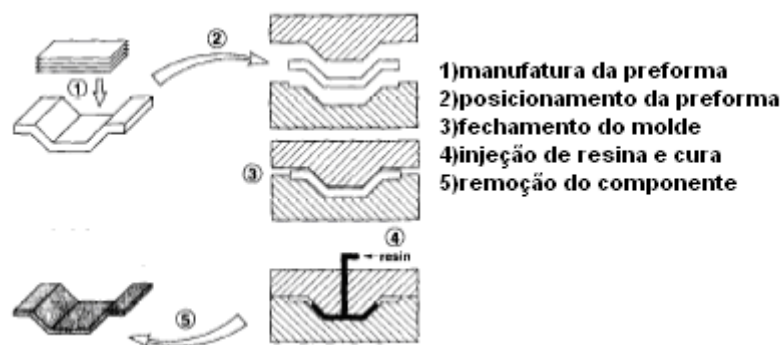


Figura 2.16 - Ciclo de processamento por RTM : preparação da preforma, posicionamento da preforma no interior do molde, fechamento e depois injeção da resina e desmoldagem.

Embora as operações de molde aberto possam ocupar um significativo tempo, as operações de molde fechado são realmente as que têm o potencial de controlar a taxa de produção, custo e performance da peça produzida.

Entretanto, para conseguir o máximo de propriedades mecânicas dos compósitos produzidos por RTM, cada fibra individual deve estar completamente “molhada” pela resina líquida e a quantidade de vazios deve ser a menor possível. A molhabilidade das fibras depende das propriedades dos materiais, como energia superficial do sistema resina/fibra e seu tempo de contato. Em adição ao problema da molhabilidade, macrovazios gerados pela coalescência da frente de fluxo podem ocorrer; portanto, a dinâmica do fluido no interior do molde é muito importante para desempenho do processamento por RTM. Estudos relacionados à reologia da resina, permeabilidade dos tecidos, influência da geometria do molde, interação da resina/fibra, posicionamento dos pontos de injeção de resina, dos pontos

de saídas de ar, etc são essenciais para otimização do processo e para completa exploração do potencial desse processamento de materiais compósitos, Shojaei *et al.* [2003].

Os principais fatores que influenciam as atividades com molde fechado são:

- Parâmetros de Processo - pressão de injeção, pressão de vácuo, tipo de sistema de injeção, etc.
- Resina
- Permeabilidade

Se a resina e os parâmetros de processo forem mantidos constantes, a permeabilidade surge como a principal variável no processamento por RTM.

Permeabilidade

Permeabilidade é a resistência ao escoamento de um fluido através de um meio sólido poroso, ver Figura 2.17. Ela é uma propriedade do material.



Figura 2.17 - Desenho esquemático de um fluido escoando por um meio sólido.

A permeabilidade dos materiais é provavelmente uma das mais importantes propriedades para o processamento por RTM, já que da mesma depende o tempo de enchimento do molde e conseqüentemente a taxa de produção. As propriedades mecânicas também estão relacionadas com a permeabilidade já que a impregnação e molhamento das fibras pela resina são necessárias para que se obtenha o máximo de desempenho do compósito. Várias são as variáveis que controlam a permeabilidade e são importantes para o processamento por RTM:

- Arquitetura dos tecidos da preforma
- Defeitos nas fibras (fissuras, etc)
- Parâmetros de injeção – vazão, pressão de injeção
- Compressibilidade das fibras
- Porosidade – micro e macro porosidades

- Capilaridade – interação da resina com a fibra
- Fração volumétrica das fibras no compósito (V_f)
- Fluido de teste usado no estudo de permeabilidade
- Número de camadas de tecido
- Tratamento superficial (*sizing*) das fibras
- Deflexão do molde
- Molhabilidade
- Tipo de fibra

Segue a discussão dessas variáveis que controlam a permeabilidade.

Arquitetura dos tecidos da preforma

A permeabilidade é bastante influenciada pela variação na arquitetura dos tecidos, ver Figura 2.18. A geometria da arquitetura das fibras inclui: ângulo das fibras, espessura das fibras, distância entre as fibras, forma e padrão de entrelaçamento como pode ser observado na Figura 2.19, Pillai [2002].

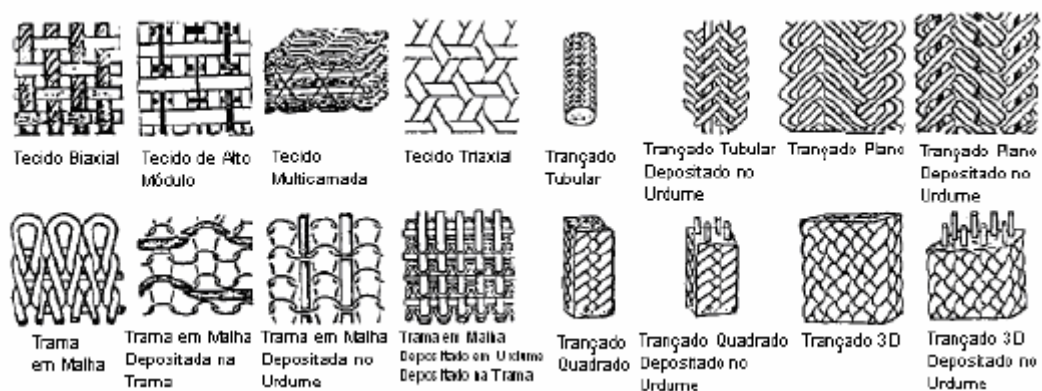


Figura 2.18 - Diversas arquiteturas de tecido de reforço, Sousa [2004].

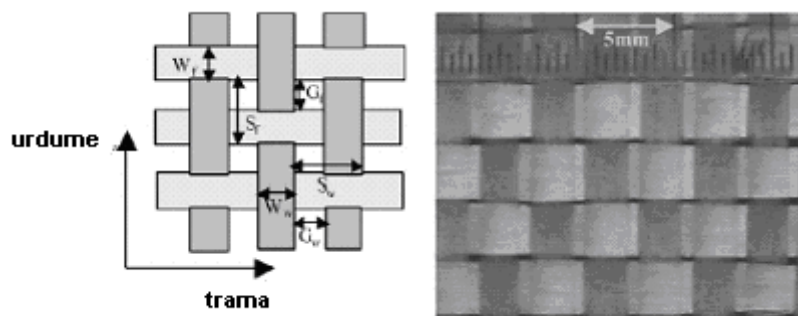


Figura 2.19- Geometria da arquitetura do tecido de fibra de vidro Syncoglas R420, Hoes *et al.* [2002].

Cada uma dessas medidas presentes no tecido da Figura 2.19 (W_f , S_f , G_f , W_w , S_w , G_w) constitui uma distribuição estatística. A variação desses valores influencia diretamente o valor da porosidade dos tecidos e conseqüentemente o valor da permeabilidade, Hoes *et al.* [2002]. Endruweit e Ermanni [2004] mostraram em seu trabalho a influência da variação da arquitetura dos tecidos de reforço sobre a forma da frente de escoamento da resina quando a mesma é injetada sobre os tecidos, ver Figura 2.20.

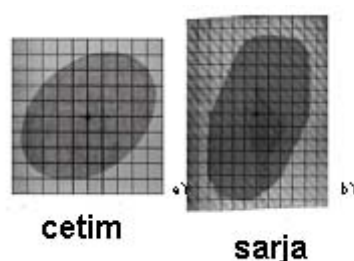


Figura 2.20 - (a) Tecido de cetim e (b) sarja; ambos apresentam marcante diferença na forma da frente de escoamento.

Na Figura 2.20, o tecido de cetim apresenta uma frente de escoamento de resina quase que praticamente elíptica já que o mesmo é fabricado com fibras finas garantindo uma relativa maior homogeneidade da porosidade e conseqüentemente uma melhor distribuição de permeabilidade. O tecido de sarja não apresenta uma frente de escoamento elíptica já que o mesmo é fabricado com fibras grossas gerando uma porosidade de menor homogeneidade, conseqüentemente uma não-homogênea distribuição de permeabilidade.

Defeitos na fibra

A presença de defeitos como pequenas trincas ou fissuras nas fibras em geral, aumenta localmente o valor da permeabilidade, como pode ser visto na Figura 2.21, Parnas *et al.* [1994].

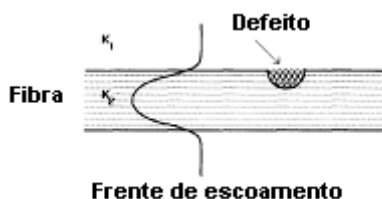


Figura 2.21 - Defeito em uma fibra, Parnas *et al.* [1994].

Os defeitos nas fibras constituem um importante fator na geração de vazios em placas de material compósito processadas por LCM (Liquid Composite Molding), já que as mesmas são pontos de aprisionamento de ar. Para geração de um vazio a partir de um defeito, há a necessidade do defeito possuir um tamanho crítico. Parnas *et al.* [1994] afirmam que a profundidade do defeito é importante para determinação desse tamanho crítico.

Vazão da resina

Lekakou *et al.* [1996] mostraram, em seu trabalho, a influência da vazão no cálculo da permeabilidade. Como pode ser observado na Tabela 2.3, para diferentes valores de número de camadas de tecido da preforma e vazão de resina, foram obtidos diferentes valores para a permeabilidade no plano.

Tabela 2.3 – Variação da Permeabilidade com a Vazão da Resina

Número de camadas	Vazão (m³/s)	Permeabilidade no plano(m²)
5	6,76 x 10 ⁻⁷	7,39x 10 ⁻¹⁰
	13,52 x 10 ⁻⁷	1,20x10 ⁻⁹
	27,04 x 10 ⁻⁷	1,40x10 ⁻⁹
15	6,76 x 10 ⁻⁷	4,77x10 ⁻¹⁰
	13,52 x 10 ⁻⁷	5,25x10 ⁻¹⁰
	27,04 x 10 ⁻⁷	1,59 x 10 ⁻⁹

Compressibilidade das fibras

Com certeza, um dos fatores que mais influencia a permeabilidade é a compressibilidade dos tecidos já que a mesma pode alterar a porosidade da preforma e conseqüentemente o valor da permeabilidade. Quando comprimimos um tecido, de uma forma geral, há o fechamento dos poros (macroporos), conseqüentemente uma diminuição da permeabilidade, ver Figura 2.22.

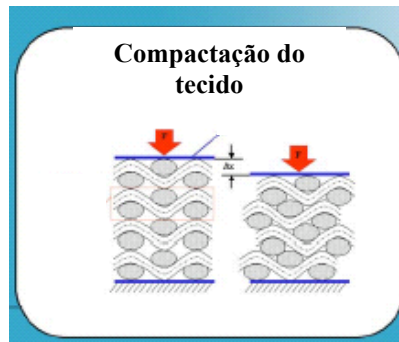


Figura 2.22 – Compactação de um tecido semelhante a que ocorre no processamento por RTM.

Cada tipo de tecido possui diferente compressibilidade; tecidos unidirecionais ou bidirecionais geralmente possuem menor compressibilidade do que tecidos aleatórios, como mostra a Figura 2.23, Han *et al.* [2000].

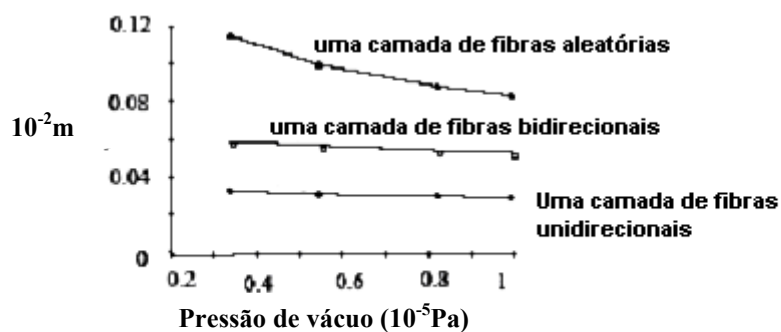


Figura 2.23 - Tipos de tecido com diferentes compressibilidades.

Porosidade

A estrutura das preformas usadas em RTM é de natureza complexa em relação ao fluxo do fluido (resina) através da mesma. Em geral, os tecidos de reforço são constituídos de entrelaçamento de diversas fibras e cada fibra é constituída de centenas de microfibras, ver Figura 2.24. Como resultado, os tecidos de reforço usados em LCM apresentam dois tipos de região de escoamento: uma região de baixa resistência ao fluido, que constitui os espaços entre as fibras, e uma região de alta resistência, que constitui o espaço entre as microfibras dentro de cada fibra, Pillai [2002].

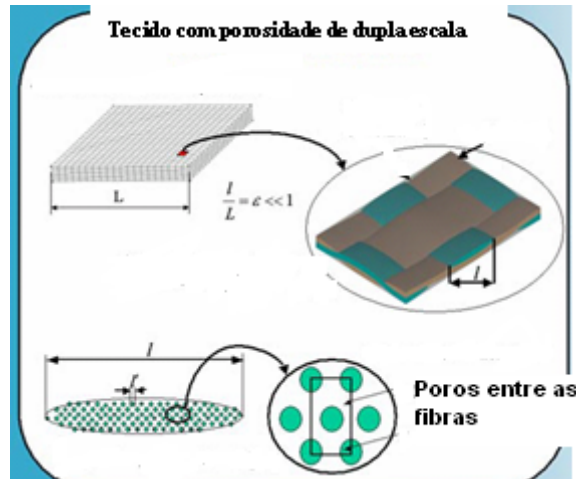


Figura 2.24 - Esquema apresentando a natureza complexa da fibra do tecido de reforço : fibra e microfibras.

No primeiro caso, chamamos os espaços entre as fibras de macroporos, distância L da Figura 2.25, e o fluxo de macrofluxo, obedecendo à equação de Darcy. No segundo caso, chamamos o espaço dentro de cada fibra de microporo, distância l na Figura 2.25, e o fluxo de microfluxo. Para esse caso, a pressão capilar é importante e chamamos o tecido de reforço de meio poroso de dupla escala (“dual-scale porous media”), Hoes *et al.* [2002].

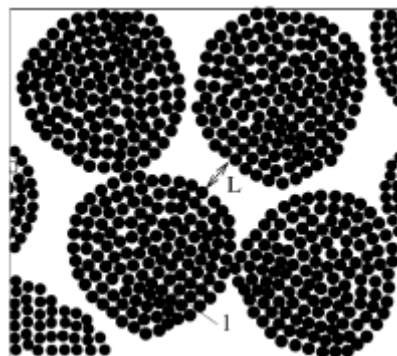


Figura 2.25 – Esquema de macroporos e microporos em fibras de um tecido de reforço, Pillai [2002].

Próximo à frente de fluxo da resina, a presença desses microporos causa um atraso na impregnação das fibras pela resina. O fluxo da resina dentro de cada fibra (microporo) é, em grande medida, comandado pela pressão capilar, Pillai [2002].

Para compósitos com altos valores de fração volumétrica de fibra (como compósitos de uso aeronáutico), espera-se que os macroporos sejam pequenos; portanto, a pressão capilar se torna importante na infiltração da resina no interior dos tecidos, Amico e Lekakou [2000].

A porosidade também pode ser responsável por formação de vazios dentro do compósito, já que essa diferença de velocidade entre o microfluxo e macrofluxo pode resultar no aprisionamento de ar, ver Figura 2.26, Parnas. *et al.* [1994].

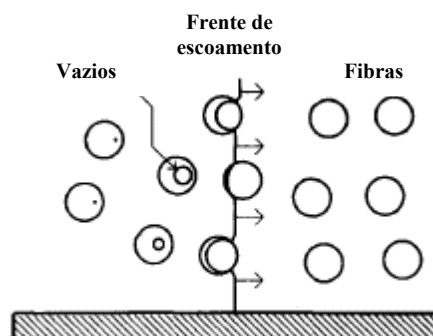


Figura 2.26 - Aprisionamento de ar que pode ser responsável pela formação de vazios em compósitos fabricados por RTM, Parnas *et al.* [1994].

Lekakou *et al.* [1996] apresentam valores para mostrar a influência da porosidade no valor da permeabilidade. Variando a espessura do molde, pode-se alterar a porosidade de uma preforma. Para um mesmo número de camadas e diferentes valores de espessura do molde, altera-se a porosidade e conseqüentemente a permeabilidade, podendo-se obter valores com uma ordem de grandeza de diferença, como pode ser observado na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Variação da Permeabilidade com a Porosidade

Número de camadas	Espessura do molde (mm)	Porosidade	Permeabilidade K (m ²)
5	3	0,626	1,8x 10 ⁻⁹
	2,25	0,5	7,92 x 10 ⁻¹⁰
15	6,10	0,45	3,92x 10 ⁻¹⁰
	6	0,44	2,46 x 10 ⁻¹⁰

Fluido de teste usado no estudo de permeabilidade

Luo *et al.* [2001] mediram a permeabilidade (K) pelo método do fluxo radial para tecidos e malhas, fazendo uso de dois tipos de fluido: óleo de silicone e glicose de milho diluída. Ambas as medidas de K não apresentaram diferenças significativas, mesmo o óleo de silicone tendo maior molhabilidade do que a glicose de milho diluída. Os autores sugeriram que a baixa pressão capilar medida durante a pesquisa para ambos os fluidos foi a responsável por esse resultado. Essa pesquisa sugere que a baixa pressão capilar do fluido de teste (0,05 bar) quando comparada à pressão de injeção (1 e 1,5 bar) do fluido é a resposta da insignificante influência do tipo do fluido de teste em experimentos de medição de permeabilidade. Já Steenkamer [1994] afirma que a permeabilidade é função do fluido de teste utilizado.

Baseado na literatura consultada, ainda não se tem certeza sobre a real influência do tipo de fluido no valor da permeabilidade. Neste trabalho, serão adotados os resultados de Luo *et al.* [2001].

Número de camadas de tecido

Uma preforma de RTM pode ser considerada um sistema homogêneo ou heterogêneo multicamadas. Um sistema homogêneo multicamadas consiste de duas ou mais camadas de mesmo tecido e com a mesma orientação. Já um sistema heterogêneo multicamadas consiste de duas ou mais camadas de tecido com diferentes permeabilidade e orientação.

Em um sistema homogêneo multicamada, dependendo da compressibilidade do tecido e da estrutura interlaminar que é criada no processo de empilhamento, poderá ou não haver alteração no valor da permeabilidade. Se o tecido é compressível mas possui mínima ondulação superficial, então os poros interlaminares são aproximadamente do mesmo tamanho dos poros da primeira camada e conseqüentemente a estrutura dos poros é repetida de camada para camada, e nesse caso, a permeabilidade é independente do número de camadas, ver tecido tipo KD811 como exemplo na Tabela 2.5. Ou seja, dependendo da compressibilidade e da ondulação superficial das camadas, pode-se aumentar, ver exemplo do tecido 3-275/33 na Tabela 2.5, ou diminuir o valor da permeabilidade.

Tabela 2.5 - Influência da Variação do Número de Camadas de uma Preforma no Valor da Permeabilidade no Plano

Tecido	Número de camadas	K_1^* (Darcy)**	K_2^* (Darcy)**
KD811(tecido Kevlar unidirecionais)	1	45,7	10,4
	2	48,2	10,4
	3	46,9	10,7
	4	46,6	10,6
3-275/33(tecido)	1	307	307
	2	417	417
	3	454	454
	4	481	481

* K_1 = permeabilidade do semieixo maior da frente elíptica de escoamento.

K_2 = permeabilidade do semieixo menor da frente elíptica de escoamento.

**1 Darcy = $9.869233 \times 10^{-13} \text{ m}^2$

Em um sistema heterogêneo multicamada, a permeabilidade aumenta ou diminui de acordo com o tipo e ordem de empilhamento dos tecidos usados na preforma. Os sistemas multiheterogêneos foram criados para otimizar a permeabilidade e o grau de anisotropia de acordo com as necessidades do processo e do produto, Adams *et al.* [1991].

Rigidez do Molde

A rigidez do molde influencia o cálculo da permeabilidade já que moldes pouco rígidos podem sofrer deflexão devido à pressão hidráulica gerada pela injeção da resina no interior do molde. Caso o molde sofra deflexão, altera-se o volume interno do molde e diminui-se o valor da fração volumétrica de fibra e conseqüentemente aumenta-se o valor da permeabilidade, ver Figura 2.27.

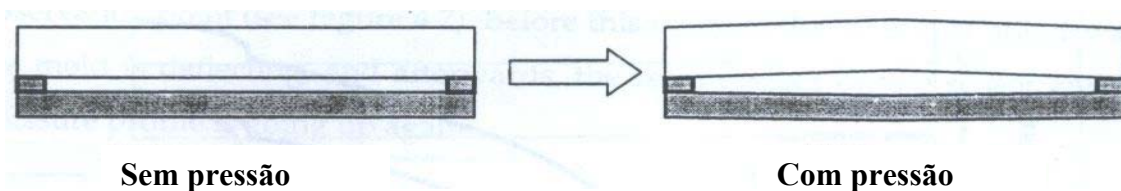


Figura 2.27 – Deflexão de um molde de RTM devido à pressão hidráulica de injeção.

Tempo

Parnas e Salem fizeram experimentos de medição de permeabilidade no plano, tanto no método paralelo como no radial com tecidos e concluíram que para ambos os métodos a permeabilidade variou com o tempo no mesmo experimento, Lekakou *et al.* [1996].

Tipo de Fibra

Um mesmo tipo de fibra fabricada por diferentes empresas pode ter variação no valor da permeabilidade. Alguns dos motivos dessa variação podem ser: o tratamento de sizing, densidade superficial, dimensões da fibra, topologia da fibra, balanceamento e densidade.

Como pode ser observado, a permeabilidade depende de muitas variáveis e, segundo Hoes *et al.* [2002], não é um valor absoluto mas sim possui uma distribuição estatística, como pode ser visto na Figura 2.28.

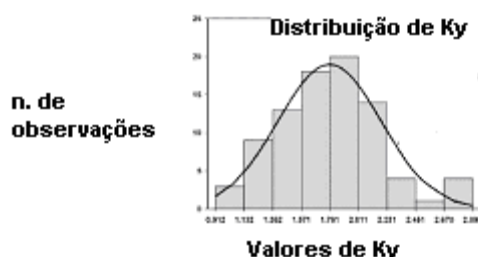


Figura 2.28 – Distribuição estatística da permeabilidade K_y de um tecido básico de fibra de vidro Syncoglas R420, Hoes *et al.* [2002].

A distribuição estatística da permeabilidade mostra que ela não é uma propriedade do material que pode ser caracterizada por um único valor. Indica também que as medidas de permeabilidade são muito sensíveis a todos os tipos de influências. Isso não é surpresa já que a permeabilidade é dominada principalmente pela geometria do meio poroso (tamanho, forma e orientação dos poros). Essa geometria é muito regular na escala macroscópica, mas quando examinado mais de perto, pode-se variar consideravelmente ponto a ponto em um nível microscópico.

Essa variação pode ser uma consequência do processo de manufatura, a manipulação do material, a preparação da amostra, a taxa da compressão ao fechar o molde, etc.

Se a permeabilidade for considerada não um único valor mas sim uma distribuição de valores como foi afirmado por Hoes *et al.* [2002], surgem novas implicações para o projeto de moldes. Um método de projeto estatístico pode assim ser executado para fornecer um projeto de molde o mais insensível a variações da permeabilidade. Ao projetar um molde e executar simulações da frente de escoamento, um software poderia agora fazer exame de amostras da distribuição e atribuir valores possíveis diferentes e aleatórias posições de injeção e saída de ar do molde.

Seria agora possível fazer projeto de moldes robustos senão considerarmos a permeabilidade como um único valor mas sim um conjunto estatístico de valores. Quando diversas simulações forem executadas, cada vez com um diferente valor de permeabilidade possível e atribuindo a esses valores as melhores posições de injeção e vácuo no molde, o projetista ganhará a necessária informação das possíveis áreas de problema no molde. Pode-se então mudar o molde de maneira a evitar os problemas. Segundo Hoes *et al.* [2002], o projeto do molde seria executado com sucesso, não importando como a permeabilidade seja distribuída na preforma que está no interior do molde.

2.3.1 Modelo Físico-Matemático da Permeabilidade

O modelo físico-matemático geralmente aplicado para o estudo da fluidodinâmica da resina no interior do molde é o proposto pelo cientista francês Henry Darcy em 1856 para escoamento em meios porosos, ver Figura 2.29, e tem a seguinte forma:

$$Q = \frac{-KA\Delta P}{\mu\Delta L} \quad (2.1)$$

em que

Q = vazão do fluido

K = permeabilidade

μ = viscosidade da resina

A = área

ΔP = Variação de Pressão

ΔL = distância percorrida pelo fluido

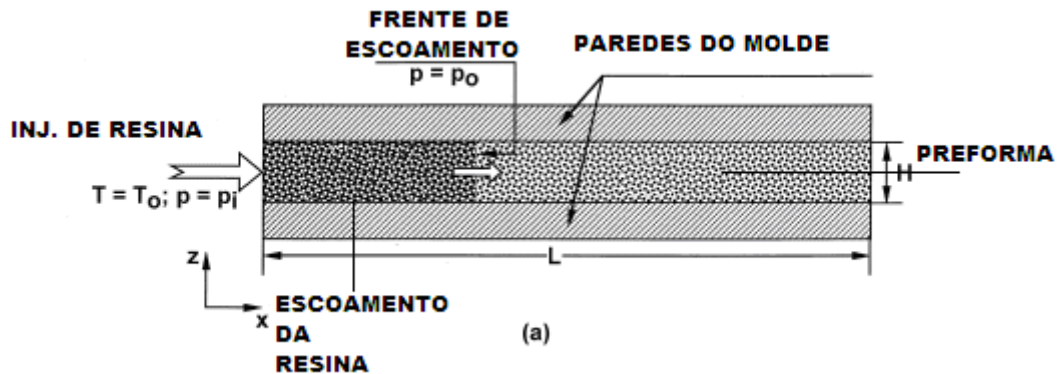


Figura 2.29 – Desenho básico que apresenta um meio poroso (preforma) sendo impregnado por uma resina.

A equação (2.1) é conhecida como a equação de Darcy que é bastante presente na literatura de fluidodinâmica de meios porosos. A modelagem de um escoamento em meio poroso pela equação de Darcy deve respeitar as seguintes hipóteses :

- O fluido é newtoniano, incompressível e não cura até o fim do enchimento do molde;
- A viscosidade é constante;
- A pressão é constante ou a vazão é constante;
- O número de Reynolds é baixo ($Re < 0,1$);
- O microporo é ignorado;
- As forças gravitacionais e capilares são ignoradas;
- O material poroso (preforma) é indeformável e não se move;
- Não existem bolhas de ar.

Para uso da Equação de Darcy no processo de RTM, fazem-se necessárias mais algumas hipóteses. A primeira delas é que a permeabilidade (K) é um tensor e a segunda é substituir na equação de Darcy o termo referente à vazão (Q) pela velocidade do fluido (u, v, w dependendo da direção x, y e z respectivamente), tendo-se então :

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = -\frac{1}{\mu} \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial x} \\ \frac{\partial P}{\partial y} \\ \frac{\partial P}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

em que

u, v, w = componentes x, y e z da velocidade respectivamente.

A outra hipótese é que o tensor permeabilidade pode ser convertido em uma matriz diagonal, em que os únicos valores diferentes de zero são os da diagonal principal (K_{xx}, K_{yy}, K_{zz}):

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = -\frac{1}{\mu} \begin{bmatrix} K_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & K_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & K_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{\partial p}{\partial y} \\ \frac{\partial p}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Agora, dividimos os compósitos fabricados por RTM em dois grandes grupos com relação ao número de componentes de K . Eles são : Placa Fina e Placa Espessa.

Para os compósitos considerados como placa fina, o termo K_{zz} da matriz (3) é zero, ou seja, o escoamento de fluido na direção Z é desprezado e a equação (3) se torna :

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = -\frac{1}{\mu} \begin{bmatrix} K_{xx} & 0 \\ 0 & K_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{\partial p}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Portanto, só as permeabilidades nas direções x e y são consideradas relevantes em compósitos tipo placa fina, Figura 2.30(a). A Figura 2.30(b) constitui a vista superior da placa da Figura 2.30(a); como pode ser observado, as únicas componentes importantes do tensor K são as componentes K_x e K_y , que se encontram no mesmo plano.

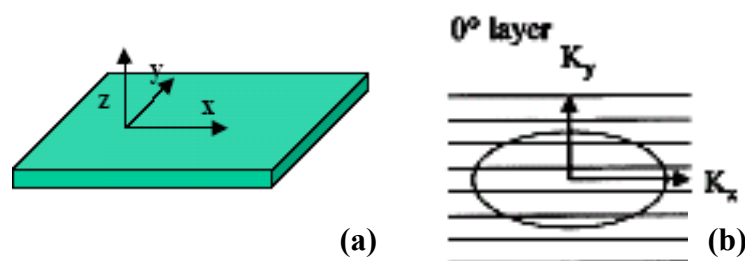


Figura 2.30 - (a) Eixos x, y e z posicionados sobre uma placa fina e (b) vista superior da placa fina apresentando as únicas componentes do tensor K que são K_x e K_y .

No caso de compósitos considerados de placa espessa, todas as três componentes, K_x , K_y e K_z são importantes. A Figura 2.31 apresenta uma frente semi-elíptica de resina no interior de um molde de placa espessa. Na Figura 2.31, a frente de escoamento não é mais uma elipse no plano e sim um elipsóide tridimensional em expansão onde o fluxo na direção da espessura (direção Z) não pode ser desprezado.

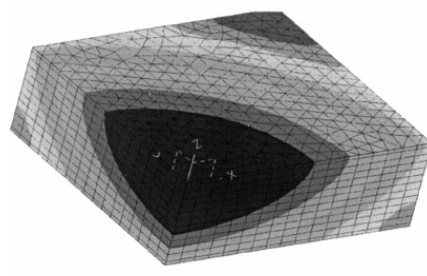


Figura 2.31 - Fluxo semi-elíptico de resina no interior de um molde de placa espessa.

Cálculo do tempo de saturação da preforma

A Figura 2.32 apresenta a variação da pressão com o avanço da frente de escoamento da resina no interior do compósito.

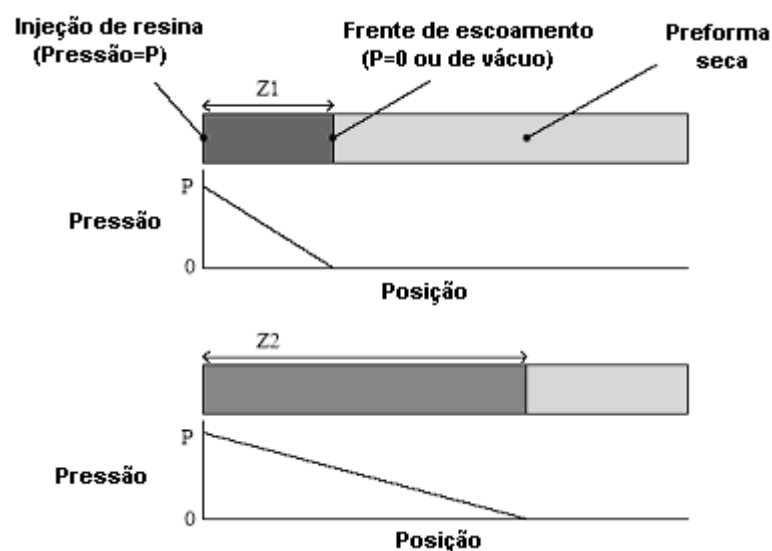


Figura 2.32 - Apresenta a variação de pressão com o avanço da frente de escoamento da resina no interior do compósito.

Isso ocorre porque enquanto o escoamento da resina no interior da preforma através de dz (espessura ou comprimento) está aumentando constantemente, a variação de pressão (ΔP) é constante. Assim a razão dP/dz está diminuindo constantemente e a resina escoar cada vez mais lentamente no interior da preforma, Figura 2.32.

A equação (2.5) é a Lei de Darcy:

$$v = \frac{K_z}{\mu e} \frac{(\Delta P_{app} + P_{cap})}{dz} \quad (2.5)$$

v = velocidade de escoamento

K_z = Permeabilidade na direção z

ΔP_{app} = Variação da pressão no fluido

P_{cap} = Pressão capilar

μ = viscosidade

e = comprimento ou espessura

Fazendo manipulações com a lei de Darcy, obtém-se:

$$v = \frac{dz}{dt} \quad (2.6)$$

$$\frac{dz}{dt} = \frac{K_f}{\mu e} \frac{(\Delta P + P_{cap})}{z} \quad (2.7)$$

$$z \, dz = \frac{K_f}{\mu e} (\Delta P + P_{cap}) \, dt \quad (2.8)$$

$$\frac{z^2}{2} = \frac{K_f}{\mu e} (\Delta P + P_{cap}) \, t \quad (2.9)$$

Baseado nessas manipulações, há uma importante expressão para o tempo de preenchimento de uma preforma durante o processo de fabricação por RTM :

$$t = \frac{z^2 \mu e}{(\Delta P + P_{cap}) K_f 2} \quad (2.10)$$

Esse é um resultado muito importante já que mostra como o tempo de enchimento de uma preforma é função do quadrado da espessura ou do comprimento da mesma. Essa equação pode ser útil em determinar o limite de fabricação de uma peça pelo processo RTM e também mostra a dificuldade de fabricação de compósitos espessos, Mastbergen [2004].

Conclui-se então que:

- A razão dP/dz diminui constantemente e a resina escoar cada vez mais lentamente no interior da preforma.
- O tempo de enchimento de uma preforma é função do quadrado da espessura ou do comprimento da mesma, o que torna difícil a fabricação de placas espessas.

Observação: Um outro modelo matemático proposto para medir a permeabilidade é o modelo de Kozeny- Carman. O modelo de Kozeny-Carman relaciona a permeabilidade com a fração volumétrica de fibra da preforma, sendo a equação dada por :

$$k_{II} = \frac{r_f^2}{4K_{II}} \frac{(1 - V_f)^3}{V_f^2} \quad (2.11)$$

sendo

k_{II} = permeabilidade na direção paralela da fibra da preforma

K_{II} = constante de Kozeny que depende da preforma e deve ser previamente determinada

r_f = raio da fibra

V_f = fração volumétrica da fibra

O modelo de Kozeny- Carman, dentro da literatura consultada, foi muito pouco aplicado para o cálculo da permeabilidade e não será estudado neste trabalho.

Outros modelos físico–matemáticos usados no processamento por RTM

O modelo apresentado por Darcy é básico para análise da infusão de resina no interior do molde; outros autores têm proposto melhorias no modelo para uma melhor compreensão da infusão de resina no processo por RTM. Por exemplo, em peças espessas de material compósito há a possibilidade da resina iniciar o processo de cura durante o processo de injeção o que faria com que houvesse uma geração de calor no interior do molde e uma mudança na viscosidade da resina. Essa mudança de viscosidade não é levada em conta no modelo de Darcy. Essas melhorias passam por novas hipóteses referentes a:

- Uso do balanço de energia para uma melhor compreensão dos processos térmicos envolvidos no processamento por RTM. Termos referentes à troca de calor entre a resina e a fibra (convecção), resina e o molde, processo de geração de calor durante o processo de cura da resina devem ser utilizados. O termo de geração de calor depende de um modelo representativo da cinética de cura da resina.

- Uma equação que acople a variação de viscosidade da resina (presente na equação de Darcy) com o processo de cura da mesma.

- Termo referente à pressão capilar, que pode ser importante em compósitos com alta fração volumétrica de fibra.

Baseando-se na literatura consultada, os artigos publicados foram divididos em dois grupos, segundo a modelagem analítica da infusão da resina no processo por RTM :

- Modelos analíticos que consideram o escoamento da resina.
- Modelos analíticos que não consideram o escoamento da resina.

Segue a apresentação de alguns desses modelos segundo a divisão proposta acima.

Modelos analíticos que consideram o escoamento da resina

Os modelos analíticos que consideram o escoamento da resina podem ser subdivididos em : modelos de infusão de resina que aplicam só a equação de Darcy e modelos de infusão de resina que aplicam modificações da equação de Darcy.

Modelos de infusão de resina que aplicam só a equação de Darcy

Ding *et al.* [2003] e Cairns *et al.* [1999] aplicaram modelo de Darcy e balanço de massa para a compreensão do processo de infusão de resina no processamento por RTM. Segue em linhas gerais o modelo apresentado no trabalho de Ding. *et al.* [2003].

Considera-se o modelo de Darcy para infusão de resina em placa fina e a equação de conservação de massa, ver equação (2.12) e (2.13) :

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = -\frac{1}{\mu} \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} \\ K_{yx} & K_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \partial p / \partial x \\ \partial p / \partial y \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.13)$$

Então as componentes nas direções principais da velocidade do fluido são :

$$u = -\frac{K}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2.14)$$

$$v = -\frac{\alpha K}{\mu} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (2.15)$$

sendo $K = K_{xx}$ e $\alpha = K_{yy}/K_{xx}$. Tem-se ainda que :

$$v = \alpha \frac{\partial p / \partial y}{\partial p / \partial x} u \quad (2.16)$$

Considerando-se o fluido como incompressível e fazendo as substituições na equação de conservação de massa tem-se:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial \left(\alpha \frac{\partial p / \partial y}{\partial p / \partial x} u \right)}{\partial y} = 0 \quad (2.17)$$

A equação acima constitui a equação de trabalho proposta por Ding *et al.* [2003] a ser resolvida pelo método das diferenças finitas para se obter a permeabilidade no plano. Esse método apresentou alguns erros porém de uma maneira geral pode-se afirmar que é possível estimar o valor da permeabilidade ao longo do escoamento.

Modelos de infusão de resina que aplicam modificações da equação de Darcy

Alguns autores aplicam a equação de Darcy mas fazem uma correção para incorporar um termo referente à capilaridade, como a correção proposta por Pillai [2002] apresentada a seguir.

Equação de Darcy

$$V = \frac{-K \nabla P}{\mu} \quad (2.18)$$

Equação da continuidade para o fluido:

$$\nabla V = 0 \quad (2.19)$$

Considerando-se o efeito da capilaridade na equação da continuidade, fica-se com :

$$\nabla V = -S \quad (2.20)$$

em que

S = termo referente à capilaridade = taxa de absorção de líquido por unidade de volume por um meio poroso de dupla escala (“dual-scale porous media”).

A equação 2.20 é a equação de Darcy corrigida com relação à capilaridade segundo Pillai [2002].

Dentro da literatura consultada, o modelo mais completo que acopla a equação de Darcy ao balanço de energia (parte térmica) foi o proposto por Lim e Lee [2000]. Segue a descrição do modelo, em que o índice r está relacionado às propriedades da resina e f às propriedades da fibra :

$$\phi\rho_r C p_r \frac{\delta T_r}{\delta t} + \rho_r C p_r V \nabla T_r = \phi \nabla (K_r \nabla T_r) + \phi h v (T_f - T_r) + \phi \Phi + \phi G \quad (2.21)$$

Essa equação acopla Darcy com o balanço térmico; segue a descrição geral dos termos da equação :

O primeiro termo $\phi\rho_r C p_r \frac{\delta T_r}{\delta t}$ se refere à variação da temperatura no tempo.

O segundo termo $\rho_r C p_r V \nabla T_r$ está relacionado com Darcy, sendo:

$$V = \frac{-K}{\mu} \nabla P \quad (2.22)$$

O terceiro termo $\phi \nabla (K_r \nabla T_r)$ expressa a condução de calor referente à resina

O quarto termo $\phi h v (T_f - T_r)$ representa a convecção referente à troca de calor entre a fibra e a resina.

O quinto termo $\phi \Phi$ é a taxa de dissipação viscosa que vem do calor gerado pelo fluxo da resina através dos poros.

O sexto termo ϕG se refere à geração de calor proveniente da reação de cura da resina, dado por :

$$G = \Delta H (K_1 + K_2 \alpha^m) (1 - \alpha)^n \quad (2.23)$$

Modelos analíticos que não consideram o escoamento da resina

Michaud *et al.* [1998], Rice e Lee e Pantelelis [2003] estudaram o processo de transferência de calor unidimensional e cura da resina no processamento por RTM. Esses pesquisadores aplicaram ao longo da espessura a 2ª lei de Fourier, acrescida do termo de geração de energia. Os modelos propostos por esses autores são basicamente semelhantes, a diferença mais significativa se encontra em como cada um contabiliza o termo de geração de calor (último termo à direita da equação), como pode ser observado a seguir :

$$\rho_c c_{pc} \frac{\partial T}{\partial t} = k_c \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + (1 - V_f) \rho_r \Delta H \frac{d\alpha}{dt} \quad (2.24)$$

sendo

ρ_c = densidade do compósito

c_{pc} = calor específico do compósito

T = temperatura

t = tempo

K_c = Condutividade térmica do compósito

z = espessura

V_f = fração volumétrica de fibra

ρ_r = densidade da resina

ΔH = calor de reação

$d\alpha/dt$ = taxa de cura

O calor gerado no processo de infusão de resina está relacionado ao processo de cura da mesma. Tanto Pantelelis [2003] como Michaud *et al.* [1998] e Rice e Lee aplicam diferentes modelos para a cinética de cura da resina.

Pantelelis [2003] aplica o modelo autocatalítico proposto por Kamal – Sourour :

$$\frac{d\alpha}{dt} = (K_1 + K_2 \alpha^m)(1 - \alpha)^n \quad (2.25)$$

em que

$d\alpha/dt$ = taxa de cura

α = grau de cura

m e n são ordens da reação

K_1 e K_2 são as constantes da taxa de reação, que são geralmente calculadas pela equação tipo Arrhenius : $K_i = A_i \cdot e^{(-E_{ai}/RT)}$ sendo

A_i = fator pré-exponencial

E_{ai} = Energia de ativação

R = constante universal dos gases

T = temperatura de cura

Michaud *et al.* [1998], pesquisando a transferência de calor em compósitos espessos fabricados por RTM, não recomendam o uso do modelo autocatalítico proposto por Kamal –

Sourour, quando a temperatura de processamento for baixa. Nesse caso, a taxa de reação no início da cura é zero, implicando que K_1 seria zero. Assim, o modelo de Kamal – Sourour pode ser simplificado para :

$$\frac{d\alpha}{dt} = K_2 \alpha^m (\alpha_{\max} - \alpha)^{2-m} \quad (2.26)$$

em que ainda foi suposto que a ordem total da reação seria 2 e que a cura não atingiria o máximo nessa temperatura baixa ($\alpha_{\max} \neq 1$).

Obs. : Outra forma observada para contabilizar a possível alteração da viscosidade na equação de Darcy é a proposta por Kiuna *et al.* [2002]. Kiuna *et al.* [2002] propõem um modelo onde o termo da viscosidade presente na equação de Darcy pode ser continuamente modificado baseado em um modelo derivado do modelo WLF que relaciona a dependência da viscosidade com a taxa de cisalhamento e temperatura, sem a necessidade de aplicar 2ª lei de Fourier, acrescida do termo de geração de energia.

2.3.2 Métodos de medição da permeabilidade

Como já foi dito, os compósitos fabricados por RTM podem ser divididos em dois grandes grupos com relação ao número de componentes da permeabilidade que são importantes : compósitos caracterizados como Placa Fina ou como Placa Espessa. Essa mesma divisão é válida para a classificação dos métodos de medição da permeabilidade.

Lundström *et al.* [2000] afirmam em sua pesquisa que os métodos de medição de permeabilidade não são padronizados e apresentam 4 problemas básicos :

- Estabilidade – variação do valor durante uma medição contínua;
- Repetitividade I – a variação do resultado quando a mesma amostra é recolocada no equipamento;
- Repetitividade II- a variação do resultado quando uma nova amostra é colocada no equipamento;
- Reprodutibilidade – variação dos resultados quando outras pessoas em outro local e com outro equipamento do mesmo tipo realizam as medidas de permeabilidade.

Tendo em vista os resultados de Hoes *et al.* [2002] e Lundström *et al.* [2000], serão analisados alguns métodos de medição de permeabilidade.

2.3.2.1 Métodos de Medição da Permeabilidade em Placa Fina

Para o conhecimento da permeabilidade de placas finas deve –se determinar o valor de K_x e K_y . Há a possibilidade de se medir apenas um das componentes por ensaio, K_x ou K_y , ou ambas simultaneamente. No primeiro caso, esse procedimento é conhecido como método de medição de escoamento paralelo e no segundo, método de medição de escoamento radial. No método de medição de escoamento paralelo, a frente de escoamento é plana, ver Figura 2.33, e no método de medição de escoamento radial, a frente de escoamento é um círculo ou uma elipse, ver Figura 2.34.

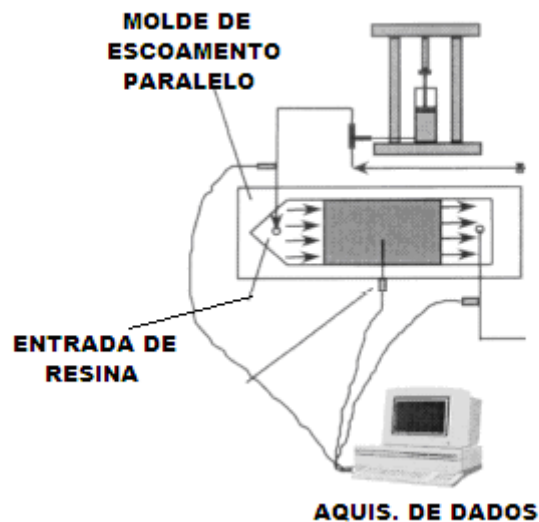


Figura 2.33 – Desenho esquemático do método de medição de fluxo paralelo.

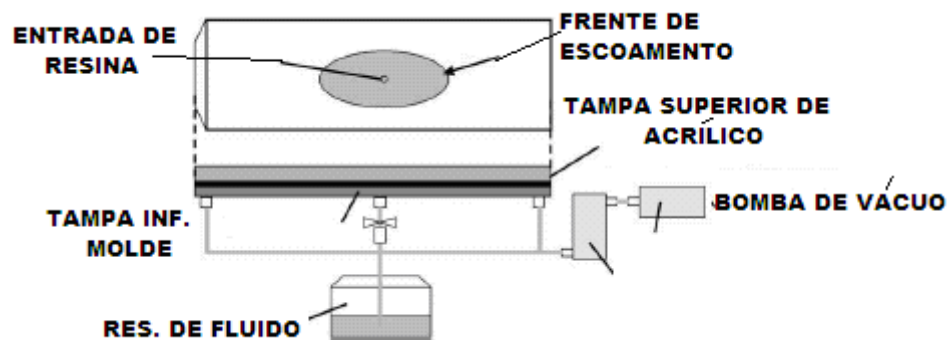


Figura 2.34– Desenho esquemático do método de medição de fluxo radial.

Outro fato que deve ser mencionado é a possibilidade de fazermos as medições da permeabilidade da preforma, com a mesma insaturada ou saturada. No primeiro caso, a

preforma está seca, a frente de escoamento avança e vai substituindo o ar presente na preforma. No segundo caso, a preforma já está previamente impregnada com a resina ou fluido de teste e o escoamento pode ser considerada como sendo livre de ar. O método de medição de escoamento radial só pode ser realizado de forma insaturada, que é a mais próxima da realidade dos processos industriais que utilizam o RTM.

Observando a equação de Darcy, conclui-se que para calcularmos o valor de K_x e de K_y é necessário termos o valor da vazão do fluido e medir a diferença de pressão do fluxo da resina no interior do molde ou o inverso, ter o valor da diferença de pressão e medir a vazão do fluido.

A partir dessa premissa, diversos métodos surgiram para medição dessas grandezas físicas para, por meio da equação de Darcy, ter-se o valor de K no plano (K_x e K_y). Segue a seguir a Tabela 2.6 sobre alguns desses métodos.

Tabela 2.6 – Métodos de Medição de Permeabilidade no Plano

Método de teste	Observação
Método de escoamento paralelo com medição da diferença de pressão	Monitora a pressão
Fibra ótica (Bragg)	Monitora o fluxo - alto custo
Método de escoamento paralelo com resistência elétrica	Monitora o fluxo – dificuldade de calibração e processamento de sinais
Smart weave	Monitora o fluxo – patente do exército americano
Placa eletrificada	Monitora o fluxo - dificuldade de calibração e processamento de sinais
Método de escoamento radial com termistores	Monitora o fluxo – método intrusivo
Método de escoamento radial com transdutores de pressão	Monitora a pressão
Método de escoamento radial com imagem	Monitora o fluxo
Método que usa gás	Monitora a pressão – usado apenas para estudo de K em placas finas

No método de escoamento paralelo com medição da diferença de pressão, a preforma é colocada em um molde retangular e a resina ou fluido de teste é injetado em uma das

extremidades. Mede-se, na direção do fluxo, a diferença de pressão (usando transdutores de pressão), ver Figura 2.35. O uso da máquina Instron como bomba hidráulica para resina garante uma vazão constante.

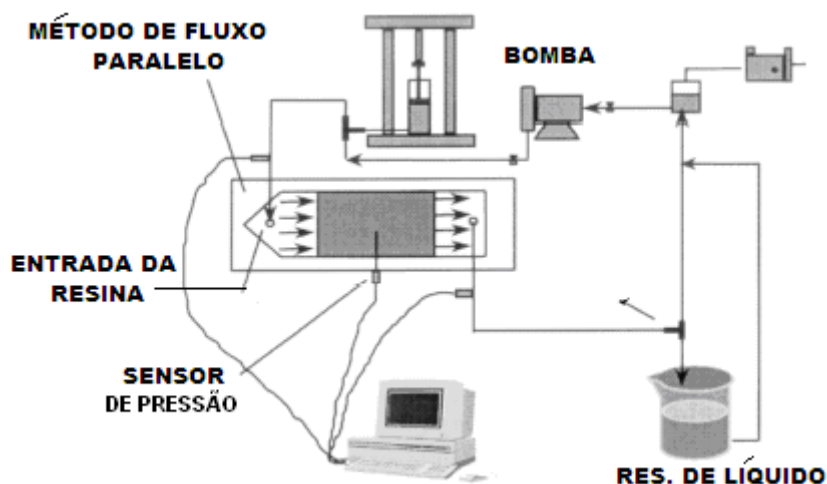


Figura 2.35 – Método de escoamento paralelo com medição da diferença de pressão.

No método de fibra ótica, as fibras são tecidas em conjunto com a fibra da preforma e monitoram o fluxo por meio do uso na resina de uma substância fluorescente. A presença da fibra ótica no interior do compósito após a cura da resina não altera a sua resistência estrutural.

No método de escoamento paralelo com medição da resistência elétrica, ver Figura 2.36, a preforma é colocada em um molde retangular e a resina ou fluido de teste é injetado em uma das extremidades. Mede-se a posição da frente de escoamento por meio da variação da resistência elétrica de fios colocados imerso e na direção do escoamento.

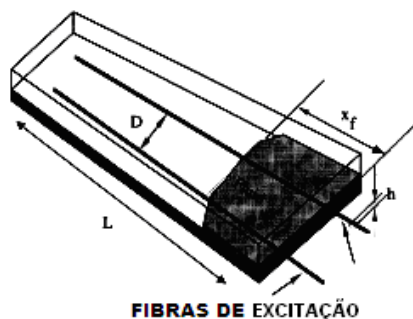


Figura 2.36 - Método de medição de escoamento paralelo com medição da resistência elétrica .

O método de medição Smartweave é uma patente do Army Research Laboratory (Exército dos EUA) e da Universidade de Delaware, ver Figura 2.37. Constitui um sistema de monitoramento de escoamento de resina no interior de uma preforma, em que a posição da frente de escoamento é dada por meio da variação da resistência elétrica causada pela passagem do fluido por nós pertencentes a uma malha de fios dispostos na preforma.

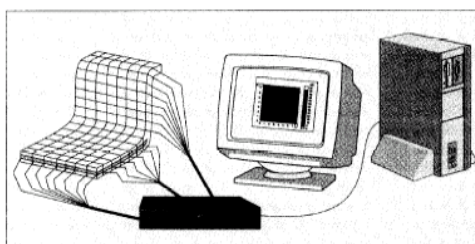


Figura 2.37 - Método Smartweave para medição de permeabilidade .

No método da placa eletrificada, a frente de escoamento é monitorada por meio de sensores elétricos dispostos na tampa superior do molde, ver Figura 2.38. Para uso dessa metodologia, a resina deve ser condutora e a preforma deve ser não-condutora. A posição da frente de escoamento é dada por meio da passagem do fluido pelos sensores elétricos que estão fixos em pontos conhecidos, as informações da posição da frente colhidas desses sensores alimentam um computador. Uma das vantagens desse método é a sua praticidade; os criadores desse método afirmam ter conseguido realizar de 5 a 7 experimentos por hora, Hoes *et al.* [2002].

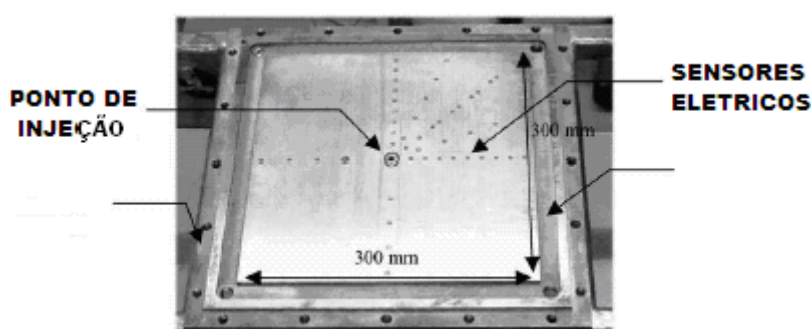


Figura 2.38 - Método de medição de permeabilidade por meio de placa eletrificada.

No método radial com termistores, a frente de escoamento é monitorada por meio de termistores, ver Figura 2.39. Os termistores são distribuídos radialmente em posições fixas no interior do molde. Quando a resina alcança esses sensores, os mesmos esfriam, a sua voltagem

é alterada e essa variação da voltagem é processada por um computador, Weitzenböck *et al.* [1999].

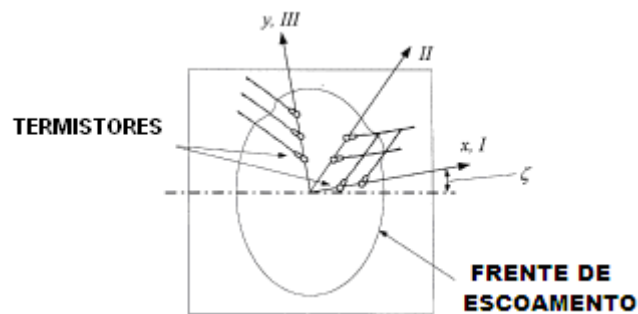


Figura 2.39 - Método de escoamento radial de medição de permeabilidade com termistores.

No método radial com transdutores de pressão, a frente de escoamento é monitorada por sensores piezoelétricos de pressão posicionados na tampa superior do molde, ver Figura 2.40. Os sensores são distribuídos radialmente em posições fixas na tampa do molde. Quando a resina alcança esses sensores, um sinal é gerado e é processado por um computador .

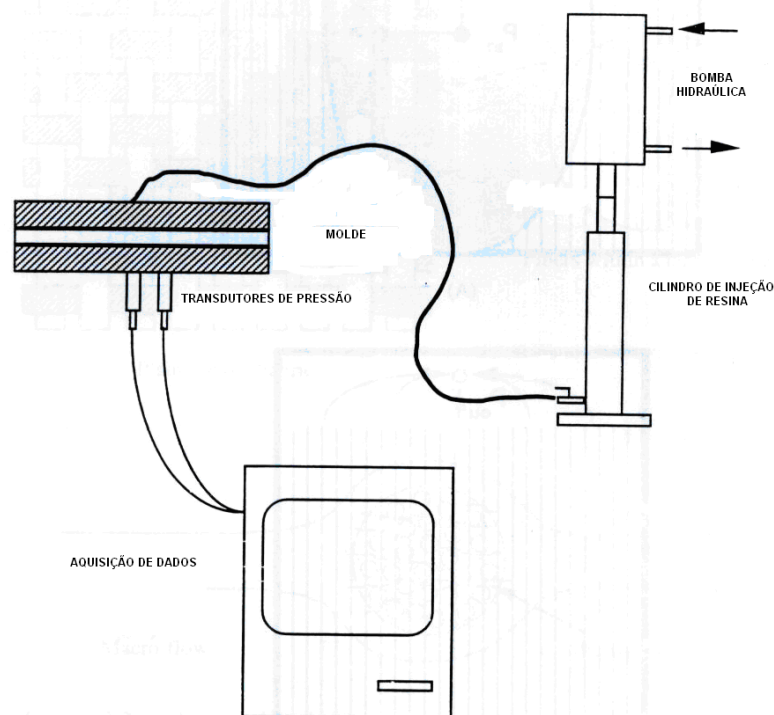


Figura 2.40 - Método de escoamento radial para medição de permeabilidade com transdutores de pressão.

O sistema de medição de permeabilidade usando gás é um método proposto por Ding *et al.* [2003], em que, no lugar da resina ou do fluido de teste, utiliza-se um gás para o estudo de permeabilidade da preforma, ver Figura 2.41. A frente de escoamento é monitorada por sensores de pressão posicionados na tampa inferior do molde, sendo os sinais processados por computador. Esse método só é válido para medição de permeabilidade de placa fina, já que o escoamento na direção da espessura é desprezível.

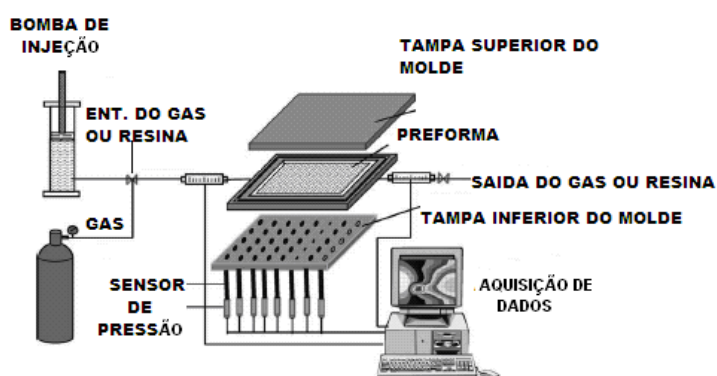


Figura 2.41 - Sistema de medição de permeabilidade usando gás.

O método de multicavidade de células de fluxo constitui 4 cavidades onde simultaneamente podem - se realizar 4 ensaios de medição de permeabilidade unidimensional (paralelo), ver Figura 2.42. Isso, para os autores, eliminaria a necessidade de se fazer um ensaio por vez, como é realizado tradicionalmente no método de medição de K paralelo. No método de multicavidade de células de fluxo, pode-se medir K_x e K_y em duas cavidades simultaneamente e nas outras duas pode -se medir o valor de K em alguma outra direção de interesse como K_{45} , Gebart e Lidström [1996].

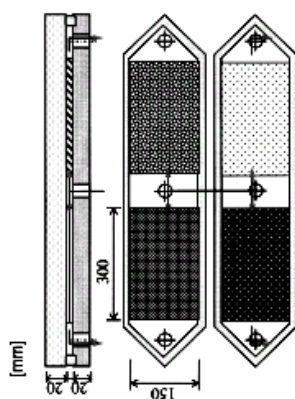


Figura 2.42 - Método de medição de permeabilidade multicavidade de células de fluxo.

O método de medição de permeabilidade radial por imagem com pressão de injeção constante faz uso de um molde onde pelo menos uma das tampas é transparente. A posição da frente de escoamento é dada pela filmagem da sua imagem se espalhando radialmente sobre a preforma, ver Figura 2.43.

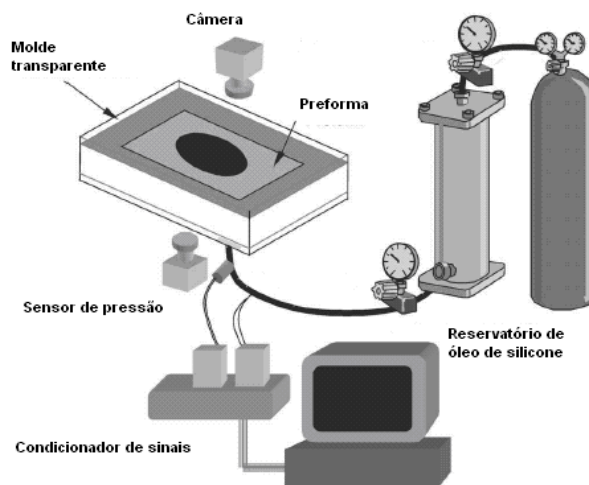


Figura 2.43 - Método de medição radial por imagem para a permeabilidade.

O método de medição de Permeabilidade no plano selecionado para esta pesquisa foi o método de medição de permeabilidade radial por imagem com pressão de injeção constante, ver Figura 2.43. A escolha foi realizada devido à presença, dentro da literatura consultada, de uma grande quantidade de artigos publicados com esse método, simplicidade relativa aos outros métodos estudados e relativo baixo custo.

Deve-se agora escolher a equação matemática que será usada para relacionar a Permeabilidade no plano (K_x e K_y) com a forma de elipse apresentada pela resina quando a mesma avança sobre a preforma no interior do molde. Em última análise, os modelos matemáticos propostos pelos diversos pesquisadores reescrevem a equação de Darcy, fazendo com que a pressão fique em função da localização da frente de escoamento (elíptica) e do tempo.

Modelos matemáticos para cálculo da Permeabilidade no plano

Cinco modelos foram coletados da literatura: o modelo apresentado na tese de doutorado de Steenkamer [1994], modelo de Ferland *et al.* [1996], o modelo de Weitzenböck *et al.* [1999], modelo de Adams *et al.* [1991] e modelo de Chan e Hwang .

Steenkamer [1994] apresentou o seguinte modelo analítico na sua tese:

$$P(x,y) = \frac{Q}{4\pi h} \frac{1}{\sqrt{K_{11} K_{22}}} \eta \ln \left(\frac{\frac{Q}{\pi h} \frac{1}{\sqrt{K_{11} K_{22}}} t + \left(\frac{x_o^2}{K_{11}} + \frac{y_o^2}{K_{22}} \right)}{\left(\frac{x^2}{K_{11}} + \frac{y^2}{K_{22}} \right)} \right) \quad (2.27)$$

sendo

x,y = coordenadas do ponto onde se afere o valor de pressão no molde

$P(x,y)$ = Pressão experimentalmente determinada

Q = vazão

h = espessura do molde

t = tempo

x_0 e y_0 = diâmetro do ponto de injeção

K_{11} e K_{22} = permeabilidade nas principais direções (x e y)

η = viscosidade

O modelo proposto por Weitzenböck *et al.* [1999] mede a velocidade da frente de escoamento em três eixos, (I, II e III), ver Figura 2.39. Árduo trabalho matemático é necessário para aplicação desse método. O modelo de Ferland *et al.* [1996] tem a desvantagem da necessidade da realização de no mínimo dois experimentos para completa caracterização da permeabilidade no plano (K_x e K_y), já que originalmente esse método foi resolvido para preformas isotrópicas.

O modelo proposto por Adams *et al.* [1991] mede a velocidade da frente de escoamento em dois eixos (x e y) porém a solução analítica torna-se complexa devido a necessidade de cálculos iterativos para se chegar ao valor da Permeabilidade no plano (K_x e K_y).

O modelo matemático selecionado nesta pesquisa para medição da permeabilidade radial por imagem foi aquele proposto por Chan e Hwang, ver equação (2.28). A escolha foi realizada devido à presença dentro da literatura consultada de uma grande quantidade de artigos publicados com esse modelo, simplicidade relativa aos outros modelos estudados e também pela flexibilidade já que com um único experimento pode-se obter tanto K_x como K_y . A descrição desse método se encontra a seguir, ver Figura 2.44, Gauvin *et al.* [1996] e Endruweit e Ermanni [2004].

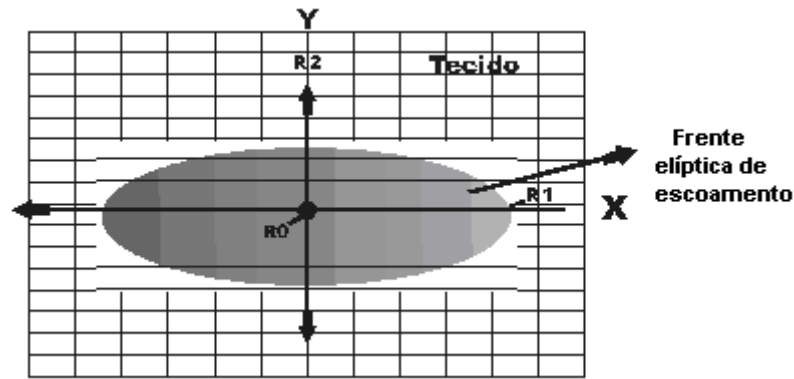


Figura 2.44 - Desenho básico para uso no modelo matemático proposto por Chan e Hwang para cálculo da permeabilidade.

$$\left(\frac{R_1}{R_0}\right)^2 \left(2 \ln\left(\frac{R_1}{R_0}\right) - 1\right) + 1 = \frac{4k\Delta p t}{\Phi \eta R_{01}^2} \quad (2.28)$$

R_1 = semieixo maior da frente elíptica de escoamento

R_2 = semieixo menor da frente elíptica de escoamento

R_0 = raio do ponto de injeção

$$R_{01} = R_0 \sqrt{\frac{R_2}{R_1}} \quad (2.29)$$

K_1 = permeabilidade do semieixo maior da frente elíptica de escoamento

K_2 = permeabilidade do semieixo menor da frente elíptica de escoamento

ΔP = diferença de pressão (constante)

t = tempo

Φ = porosidade

η = viscosidade

O primeiro membro da equação (2.28) está relacionado com a forma de elipse apresentada pela resina quando a mesma avança em meio anisotrópico e o segundo membro

relaciona as propriedades do material (K, viscosidade), o tempo e a força motriz (diferença de pressão).

Reescrevendo a equação (2.28), temos:

$$R_{cl}^2 \left(\frac{R_1}{R_0} \right)^2 \left(2 \ln \left(\frac{R_1}{R_0} \right) - 1 \right) + 1 = Fa \quad (2.30)$$

Sendo Fa igual a:

$$Fa = \frac{4k\Delta p t}{\Phi \eta} \quad (2.31)$$

A inclinação α do gráfico Fa x Tempo(t) é igual a:

$$\alpha = \frac{4k\Delta p}{\Phi \eta} \quad (2.32)$$

Sendo que:

$k = k_e$ = Permeabilidade

$$K_e = \sqrt{K_1 K_2} \quad (2.33)$$

Finalmente K_1 e K_2 podem ser obtidos por:

$$K_1 = K_e \frac{R_1}{R_2} \quad (2.34)$$

$$K_2 = K_e \frac{R_2}{R_1} \quad (2.35)$$

2.3.2.2 Métodos de Medição da Permeabilidade em Placa Espessa

Um completo conhecimento do tensor permeabilidade (componentes K_x , K_y e K_z) se faz necessário quando da fabricação de compósitos estruturais espessos (acima de 1" de espessura) para alta performance, como por exemplo a parte estrutural do trem de pouso do helicóptero pesado NH-90 europeu, fabricado por RTM e sendo constituído por uma preforma de fibra de carbono, ver Figura 2.45. Portanto, a matriz (2.3) deve ser aplicada para se entender o comportamento do fluido no interior de uma preforma espessa. Os métodos para se obter K_x e K_y foram discutidos anteriormente. Agora serão discutidos métodos para medição de K_z ou K_t , ou seja, a permeabilidade na direção da espessura ou permeabilidade transversal.



Figura 2.45 - Parte estrutural do trem de pouso do helicóptero pesado NH-90 europeu fabricado por RTM.

A equação básica para medição da permeabilidade transversal é a equação de Darcy, ver equação 2.36.

$$D = \frac{-K_{33}A\Delta P}{\eta\varepsilon} \quad (2.36)$$

D = vazão

K_{33} = permeabilidade transversal (K_t)

A = Área

ΔP = Variação de pressão

ε = espessura

η = viscosidade

Agora, deve-se aplicar a equação não mais no plano mas sim ao longo da espessura. Mais uma vez para se usar Darcy é necessário ter o valor da vazão do fluido e medir a diferença de pressão do fluxo da resina no interior do molde ou o inverso, ter o valor da diferença de pressão e medir a vazão do fluido. A partir dessa premissa, diversos métodos surgiram para medição dessas grandezas físicas para, por meio da equação de Darcy, ter-se o valor de K_t . A literatura consultada apresenta alguns métodos e resultados sobre as dificuldades de se medir a permeabilidade na direção da espessura (permeabilidade transversal, K_t).

Um dos métodos de se medir a permeabilidade transversal é o apresentado por Drapier *et al.* [2002], ver Figura 2.46.

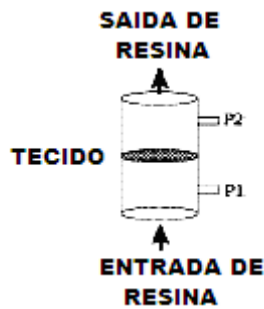


Figura 2.46 – Método de medição da permeabilidade transversal.

Nesse método, a preforma fica no interior de um cilindro onde antes e depois da mesma se encontra os sensores de pressão para uma determinada vazão. Aplicando a equação de Darcy, ver equação 2.36, chega-se ao valor da permeabilidade transversal (K_t).

Um dos problemas desse método é o fato de não se ter uma maneira de se comprimir a preforma de forma homogênea e constante. Foi sugerido o uso de placas rígidas perfuradas para satisfazer essa função, porém a perda de carga devido ao uso dessas placas é maior que a perda de carga da preforma, inviabilizando assim essa idéia.

Os próprios autores propuseram outro método para solucionar as deficiências do anteriormente apresentado. Eles desenvolveram um equipamento para medição de permeabilidade transversal onde a preforma é fixada entre placas de alumínio alveolar e os sensores de pressão antes e depois da preforma continuam sendo aplicados, ver Figura 2.47. Equipamento parecido foi desenvolvido na Holanda por Loendersloot e Akkerman, ver Figura 2.48.

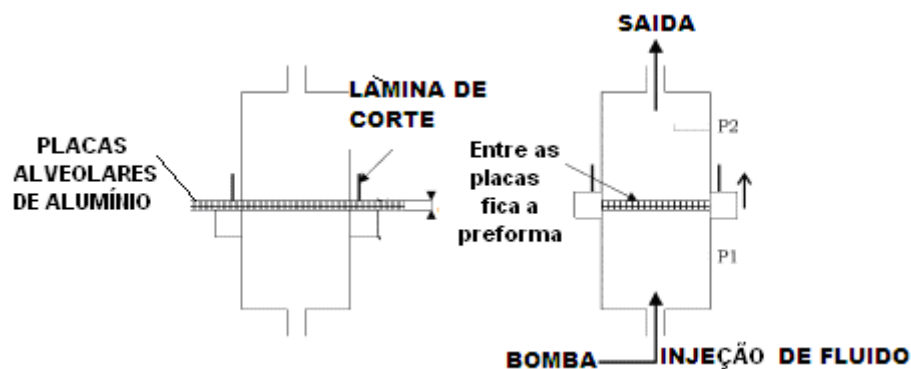


Figura 2.47– Método de medição da permeabilidade transversal proposto por Drappier *et al.* [2002].

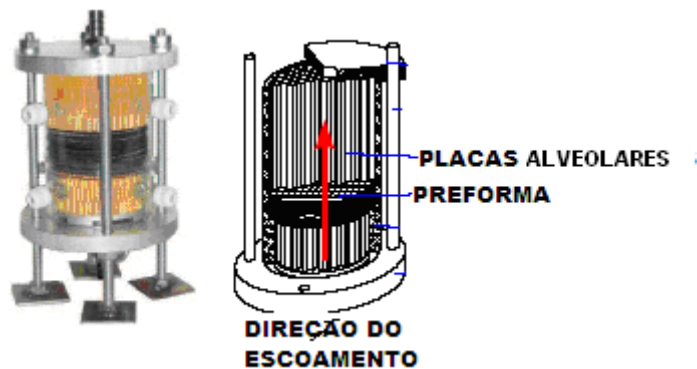


Figura 2.48 - Método de medição da permeabilidade transversal proposto por Loendersloot e Akkerman.

O uso das placas de alumínio alveolar mantém a preforma com a espessura constante e transforma a frente de escoamento, que é em geral elíptica, em uma frente de formato plano (“flat”), ver Figura 2.49.

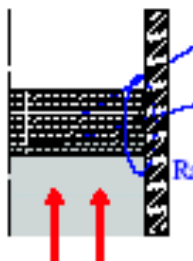


Figura 2.49 - Frente de escoamento de formato plano devido à presença das placas de alumínio alveolar.

Weitzenböck. *et al.* [1998] usam termistores posicionados nos eixos x,y e z para medir a permeabilidade no plano e a permeabilidade transversal, ver Figura 2.50. Uma das críticas a esse método é que o sensor fica em contato direto com a resina, o que poderia interferir no resultado da medida.

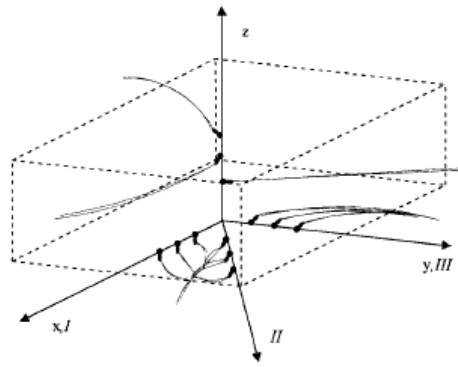


Figura 2.50 - Termistores posicionados nos eixos x,y e z para medir a permeabilidade no plano e a permeabilidade transversal.

Dentro da literatura consultada, o único método capaz de acompanhar a frente de escoamento através da espessura no interior da preforma, que é opaca, é o proposto por Saouab *et al.* [2001]. O método faz uso de espectroscopia de raio X, ver Figura 2.51(a), o que permite filmar a frente de escoamento no interior da preforma durante todo o período de injeção e em tempo real, ver Figura 2.51(b).

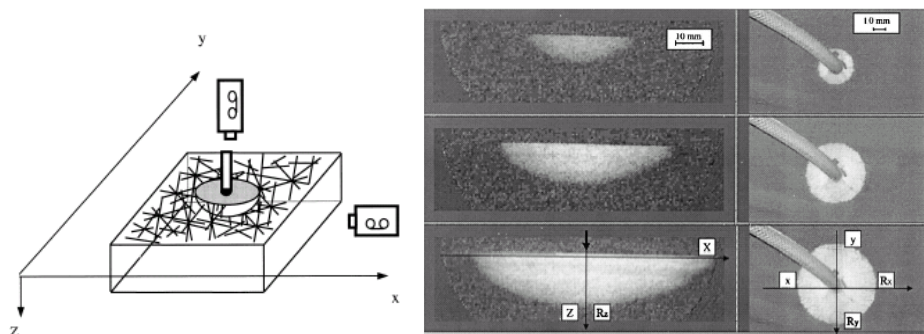


Figura 2.51 - (a) Desenho do sistema de espectroscopia de raio X para medição de permeabilidade transversal e (b) filmagem da frente de escoamento no interior da preforma.

Com esse método Saouab *et al.* [2001] obtiveram a seguinte curva espaço x tempo para a frente da resina na direção transversal, ver Figura 2.52.

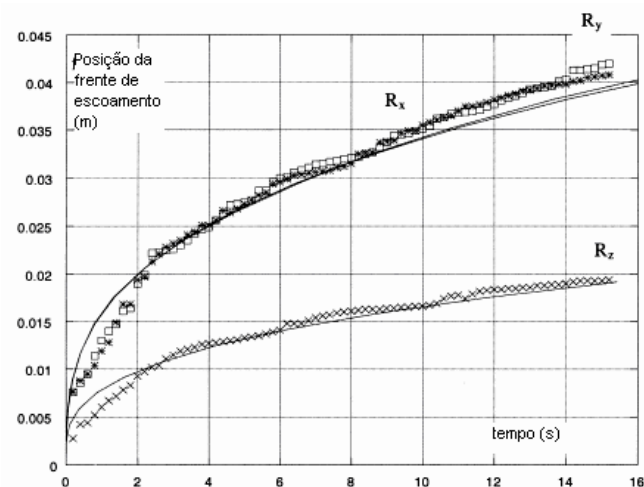


Figura 2.52 - Curva espaço x tempo para a frente da resina na direção transversal apresentada por Saouab *et al.* [2001].

Sauob *et al.* [2001] demonstraram que para materiais randômicos a curva espaço x tempo na direção transversal não é um movimento uniforme, conseqüentemente, a velocidade de escoamento na direção transversal não é constante. O método de medição de permeabilidade transversal selecionado para esta pesquisa foi o método proposto por Drappier *et al.* [2002]. A descrição detalhada de como foi aplicado esse método se encontra na seção 3.2.2.2 (Capítulo 3 - Materiais e Métodos).

2.4 Mecanismo de absorção de energia de impacto balístico pelo laminado polimérico

O advento da 1ª Guerra Mundial assistiu a uma completa ignorância quanto à proteção pessoal do combatente, ignorância essa que havia se acentuado desde as Guerras Napoleônicas. Porém, o mundo viu o surgimento dos primeiros carros de combate sobre lagartas para uso no campo de batalha. Esses carros de combate eram praticamente cofres motorizados. O desprezo com relação à proteção individual igualmente aconteceu com as tropas na 2ª Guerra Mundial; porém, os carros de combate se tornaram arma essencial no campo de batalha, sendo alvo de estudos técnico-científicos resultando em sérias pesquisas relacionadas aos fenômenos que envolviam a Mecânica da Perfuração e Penetração, utilizando métodos analíticos.

Com o início da Guerra da Coréia e o desenvolvimento de novos aços, ligas metálicas e fibras poliméricas, o conceito da armadura renasceu e as blindagens dos veículos sofreram grande otimização.

Com o terrorismo crescendo a partir da década de 60, houve uma grande expansão de uso de coletes à prova de balas por autoridades e guarda – costas e também causou a transferência da tecnologia de blindagem inicialmente desenvolvida para veículos militares para produtos do mercado civil como carros-forte, veículos de passeio, guaritas, coletes para agentes bancários, etc.

A ênfase na pesquisa de blindagem nos anos 60 e começo dos 70 foi sobre materiais leves para proteção pessoal e de pequenas aeronaves. O primeiro sistema de blindagem leve foi constituído por placas sinterizadas de cerâmicas de óxido de alumínio, coladas a um suporte traseiro dúctil, normalmente de alumínio ou de fibra de vidro reforçada com resina polimérica. No início de 1960, carbeto de boro prensado a quente substituiu a alumina em algumas aplicações.

Durante os anos 80, a ênfase foi para o desenvolvimento de proteção em veículos terrestres contra o impacto de penetradores de alta energia cinética e com cargas explosivas. Grandes chapas de cerâmica foram usadas. Aperfeiçoamentos em blindagens cerâmicas continuaram a ser feitos até os anos 90, quando a demanda nas Forças Armadas diminuiu rapidamente devido a mudanças na situação política mundial.

A maior evolução em termos de proteção pessoal contra ameaças balísticas foi a introdução dos laminados de fibra de vidro e materiais têxteis sintéticos como kevlar, náilon

66 e polietileno, sendo esses laminados aplicados nos mais diversos tipos de produtos como vestes, capacetes, assentos para pilotos, etc.

Ao longo desses mais de 30 anos de pesquisa, vários pesquisadores contribuíram para o entendimento dos mecanismo de absorção de energia por impacto balístico em laminados poliméricos. Dahsin Liu (1987), Wu e Springer (1988), Scarponi *et al.* (1996) e Bibo e Hogg (1996) estudaram o impacto de baixa velocidade em compósitos. Amandio e Thaumaturgo (1996), Carr (1999), Amandio e Thaumaturgo (1997), Olsson (2000), Shim *et al.* (2001) e Wang e Xia (2000) estudaram o comportamento dinâmico, Kang e Kim (2000), Stavropoulos e Papanicolaou (1997), Zhu *et al.* (1991), Zhu *et al.* (1992), Morye *et al.* (2000), Avery *et al.* (1981) e Savage (1989) estudaram os mecanismos de absorção de energia em impacto balístico em diversos tipos de laminados, como aqueles com fibra de polietileno, aramida, carbono e grafite. Collombet *et al.* (1998), modelaram, com elementos finitos, o comportamento sob impacto e Karbhari (1997), Ulven *et al.* (2003) e Hosur *et al.* (2003) estudaram o comportamento sob impacto em baixa velocidade e balístico em compósitos fabricados por LCM (Liquid Composite Molding).

Todas essas pesquisas foram voltadas para o estudo da penetração balística de tecidos e laminados, analisando a resposta da fibra, os mecanismos de deformação, mecanismo de falha, de energia de absorção e o carregamento dinâmico. De uma maneira geral, pode-se dizer que chegaram aos resultados expostos a seguir.

Os modos de falha de um laminado compósito podem ser classificados como: fratura da fibra, fratura da matriz, descolamento fibra – matriz e delaminação.

Fratura da fibra e fratura da matriz são danos na fibra e na matriz, respectivamente, quando a tensão em cada constituinte excede o valor permitido. Entretanto, a delaminação é o dano na interface entre duas lâminas adjacentes, ver Figura 2.53, e o descolamento é o dano na interface entre fibra e matriz. Portanto a delaminação e o descolamento são afetados pela combinação das propriedades dos materiais e pela força de adesão no compósito.

A delaminação é afetada pela combinação das propriedades entre as lâminas enquanto o descolamento é entre os constituintes. Os mecanismos de falha associados à interface baseiam – se na teoria de adesão entre fibra e matriz (molhabilidade, interação química, adesão mecânica, etc). É claro que, se a adesão fibra - matriz for comprometida, dar – se –á falha na interface.

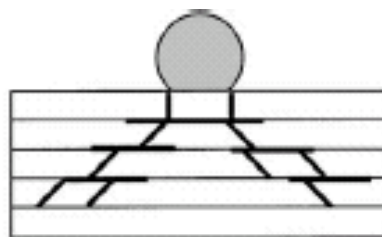


Figura 2.53 - Delaminação é o dano na interface entre duas lâminas adjacentes.

A resina em materiais laminados compósitos com fins de Proteção Balística não funciona da mesma maneira como para fins estruturais. A performance balística do laminado é sucessivamente degradada quando saímos de uma condição onde temos tecido sem resina para um tecido com resina flexível e a degradação continua se passarmos para uma condição de tecido com resina rígida. Portanto, é recomendado o uso de 15% a 25 % de resina em laminados poliméricos destinados a serem usados em proteção balística. Outro fato importante é que tratamentos que diminuam a adesão interlaminar das fibras causam perda de propriedades mecânicas do compósito porém aumentam a resistência balística pois aumentam a capacidade de absorver energia por delaminação e por fratura.

Os compósitos apresentam uma tendência de absorver energia de impacto em degraus ou níveis, o que provoca variações bruscas no comportamento do compósito submetido ao impacto, como mostra a Figura 2.54.

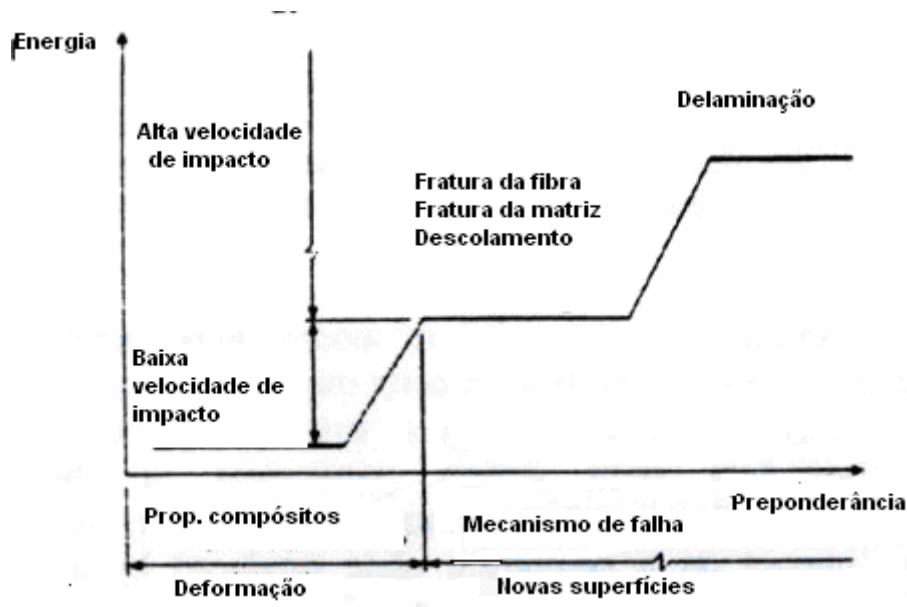


Figura 2.54 – Gráfico que apresenta a tendência dos compósitos para absorver energia de impacto em degraus ou níveis.

Os mecanismos de falha do compósito laminado dependem da taxa de deformação a que está sujeito, ver Figura 2.54. Estudos mostram que, no impacto a alta velocidade, os mecanismos de absorção de energia pela criação das novas superfícies (delaminação, etc) preponderam sobre parâmetros como: propriedades da fibra e da matriz, tipo e direção de carga, forma e massa do impactador, tamanho e forma do alvo. Isso ocorre pois, com altas taxas de deformação, a transferência de energia para o compósito é muito rápida. Desse modo, o material também tem de absorver essa energia rapidamente.

Nota-se que poderia haver patamares de energia nos quais uns mecanismos de falha preponderam sobre outros, levando a modos extras de absorção de energia. Assim, a altas taxas de transferência de energia e de absorção, o mecanismo de falha por delaminação é favorecido, pois o material tem pouco tempo para absorver a energia da onda de choque por deformação e grande parte dessa energia é absorvida por mecanismos de falha que criam novas superfícies, ver Figura 2.54.

A grande diversidade de propriedades termomecânica, ductilidade, anisotropia e sensibilidade a taxas de carregamento gera uma grande complexidade para o estudo e modelagem do comportamento de laminados sob impacto balístico. Por exemplo, a rigidez da resina tem grande influência no comportamento dos compósitos com fibra de Polietileno de Ultra – Alto- Peso Molecular sob impacto balístico. Já o uso de resina em laminados compósitos com fibra de Náilon não tem influência alguma no comportamento balístico. Portanto, o impacto balístico em materiais compósitos está longe de ser previsto de forma simples já que muitas variáveis como forma, comportamento mecânico dos projéteis, ângulo de incidência, velocidade de impacto, fricção fibra-fibra e fibra-projétil, peso das camadas do compósito, sequência de empilhamento dos laminados, tenacidade, resistência a ruptura da fibra, densidade e velocidade do som no material, etc.

Então, para compreender o comportamento sob impacto balístico de laminados compósitos poliméricos, deve-se conhecer especificamente o sistema resina-fibra a ser experimentado, já que a interação entre esses materiais pode fazer com que certos mecanismos de absorção de energia predominem sobre outros (quebra da fibra, pull-out, fratura da matriz, descolamento da interface fibra – matriz e delaminação).

Vários pesquisadores contribuíram para o entendimento dos mecanismos de absorção de energia por impacto balístico em laminados de fibra de vidro, tais como DeLuca *et al.* (1998), Silva *et al.* (2003) Tanoglu e Seyhan (2003) Nunes *et al.* (2004), Gellert *et al.* (2000), Savage

(1989), entre outros. Baseado nesses autores, pode-se chegar a importantes resultados que serão discutidos a seguir.

Vaidya, Savage, Silva, Wang e Gellert observaram que a de delaminação da zona perfurada por impacto balístico de um laminado de fibra de vidro formou uma zona cônica ao longo da espessura, onde a máxima área delaminada se encontra nas camadas mais próximas da parte de trás do laminado, ou seja, áreas delaminadas aumentam de tamanho da face frontal em direção à face traseira do laminado, ver Figura 2.55.

Savage, Wang, Gellert, Hogg, Langlie e Cheng observaram três mecanismos básicos e igualmente importantes de absorção de energia em laminados de fibra de vidro sob impacto balístico: cisalhamento das fibras nas primeiras camadas impactadas pelo projétil, seguido por uma zona onde as fibras foram previamente esticadas e depois sofreram ruptura por tensão e grande delaminação na face traseira do compósito, ver Figura 2.55. Outro mecanismo importante em laminados de fibra de vidro observado e contabilizado por Gellert *et al.* é a ejeção de fragmentos da fibra e da resina, que logo será discutido, ver Figura 2.55.

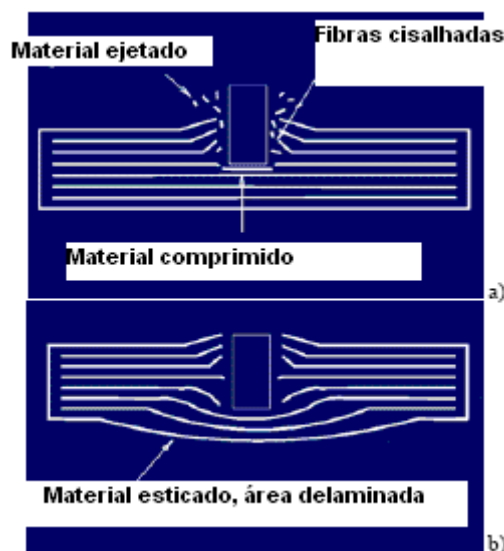


Figura 2.55 - Mecanismos básicos absorção de energia em laminados de fibra de vidro sob impacto balístico.

Gellert *et al.* realizaram um amplo estudo em 2000 sobre o efeito da espessura e forma do projétil nos mecanismos de absorção de energia de impacto balístico em laminados de fibra de vidro. Eles apresentaram o seguinte gráfico para análise, ver Figura 2.56.

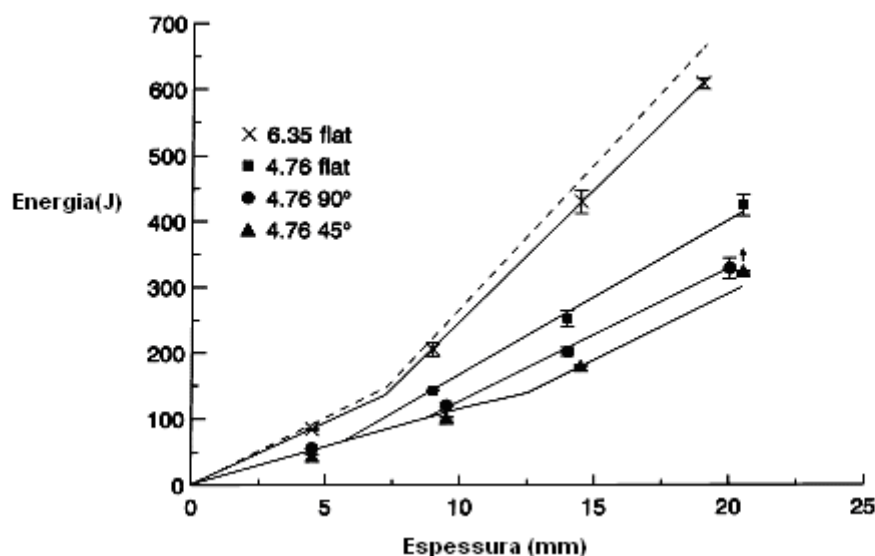


Figura 2.56 - Gráfico referente à absorção de energia por laminados de fibra de vidro de várias espessuras quando submetidos ao impacto de projéteis de várias formas.

Depois de apresentarem esse gráfico no seu artigo, Gellert *et al.* reapresentaram resultados de trabalhos publicados na década de 80, como por exemplo o trabalho confidencial desenvolvido em 1981 pelo Centro de Pesquisa de Mecânica e Materiais do Exército dos Estados Unidos, Figura 2.57, e resultados apresentados por Savage em 1989, Figura 2.58.

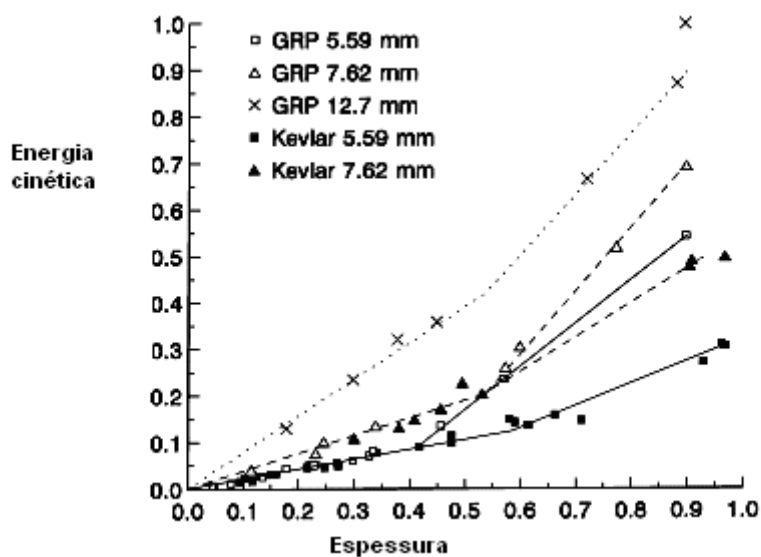


Figura 2.57- Gráfico da energia cinética absorvida por laminados de fibra de vidro e kevlar de várias espessuras quando impactados por projéteis que simulam fragmentos.

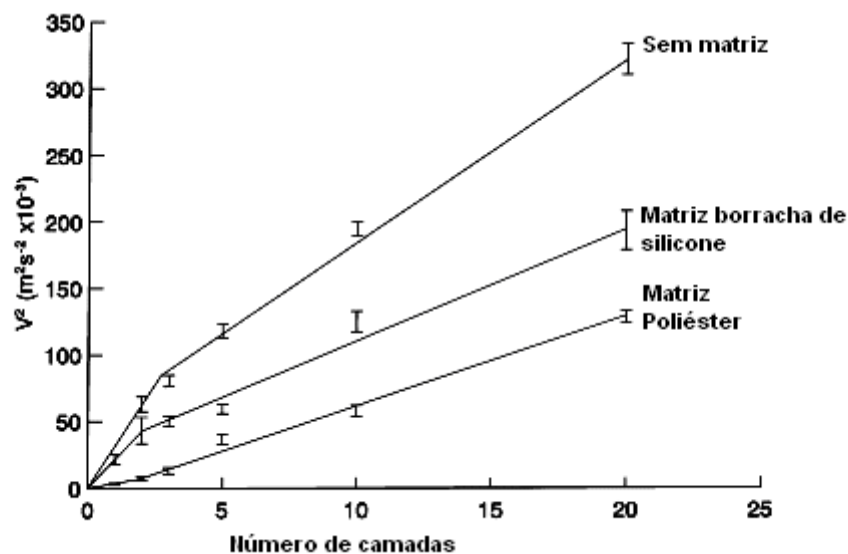


Figura 2.58 - Gráfico da velocidade no limite balístico de laminados kevlar de várias espessuras e tipos de matriz polimérica quando impactados por projéteis que simulam fragmentos.

Para Gellert *et al.* [2000], o que todos esses gráficos apresentam para laminados de fibra de vidro e Kevlar é uma relação bilinear entre a energia absorvida e a espessura da placa. Gellert *et al.*[2000] afirmam que a transição na energia de deformação que ocorre a uma certa espessura de alvo depende do diâmetro do projétil e forma do nariz do mesmo e está relacionada com a mudança de mecanismo de absorção de energia durante o impacto balístico, que passa de cisalhamento e fragmentação (ejeção de fragmentos de fibra e da resina), nos estágios iniciais, para esticamento e ruptura por tensão das fibras e grande delaminação na face traseira do compósito, nos estágios finais.

Analisando uma seção transversal de dois laminados de GRP de espessuras diferentes, ver Figura 2.59, Gellert *et al.* [2000] tecem os seguintes comentários. Observaram duas características nas áreas delaminadas apresentadas pelas placas; na placa fina, o dano se deu na forma do já conhecido cone de delaminação, ver Figura 2.59(a); esse cone de delaminação aumenta de diâmetro e altura com o aumento da espessura do alvo, até que para uma suficiente espessura, um segundo cone de delaminação surge em direção à saída do projétil, com pode ser observado na placa espessa da Figura 2.59(b). Para um melhor entendimento desse parágrafo, ver Figura 2.60, que representa, na forma de um desenho esquemático, o

dano balístico sofrido pelas placas fina e espessa apresentado na Figura 2.59(a) e (b), respectivamente.

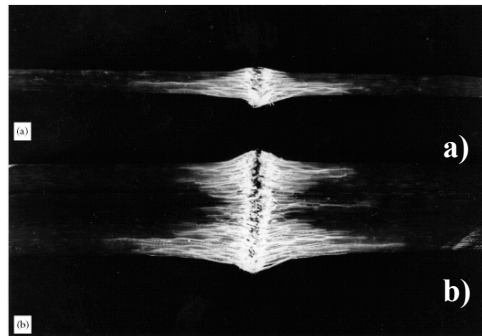


Figura 2.59 - Corte transversal de placas de fibra de vidro impactadas balisticamente: (a)placa fina e (b) placa espessa.

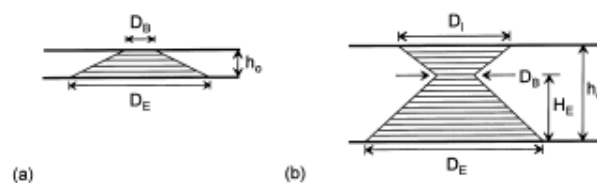


Figura 2.60 - Desenho esquemático do dano balístico sofrido pelas (a) placa fina e (b) placa espessa.

Já que a Figura 2.60(a) e (b) representa o dano da placa fina e na placa espessa, esquematicamente temos: o diâmetro D da delaminação mais um índice que representa a posição no desenho de qual área de delaminação que está sendo medido esse diâmetro, H_E e h_o , que são a altura do segundo cone na placa espessa e a espessura da placa, respectivamente.

Gellert *et al.* [2000], mesmo sendo medidas indicativas, acreditam que a variação dessas medidas geométricas, ver Figura 2.60, é função da geometria do alvo, da forma do projétil e da velocidade do projétil. Por exemplo: D_I aumenta linearmente com a espessura do alvo, maiores D_E foram encontrados quando foram usados projéteis de maiores diâmetros e mais rombudos (sem ponta, “blunter”), D_B foi difícil de ser medido, mas a maioria dos valores ficou em torno de 10 a 20 mm. Notou-se que H_E aumenta com a espessura. Portanto os mecanismos de absorção de energia de impacto balístico nos compósitos mudam com a variação da espessura.

Savage, já em 1989, observou em seu trabalho a influência da espessura do laminado de fibra de vidro como fator controlador do modo de falha balístico nesses tipos de laminados. Savage afirma que os modos de falha ao longo da espessura na direção do impacto no laminado ocorre na seguinte seqüência: cisalhamento da fibra, rompimento da fibra por tensão e delaminação. Portanto, para uma dada velocidade, a espessura relativa de cada região de dano depende da espessura total do laminado. Por exemplo, falha em painéis finos pode ser totalmente causada por cisalhamento com completa perfuração. Esse comportamento do dano balístico em laminados de fibra de vidro verificado por Savage pode explicar o resultado obtido por Woodward et al., em que foi constatado que a absorção de energia de impacto por laminados finos de fibra de vidro é independente da forma da ponta do projétil.

Em 1998, Gellert *et al.* publicaram no Journal of Materials Science outro importante trabalho e o único dentro da literatura consultada que contabilizou o valor dos três principais mecanismos de absorção de energia de impacto balístico em laminados de fibra de vidro, usando técnicas de filmagem de alta velocidade e usando um projétil tipo FSP de 5,59 mm, massa de 1,1g e velocidade de 370 m/s. Os três principais mecanismos de absorção de energia de impacto balístico em laminados de fibra de vidro nesse trabalho são: energia de deformação das fibras, cinética (referente à fragmentação e ejeção sofrida pela fibra e matriz do laminado de fibra de vidro que voa ao ser impactado pelo projétil) e delaminação. Segue a Tabela 2.7 com resultados dessa pesquisa.

Tabela 2.7 - Valores dos Principais Mecanismo Absorção de Energia de Impacto Balístico em Laminados de Fibra de Vidro

Material	Energia de deformação das fibras	Energia cinética	Delaminação
Compósito de Fibra de Vidro	27,5J	13,2J	15J

Conclui-se dessa tabela que a energia de deformação é quase o dobro das outras duas formas de energia e que a energia cinética é da mesma ordem de grandeza da energia de delaminação.

Todas essas pesquisas foram voltadas para o estudo da penetração balística de laminados de fibras de vidro de uma maneira geral; pode-se dizer que chegaram aos seguintes resultados:

- os quatro principais mecanismos de absorção de energia de impacto balístico por laminado de fibra de vidro são a energia cinética (referente à fragmentação e ejeção sofrida pela fibra e matriz do laminado de fibra de vidro que voa ao ser impactado pelo projétil), cisalhamento da fibra, rompimento da fibra por tensão e delaminação
- a forma de delaminação da zona perfurada por impacto balístico de um laminado de fibra de vidro é uma zona cônica ao longo da espessura, onde a máxima área delaminada se encontra nas camadas mais próximas da parte de trás do laminado, ou seja, áreas delaminadas aumentam de tamanho da face frontal em direção à face traseira do laminado.

CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Serão descritos aqui os materiais usados nesta tese para o processamento das placas compósitas.

Fibra de vidro

As fibras de vidro possuem uma estrutura amorfa e são compostas basicamente por sílica, contendo diversos outros óxidos como, por exemplo, óxidos de cálcio, de boro, de sódio, de alumínio e de ferro. As fibras de vidro são produzidas com diferentes composições químicas, e, conseqüentemente, possuem diferentes propriedades mecânicas e químicas. As mais comuns são tipo E, tipo C e tipo S, sendo a grande maioria da produção de fibras do tipo E, ver Figura 3.1. As fibras de vidro do tipo E são bons isolantes elétricos e apresentam alta resistência mecânica e módulo de elasticidade moderado. As do tipo C apresentam boa resistência à corrosão. As do tipo S possuem alto teor de sílica e apresentam propriedades mecânicas e resistência térmica melhores que os outros tipos de fibra de vidro.

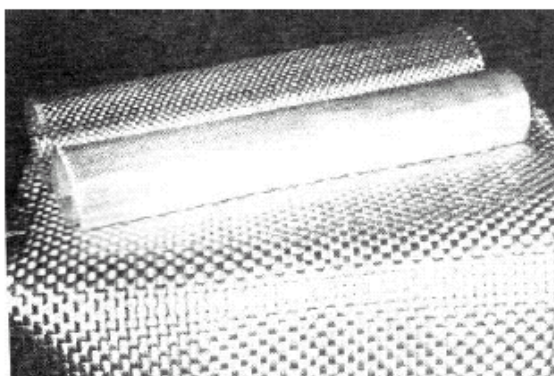


Figura 3.1 - Tecido de fibra de vidro.

Placas compósitas formadas por resina e fibra de vidro serão processadas. O reforço será de tecido básico de fibra de vidro AF 0090 da Fibertex, cuja gramatura é igual a 1100 g/m² e a densidade da fibra é de 2,60 g/cm³.

Resina

As resinas éster-vinílicas são derivadas das resinas epóxi pela reação do anel epoxídico com um ácido carboxílico insaturado, como, por exemplo, o ácido acrílico ou o ácido metacrílico. A resina obtida é combinada com um monômero, o estireno, para baixar sua viscosidade. As resinas comerciais normalmente possuem de 20 a 50 % de estireno. A Figura 3.2 mostra a estrutura molecular da resina éster-vinílica.

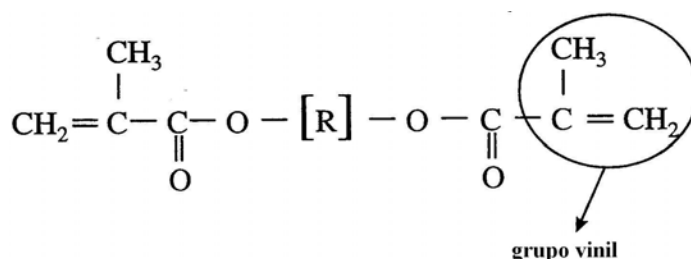


Figura 3.2 - Estrutura molecular da resina éster-vinílica.

A reação de cura consiste em uma poliadicação via radical livre em que o estireno é o agente de cura. O iniciador mais comum é o peróxido de metil etil cetona (MEKP). Os iniciadores se decompõem e formam os radicais livres que iniciam a reação. Geralmente, a decomposição é térmica. Porém, a taxa de decomposição pode ser aumentada pela adição de aceleradores ou promotores. Os mais comuns são: dimetilân timer (DMA) e naftenato de cobalto (CoNap). Também podem-se utilizar inibidores para se obter o tempo de cura desejado, principalmente no processamento de peças grandes.

As resinas éster-vinílicas combinam as boas propriedades mecânicas das resinas epóxi com a facilidade de processamento das resinas poliésteres. Será utilizada a resina éster-vinílica Derakane 411-350 (Dow Chemicals), com viscosidade a 25°C de 350 cp e densidade de 1,045.

3.2 MÉTODOS

Para o desenvolvimento da tecnologia de processamento de placas compósitas por RTM, foi necessário a realização de diversos procedimentos experimentais, projeto e fabricação de vários equipamentos e dispositivos e a seleção ou o desenvolvimento de metodologias para o entendimento do escoamento da resina no interior da preforma e para a caracterização mecânica das placas processadas, Fluxograma da Figura 3.3.

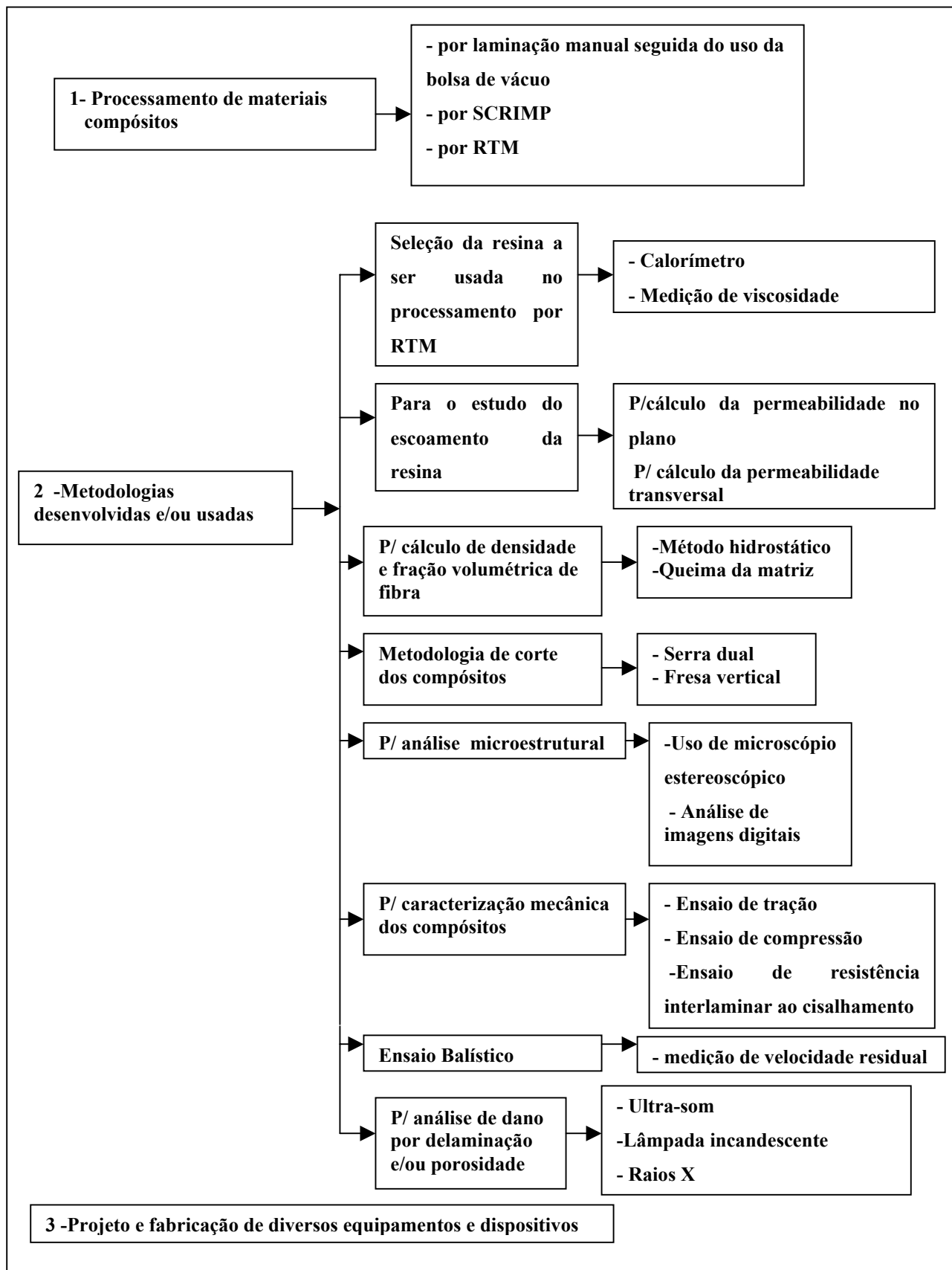


Figura 3.3 - Fluxograma das atividades desenvolvidas neste trabalho de pesquisa.

3.2.1 PROCESSAMENTO DE PLACAS COMPÓSITAS

Processamento de placas compósitas por laminação manual seguida do uso da bolsa de vácuo e por SCRIMP

Três tipos diferentes de processamentos compósitos foram realizados ao longo deste trabalho de pesquisa:

- laminação manual seguida do uso da bolsa de vácuo
- por SCRIMP
- por RTM

As primeiras placas foram fabricadas por SCRIMP e não por RTM já que simultaneamente à fabricação dessas placas, estavam sendo projetado e fabricado o molde e os outros componentes para a montagem da estação de processamento por RTM. Essas placas iniciais tinham como função testar metodologias que serão usadas nas futuras placas processadas por RTM.

Inicialmente, foram fabricados dois tipos diferentes de placas de material compósito, conforme apresentado na Tabela 3.1. Portanto, essas primeiras placas, fabricadas pelo processo SCRIMP e por laminação manual, tinham como função testar metodologias referentes ao ensaio balístico e à análise do dano interno por ultra-som das placas de material compósito, ver Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Processamento de placas de material compósito para teste de metodologias

Placas compósitas fabricadas	Quantidade	Processo de fabricação	Função
Placa de 300mm x 300mm	2	Laminação manual (a bolsa de vácuo foi usada após a laminação)	Para ensaio balístico
Placa de 150 mm x 150 mm	2	SCRIMP	Para análise de dano por ultra-som

A Figura 3.4 apresenta o esquema do processo de moldagem de compósito por infusão de resina, chamado de Seemann, ou SCRIMP (Seemann Composite Resin Infusion Molding

Process). Essa técnica foi desenvolvida por William Seemann e utiliza somente a pressão de vácuo para infusão da resina. Diferente do processamento por RTM, que é realizado com molde de dois lados, essa técnica utiliza apenas molde de um lado.

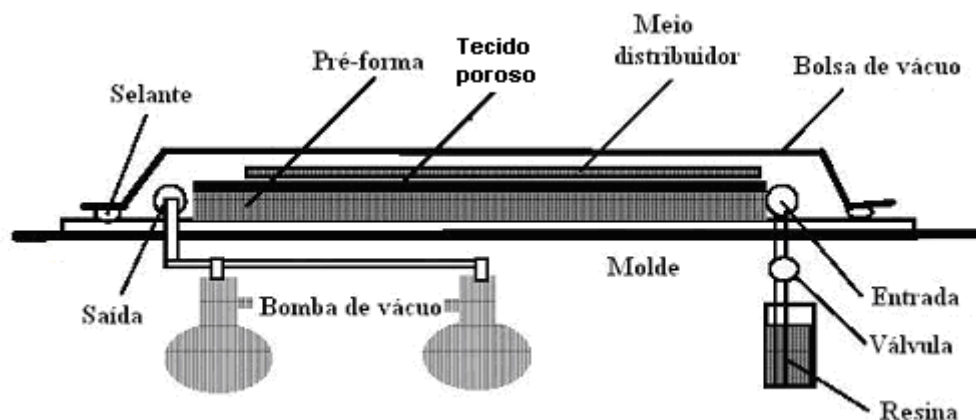


Figura 3.4 - Esquema do processo Seemann ou SCRIMP de moldagem de compósito por infusão de resina.

Nesse processamento, a preforma é posicionada na mesa coberta por um agente desmoldante. Acima da preforma, coloca-se uma camada de um material fino e poroso (“peel ply”) que não adere à resina para facilitar a desmoldagem da peça após o processamento. Em seguida, coloca-se um meio distribuidor, ou seja, um material de alta permeabilidade que aumenta a velocidade de escoamento da resina através da superfície e, simultaneamente, permite o fluxo na direção transversal da preforma. Por último, coloca-se a bolsa de vácuo que é selada com fita adesiva.

Pelo menos dois tubos são posicionados entre o molde e a bolsa de vácuo. Um é conectado à bomba de vácuo e o outro é posicionado no recipiente que contém a resina. Quando a pressão de vácuo é aplicada, a preforma é compactada e um gradiente de pressão é produzido no interior do sistema, permitindo, assim, a infusão da resina.

3.2.1.1 Processamento das placas compósitas por laminação manual, seguido do uso da bolsa de vácuo para o estudo da metodologia de ensaio balístico

Foram fabricadas duas placas de material compósito para testar a metodologia de ensaio balístico a ser adotada na tese. Os resultados desse ensaio serão apresentados no Capítulo 4.

Materiais usados :

- Tecido de Fibra de vidro AF 0090
- Resina Derakane 411-350
- Acelerador cobalto CoNap
- Iniciador Butanox
- Filme de polietileno perfurado WL 3600P / 1000 ("release film")
 - Fornecedor: Barracuda Technologies
 - Fabricante: SP Systems
 - Recomendado para temperaturas de até 100° C.
- DV7050/4040 - Bag Film
 - Fornecedor: Barracuda Technologies
 - Recomendado para temperaturas de até 200° C.
- AT90B - Sealant tape
 - Fornecedor: Barracuda Technologies
 - Fabricante: SP Systems
 - Recomendado para uso a temperaturas de até 90° C.
- Tecido absorvedor ("breather")
 - Tipo: BIDIM
 - Fabricante: Rhodia

Inicialmente, tentou-se fabricar uma placa de material compósito por SCRIMP de 25, 4 mm (1”) de espessura com tecido de fibra de vidro AF 0090 com resina éster-vinílica DERA KANE 411-350; não houve sucesso. A placa possuía 32 camadas de fibra de vidro e área de 300 x 300 mm². Foi observado que o sistema de vácuo não conseguia succionar a resina. Então, tentou-se outra abordagem para fabricação das placas de material compósito; usar laminação manual seguida do uso da bolsa de vácuo. Dessa forma, fabricaram-se 2 placas de 25,4 mm (1”) de espessura e área de 300x300mm², com tecido de fibra de vidro (1100g/m²) e resina éster-vinílica DERA KANE 411-350. As duas placas foram fabricadas com 32 camadas de fibra de vidro cada uma e o sistema de resina usado tinha a seguinte composição : 952g de resina Derakane 411-350, 9,52g de Butanox (1%) e 1,9 g de acelerador CoNap (0,2%). Segue a descrição do procedimento adotado.

Os tecidos de fibra de vidro foram cortados, com tesoura manual, em lâminas quadradas de 300 mm x 300mm. A resina e os seus componentes foram pesados em uma

balança Gehaka com precisão de 3 casas decimais. Para que houvesse homogeneidade da mistura, todos os componentes foram colocados em um misturador por 5 minutos a 25,8°C.

Sobre a mesa de trabalho do laboratório, demarcou-se a área para fabricação simultânea das duas placas. Na demarcação, foram utilizadas fitas adesivas e aplicou-se nessa área uma fina camada de desmoldante (cera de carnaúba empregada em móveis).

Após essa etapa, iniciou-se o processo de laminação manual das duas placas dentro da área demarcada. As placas foram laminadas uma por vez. Ao fim da laminação, sobrepos-se aos dois laminados uma camada de filme de polietileno perfurado ("bleeder") uma do tecido absorvedor ("breather") e a bolsa de vácuo selada por fita adesiva nas bordas, de forma a permitir a retirada do excesso de resina e das bolhas de ar. A linha de vácuo foi colocada no centro da bolsa de vácuo (pressão do vácuo de 175 mbar) entre as duas placas.

Aparentemente, ambas as placas apresentaram as camadas mais externas pouco molhadas pela resina e as mesmas apresentavam manchas aleatoriamente distribuídas.

Após 24 horas do processamento, as placas foram submetidas à pós-cura em uma estufa por 20 horas a 70°C, sendo esse o regime mais brando de tratamento térmico fornecido pelo fabricante da resina.

3.2.1.2 Processamento das placas por SCRIMP para o estudo da metodologia de análise de dano por ultra-som

Foram fabricadas duas placas de material compósito para o estudo da metodologia de análise de dano por ultra-som das futuras placas fabricadas por RTM. Os materiais usados nesse processamento foram os mesmos do processamento anterior.

Uma das placas possuía 10 mm de espessura e a outra 25,4 mm (1") de espessura, ambas com 150mm x 150mm de área. Utilizou-se tecido de fibra de vidro (1100g/m²) com resina éster vinílica DERAkANE 411-350. Uma placa foi fabricada com 32 camadas de fibra de vidro e a outra com 10 camadas. A resina usada tinha a seguinte composição: 311g de resina Derakane 411-350, 3,194g de Butanox (1%) e 0,634g de acelerador CoNap (0,2%) para a placa com 32 camadas e 121g de resina Derakane 411-350, 1,275g de Butanox (1%) e 0,258g de acelerador CoNap (0,2%) para a placa com 10 camadas.

Essas placas foram fabricadas por SCRIMP com intuito de submetê-las ao ensaio de ultra-som no Laboratório de Ensaio Não-Destrutivos (LABOEND/COPPE/UFRJ). Segue a descrição do procedimento adotado.

Os tecidos de fibra de vidro foram cortados, com tesoura manual, em lâminas quadradas, com dimensões de 150mm x 150 mm para ambas as placas. A resina e os seus componentes foram pesados em uma balança GEHAKA com precisão de 3 casas decimais. Para que houvesse homogeneidade da mistura, os componentes foram colocados em um misturador por 5 minutos a 25,6°C.

Antes de se iniciar o processamento, demarcou-se a área a ser utilizada na placa base por meio de fitas adesivas e aplicou-se uma fina camada de desmoldante (cera de carnaúba empregada em móveis). As placas foram fabricadas por SCRIMP individualmente. A preforma seca foi colocada na área demarcada e sobrepôs-se à preforma uma camada de filme de polietileno perfurado ("bleeder"), uma do tecido absorvedor ("breather") e a bolsa de vácuo selada por fita adesiva nas bordas, de forma a permitir a retirada do excesso de resina e das bolhas de ar. Na saída da mangueira de injeção da resina, foi colocada uma tela de polietileno perfurada para acelerar a resina em direção à placa no início da infusão. Após 24 horas, as placas foram submetidas à pós-cura em uma estufa por 20 horas a 70°C, Figura 3.5.

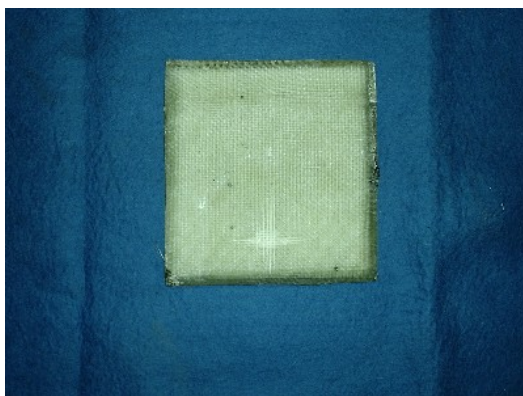


Figura 3.5 – Placas de material compósito fabricadas por SCRIMP para o estudo da metodologia de análise de dano por ultra-som.

3.2.1.3 Processamento de placas compósitas por RTM

As atividades de molde aberto do processamento RTM desenvolvido estão apresentados na Figura 3.6.

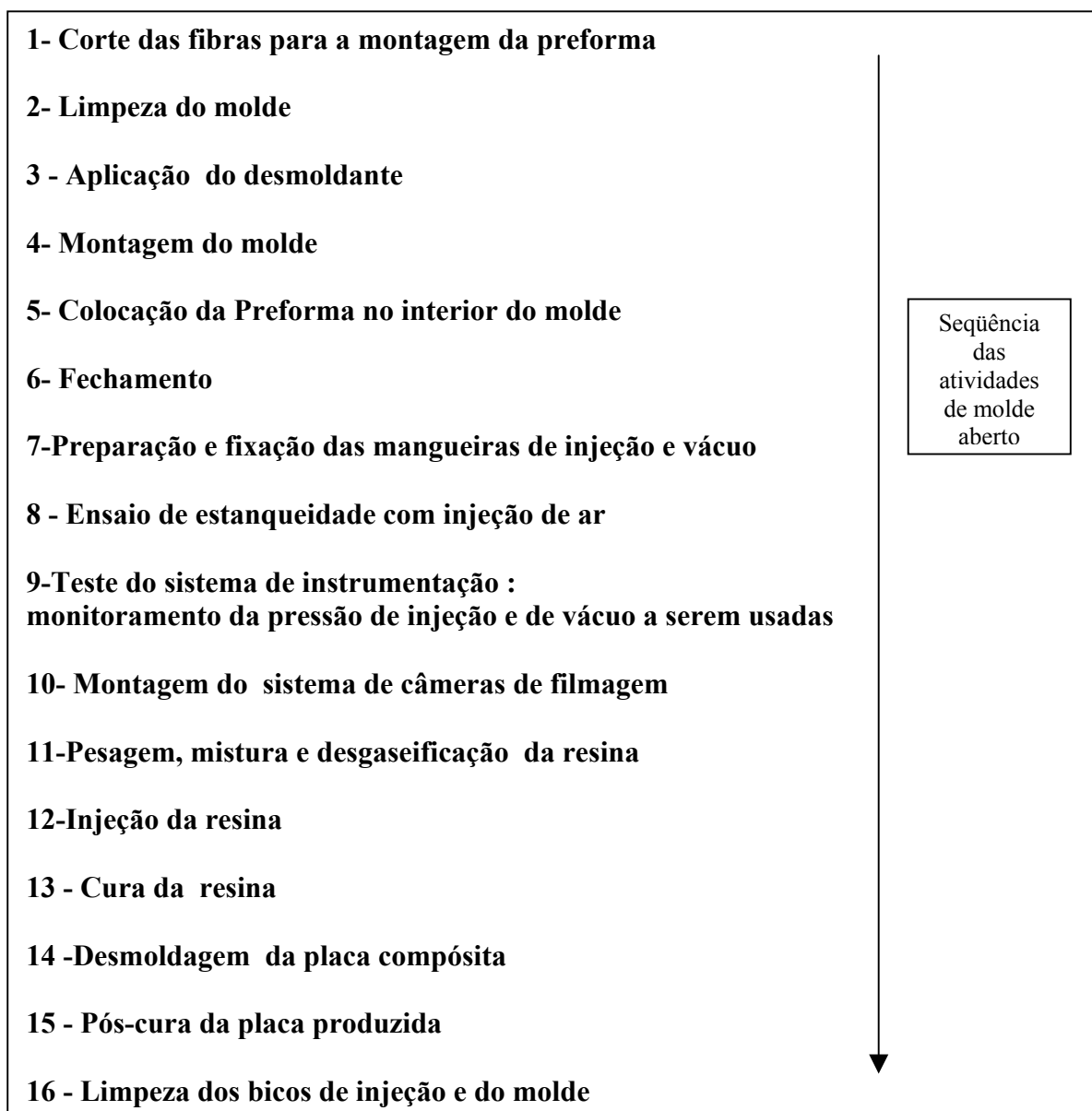


Figura 3.6 – Sequência de atividades de molde aberto do processamento RTM desenvolvido.

Com o início da fabricação das placas compósitas por RTM, percebeu-se que as atividades de molde aberto (“open-molding) ocupavam um significativo tempo na operacionalização do processamento por RTM desenvolvido, sendo neste trabalho de pesquisa um fator controlador da taxa de produção do processamento. Para o processamento de uma placa compósita pelo equipamento RTM desenvolvido, eram necessárias 16 operações básicas, ver Figura 3.6.

As fibras eram cortadas com estilete. A limpeza das conexões, torneiras de passagens, bicos de injeção e de saídas de ar (“vent”) era realizada por uma furadeira de bancada manual. Recipientes de preparação de resina eram descartáveis.

A resina e os seus componentes eram pesados em uma balança GEHAKA com precisão de 3 casas decimais e misturados manualmente por três minutos, sendo depois colocados em uma campânula com vácuo por cinco minutos para desgaseificação a 300mbar. O vácuo era mantido por 2 horas após o preenchimento da preforma pela resina.

Antes de se colocar a preforma no molde, aplicavam-se, no mesmo, três camadas de filme de PVA. A aplicação era feita com pincel, com intervalo de 20 minutos entre cada camada aplicada. Após a desmoldagem, era necessário polimento (com alumina 4) para a preparação da superfície do molde para uma nova aplicação de desmoldante.

3.2.1.4 Planejamento de experimentos

O planejamento de experimentos foi realizado com base no plano fatorial completo com dois níveis e pontos centrais. Os fatores e níveis dos experimentos estão representados na Tabela 3.2. Foram considerados aqui dois fatores como sendo importantes: número de camadas da preforma e a pressão de injeção de resina no molde.

Tabela 3.2 – Fatores e níveis do planejamento de experimentos a ser realizado

Fatores	Níveis
Nº de camadas	22 e 32 camadas
Pressão de injeção	0,5 e 2,5 bar

As variáveis de resposta foram: resistência à tração (ensaio de tração), resistência à compressão (ensaio de compressão), resistência ao cisalhamento interlaminar (flexão curta), permeabilidade (pelo método de medição por imagem da permeabilidade radial e método de medição da permeabilidade transversal), velocidade residual e área delaminada (ensaio balístico).

Como será observado no Capítulo 4, os experimentos realizados seguindo o planejamento apresentado na Tabela 3.2 falharam já que variáveis até então desconhecidas se mostraram importantes para o processamento de materiais compósitos por RTM como por exemplo: o tipo de sistema de injeção de resina usado, a quantidade de resina no reservatório de injeção ou a diminuição da porosidade da preforma com o aumento do número de camadas

de tecido após a sua compressão dentro do molde. Portanto para um melhor entendimento do processamento por RTM, foi idealizada uma nova série de processamentos apresentados nas Tabelas 3.3, 3.4 e 3.5. As tabelas 3.3, 3.4 e 3.5 apresentam as três séries básicas de processamentos realizados:

- Processamentos realizados com variação do sistema de injeção e quantidade de resina
- Processamentos realizados com preformas com menos de 32 camadas de fibras
- Processamentos realizados com preformas com mais de 32 camadas de fibras

Tabela 3.3 - Experimentos realizados com variação do sistema de injeção e quantidade de resina

Experimento	Número de camadas	Pressão de vácuo	Sistema de Injeção
1	32	500 mbar	Campânula com 600 gramas de resina
2	32	300 mbar	Campânula com 1100 gramas de resina
3	32	300 mbar	2 Béqueres de PP com 500 gramas de resina em cada um
4	32	300 mbar	1 Béquer com 900 gramas de resina
5	32	300 mbar	2 Béqueres de PP com 500 gramas de resina em cada um

Tabela 3.4 – Experimentos realizados com preformas com menos de 32 camadas de fibras

Experimento	Número de camadas	Pressão positiva	Pressão de vácuo	Sistema de Injeção
6	22	Atmosférica	300 mbar	2 Béqueres de PP com 500 gramas de resina em cada um
7	25	Atmosférica	300 mbar	2 Béqueres de PP com 500 gramas de resina em cada um
8	28	Atmosférica	300 mbar	2 Béqueres de PP com 500 gramas de resina em cada um
9	28	1,5bar	300 mbar	Campânula com 1000 gramas de resina
10	30	Atmosférica	300 mbar	2 Béqueres de PP com 500 gramas de resina em cada um

Tabela 3.5 – Experimentos realizados com preformas com mais de 32 camadas de fibras

Experimentos	Número de camadas	Pressão positiva	Pressão de vácuo	Sistema de Injeção
11	40	Atmosférica	300 mbar	2 Béqueres de PP com 500 gramas de resina em cada um
12	38	$\geq 1,5\text{bar}$	300 mbar	Campânula com 1000 gramas de resina
13	34	Atmosférica	300 mbar	2 Béqueres de PP com 500 gramas de resina em cada um

3.2.2 METODOLOGIAS DESENVOLVIDAS E/OU USADAS PARA O DESENVOLVIMENTO DO PROCESSAMENTO POR RTM

Serão descritas nesta seção as metodologias usadas para o desenvolvimento da tecnologia de processamento de placas compósitas por RTM.

3.2.2.1 Estudo da cinética de cura e da viscosidade da resina utilizada no processamento por RTM

Essas variáveis foram determinadas através da calorimetria diferencial de varredura (DSC) e da reometria. Corridas no modo dinâmico, com taxa de aquecimento de $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$, faixa de 25°C a 350°C , foram realizadas em um calorímetro diferencial de varredura (DSC) para a determinação da temperatura de processamento e de cura e do calor de reação da resina éster-vinílica.

Com a finalidade de determinar o tempo de gel da resina éster-vinílica, corridas foram realizadas em um reômetro no modo transiente. A viscosidade dessa resina foi determinada através do modo estacionário do reômetro. Cinco réplicas foram utilizadas. A temperatura foi a ambiente, visto que a fabricação das placas compósitas foi feita nessa temperatura.

O DSC (Modelo Diamond, Perkin-Elmer) e o viscosímetro Brookfield modelo RV estão localizados respectivamente no Instituto de Pesquisas Especiais e no Grupo de Química do Centro Tecnológico do Exército.

3.2.2.2 Estudo da permeabilidade de diferentes preformas de fibra de vidro tipo E

Metodologia de Permeabilidade Radial no Plano

O método de medição de permeabilidade (K_x e K_y) no plano selecionado para esta pesquisa foi o da Medição por Imagem da Permeabilidade Radial, fazendo uso de pressão constante e medindo a velocidade do escoamento por filmagem. Por esse método, a permeabilidade pode ser medida pela aplicação de um fluido de teste em um molde transparente, contendo no seu interior a preforma, e filmando o avanço da frente de escoamento sobre a superfície da preforma, ver Figuras 3.7 e 3.8.

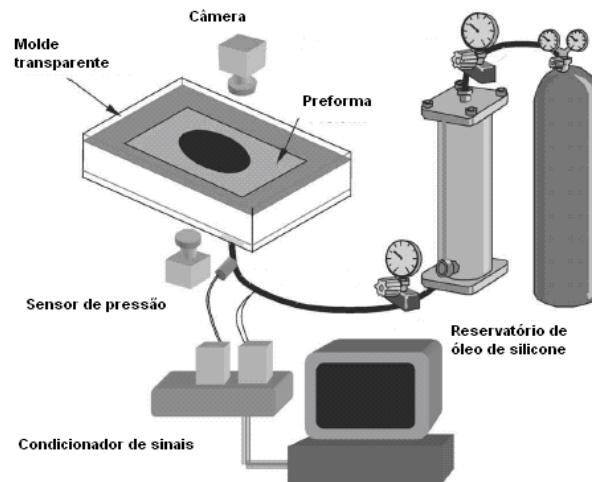


Figura 3.7 - Esquema do método por Imagem da Permeabilidade Radial.

A permeabilidade é bastante influenciada pela variação na arquitetura dos tecidos. Portanto, a forma e a velocidade com que a frente de escoamento avança sobre a preforma estão diretamente ligadas à permeabilidade dos tecidos. Para tecidos isotrópicos, o formato da frente se expandindo é circular; para tecidos anisotrópicos, é uma elipse, ver Figura 3.8. Gravando e processando essa imagem, pode-se calcular a velocidade da frente de escoamento para a solução da equação de Darcy. Essa metodologia é a mesma aplicada em diversos trabalhos publicados na literatura.

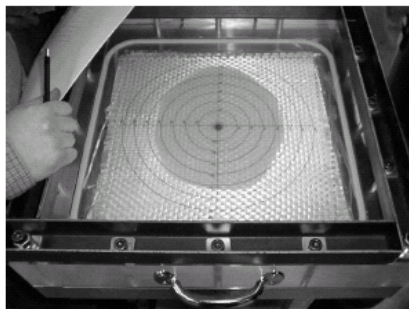


Figura 3.8 - Exemplo de filmagem do método por Imagem da Permeabilidade Radial.

Para relacionar a forma da elipse apresentada pela resina quando a mesma avança em um meio anisotrópico com a equação de Darcy, foi escolhido o modelo matemático proposto por Chan e Hwang, ver seção 2.3.2.1. Também tentou-se desenvolver um software para cálculo automático da Permeabilidade no plano, baseado nesse modelo matemático, com apoio da empresa DRV, ver seção 4.2.11.

Seleção do fluido de teste para o ensaio de permeabilidade

Em geral, as resinas usadas em um ciclo de produção são caras e de difícil limpeza, o que dificulta a sua aplicação no estudo da permeabilidade. Portanto, utilizam-se fluidos de teste para a realização dessa análise. As especificações para a seleção do fluido de teste para o ensaio de permeabilidade foram as seguintes: ter comportamento newtoniano, ser quimicamente não agressivo para a preforma e para a instalação, ter baixa viscosidade preferivelmente que possa ser ajustada, ter baixo custo, ter facilidade de limpeza e ter disponibilidade.

Os mais diversos fluidos de teste já foram utilizados em pesquisa: óleos minerais, óleo de silicone, óleo de motor, glucose de milho. A glucose de milho foi selecionada já que possui todas as propriedades desejadas. Sem diluição, ela possui viscosidade em geral muito elevada (≈ 7500 cp), mas pode facilmente ser diluída com água para obter a viscosidade apropriada. Entretanto, a viscosidade da glucose de milho é muito dependente da variação da temperatura; assim, deve-se conhecer o seu comportamento com relação a essa variação. Utilizou-se aqui a glucose de milho, comercialmente conhecida como Mel Karo.

Cálculo da densidade do fluido de teste

Determinaram-se as densidades da glucose de milho sob diversas temperaturas (25°C, 30°C, 35°C, 40°C, 45°C) e com diferentes diluições (10%, 20%). Segue a Tabela 3.6 com o resultado desse ensaio. Para que houvesse homogeneidade das amostras diluídas, essas foram colocadas, antes das medições, sob agitação mecânica com o spindle nº1 do viscosímetro, por um período de 15 minutos. Para a determinação das densidades, as amostras foram colocadas em um proveta de 100ml, imersas em banho termostático Colora em cada temperatura-teste, sendo a seguir inseridos densímetros Baumé, um a um, até que fosse possível a leitura da densidade.

Tabela 3.6 - Densidade do fluido de teste

Amostras	Densidade a 25°C	Densidade a 30°C	Densidade a 35°C	Densidade a 40°C	Densidade a 45°C	Redução da densidade com a variação da temperatura de 25°C para 45°C (%)
Glucose de Milho(sem diluição)	1,413	1,412	1,411	1,407	1,406	0,49
Glucose de Milho (10% de diluição)	1,38	1,379	1,376	1,372	1,37	0,72
Glucose de Milho (20% de diluição)	1,349	1,347	1,346	1,345	1,343	0,44

Dentro da faixa analisada de diluição e temperatura, a densidade da glucose de milho foi pouco sensível à variação de temperatura.

Cálculo da viscosidade do fluido de teste

As viscosidades da glucose de milho foram determinadas para diversas temperaturas (25°C, 30°C, 35°C, 40°C, 45°C) e com diferentes diluições (10%, 20%). Para que houvesse homogeneidade das amostras diluídas, essas foram colocadas, antes das medições, sob agitação mecânica com o spindle nº1 do viscosímetro, por um período de 15 minutos. Foi usado o viscosímetro Brookfield, modelo RV, além de 2 a 3 spindles para cada amostra/temperatura de teste. Para a determinação da viscosidade, 500 ml das amostras foram

colocados em um béquer de 600ml, imerso em um banho termostático para cada temperatura-teste; em seguida, efetuou-se a leitura da viscosidade. De posse da leitura multiplicada por um fator do equipamento, que é função do spindle usado e da velocidade de rotação empregada, obtém-se a viscosidade em centipoise (cp). Segue a Tabela 3.7 e o gráfico da Figura 3.9 com os resultados desse ensaio.

Tabela 3.7 - Viscosidade (η) do fluido de teste

Amostras	η (cps) 25°C	η (cps) 30°C	η (cps) 35°C	η (cps) 40°C	η (cps) 45°C	Redução da viscosidade com a variação da temperatura de 25°C para 45°C (%)
Sem diluição	6896	5070	2417,3	1652,5	1241	82,00
10% de diluição	1045,2	733,2	537	389	272,5	73,93
20% de diluição	339,7	236,9	179,8	138,9	120,4	64,56
Redução da viscosidade com a variação na diluição de 0% para 20%	95,07	95,33	92,56	91,59	90,30	

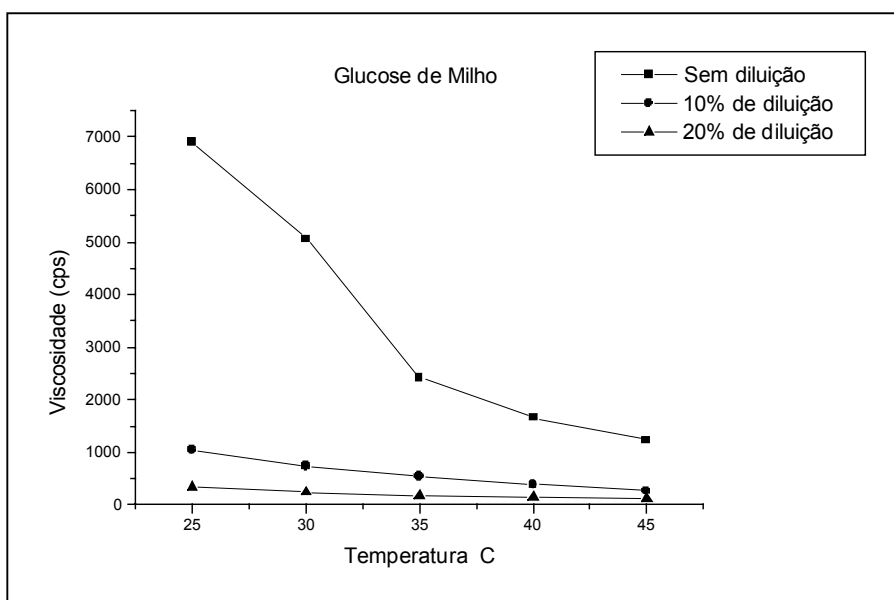


Figura 3.9 – Variação da viscosidade da glucose de milho com a temperatura (25°C, 30°C, 35°C, 40°C, 45°C) e com diferentes diluições (10%, 20%).

Dentro da faixa analisada de diluição e temperatura, a viscosidade da glucose de milho foi bastante sensível tanto à variação de temperatura como de diluição.

Não foi possível o **cálculo da permeabilidade transversal**, devido à constatação de que o preenchimento das preformas foi da borda para o centro (com intenso race-tracking) e não perpendicularmente à espessura, ver Capítulo 4.

3.2.2.3 Estudo da influência da fração volumétrica de fibra da preforma

A compactação da preforma causa uma deformação das fibras e uma acomodação das camadas do tecido. Portanto, no processamento por RTM, para uma mesma espessura de placa pode-se variar a fração de fibra já que se pode comprimi-las no interior do molde. Dessa forma, podem-se alterar as propriedades mecânicas de um compósito fabricado por RTM sem alterar a sua espessura.

A fração volumétrica de fibras (V_f), para uma dada espessura, pode ser determinada pela seguinte equação, Luo *et al.*[2001]:

$$V_f = \frac{nA_f}{h\rho} \quad (3.1)$$

em que n é o número de camadas de tecidos, A_f é a gramatura do tecido (1100g/m^2), h é a espessura da preforma (25,4 mm) e ρ é a densidade da fibra ($2,6\text{g/cm}^3$). Baseado nessa equação, foi plotado o gráfico número de camadas x fração volumétrica, ver Figura 3.10.

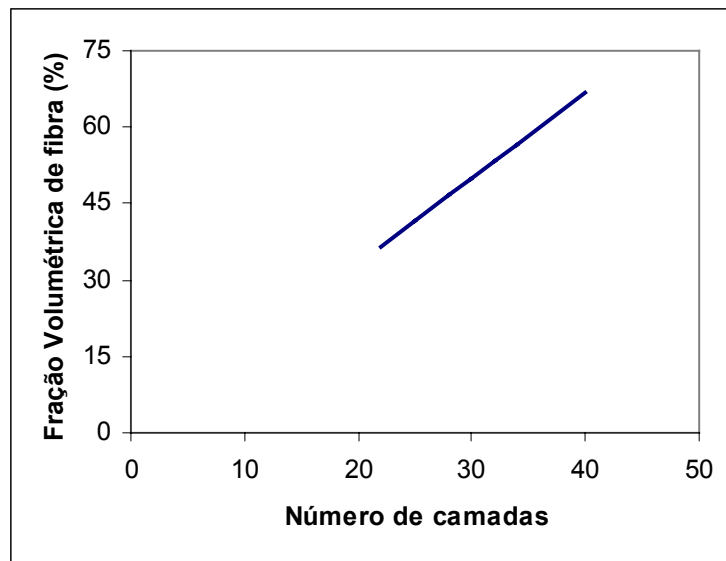


Figura 3.10 - Gráfico de Número de camadas x Fração volumétrica de fibra, baseando-se na equação proposta por Luo *et al.* [2001].

Nesta pesquisa, a faixa de fração volumétrica de fibra que será usada ficará entre 22 camadas (aprox. 36%) e 40 camadas (aprox. 66%) para uma placa de material compósito de espessura constante de 25,4 mm (1”).

Os procedimentos da norma ASTM D-3171 foram usados para a determinação da fração volumétrica de fibras, resina e vazios e o método hidrostático foi usado para a medição da densidade.

3.2.2.4 Metodologia de corte das placas compósitas por RTM

Com o início da fase de ensaios mecânicos dos materiais compósitos, surgiu a necessidade de se estabelecer um procedimento de corte para as placas processadas.

A primeira tentativa foi com a máquina serra de fita dual da Seção de Apoio Mecânico (SAM) do CTEEx, porém o corte foi bastante irregular. A segunda tentativa foi usar a fresa vertical KONE KFF 30 do Laboratório de Optrônica e Sensores (LOS) do Grupo de Optrônicos do CTEEx. O corte das placas compósitas feitas com esse equipamento foi aprovado pelo seu acabamento e precisão, ver Figura 3.11.



Figura 3.11 – (a) Fresa vertical KONE KFF 30 e (b) corte de placa compósita por essa fresa.

Foram testados dois tipos de fresa com diferentes espessuras : 1 mm e 3 mm. A fresa de 1 mm durante o corte da placa compósita ficou superaquecia e foi dispensada do uso. Já a fresa de 3mm de espessura, além de não superaquecer permitiu um corte suave, Figura 3.11(b). Para essa fresa, foram testadas duas profundidades de corte: 5 mm e 10 mm. A profundidade de 10 mm rapidamente terminava o serviço de corte mas gerava grande esforços sobre a fresa; portanto, ficou estabelecido que a profundidade de corte de trabalho seria 5mm.

3.2.2.5 Caracterização microestrutural dos compósitos fabricados

A caracterização microestrutural dos compósitos fabricados foi realizada através de microscopia estereoscópica e análise de fotos digitais. Para análises por microscopia estereoscópica, foi utilizado o microscópio estereoscópico da marca STEMI, modelo SV6 KL1500, disponível no Laboratório de Compósitos do PEMM/COPPE.

3.2.2.6 Caracterização mecânica dos compósitos fabricados

Esta seção apresenta uma explanação dos métodos usados na realização dos ensaios estáticos de tração, compressão e resistência interlaminar ao cisalhamento. Existem diversos métodos para avaliação das propriedades mecânicas de materiais compósitos, ver Tabela 3.8.

Tabela 3.8 - Métodos para avaliação das propriedades mecânicas de materiais compósitos

Ensaio Mecânico	Observação
Tração	Predominam as propriedades da fibra
Compressão	Predominam as propriedades da fibra
Flexão	Estado de tensão compressivo e trativo
Charpy	Estado de tensão complexo: ruptura da fibra, da matriz, delaminação
Cisalhamento interlaminar	Predominam as propriedades da interface fibra/matriz

A caracterização mecânica foi feita por meio de ensaios de tração, compressão e cisalhamento interlaminar.

Ensaio de Cisalhamento Interlaminar dos compósitos fabricados por RTM

Como pode ser observado na Tabela 3.8, o único ensaio que não é dominado pelas propriedades das fibras é o Ensaio de Cisalhamento Interlaminar (ILSS). A Resistência Interlaminar de um compósito é dominada pelas propriedades da matriz e pela resistência ao cisalhamento da interface fibra-matriz. O valor dessa resistência é um forte indicador da

qualidade e sucesso de um processamento. Esse ensaio mecânico é bastante sensível a variações nas condições de processamento de um compósito, Michaud [2000].

A Resistência ao Cisalhamento Interlaminar foi obtida pelo ensaio de flexão curta em três pontos, segundo a norma ASTM D 2344/D2344M. Foi usada a máquina de ensaios EMIC, modelo DL 10000, com célula de carga de 100kN, disponível na COPPE/UFRJ, a uma taxa de deslocamento constante igual a 1 mm/min. O dispositivo usado para o ensaio está esquematizado na Figura 3.12 e mostrado na Figura 3.13. Os corpos de prova possuíam comprimento de 153 mm, largura de 25,4mm (1”) e espessura de acordo com o número de camadas do compósito, ver Capítulo 4.

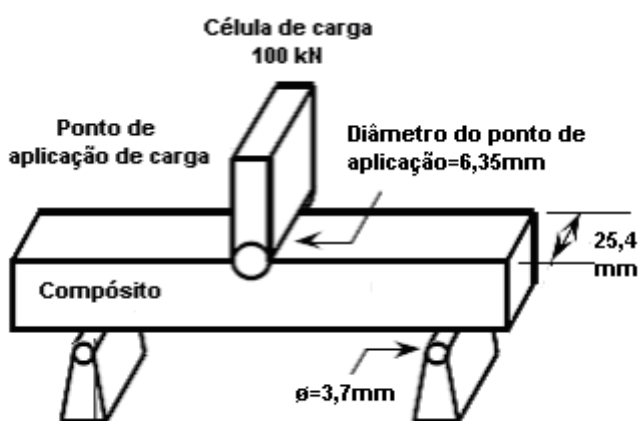


Figura 3.12 – Esquema de dispositivo para ensaio de flexão curta em três pontos.



Figura 3.13 - Dispositivo usado nos ensaios de flexão curta em três pontos.

A tensão cisalhante máxima ocorre no centro do corpo de prova e é calculada pela seguinte equação :

$$\tau = \frac{3.P}{4bd} \quad 3.2$$

τ = Tensão cisalhante(MPa)

P = Carga máxima observada durante o teste (N)

b = largura do corpo de prova (mm)

d = espessura do corpo de prova (mm)

Foram ensaiados 5 corpos de prova retirados de cada uma das placas compósitas fabricadas com êxito (28, 30 e 32 camadas). O esquema da Figura 3.14 mostra a posição de retirada dos corpos de prova das placas compósitas processadas por RTM.

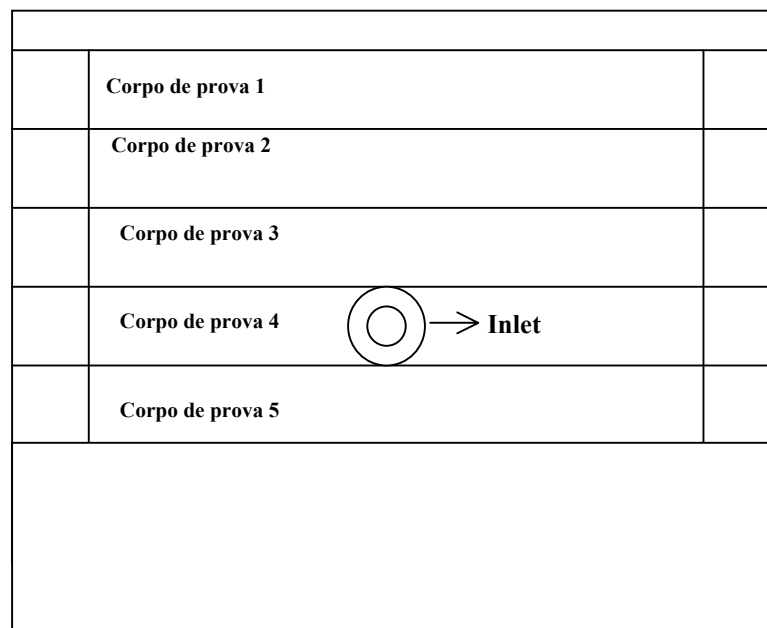


Figura 3.14 – Posição de retirada dos corpos de prova das placas compósitas processadas por RTM para uso no ensaio de resistência ao cisalhamento interlaminar.

Para se conseguir o máximo de Resistência Interlaminar dos compósitos produzidos por RTM, cada fibra individual deve estar completamente “molhada” pela resina líquida e a quantidade de vazios deve ser a menor possível garantindo uma melhor interação da fibra/matriz. A Resistência ao Cisalhamento Interlaminar é fortemente dependente da forma, tamanho e distribuição de vazios. Pearce *et al.* [1998] afirmam em seu trabalho que a

presença de vazios na superfície de um compósito não altera o valor da Resistência Interlaminar ao Cisalhamento. Mallik [1993] e Pahr *et al.* [2002] afirmam que a tensão gerada no ensaio de flexão curta em três pontos é parabólica, sendo zero nas extremidades e máxima no centro, Figura 3.15. Portanto, a presença de vazios no centro de um compósito, onde a carga é máxima, é mais prejudicial à Resistência Interlaminar ao Cisalhamento do que a presença de vazios na superfície do compósito.

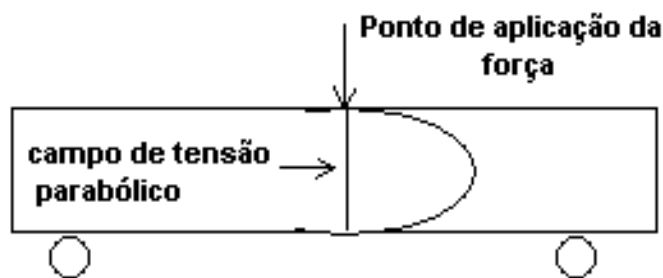


Figura 3.15 - Tensão gerada no ensaio de flexão curta em três pontos é parabólica, sendo zero nas extremidades e máxima no centro.

Portanto, para um real entendimento do ensaio de cisalhamento interlaminar é necessário fazer uma correlação entre os valores de tensão cisalhante e a distribuição dos vazios nos compósitos. Para tentar fazer essa correlação, foi testada uma metodologia de ensaio por ultra-som para os compósitos fabricados, ver seção 3.2.2.8. Porém a técnica de ultra-som não logrou êxito; dessa forma, foi decidido trabalhar com microscopia estereoscópica e análise de imagens digitais, como apresentados nos trabalhos de Pearce *et al.* [1998] e Abraham *et al.* [1998].

Ensaio de tração dos compósitos fabricados por RTM

O primeiro passo para viabilização do ensaio de tração foi a definição das dimensões do corpo de prova já que um fator importante no controle do estado de tensão nos compósitos é a sua relação espessura/comprimento (efeito da geometria). Os compósitos espessos exibem estado de tensão tridimensional mesmo quando submetidos apenas a cargas uniaxiais, norma MIL-HDBK-17-1F [2002].

A primeira idéia foi usar um corpo de prova com a espessura aproximadamente de 25,4 mm (ou seja na espessura da própria placa compósita). Para evitar problemas de adesão dos tabs nos corpos de prova, ficou definido que seria usado em substituição aos tabs o tecido (pano) abrasivo de esmeril e já que a fibra de vidro é isotrópica, definiu-se também que seriam testados desenhos de corpos de prova tanto com seção transversal constante retangular como em formato de gravata (“dog bone”), semelhante ao usado por Kelkar et al.[2006]. O uso de tecido (pano) abrasivo de esmeril como tab se encontra previsto na norma ASTM D3039/3039M e recomendada na MIL- HDBK-17-1F[2002].

A Tabela 3.9 apresenta os tipos de corpos de prova fabricados e testados para a definição das dimensões e forma do corpo de prova de tração final.

Tabela 3.9 - Tipos de corpos de prova fabricados e testados para o ensaio de tração

Corpos de prova Tração	Formato	Espessura (mm)
Tipo 1	Rectangular	Aproximadamente 25,4
Tipo 2	Gravata	Aproximadamente 25,4
Tipo 3	Gravata	12,7

Devido à grande espessura dos corpos de prova Tipo 1 e Tipo 2, foi necessário o uso de uma máquina de ensaio de tração de 100 ton com garra hidráulica de grande abertura, disponível no LABEST/PEC/UFRJ, Figura 3.16.



Figura 3.16 – Máquina de ensaio de tração do LABEST/PEC/UFRJ.

O corpo de prova Tipo 1 foi o primeiro a ser ensaiado na máquina de ensaio de tração de 100ton do LABEST/PEC/UFRJ, fazendo uso como tab do tecido abrasivo de esmeril, ver Figuras 3.17 e 3.18.

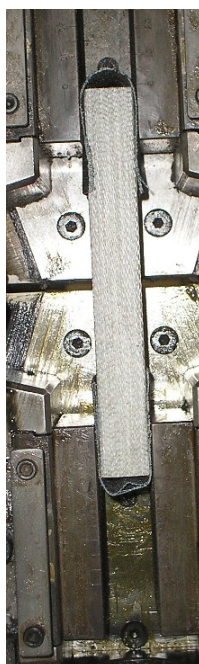


Figura 3.17 – Corpo de prova Tipo 1 na máquina de ensaio de tração de 100ton.



Figura 3.18 – Corpo de prova de tração Tipo 1: aproximadamente 25, 4 mm de espessura e área de seção retangular constante.

Porém não houve sucesso nesse ensaio, porque o corpo de prova escorregou da garra, Figura 3.19. O atrito gerado pelo aperto da garra da máquina e transmitido ao corpo de prova pelo tecido de esmeril foi insuficiente. Outro problema é que a garra dessa máquina de ensaio é hidráulica, não permitindo ajuste no aperto do corpo de prova.



Figura 3.19 – Corpo de prova Tipo 1 escorregando da garra da máquina de ensaio de tração de 100 ton.

O segundo corpo de prova a ser ensaiado foi o Tipo 2, ver Figura 3.20.

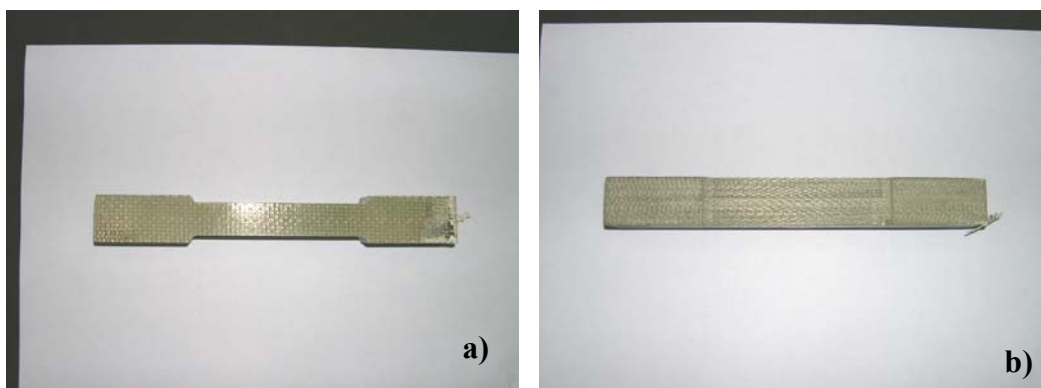


Figura 3.20 – Corpo de prova Tipo 2 para teste do ensaio de tração: (a) vista frontal e (b) vista lateral.

O corpo de prova Tipo 2 também foi ensaiado na máquina de ensaio de tração de 100ton do LABEST/PEC/UFRJ. Com a falha no ensaio anterior do tecido abrasivo de esmeril, foi decidido não usar esse tecido como tab nesse novo experimento; dessa vez o contato foi direto entre o corpo de prova e a garra da máquina.

Mais uma vez não houve sucesso: o corpo de prova escorregou da garra, uma vez que a resistência à tração do corpo de prova venceu o atrito gerado pela garra. Com o insucesso dos corpos de prova de aproximadamente 25,4mm de espessura (Tipo 1 e Tipo 2), foi resolvido testar um corpo de prova com a metade da espessura (Tipo 3 da Tabela 1), ou seja, 12,7 mm de espessura, ver Figura 3.21. Com a redução da espessura do corpo de prova, não era mais necessário o uso da máquina de tração para corpos espessos do LABEST/PEC/UFRJ e o ensaio de tração pode ser realizado na EMIC do Laboratório de Compósitos da COPPE/UFRJ, ver Figura 3.22.

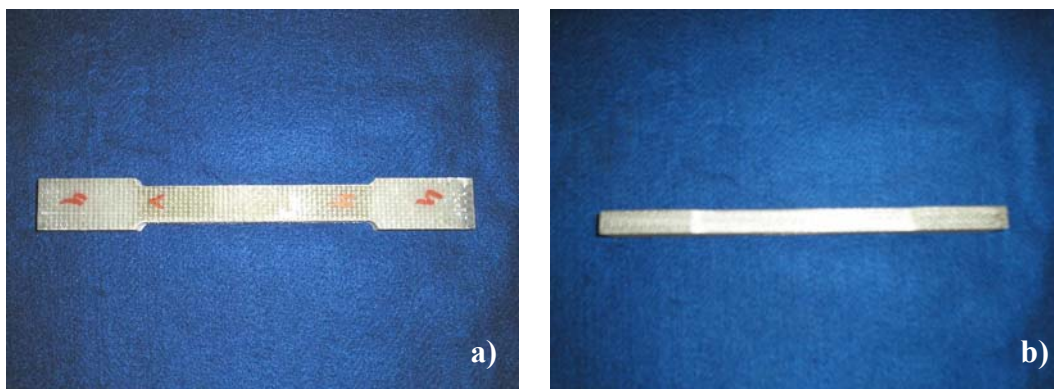


Figura 3.21 – Corpo de prova Tipo 3 para o ensaio de tração: (a) vista frontal e (b) vista lateral.

O corpo de prova Tipo 3 ensaiado na EMIC não usou o tecido abrasivo de esmeril como tab já que a EMIC possui controle manual de aperto da garra contra o corpo de prova. O corpo de prova Tipo 3 ensaiado logrou sucesso. A fratura apresentada foi característica do ensaio de tração e fora da zona de concentração de tensão (próximo das garras), ver Figura 3.22.

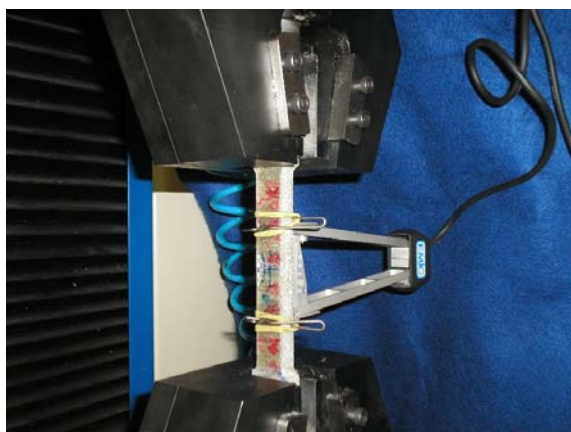


Figura 3.22 – Corpo de prova Tipo 3 ensaiado na EMIC do Laboratório de Compósito/COPPE/UFRJ.

O corpo de prova tipo 3 e a máquina de ensaio de tração EMIC do Laboratório de Compósito/COPPE/UFRJ foram os escolhidos para a realização dos ensaios de tração. Foram produzidos 6 corpos de prova. O esquema da Figura 3.23 representa a posição de retirada dos corpos de prova da placa compósita, e a taxa de deslocamento foi de 2 mm/min seguindo

a norma ASTM D3039/3039M. O ensaio foi instrumentado, colocando-se um extensômetro do tipo clip gage no corpo de prova, a fim de avaliar o módulo de elasticidade do compósito.

	Corpo de prova 1	
	Corpo de prova 2	
	Corpo de prova 3	
	Corpo de prova 4 	
	Corpo de prova 5	
	Corpo de prova 6	

Figura 3.23 – Esquema de retirada dos corpos de prova para ensaio de tração da placa compósita.

Caracterização de ensaio de compressão das placas compósitas processadas por RTM

No ensaio de compressão de materiais compósitos, a definição da razão de aspecto, razão entre comprimento/espessura (L/e), dos corpos de prova é importante. Um corpo de prova com valor de L/e grande pode sofrer flambagem e com um valor de L/e pequeno pode haver concentração de tensão na área do corpo de prova em contato com a placa (ou garra) de compressão e conseqüentemente falha prematura do compósito. Schultheisz e Waas [1996] e Carlsson e Pipes [1997].

A norma de ensaio de compressão de compósitos ASTM D3410 recomenda o uso de uma garra especial (IITRI) para a realização do ensaio de compressão de compósitos. O Army Research Laboratory (ARL) do Exército dos Estados Unidos da América recomenda como ferramenta de varredura o ensaio de compressão de compósitos de forma tradicional (compressão direta do corpo de prova entre duas placas de aço). Vaidya *et al.* [2001] e Anand e Gupta [1995] ensaiaram com o método tradicional de compressão, compósitos de fibra de vidro S-2/resina éster vinílica e compósitos carbono-carbono, respectivamente. Neste trabalho, foi usado o método tradicional para o ensaio de compressão dos compósitos. Foi

usado, para a definição das dimensões do corpo de prova para ensaio de compressão, o trabalho de Vaidya *et al.* [2001], ver Figura 3.24. As dimensões dos corpo de prova de compressão a serem usados neste trabalho são: largura (L) = 25,4 mm, espessura (e) = 25,09 mm (da placa) e altura (h) = 35 mm.

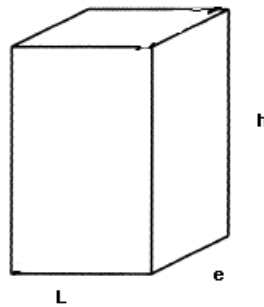


Figura 3.24 – Esquema da dimensão do corpo de prova de compressão.

Foram preparados 4 corpos de prova da placa compósita processada por RTM. Antes do ensaio, os mesmos eram envoltos em teflon para a diminuição do atrito com a placa de compressão da máquina de ensaio. O ensaio foi realizado no LABEST PEC/UFRJ fazendo uso da máquina de 100 ton. (não fazendo uso das peças apresentadas na seção 3.2.3.9), ver Figura 3.25, com taxa de deslocamento de 0,5 mm/min. Os 4 corpos de prova foram obtidos a partir do corte de um 1 corpo de prova de tração não-ensaiado.



Figura 3.25 - Ensaio de compressão do compósito na máquina de ensaio do LABEST/PEC/UFRJ.

3.2.2.7 Ensaio balístico dos materiais compósitos processados

Metodologia do ensaio balístico

Os ensaios balísticos de compósitos fabricados por RTM foram realizados no Campo de Provas da Marambaia do Centro Tecnológico do Exército, utilizando-se uma bancada para ensaios balísticos. A bancada contém um cronógrafo AVL B212, duas barreiras óticas AVL B470, para medição da velocidade do projétil, e um provete de tiro de onde é disparado o projétil, Figura 3.26. Os dados das barreiras óticas foram processados por um computador de tiro.

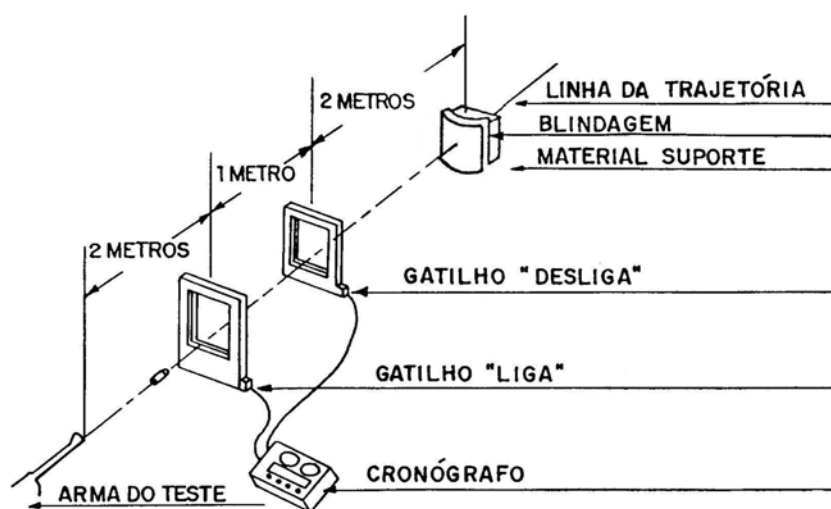


Figura 3.26 - Esquema da bancada para ensaios balísticos.

O alvo é fixado em uma armação metálica por 4 grampos presos a cada uma de suas extremidades e a munição escolhida foi a de 7,62 mm (AP) perfurante (projétil com núcleo de aço), fabricada pela Companhia Brasileira de Cartuchos. O projétil possui massa de $9,7 \cdot 10^{-3}$ kg (9,7 g) e velocidade inicial de 838 ± 15 m/s, Figura 3.27.



Figura 3.27 - Projétil 7,62 mm (AP) perfurante.

Metodologia de medição da velocidade residual

Reduzir a penetração de um projétil é o principal objetivo de um sistema de blindagem. A redução de penetração está ligada diretamente à redução de energia cinética do projétil e, portanto, conhecer a velocidade residual de um projétil é um indicador importante para a determinação da eficiência balística dos materiais, embora não seja utilizada pela norma de certificação. Nos ensaios, foram empregadas duas barreiras óticas, uma antes do alvo para medição da velocidade de impacto e outra por trás do alvo para medição da velocidade residual dos projéteis, caso haja perfuração. Os equipamentos necessários para realização do ensaio balístico estão disponíveis no Campo de Provas da Marambaia (CPrM).

3.2.2.8 Metodologia para análise do dano por delaminação e porosidade nas placas compósitas

Foram testadas três técnicas para o estudo da área delaminada das placas espessas de material compósito (25,4 mm ou 1" de espessura) submetidas ao ensaio balístico: lâmpada incandescente, raio X e ultra-som.

Lâmpada incandescente

Tradicional método de análise de área delaminada de compósitos de pouca espessura, consiste em iluminar, por lâmpada incandescente comum, a área delaminada. Dessa forma, pode-se observar o dano e calcular a sua área, já que a área delaminada aparece como uma mancha no compósito.

Quando iluminou-se a placa laminada de fibra de vidro de 32 camadas (aprox. 25,4 mm de espessura), apresentada na seção 3.2.2, com uma lâmpada de 700W (usada em estúdios de fotografia), o feixe luminoso não conseguiu atravessar a placa devido a sua grande espessura e nenhuma informação com relação à área delaminada foi obtida com esse método. Portanto, o método por lâmpada incandescente foi descartado para o estudo de área delaminada de placas espessas de material compósito.

Análise por raio X

Depois do insucesso colhido com a técnica com a lâmpada incandescente, iniciaram-se as análises das placas de material compósito usando a técnica de raio X. O método de análise por Raio X está baseado na mudança de atenuação da radiação eletromagnética (Raios-X), causada pela presença de descontinuidades internas; quando a radiação passa pelo material, deixa sua imagem gravada em um filme radiográfico.

A primeira irradiação por raio X foi realizada no CTEEx com 95Kv e 32 mAs na placa 1 (300 x 300 x 25,4 mm de espessura), ver seção 3.2.2; foram feitas imagens tanto frontal como lateral, porém sem nenhum resultado.

A segunda irradiação por Raio X foi realizada no LIN/COPPE/UFRJ com 100Kv e 4 mAs na placa 1, ver seção 3.2.2; foram feitas imagens tanto frontal como lateral, porém sem nenhum resultado. Análise de raio X para estudo do dano por delaminação foi realizada, mas sem qualquer sucesso.

Análise por ultra-som

O ensaio de inspeção por ultra-som foi realizado no Laboratório de Ensaio Não-Destrutivo (LABOEND) do PEMM-UFRJ. Foi usado o método de pulso-eco, onde um transdutor é usado em um dos lados da peça a ser inspecionada e funciona como transmissor e receptor simultaneamente, ver Figura 3.28. A análise por ultra-som das placas foi orientada pelo trabalho de Erickson e Chung. Foi usado óleo como acoplante e a velocidade da onda de som foi considerada no compósito como sendo de 3000 m/s.

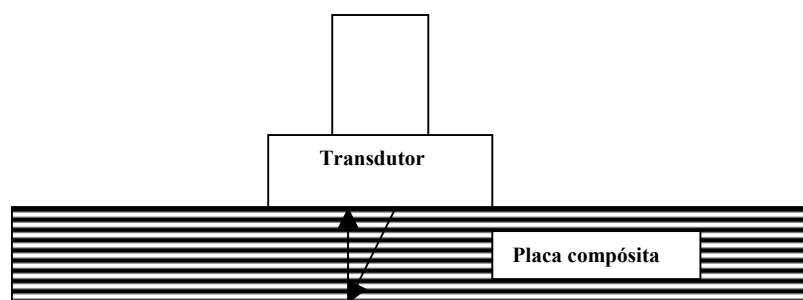


Figura 3.28 - Esquema do método de pulso-eco por ultra-som.

Em um primeiro momento, foram analisadas duas placas de laminado polimérico ($300 \times 300 \text{ mm}^2$) de 25,4 mm de espessura, que foram apresentadas na seção 3.2.2. Foram usados nesse ensaio diversos diâmetros de transdutores e faixas de frequência. Porém, nenhum resultado foi obtido com esse método. Mergulhou-se então uma das placas em um aquário cheio com água. Mais uma vez foram utilizados diversos diâmetros de transdutores e faixas de frequência, porém nenhum resultado foi obtido. A falta de resultado inicial nas placas analisadas poderia estar associada ao processo de fabricação usado (laminação manual seguida por uso da bolsa de vácuo, ver seção 3.2.2). Esse tipo de processamento poderia ter gerado uma quantidade de defeitos tão grande que teria invalidado a eficiência do ensaio por ultra-som.

Para se tentar eliminar a dúvida se foi ou não o processo de fabricação que invalidou o ensaio, confeccionaram-se então duas placas de material compósito para a calibração do ultra-som por SCRIMP, ver seção 3.2.2, ambas com 150 mm x 150 mm de área e 1" e 10 mm, de espessura respectivamente. Bons resultados foram obtidos em diversos pontos de ambas as placas, quando foi utilizado o transdutor com diâmetro de aproximadamente 1" e faixa de frequência de 1 Megahertz, o que possibilitou afirmar que a espessura das placas foi detectada usando o ultra-som nesses pontos. Mesmo obtendo um bom sinal em ambas as placas, em alguns pontos das mesmas, a inspeção por ultra-som não resultou em nenhuma informação de interesse. Provavelmente, a estrutura laminar com múltiplas interfaces dos laminados poliméricos analisados pode ter sido responsável pelo o insucesso do teste. Portanto, a técnica de ultra-som foi descartada. Rinehart [1960].

Não foi possível desenvolver nenhuma técnica capaz de avaliar a área delaminada nem a porosidade dos compósitos.

3.2.3 MONTAGEM, PROJETO E FABRICAÇÃO DE EQUIPAMENTOS E DISPOSITIVOS

Antes de se iniciar o desenvolvimento do processamento por RTM uma pergunta deveria ser respondida: qual tipo de equipamento de RTM deveria ser projetado e fabricado? Como resposta a essa pergunta inicial e com base na literatura técnico - científica consultada, foram gerados os seguintes requisitos técnicos a serem atingidos pelo projeto:

- O equipamento de RTM deveria ser capaz de fabricar as placas compósitas e simultaneamente estudar o escoamento da resina no interior do molde.
- Possuir estrutura rígida e leve, além de mobilidade.
- Capaz de operar com moldes de vários tamanhos.
- Ser capaz de monitorar a pressão de injeção, de vácuo e o escoamento da resina no interior do molde.
- Fazer uso de peças de fácil limpeza e resistentes à corrosão.

Diversas áreas da engenharia foram utilizadas para se projetar e fabricar os equipamentos do processamento por RTM como por exemplo: resistência dos materiais, mecânica dos fluidos, usinagem, engenharia de armamento, técnicas de desenho geométrico, tratamento térmicos dos metais. Para gerenciar as várias variáveis de engenharia envolvidas nesse desenvolvimento, foi adotada uma metodologia básica de projeto, Figura 3.29.

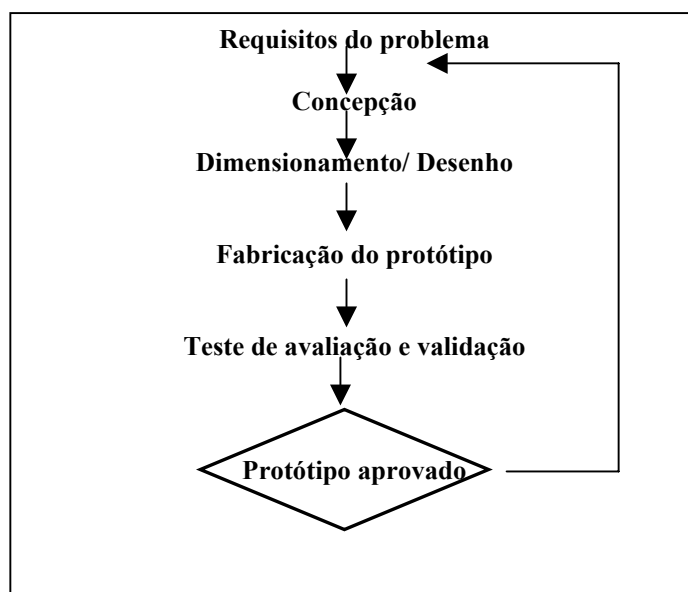


Figura 3.29 – Fluxograma da metodologia de projeto adotada neste trabalho de pesquisa.

O equipamento de RTM desenvolvido é de concepção própria e foi construído com apoio de várias empresas e grupos de pesquisa espalhados pela COPPE/URFJ e pelo CTEEx. Uma série de equipamentos e dispositivos foram projetados, desenvolvidos e fabricados e estão esquematizados no fluxograma da Figura 3.30.

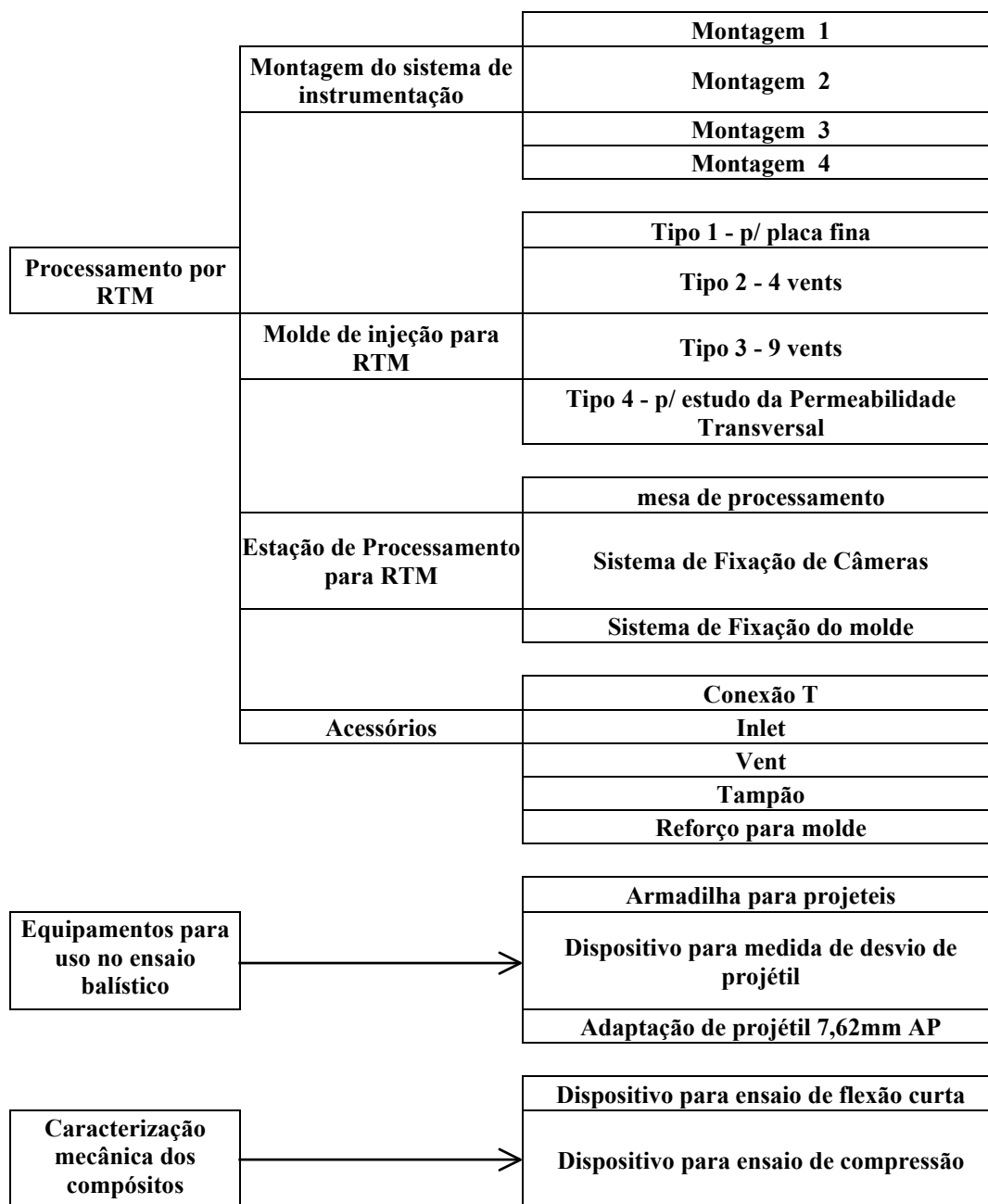


Figura 3.30 - Fluxograma dos equipamentos e dispositivos projetados e/ou fabricados.

Um balanço geral das atividades de projeto e desenvolvimento deste trabalho de pesquisa será dado a seguir :

- Foram desenvolvidos 20 projetos de equipamentos e dispositivos. Desses 20 projetos, 18 se transformaram em protótipos.
- O equipamento de RTM foi construído usando materiais e serviços de 8 empresas (RioVeda, Resiline, Aliança Brito, Conectudo, Tenax, Paumar, Fertools e DRV), oficina mecânica do Instituto de Física da UFRJ e 18 grupos de pesquisa espalhados pela COPPE/UFRJ (Laboratório de Ensaaios Não-Destrutivos, Laboratório de Instrumentação Nuclear, Laboratório de Estruturas, Laboratório de Propriedades Mecânicas, Laboratório de Compósitos), LADEQ da Escola de Química e pelo CTEEx (Grupo de Materiais, Mísseis e Foguetes, Tecnologia da Informação, Armamento, Química, Optrônicos, Seção de Apoio Mecânico, Seção de Modelagem e Metrologia, de Normas, Meios de Apoio de Vídeo, Divisão de Química do Instituto de Pesquisas Especiais e Campo de Provas da Marambaia).
- O tempo usado para o desenvolvimento desses projetos e protótipos foi de 18 meses (1 ano e meio).
- O tempo usado para a montagem do sistema de instrumentação foi de 10 meses. Segue a apresentação desses equipamentos e dispositivos.

3.2.3.1 Montagem do sistema de instrumentação para a fase de processamento

O método de medição de permeabilidade no plano selecionado para esta pesquisa foi o de medição por imagem da permeabilidade radial, fazendo uso de pressão constante e medindo, por imagem, a velocidade de escoamento. Para a implementação dessa escolha, fez-se necessária a monitoração da pressão de entrada de resina no interior do molde. Para tanto, foi importado um sensor de pressão da Omega Inc série PX-600 do tipo diafragma, mais especificamente o da série PX600-200GV, na faixa de 0 a 12 bar. Esse sensor possui voltagem de excitação de 5Vdc (15mA) e saída de resposta não amplificada, sendo essa última da ordem de mV. Com a aquisição do sensor, iniciaram-se as atividades relacionadas à montagem do mesmo no sistema de instrumentação.

O sistema de instrumentação empregado neste trabalho e disponível no GM (Grupo de Materiais-CTEx) é composto por uma placa de aquisição conversora A/D PCMCIA de 12 bits (DAQ 6062E), Chassis de 12 slots (SCXI 1001), 1 placa condicionadora de 32 canais de

entradas analógicas (SCXI 1102C), 2 placas de 8 canais para termometria (SCXI 1112), 1 placa para extensometria de 8 canais (SCXI 1520), todas fabricadas pela National Instruments. Foram testados 4 esquemas de montagem do sistema de instrumentação do processamento por RTM.

Esquema 1

O primeiro esquema usado está representado na Figura 3.31.

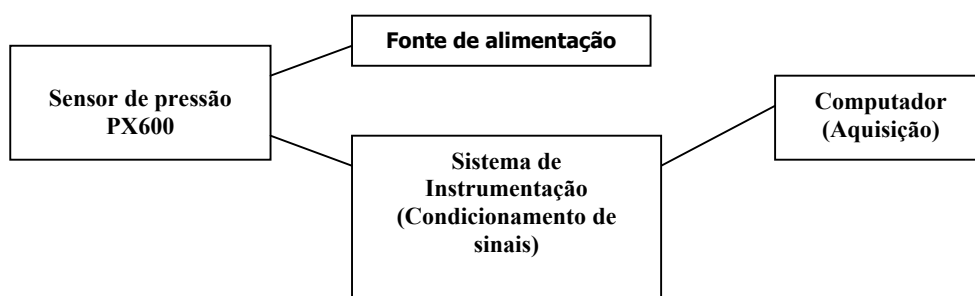


Figura 3.31 – Primeiro esquema testado para a montagem do sistema de instrumentação para o processamento por RTM.

O sensor de pressão Omega de 12 bar foi alimentado com a voltagem especificada pelo fabricante por meio de uma fonte de alimentação estabilizada e a saída do sinal do sensor foi ligada diretamente ao sistema de condicionamento de sinais. Após esse condicionamento, o sinal é enviado para a placa de aquisição de dados conectada ao computador. Com esse esquema, não houve sucesso, o sinal obtido não tinha nenhum significado físico, de acordo com os valores de calibração fornecidos pelo fabricante.

Esquema 2

O segundo esquema usado está representado na Figura 3.32.

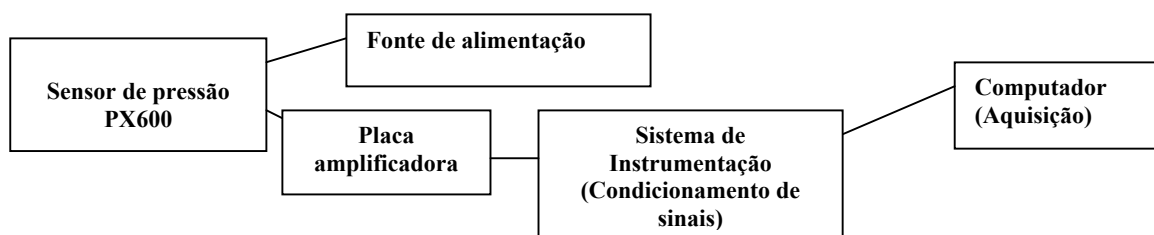


Figura 3.32 – Segundo esquema testado para a montagem do sistema de instrumentação para o processamento por RTM.

Após a falha do primeiro esquema, foi decidido amplificar o sinal de saída do sensor de pressão Omega. O amplificador escolhido foi o do próprio fabricante tipo OMNI III, devido à existência do mesmo no Laboratório de Compósitos/COPPE. Porém, mais uma vez não houve sucesso. Posteriormente, o fabricante informou que esse amplificador não seria adequado para uso com esse sensor.

Esquema 3

A Figura 3.33 mostra o terceiro esquema adotado.

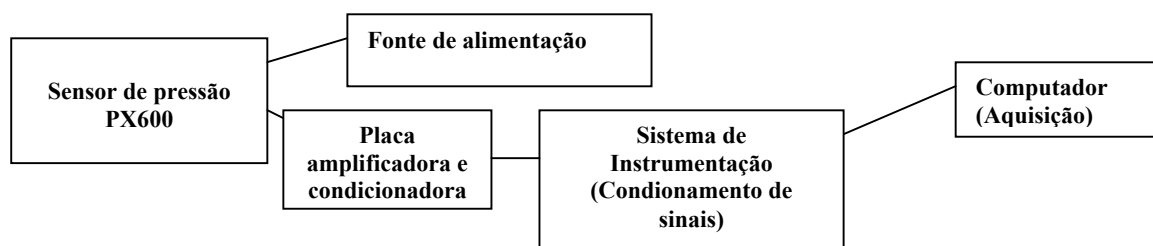


Figura 3.33 – Terceiro esquema testado para a montagem do sistema de instrumentação para o processamento por RTM.

Após a falha do segundo esquema, foi decidido amplificar o sinal de saída do sensor de pressão Omega usando uma placa amplificadora e condicionadora de sinais pertencente ao grupo de Mísseis e Foguetes do IPD/CTEx. Aparentemente esse esquema logrou sucesso, porém haveria a necessidade de recalibrar o sensor de pressão e adquirir essa placa. Mas o alto custo dessa placa inviabilizaria a execução deste trabalho. Dessa forma, esse esquema também foi abandonado.

Esquema 4

O quarto esquema adotado está representado na Figura 3.34.

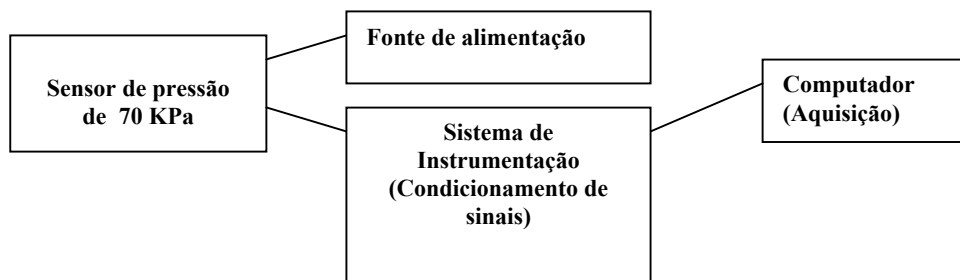


Figura 3.34 – Quarto esquema testado para a montagem do sistema de instrumentação para o processamento por RTM.

Foi solicitado apoio ao Grupo de Mísseis e Foguetes (GMF) e Grupo de Tecnologia da Informação (GTI) do CTEX para a montagem do sistema de instrumentação. O GMF forneceu um sensor de pressão (pressão máxima=70KPa) mais a sua fonte de alimentação plenamente operacional. Quando esse sistema foi montado no sistema de instrumentação e ensaiado, funcionou perfeitamente, embora as faixas de pressão empregadas neste trabalho estejam um pouco fora da faixa recomendável para esse sensor. Portanto, o esquema de montagem 4 foi o adotado para os estudos realizados no desenvolvimento do processamento por RTM.

3.2.3.2 Projeto e fabricação do molde de injeção por RTM para estudo de permeabilidade

O método do uso de imagem para analisar o escoamento radial de resina foi utilizado para a medição da permeabilidade no plano. Essa metodologia exige a confecção de um molde transparente onde será injetada a resina, sendo seu escoamento analisado. O projeto e desenho do molde foram baseados nos seguintes trabalhos : Steenkamer [1994], Adams e Rebenfeld [1991], Lundström *et al.* [2000], Weitzenböck *et al.* [1999], Gauvin *et al.* [1996] e Gebart e Lidström [1996]. Duas placas de acrílico de 300 x 300 x 30 mm³ formam as tampas superior e inferior do molde, que tem ainda um espaçador de aço de 300 x 300 x 7,5 mm³, ver Figura 3.35. As seguintes etapas foram seguidas para o projeto e fabricação do molde.



Figura 3.35 - Molde de injeção por RTM para estudo de permeabilidade: (a) molde aberto e (b) molde fechado.

Seleção do material a ser usado nas tampas superior e inferior do molde

O material deveria ser transparente e rígido para permitir a filmagem do processo e defletir o mínimo possível, respectivamente. Portanto, o material selecionado foi o acrílico com 30 mm de espessura, Steenkamer [1994] e Gauvin *et al.* [1996].

A análise da deflexão dessa tampa de acrílico foi realizada pela Seção de Modelagem e Metrologia do Centro Tecnológico do Exército fazendo uso do programa computacional ANSYS, Figura 3.36. A simulação da deflexão da placa de acrílico seguiu as hipóteses adotadas por Beiter *et al.* no projeto de moldes de injeção de plástico que são:

- A placa é plana com espessura uniforme e constituída de um mesmo material.
- As laterais da placa estão engastadas.
- Todas as forças são normais ao plano da placa e uniformemente distribuídas.
- Todas as tensões estão abaixo do limite de elasticidade do material da placa.

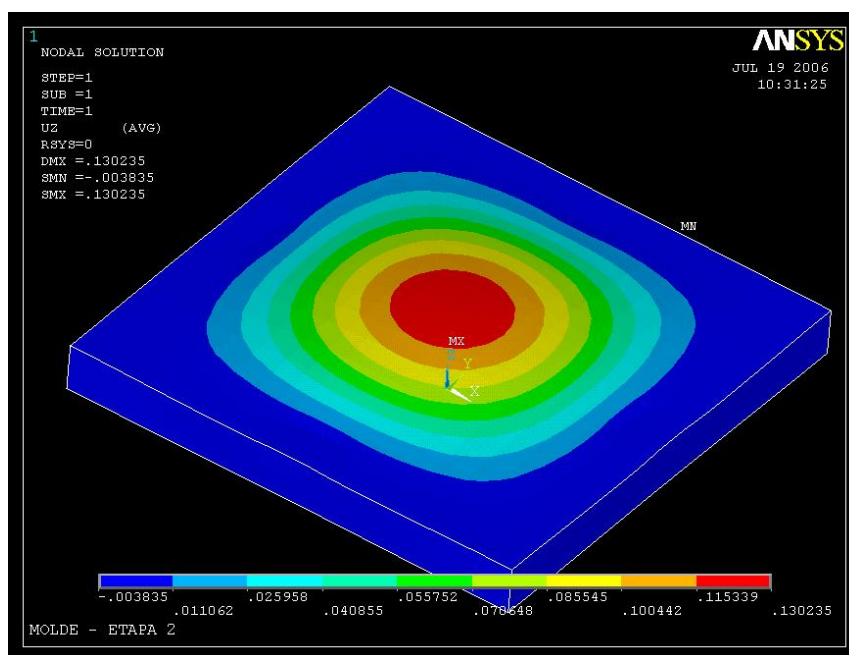


Figura 3.36 – Simulação da deflexão da tampa superior do molde realizada com o programa ANSYS.

A simulação demonstrou que as maiores tensões estão localizadas no centro da placa e que para uma pressão de injeção de 150KPa (1,5bar) a deflexão máxima nessa posição é de 0,13 mm. Devido a essa pequena deflexão calculada pelo ANSYS, manteve-se a espessura da

placa de acrílico (30 mm). Durante o processo de simulação, também foi projetado um reforço em forma de cruz construído em metalon para uso na tampa superior do molde.

Concepção e dimensionamento do sistema de injeção

O diâmetro do furo na tampa superior de acrílico para a injeção de resina depende da área da placa disponível para o desenvolvimento da frente de escoamento. Weitzenböck *et al.* [1999] demonstraram a influência do diâmetro e da forma do furo de injeção no valor da permeabilidade e chegaram à conclusão de que quanto maior o diâmetro do furo de injeção maior é a influência dele no formato da frente de escoamento e conseqüentemente maior será o tempo para que essa frente se estabilize. Como indicação para o dimensionamento do diâmetro do furo de injeção, foi usado o gráfico apresentado por Weitzenböck *et al.* [1999], Figura 3.37.

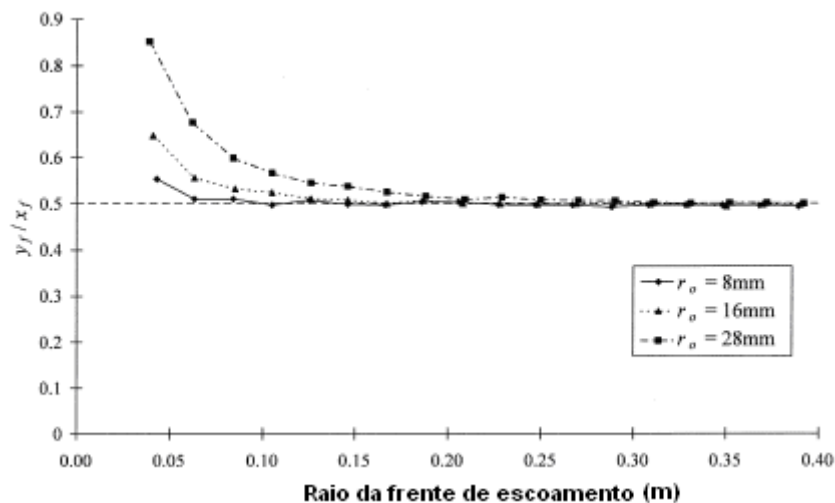


Figura 3.37 - Gráfico apresentado por Weitzenböck *et al.* [1999] para o dimensionamento do diâmetro do furo de injeção.

O gráfico da Figura 3.37 apresenta no seu eixo y a relação y_f/x_f (y_f e x_f são semi-eixos da elipse formada pela frente de escoamento, respectivamente, nas direções y e x) e no eixo x apresenta o raio mínimo necessário para a estabilização da frente de escoamento. Quando essa frente se torna estável, ou seja, y_f/x_f se torna constante, pode-se efetuar a medição da permeabilidade. O gráfico da Figura 3.37 mostra que para um furo de injeção de raio 8 mm, a frente de escoamento da resina se estabilizará (forma uma elipse estável) após

percorrer um raio de 60 mm. A área disponível no molde para estudo da permeabilidade no plano é de $238 \times 238 \text{ mm}^2$, ou seja, um raio máximo de 119 mm. Baseado na área disponível e no gráfico, o raio de injeção selecionado foi de aproximadamente 6mm. Optou-se pelo uso de uma mangueira de baixo custo com diâmetro externo de 16 mm e diâmetro interno de $\frac{1}{2}$ " ,ou seja, 12,7 mm e conseqüentemente um raio de aproximadamente 6 mm. Após a especificação da mangueira a ser usada, passou-se para o projeto da peça para fixação da mangueira de injeção de resina no molde.

Dimensionamento da vedação do vácuo do molde para RTM

Devido à baixa viscosidade da resina e à necessidade de uso de vácuo no interior do molde, necessita-se escolher e dimensionar o sistema de vedação.

Na montagem, operação e serviço de sistemas de vácuo, há a necessidade de uso de anéis de vedação. Em aplicações comuns de sistemas de vácuo, Atta [1965] recomenda o uso de anéis de vedação com dureza SHORE de aproximadamente 60, resistente a óleo e graxa e excelentes propriedades mecânicas em temperatura ambiente, devendo-se ter atenção na especificação do diâmetro seccional e do diâmetro interno do anel já que as tolerâncias dimensionais do anel de vedação variam de acordo com esses dois parâmetros. Atta [1965] também recomenda que independente da forma do canal de alojamento do anel (a forma do canal depende da aplicação), o canal deve ter a profundidade com valor de no máximo $\frac{2}{3}$ do diâmetro seccional do anel e a área da seção transversal do canal deve exceder a do anel de vedação.

Foi selecionado O-ring da marca Orion tipo OR1-453, com diâmetro interno $304,17 \text{ mm} \pm 0,76$ e diâmetro seccional $6,99 \text{ mm} \pm 0,15$; o material é de borracha. Já que o molde é quadrado, o diâmetro interno do anel de vedação foi especificado fazendo um cálculo simples: foi feita a equivalência do comprimento de um círculo com um quadrado de borda arredondada.

O canal de alojamento foi em uma das superfícies do espaçador e em uma das superfícies da tampa de acrílico. Como a aplicação é estática (não há movimento entre as superfícies), a forma e as dimensões do canal foram as especificadas pelo catálogo do fabricante fornecido pela empresa Rioveda.

3.2.3.3 Projeto e fabricação de mesa para processamento e medição de permeabilidade radial

A mesa para processamento foi projetada para satisfazer duas aplicações: servir como uma estação para estudo de permeabilidade radial das preformas e servir como uma estação de processamento das placas de material compósito. Dois sistemas tiveram que ser projetados e fabricados para a montagem dessa estação: um sistema de fixação das câmeras de filmagem e sistema para fixação do molde.

Sistema para fixação das câmeras de filmagem

A primeira concepção do sistema de fixação de câmeras de filmagem consistia em uma estrutura tubular oca de alumínio, Figura 3.38. Os tubos de alumínio tinham as seguintes dimensões: 5/8" x 6 m e espessura de parede igual a 3 mm. Esse sistema foi construído (serviços de corte por serra e soldagem), porém depois de pronto se revelou pouco rígido.

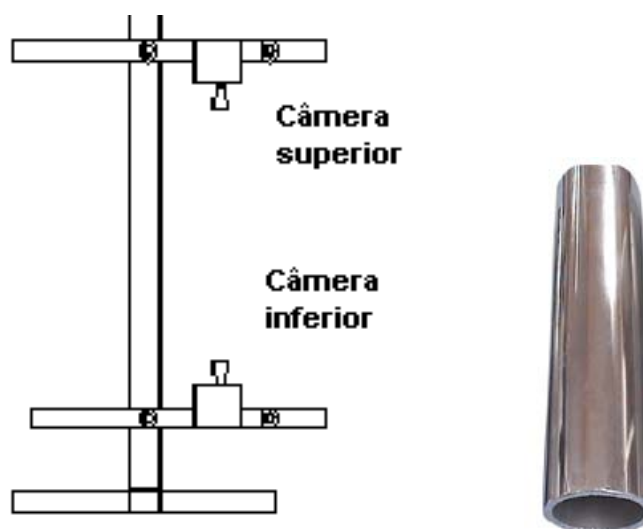


Figura 3.38 – Tubo oco de alumínio usado na estrutura tubular para fixação das câmeras de filmagem.

Com o fracasso desse primeiro protótipo, partiu-se para um novo desenho. A nova concepção consistia em uma estrutura fabricada em metalon e perfis de aço fixos na própria mesa de processamento, ver Figura 3.39. Esse novo sistema de fixação para câmeras possuía

possibilidade de ajuste em três eixos, sendo também desmontável e removível. Foram fabricados dois sistemas desses para possibilitar o uso de duas câmeras: uma filmando a parte superior e a outra filmando a parte inferior do molde. Esse sistema foi adotado e usado com sucesso.



Figura 3.39 - Segundo protótipo do sistema de fixação para câmeras para uso na mesa de processamento.

Sistema para fixação e posicionamento do molde de RTM

Também foi projetado e fabricado um sistema que permitisse o uso dos mais diversos tamanhos de molde. O sistema fabricado consiste de eixos móveis e girados por manivelas e nas suas extremidades se encontra o ponto onde o molde ficará apoiado (segmento de uma cantoneira em L), ver Figura 3.40. Esse sistema permite o uso de moldes de até no máximo $600 \times 600 \text{ mm}^2$.



Figura 3.40 - O sistema móvel para fixação do molde na mesa de processamento.

Esses dois sistemas descritos acima foram acoplados a uma mesa de metalon (60 mm x 60 mm x 2 mm), com uma área de 700 mm x 700 mm e altura de 1300 mm, com rodízios, ver Figura 3.41, compondo finalmente a estação para estudo de permeabilidade radial dos materiais e processamento das placas de material compósito.



Figura 3.41 - Mesa para processamento fabricada para uso no processamento por RTM.

3.2.3.4 Projeto de conexão T para a fixação do sensor de pressão

Foi projetada uma conexão com o objetivo de causar a menor perturbação possível ao fluxo de injeção de resina no interior do molde. Para o projeto da conexão, foi usada a técnica de desenho conhecida como curva de interpenetração, proposta por Maguire e Simmons, ideal para o projeto de peças que são geradas pela união ou interpenetração de um sólido em outro. No caso específico deste trabalho de pesquisa, a união de dois cilindros são necessários para o projeto de uma conexão em T. O resultado dessa técnica de desenho pode ser observado na Figura 3.42.

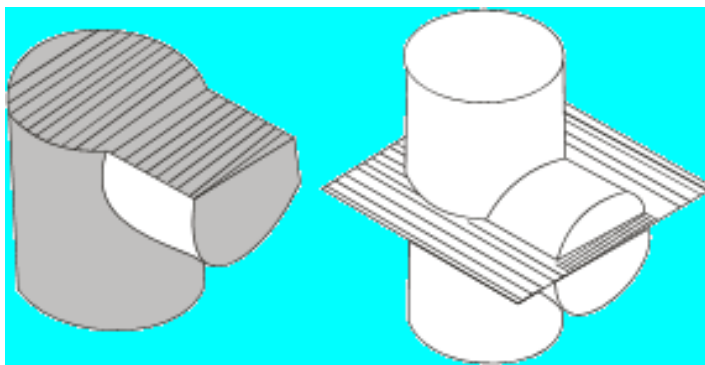


Figura 3.42 - Técnica de desenho, conhecida como curva de interpenetração.

A Figura 3.43 apresenta o projeto da conexão T desenvolvida e na Figura 3.44 pode ser observado o protótipo fabricado.

A conexão fabricada possui diâmetro interno aproximadamente igual ao diâmetro interno da mangueira de injeção. O sensor de pressão está posicionado transversalmente e próximo ao fluxo de resina, ver Figuras 3.43 e 3.44. Foram fabricadas duas conexões: uma de alumínio e outra de bronze. Esses materiais foram selecionados devido a seu baixo peso e resistência à corrosão.

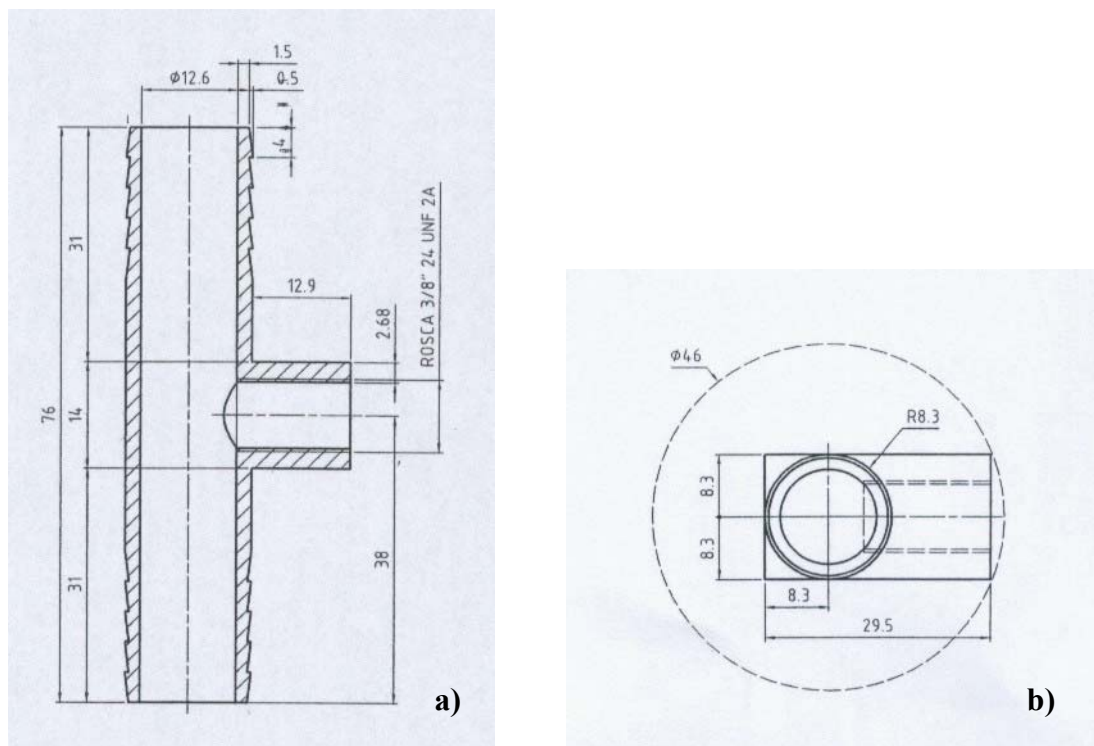


Figura 3.43 - Projeto da conexão T: a)corte transversal e b)vista superior.

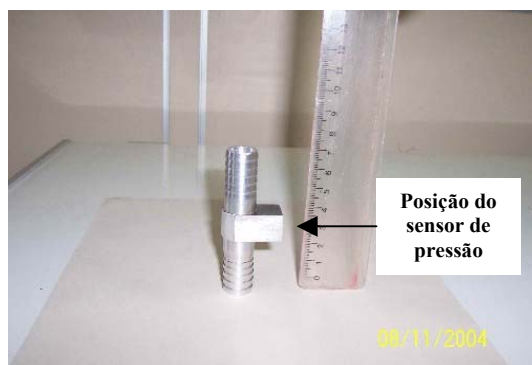


Figura 3.44 - Conexão T projetada para uso no processamento RTM.

3.2.3.5 Projeto e fabricação do molde de RTM para obtenção de placas de material compósito de 25,4 mm (1") de espessura

O projeto e desenho do molde de 25,4 mm (1") são praticamente iguais ao molde para estudo de permeabilidade radial, com uma diferença básica: o espaçador é constituído por placa de aço 1045 com 300 x 300 mm² de área e 25,4 mm (1") de espessura, ver Figura 3.45.

Uma das grandes dificuldades na fabricação desse molde foi o corte da placa de aço de 25,4 mm de espessura. Depois de várias consultas comerciais, uma empresa foi selecionada. Esse corte foi realizado pela empresa “TENAX aços especiais”, por meio de bico de corte com maçarico, Figura 3.45; porém, a zona que foi submetida à chama do maçarico ficou temperada. A placa de aço foi enviada para a empresa para que a mesma fosse tratada termicamente por recozimento para recuperação das propriedades mecânicas.



Figura 3.45 - Molde de 1” usado no processamento por RTM.

3.2.3.6 Projeto do molde de RTM de múltiplas entradas e saídas

Com intuito de estudar a variação da frente de escoamento com a mudança da posição do ponto de entrada da resina e ponto de vácuo, foi projetado um molde de múltiplas entradas e saídas. Após o projeto, foi decidido não fabricar um novo molde mas sim adaptar o molde com espaçador de 1” com as modificações necessárias. As modificações foram: o molde faz uso de três pontos de injeção de resina e 9 pontos para linha de vácuo, ver Figura 3.46.

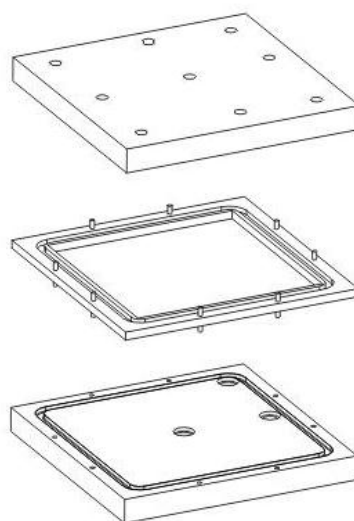


Figura 3.46 – Desenho de projeto do molde de múltiplas entradas e saídas.

3.2.3.7 Projeto e fabricação do dispositivo de vácuo e de injeção de resina para molde de RTM

Dispositivo de injeção de resina (“inlet”)

O dispositivo de injeção de resina é o responsável pela maneira pela qual a resina é introduzida no molde. Previamente, foi definido que esse dispositivo seria tipo ponto de injeção e que a resina seria levada até o molde por meio de uma mangueira de baixo custo, com diâmetro externo de 16 mm e diâmetro interno de $\frac{1}{2}$ ” (12,7 mm). Após a especificação do tipo de “inlet” e da mangueira a ser usada, passou-se para o projeto da peça para fixação da mangueira de injeção de resina no molde, denominada neste trabalho de bico de injeção de resina. Foram projetados e fabricados 3 protótipos.

As especificações para o bico de injeção de resina foram: segurança contra vazamento, vedação para uso de vácuo, facilidade de uso e resistência à corrosão. Para satisfazer essas especificações, foi proposto o desenho de um bico de injeção feito em aço inox, que por meio de uma porca ficaria preso à tampa superior de acrílico do molde e no seu interior seria introduzida a mangueira especificada, Figura 3.47.

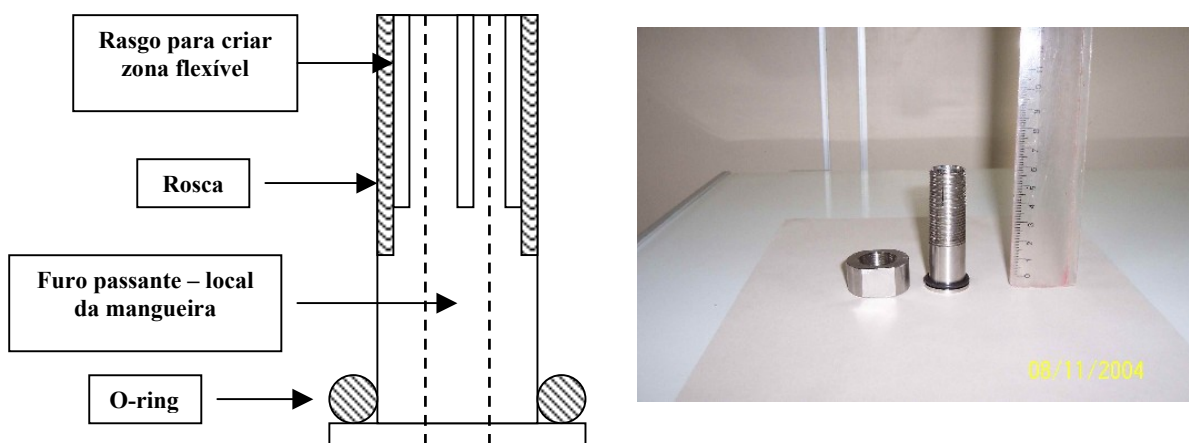


Figura 3.47 – Primeiro bico de injeção projetado.

Os rasgos presentes no bico de injeção tinham como função criar uma zona mais flexível que se deformaria sob o aperto de uma braçadeira e conseqüentemente apertaria a mangueira que é introduzida no interior do bico de injeção, Figura 3.47. A vedação para o uso de vácuo é garantida fazendo uso de um o-ring que se assenta em um rebaixo usinado na tampa superior de acrílico do molde. Essa concepção de bico de injeção de resina falhou durante os testes iniciais, tendo o fluido de teste (glucose de milho) vazado através do mesmo. Um fato que pôde ser observado foi que a presença dos rasgos no bico de aço inox não criou uma zona mais flexível como tinha sido planejado.

A próxima tentativa foi fabricar um novo bico de injeção seguindo o mesmo projeto apresentado na Figura 3.47, porém substituindo o aço inox por polipropileno, Figura 3.48. Essa proposta falhou já que a rosca aberta nessa peça ficou muito fina e flexível, não permitindo aperto; a altura do filete dessa rosca era de mais ou menos 0,9 mm, feito em uma parede de 2mm.

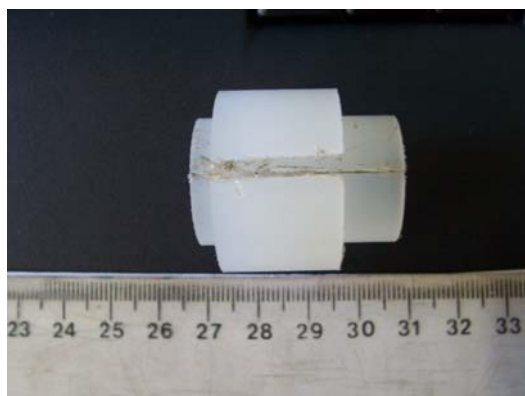


Figura 3.48 – Peça de polipropileno para o bico de injeção.

Devido a essa nova falha, uma nova concepção de bico de injeção em aço inox foi projetada e está apresentada na Figura 3.49 e o protótipo na Figura 3.50. Nessa nova concepção, a mangueira fica presa externamente ao bico de injeção em uma seção especificamente desenhada para esse fim (parte segmentada superior), além do uso de uma braçadeira. O furo passante desse novo bico de injeção possui o diâmetro de 10 mm. A vedação para o uso de vácuo é garantida fazendo uso de um o-ring que se assenta em um rebaixo usinado na tampa superior de acrílico do molde.

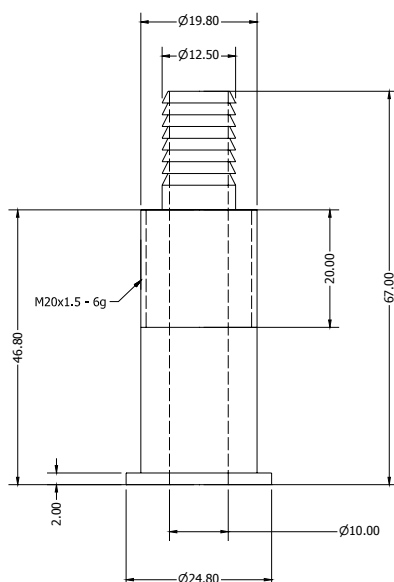


Figura 3.49 - Concepção do bico de injeção aprovado para uso no processamento por RTM.



Figura 3.50 - Bico de injeção aprovado para uso no processamento por RTM.

Esse novo bico de injeção foi projetado, fabricado e testado com sucesso e aprovado para uso no processamento por RTM.

Ponto para linha de vácuo (“vent”)

Saídas de ar (“vents”) se referem à maneira como ar é removido da ferramenta. São nos pontos de saída de ar que podem ser acopladas as linhas de vácuo.

A primeira idéia para as mangueiras de vácuo foi introduzi-las diretamente no furo da tampa inferior de acrílico, ficando presas pelo atrito no contato com o molde, Figura 3.51. Porém, essa concepção inicial se revelou falha, já que durante o teste realizado com glucose de milho, houve vazamento pela mangueira. Então essa concepção foi abandonada.

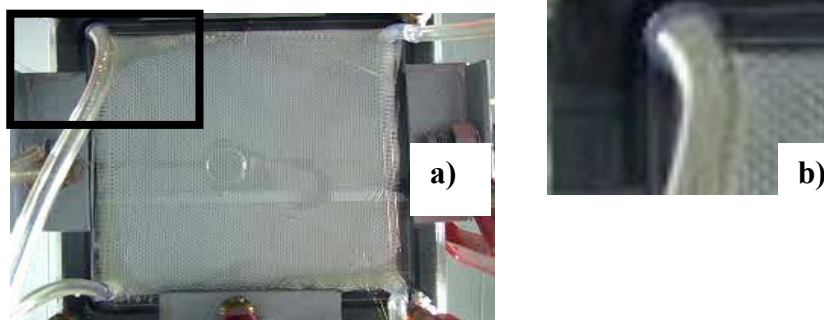


Figura 3.51 – Primeira concepção para o “vent” : (a) tampa inferior de acrílico do molde e (b) no detalhe a mangueira de vácuo introduzida diretamente no furo da tampa.

Optou-se em adotar um bico para as mangueiras de vácuo. Portanto, o projeto do bico adotado para as mangueiras de vácuo será o mesmo projeto do bico de injeção de resina, Figura 3.49. Ele também será construído em aço inox, mas com uma única diferença: o furo passante possui diâmetro de 4 mm. Esse novo bico para as mangueiras de vácuo foi fabricado e testado com sucesso e aprovado para uso no processamento por RTM.

Tampão

Foi projetado um tampão para o molde de múltiplas entradas e saídas, para que quando uma das entradas ou saídas não estiver sendo usada ela possa ser fechada. Esse tampão segue o mesmo projeto do bico de injeção de resina, Figura 3.49, porém com duas diferenças básicas: não há furo passante e não há a ponta superior para a fixação da mangueira. O tampão também foi construído em aço inox, Figura 3.52.

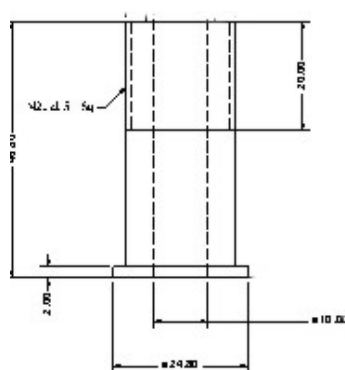


Figura 3.52 – Tampão em aço inox para uso no processamento por RTM.

3.2.3.8 Projeto e fabricação do dispositivo para ensaio de cisalhamento interlaminar

Para a realização dos ensaios de cisalhamento interlaminar, fez-se necessário o projeto e a confecção do dispositivo superior de apoio responsável pela transferência de carga ao corpo de prova, ver seção 3.2.2.6, para atender às recomendações da ASTM D2344/2344-M. O esquema do dispositivo está apresentado na Figura 3.53 e o dispositivo na Figura 3.54.

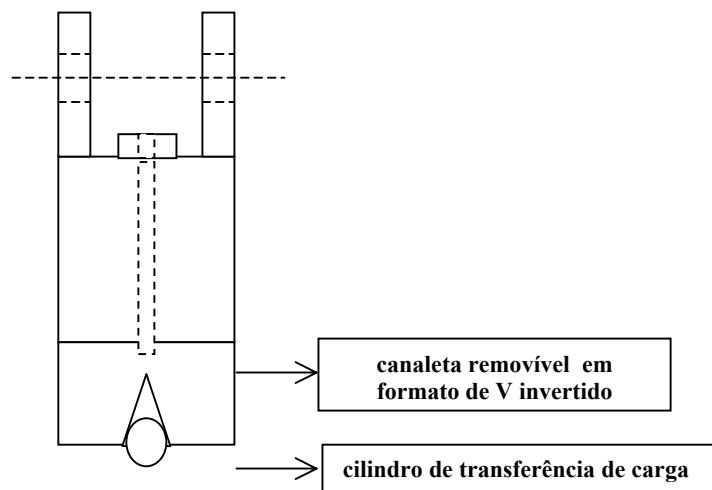


Figura 3.53 – Esquema do dispositivo para ensaio de cisalhamento interlaminar.



Figura 3.54 – Dispositivo para ensaio de cisalhamento interlaminar.

Esse dispositivo foi fabricado segundo o desenho da empresa EMIC (fornecedora da máquina de ensaio), porém foi feita a seguinte modificação: o cilindro de transferência de carga, ver Figuras 3.53 e 3.54, está posicionado em uma canaleta removível em formato de V invertido. Essa modificação permite uma maior flexibilidade; se necessário, pode-se variar o diâmetro do cilindro de transferência de carga.

O dispositivo foi fabricado em aço-carbono e depois foi submetido a tratamento térmico de têmpera no laboratório de Tratamentos Térmicos do PEMM/UFRJ (têmpera em óleo a 864°C por 30 minutos e revenimento a 330°C por 2 horas).

Os primeiros cilindros de transferência de carga ($\varnothing=6,35$ mm) foram submetidos à têmpera e resfriados em água porém sofreram empenamento; para solucionar esse problema,

foram fabricados novos cilindros, só que dessa vez o resfriamento da têmpera foi feito em óleo. Esse procedimento logrou êxito, Figura 3.55.



Figura 3.55 – Cilindros de transferência de carga do dispositivo de ensaio de cisalhamento interlaminar após o tratamento de têmpera.

3.2.3.9 Fabricação do dispositivo para ensaio de compressão

Inicialmente, a máquina de ensaio mecânico servohidráulica do Laboratório de Propriedades Mecânicas da COPPE/UFRJ foi selecionada para a realização do ensaio de compressão. Para tanto, era necessário adaptar a placa de compressão da máquina EMIC desse mesmo laboratório à garra da Instron. Para realizar essa adaptação foi fabricado uma anel de aço (para transferir a carga para a placa de compressão) e um suporte cilíndrico (para fixar a placa a garra da Instron), Figura 3.56.

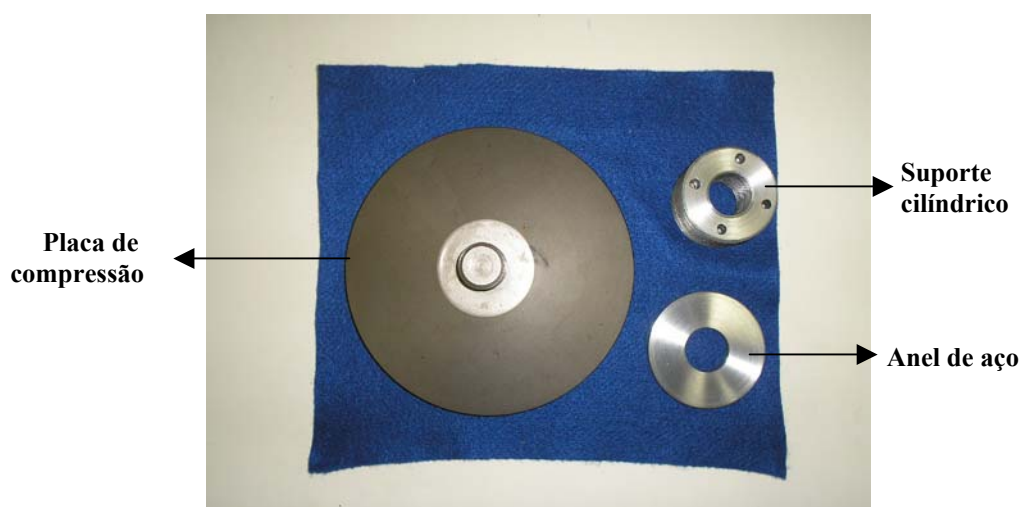


Figura 3.56 – Placa de compressão e as peças usadas na adaptação: anel de aço e suporte cilíndrico.

3.2.3.10 Equipamentos para uso no ensaio balístico das placas compósitas

Nos ensaios balísticos, foram empregadas duas barreiras óticas: uma antes do alvo para medição da velocidade de impacto e outra por trás do alvo para medição da velocidade residual dos projéteis, caso houvesse perfuração. Os equipamentos necessários para realização do ensaio balístico estão disponíveis no Campo de Provas da Marambaia (CPrM).

O grande problema associado ao método de medição da velocidade residual é a mudança na trajetória do projétil após a perfuração do alvo. Esse erro foi avaliado por equipamentos fabricados e apresentados a seguir.

Equipamento para medir o desvio da trajetória dos projéteis ao passar pelo alvo

A Figura 3.57 apresenta o comportamento do vetor velocidade do projétil quando esse transpassa o alvo. A velocidade medida pela barreira ótica é na verdade a projeção no eixo de tiro ou linha de visada (reta imaginária que liga a boca do provete de tiro ao ponto de impacto no alvo) do vetor velocidade.

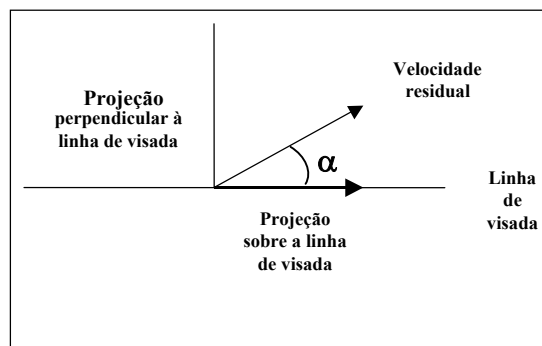


Figura 3.57 - Variação de direção do vetor velocidade.

A barreira ótica fornece o valor da velocidade sobre a linha de visada, ver Figura 3.57. Porém, a real velocidade do projétil é o vetor velocidade residual e, para pequenos valores de ângulo α ($<14^\circ$), pode-se afirmar que a velocidade medida pela barreira ótica é igual à velocidade residual do projétil. Portanto, é necessário medir o valor do ângulo α para se conhecer a diferença entre a velocidade medida pela barreira ótica e a real velocidade residual do projétil.

Para se medir essa diferença, foi fabricado um equipamento constituído de duas molduras metálicas paralelas e separadas por uma distância fixa. Em cada uma das molduras, foi colocada uma folha de papel pardo, ver esquema na Figura 3.58. Esse equipamento ficava atrás do alvo e o projétil, ao passar pelo mesmo, furava as folhas de papel pardo em dois pontos e as coordenadas desses furos de entrada e saída eram medidas.

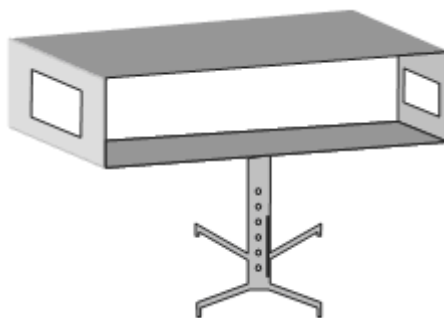


Figura 3.58 – Esquema do equipamento para medir o desvio do projétil.

Armadilha para recuperar os projéteis

Uma armadilha para recuperar os projéteis que transpassaram o alvo (placa de material compósito) foi confeccionada a partir de uma caixa metálica de ar-condicionado onde se adaptou uma estrutura metálica para apoio e fixação, ver esquema da Figura 3.59. Para amortecer a energia residual do projétil, foram colocados dentro da mesma, jornais, retalhos de Kevlar e fibra de vidro.

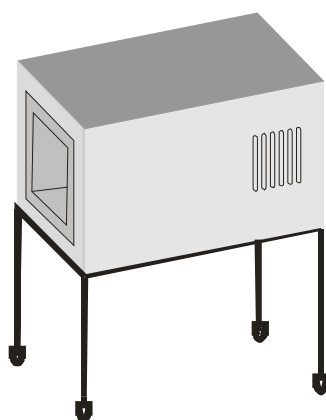


Figura 3.59 – Esquema da armadilha para projéteis.

3.2.3.11 Corte transversal dos projéteis 7,62 mm perfurante (AP) para impacto balístico nas placas processadas por RTM

Em um sistema de blindagem compósita, a função da cerâmica é fornecer um revestimento rígido, capaz de fragmentar e erodir a ponta do projétil, diminuindo a quantidade de movimento do mesmo e reduzindo a sua capacidade de penetração, ver Figura 3.60. Por outro lado, devido à baixa resistência à flexão da cerâmica, adiciona-se à mesma um laminado polimérico (podendo ser um laminado de fibra de vidro) que confere ductilidade à blindagem, suportando a cerâmica e absorvendo o momento residual do projétil e dos próprios fragmentos da cerâmica. Caso contrário, os excessivos esforços de flexão resultarão em prematuras falhas da cerâmica devido à tração desenvolvida na superfície oposta à do impacto.

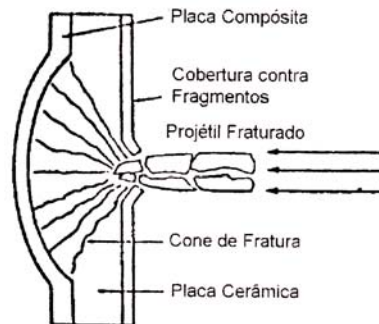


Figura 3.60 - Representação de uma blindagem cerâmica + laminado polimérico.

A idéia de seccionar o projétil, eliminando a sua ponta, está relacionada com o fato de que um laminado polimérico é utilizado como placa de apoio para cerâmicas balísticas. Portanto, em geral o laminado polimérico não é diretamente impactado pelo projétil mas sim pelo que sobrou do processo de erosão realizado pelas cerâmicas balísticas. Wilkins (1978), em seu trabalho pioneiro, afirma que um projétil pode perder até aproximadamente 60% de sua massa antes de atingir a placa de laminado de fibra de vidro. Baseado nos estudos de estabilidade de projéteis (Balística externa) apresentados por Backman [1976] e Moss *et al.* [1995], conclui-se que o corte transversal da ponta de um projétil 7,62 mm perfurante deve respeitar as seguintes especificações da engenharia de armamento:

- Não pode haver alteração do forçamento do projétil
- Não pode haver alteração do Crimp, ver Figura 3.61.

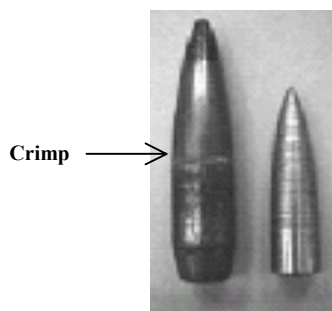


Figura 3.61 - Projétil 7,62 mm perfurante com o seu núcleo duro de aço.

Em um projétil de pequeno calibre, o seu diâmetro deverá ser levemente superior ao diâmetro interno do cano que irá dispará-lo e isso é chamado de Forçamento. Portanto, o projétil será sempre maior do que o calibre real do cano; por exemplo, o projétil de calibre 7,62 mm na verdade possui o diâmetro de 7,82mm e essa diferença para maior, conhecida como Forçamento, é que irá permitir que o mesmo seja forçado contra o raizamento do cano (ranhuras helicoidais ao longo do cano, responsáveis pela rotação do projétil), nele se engrazando e passando a acompanhar a hélice segundo a qual o raizamento foi produzido, adquirindo assim a rotação necessária a sua estabilização durante a trajetória.

O Crimp são canaletas que servem para fixar o projétil ao estojo, que é obtido pelo curvamento da boca do estojo para dentro da mesma, Figura 3.61. O Crimp é sempre necessário em cartuchos de alta potência pois, com recuo, os projéteis, em função da inércia, têm a tendência de sair dos estojos. Portanto, há um limite para a altura que o projétil pode ser seccionado. Com o apoio do Grupo de Armamento e da seção de Normas, ambos do CTEx, foram analisados os desenhos e os componentes do projétil 7,62AP; e com apoio da seção de Modelagem e Metrologia do CTEx levantou-se, usando um projetor de perfil, as reais dimensões do projétil, ver corte transversal na Figura 3.62.

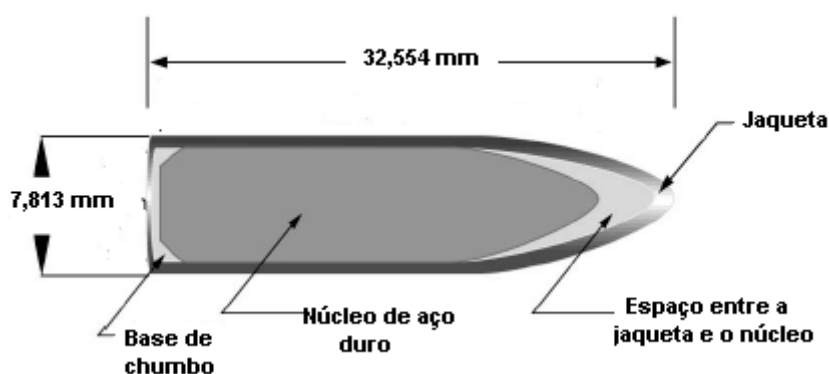


Figura 3.62 – Esquema do perfil levantado do projétil 7,62 mm AP.

Com o levantamento do perfil do projétil foram feitos três cortes transversais, a diferentes alturas, em três projéteis 7,62 mm AP, respectivamente nomeados Tipo 1, Tipo 2 e Tipo 3, ver Figura 3.63. Segue a Tabela 3.10 com os dados referentes desses tipos.



Figura 3.63 - Corte transversal do projétil 7,62 mm AP.

Tabela 3.10 - Tipos de projéteis seccionados

Tipos	Altura(mm)	Massa(g)	Perda de massa
7,62AP	32,554	9,7	0%
Tipo 1	21,62	8,2	15% da massa
Tipo 2	15,75	6,0	38 % da massa
Tipo 3	16,8	6,475	33 % da massa

O projétil Tipo 1 foi descartado pelo seu elevado peso em comparação aos Tipos 2 e 3, Tabela 3.10. O corte realizado no projétil Tipo 2 ficava muito próximo do crimp podendo danificá-lo, portanto não foi selecionado. O projétil escolhido foi o Tipo 3, ver Figura 3.64.



Figura 3.64 - Projétil tipo 3 usado nos ensaios balísticos.

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Desenvolvimento do processamento por RTM

Esta seção apresentará os testes de validação de uso da estação de processamento por RTM desenvolvida e a seleção da matriz polimérica a ser usada nesse processamento.

4.1.1 Seleção da matriz polimérica para uso no processamento por RTM

Optou-se por selecionar uma das 9 formulações desenvolvidas pela aluna do Laboratório de Materiais Compósitos do PEMM/COPPE/UFRJ Ledjane de Lima Sobrinho na sua tese de mestrado Desenvolvimento de Matriz Polimérica para Material Compósito Visando o Reforço de Dutos de Aço [2005], Tabela 4.1. Dois requisitos foram usados para a seleção das porcentagens a serem usadas de catalisador Butanox e acelerador cobalto (CoNap): tempo de cura e pico exotérmico. Segue o resultado dessa seleção na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Formulações analisadas para uso na preparação da matriz polimérica

Resina Derakane 411- 350	Catalisador Butanox (% peso)	Acelerador Cobalto (% peso)	Pico exotérmico (°C)	Tempo para atingir o pico exotérmico (min)
Tipo 1	1,5	0,3	99,90	60,54
Tipo 2	2	0,3	114,21	42,42
Tipo 3	2,5	0,3	128,6	34,41
Tipo 4	1,5	0,5	59,8	79,04
Tipo 5	2	0,5	96,33	43,50
Tipo 6	2,5	0,5	117,52	31,08
Tipo 7	1,5	1	42,81	75
Tipo 8	2	1	90,62	63,23
Tipo 9	2,5	1	118	35

A formulação selecionada para uso em todas as placas compósitas fabricadas por RTM neste trabalho está apresentada na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Formulação da resina selecionada para uso no processamento por RTM

Resina	Catalisador Butanox	Acelerador Cobalto
Resina Derakane 411-350 (Tipo 1)	1,5%	0,3%

A opção por essa formulação foi baseada na comparação entre três requisitos técnicos: menor pico exotérmico, menor tempo de cura e maior tenacidade a fratura possíveis. Dentre as formulações desenvolvidas pela aluna, a que melhor satisfazia esses três requisitos de forma balanceada foi a formulação Tipo 1, apresentada na Tabela 4.2. Essa formulação apresentou as seguintes propriedades: viscosidade de 350 cp, pico exotérmico de 99,90°C, tempo de gel de 70 minutos, tenacidade à fratura de 2,67 J e deformação máxima de fratura de 7,31%.

Seguindo recomendações presentes nos trabalhos de Sobrinho [2005], Michaud [1998] e Ruiz e Trochu [2005], foram selecionados os seguintes valores para a temperatura de cura e pós-cura do sistema de resina:

- A temperatura de cura deve ser a temperatura ambiente, para evitar possíveis empenamentos ou delaminações causados por altos gradientes de temperatura ao longo da espessura do compósito, ver seção 2.1; conseqüentemente o molde não precisa possuir sistema de aquecimento.
- Pós-cura – o compósito deve permanecer após o processamento dentro de uma estufa por 20 horas a 70°C.

A caracterização por FTIR da resina de Derakane 411-350 usada foi realizada no CTE_x e está apresentada na Figura 4.1.

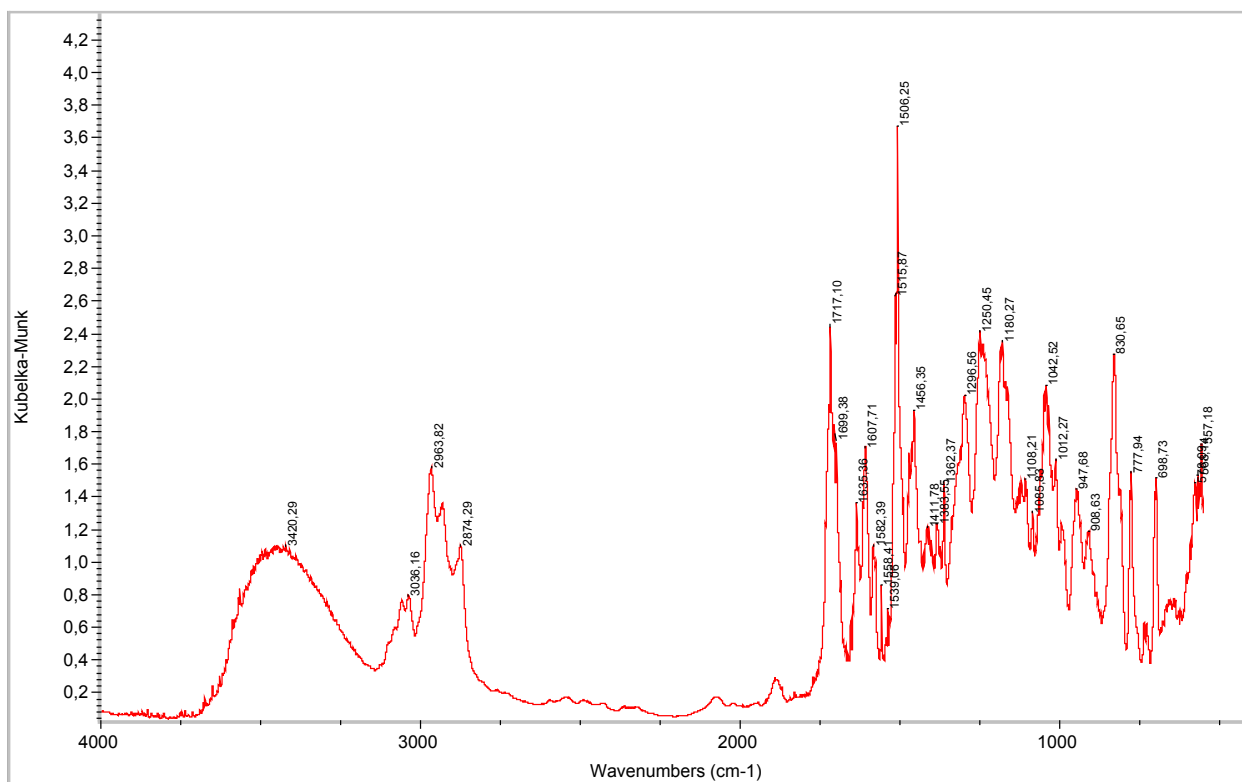


Figura 4.1 - Espectro IR da resina Derakane 411-350.

As resinas Derakane tipo 411 são reconhecidas por espectrometria no infravermelho, através de:

- bandas características de absorção a 1730 cm^{-1} (éster);
- bandas de aromáticos a $1610, 1585, 1510, 830, 760$ e 700 cm^{-1} ;
- grupo dimetil germinal do Bisfenol A a 1365 e 1390 cm^{-1} .

4.1.2 Experimento preliminar da estação de processamento por RTM

Depois dos equipamentos terem sido projetados e fabricados, ver Capítulo 3, realizaram-se experimentos preliminares. Os materiais usados nesses experimentos foram: tecido de fibra de vidro AF 0090 com gramatura de 1100 g/m^2 , fabricado pela Fibertex, e o fluido de teste usado foi glucose de milho diluída a 80% (água destilada). A preforma possuía 32 camadas de fibra de vidro e área de $238 \times 238\text{ mm}^2$ (área interna disponível do molde). Foi empregado um sistema de instrumentação da National Instruments para monitorar os

sensores de pressão de injeção de resina (esquema 4 da seção 3.2.3.1) e de vácuo. A pressão de injeção da resina foi mantida constante.

As imagens digitais adquiridas durante o enchimento do molde foram armazenadas como arquivo de imagem em um computador e a sua análise está apresenta na Figura 4.2. Segue também o perfil da pressão de injeção e de vácuo, Figuras 4.3 e 4.4, durante esse experimento.

A frente de escoamento apresentou formato elíptico, Figura 4.2(b) e (c), e atingiu a parede lateral do molde aproximadamente 2 segundos após o início da injeção. A pressão de injeção, durante esse avanço, manteve-se constante, em torno de 1,95 bar, trecho BC do gráfico apresentado na Figura 4.3. Intenso “race-tracking” (tendência do fluido penetrar no espaço entre a fibra e a parede do molde) foi notado após o completo espalhamento da resina sobre a preforma.

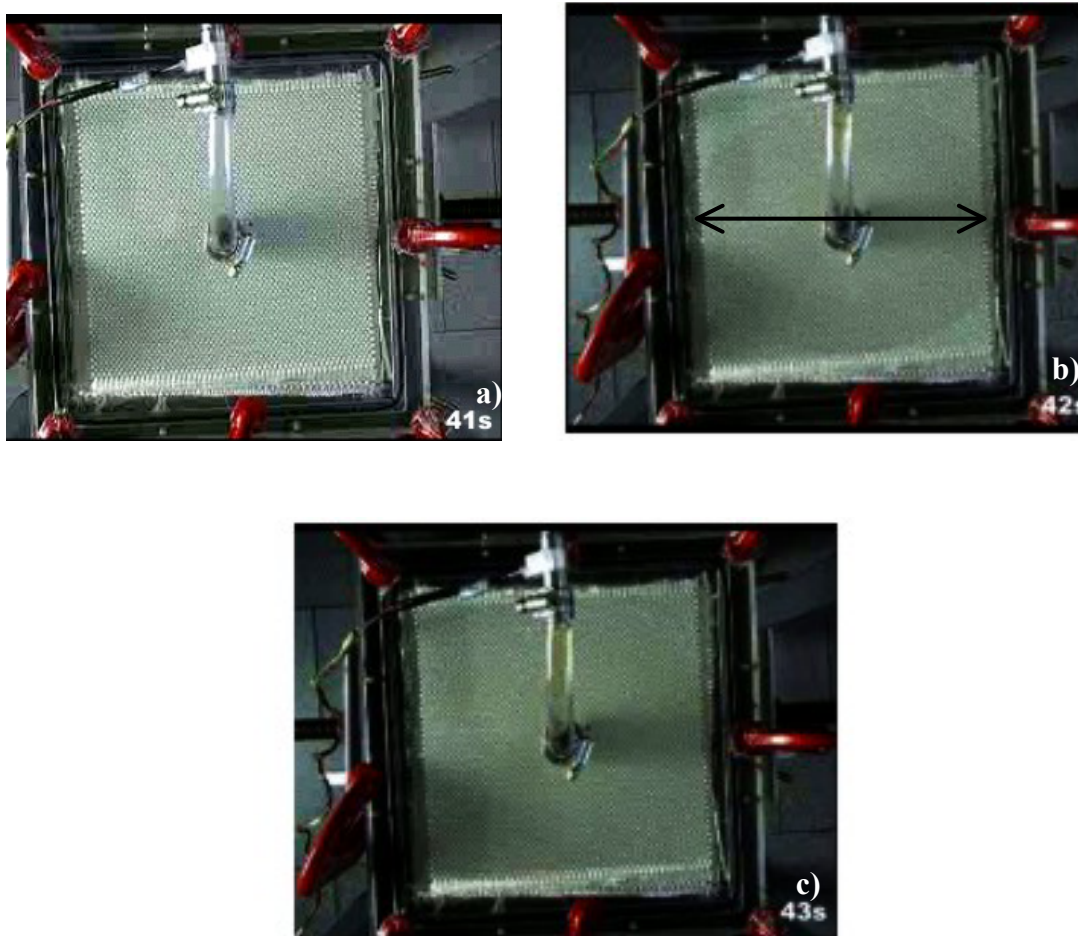


Figura 4.2 - Imagens da frente de fluxo avançando no interior do molde.

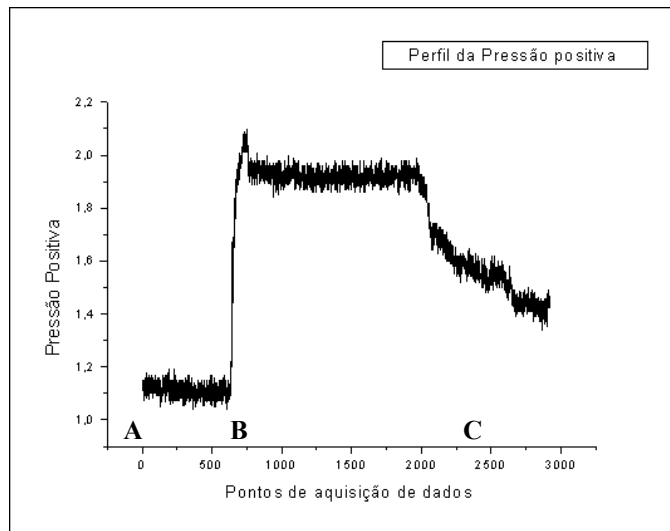


Figura 4.3 - Perfil da pressão de injeção durante o experimento.

A Figura 4.3 apresenta o perfil da pressão de injeção obtido pelo sistema de instrumentação montado; gráfico semelhante foi obtido por Weitzböck *et al.* [1999].

A Figura 4.4 apresenta o perfil da pressão de vácuo obtido pelo sistema de instrumentação montado. Como pode ser observado nessa figura, a diminuição da pressão a partir do ponto A (pressão atmosférica) é realizada em patamares (B e C), através da regulação da válvula de escape da bomba de vácuo. Só quando se atinge a pressão de vácuo de trabalho é que se inicia o processo de infusão de resina no molde; nesse caso, quando se atingiu o patamar C. A pressão de vácuo de trabalho é mantida praticamente constante, em torno de 300 mbar.

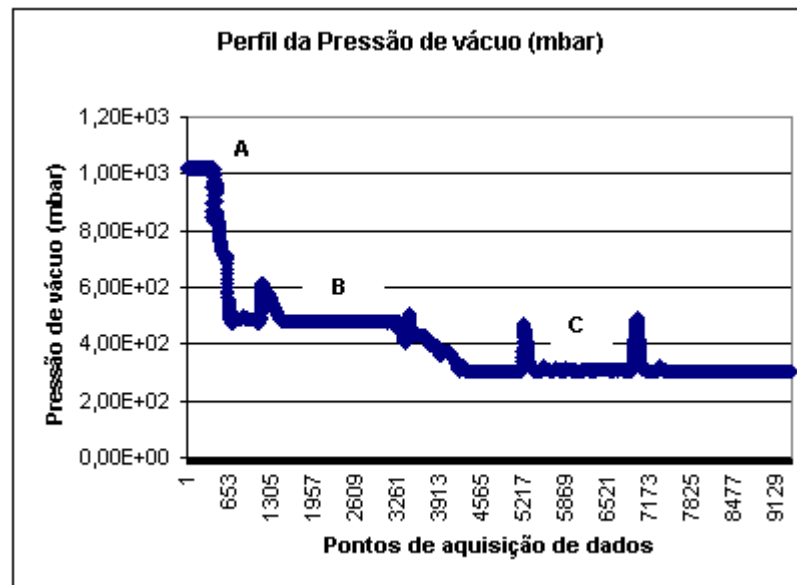


Figura 4.4 - Perfil da pressão de vácuo durante o experimento.

Baseado nos resultados iniciais obtidos, conclui-se que :

- O molde com 1 inlet (entrada de resina) e 4 vents e os seus respectivos componentes (inlet e vent) foram testados com sucesso.
- O processo de aquisição e análise de imagem, a instrumentação (sensores), o sistema de aquisição e processamento de sinais foram todos testados com sucesso.
- A pressão de injeção e a pressão de vácuo foram mantidas aproximadamente constantes durante o processo de infusão da resina.

Com o sucesso desse processamento, iniciaram-se os preparativos para o teste final da Estação de Processamento por RTM, ver seção seguinte.

4.1.3 Teste da estação de processamento por RTM: molde de múltiplas entradas e saídas

Com o projeto, fabricação e teste com êxito dos dispositivos de injeção de resina e bicos para a mangueira de vácuo e o projeto e fabricação do molde de múltiplos pontos de injeção e vácuo, realizou-se um experimento preliminar. A Figura 4.5 apresenta a estação de processamento por RTM atualmente disponível. As Figuras 4.6 e 4.7 apresentam, respectivamente, o sistema de instrumentação e o molde com múltiplos pontos de injeção e saídas (vácuo).



Figura 4.5 – Duas vistas da estação de processamento por RTM.

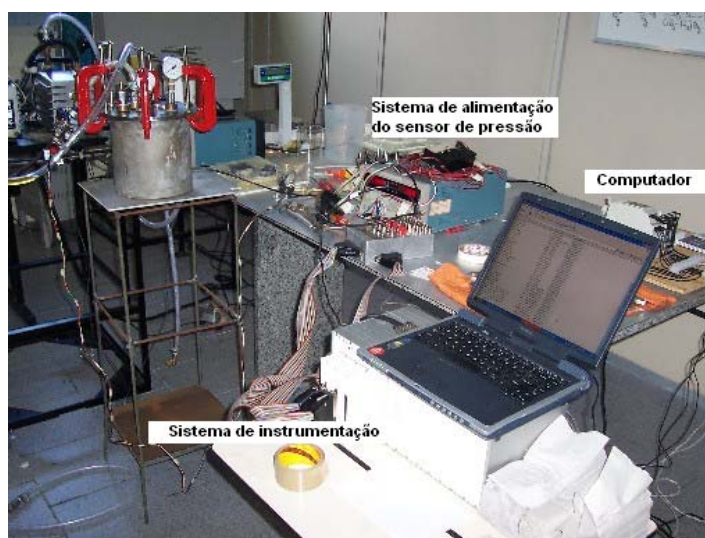


Figura 4.6 - Sistema de instrumentação adotado no processamento por RTM.

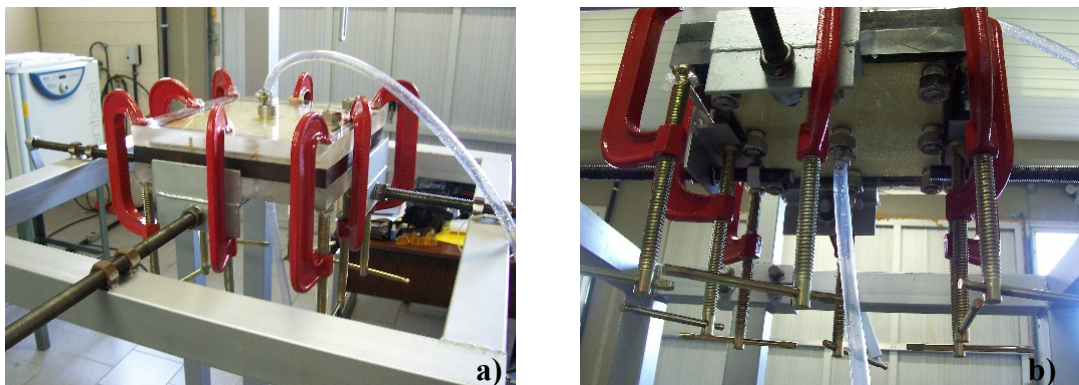


Figura 4.7 – Vistas superior (a) e inferior (b) do molde de múltiplos pontos de injeção e de saída de resina.

Com essa estação de processamento por RTM, realizou-se um experimento preliminar. Os materiais usados nesse experimento foram: tecido de fibra de vidro AF 0090 com gramatura de 1100 g/m^2 , fabricado pela Fibertex, e o fluido de teste usado foi glucose de milho diluída a 20% (água destilada). A preforma possuía 25 camadas de fibra de vidro e área de $238 \times 238 \text{ mm}^2$. Foi empregado o esquema 4 da seção 3.2.3.1 para monitorar os sensores de pressão de injeção de resina e de vácuo. A pressão de injeção da resina foi a pressão atmosférica e a pressão de vácuo foi 500mbar.

Baseado nesse experimento, conclui-se que:

- Foi desenvolvido com sucesso (projeto e fabricação) uma Estação de Processamento por RTM para materiais compósitos espessos.
- O molde de múltiplos pontos de injeção e de vácuo com espaçador de aço de 25,4 mm (1”) de espessura será usado na fabricação de todas as placas compósitas fabricadas por RTM neste trabalho de pesquisa.

4.2 Fabricação de placas compósitas espessas por RTM

Após o desenvolvimento da estação de processamento de RTM, iniciou-se a fabricação das placas compósitas espessas por RTM e análise dos resultados.

4.2.1 Definição da posição do ponto de injeção e de vácuo para o processamento por RTM

Com o projeto e fabricação do molde de múltiplas entradas e saídas da Estação de Processamento por RTM desenvolvida, pode-se definir qual seria a disposição dos pontos de entrada de resina e saída de ar a ser usada na fabricação das placas compósitas. O primeiro arranjo a ser testado foi: entrada central na tampa superior e 4 saídas em cada um dos cantos da tampa inferior para aplicação do vácuo, ver setas indicativas na Figura 4.8. A Figura 4.9 apresenta o molhamento obtido por esse arranjo nas últimas camadas da preforma; como pode ser observado, o molhamento foi incompleto. A área central não-molhada pela resina (“dry spot”) foi obtida praticamente de forma semelhante em todas as outras camadas ao longo da espessura.

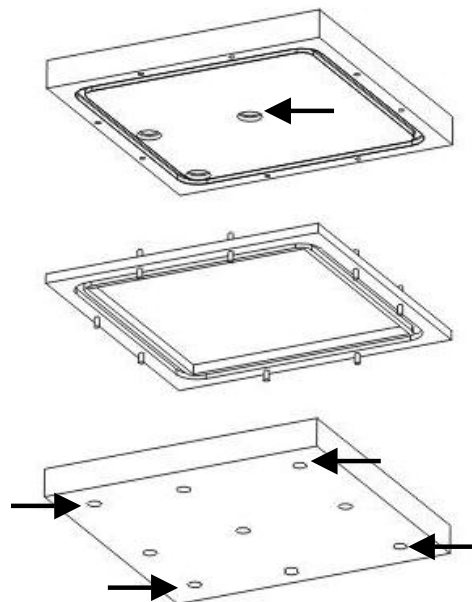


Figura 4.8 - Primeiro esquema de lay-out a ser usado no processamento por RTM.

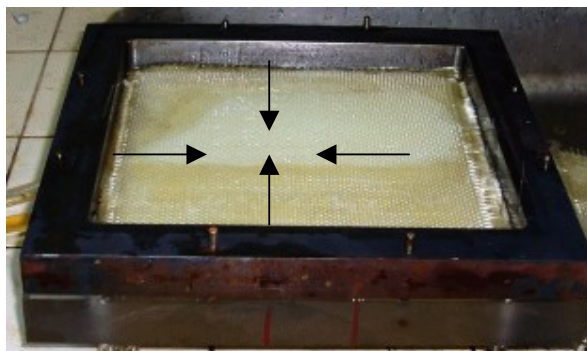


Figura 4.9 – Região não molhada da última camada da preforma.

A falta de molhamento da área central da preforma está relacionada com a posição do ponto de injeção (central) e dos pontos de vácuo, fazendo com que esse arranjo fosse descartado.

O segundo arranjo a ser testado foi: entrada central na tampa superior e 1 saída central da tampa inferior para aplicação do vácuo, ver setas indicativas na Figura 4.10. A Figura 4.11 apresenta o resultado desse experimento; como pode ser observado, o molhamento das camadas da preforma foi completo. A área central molhada foi obtida de forma semelhante em todas as outras camadas ao longo da espessura.

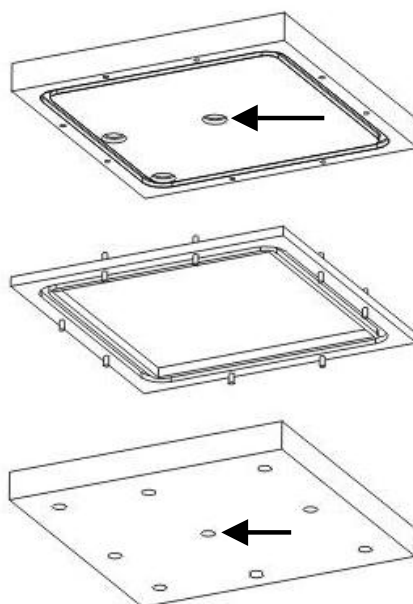


Figura 4.10 - Segundo arranjo testado e aprovado para uso no processamento por RTM.



Figura 4.11 – Molhamento obtido na primeira (a) e na última (b) camadas da preforma do experimento com o molde com múltiplos pontos de injeção e saídas.

Baseado nesse resultado, conclui-se que: a) houve molhamento da área central da preforma; b) o ponto de injeção central e o ponto de vácuo também central tiveram resultado positivo, fazendo com que esse arranjo fosse aprovado para a uso em todas as placas compósitas fabricadas por RTM neste trabalho de pesquisa.

4.2.2 Processamento de placas compósitas por RTM

Iniciou-se o processo de fabricação das placas compósitas, seguindo o planejamento de experimentos proposto na Tabela 3.3 (experimento 1). Uma placa de material compósito com as seguintes especificações foi fabricada: 32 camadas de tecido de fibra de vidro AF 0090 e pressão de vácuo no valor de 500 mbar (não foi usada pressão positiva). O sistema polimérico teve a seguinte composição: 600 g de resina Derakane 411-350, 9 g de Butanox (1,5%) e 1,8 g de acelerador CoNap (0,3%). A temperatura ambiente era de 24,9°C e a umidade relativa era de 56%. Nesse processamento, foi usada a campânula como sistema de injeção.

Antes de se colocar a preforma no molde, aplicou-se no mesmo uma camada de desmoldante, cera de carnaúba empregada em móveis. Depois da placa pronta, iniciou-se a análise visual da mesma. O processo de desmoldagem da placa compósita falhou como pode ser visto na Figura 4.12. A placa compósita ficou colada na tampa superior do molde, sendo necessário o uso de uma prensa hidráulica para o descolamento do compósito da

mesma. Esse procedimento adotado ameaçou a integridade do molde, porém foi o único que se demonstrou capaz de desmoldar a peça.

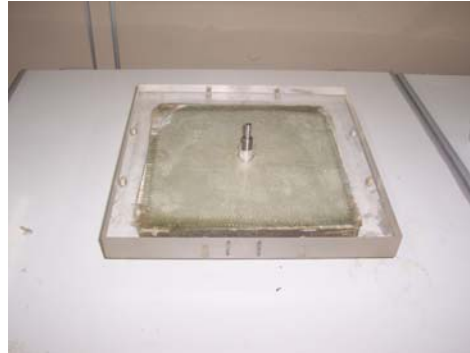


Figura 4.12 – Placa compósita colada na tampa superior do molde.

Depois da placa desmoldada, iniciou-se a análise do seu preenchimento, Figura 4.13.

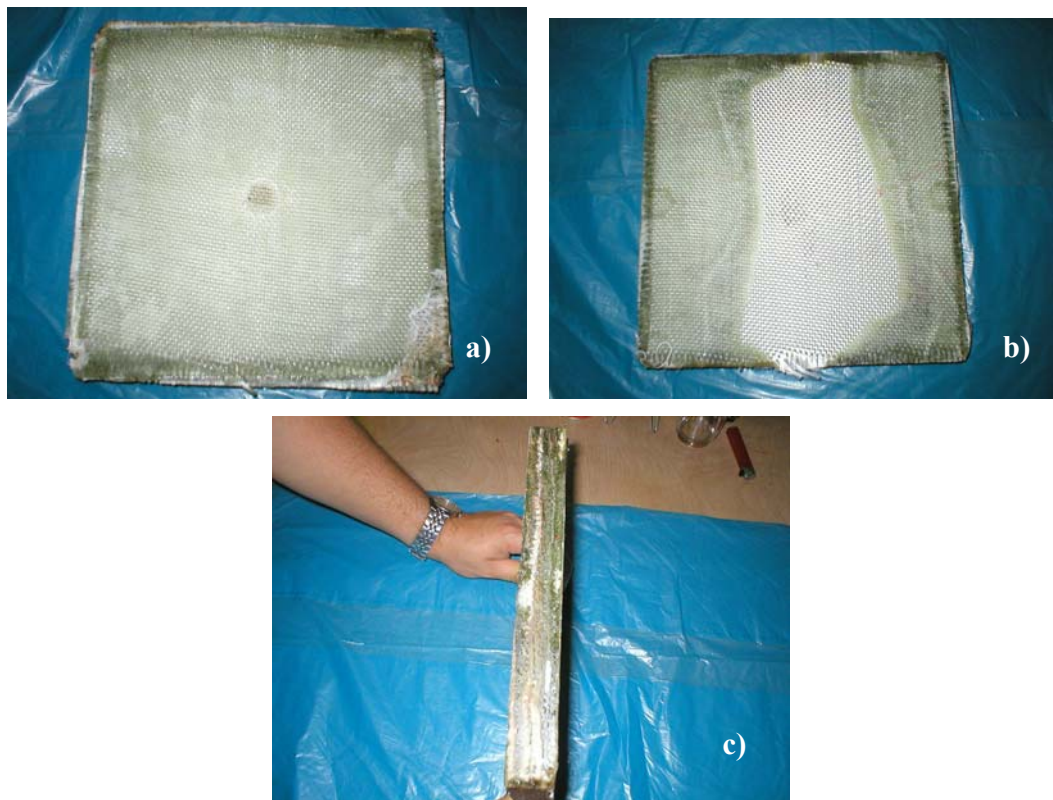


Figura 4.13 – Placa compósita processada : (a) vista superior (b) vista inferior da placa e (c) vista lateral.

A quantidade de resina utilizada não foi suficiente para o preenchimento da placa como pode ser observado na Figura 4.13(b). A falta de resina causou mau acabamento na lateral da placa 4.13(c). A placa foi seccionada ao longo da sua espessura para a análise da penetração da resina, Figura 4.14.

Como indicado na Figura 4.14, houve o preenchimento das fibras até uma profundidade em torno de 12 mm.

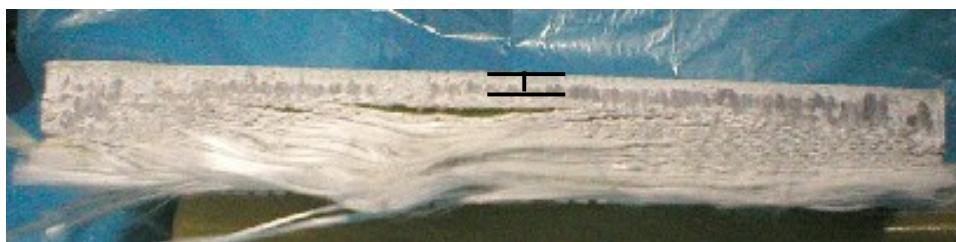


Figura 4.14 - Preenchimento da placa compósita processada.

Com a falha no preenchimento da preforma desse processamento, tornou-se necessária a repetição desse experimento, porém com algumas modificações de procedimento :

- Um novo procedimento de desmoldagem foi aplicado, consistindo na aplicação de cera de carnaúba específica para uso em moldes de injeção (três camadas bem distribuídas sobre a superfície do molde em intervalos de tempo de 15 minutos), seguida da aplicação do filme de PVA (duas camadas sobre a superfície do molde em intervalos de tempo também de 15 minutos).
- A pressão de vácuo foi alterada para 300 mbar.
- A quantidade de resina foi aumentada para 1100 gramas, já que menos da metade da placa processada foi preenchida, ver Figura 4.14.

Nesse novo processamento (experimento 2 da Tabela 3.3), foi mantido o mesmo número de camadas (32) e o sistema de injeção de resina usado continuou sendo a campânula. Depois da placa processada e desmoldada, foi realizada a análise visual da mesma, ver Figura 4.15.

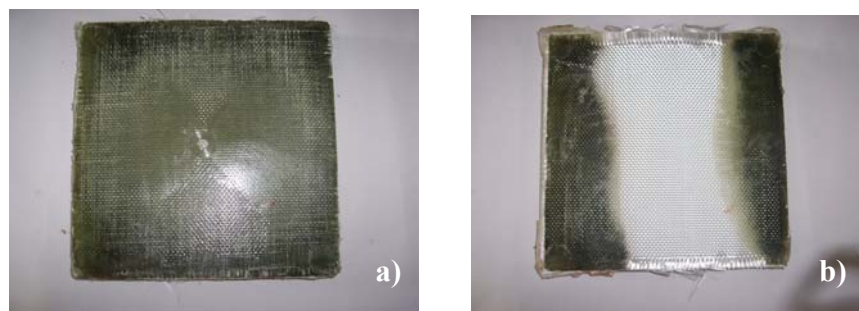


Figura 4.15 – Placa processada (a) vista superior e (b) vista inferior.

O processo de desmoldagem da placa compósita funcionou sem maiores dificuldades; os desmoldantes cumpriram o seu propósito. Porém, mais uma vez a preforma não foi preenchida completamente. Quando foi aberta a campânula do sistema de injeção, foi observado que havia ainda muita resina no reservatório de injeção, porém gelificada.

Duas hipóteses surgiram para explicação da falha desse segundo processamento: uma no campo da cinética de cura, já que foi alterada significativamente a quantidade de resina na campânula e a outra no campo da mecânica dos fluidos, ou seja, a perda de carga gerada pelos componentes do sistema de injeção de resina (conexão, válvula, mangueiras). Portanto, era necessário estudar o escoamento viscoso no interior do sistema de injeção, para dessa forma, propor modificações no sistema.

4.2.3 Estudo analítico do sistema de injeção de resina do processamento por RTM

Com a incapacidade de fabricação de placas compósitas com 32 camadas, surgiu a necessidade de se modificar o sistema de injeção de resina. A implementação desse projeto passa por ações a serem desenvolvidas em três pontos:

- Estudo por meio de modelos analíticos dos escoamentos presentes no processamento por RTM
- Análise do sistema de vácuo
- Soluções baseadas na cinética de cura da resina

Seguem as análises do sistema de injeção de resina.

Análise do escoamento no interior do sistema de injeção de resina do equipamento de RTM

O equipamento de RTM desenvolvido neste trabalho é controlado por três tipos de escoamento: escoamento no sistema de vácuo, escoamento da resina até antes de entrar no molde e o escoamento da resina no interior da preforma. O segundo tipo de escoamento é o foco desse estudo. O primeiro passo foi analisar, através de modelos analíticos de escoamento de fluidos, o sistema de injeção de resina. A Figura 4.16 apresenta o sistema de injeção tipo campânula e a Figura 4.17 é a representação esquemática desse sistema onde serão aplicados os modelos analíticos de escoamento viscoso no interior de tubos, Fox e McDonald [1988].



Figura 4.16 – Sistema de injeção tipo campânula.

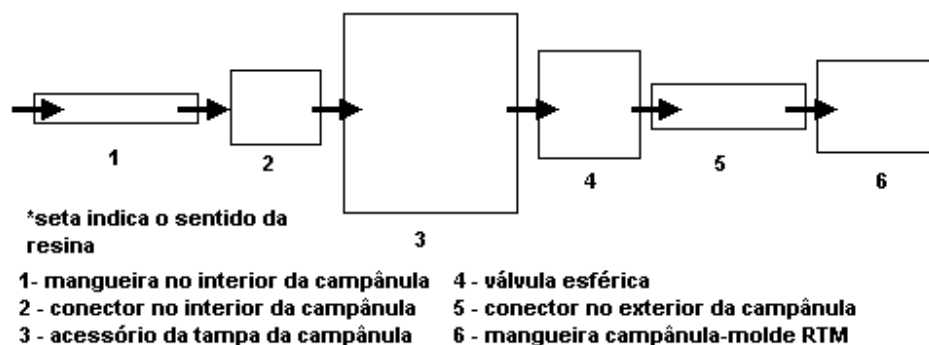


Figura 4.17 – Esquema dos componentes do sistema de injeção de resina do processamento de RTM desenvolvido.

As Figuras 4.16 e 4.17 apresentam o sistema de injeção de resina usado no processamento por RTM. Nele, observam-se diversos componentes: conectores, mangueiras e válvula esférica. Todos esses componentes compreendem o caminho que a resina percorre desde o interior da campânula até a entrada na preforma. Baseando-se no modelo analítico da Mecânica dos Fluidos, pode-se afirmar que existem nesse sistema dois tipos principais de perda de carga: as perdas localizadas e as contínuas e que podem ser modeladas analiticamente pela equação 4.1:

$$h = \frac{fLV^2}{2.D} + \frac{KeV^2}{2} \quad (4.1)$$

h = perda de carga

f = coeficiente de atrito

L= comprimento da mangueira

V= velocidade do fluido

D= diâmetro da mangueira

Ke= coeficiente de perda de carga local

O termo h corresponde à perda de carga do sistema; o primeiro termo após a igualdade é a soma das perdas contínuas (atrito no interior das mangueiras e outros componentes) e o segundo termo é a soma das perdas de carga localizadas (expansões e contrações presentes no sistema de injeção de resina). Analisando a relação entre a perda de carga e os outros parâmetros de projeto (L,V, etc), pode-se concluir os seguintes requisitos para o projeto de um sistema de injeção de resina para um equipamento de RTM:

- Diminuição das perdas localizadas com o uso de um menor número possível de peças.
- Usar acessórios de menor perda de carga possível.
- Menor comprimento das mangueiras de injeção.
- Maior diâmetro das mangueiras de injeção.

Análise do sistema de vácuo

Como a bomba de vácuo usada nos processamentos era uma bomba mecânica de rotor com vazão constante, foi proposto apenas diminuir o tamanho da mangueira de vácuo para diminuir o tempo de estabelecimento da pressão de trabalho, Moutinho *et al.* [1980].

Influência da cinética de cura da resina no escoamento do processamento por RTM

A cura da resina é acelerada proporcionalmente à sua quantidade, devido à maior liberação de calor durante a reação de polimerização e, conseqüentemente, diminuição do tempo de gelificação e aumento da viscosidade. Para evitar essa aceleração da cura da resina, optou-se pela divisão da resina em dois recipientes de armazenagem. Portanto o sistema de injeção de resina do processamento RTM deve possuir no mínimo dois recipientes de armazenagem de resina, esquema na Figura 4.18.

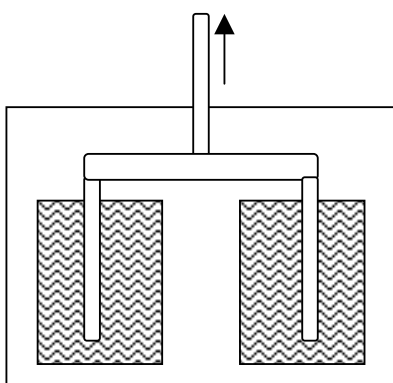


Figura 4.18 - Esquema proposto para a modificação do sistema de injeção de resina do processamento por RTM.

Baseado nas três análises anteriores, foi proposto um novo sistema de injeção para o processamento por RTM desenvolvido, ver Figura 4.19.



Figura 4.19 – Novo sistema de injeção de resina proposto a ser usado no processamento por RTM.

A Figura 4.19 apresenta o novo sistema de injeção de resina a ser testado e consiste, baseado nos estudos realizados anteriormente, apenas de dois béqueres de PP de 600 ml, comportando cada um 500g de resina e uma mangueira de injeção, onde uma das pontas estava diretamente mergulhada dentro de um dos beakers de PP e a outra ponta ligada diretamente ao inlet do molde de injeção. O comprimento da mangueira de injeção de 1/2" de diâmetro foi reduzido e fixado em 1,20 m. O comprimento da mangueira de vácuo foi reduzido e fixado em 2 m. Com exceção do inlet do molde de RTM, não há nenhum acessório no caminho percorrido pela resina.

Processamento por RTM da placa compósita fazendo uso do novo sistema de injeção

Uma nova tentativa de processamento foi realizada com intuito de fabricar a placa compósita especificada no experimento 2 da Tabela 3.3 (32 camadas de fibra e pressão de vácuo de 300 mbar), agora já fazendo uso do novo sistema de injeção proposto na seção 4.2.3 e que é apresentado na Figura 4.19.

A última modificação proposta para esse novo processamento está relacionada com o procedimento de uso do desmoldante. O uso da cera de carnaúba específica para moldes em conjunto com filme de PVA logrou êxito no processamento anterior, ver Figura 4.15. Porém

o uso de dois tipos de desmoldante tem como desvantagem longo tempo para a sua aplicação no molde. A solução foi fazer um teste só usando três camadas de PVA (a aplicação é feita com pincel, com intervalo de 20 minutos entre cada camada aplicada), sem o uso da cera. Depois da placa desmoldada iniciou-se a análise visual da mesma, ver Figura 4.20 (a) e (b).

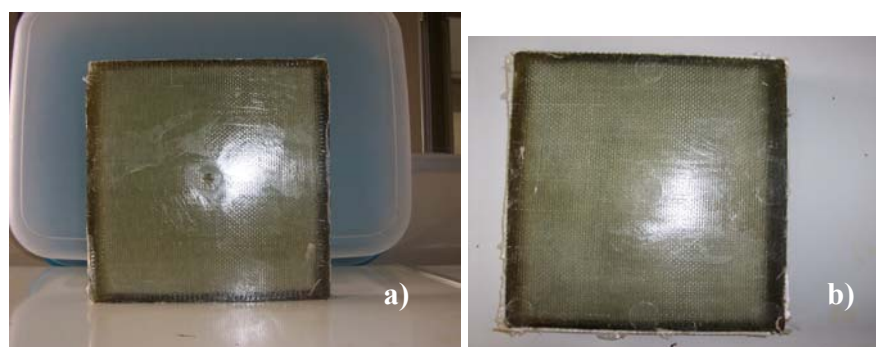


Figura 4.20 – Placa processada com sucesso por RTM: (a) vista superior e (b) vista inferior

Como pode ser observado, a placa compósita foi preenchida completamente, sendo essa a primeira placa fabricada com sucesso por RTM deste projeto de pesquisa. Portanto, é possível fabricar, com o equipamento de RTM desenvolvido, uma placa de compósito com 32 camadas de fibra de vidro e espessura de aproximadamente 25,4 mm apenas usando vácuo. O sucesso no processamento dessa placa só foi conseguido após a realização das modificações no sistema de injeção de resina.

A placa compósita obtida com sucesso por RTM pesa 2,472 Kg. A placa então foi pós-curada (70°C por 20 horas). Foi medida a dureza Barcol da placa (30 medidas), apresentada na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Dureza Barcol da placa compósita processada

Média	Desvio-padrão
58,4	8,74

A dureza Barcol recomendada para laminados compósitos varia de 30 a 70. Portanto a dureza da placa compósita produzida está na faixa adequada.

Com o equipamento de RTM projetado e fabricado neste trabalho, foi possível fabricar uma placa compósita de grande espessura (aproximadamente 25,4 mm ou 1”) constituída por um tecido de elevada gramatura (1100 g/m²), conseqüentemente baixíssima porosidade, e uma resina com uma viscosidade relativamente alta para RTM, ver Steenkamer [1994], que é de 350 cp, fazendo uso apenas de pressão de vácuo. A maioria dos trabalhos pesquisados usaram resinas com metade dessa viscosidade. Em nenhum dos artigos usados como fonte de pesquisa para este trabalho se processou uma placa compósita com essas três características simultaneamente (grande espessura da placa, grande gramatura do tecido e grande viscosidade da resina). Como desmoldante, obteve-se sucesso além de redução do tempo de preparação do molde e melhora no acabamento da placa produzida. Essa redução de tempo está relacionada com dois fatores: redução de tempo de aplicação do desmoldante e após a desmoldagem só é necessário um simples polimento (com alumina 4). Antes, quando se usava cera de carnaúba especial, era necessário lixamento (com lixa d’água 400 e 600) e depois polimento (com Alumina 4). A Figura 4.21 apresenta o filme de PVA retirado da tampa de acrílico inferior do molde após o processamento; como pode ser visto, o filme foi retirado praticamente inteiro da tampa do molde.



Figura 4.21 – Filme de PVA retirado após o processamento por RTM.

4.2.4 Influência do sistema de injeção e da quantidade de resina no processamento por RTM

Para verificar as hipóteses que foram realizadas durante esses processamentos iniciais com relação à influência do tipo de sistema de injeção e da quantidade de resina, foram realizados dois tipos de experimentos: o primeiro para medir a influência do sistema de injeção de resina no processamento e o segundo para medir a influência da quantidade de resina presente no reservatório de injeção.

Para o primeiro tipo de experimento, foram testadas duas condições: a resina é injetada através da campânula (onde a resina é forçada a passar por mangueira, conectores, válvulas) e, na segunda condição, a resina é injetada por meio de uma mangueira colocada diretamente dentro do béquer, sistema proposto na seção 4.2.3. No segundo tipo de experimento, foram testadas diversas quantidades de resina no interior do reservatório de alimentação. Os experimentos seguiram a Tabela 3.3 (Capítulo 3 – Materiais e Métodos).

As Figuras 4.22, 4.23 e 4.24 apresentam o início e o avanço da frente de escoamento da resina sobre a preforma do experimento 3 da Tabela 3.3. A Figura 4.22 apresenta o início do processo de injeção.



Figura 4.22- Início do processo de injeção do experimento 3.

Na Figura 4.23, pode ser observado que a frente de escoamento da resina sobre a preforma do experimento 3 possui formato elíptico. O eixo maior (semi-eixo maior $R1$) e o eixo menor (semi-eixo menor $R2$) da elipse formada podem ser considerados como compondo um sistema de eixos cartesianos.

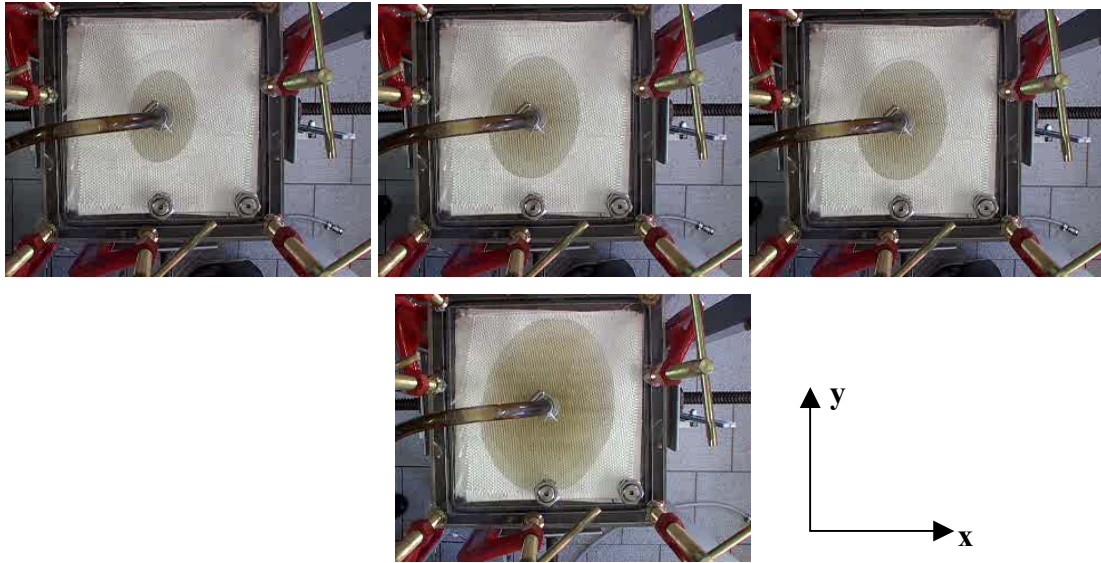


Figura 4.23 - Avanço da frente elíptica de escoamento da resina sobre a preforma no experimento 3.

A Figura 4.24 apresenta o completo preenchimento da parte superior da preforma.



Figura 4.24 - Parte superior da preforma do experimento 3 depois do preenchimento pela resina.

A Figura 4.25 apresenta o início da frente de escoamento na parte inferior da preforma. O tempo do surgimento dos primeiros sinais da resina na parte inferior do molde, ponto A, corresponde ao tempo de *race-tracking*.

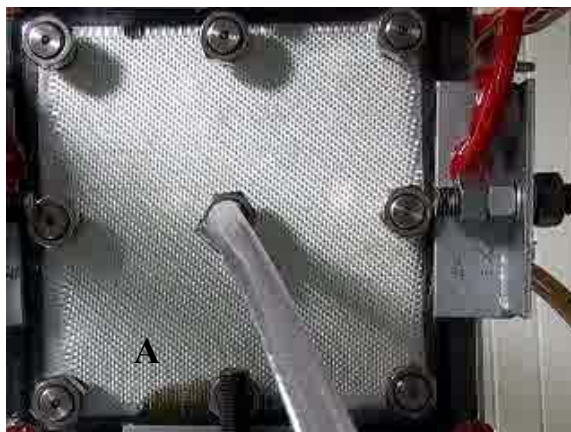


Figura 4.25 - Parte inferior da preforma do experimento 3 onde pode ser observado o surgimento dos primeiros sinais da resina, ponto A.

De uma forma geral, todos os experimentos apresentados na Tabela 3.3 tiveram comportamento semelhante ao analisado nas Figuras 4.22 a 4.25. As análises desses experimentos foram feitas fazendo uso dos seguintes parâmetros:

- Tempo para atingir o eixo maior (tempo R_1) e o eixo menor (tempo R_2) da elipse formada durante o escoamento da resina sobre a preforma no interior do molde, ver Figura 4.23, como proposto por Gauvin *et al.* [1996].
- Tempo do surgimento dos primeiros sinais da resina na parte inferior do molde (tempo de *race-tracking*), ver Figura 4.25.

Seguem os resultados dessas análises.

A Figura 4.26 apresenta a análise do escoamento no interior do molde baseando-se nos tempos R_1 e R_2 para os experimentos realizados.

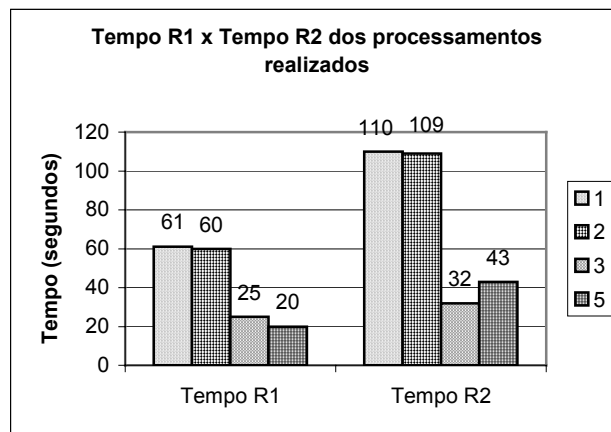


Figura 4.26 - Análise do escoamento no interior do molde baseando-se nos tempos R_1 e R_2 para os experimentos realizados.

O uso da campânula nos experimentos (1 e 2 da Tabela 3.3) mais do que dobrou os tempos (R_1 e R_2) para o total desenvolvimento da elipse formada durante o escoamento da resina através da preforma, quando comparado aos processamentos (3 e 5 da Tabela 3.3) que usaram como reservatório de injeção só o béquero, Figura 4.26.

A Figura 4.27 apresenta a análise do escoamento no interior do molde, baseando-se no tempo de *race-tracking* para os experimentos realizados.

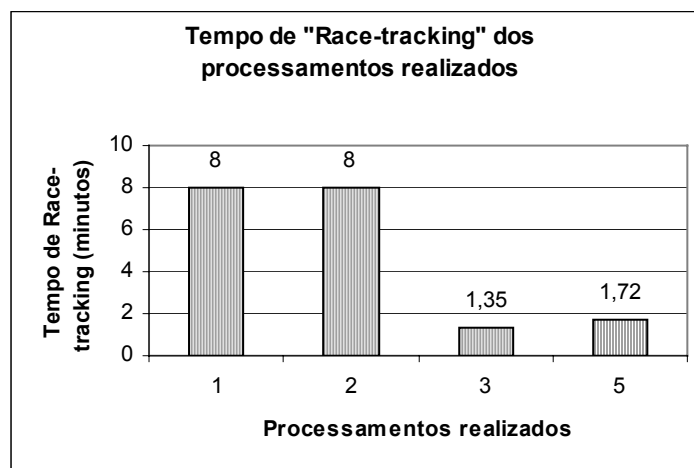


Figura 4.27 - Análise do escoamento no interior do molde baseado no tempo de *race-tracking* para os experimentos realizados.

O uso da campânula nos processamentos (1 e 2) mais do que quadruplicou os tempos de *race-tracking* através da preforma quando comparado aos processamentos (3 e 5) que usaram como reservatório de injeção só o béquero, Figura 4.27.

A grande diferença de comportamento apresentado durante o processamento com a mudança do sistema de injeção da campânula para um simples béquero pode estar relacionada com a maior perda de carga apresentada pelo primeiro sistema. Esses resultados experimentais apresentados nas Figuras 4.26 e 4.27 corroboram com as análises teóricas realizadas por Belloli *et al.* e Mastbergen [2004]. Portanto, o escoamento de resina no sistema de injeção é importante para o entendimento do processamento por RTM.

A Figura 4.28 apresenta a análise do escoamento no interior do molde baseado-se nos tempos R_1 e R_2 e *race-tracking* para os experimentos 1 e 2.

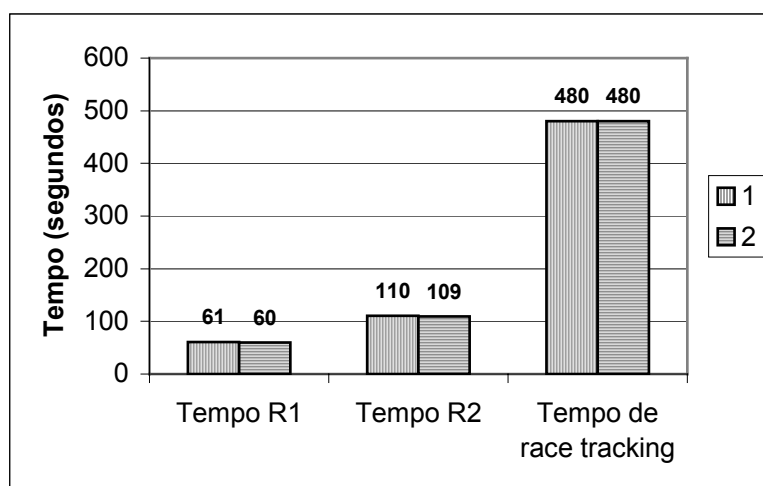


Figura 4.28 - Análise do escoamento no interior do molde baseado nos tempos R_1 , R_2 e de *race-tracking* para os experimentos realizados.

O vácuo teve o seu valor alterado de 500 mbar no experimento 1 para 300 mbar no experimento 2. Com essa mudança, esperava-se a diminuição dos tempos R_1 , R_2 e o *race-tracking*, porém os mesmos ficaram praticamente inalterados, ver Figura 4.28. A única diferença entre os experimentos 1 e 2 está na quantidade de resina no reservatório da campânula que é de 600g e 1100g, respectivamente.

A Figura 4.29 apresenta a análise do escoamento no interior do molde baseado-se nos tempos R_1 e R_2 e *race-tracking* para os experimentos 3, 4 e 5.

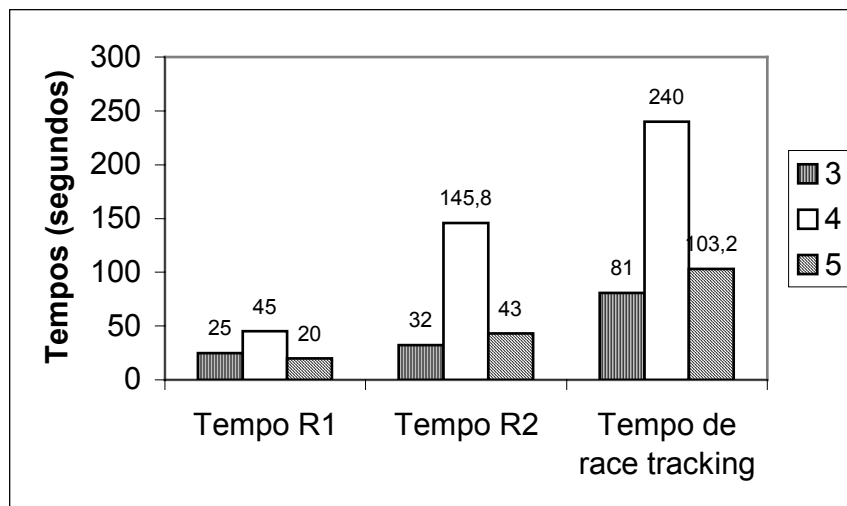


Figura 4.29 - Análise do escoamento no interior do molde baseando-se nos tempos R_1 , R_2 e de *race-tracking* para os experimentos realizados.

A comparação desses experimentos mostra a diferença de tempo de preenchimento com a mudança da quantidade de resina. Os experimentos 3 e 5 são aparentemente semelhantes, ver Tabela 3.3, ambos possuindo a mesma quantidade de resina nos béqueres; porém os tempos do experimento 4, comparando com os experimentos anteriores, são bem maiores.

O que as Figuras 4.28 e 4.29 pode estar indicando é a influência da quantidade de resina no reservatório de injeção no processamento por RTM. Uma das explicações para esse fato seria a aceleração da reação de cura da resina com uma maior quantidade da mesma, devido à maior liberação de calor durante a reação de polimerização.

Baseado nos experimentos realizados, pode-se concluir que:

- O sistema de injeção de resina é importante no real entendimento do processamento por RTM. Nos processamentos realizados, esse sistema alterou o tempo de preenchimento da preforma.
- A quantidade de resina no reservatório de injeção pode influenciar o processamento por RTM. Nos processamentos realizados, a quantidade de resina não só alterou os tempos de preenchimento como impediu o preenchimento da preforma em um dos processamentos (experimento 2 - Tabela 3.3).

4.2.5 Influência do *race-tracking* no preenchimento da preforma

A Figura 4.30 (a) apresenta a forma de preenchimento da preforma na parte superior e as Figuras 4.30(b), (c) e (d) apresentam a forma de preenchimento da preforma na parte inferior do molde. A frente de escoamento apresentou formato elíptico, Figura 4.30(a), atingiu a parede lateral do molde e intenso *race-tracking* (tendência do fluido penetrar no espaço entre a fibra e a parede do molde) foi notado após o completo espalhamento da resina sobre a preforma. Como pode ser observado nas Figuras 4.30(b), (c) e (d), a placa foi preenchida das bordas para o centro.

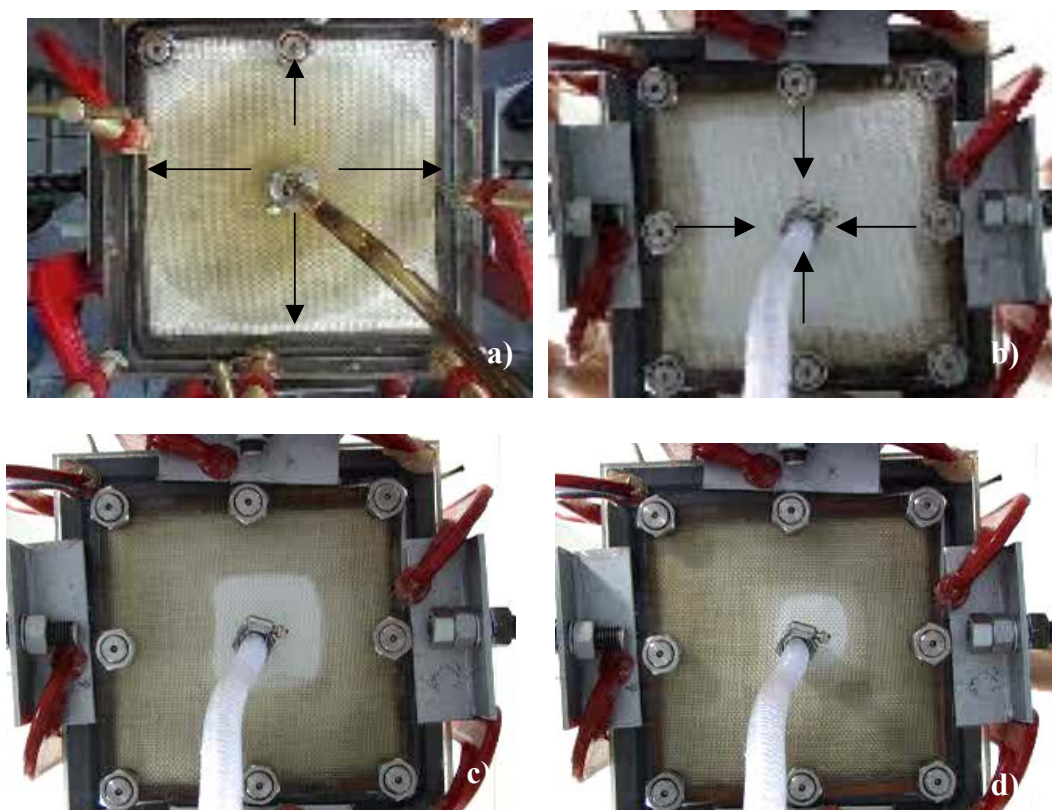


Figura 4.30 - Imagens da frente de escoamento avançando no interior do molde.

A placa produzida sem sucesso pelo experimento 2 da Tabela 3.3 foi seccionada para análise, ver Figura 4.31. Como indicado nessa figura, houve o preenchimento das fibras até uma profundidade em torno de 12 mm; a área à esquerda da curva apresenta-se impregnada de resina e na da direita não houve impregnação de resina, o que corrobora os resultados apresentados anteriormente; ou seja, o preenchimento da preforma foi da borda para o centro.

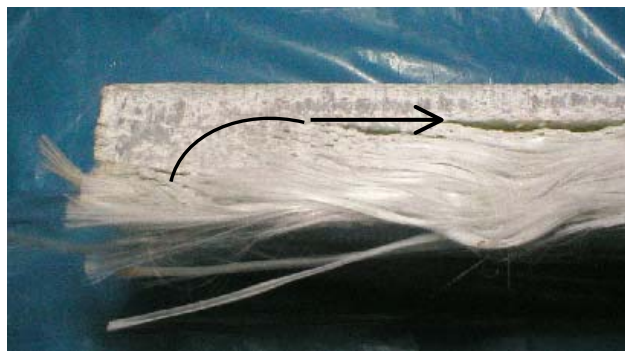


Figura 4.31 - Preenchimento da placa do experimento 2.

O que essas análises revelaram é que o fenômeno de *race tracking* é o responsável pelo preenchimento da preforma dos processamentos realizados. Esse fato corrobora as observações de Bickerton e Advani [1999], Abraham e McIlhagger [1998], Gebart e Strömbeck [2000] e Hammami *et al.* [1998].

Bickerton e Advani [1999] afirmam, em seu trabalho, que o *race-tracking* pode ser usado como estratégia de preenchimento de uma placa compósita fabricada por RTM. Abraham e McIlhagger [1998] afirmam que o fenômeno de *race-tracking* é bastante comum em processamentos por RTM com infusão radial de resina (ponto de injeção no centro da placa). Gebart e Strömbeck [2000] afirmam que o fenômeno de *race-tracking* é bastante comum em processamentos de placas espessas por RTM.

Hammami *et al.* [1998] afirmam em seu trabalho que o *race-tracking* pode produzir um importante fluxo transversal, em direção ao interior da preforma, gerado por um gradiente de pressão. Nos processamentos realizados, um gradiente de pressão pode existir entre a borda e o centro da preforma já que o ponto de vácuo é aplicado no centro da tampa inferior do molde, ver Figura 4.30(b). Esse gradiente de pressão, presente no interior da preforma, pode estar gerando o fluxo de resina no sentido da borda para o centro do molde e com isso preenchendo a preforma.

4.2.6 Processamento por RTM de placas compósitas com preformas de diferentes números de camadas

A partir desses resultados, iniciou-se uma série de estudos voltados para se descobrir os limites do processamento desenvolvido. Para tanto, duas séries de experimentos foram realizadas: o primeiro voltado para fabricação de placas com menos de 32 camadas de fibras

(ver Tabela 3.4) e o segundo voltado para fabricação de placas com mais de 32 camadas de fibras (ver Tabela 3.5).

Processamento por RTM de placas compósitas com menos de 32 camadas de fibras

Os experimentos realizados com preformas com menos de 32 camadas de fibras estão apresentados na Tabela 3.4 (Capítulo 3 – Materiais e Métodos). Iniciou-se a análise pela placa compósita com 22 camadas, ver Figura 4.32.

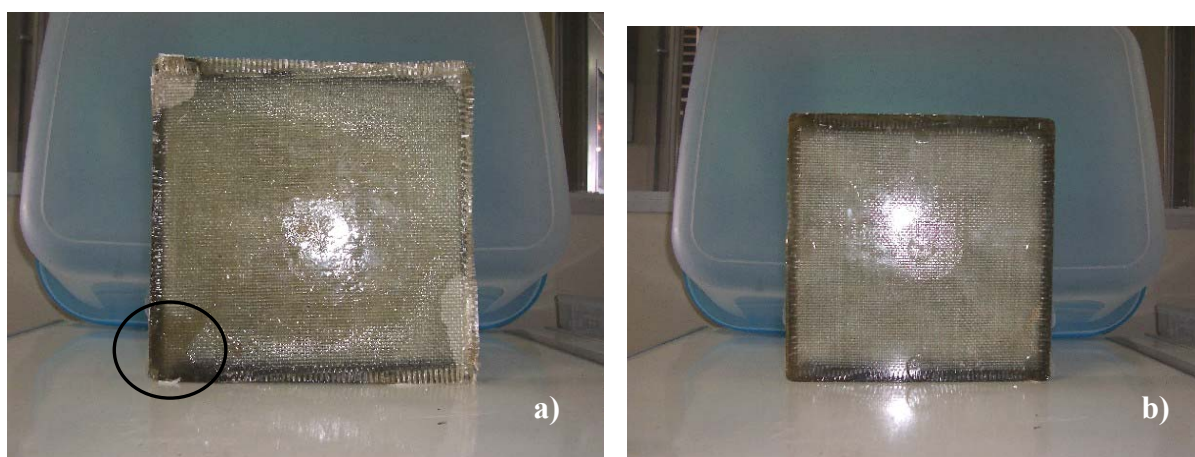


Figura 4.32 – Placa compósita com 22 camadas: (a) vista superior e (b) vista inferior da placa.

A Figura 4.32 (a) apresenta a vista superior do compósito com 22 camadas e, como pode ser observado, essa placa teve simultaneamente áreas com falta de resina (maior parte da área observada) e excesso de resina (indicado na Figura 4.32(a)). A Figura 4.32 (b) apresenta o bom acabamento obtido na superfície inferior (lado onde o vácuo é aplicado), sem os problemas apresentados pela superfície superior. A Figura 4.33 apresenta a vista lateral da placa. Como pode ser observado, houve movimento das fibras.

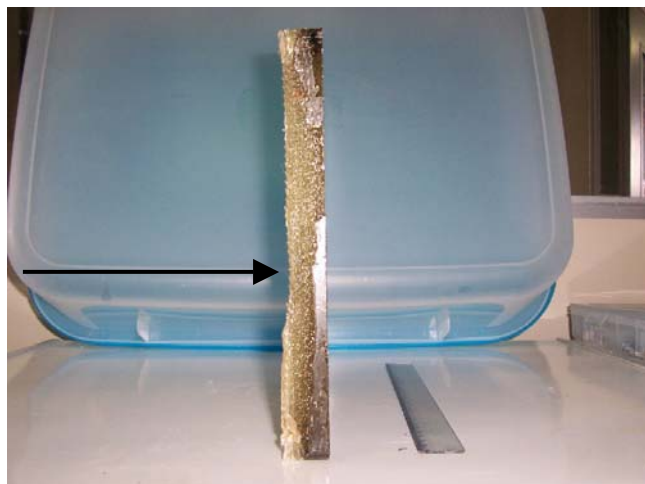


Figura 4.33 – Vista lateral da placa compósita de 22 camadas.

A placa compósita com 25 camadas está apresentada na Figura 4.34.

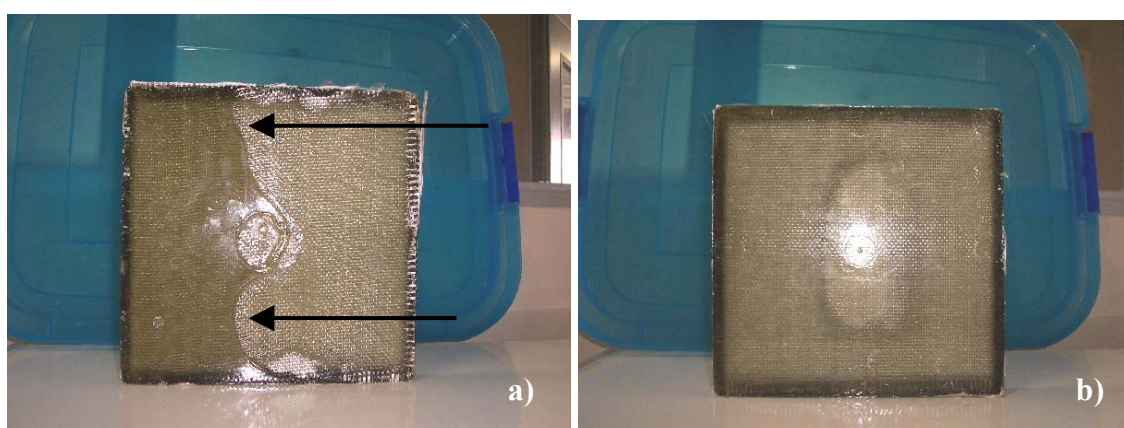


Figura 4.34 – Placa compósita com 25 camadas: (a) vista superior e (b) vista inferior da placa.

A Figura 4.34 (a) apresenta a vista superior do compósito com 25 camadas e, como pode ser observado, essa placa teve simultaneamente áreas com falta de resina (maior parte da área observada) e excesso de resina (indicado na Figura 4.34(a)). A Figura 4.34(b) apresenta o bom acabamento obtido na superfície inferior (lado onde o vácuo é aplicado), sem os problemas apresentados pela superfície superior. A Figura 4.35 apresenta a vista lateral da placa, rica em resina.



Figura 4.35 – Vista lateral da placa compósita com 25 camadas.

O excesso de resina presente na parte superior das placas compósitas de 22 e 25 camadas é a consequência do fenômeno conhecido como “flow on top”. Gebart e Strömbeck [2000] afirmam que esse fenômeno é característico quando se usam frações volumétricas de fibra muito baixas para uma determinada espessura do espaçador. Segundo esses autores, esse fenômeno é parecido com o de race-tracking; ou seja, uma região rica em resina sem fibras. O modo de evitar esse problema seria medindo a altura da preforma seca; a espessura do espaçador do molde deve ser próxima dessa altura. Porém essa medida é complexa de obter porque o uso do vácuo e a impregnação da preforma pela resina causam compactação da mesma, e essas duas variáveis não estão presentes quando se mede a preforma seca simplesmente. Portanto a solução para esse problema neste trabalho de pesquisa foi aumentar o número de camadas da preforma de 25 camadas para 28 camadas (aproximadamente 25,4 mm de altura).

A placa compósita com 28 camadas (experimento 8 da tabela 3.4), processada usando apenas o vácuo, está apresentada na Figura 4.36.



Figura 4.36 – Placa compósita com 28 camadas: (a) vista superior e (b) vista inferior da placa.

As Figuras 4.36 (a) e (b) apresentam a vista superior e inferior do compósito com 28 camadas, respectivamente, e como pode ser observado, essa placa foi produzida com sucesso e não apresentou problema de excesso de resina na parte superior da preforma (“flow on top”). Portanto, neste trabalho de pesquisa, a preforma tem que ter no mínimo 28 camadas de fibra.

A última preforma a ser testada foi a de 30 camadas (experimento 10 da tabela 3.4), ver Figuras 4.37 (a) e (b).

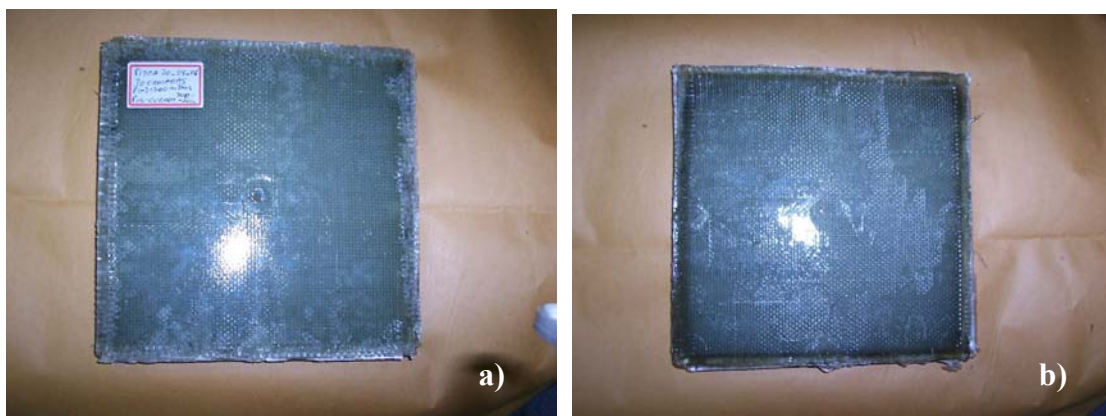


Figura 4.37 – Placa compósita com 30 camadas: (a) vista superior e (b) vista inferior da placa.

As Figuras 4.37 (a) e (b) apresentam a vista superior e inferior do compósito com 30 camadas respectivamente e, como pode ser observado, essa placa também foi produzida com sucesso.

Processamento por RTM de placas compósitas com mais de 32 camadas de fibras

Os experimentos realizados com preformas com mais de 32 camadas de fibras estão apresentados na Tabela 3.5 (Capítulo 3 – Materiais e Métodos).

Iniciou-se a análise pela placa compósita com 40 camadas, ver Figura 4.38.

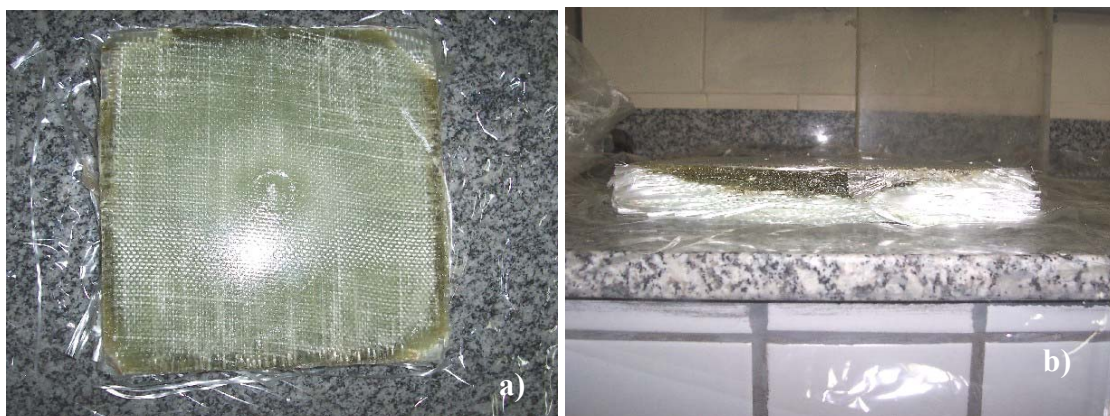


Figura 4.38 – Placa compósita com 40 camadas: (a) vista superior e (b) vista lateral da placa.

Como pode ser observado, a placa não foi preenchida completamente, Figura 4.38(b). Praticamente, não houve preenchimento ao longo da espessura. A Figura 4.38(b) apresenta a lateral da placa onde se vê claramente que nem mesmo o *race-tracking* conseguiu se desenvolver e, conseqüentemente, aproximadamente metade das fibras sequer foi minimamente molhada pela resina. Para o sistema de fibra-resina adotado e fazendo uso do equipamento de RTM desenvolvido neste trabalho, uma preforma com 40 camadas de fibra não pode ser fabricada.

A próxima preforma a ser testada foi a de 38 camadas. Mas dessa vez optou-se usar pressão positiva e vácuo simultaneamente. A pressão positiva variou de 1,5 bar a 2 bar; o resultado pode ser visto na Figura 4.39.

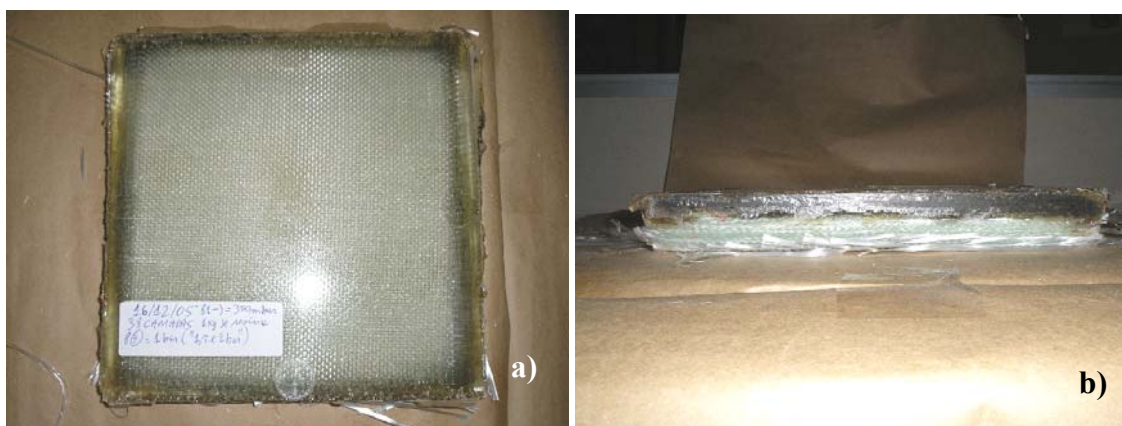


Figura 4.39 – Placa compósita com 38 camadas: (a) vista superior e (b) vista lateral da placa.

Como pode ser observado na Figura 4.39, mesmo aumentando a pressão de injeção, o processamento falhou mais uma vez e a preforma de 38 camadas não foi preenchida completamente, Figura 4.39(b). Praticamente, não houve preenchimento ao longo da espessura. A Figura 4.39(b) apresenta a lateral da placa onde se vê claramente que nem mesmo o *race-tracking* conseguiu se desenvolver e, conseqüentemente, aproximadamente metade das fibras se quer foi minimamente molhada pela resina. Para o sistema de fibra-resina adotado e fazendo uso do equipamento de RTM desenvolvido neste trabalho, uma preforma com 38 camadas de fibra não pôde ser fabricada.

A outra preforma a ser testada foi a de 34 camadas; o resultado pode ser visto na Figura 4.40.



Figura 4.40 – Placa compósita com 34 camadas: (a) vista superior, (b) vista lateral e (c) vista inferior da placa.

Como pode ser observado na Figura 4.40, o processamento falhou mais uma vez e a preforma de 34 camadas não foi preenchida completamente, Figura 4.40(b). Praticamente, não houve preenchimento ao longo da espessura. A Figura 4.40(b) apresenta a lateral da placa onde se vê claramente que o *race-tracking* não conseguiu desenvolver-se completamente. A

Figura 4.40(c) apresenta a vista inferior da placa. Pode-se observar que a resina não conseguiu avançar em direção ao centro da preforma. Para o sistema de fibra-resina adotado e fazendo uso do equipamento de RTM desenvolvido neste trabalho, uma preforma com 34 camadas de fibra não pôde ser fabricada. Não foi possível a fabricação de compósito com mais de 32 camadas e menos de 25 camadas de fibra pelo processamento RTM desenvolvido e com o sistema de fibra-resina adotado.

A baixa porosidade das preformas com mais de 32 camadas de fibra impediu o seu preenchimento. A baixa fração volumétrica de fibra no interior do molde das preformas com menos de 25 camadas criou uma região com excesso de resina sem fibra sobre as placas impedindo a sua fabricação por RTM. Só foi possível a fabricação por RTM das placas compósitas com o seguinte número de camadas de fibra: 28, 30 e 32. Portanto, para uma determinada espessura do espaçador do molde de injeção e para o sistema fibra-resina adotado, uma estreita faixa de preformas pode ser usada para a fabricação de placas compósitas por RTM.

4.2.7 Cálculo da fração volumétrica de fibra e da densidade das placas compósitas processadas

O cálculo da fração volumétrica de fibra, de matriz e de vazios foi realizado utilizando-se o procedimento G do método 1 (digestão da matriz em forno) da norma ASTM 3171. A Figura 4.41 apresenta as posições em que foram retiradas as amostras da placa compósita de 32 camadas submetidas aos procedimentos dessa norma.

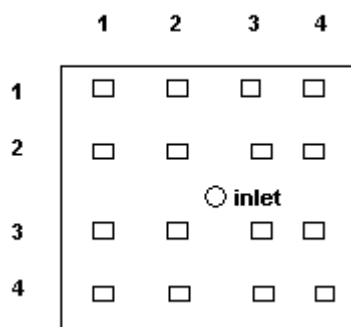


Figura 4.41 - Posições de retiradas das amostras da placa compósita de 32 camadas submetidas aos procedimentos da norma ASTM 3171.

Porém, esse procedimento de cálculo não logrou êxito pois das 16 amostras submetidas ao ensaio, 10 foram perdidas por erro experimental (a norma ASTM 3171 estabelece que frações volumétricas de vazios menores que -0,2% indicam falha no procedimento de ensaio). Devido ao grande erro experimental, esse procedimento não mais foi utilizado. Para a determinação da fração volumétrica da fibra utilizou-se então a seguinte expressão proposta nos trabalhos de Lacy [2006] e Ferreira [1994] :

$$V_f = W_f \cdot (\rho_c / \rho_f) \quad (4.2)$$

V_f = fração volumétrica de fibra

W_f = fração de massa de fibras

ρ_c = densidade do compósito

ρ_f = densidade da fibra

Para o cálculo da densidade dos compósitos de 28, 30 e 32 camadas processados, foram usados uma balança GEHAKA BG200 com precisão de três casas decimais, e um paquímetro digital Mitutoyo. Os corpos de prova selecionados para esse cálculo e para cálculo da fração volumétrica de fibra foram os confeccionados para o ensaio de resistência ao cisalhamento interlaminar, ver Figuras 3.12 e 3.14 (Capítulo 3 - Materiais e Métodos), 5 amostras para cada placa. Os resultados desses cálculos estão apresentados nas Tabelas 4.4 e 4.5.

Tabela 4.4 – Cálculo da densidade das placas compósitas

Placas compósitas	Massa (kg)	Densidade (g/cm ³)	
		Média	Desvio-padrão
28 camadas	2,318	1,682	0,030
30 camadas	2,373	1,764	0,005
32 camadas	2,472	1,766	0,030

Com relação à densidade, a placa compósita de 30 camadas é mais homogênea do que as placas de 28 e 32 camadas, ver Tabela 4.4. Fazendo uso da equação 4.2, foram calculadas as frações volumétricas de fibra dos compósitos. Os resultados desses cálculos estão apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Frações volumétricas de fibra dos compósitos

Placas compósitas	Fração volumétrica de fibra (%)	Desvio-padrão
28 camadas	42	0,009
30 camadas	46	0,004
32 camadas	47	0,008

4.2.8 Acabamento das placas compósitas processadas por RTM

Os aspectos das superfícies das placas compósitas processadas por RTM, cujas preformas foram preenchidas são apresentadas na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Acabamento das placas processadas por RTM.

Número de camadas das placas compósitas	Lado da injeção (superior)	Lado do vácuo (inferior)
22	Excesso de resina	1 *
25	Excesso de resina	1
28	$\frac{1}{2}$ **	1
30	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
32	1	1

* O número 1 significa que a superfície é lisa, ou seja, superfície onde a textura do tecido não pode ser percebida pelo toque.

** O número $\frac{1}{2}$ significa que existem regiões lisas e não-lisas (onde a textura do tecido pode ser percebida pelo toque).

As placas compósitas de 22 e 25 camadas apresentaram excesso de resina (“*flow on top*”) na superfície do lado da injeção, Figura 4.32(a) e 4.34 (a) da seção 4.2.6; no lado do vácuo (parte inferior do molde), elas apresentaram uma superfície lisa, Figura 4.42.

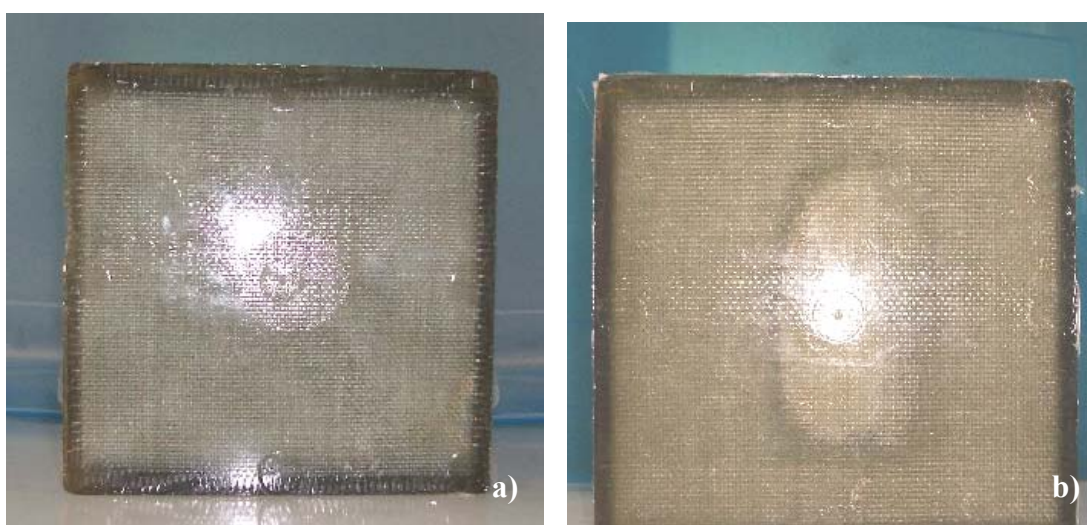


Figura 4.42 - Superfície apresentada pelo lado do vácuo das placas compósitas de 22 (a) e 25 (b) camadas; ambas superfícies apresentam-se lisas ao toque.

A placa compósita de 28 camadas apresentou acabamento superior no lado do vácuo (superfície lisa), Figura 4.43, quando comparado ao lado da injeção de resina (parte superior do molde) da respectiva placa, Figura 4.44 (a) onde foi percebida a presença de regiões lisas e não-lisas (onde a textura do tecido pode ser percebida pelo toque), Figura 4.44(b).



Figura 4.43 – Superfície apresentada pelo lado do vácuo da placa compósita de 28 camadas.

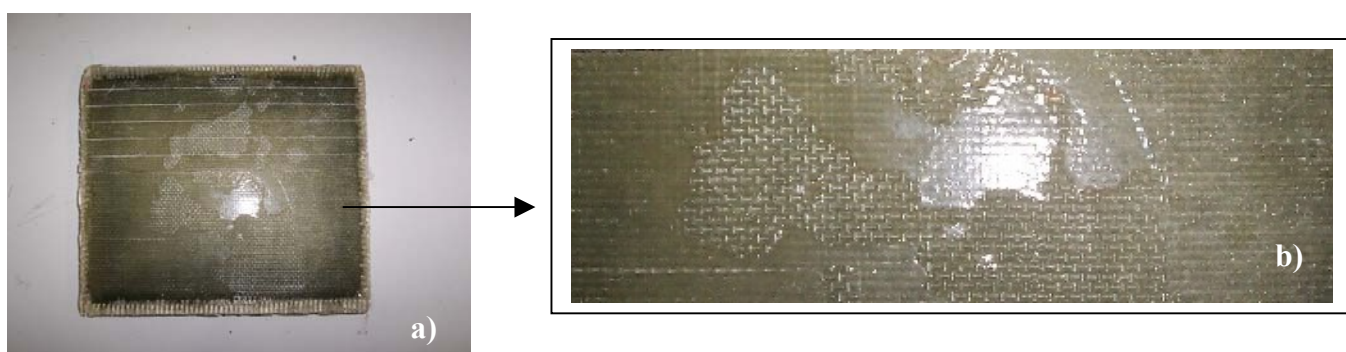


Figura 4.44 – (a) Superfície apresentada pelo lado da injeção da placa compósita de 28 camadas e (b) detalhe dessa superfície apresentando regiões lisas e não – lisas ao toque.

Todas essas placas (22, 25 e 28 camadas) apresentaram a superfície do lado do vácuo lisa ao toque.

A placa de 30 camadas apresentou a superfície de ambos os lados (lado da injeção e do vácuo) com qualidade superficial semelhante. Ambas apresentaram regiões lisas e não-lisas (onde a textura do tecido pode ser percebida pelo toque), Figuras 4.45 e 4.46.

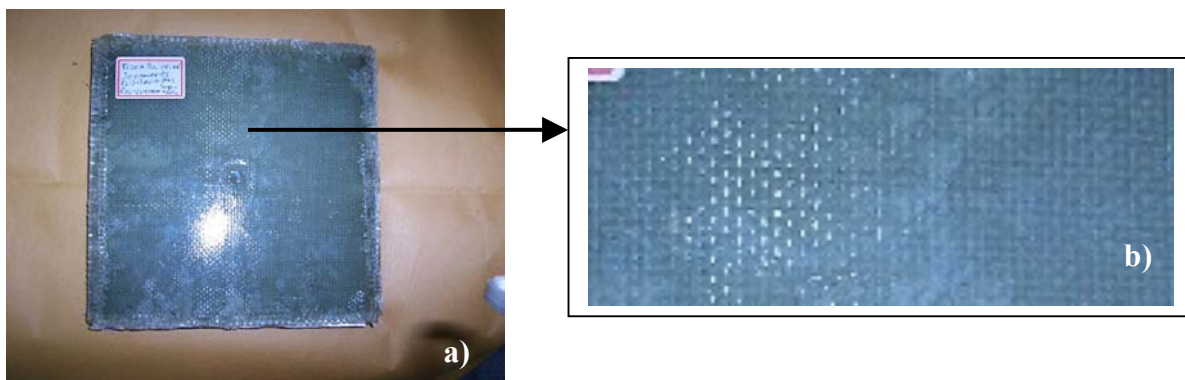


Figura 4.45 - (a) Superfície apresentada pelo lado da injeção da placa compósita de 30 camadas e (b) detalhe dessa superfície apresentando regiões lisas e não – lisas ao toque.

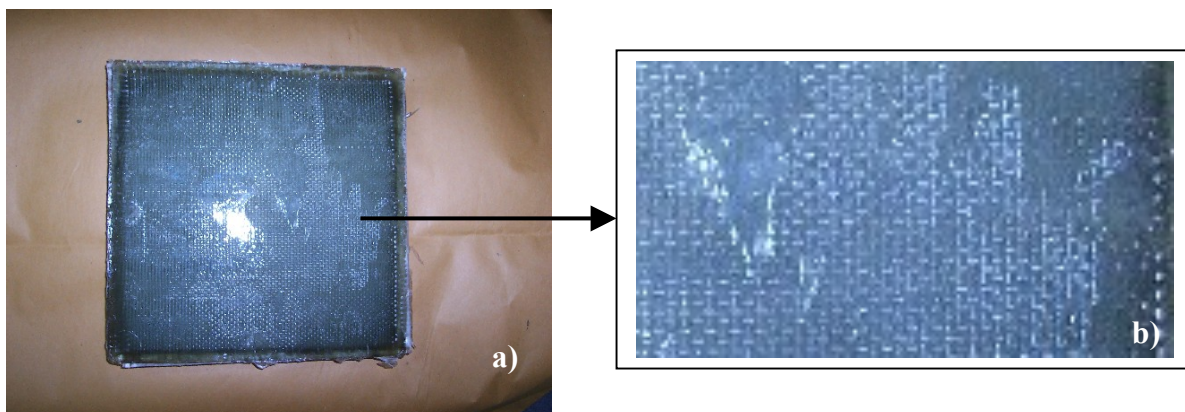


Figura 4.46 - (a) Superfície apresentada pelo lado do vácuo da placa compósita de 30 camadas e (b) detalhe dessa superfície apresentando regiões lisas e não – lisas ao toque.

A placa de 32 camadas apresentou a superfície de ambos os lados (lado da injeção e do vácuo) com qualidade superficial semelhante, ambas lisas, sem textura de tecido, Figura 4.47(a) e (b).

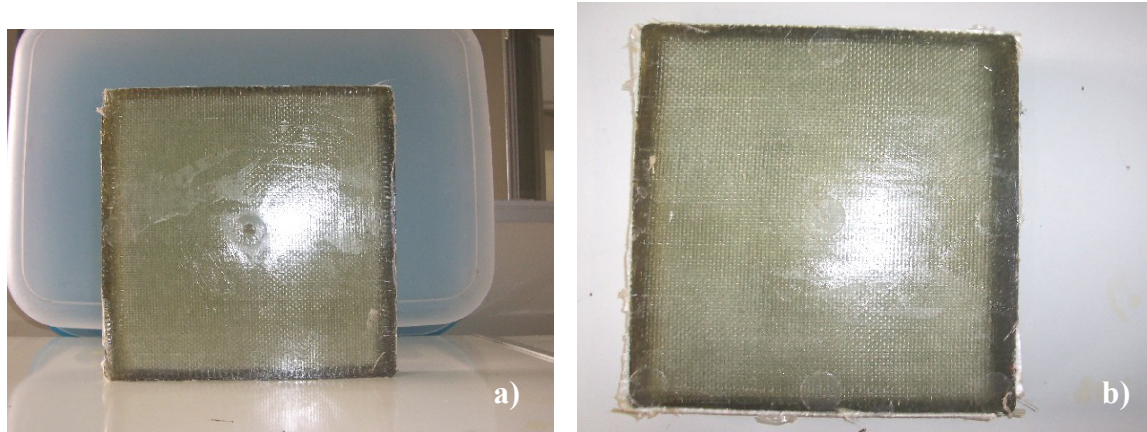


Figura 4.47 - Superfícies do lado da injeção (a) e do vácuo (b) da placa compósita de 32 camadas.

Kim e Lee [2002] afirmam em seu trabalho que a qualidade superficial de materiais compósitos é função do tipo de material, seqüência de empilhamento e da contração da resina (processo de cura). Heider *et al.* afirmam que para se obter qualidade superficial em placas compósitas fabricadas por RTM é preciso ter entre a parede do molde e o tecido da fibra (preforma) uma região rica em resina, eliminando assim a textura de tecido, preenchendo os picos e vales da textura e obtendo uma superfície lisa ao toque humano, Figura 4.48.

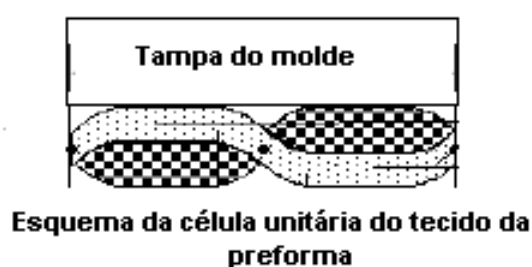


Figura 4.48 – Esquema da célula unitária do tecido da preforma.

A placa de 32 camadas foi a que apresentou melhor acabamento superficial em ambos os lados (lado da injeção e do vácuo). As superfícies desses lados são lisas ao toque humano. Portanto a placa de 32 camadas conseguiu reter, em ambas as superfícies, resina suficiente para eliminar a rugosidade do tecido provavelmente devido ao seu maior número de camadas de fibra.

4.2.9 Variação da espessura das placas compósitas processadas por RTM

Para as placas compósitas processadas que tiveram suas preformas preenchidas e que não tiveram problemas com acabamento, como excesso de resina na superfície (*flow on top*), foi medida a variação de sua espessura tanto no sentido x (trama) como no sentido y (urdume), ver Figura 4.49 e Tabela 4.7.

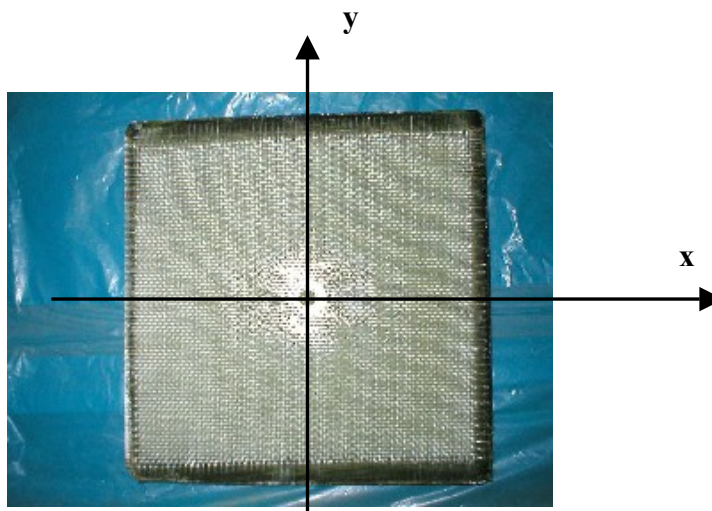


Figura 4.49 – Eixos x e y de indicação da direção de medição da espessura da placa.

Fazendo uso de uma máquina para medidas tridimensionais de objetos, LK G-90C, disponível na seção de Modelagem e Metrologia do CTEx, foi levantada a variação de espessura das placas compósitas fabricadas ao longo do eixo x (trama) e y (urdume) e o resultado se encontra na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Média das espessuras das placas processadas na direção x e y em mm

Número de camadas da placa	Pressão positiva	Pressão de vácuo (mbar)	Altura da preforma seca no interior do molde	Média das espessuras da placa na direção x e y em mm	
				x(trama)	y (urdume)
28	atmosférica	300	Aprox. 25,4mm	24,39	24,17
30	atmosférica	300	> 25,4 mm	25,03	24,86
32	atmosférica	300	> 25,4 mm	25,12	25,04

As placas compósitas de 28, 30 e 32 camadas processadas com pressão atmosférica e pressão de vácuo não conseguiram atingir a espessura de 25,4 mm, ver Tabela 4.7. Esses resultados estão de acordo com Bickerton *et al.* [2003] que afirmam em seu trabalho que a infusão da resina no interior da preforma usada no processamento por RTM causa lubrificação das fibras e a conseqüente compactação da preforma. Abraham *et al.* [1998] afirmam que o vácuo no processamento por RTM proporciona tanto impregnação como compactação da preforma; a própria contração da resina após a cura gera compactação. A compactação das placas compósitas processadas por RTM neste trabalho provavelmente ocorreu por um balanço de todos os mecanismos apresentados anteriormente: lubrificação das fibras, o uso do vácuo e a contração da resina após cura. Essas placas compósitas apresentaram maior compactação na direção do urdume do que da trama.

A placa de 28 camadas processada com pressão positiva de 1,5 bar e pressão de vácuo foi fabricada para avaliar a influência da pressão positiva na variação da espessura das placas compósitas processadas, ver Tabela 3.4 (Capítulo 3 - Materiais e Métodos). A espessura média dessa placa compósita foi de 25,52 mm, maior do que a espessura do espaçador (25,4 mm).

A diferença entre a espessura média dessa placa compósita e a espessura do espaçador é de 0,12 mm que é próxima da deflexão máxima da tampa superior do molde, prevista pela simulação realizada, ver Figura 3.36 (Capítulo 3 - Materiais e Métodos). Esses resultados indicam que a pressão positiva causou deflexão na tampa superior do molde, o que gerou esse aumento médio de espessura.

O uso da pressão positiva no processamento da placa compósita de 28 camadas causou a redução da quantidade de resina impregnada na sua preforma quando comparada com a placa compósita de 28 camadas processada só com pressão de vácuo, ver Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Comparação entre as placas de 28 camadas processadas por pressão positiva e vácuo e pressão atmosférica e vácuo, respectivamente

Número de camadas da placa	Pressão positiva	Pressão de vácuo (mbar)	Massa de resina impregnada na preforma	Tempo de “race-tracking” (s)
28	1,5 bar	300	698 gramas	2
28	atmosférica	300	817 gramas	18

Outra consequência do uso da pressão positiva (1,5 bar) no processamento da placa compósita de 28 camadas foi a drástica redução no tempo de race-tracking (tempo do surgimento dos primeiros sinais da resina na parte inferior do molde): de 18 segundos para 2 segundos quando comparado à placa de 28 camadas processada com pressão de vácuo, ver Tabela 4.8. Barraza *et al.* [2004] afirmam que a maior consequência do aumento da velocidade de injeção da resina no interior do molde é a formação de defeitos como vazios e regiões não preenchidas nos compósitos processados por RTM.

A combinação desses dois fatores, menor quantidade de resina presente na preforma e rápido preenchimento da mesma, gerou na placa compósita de 28 camadas processada com pressão positiva, uma grande quantidade de vazios (linhas brancas da Figura 4.50), a ponto dessa placa não poder ser considerada como submetida a um processamento válido, este resultado está de acordo com a afirmação de Barraza *et al.* [2004].



Figura 4.50 – Placa compósita de 28 camadas processada por RTM com pressão de injeção de 1,5 bar.

4.2.10 Curva de infusão de resina no interior das preformas usadas

Foi calculada a quantidade de resina que foi injetada pelo equipamento RTM desenvolvido nas preformas utilizadas, preenchidas ou não, ver Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Variação da quantidade de resina na preforma com o número de camadas.

Número de camadas da preforma	Massa da resina do compósito (gramas)	Pressão de injeção	Pressão de vácuo (mbar)	Observação
22	733	Atmosférica	300	Excesso de resina
25	832	Atmosférica	300	Excesso de resina
28	817	Atmosférica	300	Preenchida
30	766	Atmosférica	300	Preenchida
32	760	Atmosférica	300	Preenchida
34	220	Atmosférica	300	Não preenchida
38	153	1,5 a 2 bar	300	Não preenchida
40	136	Atmosférica	300	Não preenchida

A Figura 4.51 apresenta o gráfico da variação da quantidade de resina na preforma com o número de camadas.

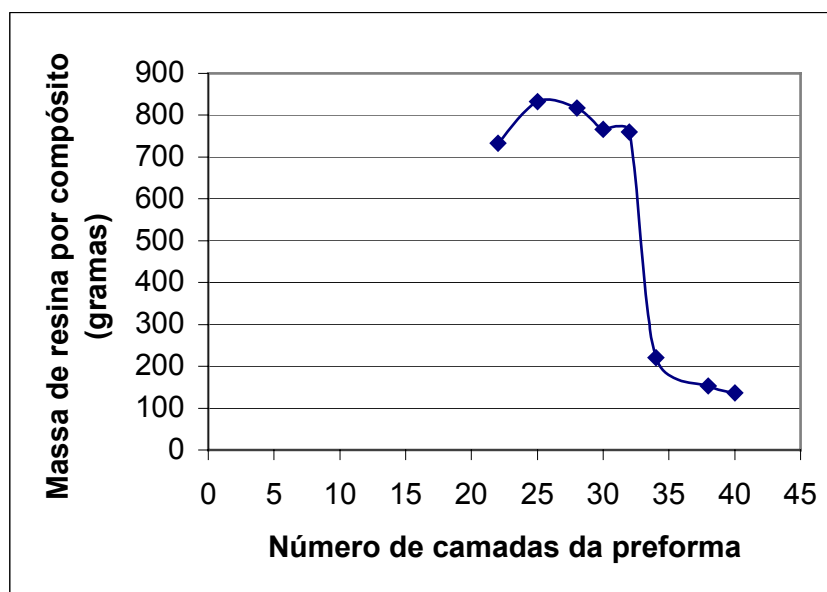


Figura 4.51 – Gráfico da variação da quantidade de resina do compósito com o número de camadas.

A capacidade de injeção de resina na preforma é fortemente influenciada pela variação do número de camadas quando se mantém fixa a espessura do espaçador, Figura 4.51. A quantidade de resina injetada na preforma aumenta entre 22 e 25 camadas, começa a diminuir lentamente a partir de 28 camadas, tendendo a um patamar entre 30 e 32 camadas; depois, sofre uma queda abrupta a partir de 34 camadas, não mais se recuperando e tendendo continuamente à diminuição, até 40 camadas. A placa de 32 camadas foi processada com sucesso, mas o aumento de 2 camadas na preforma (preforma de 34 camadas) reduziu a capacidade de injeção de resina no interior da preforma em aproximadamente 70% e, como consequência, inviabilizou o processamento por RTM, não sendo mais possível a injeção de resina suficiente para a impregnação das preformas com mais de 34 camadas.

Esses resultados experimentais estão de acordo com Chen *et al.* [2001] e Lane [2006]. Os pesquisadores Chen *et al.* [2001] afirmam que os tecidos planos (como os usados neste trabalho de pesquisa) possuem, como principal mecanismo de compactação atuante durante a compressibilidade dos mesmos no interior do molde, o mecanismo denominado tipo “Nest”, que consiste no “casamento” dos picos e vales dos tecidos durante o empilhamento das camadas, ver Figura 4.52.

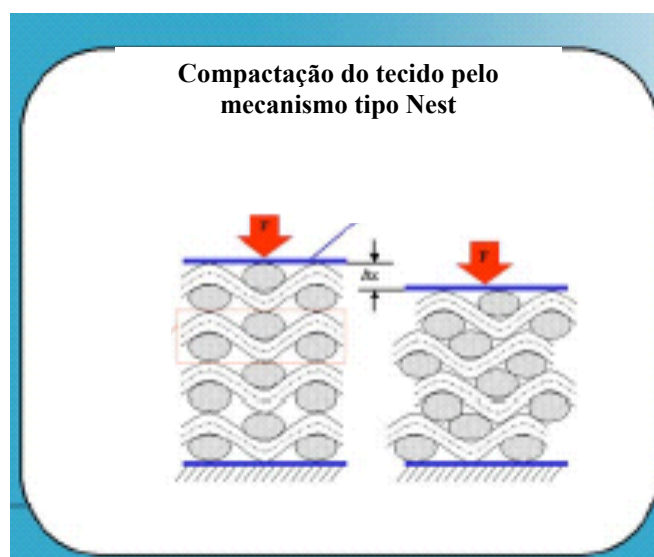


Figura 4.52 – Compactação de um tecido plano pelo mecanismo tipo “Nest”.

Esse mecanismo diminui os macroporos da preforma com o aumento do número de camadas no interior do molde, impedindo a infusão de resina no interior da mesma, Figura

4.52. Lane [2006] afirma que o simples empilhamento de um tecido é prejudicial à infusão de resina no interior da preforma e que dependendo da quantidade de camadas empilhadas, não haverá possibilidade de infusão de resina na preforma, responsabilizando também o mecanismo tipo “Nest” como causa dessa impossibilidade.

Em suma, os macroporos das preformas usadas neste trabalho foram, com o aumento do número de camadas, gradualmente sendo fechados e perdendo a sua interconectividade até o ponto da incapacidade de processamento.

4.2.11 Resistência ao Cisalhamento Interlaminar de compósitos fabricados por Moldagem de Transferência de Resina

Os compósitos fabricados com 28, 30 e 32 camadas foram avaliados por análise de imagens digitais, pelo cálculo da densidade e por ensaio mecânico de cisalhamento interlaminar (Interlaminar Shear Strength, ILSS), de acordo com a norma D 2344 da ASTM (Flexão Curta).

Análises dos modos de falha dos corpos de prova ensaiados

A Figura 4.53 apresenta os corpos de prova 3, 4 e 5 da placa compósita de 28 camadas após o ensaio de cisalhamento interlaminar. Aparentemente, as trincas foram criadas e propagadas a partir dos vazios presentes na parte central desses compósitos, assinalados na Figura 4.53. Corroborando esse resultado, têm-se os trabalhos de Botelho e Rezende [2002] e Costa *et al.* [2001] que afirmam que os vazios são propagadores de trincas e defeitos.

Alguns dos corpos de prova, após o ensaio de cisalhamento interlaminar, sofreram dois outros tipos diferentes de dano que são apresentados nas Figuras 4.54 e 4.55.



Figura 4.53 – Dano após o ensaio de cisalhamento interlaminar dos corpos de prova 3, 4 e 5 da placa compósita de 28 camadas.

Na Figura 4.54, a delaminação no corpo de prova 3 da placa de 30 camadas de fibra (30_3, ver seção 3.2.2.6) se inicia no ponto de contato do rolete superior do ensaio de ILSS, ponto A, e se propaga em direção ao ponto de contato do rolete inferior desse dispositivo, ponto B. Segundo Mallick [1993], esse dano é característico de ensaios de cisalhamento interlaminar por flexão curta.



Figura 4.54 – Dano após o ensaio de cisalhamento interlaminar do corpo de prova 3 da placa compósita de 30 camadas (30_3).

A Figura 4.55 apresenta o dano sofrido pelo corpo de prova 30_1 e consta de uma delaminação aproximadamente no meio do corpo de prova.



Figura 4.55 – Dano após o ensaio de cisalhamento interlaminar do corpo de prova 1 da placa compósita de 30 camadas.

Todos os danos apresentados pelos corpos de prova ensaiados são característicos do ensaio de cisalhamento interlaminar por flexão curta em materiais compósitos.

Análise de distribuição de poros dos corpos de prova ensaiados

A Figura 4.56 apresenta a superfície lateral do corpo de prova para ensaio ILSS 28_3 (retirado do compósito de 28 camadas da posição 3, ver seção 3.2.2.6), a ser analisado com relação aos tipos de poros (vazios).

Essa análise pode ser estendida para outros corpos de prova usados nesse ensaio, com exceção dos corpos de prova retirados da placa compósita de 30 camadas. Foi observada a presença de duas regiões distintas no corpo de prova: nas bordas direita e esquerda, a presença de pequenos e dispersos vazios, assinalados nas Figuras 4.56 (b) e 4.56(c) por pequenos círculos; e na parte central, vazios achatados e alongados na direção longitudinal das fibras ao longo da interface fibra/matriz, Figura 4.56(a).

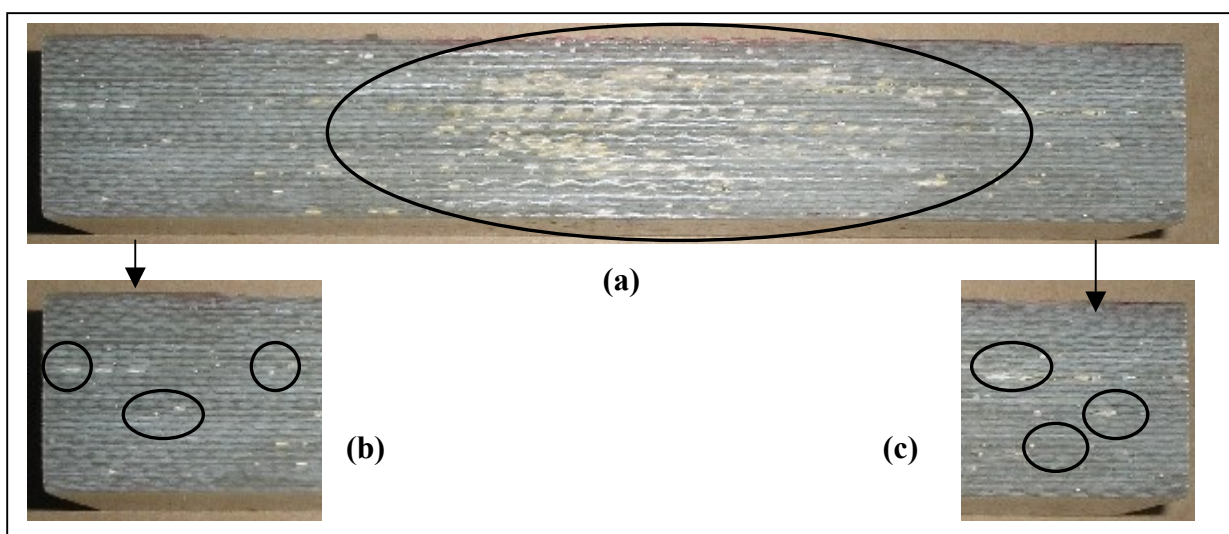


Figura 4.56 - Superfície lateral do corpo de prova para ensaio ILSS retirado do compósito de 28 camadas da posição 3.

Segundo Costa *et al.* [2001], pequenos vazios esféricos são originados da evaporação de voláteis e os vazios achatados tendem a ser formados ao longo da interface trama/urdume e da fibra/matriz sendo a sua origem ligada ao aprisionamento de bolsas de ar.

As Figuras 4.57, 4.58 e 4.59 apresentam as análises das imagens digitais da superfície lateral dos corpos de prova das placas compósitas de 28, 32 e 30 camadas, respectivamente, antes de serem submetidos ao ensaio de cisalhamento interlaminar. Seguem as conclusões dessa análise.

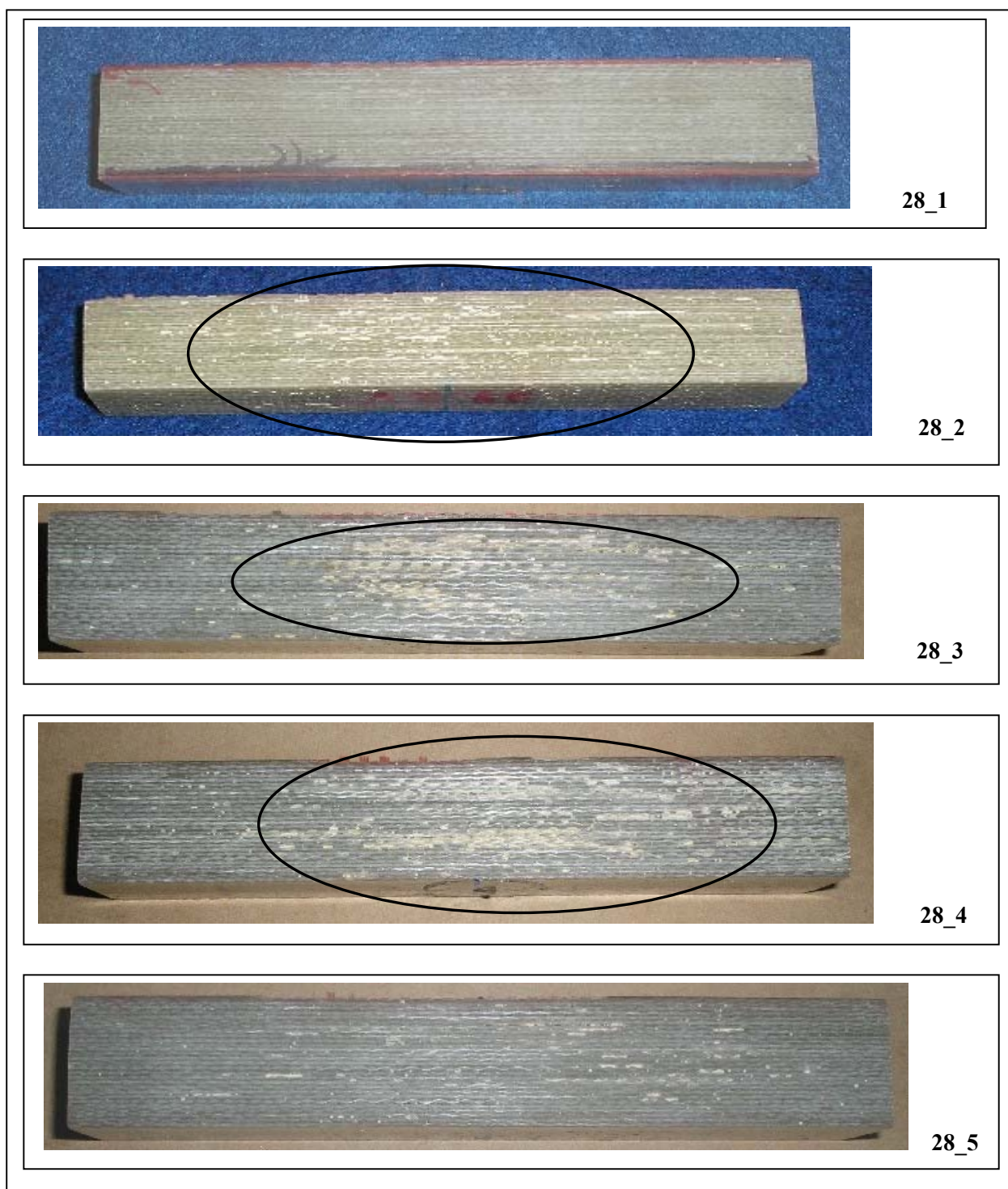


Figura 4.57 - Superfície lateral dos corpos de prova da placa compósita de 28 camadas.



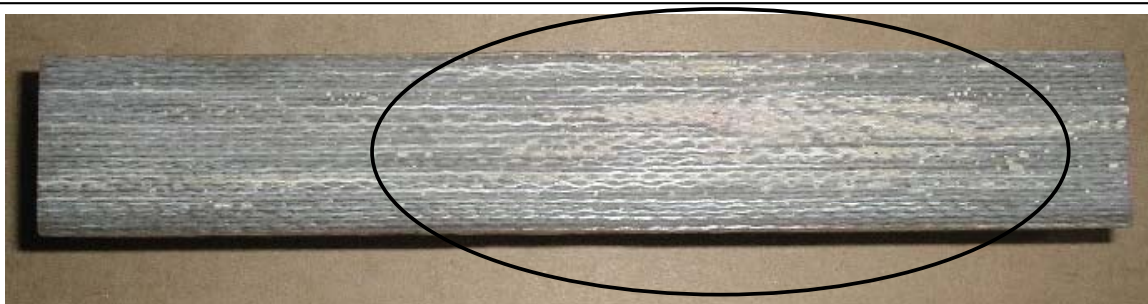
32_1



32_2



32_3

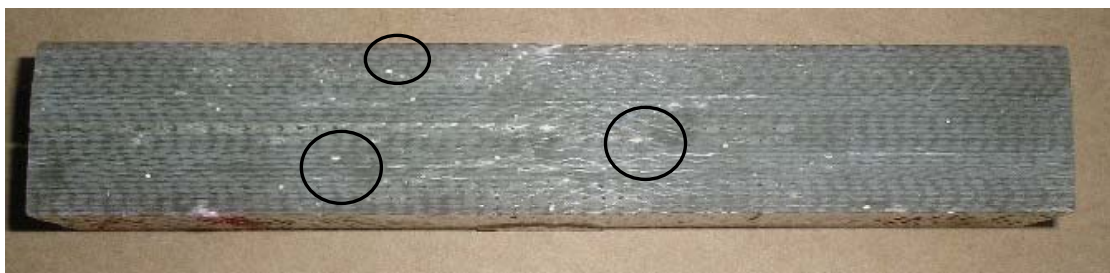


32_4

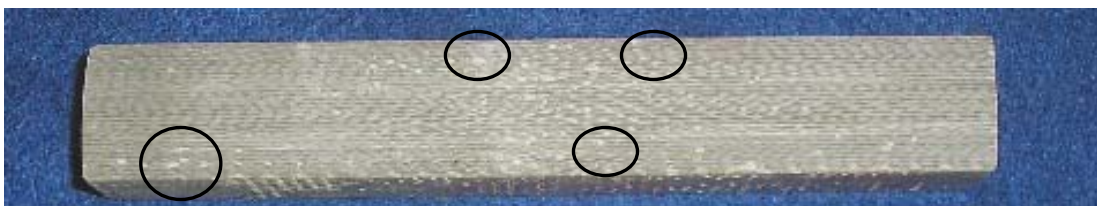


32_5

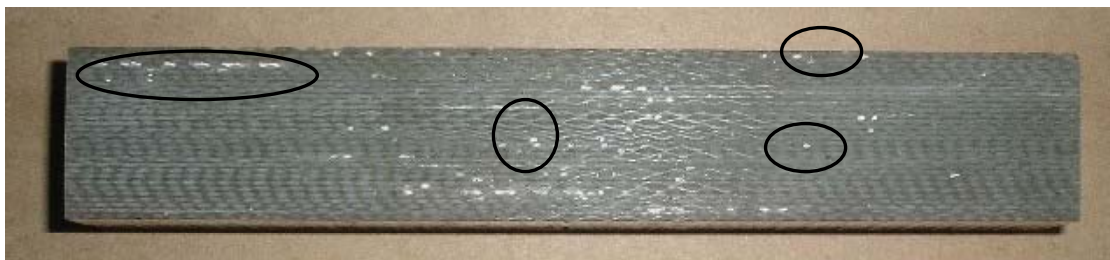
Figura 4.58 - Superfície lateral dos corpos de prova da placa compósita de 32 camadas.



30_1



30_2



30_3



30_4



30_5

Figura 4.59 - Superfície lateral dos corpos de prova da placa compósita de 30 camadas.

Os corpos de prova retirados das placas compósitas de 28 e 32 camadas apresentam a distribuição de poros semelhantes, ver Figuras 4.57 e 4.58; ou seja, os vazios achatados e alongados (na direção longitudinal das fibras ao longo da interface fibra/matriz) aumentam da borda para o centro de ambas as placas. Já os corpos de prova retirados da placa compósita de 30 camadas, não apresentam esse comportamento: os vazios achatados não aumentam em direção ao centro da placa, ver Figura 4.59. Os vazios presentes nesses corpos de prova são pequenos e dispersos de formato achatado ou não.

Esse aumento da quantidade de vazios nos corpos de prova das placas compósitas de 28 e 32 camadas segue a direção do fluxo de preenchimento da resina no interior da preforma dos compósitos processados por RTM, da borda para o centro, sendo o centro de todos os corpos de prova a região de coalescência das frentes de fluxo, ver seção 4.2.5. Esse resultado está de acordo com Pearce *et al.* [1998] e Abraham e McIlhagger [1998]. Esses pesquisadores afirmam que, em geral, o aprisionamento de bolsas de ar (vazios achatados) ocorre no encontro de fluxos de resina no interior da preforma de RTM.

Variação da densidade e da quantidade de resina dos corpos de prova ensaiados por ILSS

Os gráficos das Figuras 4.60 e 4.61 apresentam a variação da densidade e da quantidade de resina para os corpos de prova ensaiados por ILSS e retirados das placas de 28, 30 e 32 camadas.

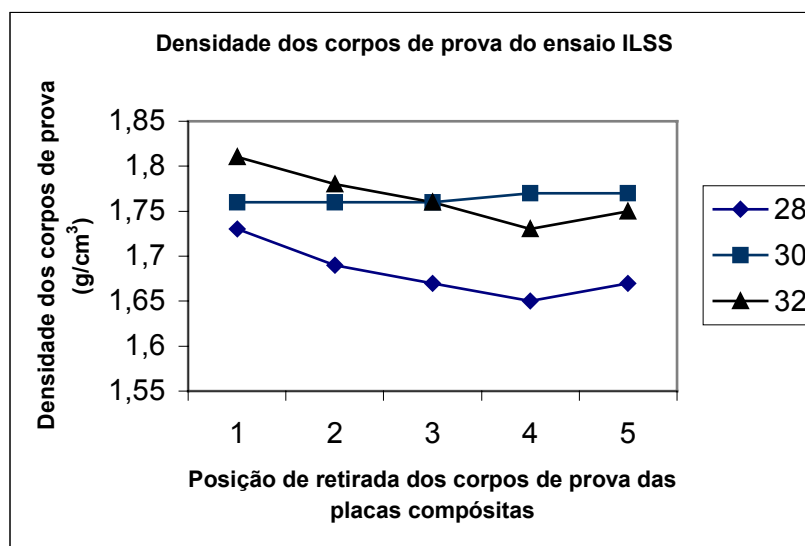


Figura 4.60 – Gráfico da variação da densidade dos corpos de prova ensaiados por ILSS.

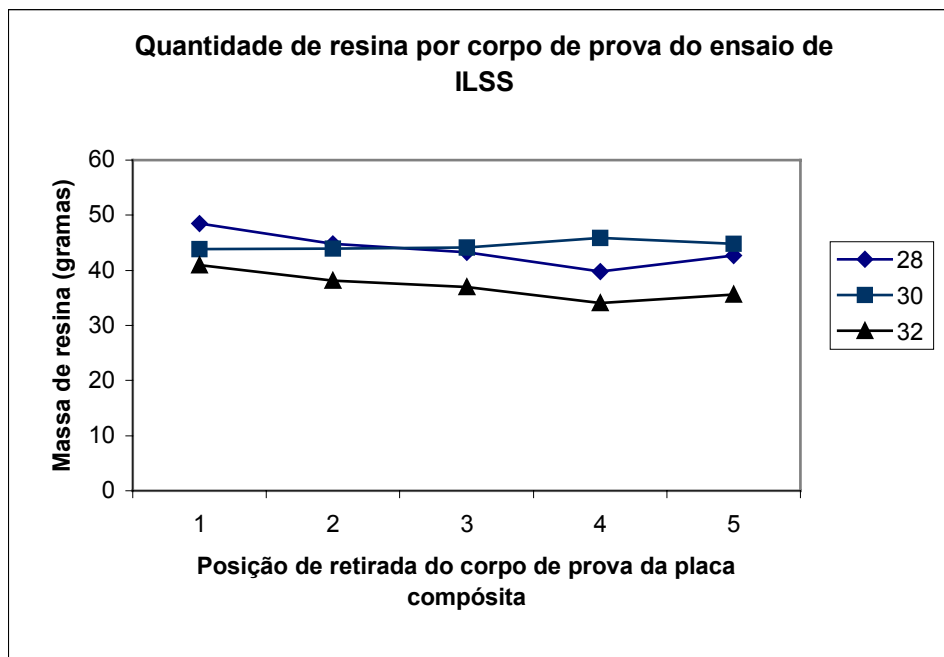


Figura 4.61 - Gráfico da variação de quantidade de resina dos corpos de prova ensaiados por ILSS.

A densidade e a quantidade de resina diminuem em direção ao centro da placa compósita com 28 e 32 camadas. Já a densidade e a quantidade de resina da placa compósita de 30 camadas não diminuem em direção ao centro da placa, significando uma maior homogeneidade para a placa compósita de 30 camadas. Os resultados das Figuras 4.60 e 4.61 estão de acordo com a análise das imagens digitais realizadas anteriormente.

Resistência Interlaminar ao Cisalhamento das placas compósitas processadas por RTM

O gráfico da Figura 4.62 apresenta o resultado do ensaio de Resistência Interlaminar ao Cisalhamento para os corpos de prova retirados das placas compósitas processadas por RTM com 28, 30 e 32 camadas.

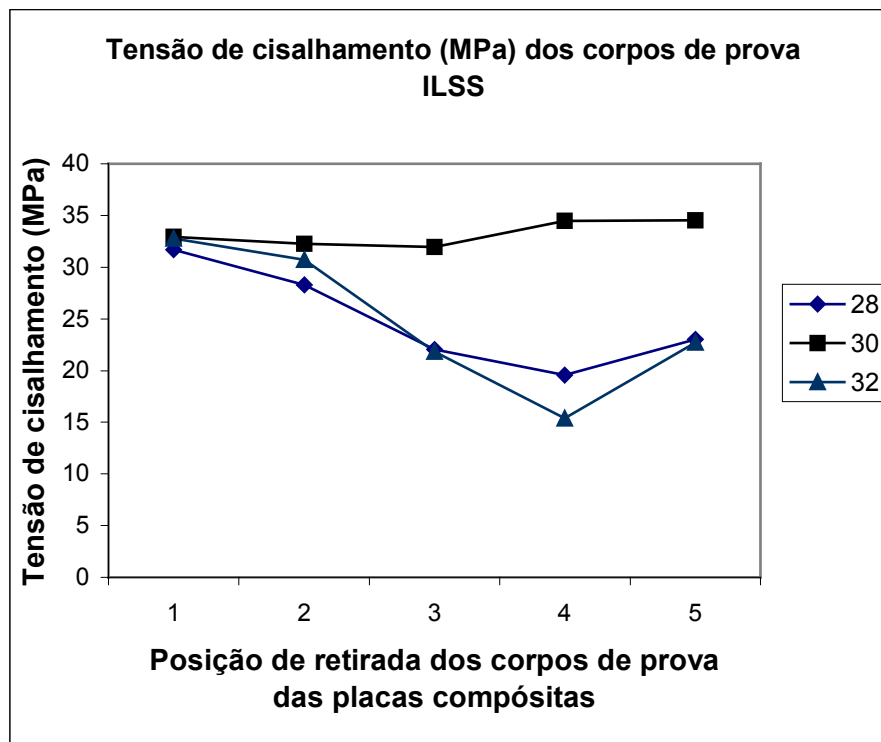


Figura 4.62 - Gráfico da variação da Tensão Cisalhamento Interlaminar dos corpos de prova ensaiados por ILSS.

Como pode ser observado, a Resistência Interlaminar ao Cisalhamento dos corpos de prova das placas compósitas de 28 e 32 camadas diminui em direção ao centro da placa, no sentido do preenchimento da mesma. Já os corpos de prova da placa compósita de 30 camadas não sofre diminuição da sua Resistência Interlaminar ao Cisalhamento, Figura 4.62.

Outro fato a ser observado é que no início, os corpos de prova de número 1 (seccionado próximo da borda da placa compósita, primeira região a ser preenchida pela resina) de todas as placas compósitas apresentam valores da Resistência Interlaminar ao Cisalhamento aproximadamente iguais, Figura 4.62.

Botelho e Rezende [2002], Costa *et al.* [2001] e Barraza *et al.* [2004] afirmam que a diminuição no valor da Resistência ao Cisalhamento Interlaminar está relacionada diretamente com o aumento do conteúdo de vazios nos compósitos.

Mallik [1993] e Pearce *et al.* [1998] afirmam que a tensão gerada no ensaio de Resistência ao Cisalhamento Interlaminar é parabólica, sendo nula nas extremidades e máxima no centro, ver seção 3.2.2.6. Conseqüentemente, a presença de vazios no centro de um compósito, onde a tensão é máxima, é mais prejudicial à Resistência Interlaminar ao Cisalhamento do que a presença de vazios na superfície do compósito. Portanto, a análise de

imagens digitais, o cálculo de densidade, da quantidade de resina e o gráfico da Resistência Interlaminar ao Cisalhamento dos corpos de prova ensaiados corroboram com esses autores e demonstram que a placa compósita de 30 camadas apresentou maiores valores de resistência ao cisalhamento interlaminar, conseqüentemente melhor interação fibra/resina quando comparada às placas compósitas de 28 e 32 camadas.

A tensão cisalhante média da placa compósita de 30 camadas é de 33,23 MPa. Michaud [1998] fabricou compósitos de fibra de vidro tipo E e resina ester vinílica Derakane 411-C50 por RTM e obteve uma tensão cisalhante média em torno de 36MPa.

Não há consenso entre os pesquisadores sobre a forma de decaimento da Resistência Interlaminar ao Cisalhamento com conteúdo de vazios. Porém, Bowles e Frimpong afirmam que o decaimento é exponencial, Costa *et al.* [2001].

As Figuras 4.63 e 4.64 apresentam o ajuste exponencial realizado nos gráficos de queda de ILSS das placas compósitas de 28 e 32 camadas com os seus respectivos coeficientes de determinação, corroborando a afirmação dos autores mencionados anteriormente.

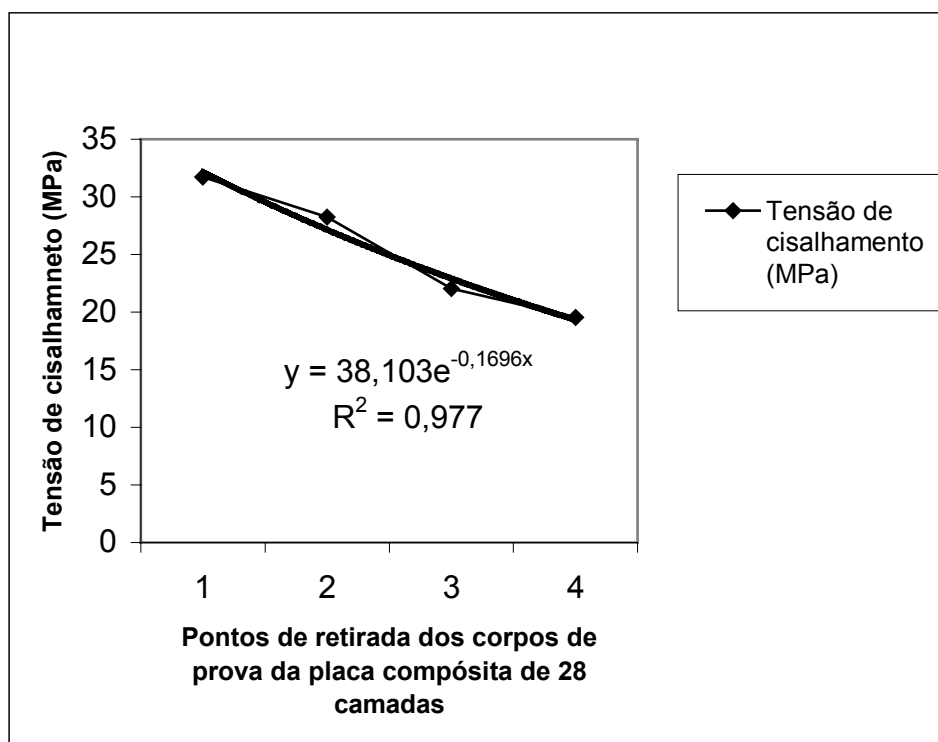


Figura 4.63 - Ajuste exponencial do gráfico do ensaio ILSS da placa compósita de 28 camadas.

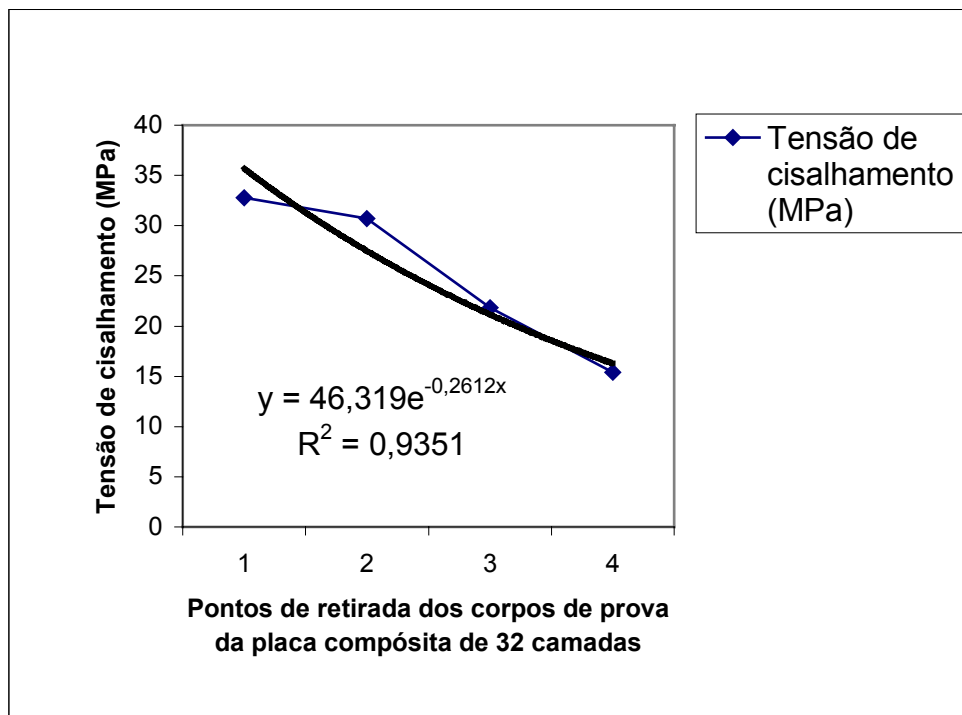


Figura 4.64 - Ajuste exponencial do gráfico do ensaio ILSS da placa compósita de 32 camadas.

As razões da existência da melhor interação fibra/resina da placa compósita de 30 camadas com relação aos compósitos de 28 e 32 camadas são de origens diferentes. No caso da placa de 28 camadas, está relacionada com o tempo de preenchimento, ver Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Comparação do tempo de race-tracking e de preenchimento das placas de 28 camadas e 30 camadas

Placa compósita	Tempo de <i>race-tracking</i> (s)	Tempo de preenchimento(s)
28 camadas	18	47
30 camadas	37	112

Pearce *et al.* [1998] afirmam que há duas situações durante o processamento por RTM que favorecem o aprisionamento de bolsas de ar. A primeira é a alta velocidade de preenchimento da preforma pela resina, que impede a adequada remoção do ar da mesma. A segunda é o encontro (coalescência) das frentes de fluxos de resina no interior da preforma.

Provavelmente, o menor tempo de preenchimento da placa compósita de 28 camadas com relação a de 30 camadas impediu a adequada retirada de ar da preforma da primeira placa, aprisionando conseqüentemente maior quantidade de bolsas de ar, geradoras de vazios.

No caso da placa compósita de 32 camadas, a queda nos valores de Resistência Interlaminar ao Cisalhamento está relacionada com a falta de resina no interior da preforma. Essa falta de resina pode ser verificada da seguinte forma: comparando a quantidade de resina na placa compósita de 30 camadas com a de 32 camadas, ver Tabela 4.11, e depois observando as laterais de ambas as placas.

Tabela 4.11 - Quantidade de resina por placa compósita

Placa compósita	Quantidade de resina por placa
30 camadas	766 gramas
32 camadas	760 gramas

A Tabela 4.11 mostra que as placas de 30 e 32 camadas têm aproximadamente a mesma quantidade de resina. Mas como a Figura 4.61 mostra, enquanto a placa compósita de 30 camadas possui homogeneidade na sua quantidade de resina, o compósito de 32 camadas sofre uma forte queda da sua quantidade de resina, da borda para o centro. Confrontando os dados da Tabela 4.11 e do gráfico da Figura 4.61 surge a seguinte pergunta: porque a resina não atingiu o centro da placa de 32 camadas? Para responder a essa pergunta deve-se analisar as Figuras 4.65 e 4.66.

A Figura 4.65 mostra que a resina que falta ao longo da direção ao centro do compósito de 32 camadas ficou retida nas bordas laterais (em todas as quatro) do mesmo, não conseguindo penetrar no interior da sua preforma. Para comparação, pode-se observar a lateral da placa compósita de 30 camadas livre de resina, Figura 4.66.

A placa compósita de 32 camadas, por possuir maior número de camadas, apresentou menor porosidade quando comparada com a placa compósita de 30 camadas; como ambas estão submetidas à mesma diferença de pressão, a menor porosidade da primeira impediu que a resina chegasse ao interior da preforma de forma homogênea.

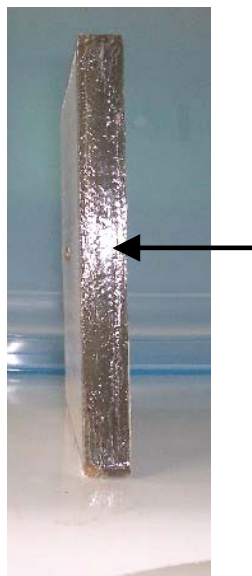


Figura 4.65 – Lateral da placa compósita de 32 camadas.

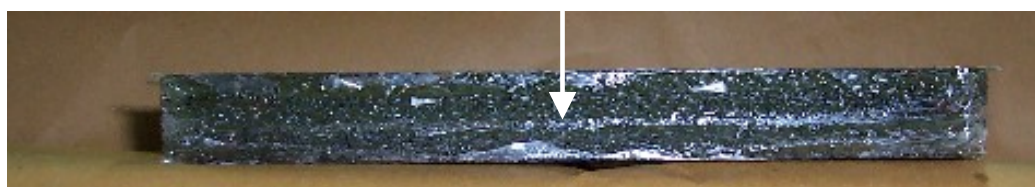


Figura 4.66 – Lateral da placa compósita de 30 camadas.

Baseando-se nos experimentos e análises realizadas e para o sistema de fibra/resina usado neste trabalho, pode-se concluir que:

- A variação do número de camadas de fibra das placas produzidas por RTM controla não só o tempo de preenchimento do molde, conseqüentemente a taxa de produção, como a Resistência ao Cisalhamento Interlaminar nos compósitos fabricados. A placa compósita fabricada com a preforma de 30 camadas (aproximadamente 46% de fração volumétrica de fibra) apresentou tempo de preenchimento intermediário entre as duas outras preformas, maiores valores de Resistência ao Cisalhamento Interlaminar e conseqüentemente maior qualidade de processamento.
- Para uma determinada espessura do espaçador do molde de RTM, só uma estreita faixa de frações volumétricas de fibra de placas compósitas pode ser fabricada (28, 30 e 32 camadas) e apenas uma dessas placas (30 camadas) será a otimizada tanto em tempo de preenchimento como em termos de qualidade de processamento.

4.2.12 Cálculo de permeabilidade dos processamentos realizados por RTM

Serão descritos nesta seção os resultados do cálculo da permeabilidade no plano e da permeabilidade transversal dos processamentos realizados por RTM.

4.2.12.1 Cálculo da permeabilidade no plano dos processamentos realizados por RTM

Preformas de 22 e 25 camadas

Tanto o compósito de 22 como o de 25 camadas apresentaram a formação de uma camada rica em resina sobre a preforma (“flow on top”). Como houve movimento das fibras no compósito de 22 camadas no interior do molde, ver seção 4.2.6, nenhuma consideração será feita com relação à permeabilidade no plano desse material.

A Figura 4.67 apresenta o avanço da frente de escoamento sobre a preforma de 25 camadas obtido pela estação de processamento por RTM desenvolvida neste trabalho. A frente de escoamento da resina sobre a preforma avançou de forma aparentemente regular. O tempo para a frente de escoamento atingir a borda do molde é de aproximadamente 1,40 segundo.

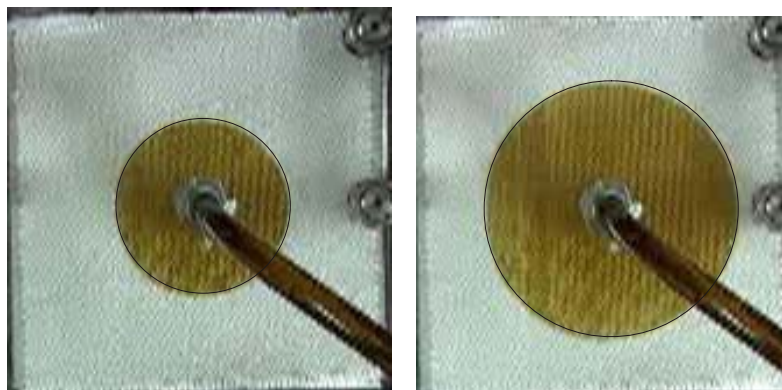


Figura 4.67 – Avanço da frente de escoamento sobre a preforma de 25 camadas.

Não houve a formação de uma frente de escoamento elíptica, mas sim uma frente de escoamento de formato circular, Figura 4.67. A formação dessa frente de escoamento circular implica dizer que a anisotropia do tecido (o tecido usado é desbalanceado) não foi “percebida” pela frente de escoamento da resina, provavelmente devido à baixa fração volumétrica de fibra dessa preforma em relação à espessura do espaçador. Portanto, não foi possível aplicar a metodologia para avaliação da permeabilidade no plano nesse compósito.

Para a frente de escoamento da resina, o tecido usado se comporta como se fosse isotrópico. Essa afirmação pode ser verificada plotando-se o gráfico de R_1 x R_2 .

Nesse gráfico, plota-se no eixo x o semi-eixo menor (R_2) e no eixo y o semi-eixo maior (R_1) da frente de escoamento da resina sobre a preforma, Figura 4.68.

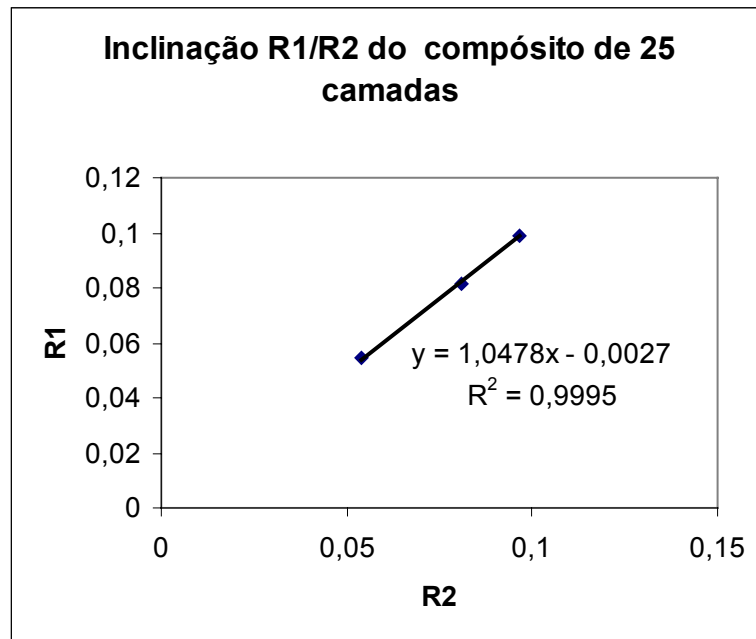


Figura 4.68 - Gráfico R_1 x R_2 do compósito com 25 camadas.

A equação da reta do gráfico R_1 x R_2 da Figura 4.68 mostra que a diferença entre R_1 e R_2 é muito pequena, na segunda casa decimal:

$$R_1 \approx 1,0478R_2$$

O gráfico da Figura 4.68 corrobora o da Figura 4.67; ou seja, a frente de escoamento da resina é aproximadamente circular.

As preformas de 34, 38 e 40 camadas não foram preenchidas. Portanto, para essas preformas, não foram calculadas as permeabilidades no plano. A permeabilidade no plano foi então calculada para as placas compósitas processadas com êxito que foram: 28, 30 e 32 camadas.

A permeabilidade no plano da preforma de 28 camadas

A Figura 4.69 representa o avanço da frente de escoamento sobre a preforma de 28 camadas. A frente de escoamento da resina sobre a preforma avançou de forma aparentemente regular, Figura 4.69. O tempo para frente de escoamento atingir a borda do molde foi de aproximadamente 1,80 segundo.

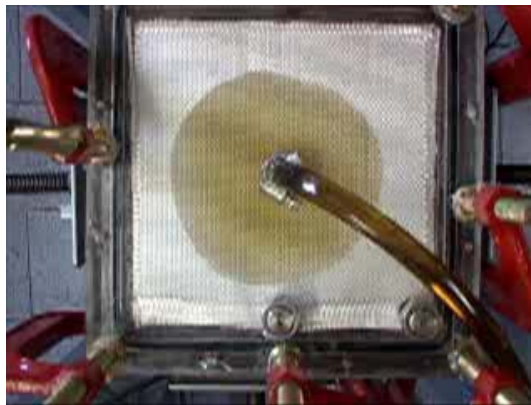


Figura 4.69 - Imagens da frente de escoamento avançando no interior do molde do experimento de 28 camadas.

Gauvin *et al.* [1996] afirmaram em seu trabalho que o método de Chan e Hwang deve ser aplicado para o cálculo da permeabilidade no plano depois que a frente de escoamento da resina sobre a preforma de fibra se torne uma elipse estável. Para verificar essa estabilidade, foi usado o gráfico de convergência $K_1 \times K_2 \times \text{tempo}$ apresentado por Wetzenböck *et al.* [1999]. Sendo K_1 e K_2 as componentes da permeabilidade no plano nas direções 1 (semieixo maior) e 2 (semieixo menor) da elipse, respectivamente.

A Figura 4.70 apresenta o gráfico de convergência $K_1 \times K_2 \times \text{tempo}$ do processamento para a placa compósita de 28 camadas.

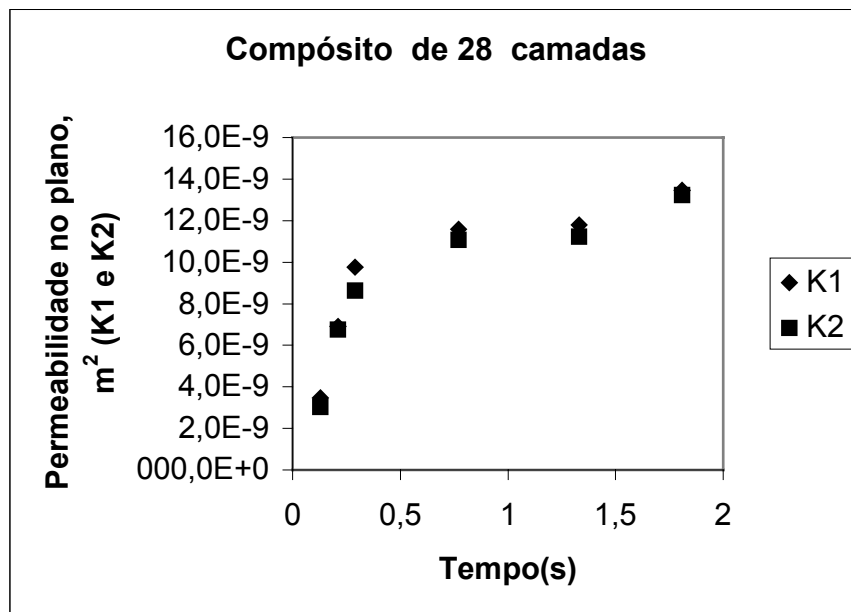


Figura 4.70 - Gráfico de convergência K1 x K2 x tempo do processamento da placa compósita de 28 camadas.

Como pode ser observado nesse gráfico, a frente de escoamento da resina não se estabiliza, não havendo convergência para um determinado valor tanto para K1 e como para K2. Esse resultado já era esperado devido ao curtíssimo tempo (menos de 2 segundos) para a frente de escoamento atingir a borda do molde, o que implica dizer que para avaliação da permeabilidade no plano do compósito de 28 camadas o molde utilizado não tem área suficiente.

Permeabilidade no plano do compósito de 30 camadas

A preforma de 30 camadas foi a escolhida para o primeiro teste do software desenvolvido pela DRV para cálculo automático da permeabilidade no plano (Capítulo 3 - Materiais e Métodos). A Figura 4.71 apresenta a imagem obtida pelo avanço da frente de escoamento sobre a preforma de 30 camadas obtido para esse sistema. Porém, o sistema falhou, pois não houve sincronia entre a imagem obtida pela câmera e o tempo medido pelo computador. Mais desenvolvimento é necessário para a completa operacionalidade desse sistema.



Figura 4.71 – Avanço da frente de escoamento sobre a preforma de 30 camadas, obtido pelo sistema automático de cálculo da permeabilidade.

Com a falha desse teste, refizemos esse processamento com o sistema de filmagem previamente montado.

A Figura 4.72 apresenta a frente de escoamento da resina sobre a preforma de 30 camadas que avançou de forma aparentemente regular. O tempo para frente de escoamento atingir a borda do molde é de aproximadamente 9 segundos.

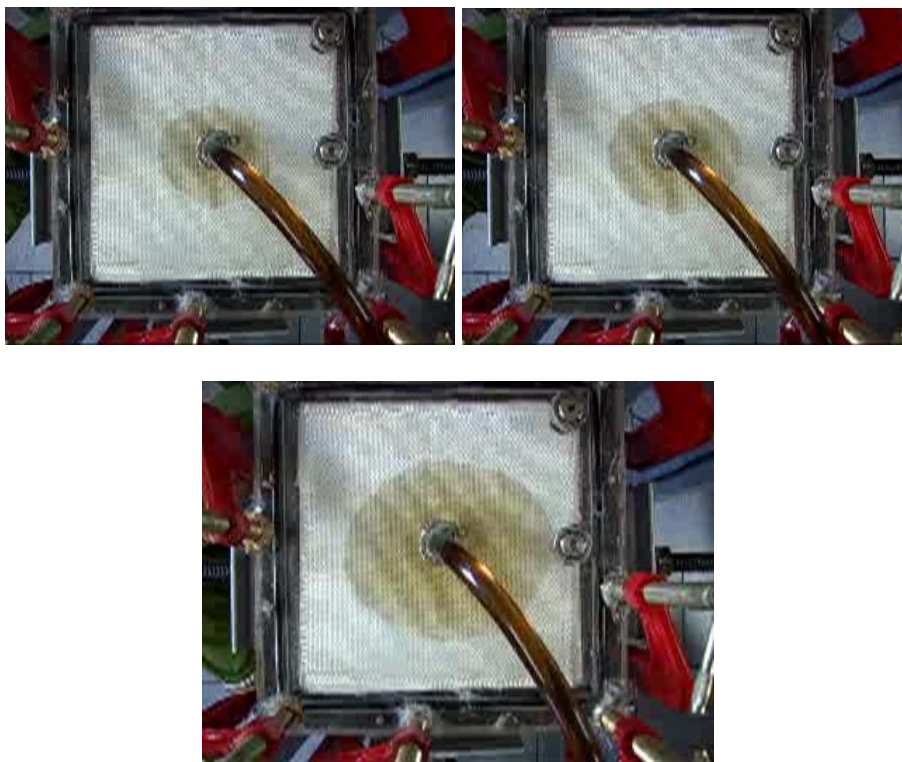


Figura 4.72 – Avanço da frente de escoamento sobre a preforma de 30 camadas.

A Figura 4.73 apresenta o gráfico de convergência $K_1 \times K_2 \times$ tempo desse experimento.

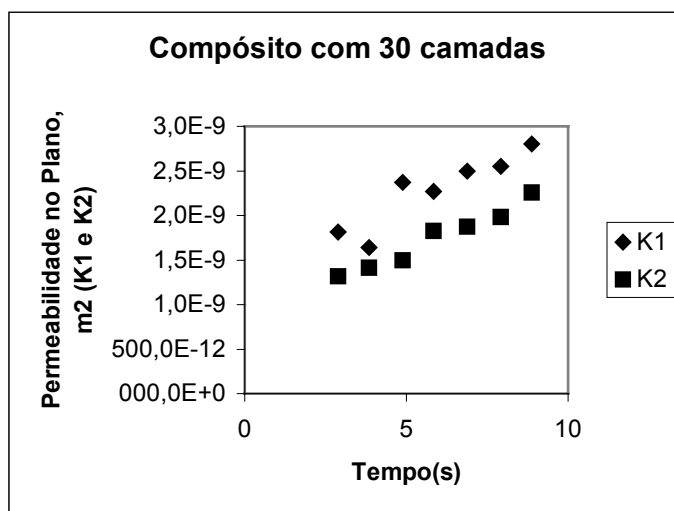


Figura 4.73 - Gráfico de convergência $K_1 \times K_2 \times$ tempo do processamento de 30 camadas.

Os aproximadamente 9 segundos para a frente de escoamento atingir a borda do molde não foram suficientes para que a frente de escoamento da resina estabilizasse, não havendo

convergência para um determinado valor tanto para K1 quanto para K2, gráfico da Figura 4.73. A não estabilização da frente de escoamento implica dizer que para a avaliação da permeabilidade no plano do compósito de 30 camadas, o molde utilizado não tem área suficiente.

Permeabilidade no plano da preforma de 32 camadas

A Figura 4.74 representa o avanço da frente de escoamento sobre a preforma de 32 camadas. A frente de escoamento da resina sobre a preforma avançou de forma aparentemente regular. O tempo para frente de escoamento atingir a borda do molde foi de aproximadamente 20 segundos.

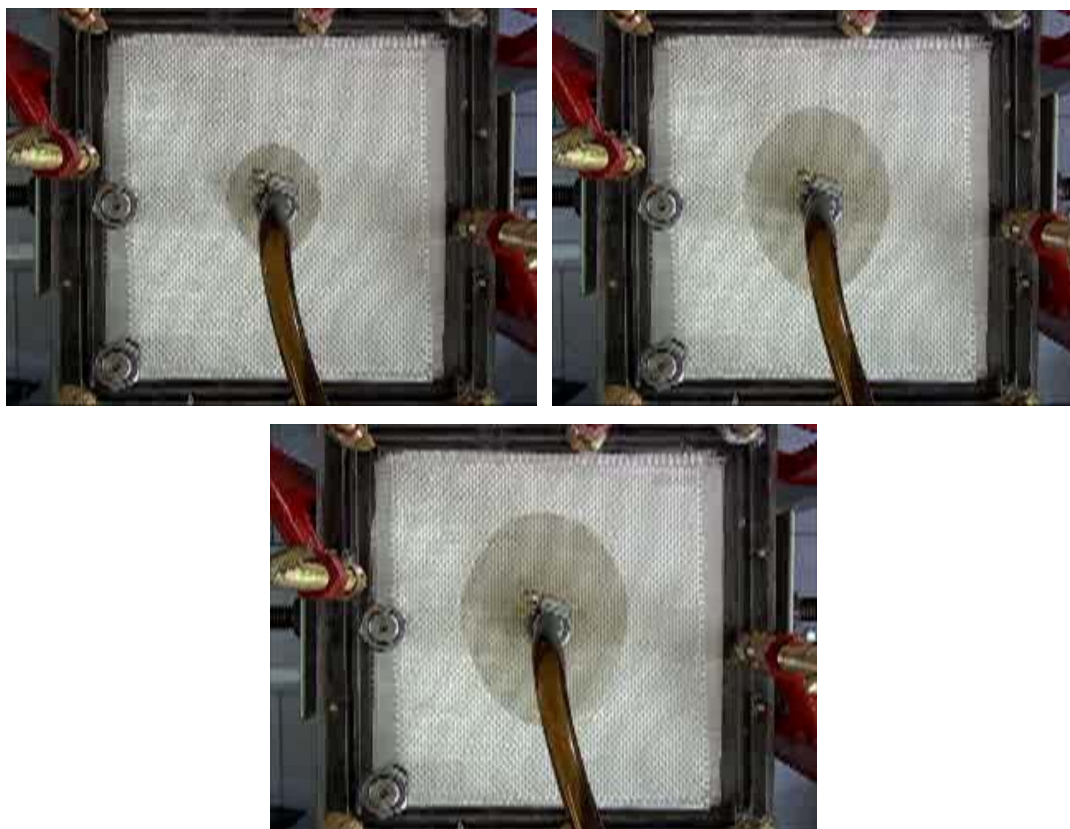


Figura 4.74 – Avanço da frente de escoamento sobre a preforma de 32 camadas.

A Figura 4.75 apresenta o gráfico de convergência K1 e K2 pelo tempo desse experimento.

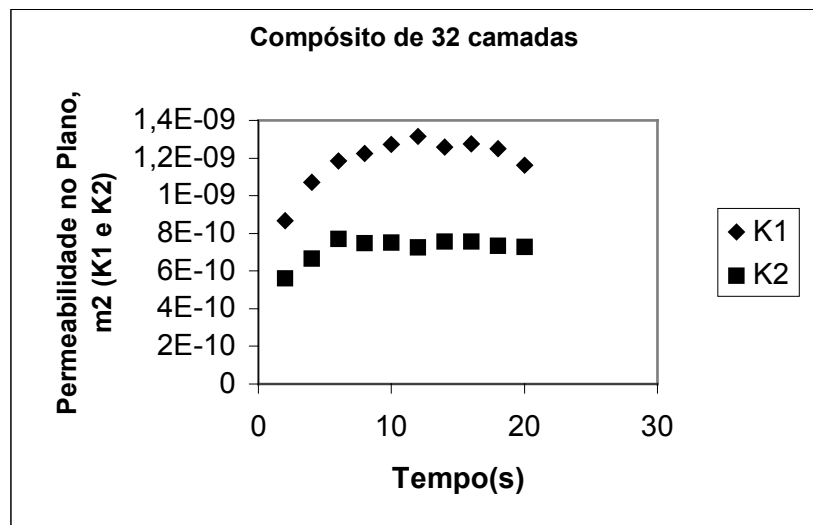


Figura 4.75 - Gráfico de convergência K1 e K2 pelo tempo desse experimento.

Como pode ser observado nesse gráfico da Figura 4.75, as curvas de K1 e K2 entre 0 e 6 segundos começam aumentando de valor. Essa ascensão inicial nos valores de K1 e K2 pode ser explicada por Weitzenböck *et al.* [1999] nos seus estudos sobre a influência da injeção no cálculo da permeabilidade no plano. Weitzenböck *et al.* [1999] demonstraram a influência do diâmetro e da forma do furo de injeção no valor da permeabilidade e chegaram à conclusão de que para cada diâmetro do furo de injeção existe uma faixa de tempo para que a frente de escoamento de formato elíptico se estabilize. Aparentemente, as curvas começam a estabilizar a partir de 6 segundos. A partir daí, K1 varia entre $1,16 \cdot 10^{-9}$ a $1,31 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$ e K2 varia entre $7,25 \cdot 10^{-10}$ a $7,57 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2$.

O gráfico Tempo x Fa, ver Capítulo 2, aplicado a partir de 6 segundos, está apresentado na Figura 4.76.

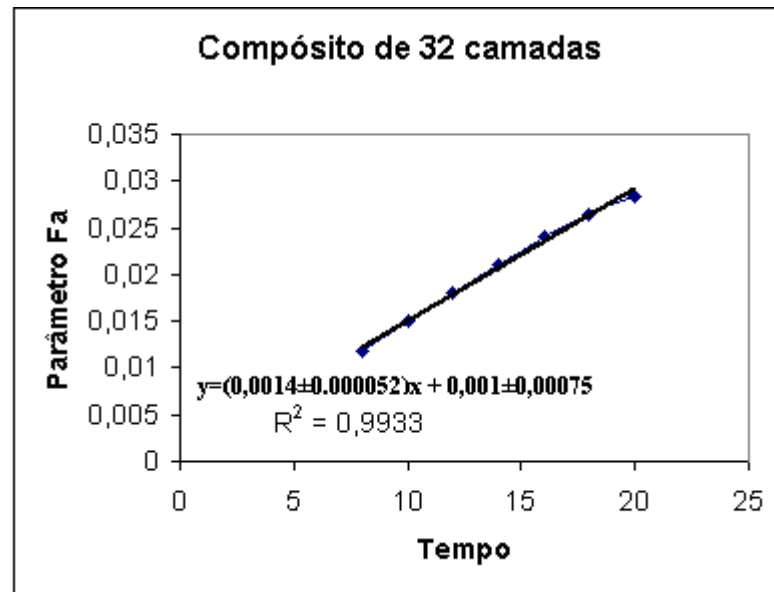


Figura 4.76 - O gráfico Tempo x Fa do processamento de 32 camadas.

Para a realização do cálculo da permeabilidade no plano pelo método de Chan e Hwang, a função Fa x t deve ser linear, passando pela origem dos eixos cartesianos, Gauvin *et al.* [1996].

No processamento realizado, a reta obtida por esse gráfico passou muito próxima da origem, ponto de interseção com os eixos cartesianos (0;0,001); portanto, a inclinação dessa reta é utilizada para o cálculo de K1 e K2 desse experimento, Figura 4.76.

A Figura 4.77 apresenta o gráfico R1 x R2 desse processamento.

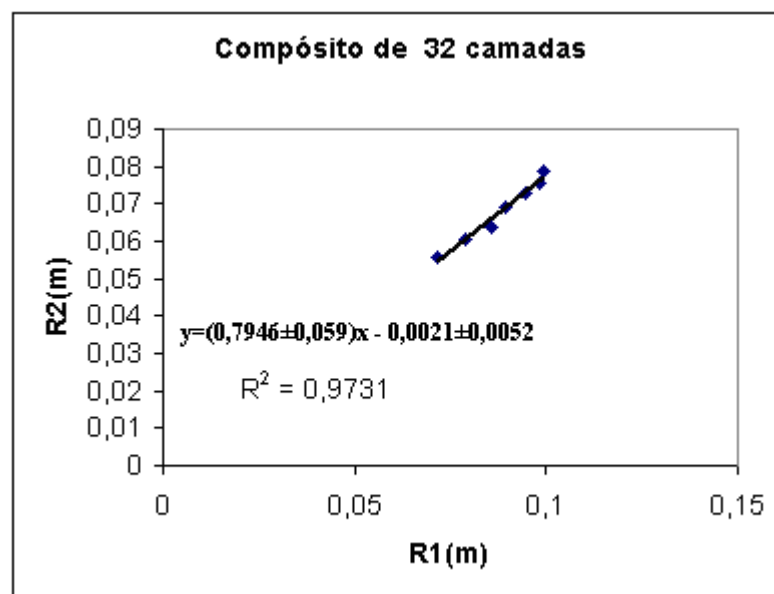


Figura 4.77 – O gráfico R1 x R2 do processamento da placa compósita de 32 camadas.

A Tabela 4.12 apresenta o resultado do cálculo da permeabilidade no plano pelo método de Chan e Hwang do processamento da placa de 32 camadas.

Tabela 4.12 - Permeabilidade no plano para o processamento da placa de 32 camadas

Inclinação Fa x t	0,0014
Ke	$9,1027.10^{-10} \text{m}^2$
Inclinação R2/R1	0,7946
Inclinação R1/R2	1,2246
Permeabilidade no Plano	
$K2= 7,233.10^{-10} \text{m}^2$	
$K1= 1,11472.10^{-9} \text{m}^2$	

Para verificar a influência do sistema de injeção no valor da permeabilidade no plano da placa compósita de 32 camadas, foi calculada a permeabilidade no plano do processamento de 32 camadas, onde foi usado o sistema de injeção tipo campânula, ver experimento 1 da Tabela 3.3.

A Figura 4.78 representa o avanço da frente de escoamento sobre a preforma de 32 camadas desse processamento. A frente de escoamento da resina sobre a preforma avançou de forma aparentemente regular. O tempo para frente de escoamento atingir a borda do molde foi de aproximadamente 60 segundos.

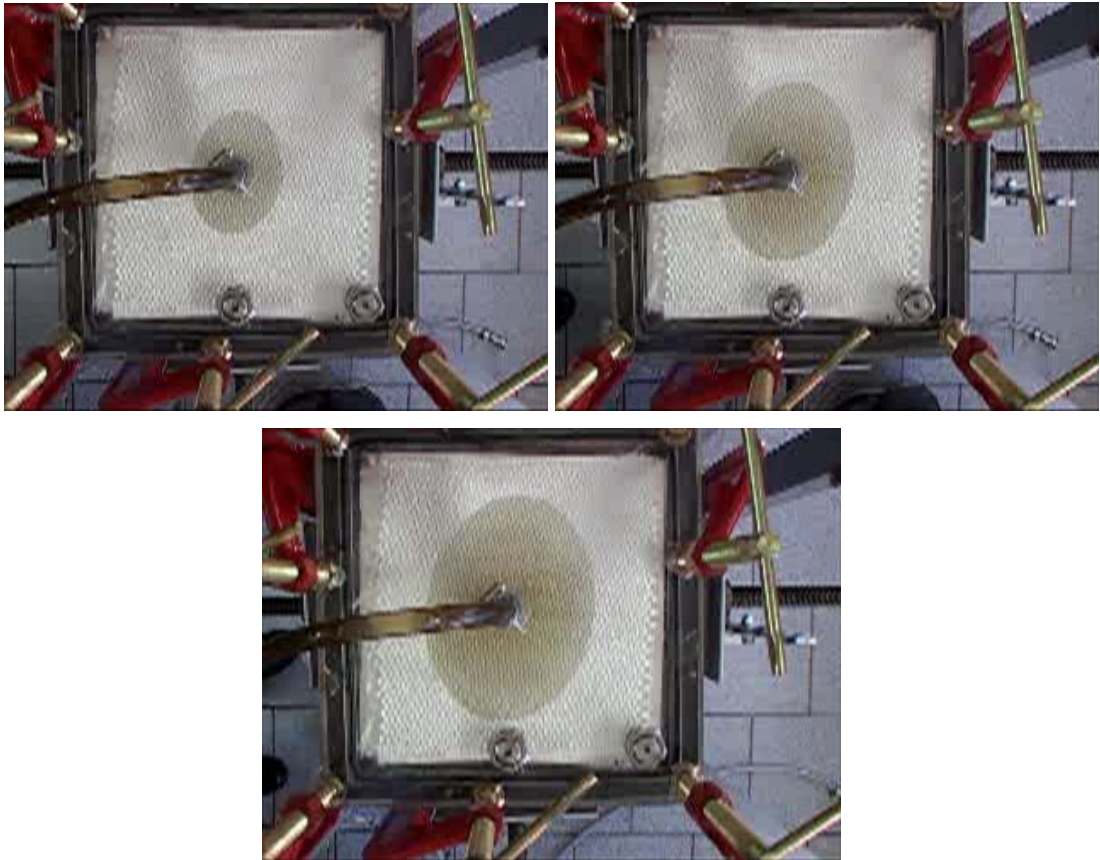


Figura 4.78 – Avanço da frente de escoamento sobre a preforma de 32 camadas.

A Figura 4.79 apresenta o gráfico de convergência $K1 \times K2 \times$ tempo desse experimento.

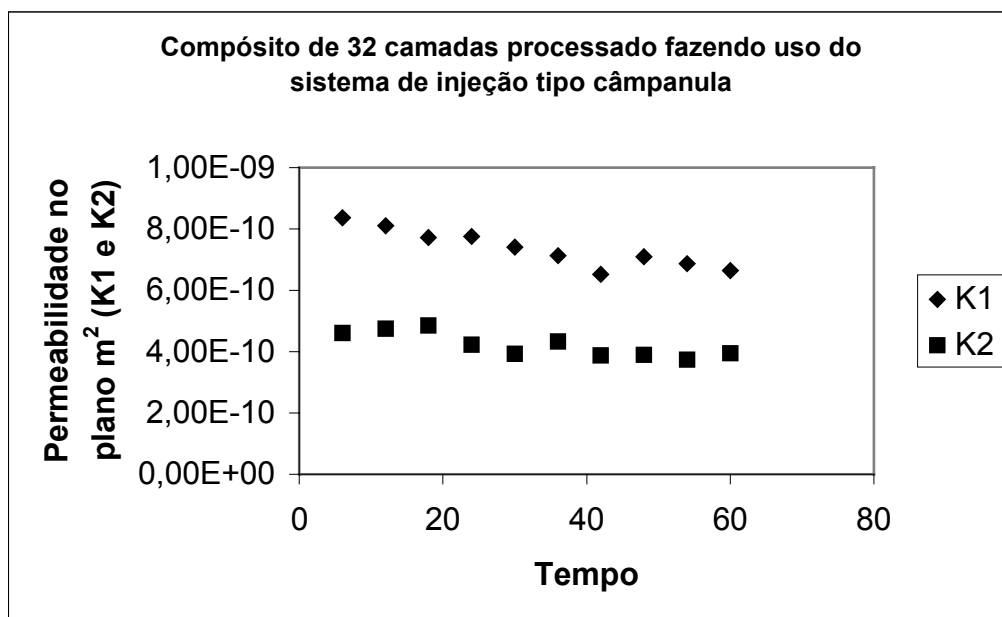


Figura 4.79 - Gráfico de convergência $K1 \times K2 \times$ tempo desse experimento.

Como pode ser observado no gráfico da Figura 4.79, as curvas de K1 e K2 aparentemente começam a estabilizar a partir de 42 segundos. A partir desse tempo, K1 varia entre $7,09 \cdot 10^{-10}$ a $6,52 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2$ e K2 varia entre $3,94 \cdot 10^{-10}$ e $3,88 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2$. Entre 0 e 42 segundos, as curvas K1 e K2 diminuem e oscilam, respectivamente, em direção ao patamar que surge a partir de 42 segundos.

Essa diminuição e oscilação iniciais nos valores de K1 e K2 podem ser explicadas por Weitzenböck *et al.* [1999] nos seus estudos sobre a influência da injeção no cálculo da permeabilidade no plano, já discutido na análise anterior.

O gráfico Tempo x Fa, aplicado a partir de 42 segundos, está apresentado na Figura 4.80.

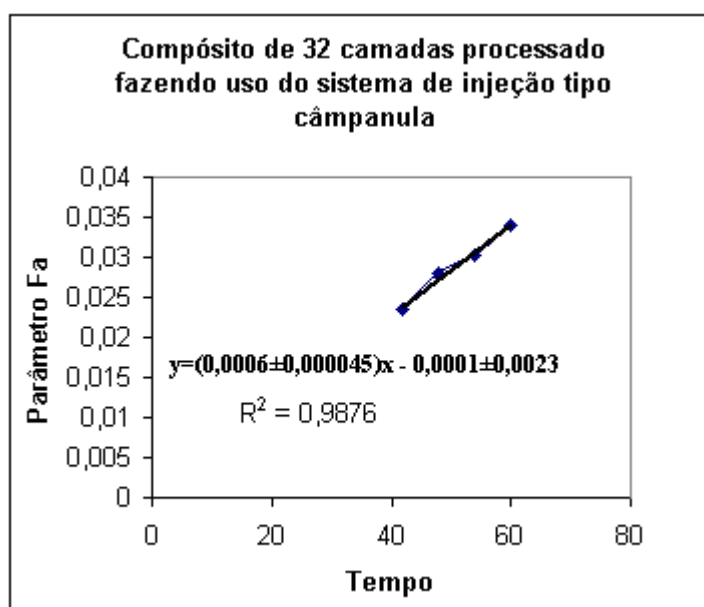


Figura 4.80 - Gráfico Tempo x Fa do processamento de 32 camadas.

No processamento realizado, mais uma vez a reta obtida por esse gráfico passou muito próxima da origem, ponto de interseção com os eixos cartesianos (0;0,0001); portanto, a inclinação dessa reta é utilizada para o cálculo de K1 e K2 desse experimento.

A Figura 4.81 apresenta o gráfico R1 x R2 desse processamento.

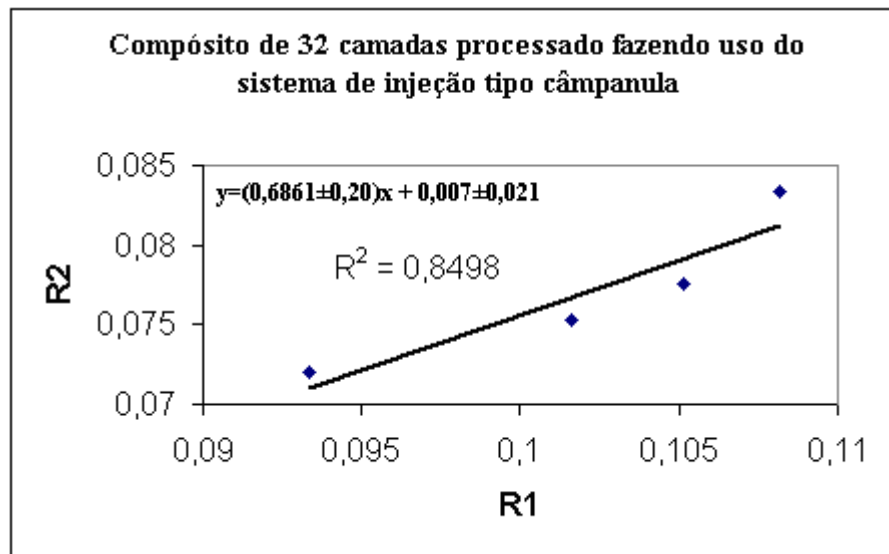


Figura 4.81 – Gráfico R1 x R2 do processamento de 32 camadas.

A Tabela 4.13 apresenta o resultado do cálculo da permeabilidade no plano pelo método de Chan e Hwang para o processamento da placa de 32 camadas com o sistema de injeção tipo câmpanula.

Tabela 4.13 - Permeabilidade no plano do processamento da placa de 32 camadas com o sistema de injeção tipo campânula

Inclinação Fa x t	0,0006
Ke	$5,42133.10^{-10}$
Inclinação R2/R1	0,6861
Inclinação R1/R2	1,238
Permeabilidade no Plano	
$K2=3,71958.10^{-10}m^2$	
$K1=6,71486.10^{-10}m^2$	

A Tabela 4.14 apresenta os valores de K1 e K2 para os processamentos das placas de 32 camadas com os dois diferentes sistemas de injeção: câmpanula e béquer.

Tabela 4.14 – Valores de K1 e K2 para os processamentos das placas de 32 camadas.

	Número de camadas	Pressão de vácuo (mbar)	Sistema de injeção usado	K1(m ²)	K2(m ²)
1	32	500	Campânula	6,71161.10⁻¹⁰	3,71958.10⁻¹⁰
2	32	300	Bequer	1,11472.10⁻⁹	7,233.10⁻¹⁰

O experimento 1, que usa a campânula como sistema de injeção, apresentou menores valores de K1 e K2 quando comparado ao experimento 2, que usa como sistema de injeção só o bquer. O vácuo teve o seu valor alterado de 500 mbar no experimento 1 para 300 mbar no experimento 2, uma variação de 40%. Conseqüentemente, K2 do experimento 2 aumentou aproximadamente 49% em relação ao K2 do experimento 1 e, de forma não esperada, K1 do experimento 2 foi alterado em uma ordem de grandeza em relação ao K1 do experimento 1.

Esse comportamento apresentado durante esses processamentos pode estar relacionado com a maior perda de carga apresentada pelo sistema de injeção que usa a campânula. Esses resultados experimentais apresentados na Tabela 4.16 corroboram as análises teóricas realizadas por Belloli *et al.* e Mastbergen [2004]. Portanto, o escoamento no sistema de injeção de resina alterou significativamente a permeabilidade do processamento por RTM.

4.2.12.2 Cálculo da Permeabilidade Transversal (Kt) dos processamentos realizados por RTM

Foi projetado um equipamento para medir a permeabilidade transversal, mas não foi construído um protótipo devido à constatação de que o preenchimento das preformas foi da borda para o centro (com intenso *race-tracking*) e não perpendicularmente à espessura, como o estudado por Saouab *et al.* [2001].

Porém, uma dúvida surgiu: o problema de não haver fluxo de resina na direção da espessura da preforma era causado pela alta gramatura do tecido (1100 g/m²), e conseqüente baixa porosidade, ou pelo empilhamento das várias camadas desse tecido que impediria o fluxo transversal da resina através da espessura da preforma? Um teste simples foi criado para tentar responder a essa pergunta, Figura 4.82, baseado no equipamento projetado na EMBRAPA e apresentado por Vasques *et al.* [1999].

O teste consiste em verificar o efeito do fluxo de ar gerado por um secador de cabelo sobre um conjunto de pequenas bolas de isopor no interior de um bequer de vidro, Figura 4.82. Como pode ser observado na foto da Figura 4.82, as bolas de isopor são ejetadas do bequer pelo fluxo de ar.



Figura 4.82 – Efeito do fluxo de ar gerado por um secador de cabelo sobre um conjunto de pequenas bolas de isopor no interior de um bequer de vidro.

Então colocou-se, uma única camada do tecido de fibra de vidro tipo E (1100g/m^2), usado nos compósitos fabricados por RTM, tampando a entrada do bequer de vidro, Figura 4.83. A presença dessa única camada de tecido bloqueou o fluxo de ar do secador, fazendo com que as bolas de isopor não apresentassem nenhum tipo de movimento, Figura 4.83.



Figura 4.83 - Efeito do fluxo de ar gerado por um secador de cabelo sobre um conjunto de pequenas bolas de isopor no interior de um bequer de vidro, tampado por uma camada de fibra de vidro.

O que as Figuras 4.82 e 4.83 demonstram é que o próprio tecido, devido à elevada gramatura, possui os poros bastante fechados e, independentemente do número de camadas empilhadas para a montagem da preforma, não há fluxo transversal pelo tecido. Outra conclusão importante é a necessidade de se fazer um estudo prévio com os tecidos a serem usados em RTM, talvez com o desenvolvimento de um simples equipamento de fluxo de ar, para já se ter uma idéia da problemática de preenchimento que se terá de enfrentar.

4.3 Ensaio balístico dos materiais compósitos processados

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, foi observado que não seria possível, por meio de ensaios balísticos, chegar em tempo hábil a uma correlação entre propriedades mecânicas e qualidade do processamento dos compósitos. Portanto, os ensaios balísticos realizados neste trabalho tem um caráter exploratório, com intuito de fornecer subsídios teóricos e experimentais para trabalhos futuros.

4.3.1 Resultados do ensaio balístico nas placas fabricadas por laminação manual seguida de bolsa de vácuo

Ambas as placas fabricadas por laminação manual seguida de bolsa de vácuo foram perfuradas pelo projétil 7,62mm AP (perfurante), ver Figura 4.84 e 4.85. Os dados balísticos do ensaio são mostrados na Tabela 4.15.

Tabela 4.15 - Resultados do ensaio balístico nas placas de material compósito

Placas	Velocidade Inicial (m/s)	Velocidade Residual(m/s)
Placa 1	849,80	557,62
Placa 2	851,5	369,15

Notou-se uma diferença significativa de absorção de energia cinética entre as mesmas. A placa 1 foi a primeira a ser laminada, Tabela 4.15. A maior absorção de energia cinética pela placa 2 pode estar relacionada com a maior eficiência do vácuo na eliminação das bolhas de ar da mesma já que está placa teve o tempo de cura sob vácuo maior do que a placa 1.

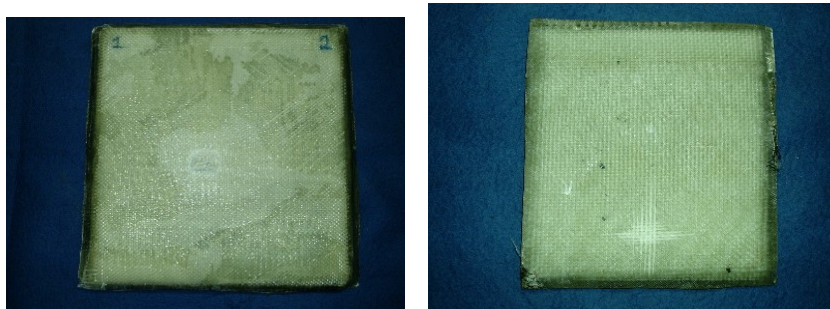


Figura 4.84 - Dano balístico na placa 1 : (a)vista frontal e (b) vista posterior.

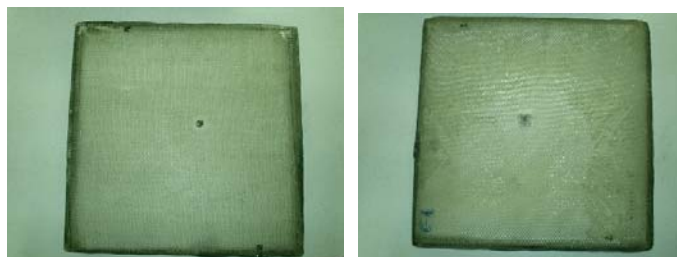


Figura 4.85 - Dano balístico na placa 2: (a)vista frontal e (b) vista posterior

4.3.2 Resultados do uso dos equipamentos fabricados para ensaio balístico das placas de material compósito

Equipamentos para medir o desvio da trajetória dos projéteis ao passar pelo alvo

Para medir o desvio do projétil ao perfurar o alvo, digitalizam-se as duas folhas de papel pardo usadas no equipamento para medir o desvio da trajetória dos projéteis ao passar pelo alvo e, usando o programa ImageProPlus, obtêm-se as coordenadas (x,y) dos pontos de entrada e saída do projétil. Usando conhecimentos básicos de geometria analítica e mecânica vetorial, calculamos o valor do ângulo α e conseqüentemente o valor da velocidade residual, ver Tabela 4.16 com os resultados.

Tabela 4.16 – Desvio do projétil que transpassou o alvo

Tiro	Vel. residual (barreira óptica)	α	Vel. residual real
Tiro 1	557,62	5,52 °	560,22 m/s
Tiro 2	369,15	3,77 °	369,95 m/s

Observando a Tabela 4.16, pode-se afirmar que o desvio do projétil é aceitável ($\alpha < 14^\circ$) e, portanto, a velocidade medida pela barreira óptica é aproximadamente igual à velocidade real residual do projétil.

Armadilha para projéteis

A armadilha de projeteis conseguiu recuperar um dos dois projéteis disparados.

4.3.3 Resultados do ensaio balístico da placa de 32 camadas fabricadas por RTM

A Figura 4.86 apresenta a foto da placa compósita de 32 camadas processada por RTM depois de impactada balisticamente pelos três tipos de projéteis (7,62 mm comum, 7,62AP e 7,62 SP, com ponta cortada, ver seção 3.2.3.11).



Figura 4.86 - Placa compósita de 32 camadas processada por RTM depois de impactada balisticamente: (a) frontal (face de impacto) e (b) vista posterior da placa.

A Tabela 4.17 apresenta os resultados do método de velocidade residual obtidos durante o ensaio balístico desta placa compósita.

Tabela 4.17 - Resultados do método de velocidade residual obtidos durante o ensaio balístico da placa compósita de 32 camadas

Tipo de munição	Velocidade de impacto	Velocidade residual
7,62AP-núcleo de aço	815, 99 m/s	318,67 m/s
7,62 FMJ – núcleo de chumbo	854,45 m/s	307,58 m/s
7,62SP- com a ponta cortada	888, 26 m/s	508, 34 m/s

A Figura 4.87 apresenta o dano balístico na parte frontal (a) e posterior (b) da placa compósita gerada pelo impacto do projétil 7,62 AP. A área delaminada frontal ao redor do furo de entrada do projétil, Figura 4.87(a), teve um formato irregular e não foi possível ver de forma clara a área delaminada ao redor do furo de saída do projétil, Figura 4.87(b). Os furos tanto de entrada como de saída do projétil foram fechados pelas fibras rompidas após a sua passagem pela placa compósita, ver Figura 4.87(a) e (b).

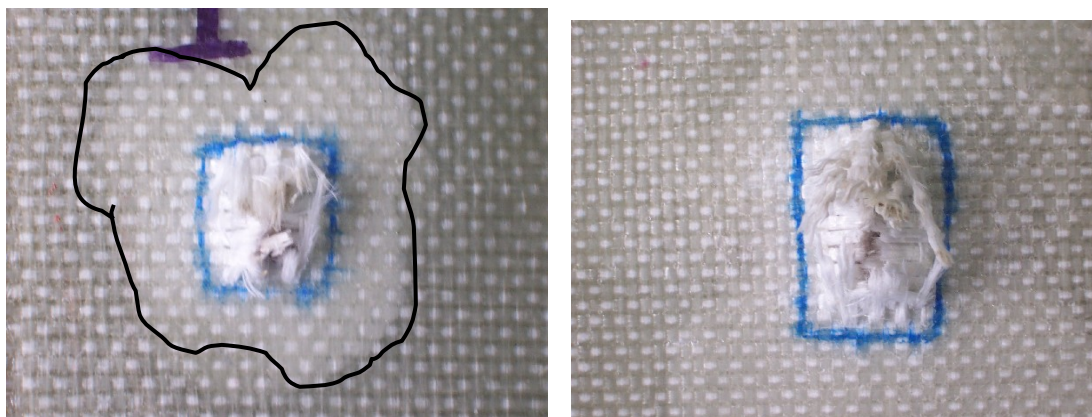


Figura 4.87 - Dano balístico causado pelo projétil 7,62AP na parte frontal (a) e na face de saída do projétil (b) na placa compósita .

A Figura 4.88 apresenta o dano balístico na parte frontal (a) e posterior (b) da placa compósita gerada pelo impacto do projétil 7,62FMJ, com núcleo de chumbo. A área delaminada frontal ao redor do furo de entrada do projétil, Figura 4.88(a), aparentemente foi esférica e não foi possível ver de forma clara a área delaminada ao redor do furo de saída do projétil, Figura 4.88(b). Essa área delaminada frontal, Figura 4.88(a), foi a menor das três áreas delaminadas frontais analisadas. Os furos tanto de entrada como de saída do projétil foram fechados pelas fibras rompidas após a sua passagem pela placa compósita, ver Figura 4.88(a) e (b). Esse dano foi aparentemente semelhante ao dano causado pelo impacto do projétil 7,62AP.

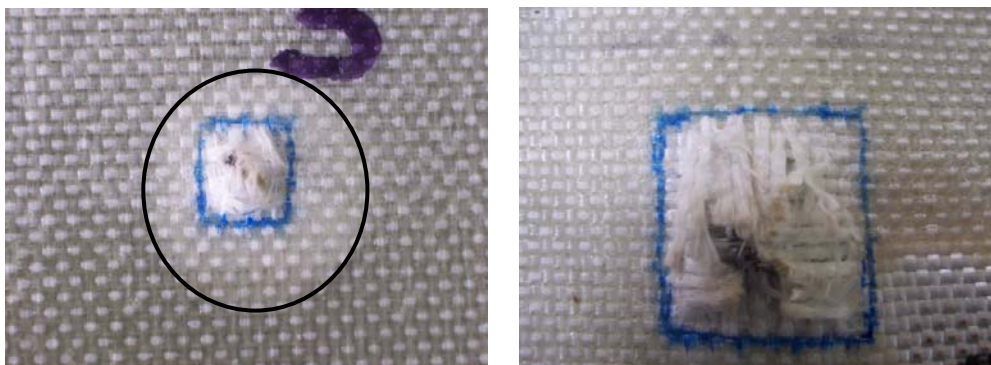


Figura 4.88 - Dano balístico causado pelo projétil 7,62FMJ na parte frontal (a) e na face de saída do projétil (b) na placa compósita .

A Figura 4.89 apresenta o dano balístico na parte frontal (a) e (b) na face de saída do projétil na placa compósita gerada pelo o impacto do projétil 7,62SP, sem ponta e com núcleo de aço. A área delaminada frontal ao redor do furo de entrada do projétil, Figura 4.89(a), aparentemente foi esférica e não foi possível ver de forma clara a área delaminada ao redor do furo de saída do projétil, Figura 4.89(b). Os furos tanto de entrada como de saída do projétil não foram fechados pelas fibras rompidas após a sua passagem pela placa compósita. O tufo de fibras observado nas Figuras 4.87(a), 4.87(b), 4.88(a) e 4.88(b) não foi formado nesse caso, ver setas da Figura 4.89(a) e 4.89(b).

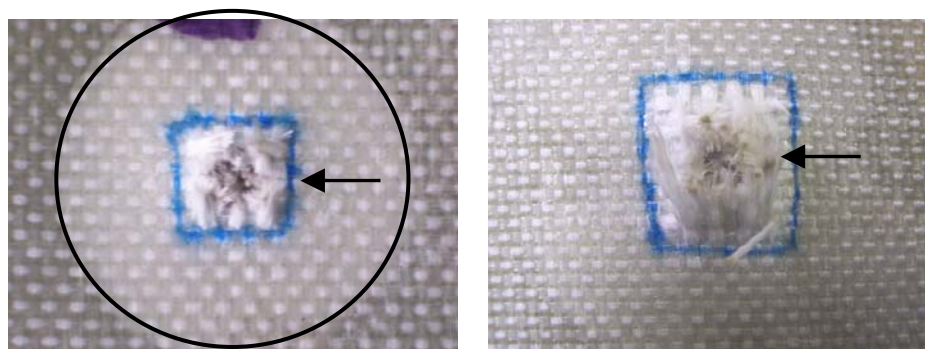


Figura 4.89 - Dano balístico causado pelo projétil 7,62SP na parte frontal (a) e na face de saída do projétil (b) na placa compósita .

Como pode ser observado na Tabela 4.19, houve pouca diferença de velocidade residual entre o projétil 7,62FMJ e o projétil 7,62AP. Esse fato merece mais estudos para o seu real entendimento, pois era esperado que o projétil 7,62 AP, por ter núcleo de aço, tivesse

um comportamento superior (ou seja, maior velocidade residual) do que o projétil 7,62 FMJ com um núcleo de chumbo, muito menos duro do que o núcleo do primeiro projétil. Já as análises esquematizadas nos desenhos das Figuras 4.90 e 4.91 podem fornecer uma possível explicação da maior eficiência da penetração balística apresentada pelo projétil 7,62SP, sem ponta, quando comparado aos projéteis 7,62AP e 7,62FMJ, com ponta.

Os esquemas das Figuras 4.90 e 4.91 apresentam os mecanismos de penetração de um projétil sem ponta (SP) e com ponta, adaptados de Gama *et al.* [2005] e Iremonger e Went [1996], respectivamente. Como pode ser observado na Figura 4.90, a borda do projétil sem ponta ao impactar o compósito causa corte imediato das fibras; isto pode ser observado nas Figuras 4.89(a) e 4.89(b) onde se vê um furo relativamente bem definido, tanto na entrada como na saída do projétil, sem a formação do tufo de fibras.

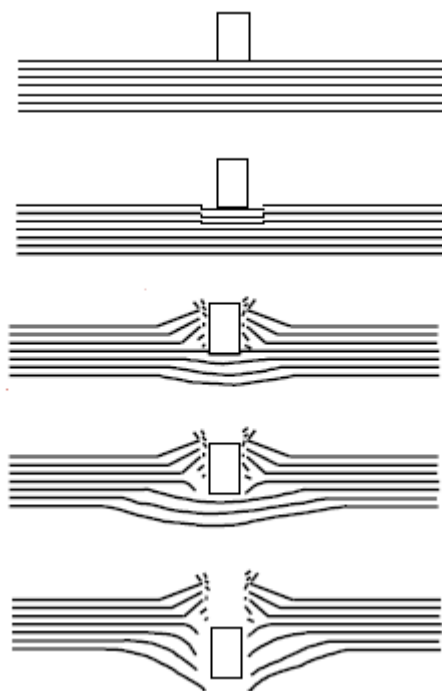


Figura 4.90 - Esquema do mecanismo de penetração de um projétil sem ponta em uma placa compósita.

Na Figura 4.91, as faces inclinadas do projétil com ponta, ao impactar o compósito, esticam as fibras e causam a sua ruptura por tensão próxima à ponta do projétil, isto pode ser observado nas Figuras 4.87 e 4.88, onde não se vê um furo bem definido, mas ao contrário, as fibras que foram esticadas e rompidas por tensão após a passagem do projétil, retornam a sua posição e fecham o furo de passagem, tanto na entrada como no furo de saída do projétil.

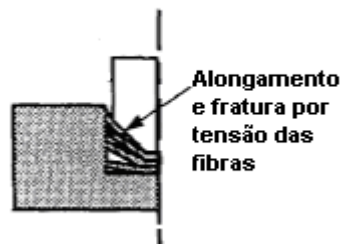


Figura 4.91 - Esquema do mecanismo de penetração de um projétil com ponta em uma placa compósita.

Essa mudança de mecanismo de penetração balística apresentada pelos projéteis com ponta 7,62AP e 7,62FMJ quando comparados ao projétil sem ponta 7,62SP, pode ser uma possível explicação para a grande diferença de velocidade residual apresentada por esses tipos de projéteis neste trabalho.

A Figura 4.92 apresenta o dano balístico sofrido pelo compósito e causado pelo projétil 7,62AP através da sua espessura, visto por meio de um corte transversal.

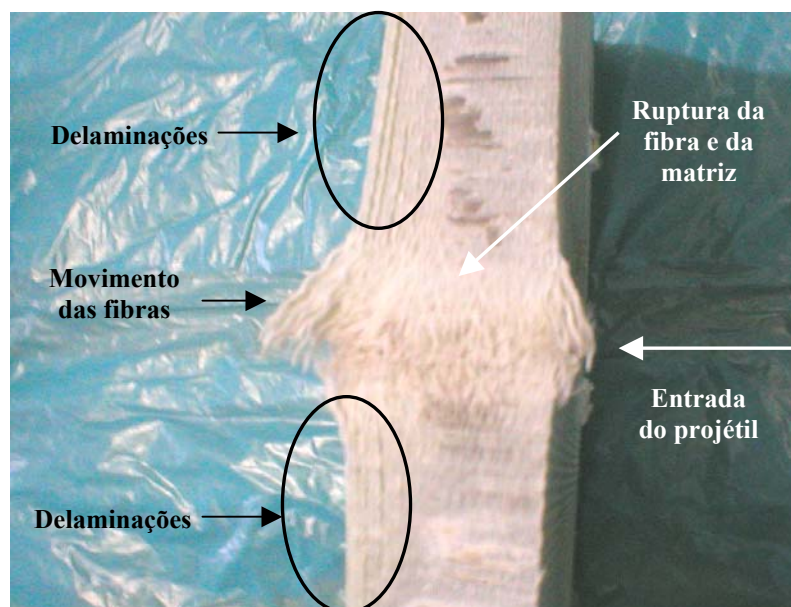


Figura 4.92 – Corte transversal do dano balístico sofrido pelo compósito causado pelo projétil 7,62 AP através da sua espessura.

O corte transversal do compósito apresentado na Figura 4.92 mostra os seguintes mecanismos de dano causado pelo impacto do projétil 7,62AP:

- Ruptura de fibra e da matriz através do caminho percorrido pelo projétil.
- Movimento de fibras na direção de saída do projétil.
- Extensas delaminações ao redor do furo de saída do projétil.

4.4 Caracterização mecânica dos compósitos processados

Serão descritos nesta seção os resultados da caracterização mecânica (tração e compressão) dos compósitos processados.

4.4.1 Ensaio de tração dos materiais compósitos processados

Os resultados obtidos no ensaio de tração dos 6 corpos de prova retirados da placa compósita de 30 camadas estão apresentados na Tabela 4.18. A curva tensão versus deformação típica obtida nos ensaios de tração realizados está exemplificada na Figura 4.93.

Tabela 4.18 – Resultados do ensaio de tração dos corpos de prova retirados da placa compósita de 30 camadas

Tensão Máxima (MPa)		Módulo de Elasticidade (GPa)	
Média	Desvio-padrão	Média	Desvio-padrão
266,96	15,47	13,49	0,63

Alves [2006] fabricou compósitos de fibra de vidro tipo E e resina epóxi (resina com propriedades mecânicas superiores a resina éster vinílica) por SCRIMP e obteve uma tensão de tração de 245,6 MPa e um módulo de elasticidade de 17,5 GPa. Esses resultados são aproximadamente 8% inferior e 23% superior aos valores de tensão de tração e de módulo de elasticidade obtidos neste trabalho, respectivamente.

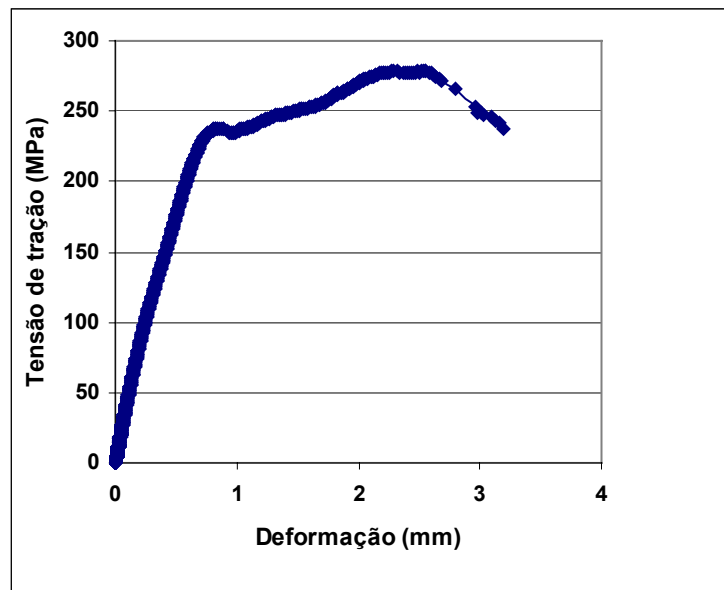


Figura 4.93 – Curva tensão versus deformação típica obtida nos ensaios de tração realizados.

A curva do ensaio de tração apresentada na Figura 4.93 é caracterizada por uma regime linear inicial sofrendo uma queda no valor de tensão e em seguida uma região aproximadamente linear porém com inclinação menor (rigidez reduzida) até a ruptura final. Zhou [1996] afirma que essa queda inicial no valor da tensão de tração, gerando essa dupla inclinação, está relacionada com o início do dano por delaminação.

As Figuras 4.94 e 4.95 apresentam uma análise macroscópica do dano dos corpos de prova submetidos ao ensaio de tração depois da ruptura final.



Figura 4.94 – Fratura do corpo de prova compósito durante o ensaio de tração.



Figura 4.95 – Corpo de prova após o ensaio de tração.

As Figuras 4.94 e 4.95 mostram os seguintes mecanismos de dano causado pelo ensaio de tração realizado:

- Rupturas transversais e longitudinais nas fibras e na matriz, com relação à direção de aplicação da carga.
- Delaminações.

Foi observado durante o ensaio que ocorre grande quantidade de delaminações, ao ponto de grande quantidade de fibra se desprender do laminado após a ruptura final do corpo de prova, caracterizando o fenômeno de “pull-out” na região de fratura final.

4.4.2 Ensaio de compressão dos materiais compósitos processados

Os resultados obtidos no ensaio de compressão dos corpos de prova retirados da placa compósita de 30 camadas estão apresentados na Tabela 4.19. A curva tensão versus deformação típica obtida nos ensaios de compressão realizados está exemplificada na Figura 4.96.

Tabela 4.19 – Resultados do ensaio de compressão

Tensão Máxima (MPa)	
Média	Desvio-padrão
176,73	13,69

Vaidya *et al.* [2001] fabricaram compósitos de fibra de vidro tipo S-2 (fibra com propriedades mecânicas superiores a fibra de vidro tipo E) e resina éster vinílica por RTM e obtiveram uma tensão de compressão média de 250 MPa, aproximadamente 30% superior a obtida neste trabalho.

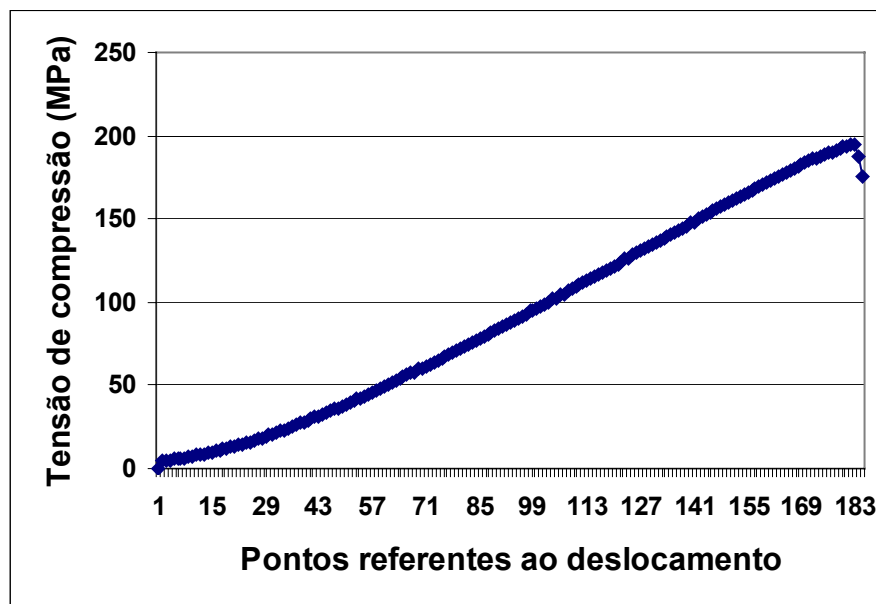


Figura 4.96 – Curva tensão versus pontos referentes ao deslocamento típica obtida nos ensaios de compressão realizados.

A Figura 4.97 apresenta uma análise macroscópica do dano dos corpos de prova submetidos ao ensaio de compressão depois da ruptura final.

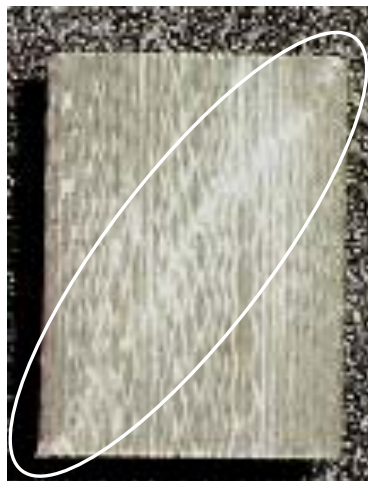


Figura 4.97 - Corpo de prova após o ensaio de compressão.

A Figura 4.97 mostra o mecanismo de dano conhecido como “microbuckling”, onde uma sequência progressiva de microflambagens ocorre nas fibras de um mesmo plano de cisalhamento.

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 CONCLUSÕES

Analisando-se os resultados obtidos com o equipamento de RTM desenvolvido, com as variáveis de processamento selecionadas e o sistema fibra-resina adotado no presente trabalho de pesquisa, pode-se concluir que:

- Foi desenvolvido com sucesso (projeto e fabricação) uma Estação de Processamento por RTM para materiais compósitos espessos de concepção própria.
- O arranjo aprovado para o uso em todas as placas compósitas fabricadas por RTM neste trabalho de pesquisa foi: ponto de injeção central e ponto de vácuo também central.
- O arranjo testado: ponto de injeção central de resina na tampa superior e 4 pontos de vácuo em cada um dos cantos da tampa inferior apresentou molhamento incompleto das camadas de fibra. A área central não-molhada pela resina (“dry spot”) foi obtida praticamente de forma semelhante em toda as camadas ao longo da espessura.
- Foi possível com o equipamento de RTM projetado e fabricado neste trabalho fabricar placas compósitas com 32 camadas de fibra espessa (aproximadamente 25,4 mm ou 1”) constituídas por tecidos de elevada gramatura (1100 g/m²) e baixíssima porosidade e uma resina com uma viscosidade (350 cp), relativamente alta para RTM, fazendo uso apenas de pressão de vácuo.
- Não foi possível a fabricação de compósito com mais de 32 camadas e menos de 25 camadas de fibra pelo processamento RTM desenvolvido e com o sistema de fibra-resina adotado.
- Só foi possível a fabricação por RTM das placas compósitas com o seguinte número de camadas de fibra : 28, 30 e 32. Para uma determinada espessura do espaçador do molde de injeção e para o sistema fibra-resina adotado, uma estreita faixa de preformas pode ser usada para a fabricação de placas compósitas por RTM.
- O sistema de injeção de resina é importante no entendimento real do processamento por RTM. Nos processamentos realizados, esse sistema alterou o tempo de preenchimento da preforma.

- A quantidade de resina no reservatório de injeção pode influenciar o processamento por RTM, uma vez que ela não só alterou os tempos de preenchimento, como impediu o preenchimento da preforma em um dos processamentos (experimento 2).
- O fenômeno de *race tracking* é o responsável pelo preenchimento da preforma dos processamentos realizados, não sendo possível, conseqüentemente, o cálculo da permeabilidade transversal.
- A placa de 32 camadas foi a que apresentou melhor acabamento superficial em ambos os lados (lado da injeção e do vácuo); as superfícies desses lados são lisas ao toque humano.
- As placas compósitas de 28, 30 e 32 camadas processadas com pressão atmosférica e pressão de vácuo não conseguiram atingir a espessura de 25,4 mm. Essas placas compósitas apresentaram maior compactação na direção do urdume do que da trama.
- O uso de pressão positiva e vácuo na placa processada com 28 camadas gerou uma placa com espessura média maior do que a espessura do espaçador (25,4 mm), rápido preenchimento da preforma e grande quantidade de vazios quando comparada com a placa compósita de 28 camadas processada só com pressão de vácuo.
- A capacidade de injeção de resina na preforma é limitada pelo número de camadas, quando se mantém fixa a espessura do espaçador.
- A variação do número de camadas de fibra das placas produzidas por RTM controla não só o tempo de preenchimento do molde, conseqüentemente a taxa de produção, como a Resistência ao Cisalhamento Interlaminar nos compósitos fabricados.
- A placa compósita fabricada com a preforma de 30 camadas (aproximadamente 46% de fração volumétrica de fibra) apresentou tempo de preenchimento intermediário entre as duas outras preformas (28 e 32 camadas), maiores valores de Resistência ao Cisalhamento Interlaminar e conseqüentemente maior qualidade de processamento.
- Para uma determinada espessura do espaçador do molde de RTM, só uma estreita faixa de frações volumétricas de fibra de placas compósitas pode ser fabricada (28, 30 e 32 camadas) e apenas uma dessas placas (30 camadas) será a otimizada tanto em tempo de preenchimento como em termos de qualidade de processamento.

- Foi iniciada uma metodologia teórica e experimental para cálculo da permeabilidade no plano de compósitos processados por RTM. Fazendo uso dessa metodologia foi possível calcular a permeabilidade no plano do compósito de 32 camadas.
- O escoamento no sistema de injeção de resina alterou significativamente o valor da permeabilidade no plano do processamento por RTM.
- Não foi possível desenvolver nenhuma técnica capaz de avaliar a área delaminada dos compósitos submetidos a impactos balísticos.
- A metodologia de medição de velocidade residual foi aprovada para uso no ensaio balístico de placas compósitas espessas.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para a continuação deste trabalho, têm-se:

- Estudo mais aprofundado da permeabilidade dos compósitos processados por RTM, fazendo uso do modelo matemático proposto por Massarani e Telles (2001).
- Estudo de processamento de materiais compósitos por RTM alterando o tempo de preenchimento por meio de uso diferentes combinações da posição do pontos de injeção e de vácuo.
- Estudo de processamento de materiais compósitos por RTM variando o diâmetro do ponto de injeção.
- Desenvolvimento de um molde com sistema de injeção de resina periférico e estudo do escoamento da resina no interior do mesmo.
- Produção de placas compósitas por RTM com diferentes arquiteturas de tecido.
- Desenvolvimento de um equipamento para medição da permeabilidade transversal de compósitos processados por RTM.
- Estudo da distribuição de temperatura, pressão e deflexão no interior do molde de injeção por RTM.
- Cálculo e comparação entre os diversos métodos de medição da permeabilidade no plano dos compósitos processados por RTM.
- Caracterização balística de placas compósitas processadas por RTM.
- Uso de outros sistemas poliméricos na fabricação de placas por RTM.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A review of DSC kinetics methods. Catálogo TA instruments.

ABRAHAM, D. E MCLLHAGGER, R. “ Investigations into various methods of liquid injection to achieve mouldings with minimum void contents and full wet out”,

Composites Part A, v. 29A, p.533-539, 1998.

ABRAHAM, D. et al.“A comparision of physical properties of glass fibre epoxy composites produced by wet lay-up with autoclave consolidation and resin transfer moulding”, Composites Part A, v. 29A, p.795-801, 1998.

ADAMS K. L. E REBENFELD L. “Permeability characteristics of multiplayer fiber reinforcements. Part II: Theoretical Model”, Polymer Composites, v.12, n.3, junho, 1991.

ADAMS K. L. E REBENFELD L.“Permeability characteristics of multiplayer fiber reinforcements. Part I: Experimental Observations”, Polymer Composites, v.12, n.3, junho, 1991.

ADAMS, D. F. Test methods for composite materials. Technomic Publishing Company, Pennsylvania, EUA.

AJDELSZTAIN, L.1998.“Desenvolvimento de placas de material compósito para aplicação em proteções contra impactos balísticos”. Dissertação de Mestrado. PEMM/ COPPE, Universidade Federal do Rio Janeiro, Rio de Janeiro.

ALMANSA, E. M., CÁNOVAS, M. F. “Behavior of normal and steel fiber reinforced concrete under impact of small projectiles”, Cement and Concrete Research, v. 29, p. 1807-1814, 1999.

ALMOHANDES, A. A. et al. “Experimental investigation of the ballistic resistanse of steel-fiberglass reinforced polyester laminated plates”, Composites: Part B, v. 27B, p. 447-458, 1996.

ALVES, A. L. S., 2006, Processamento de placas compósitas pela Técnica de Moldagem por Infusão de Resina de SEEMANN (SCRIMP). Dissertação de Mestrado. PEMM, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

AMICO, S. E LEKAKOU, C. “Mathematical modelling of capillary micro-flow through woven fabrics”, Composites: Part A, v.31, p.1331–1344, 2000.

ANAND, K. e GUPTA, V. “The effect of processing conditions on the compressive and shear strength of 2-D carbon-carbon laminates”, Carbon, v. 33, n.6, p. 739-748, 1995.

ATTA, C. M. V.. 1965, Vacuum Science and Engineering, Mcgraw-Hill book company, New York.

AVERY, J.G. et al. "Fracture Control in Ballistic - Damaged Graphite / Epoxy Wing Structure", In: Fracture Mechanics: Thirteenth Conference, ASTM, 1981.

BACKMAN, M. E. Terminal Ballistics, ed. Technical Information Department, EUA, 1976.

BARRAZA, H. J. et al. "Porosity reduction in the High-Speed processing of glass-fiber composites by Resin Transfer Molding (RTM)", Journal of Composite Materials, v.38, n.3, 2004.

BEITER, K. A. et al. "Design for injection molding: balancing mechanical requirements, manufacturing costs and material selection".

BELLOLI, A. et al. "PERMSTAT – Automated permeability measurement station", poster, CCM, University of Delaware.

BENJAMIN, W. P. e BECKWITH, S. W. Resin Transfer Molding SAMPE Monograph n. 3, ed. SAMPE, EUA, 1999.

BIBO, G. A., HOGG, P. J. "Review: The role of reinforcement architecture on impact damage mechanisms and post-impact compression behaviour", Journal of Materials Science, v. 31, p. 1115-1137, 1996.

BICKERTON, S. E ABDULLAH, M. Z. "Modeling and evaluation of the filling stage of injection/compression moulding", Composites Science and Technology, v.63, p.1359–1375, 2003.

BICKERTON, S. e ADVANI, S. G. "Characterization and modeling of race-tracking in liquid composite molding process", Composites Science and Technology, 59, p. 2215-2229, 1999.

BICKERTON, S. et al. "Design and application of actively controlled injection schemes for resin-transfer molding", Composites Science and Technology, v. 61, p. 1625-1637, 2001.

BICKERTON, S. et al. "The viscoelastic compression behavior of liquid composite molding performs", Composites: Part A, v. 34, p. 431–444, 2003.

BINÉTRUY, C. et al. "The interactions between flows occurring inside and outside fabric tows during RTM", Composites Science and Technology, v.57, p.587-596, 1997.

BLANC, S. "Analysis of fabric compaction and flow-rate monitoring during the RTM process", Relatório de pesquisa, University of Delaware, 1999, USA.

BORG, U. "Compressive strength of fiber composite with porosity", XXI ICTAM, 15-21, Varsóvia, Polônia, agosto, 2004.

BOTELHO, E. C. e REZENDE, M. C. "Caracterização mecânica de compósitos de poliamida/fibra de carbono via ensaios de cisalhamento interlaminar e de mecânica da fratura", Polímeros: Ciência e Tecnologia, v. 12, n. 3, p. 153-163, 2002.

BOURBAN P. E. et al. "Material phenomena controlling rapid processing of thermoplastic

composites”, *Composites: Part A*, v. 32, p. 1045-1057, 2001.

BRUSCHKE, M. V. et al. “Effective in-plane permeability of multi-layered RTM performs”.

BUNTAIN, M. J. e BICKERTON, S. “Prediction of Tooling forces in liquid composite moulding process”, *SAMPE Journal*, v. 39, n. 1, p.8-15, 2003.

CAIRNS, D. S. et al. “Modeling of resin transfer molding of composite materials with oriented unidirectional plies”, *Composites: Part A*, v.30, p.375–383, 1999.

CALADO, V.M. A., ADVANI, S. G. “Effective average permeability of multi-layer preforms in Resin Transfer Molding”, *Composites Science and Technology*, v. 56, p. 519-531, 1996.

CAMPBELL J., et al. “Understanding resin flow behavior during the manufacture of multifunctional armor”.

CARDOSO, A . L. V et al. A evolução das blindagens para viaturas militares de reconhecimento, In: Encontro Técnico de Química – Militar, 2000, Instituto de Pesquisa da Marinha, Rio de Janeiro.

CARDOSO, A. L. V. Estudo Técnico do IPD GM01/2001.

CARLSSON, L. A. e PIPES, B. R. Experimental characterization of advanced composite materials. Ed. Technomic, USA, 1997.

CARR, D.J. “Failure mechanisms of yarns subjected to ballistic impact”, *Journal of Materials Science Letters*, v. 18, p. 585-588, 1999.

CHANGESKE, J. e JAYARAMAN, K. “Effects of preform architecture on racetracking in liquid molding”, University of Michigan, EUA.

CHEN, B. E CHOU, T-W. “Compaction of woven-fabric preforms in liquid composite molding process: single-layer deformation”, *Composites Science and Technology*, v. 59, p. 1519-1526, 1999.

CHEN, B. et al. “Experimental and theoretical studies of fabric compaction behavior in resin transfer molding”, *Materials and Science Engineering*, A317, p. 188-196, 2001.

CHOCRON, S. et al. “Impact of the 7.62-mm APM2 projectile against the edge of a metallic target”, *International Journal of Impact Engineering*, 25, p. 423-437, 2001.

COLLOMBET, F. et al. “Impact behavior of laminated composites: physical basis for finite element analysis”, *Composites Science and Technology*, v. 58, p. 463-478, 1998.

COSTA, M. L. et al. “Resistência ao cisalhamento interlaminar de compósitos com resina epóxi com diferentes arranjos das fibras na presença de vazios”, *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 11, n. 4, p. 182-189, 2001.

COSTA, M. L., 2002, Efeito do volume de vazios no comportamento mecânico de compósitos avançados carbono/epóxi e carbono/bismaleimida, Tese de Doutorado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, São Paulo.

DA COSTA, A. M. JR et al. “Shock - waves on polymer composites”. Journal of Materials Science Letters , v.16, p. 1480 - 1482, 1997.

DA COSTA, A. M. JR et al. “Woven glass fibre/epoxy composites under shock – waves”. Latin American Applied Research, v. 26, p. 19 - 21, 1996.

DANIEL, I. M. et al. “Permeability and resin flow measurements and simulations in composite performs”.

DeLUCA, E. et al. “Ballistic impact damage of S-2 glass-reinforced plastic structural armor”, Composite Science and Technology, v. 58, p.1453-1461,1998.

DIALLO, M.L. et al. “Experimental analysis and simulation of flow through multi-layer fiber reinforcements in liquid composite molding”, Polymer Composites, v. 19, p. 246-256, 1998.

DIMITROVOVÁ, Z. E FARIA, L. “Finite element modeling of the resin transfer molding process based on homogenization techniques”, Computers e Structures, v. 76, p. 379-397, 2000.

DING, LI et al. “In situ measurement and monitoring of whole-field permeability profile of fiber preform for liquid composite molding processes”, Composites: Part A, v.34, p. 779–789, 2003

DRAPIER, S. et al. “Influence of the stitching density on the transverse permeability of non-crimped new concept (NC2) multiaxial reinforcements: measurements and predictions”, Composites Science and Technology, v.62, p.1979–1991, 2002.

DUNKERS, JOY P. et al. “Fiber optic flow and cure sensing for liquid composite molding”, Optics and Lasers in Engineering , v. 35, p. 91-104, 2001.

EBELING, T et al. “Delamination failure of a single yarn glass fiber composite”, Journal of Composite Materials, v. 31, n. 13, 1997.

EBELING,T. et al. “Delamination failure of woven glass fiber composite”, Journal of Composite Materials, v.31, n. 13,1997.

ENDRUWEIT, A. E ERMANNI, P. “The in-plane permeability of sheared textiles. Experimental observations and a predictive conversion model”, Composites: Part A, 2004.

ERICKSON, G.C., CHUNG, W. R. “Effectiveness of ultrasonic testing method in detecting delamination defects in thick composites”.

FERLAND, P. et al. “Concurrent methods for permeability measurement in resin transfer

molding”, *Polymer Composites*, v. 17, n. 1, 1996.

FERREIRA, D.B.B., 1994, Comportamento mecânico de blindagens compósitas leves. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Mecânica e de Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.

FLORES, FLORELLA. 2000. Cure-Dependent material response of vinyl ester resin: Experimental investigation and model evaluation. Dissertação de Mestrado, University of Delaware(CCM), USA.

FOX, R. W. e McDONALD, A. T. Introdução à Mecânica dos Fluidos. Ed. Guanabara. Rio de Janeiro, 1988.

FREIRE, JÚNIOR R. C. S., 2005, Fadiga de alto ciclo em compósitos de PRFV modelagem por RNAs e prevenção de falha. Tese de Doutorado. PPgCEM, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte.

GAMA et al. “Punch shear behavior of thick-section composites under quasi-static, low velocity, and ballistic impact loading”, *SAMPE Journal*, v. 41, n.4, julho/agosto, 2005.

GAUVIN, R. et al. “Permeability measurement and flow simulation through fiber reinforcement”, *Polymer Composites*, v. 17, p.34- 42, 1996.

GEBART, B. R., LIDSTRÖM, PEDER. “Measurement of in-plane permeability of anisotropic fiber reinforcements”, *Polymer Composites*, v. 17, p. 43-51, 1996.

GEBART,R. e STRÖMBECK, L.. Principles of Liquid Composite Molding, Processing of Composites editado por Davé, R. S. and Loos, A.C. (eds), *Processing of composites*, p. 358- 387, Hanser Publishers, Munich, 2000.

Gellert E. P. et al. “Energy transfer in ballistic perforation of fibre reinforced composites”, *Journal of Materials Science*, v.33, p.1845-1850,1998.

Gellert, E.P. et al. “A study of the effect of target thickness on the ballistic perforation of glass-fibre-reinforced plastic composites”, *International Journal of Impact Engineering*, v. 24, p. 445-456, 2000.

HAMMAMI, A. et al. “Modeling the edge effect in liquid composites molding”, *Composites Part A*, v. 29A, p.603-609, 1998.

HAN, K.K et al. “Measurements of the permeability of fiber preforms and applications”, *Composites Science and Technology*, v. 60, p.2435-2441, 2000.

HAN, KERANG et al. “Flow modeling and simulation of SCRIMP for composites manufacturing”, *Composites: Part A*, v. 31, p.79–86, 2000.

- HARPER, A. Vacuum moulding - theory, practice and application. Reinforced plastics, abril, 2003.
- HARPER, A. Closed mould processing. Reinforced plastics, fevereiro, 2001.
- HEARDMAN, E. et al. "In-plane permeability of sheared fibers", Composites: Part A, v. 32, p. 933-940, 2001.
- HEIDER, D. et al. "Improvement of surface quality during VARTM processing". CCM, University of Delaware, EUA.
- HOES, K. et al. "New set-up for measurement of permeability properties of fibrous reinforcements for RTM", Composites: Part A, v.33, p. 959-969, 2002.
- HOGG, P. J. "Composites for ballistic applications".
- HOSUR, M. V. et al. "Studies on the repair of ballistic impact damaged S2-glass/vinylester laminates", Composite Structures, v. 61, p. 281-290, 2003.
- HSIAO, K-T E ADVANI, S. G. "Modified effective thermal conductivity due to heat dispersion in fibrous porous media", International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 42, p. 1237-1254, 1999.
- HYER, A. W. Stress analysis of fiber – reinforced composite materials. Ed. McGraw – Hill, EUA, 1998.
- ILINCA, F., HÉTU, J.-F. "Modelo matemático ajuda a simular a injeção auxiliada por gás", Plástico Industrial, jun., 2001.
- INNOCENTINI, M. D.M. et al. "Previsão da permeabilidade a partir de propriedades físicas de concretos refratários", Cerâmica, v. 48, n. 305, jan/fev/mar, 2002.
- IREMONGER, M. J., WENT, A. C. "Ballistic impact of fibre composite armours by fragment-simulating projectiles", Composites: Part A, v. 27A, p. 575-581, 1996.
- JAYARAMAN, J. C. et al. "Effects of preform architecture on racetracking in liquid molding".
- JIANG, S. et al. "Optimum arrangement of gate and vent locations for RTM process design using a mesh distance-based approach", Composites: Part A, v. 33, p. 471-481, 2002.
- JONES, R. M. Mechanics of composite materials. Ed. McGraw – Hill, EUA, 1975.
- KANG, M. K. et al. "Formation of microvoids during resin-transfer molding process", Composites Science and Technology, v. 60, p. 2427-2434, 2000.
- KARBHARI, V. M. "Impact characterization of RTM composites", Journal of Materials Science, v. 32, p. 4159-4166, 1997.
- KELKAR, A. D. et al. "Performance evaluation of VARTM manufactured textile composites for

the aerospace and defense applications”, *Materials Science and Engineering B*, 132, p. 126-128, 2006.

KIM, P. J. E LEE, D. G. “Surface quality and shrinkage of the composite bus housing panel manufactured by RTM”, *Composite Structures*, v. 57, p.211–220, 2002.

KIM, S. K. E DANIEL, I. M. “Determination of three-dimensional permeability of fiber preforms by the inverse parameter estimation technique”, *Composites: Part A*, v. 34, p. 421-429, 2003.

KIM, Y. G. et al. “Manufacturing of the composite screw rotors by resin transfer molding”, *Journal of Materials Processing Technology*, v. 48, p. 641-647, 1995.

KISSINGER, C. et al. “Continuos on-line permeability measurement of textile structures”.

KIUNA, N. et al. “A model for resin viscosity during cure in the resin transfer moulding process”, *Composites Part A*, v. 33, p. 1497-1503, 2002

LACY, G. “The how & why of vacuum infusion”, *International Sandwich Symposium*, Seattle, Washington, EUA, abril, 2006.

LAIBLE, R. C. 1980, *Ballistic Materials and penetration mechanics*. ed. Elsevier Scientific Publishing Company, Netherlands.

LANE. “Cutting infusion time and cost”, *Composites Technology*, agosto, 2006.

LAWRENCE,J.M.,ADVANI, S.G. “The effect of ply drop-off regions on flow propogation and processing parameters during the resin transfer molding process”. CCM, University of Delaware, EUA.

LEBRUN, G. et al. “Experimental investigation of resin temperature and pressure during filling and curing in a flat steel RTM mould”, *Composites: Part A*, v. 27A, p. 347-355, 1996.

LEE, B. L. et al. “Failure of Spectra Polyethylene Fiber - Reinforced Composites under Ballistic Impact Loading”, *Journal of Composite Materials*, v. 28, n. 13, p. 1202 - 1226, 1994.

LEKAKOU, C. et al. “Measurement techniques and effects on in-plane permeability of woven cloths in resin transfer moulding”, *Composites: Part A*, v. 27A, p. 401-408, 1996.

LEKAKOU, C., BADER, M. G. “Mathematical modelling of macro- and micro-infiltration in resin transfer moulding (RTM), *Composites: Part A*, v. 29A, p.29-37, 1998.

LIANG, Z. et al. “In-situ measurement and monitoring of fiber perform permeability for Liquid Composite Molding”.

LIM, S. T., LEE, W.I. “An analysis of the three-dimensional resin-transfer mold filling process”, *Composites Science and Technology*, v.60, p. 961-975, 2000.

LIU, B. et al. “Modelling and simulation of resin transfer moulding (RTM)-gate control, venting

and dry spot prediction”, Composites: Part A, v.27A, p.135-141, 1996.

LIU, D. “Impact - Induced Delamination - A View of Bending stiffness Mismatching”, Journal of Composite Materials, v.22, 1988.

LIU, L. et al. “ Effects of cure cycles on void content and mechanical properties of composite laminates”, Composite Structures, 73, p. 303-309, 2006.

LIU,D. “Matrix Cracking in impacted glass/epoxy plates”, Journal of Composite Materials, v. 21, jul., 1987.

LOENDERSLOOT, R., AKKERMAN, R. “Through-thickness permeability measurements of fibre reinforcements”, University of Twente, Twente Institute of Mechanics, The Netherlands.

LONG, A. C. “Process modeling for liquid molding of braided performs”, Composites: Part A, v. 32, p. 941- 953, 2001.

LOUIS,M. E HUBER, U. “ Investigation of shearing effects on the permeability of woven fabrics and implementation into LCM simulation”, Composites Science and Technology, v. 63, p. 2081–2088, 2003.

LUCE, T. L. et al. “Permeability Characterization. Part 2: flow behavior in multiple-layer performs”, Polymer Composites, v. 16, n. 6, dezembro, 1995.

LUNDSTRÖM, T. S. “The permeability of non-crimp stitched fabrics”, Composites: Part A, v. 31, p.1345–1353, 2000.

LUNDSTRÖM, T.S. et al. “In-plane permeability measurements: a nordic round-robin study”, Composites: Part A, v. 31, p.29–43, 2000.

LUO, YIWEN et al. “Permeability measurement of textile reinforcements with several test fluids”, Composites: Part A, v. 32, p. 1497-1504, 2001.

LUTHY, T. e ERMANNI, P. “Linear direct current sensing system for flow monitoring in Liquid Composite Moulding”, Composites: Part A, v.33, p. 385-397, 2002.

MACHADO, J. C. V. Reologia e escoamento de fluidos. Ed. Interciência. Rio de Janeiro, 2002.

MAGUIRE, D. E., SIMMONS, C.H. Mecânica técnica industrial – desenho técnico. Ed. Hemus, São Paulo.

MAHDI, STEPHANE et al. “The structural behavior of composite armor: effects of the manufacturing process”.

MALLICK, P. K. Fiber-reinforced composites. Ed. Marcel Dekker, Inc., USA, 1993.

MASSARANI, G. 2002, Fluidodinâmica em sistemas particulados, 2 ed., editora e-Papers, Rio de Janeiro.

MASSARANI, G. e TELLES, A. S. “An extended capillary model for flows in porous media”, *Journal of Porous Media*, 4(4), p. 297-307, 2001.

MASTBERGEN, D. B., 2004, *Simulation and Testing of Resin Infusion Manufacturing Processes for Large Composite Structures*. Dissertação de Mestrado. Montana State University-Bozeman, Estados Unidos da América.

McCREA, J. B. 2000. *Initiator effects on the cure kinetics of vinyl ester resin systems*. Dissertação de Mestrado, University of Delaware(CCM), USA.

MCILHAGGER, A. et al. “The development of a dielectric system for the on-line cure monitoring of the resin transfer moulding process”, *Composites: Part A*, v. 31, p.1373–1381, 2000.

MICHAUD, D. J., 2000, *Simulation-based design optimization and control of thick composite laminates manufactured by resin transfer molding*. Tese de Doutorado. University of Delaware, EUA.

MICHAUD, D.J.et al. “Curing behavior of thick-sectioned RTM composites”, *Journal of Composite Materials*, v.32, n.14, p. 1273-1296, 1998.

MIT offers economic route to high volume RTM. *Reinforced Plastics*, maio, 1998.

MONIB, A. M. 1999. “Damage tolerance of thick-section composites subjected to ballistic impact”, *Dissertação de Mestrado*, University of Delaware(CCM), USA.

MORYE, S.S. et al. “Modelling of the energy absorption by polymer composites upon ballistic impact”, *Composites Science and Technology*, v. 60, p. 2631-2642, 2000.

MOSS,G. M.et al., 1995, *Military Ballistics*, vol. 1, ed. Brassey’s, London.

MOUTINHO, A. M. C. et al. 1980, *Tecnologia de vácuo*, 1 ed., editora Universidade Nova de Lisboa, Portugal.

Norma ASTM D 2344/2344M *Standard Test for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and their Laminates*.

NORMA ASTM D-3039/D3039M – *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*.

Norma MIL-HDBK-17-1F *Polymer matrix composites guidelines for characterization of structural materials*, 2002.

NORMA MIL-P-46593A *Projectile, calibers .22, .30, .50 e 20 mm Fragment-Simulatin*

NUNES, L.M. et al. “Evaluation of the damaged area of glass-fiber-reinforced epoxy-matrix composite materials submitted to ballistic impacts”, *Composite Science and Technology*, v. 64, p. 945-954, 2004.

OLSSON, R. "Mass criterion for wave controlled impact response of composite plates", *Composites Part A: applied science and manufacturing*, v. 31, p. 879-887, 2000.

PAHR, D. H. et al. "A study of short-beam-shear and double-lap-shear specimens of glass fabric/epoxy composites", *Composites: Part B*, 33, p. 125-132, 2002.

PANTELELIS, N. G. "Optimised cure cycles for resin transfer moulding", *Composites Science and Technology*, v. 63, p.249–264, 2003.

PARDINI, L. C. "Preformas para compósitos estruturais", *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 10, n. 2, p. 100-109, 2000.

PARNAS, R. S. et al. "Permeability characterization. Part 1: a proposed standard reference fabric for permeability", *Polymer Composites*, v. 16, n. 6, dezembro, 1995.

PARNAS, R. S. et al. "The interaction between micro- and macroscopic flow in RTM performs", *Composite Structures*, v. 27, p.93 – 107, 1994.

Pearce, N. R. L. et al. "An investigation into the effects of fabric architecture on the processing and properties of fibre reinforced composites produced by resin transfer moulding", *Composites: Part A*, 29A, p. 19-27, 1998.

Pearce, N. R. L. et al. "Improving the resin transfer moulding process for fabric-reinforced composites by modification of the fabric architecture", *Composites: Part A*, 31, p. 1433-1441, 2000.

PETERS, S. T. *Handbook of composites*. London : Ed. Chapman & Hall,1998.

PHELAN, F. R. Jr., WISE, GEOFF. "Analysis of transverse flow in aligned fibrous porous media", *Composites Part A*, v. 27A, p. 25-34, 1996.

Pillai, K. M. "Governing equations for unsaturated flow through woven fiber mats. Part 1. Isothermal flows", *Composites Part A*, v. 33, p. 1007-1019, 2002.

PILLAI, K. M. E ADVANI, S. G. "Wicking across a Fiber-Bank", *Journal of Colloid and Interface Science*, v.183, p. 100–110, 1996.

PINHEIRO, M. A . S. "Compósitos reforçados por tecidos", *Revista Militar de Ciência e Tecnologia*, v. XVII, n. 1, 2000.

POTTER, K. D. " The early history of the resin transfer moulding process for aerospace Applications", *Composites: Part A*, v.30, p.619–621, 1999.

Process to RTM refinement key success. *Reinforced Plastics*, fevereiro, 1999.

Resin flow front monitoring in RTM. *Reinforced Plastics*, Fevereiro, 1998.

RICE, B.P., LEE, C. W. "Automated exotherm control for thick composite processing".

RICHARDSON, M. O. W., ZHANG, Z. Y. “Experimental investigation and flow visualization of the resin transfer mould filling process for non-woven hemp reinforced phenolic composites”, *Composites: Part A*, 31, p. 1303-1310, 2000.

RINEHART, J. S. On fractures caused by explosions and impacts. *Quarterly of the Colorado school of mines*, n.4, v. 55, Colorado, EUA, 1960.

RUDD C. D. et al. “In-plane permeability determination for simulation of liquid composite molding of complex shapes”, *Polymer Composites*, v. 17, n.1, fevereiro, 1996.

RUIZ, E. e TROCHU, F. “Numerical analysis of cure temperature and internal stresses in thin and thick RTM parts”, *Composites: Part A*, 36, p. 806-826, 2005.

SAOUAB, A. et al. “Injection simulations of thick composite parts manufactured by the RTM process”, *Composites Science and Technology*, v. 61, p. 445-451, 2001.

SAVAGE, G. M. “Fabric and fibre reinforced laminate armours”, *Metals and Materials*, v. 5, p. 285 - 290, 1989.

SCARPONI, CLAUDIO et al. “Impact testing on composites laminates and sandwich panels”, *Journal of Composite Materials*, v. 30, n. 17, 1996.

SCHULTHEISZ, C. R. e WAAS, A. M. “Compressive failure of composites, part 1: testing and micromechanical theories”, *Prog. Aerospace Science*, v. 32, p.1-42, 1996.

SCHWENDEMAN, N. J. “Real-time monitoring and in-process control for RTM production”.

SHENOI, R. A. e WELLICOME, J. F. *Composite materials in maritime structures*. Ed. Cambridge University Press, v. 1, 1993.

SHIM, V. P. W. et al. “Dynamic mechanical properties of fabric armour”, *International Journal of Impact Engineering*, v. 25, p. 1-15, 2001.

SHOJAEI, A. et al. “Numerical simulation of three-dimensional mold filling process in resin transfer molding using quasi-steady state and partial saturation formulations”, *Composites Science and Technology*, v.62, p.861–879, 2002.

SHOJAEI, A. et al. “Simulation of the three-dimensional non-isothermal mold filling process in resin transfer molding”, *Composites Science and Technology*, v. 63, p. 1931–1948, 2003.

SILVA Jr., J. E. L. et al. “Determination of the post-ballistic impact mechanical behavior of a $\pm 45^\circ$ glass- fabric composite”, *Polymer testing XX*, 2003, XXX-XXX.

SMITH, C. S. *Design of marine structures in composite materials*. Ed. Elsevier Applied Science, EUA, 1990.

SOBRINHO, L. L., 2005, *Desenvolvimento de Matriz Polimérica para Material Compósito*

Visando o Reforço de Dutos de Aço. Dissertação de Mestrado. PEMM, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

SOUSA, A. N., 2004, Desenvolvimento de sistema para reparo de dutos submarinos utilizando materiais compósitos. Tese de Doutorado. PEMM, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

STAVROPOULOS, C. D. et al. “Effect of thickness on the compressive performance of ballistically impacted carbon fibre reinforced plastic (CFRP) laminates”, Journal of Materials Science, v. 32, p. 931 - 936, 1997.

STEENKAMER, D. A., 1994, The influence of Preform Design and Manufacturing Issues on the Processing and Performance of Resin Transfer Molded Composites, Tese de Doutorado, University of Delaware Center for Composite Materials, Delaware, Estados Unidos da América.

STIOPIN, P.A.. Resistencia de Materiales. Ed. MIR, Moscou, 1968.

STÓVEN, T. et al. “Continuous monitoring of three-dimensional resin flow through a fiber perform”, Composite Part A, v. 34, p.475-480, 2003.

TAKANO, N. et al. “Microstructure-based evaluation of the influence of woven architecture on permeability by asymptotic homogenization theory”, Composites Science and Technology, v. 62, p.1347–1356, 2002.

TANOGLU, M., SEYHAN, A. T. “Investigating the effects of a polyester performing binder on the mechanical and ballistic performance of E-glass fiber reinforced polyester composites”, International Journal of Adhesion & Adhesives, v.23, p. 1-8, 2003.

TIMOSHENKO, S. P. Resistência dos Materiais, Ed. Ao Livro Técnico, Rio de Janeiro, 1969.

TSAI, S. W. Composites Design. Ed. Think Composite, EUA, 1988

ULVEN, C. et al. “Effect of projectile shape during ballistic perforation of VARTM carbon/epoxy composite panels”, Composite Structures, v. 61, p.143–150, 2003.

VAIDYA, U. K. et al. “Affordable processing of thick section and integral multi-functional composites”, Composites: Part A, v.32, p. 1133-1142, 2001.

VASQUES, R. A., et al. “A simple apparatus for determining the permeability of thin-thickness porous materials by pressure-decay technique”, Revista de Física Aplicada e Instrumentação, v. 14, n. 4, dezembro, 1999.

WAAS, A. M e SCHULTHEISZ, C. R. “Compressive failure of composites, part 2: experimental studies”, Prog. Aerospace Science, v. 32, p. 43-78, 1996.

WANG, Y., XIA, Y. “ Dynamic tensile properties of E-glass, Kevlar-49 and polyvinyl alcohol

fiber bundles”, Journal of Materials Science Letters, v. 19, p. 583-586, 2000.

WEITZENBÖCK, J.R. et al. “Measurement of three-dimensional permeability”, Composites: Part A, v. 29A, p.159-169, 1998.

WEITZENBÖCK, J.R. et al. “Radial flow permeability measurement. Part A: Theory”, Composites: Part A, v. 30, p.781–796, 1999.

WEITZENBÖCK, J.R. et al. “Radial flow permeability measurement. Part B: Application”, Composites: Part A, v.30, p.797–813, 1999.

WILKINS, MARK L. “Mechanics of Penetration and Perforation”, Int. J. Engng. Sci., v. 16, p. 793-807, 1978.

WOERDEMAN, D. L. et al. “Interpretation of 3-D permeability measurements for RTM modeling”, Polymer Composites, v. 16, n.6, 1995.

WOODWARD, R. L. et al. “A study of fragmentation in the ballistic impact of ceramics”, International Journal of Impact Engineering, v.15, n. 5, p. 605-618, 1994.

WU, HSI - YUNG T. et al. “Impact induced stresses, strains, and delamination in composite plates”, Journal of Composite Materials, v. 22, jun. 1988.

WU, HSI - YUNG T. et al. “Measurements of matrix cracking and delamination caused by impact on composite plates”, Journal of Composite Materials, v. 22, jun. 1988.

ZANOTTA, C. M. 1990, Recarga de munições no Brasil. Ed.Magnum, São Paulo.

ZHOU, G. “Static behavior and damage of thick composite laminates”, Composite Structures, 36, p. 13-22, 1996.

ZHU, GUOQI et al. “Penetration of laminated kevlar by projectiles - I. Experimental Investigation”, Int. J. Solids Structures, v. 29, n. 4, p. 399 - 420, 1992.

ZHU, GUOQI et al. “Penetration of laminated kevlar by projectiles - II. Analytical Model”, Int. J. Solids Structures, v. 29, n. 4, p.421 - 436, 1992.