

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE

CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: SISTEMAS TERMOMECÂNICOS

**SUB-ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ANÁLISE E PROJETO DE SISTEMAS
TERMOMECÂNICOS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Desenvolvimento do Processamento de Compósitos por Moldagem de

Transferência de Resina

Fevereiro de 2014

Artur Magno Silveira Cavalcanti

artur.magno@gmail.com

Campina Grande – PB

Fevereiro de 2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE

CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: SISTEMAS TERMOMECÂNICOS

**SUB-ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ANÁLISE E PROJETO DE SISTEMAS
TERMOMECÂNICOS**

Desenvolvimento do Processamento de Compósitos por Modelagem de
Transferência de Resina

Artur Magno Silveira Cavalcanti

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
como requisito à obtenção do título de
MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

Orientador: Prof. Dr. Wanderley Ferreira de Amorim Júnior

Agência Financiadora: CAPES

Campina Grande

Fevereiro de 2014

C376d

Cavalcanti, Artur Magno Silveira.

Desenvolvimento do processamento de compósitos por modelagem de transferência de resina / Artur Magno Silveira Cavalcanti. – Campina Grande, 2019.

137 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2019.

"Orientação: Prof. Dr. Wanderley Ferreira de Amorim Júnior".

Referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Processamento de Compósitos. 3. RTM. 4. Desenvolvimento de Subsistema de Injeção. I. Amorim Júnior, Wanderley Ferreira de. II. Título.

CDU 621.01(043)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE

CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

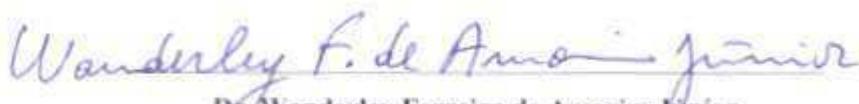
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: SISTEMAS TERMOMECÂNICOS

**SUB-ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ANÁLISE E PROJETO DE SISTEMAS
TERMOMECÂNICOS**

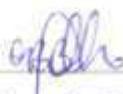
ARTUR MAGNO SILVEIRA CAVALCANTI

Dissertação Aprovada em 27/02/2014 pela banca examinadora constituída dos seguintes
membros:


Dr. Wanderley Ferreira de Amorim Júnior

Orientador

PPGEM/UAEM/CCT/UFCG



Dr. Celso Rosendo Bezerra Filho

Examinador Interno

PPGEM/UAEM/CCT/UFCG



Dr. Enivaldo Santos Barbosa

Examinador Externo

UAEM/CCT/UFCG

DEDICATÓRIA

À minha futura esposa Karoline por ter me apoiado incondicionalmente em todos os momentos desta jornada, motivando e dando força constantemente para que este sonho pudesse ser realizado.

À minha mãe Socorro, que como ninguém soube me mostrar o sentido da família e me encaminhar nas trilhas da honestidade, perseverança e dignidade.

Ao meu pai Carlos, assim como a minha irmã Karla e meus sobrinhos Eduardo e Gabriel.

CURRICULUM VITAE

- Engenheiro Mecânico pela UFCG (2010).

AGRADECIMENTOS

A Deus por me abençoar com força e sabedoria, possibilitando assim que eu cumprisse essa árdua jornada.

A minha namorada Karoline, por sua paciência, compreensão e apoio sempre presentes;

A minha família, por toda dedicação que a mim tiveram, aos quais não seria possível dar mais esse passo na minha jornada, além do incentivo ao qual fui submetido para mais esta realização.

Ao professor Wanderley Ferreira de Amorim Júnior, pela oportunidade a mim cedida de realizar este trabalho através de sua orientação.

A Coordenação de Aperfeiçoamento do Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro para a concepção da pesquisa.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e aos seus professores, aos quais contribuíram para o meu crescimento pessoal e profissional durante o nosso período de convívio.

Ao Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas (LaMMEA) e a oficina do Departamento de Engenharia Mecânica pelo suporte técnico.

A Glauber que além da colaboração com o projeto, também prestou suporte para as atividades neste necessárias.

Aos companheiros Daniele, Estephanie, Henrique, Hudson, pela colaboração técnica e científica, além do tempo e paciência cedidos.

E a todos que, de alguma forma, tornaram possível o desenvolvimento deste projeto.

Desenvolvimento do Processamento de Compósitos por Modelagem de Transferência de Resina

RESUMO

Este projeto de dissertação tem como objetivo o desenvolvimento do processamento de compósitos por modelagem de transferência de baixo custo, através do desenvolvimento de subsistema de injeção, que possa ser acoplado a uma máquina de ensaio mecânico universal, além dos seus elementos constituintes, dos moldes, da resina, das placas e perfis concebidos, como também, os testes adotados para adequada caracterização e sua conseqüente validação. A metodologia adotada consiste no desenvolvimento do processamento, estudo da resina, caracterização microestrutural, caracterização mecânica e cálculo preliminar da permeabilidade. Foram utilizados como materiais constituintes desse projeto a resina poliéster saturada, tixotrópica pré-acelerada, catalisador e manta de fibra de vidro especificada como manta para laminação, todos produzidos pela MEKOL®. Com base nos experimentos realizados pode-se concluir que o projeto é viável, através do desenvolvimento e a fabricação de dois equipamentos para o processamento por modelagem de transferência de resina de baixo custo e concepção própria, para a fabricação de placas compósitas com total preenchimento pela resina, bom acabamento superficial e dimensões uniformes, compostas por 6 camadas de fibra de vidro (manta com gramatura de 450g/m²) e uma resina com uma viscosidade entre 200 a 400cps. Uma análise dos tempos totais das atividades se fez fundamental para a taxa de produção, onde foi observado uma redução de 26,4% desse total. A carga de injeção chegou a variar 91,17% entre os processamentos que adotaram os diferentes subsistemas de injeção. Quanto aos testes de flexão, tem-se que a variação na carga máxima suportada entre as amostras da mesma placa foi de 6,05% a 21,1% com média entre as placas variando de 16,68%. O processo de injeção definitivo para o processamento de placas compósitas portanto foi o Subsistema de Injeção Tipo II, com Molde RTM MP3 e injeção de disposição inferior.

Development of Training Composites Processing by Resin Transfer Molding

ABSTRACT

The objective of this work was the development of processing the composites by Resin Transfer Molding (RTM) with a low cost, through the development of injection subsystem, that can be attached to a universal mechanical testing machine, as well as its constituent elements, molds, resin and designed profiles, as well as the tests adopted for proper characterization and its subsequent validation. The methodology consists in the development of the RTM process, resin study, microstructural and mechanical characterization and preliminary calculation of permeability. Thixotropic saturated polyester resin, pre-accelerated catalyst and fiberglass as specified blanket for lamination, were use as building materials for this project, all produced by MEKOL[®]. Based on the experiments we can be concluded that the project is possible through the development and fabrication of two devices RTM, with low cost and own design, to manufacture composite plates with fully filled by resin, good surface and uniform dimensions, composed of 6 layers of fiberglass (basis weight of 450g/m²) and a resin with a viscosity of 200 to 400cps. An analysis of the total times of the activities became essential to the production rate, where a reduction of the 26.4 % was observed. The charge injection vary reached 91.17 % among processes that have adopted the different subsystems. As for the bending tests, it has been the variation in the maximum load between samples from the same plate was 6.05 % to 21.1% with an average ranging from between plates 16.68%. The process of final injection for processing composite plates was therefore adopted the SSI Type II, with injection mold RTM MP3 with below disposition.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	VII
CURRICULUM VITAE.....	VIII
AGRADECIMENTOS.....	VIII
<i>RESUMO</i>	X
ABSTRACT.....	XI
SUMÁRIO.....	XII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XVI
ÍNDICE DE TABELAS.....	XXII
ÍNDICE DE ANEXOS.....	XXIII
SÍMBOLOS E ABREVIACÕES.....	XXIV
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO.....	1
1.2. OBJETIVO GERAL.....	3
1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
1.4. JUSTIFICATIVAS.....	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1. MATERIAIS COMPÓSITOS.....	6
2.1.1. CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS COMPÓSITOS POLIMÉRICOS.....	8
2.2. PROCESSAMENTO DE MATERIAIS COMPÓSITOS.....	10
2.2.1. LAMINAÇÃO MANUAL (HAND LAY-UP).....	13
2.2.2. LAMINAÇÃO POR PROJEÇÃO (SPRAY-UP).....	14
2.2.3. ENROLAMENTO FILAMENTAR (FILAMENT WINDING).....	14
2.2.4. PROCESSO EM AUTOCLAVE.....	15
2.2.5. MODELAGEM POR TRANSFERÊNCIA DE RESINA (RTM).....	16

2.3.	SISTEMAS DE INJEÇÃO (SI) PARA RTM	18
2.4.	MATRIZES POLIMÉRICAS	22
2.4.1.	CURA DE MATRIZES POLIMÉRICAS	24
2.5.	FIBRAS.....	25
2.6.	INTERFACE FIBRA/MATRIZ	27
2.7.	MOLDE	27
2.8.	AGENTE DESMOLDANTE	29
2.9.	CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA	30
2.9.1.	ENSAIO DE FLEXÃO	30
2.10.	CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL.....	31
2.11.	CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA.....	31
2.11.1.	CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE VARREDURA	32
2.11.2.	ANÁLISE DINÂMICO MECÂNICA.....	33
2.12.	PERMEABILIDADE.....	34
2.12.1.	MODELO FÍSICO-MATEMÁTICO DA PERMEABILIDADE.....	34
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	37
3.1.	MATERIAIS.....	37
3.1.1.	MATRIZ POLIMÉRICA	37
3.1.2.	CATALISADOR.....	38
3.1.3.	FIBRA	38
3.1.4.	AGENTE DESMOLDANTE	39
3.2.	MÉTODOS	39
3.2.1.	PROJETO DO EQUIPAMENTO RTM	39
3.2.2.	ESTUDO DA RESINA A SER UTILIZADA NO PROCESSAMENTO POR RTM	41
3.2.3.	PROCESSAMENTO DAS PLACAS COMPÓSITAS POR RTM	42
3.2.4.	DIMENSIONAMENTO DAS PLACAS.....	45
3.2.5.	CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA	46

3.2.6. CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E SUPERFICIAL.....	49
3.2.7. CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA.....	49
DSC.....	50
DMA	50
3.2.8. CÁLCULO PRELIMINAR DA PERMEABILIDADE.....	51
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	55
4.1. DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTOS E DISPOSITIVOS PARA O PROCESSAMENTO POR RTM.....	55
4.1.1. DESENVOLVIMENTO DO SSI TIPO I	55
4.1.2. DESENVOLVIMENTO DO SSI TIPO II.....	65
4.2. DESENVOLVIMENTO DOS MOLDES	71
4.2.1. MOLDE PLACA RTM TIPO I (MP1).....	72
4.2.2. MOLDE PLACA RTM TIPO II (MP2)	73
4.2.3. MOLDE PLACA RTM TIPO III (MP3).....	75
FALHA NA MOLDURA DO MOLDE.....	77
4.2.4. MOLDE PLACA RTM TIPO IV (MP4).....	78
4.2.5. MOLDE PERFIL ESTRUTURAL (MPE).....	79
DESENVOLVIMENTO DO SUPORTE PARA O MOLDE.....	83
4.3. ESTUDOS PARA DEFINIÇÃO DO SISTEMA DE RESINA A SER USADO NO PROCESSAMENTO POR RTM.....	83
TESTE PARA MEDIÇÃO DE VARIAÇÃO DE TEMPERATURA NO MOLDE	86
4.4. TEMPO TOTAL DE PROCESSAMENTO DOS COMPÓSITOS FABRICADOS.....	86
4.5. CARACTERIZAÇÃO DAS PLACAS COMPÓSITAS PROCESSADAS PELOS EQUIPAMENTOS DE INJEÇÃO DE RTM DESENVOLVIDOS	92
VARIAÇÃO DIMENSIONAL DAS PLACAS COMPÓSITAS PROCESSADAS	93
PESO E DENSIDADE.....	94
CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E SUPERFICIAL	95
PROCESSO DE INJEÇÃO.....	98

CÁLCULO PRELIMINAR DA PERMEABILIDADE	105
ENSAIO DE FLEXÃO	107
4.6. CARACTERIZAÇÃO DOS PERFIS ESTRUTURAIS	113
PERFIL ESTRUTURAL I	113
PERFIL ESTRUTURAL II	114
5. CONCLUSÃO	118
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	120
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121
ANEXO A	126
ANEXO B	127
ANEXO C	128
ANEXO D	129
ANEXO E	130
ANEXO F	131
ANEXO G	140
ANEXO H	141
ANEXO I	142
ANEXO J	143

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Composição dos materiais utilizados no corpo do Airbus 787. Boeing (http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_4_06/article_04_1.html)	2
Figura 2 – Arcos Confeccionados de materiais compósitos em 800 AC. Ventura (2009).	6
Figura 3 – Distribuição do percentual do peso dos materiais utilizados na fabricação das aeronaves (a) Boing 777, (b) Airbus A380 e (c) Embraer 170. Rezende et al (2002).....	7
Figura 4 – Vista explodida dos componentes fabricados em compósitos poliméricos presentes na aeronave Embraer 170, Rezende et al (2002).....	8
Figura 5 - Classificação dos materiais compósitos poliméricos.....	9
Figura 6 - Fatores de dependência das propriedades dos compósitos. Ventura (2009). ...	9
Figura 7 - Classificação segundo a fase constituinte descontínua. Nascimento et al (2009).....	10
Figura 8 – Gráfico comparativo das necessidades de três setores industriais. Amorim (2007).....	11
Figura 9 - Métodos de processamento de materiais compósitos.	12
Figura 10 - Distribuição do mercado brasileiro segundo o tipo de processo de fabricação dos materiais compósitos. Asplar. (http://www.plastico.com.br/revista/pm316/prfv1.htm)	12
Figura 11 - Esquema representativo do processo de laminação manual. CPIC Fiberglass. (http://br.cpicfiber.com/processos.asp?codigo=1&cat=Processos)	13
Figura 12 - Esquema representativo do processo de laminação por projeção. CPIC Fiberglass. (http://br.cpicfiber.com/processos.asp?codigo=2&cat=Processos).	14

Figura 13 - Esquema representativo do processo de enrolamento filamental. CPIC Fiberglass. (http://br.cpicfiber.com/processos.asp?codigo=7&cat=Processos).	15
Figura 14 - Esquema representativo do processo em autoclave. Nascimento (2009). ...	15
Figura 15 – Esquema representativo do processo RTM. Nascimento (2009).....	16
Figura 16 - Modelos de Sistema de Injeção da GLASCRAFT.	18
Figura 17 - Resina Poliéster Ortoftálica Insaturada. Ornaghi (2009).	22
Figura 18 - Classificação das fibras de vidro quanto a sua forma de apresentação.....	26
Figura 19 - Representação do gráfico tensão x deformação dos materiais compósitos em relação as suas fases. Nascimento (2009).	27
Figura 20 - Modelo de Molde de Injeção. GLASCRAFT.....	28
Figura 21 – Simulação do fluxo de acordo com os pontos de injeção. Amorim (2007).	29
Figura 22 - Representação de ensaio de flexão em 3 pontos. ASTM D7264/D7264M..	30
Figura 23 - Técnicas de análises térmicas.	32
Figura 24 - Curva característica do DSC.	33
Figura 25 - Definição de T_g de acordo com a norma ASTM E1640-09.....	33
Figura 26 – Componentes do tensor K apresentados de uma vista superior no plano X,Y. Amorim (2007).	36
Figura 27 - Resina Poliéster Insaturada MEKOL®.	37
Figura 28 - Manta de fibra de vidro	39
Figura 29 - Fluxograma do projeto.	40
Figura 30 – Sistema de Aquisição Agilent, Modelo 34970A.....	42
Figura 31 – Posição das amostras retiradas das placas para realização do ensaio de flexão.....	46
Figura 32 – Modelo de disposição do sistema. ASTM D7264/D7264M.....	47

Figura 33 – Ensaio de flexão em 3 pontos.	48
Figura 34 - Montagem utilizada para a realização do ensaio.	48
Figura 35 - Microscópio Olympus BX51M.	49
Figura 36 – Equipamento DSC. TA Instruments.....	50
Figura 37 - Equipamento DMA. TA Instruments.....	50
Figura 38 – Amostra para ensaio DMA.	51
Figura 39 - Esquema da metodologia utilizada para cálculo da permeabilidade radial no plano. Amorim (2007).....	52
Figura 40 - Representação das frentes de avanço. Amorim (2007).....	52
Figura 41 – Formato circular das frentes de avanço apresentado para processos dotados de mantas de fibra de vidro.	53
Figura 42 - Estrutura da divisão do Sistema de Injeção.....	56
Figura 43 - Sistema de testes universal INSTRON 5582.....	57
Figura 44 – Composição do SSI.	58
Figura 45– Concepção proposta para o sistema pistão.	58
Figura 46 - Concepção proposta para o reservatório de armazenamento.	59
Figura 47 - Conjunto Conexão-Mangueira.	61
Figura 48 - Conexões utilizadas.	61
Figura 49 - Equipamento para processamento por RTM.	63
Figura 50- Componentes do sistema de injeção.	64
Figura 51 - Placa compósita injetada pelo SSI Tipo I.	65
Figura 52 – Concepção do novo SSI.....	66
Figura 53 - Detalhes da placa base (a), reservatório de resina (b) e luva (c) do SSI Tipo II.....	68

Figura 54 - Detalhes do pistão de injeção (a, c), da conexão (b) e da chaveta (d) do SSI Tipo II.....	69
Figura 55 - Esboço do SSI Tipo II montado.	69
Figura 56 - Novo Equipamento para processamento por RTM.....	70
Figura 57 – Perfil estrutural compósito injetado pelo SSI Tipo II.	71
Figura 58 - Primeira concepção proposta para o molde de RTM.....	72
Figura 59 - Primeiro molde fabricado.....	73
Figura 60 - Segunda concepção proposta para o molde de RTM.....	73
Figura 61 - Detalhe da solução proposta.....	74
Figura 62 – MP2 fabricado (a, b) e montado (c).	75
Figura 63 - Placa Inferior de MP3 com 4 saídas de ar.	76
Figura 64 - Modificação Realizada na Base do Molde.	76
Figura 65 - Apresentação da Diferença entre as Placas Inferiores dos Moldes MP2 e MP3.....	77
Figura 66 - Moldura de acrílico danificada.	77
Figura 67 - Moldura do molde de Nitanyl®.....	78
Figura 68 – Vistas superior (a) e Lateral (b) do Molde RTM MP4.....	79
Figura 69 – Modelo de associação do perfil com a placa.	79
Figura 70 - Dimensões do Perfil Estrutural para teste.	80
Figura 71 - (a) Selamentos laterais; (b) Selamentos frontal e inferior; (c) Elementos da geometria em L; (d) Molde de teste em vista explodida.	80
Figura 72 - Ponto de Injeção do MPE1.....	81
Figura 73 - Formatos em L do molde produzidos com a tecnologia de prototipagem rápida.....	81

Figura 74 - (a) Molde montado; (b) Molde com bico injetor.	82
Figura 75 - (a) Molde definitivo; (b) Vista explodida com os pontos de entrada e/ou saída.	82
Figura 76 - Suporte para Molde.....	83
Figura 77 – Ensaio DMA para a primeira amostra, sem influência do fluido refrigerante.	85
Figura 78 – Ensaio DMA para a segunda amostra, com influência do fluido refrigerante.	85
Figura 79 – Ensaio DSC realizado para amostra da resina.	86
Figura 80 – Placa 1 pré retificada.	93
Figura 81 - Placa 1 pós retificada.	93
Figura 82- Fotografias microscópica ópticas digitais da placa 1.....	96
Figura 83 - Fotografias microscópica ópticas digitais da placa 2.....	96
Figura 84 - Fotografias microscópica ópticas digitais das placas 3 (a) e 4 (b).	97
Figura 85 - Fotografias microscópica ópticas digitais da placa 5.....	97
Figura 86 - Apresentação da diferença entre o acabamento superficial das placas 1 e 2.	98
Figura 87 - Escoamento da resina no interior no molde.	99
Figura 88 - Gráfico da força injeção no pistão ao longo do seu deslocamento (Placa 1).	100
Figura 89 - Gráfico da força injeção no pistão ao longo do seu deslocamento (Placa 2).	101
Figura 90 - Gráfico da força injeção no pistão ao longo do seu deslocamento (Placa 3).	102

Figura 91 - Gráfico da força injeção no pistão ao longo do seu deslocamento (Placa 4).	103
Figura 92 - Gráfico da força injeção no pistão ao longo do seu deslocamento (Placa 5).	104
Figura 93 - Gráfico da força injeção no pistão ao longo do seu deslocamento (Placa 6).	105
Figura 94 – Determinação da área da secção do molde RTM preenchido a partir do seu diâmetro.....	106
Figura 95 - Esquema do avanço do deslocamento do apoio central.....	108
Figura 96 – Ensaio de flexão para as três amostras da Placa 1.	108
Figura 97 - Ensaio de flexão para as três amostras da Placa 2.	109
Figura 98 - Ensaio de flexão para as três amostras da Placa 3.	110
Figura 99 - Ensaio de flexão para as três amostras da Placa 4.	111
Figura 100 - Ensaio de flexão para as três amostras da Placa 5.	112
Figura 101 - Ensaio de flexão para as três amostras da Placa 6.	113
Figura 102 – Perfil Estrutural I (a) e sua disposição como elemento estrutural (b).	114
Figura 103 – Perfil Estrutural II.....	115
Figura 104 - Gráfico da força injeção no pistão ao longo do seu deslocamento (Perfil Estrutural II).....	115
Figura 105 - Ensaio de flexão para as três amostras do Perfil Estrutural II.	117

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Equipamentos desenvolvidos para processamento RTM.	19
Tabela 2 - Diferentes tipos de resinas poliésteres. Ornaghi 2009.....	23
Tabela 3 - Propriedades das resinas poliéster, viniléster e epóxi. Marinucci (2011).	24
Tabela 4 – Materiais de Moldes para RTM.....	28
Tabela 5 – Cronograma das atividades durante o processo RTM.	43
Tabela 6 – Cronograma de atividades pré e pós processamento RTM.....	44
Tabela 7 – Alocação dos materiais adotados para cada elemento do SSI Tipo II.....	67
Tabela 8 – Análise da resina a partir da variação do % de catalisador.	84
Tabela 9 - Atividades de molde fechado Placa 1.....	87
Tabela 10 - Atividades de molde fechado Placa 6.....	88
Tabela 11 - Atividades de molde aberto Placa 1.	90
Tabela 12 - Atividades de molde aberto Placa 6.	91
Tabela 13 – Verificação dimensional das placas compósitas.....	94
Tabela 14 – Peso e densidade das placas compósitas processadas.....	94
Tabela 15 – Variações do processo.....	98
Tabela 16 – Cálculo preliminar da permeabilidade das placas compósitas e seus raios da seção preenchida para o tempo de preenchimento de 30s.....	107

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A	.....	118
ANEXO B	.....	119
ANEXO C	.....	120
ANEXO D	.....	121
ANEXO E	.....	122
ANEXO F	.....	123
ANEXO G	.....	124
ANEXO H	.....	130
ANEXO I	.....	131
ANEXO J	.....	132

SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

ABMACO - Associação Brasileira de Materiais Compósitos

ASPLAR - Associação dos Materiais Plásticos Compósitos

ASTM - American Society for Testing and Materials

b - Largura do corpo de prova [mm]

CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento do Pessoal de Nível Superior

DMA - Análise Dinâmico-Mecânica

DSC - Calorimetria Exploratória Diferencial

E - Módulo de Elasticidade

Ge - Tempo de gel [s]

h - Espessura do corpo de prova [mm]

L - Span [mm]

LaMMEA - Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas

LMP - Processamento por Moldagem de Líquido

K - Permeabilidade [Darcy]

MP - Molde Placa

MPE - Molde Perfil Estrutural

P - Carga Aplicada [N]

RTM - Modelagem por Transferência de Resina

SSI - Subsistema de Injeção

T_c - Temperatura de Cristalização [°C]

T_{inj} - Temperatura de Injeção [°C]

T_g - Temperatura de Transformação Vítrea [°C]

T_m - Temperatura de Fusão [°C]

T_{reac} - Temperatura de Reação [°C]

VARTM - Modelagem por Transferência de Resina Assistida a Vácuo

τ - Tensão de flexão máxima [Pa]

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo, como se faz necessário, além da contextualização do trabalho no tema ao qual se insere, estão presentes as motivações e objetivos que o fundamentam.

1.1. Contextualização

O surgimento de novos materiais na indústria mundial sempre esteve relacionada a capacidade destes de possuir características melhores ou mais adequadas de acordo com suas aplicações, assim, o controle de suas propriedades tornaram-se vitais para a constante evolução do conhecimento da humanidade, conforme apresentado ao longo da sua história, e ao qual, se deve o desenvolvimento dos Materiais Compósitos.

Em 1950 foi dada a largada na produção comercial destes materiais para as indústrias aeroespaciais e marítimas, as quais são duas das mais importantes para o almejado progresso, onde, a partir de um posterior desenvolvimento do processo de fabricação, aliado a uma redução de custos, sua aplicação se estendeu para as mais diversas áreas, como para a indústria automobilística, a esportiva, a elétrica/eletrônica, de recreação e lazer e até mesmo a nuclear, além de serem também comumente empregadas em projetos de engenharia civil e em sistemas de blindagem balística, Amorim (2007).

A adoção dos materiais compósitos, que de forma geral são de matrizes poliméricas dotados de reforços fibrosos, se mostra em constante evolução por apresentarem algumas características particulares em relação aos metais, onde Marinucci (2011) explica que estes possuem uma relação resistência/peso excepcional, com considerável resistência a ataques químicos e não se apresentam como materiais magnéticos e condutores, além de permitirem eliminar pontos de solda e rebites em suas estruturas por consolidarem vários elementos em uma único componente quando desenvolvidos. Um exemplo desse avanço na utilização destes materiais é o Boeing 787 (Figura 1), que possui um crescimento da composição de matérias compósitos em seu corpo, em relação ao seu antecessor Boeing 777, ao qual utilizava 12% de material compósito e 50% de alumínio.

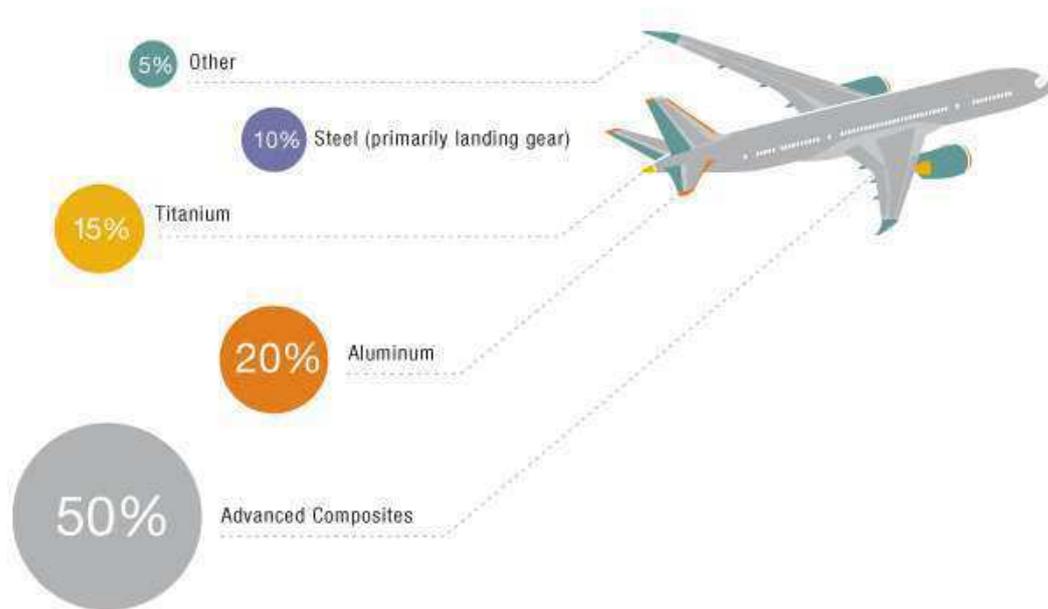


Figura 1 - Composição dos materiais utilizados no corpo do Boeing 787.

(http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_4_06/article_04_1.html)

Os materiais compósitos apresentam de forma geral uma máxima temperatura de serviço (abaixo de 200°C), inferior a maioria dos metais tradicionais, o que é visto como uma das suas maiores desvantagens.

Em contexto atual, esta crescente utilização, associado a regulamentação de leis ambientais e ao aprimoramento da química orgânica, tornam indispensáveis o constante desenvolvimento das técnicas de processamento menos nocivas ao meio ambiente com maior qualidade e produtividade, de forma que este não ocorra desassociado ao quesito custo, visto que a modernidade dos tempos e a variedade nas frentes de estudo e produção tornam estas as principais variáveis para um processo bem sucedido, Pagano (2009).

Técnicas tradicionais como a laminação manual não satisfazem as necessidades atuais de produção, assim, a Infusão de Resina Líquida surge como processo inovador, ao qual a Técnica de Moldagem por Transferência de Resina (RTM, do inglês “Resin Transfer Molding”), que além de aumentar a produtividade, também viabiliza a redução de custos, se encontra em constante desenvolvimento. O processamento por RTM, se

baseia simplesmente na infusão de uma resina líquida em um molde rígido, alimentado de um reforço, denominado de pré-forma, até que nesta ocorra o completo preenchimento, por fim, constituindo o material compósito.

Para este trabalho, que se objetiva no aprimoramento de um processo de baixo custo, foram produzidos placas e perfis compósitos constituídos de resina poliéster insaturada reforçadas por mantas de fibra de vidro, na qual suas concepções sofreram variações nas saídas de ar do molde, no elemento desmoldante no sistema de injeção e no processo de fabricação, contudo, conservando as características essenciais da metodologia para possibilitar uma analogia com processo pioneiro existente no LaMMEA (Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas), o que tornou possível vislumbrar a capacitação na produção destes elementos em conjunto com o aperfeiçoamento e domínio da técnica, perante concepção de projeto inovador, funcional e com excelente custo benefício.

A adoção destes constituintes se deu baseado no quesito popularidade, visto que, são os mais comumente adotados pelo desempenho que apresentam quando considerado o custo.

1.2. Objetivo Geral

Este projeto de dissertação é fundamentado no desenvolvimento do processamento de compósitos por modelagem de transferência de resina.

1.3. Objetivos Específicos

No projeto, como forma de alcançar o objetivo geral, foram propostos seis linhas de ação, porém, antes se fez necessária uma primeira etapa de trabalho, a qual consistiu em realizar um levantamento das então atuais condições e metodologia existentes para a produção de placas compósitas, para que em seguida se fosse possível trabalhar nas linhas de ação programadas, estas descrevidas a seguir:

- Desenvolvimento de um adequado equipamento de injeção de resina de baixo custo;
- Desenvolvimento dos moldes;
- Estudo da resina, adequada de acordo com o processo;
- Desenvolvimento, detalhamento e aperfeiçoamento da metodologia de fabricação das placas compósitas;
- Análise do escoamento da resina no interior do molde, através do estudo preliminar da permeabilidade no plano das pré-formas, voltado para o adequado entendimento do processo de infusão na pré-forma;
- Caracterização mecânica e estrutural, para avaliação, das placas produzidas durante o projeto.

1.4. Justificativas

Apesar dos materiais compósitos terem sua produção comercial iniciada a mais de 60 anos, ao passar destes, com o adequado reconhecimento do seu potencial e ampliação de sua aplicação, foram e continuam sendo regularmente desenvolvidas novas metodologias de processamento, no almejo de proporcionar cada vez mais uma produção que alie produtividade, com qualidade e redução de custos, fatores estes, que qualificam esta como uma área totalmente aberta para aplicação de estudos em busca da citada necessidade da evolução do conhecimento constante apresentado pela humanidade.

Pôr a capacitação de processamento se apresentar como impulsionador do desenvolvimento na produção destes materiais, justifica-se assim a existência de diversas frentes de estudos voltados a sua evolução, tornando, tão importante quanto necessário, que o quesito custo esteja sempre no topo da pauta do projeto, visto, que este se apresenta como fator diferencial e como forma de abranger sua justificativa.

No sentido de desenvolver a produção de materiais compósitos via RTM no LaMMEA e de colaborar para a literatura, este trabalho visa analisar detalhadamente todas as etapas do processo, como também através das oportunidades de inovação, aperfeiçoá-lo e qualificá-lo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Materiais Compósitos

Conforme Ventura (2009), o fato de os materiais compósitos apresentarem seu grande impulso de desenvolvimento na década de 50, nos faria pensar que os mesmos são recentes, contudo a partir de relatos históricos, pode-se afirmar que a sua utilização se iniciou a pelo menos 2500 AC, através da fabricação de tijolos constituídos de barro e palha no antigo Egito. A utilização de madeira aglomerada para a fabricação de sarcófagos em 1500 AC, assim como assimilação de ossos, tendões, chifres e pele a madeira em 800 AC para confecção de arcos (Figura 2), ratificam a existência desses materiais já na antiguidade.

Fazendo referência aos materiais compósitos recentes, a utilização de concreto reforçado de aço foi desenvolvida a partir de reforços de barras de ferro existentes na alvenaria do século 19, época também equivalente a produção dos primeiros barcos com a presença de fibra de vidro e a utilização de placas reforçadas na indústria aeronáutica. Quando ao final dos anos 70, já era perceptível a utilização destes materiais para as indústrias automotiva e biomédica, expandindo-se ainda para as áreas de estruturas aeroespaciais, equipamentos esportivos e aos mais diversificados componentes, Vilar (2009). Com relação aos reforços poliméricos, no final do século XX foi introduzida a utilização da resina fenólica em conjunto a pedaços de asbestos em forma fibrosa e de origem mineral, assim se auto classificando como antecessor das fibras atuais.

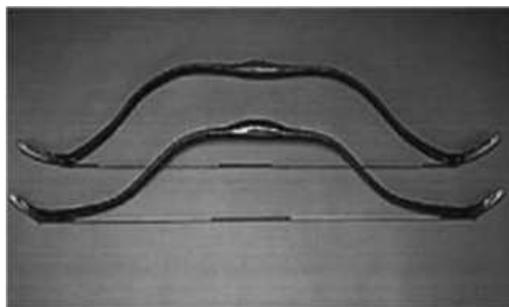


Figura 2 – Arcos Confeccionados de materiais compósitos em 800 AC. Ventura (2009).

Segundo Marinucci (2011), o significado do substantivo compósito, como sendo todo aquele material que possui duas ou mais fases distintas, pode levar a conclusão de que todos materiais formados por dois ou mais componentes, constituem compósitos, onde de forma mais detalhada, estes são caracterizados por possibilitarem que materiais componentes, distintos nitidamente em suas propriedades físicas e químicas, após processados constituam um novo material que apresente propriedades específicas consideravelmente superiores ao dos seus constituintes isolados.

Entretanto, como desvantagem, são facilmente susceptíveis a danos, estes aos quais podem ocorrer desde o processo de fabricação, manuseio ou transporte, que a partir de sua exposição, estes ficam sujeitos aos efeitos ambientais como temperatura e umidade, aumentando dessa maneira a degradação de suas propriedades físicas, Rezende (2002).

Para sua produção, os principais materiais adotados se dividem de acordo com o tipo de matriz, sendo assim, os de matrizes metálicas, utilizam principalmente o alumínio, o níquel ou o titânio, os de matrizes cerâmicas, a alumina, o carbetto e o nitreto de silício e os de matrizes poliméricas, onde se subdividem as resinas termoplásticas e as resinas termorrígidas, que além de serem comumente denominadas de termofixas, também são as mais utilizadas.

Um bom exemplo do emprego e da importância dos materiais compósitos na atualidade, pode ser verificada na Figura 3, onde a distribuição do percentual do peso dos materiais utilizados na fabricação de três distintos tipos de aeronaves é apresentado.

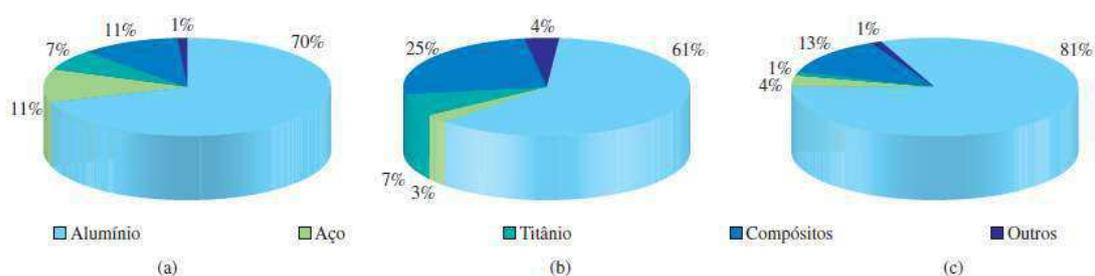


Figura 3 – Distribuição do percentual do peso dos materiais utilizados na fabricação das aeronaves (a) Boeing 777, (b) Airbus A380 e (c) Embraer 170. Rezende et al (2002).

Na Figura 4, onde está apresentado de forma explodida os componentes da aeronave Embraer 170, torna-se mais evidente a importância desses componentes na indústria atual, possibilitando verificar que apesar de uma grande quantidade de itens constituídos desse tipo de material, ao final, seu percentual de peso é bem inferior ao aço.

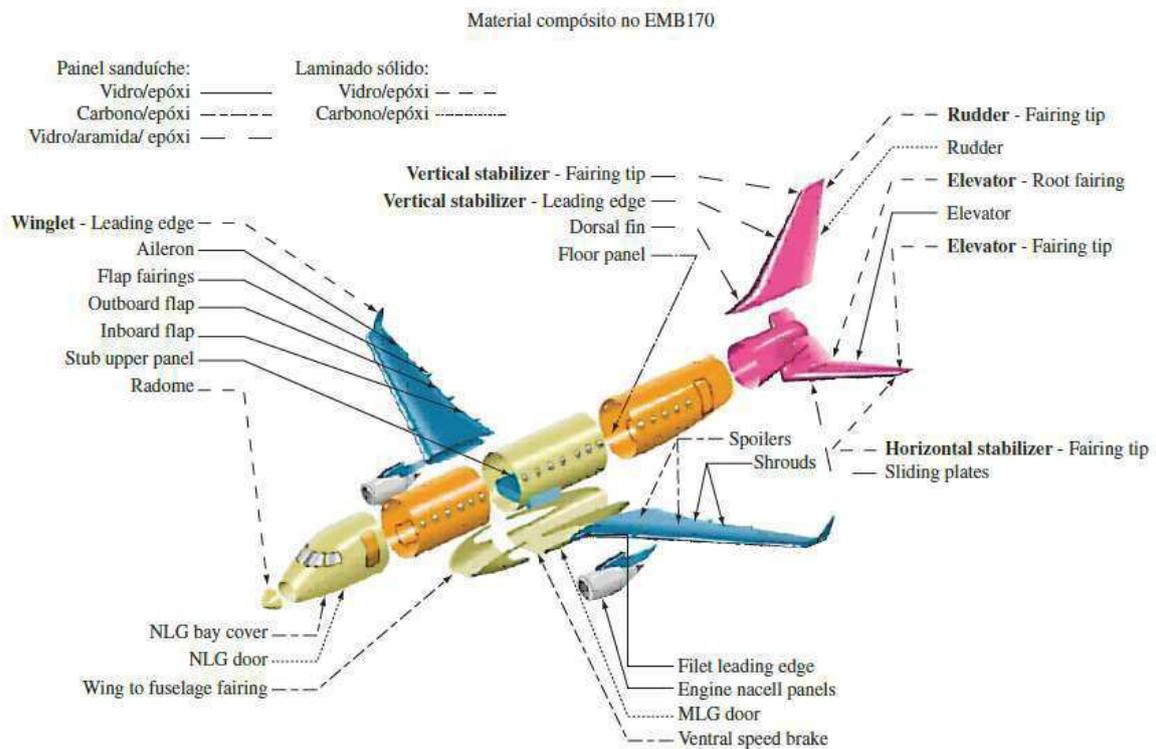


Figura 4 – Vista explodida dos componentes fabricados em compósitos poliméricos presentes na aeronave Embraer 170, Rezende et al (2002).

2.1.1. Classificação dos Materiais Compósitos Poliméricos

De forma genérica os materiais compósitos poliméricos são classificados conforme a Figura 5, onde é possível se verificar algumas das possibilidades de construção do material.

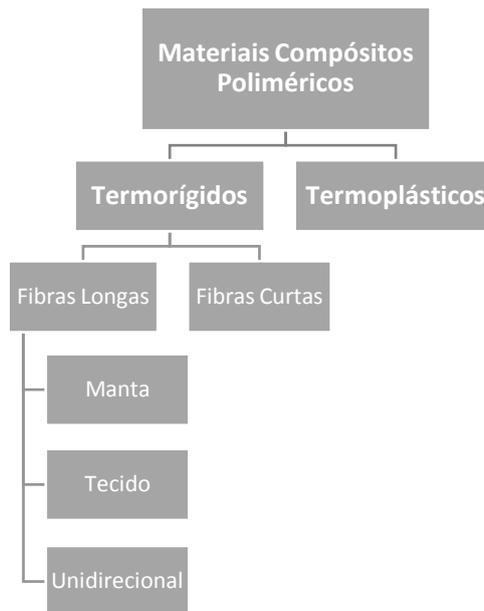


Figura 5 - Classificação dos materiais compósitos poliméricos.

Os materiais componentes apresentados pela fase constituinte contínua e pela fase constituinte descontínua, são respectivamente denominadas de matrizes e reforços e estão diretamente associados as propriedades do produto, visto que, as matrizes tem função de transmitir os esforços entre as fibras e protegê-las do meio, enquanto que aos reforços estão atribuídos a função de melhorar o desempenho mecânico, assim, características específicas como o a propriedade da fibra e da matriz, concentração ou fração volumétrica, geometria e disposição das camadas e orientação, são quem determinam as propriedades finais do compósito e possibilitam a produção de materiais de peso reduzido, com boa resistência mecânica, dentre outras características. Alguns destes fatores de dependência estão ilustrados na Figura 6, quanto referência a características do reforço.

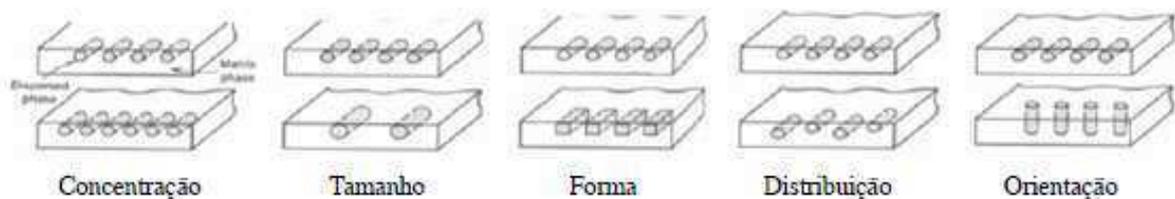


Figura 6 - Fatores de dependência das propriedades dos compósitos. Ventura (2009).

A Figura 7 apresenta a classificação de forma geral dos compósitos segundo a disposição da fase constituinte descontínua, sendo da esquerda para a direita, a fibra contínua, a dispersa (aleatória) ou de fibra unidirecionais tecidas ortogonalmente.



Figura 7 - Classificação segundo a fase constituinte descontínua. Nascimento et al (2009).

2.2. Processamento de Materiais Compósitos

Como já contextualizado, o crescimento na produção dos materiais compósitos não está só diretamente relacionada as propriedades que estes são capazes de apresentar, como também a técnica de processamento adotada, uma vez que o exigente mercado viabiliza cada vez mais o avanço na eficiência e eficácia das técnicas já existentes, assim, é de fundamental importância para o projeto de um elemento compósito, que em seu planejamento, além de se realizar a escolha dos adequados componentes, também tenha-se em consideração o tipo de processo de fabricação, aos quais existem nas mais diversificadas formas possíveis, com os mais distintos resultados, influenciando diretamente na qualidade do produto, no taxa de produção e no seu custo.

Visto o enorme potencial apresentado pelos materiais compósitos, devido a possibilidade de associação de dois dos mais importantes fatores na produção de matérias, boa performance e baixo custo, resta que estes agora sejam desenvolvidos de forma a explorar ao melhor estas características. Na Figura 8, vetores como taxa de produção, custo e performance estão apresentados de forma a comparar as necessidades de três dos mais importantes setores industriais.

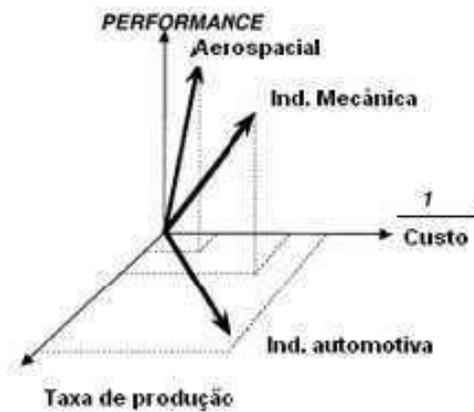


Figura 8 – Gráfico comparativo das necessidades de três setores industriais. Amorim (2007).

Segundo Amorim (2007), a antes conhecida geração dos projetos para mínimo peso (*design for minimal Weight*), mudaram de foco com o despertar dos diversos setores industriais nos anos 80 e 90, passando para geração de projetos para mínimo custo (*design for cost*), para os quais, processos mais tradicionais como a laminação manual (*hand lay-up*), laminação por projeção (*spray-up*) e o enrolamento filamentar (*filament winding*) podem ser consideradas técnicas com baixa produtividade ou específicas para geometrias relativamente simples, enquanto que a técnica de processamento em autoclave, que adota de elementos pré-impregnados conhecidos como pré-pregs, é adotada para a produção de compósitos de alta performance, onde à necessidade de um gás inerte durante seu processo aliada a um necessário armazenamento dos pré-pregs sob refrigeração, que assim elevam em demasia o custo da produção.

A possibilidade de produzir peças compósitas através de uma técnica que adequasse boa qualidade a um baixo custo, fez com que o método RTM, obtivesse grande interesse e seu desenvolvimento ocorresse nas mais variadas frentes de produção, sofrendo variações e gerando uma nova gama de métodos, aos quais o RTM *Light* e *Vacuum assisted RTM* (VARTM), servem como exemplo. A classificação dos métodos de processamento de materiais compósitos se dá de acordo com a Figura 9.

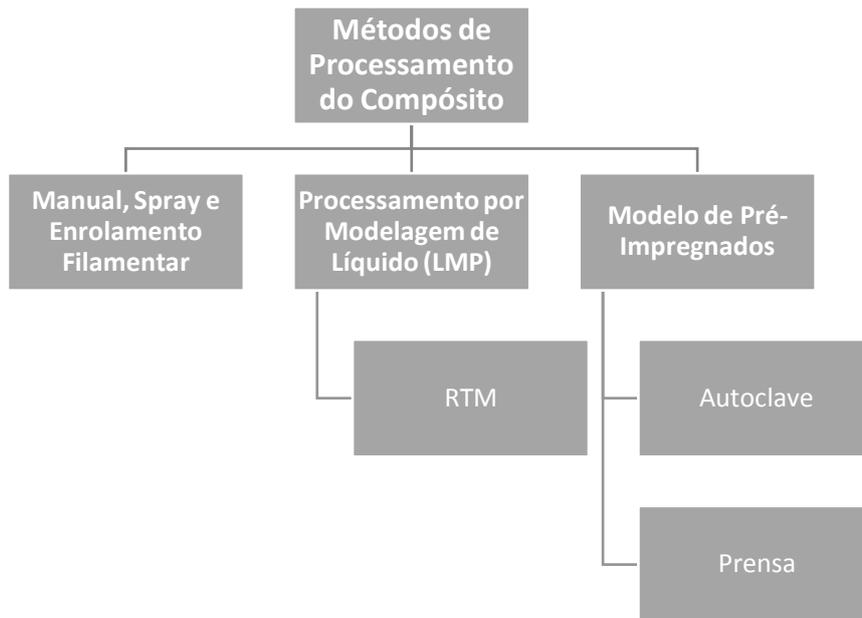


Figura 9 - Métodos de processamento de materiais compósitos.

Segundo a Associação dos Materiais Plásticos Compósitos (Asplar), dos mais de 1.600 fabricantes em atividade no Brasil, a maior parte empregam processos artesanais (74%), como a laminação por projeção (56%) e a laminação manual (18%). Apenas 6% usam o processo RTM, conforme apresentado na Figura 10. Porém, conforme dados apresentados pela Associação Brasileira de Materiais Compósitos (ABMACO), em 2010, no que se refere ao percentual de produtos que utilizam cada tipo de processo, os valores são de 54,8% para as tecnologias manuais, seguidas por RTM (16,1%), Enrolamento Filamentar (9,8%), Laminação Contínua (6,2%), e outros (13,0%).

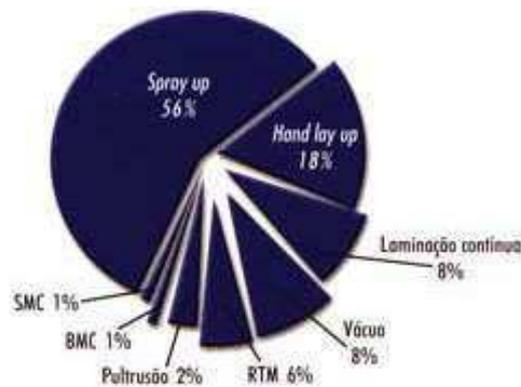


Figura 10 - Distribuição do mercado brasileiro segundo o tipo de processo de fabricação dos materiais compósitos. Asplar. (<http://www.plastico.com.br/revista/pm316/prfv1.htm>)

Uma breve abordagem sobre alguns desses diferentes tipos de processos, com apresentação e esquematização simplificadas podem ser observadas na sequência do trabalho.

2.2.1. Laminação Manual (Hand Lay-Up)

O processo de laminação manual, conhecido também por laminação por contato, consiste na utilização de um molde no qual é sobreposto o reforço devidamente impregnado pela matriz polimérica, onde roletes são utilizados para que ocorra a consolidação do laminado através da retirada do excesso de ar, assim por se tratar de um processo de baixo investimento por não necessitar de equipamentos além de roletes, espátulas e pincéis basicamente, torna-se simples, proporciona flexibilidade ao projeto e não apresenta restrição quanto ao tamanho da peça.

Conforme Marinucci (2011), a facilidade apresentada pelo o processo o torna um negócio atraente, podendo assim gerar falsas expectativas, visto que a ausência do conhecimento técnico ou da habilidade do laminador, afeta a imagem dos compósitos no mercado consumidor, pois contribui para a errada opinião de material “fraco” ou inadequado às necessidades da engenharia.

Na Figura 11, é possível observar o esquema representativo do processo de laminação manual.

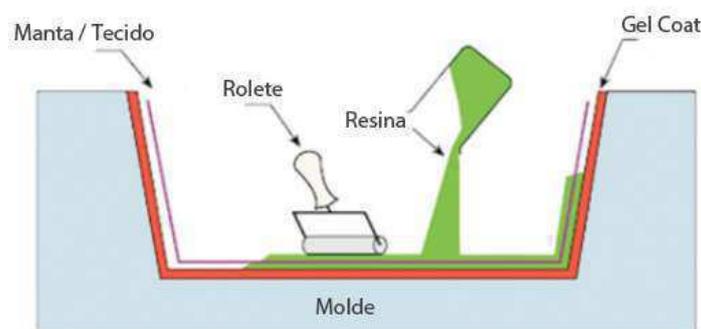


Figura 11 - Esquema representativo do processo de laminação manual. CPIC Fiberglass.

(<http://br.cpicfiber.com/processos.asp?codigo=1&cat=Processos>)

2.2.2. Laminação por Projeção (Spray-Up)

A Laminação por projeção surgiu como evolução do processo de laminação manual, por possibilitar uma produção em escala industrial, através da utilização da pistola de *spray-up*, que possibilita o ajuste automático entre a resina pré-acelerada e do indicador de cura (Figura 12), este processo também se caracteriza por apresentar um melhor controle da na fração volumétrica do laminado, um vez a presente possibilidade de ajuste prévio no cabeçote da pistola e no motor do cortador do reforço.

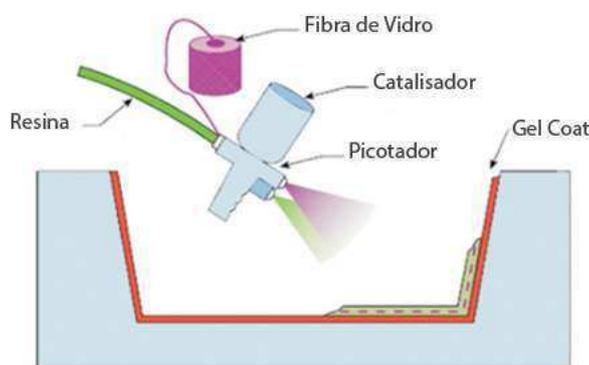


Figura 12 - Esquema representativo do processo de laminação por projeção. CPIC Fiberglass.
(<http://br.cpicfiber.com/processos.asp?codigo=2&cat=Processos>).

2.2.3. Enrolamento Filamentar (Filament Winding)

Este processo tem como principal vantagem o fato de possibilitar uma melhor exploração das propriedades que reforço apresenta em sua direção longitudinal, sendo então recomendado para peças com formato cilíndrico ou esférico, tais quais tubos de pressão, reservatórios e tanques. O processo se caracteriza por possuir filamentos contínuos de fibra de vidro como reforços, que geralmente são dispostos em prateleiras das quais são desenrolados e impregnados com a resina por meio de imersão completa em banheira, para posteriormente serem enrolados em várias camadas sobre um mandril rotativo, para então poderem ser encaminhados para o processo de cura, conforme a esquematização apresentada na Figura 13.

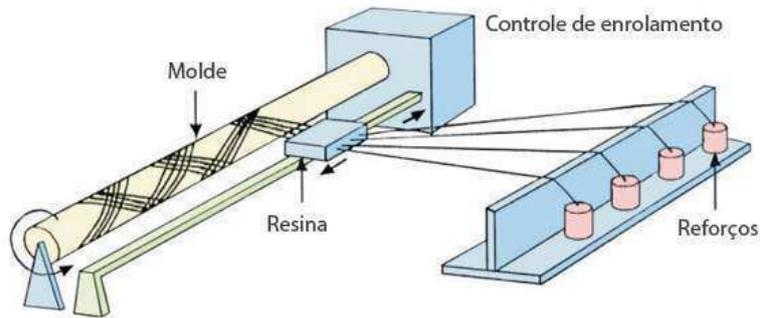


Figura 13 - Esquema representativo do processo de enrolamento filamental. CPIC Fiberglass.
<http://br.cpicfiber.com/processos.asp?codigo=7&cat=Processos>.

As principais variáveis que determinarão a qualidade do compósito produzido neste processo são a tensão de bobinagem, temperatura do banho da matriz, rotação do mandril e deslocamento longitudinal do carro com o banho.

2.2.4. Processo em Autoclave

Conforme esclarecido por Nascimento (2009), este é um processo adotado para elaboração de compósitos de elevado desempenho, no qual utiliza de um reforço pré-impregnado, que ao ser posicionada é submetida ao vácuo com a finalidade de garantir a adesão das lâminas, para posteriormente serem direcionadas ao processo de cura a elevadas temperaturas no autoclave, onde a Figura 14 apresenta um esquema de sua representação.

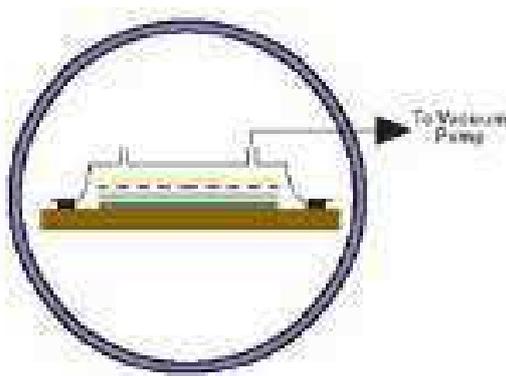


Figura 14 - Esquema representativo do processo em autoclave. Nascimento (2009).

2.2.5. Modelagem por Transferência de Resina (RTM)

Segundo Potter (1999), o processo de modelagem por transferência de resina foi originalmente desenvolvido por volta de 1940, com pouco sucesso, mas entre 1960 e 1970, o processo obteve industrialmente seu devido reconhecimento, já nos últimos anos o seu desenvolvimento proporcionou aos variados setores industriais uma adequada performance aliada a um baixo custo, elevando assim o patamar deste perante as indústrias de matérias compósitas. Outro fator crucial para alavancar o reconhecimento do RTM, vêm de âmbito ambiental, uma vez que adotando essa perspectiva, já se é visível no mercado exterior, que os processos manuais já são empregados em pequena escala e estão condenados devido à alta emissão de estireno. Segundo Carvalho (2008), a vantagem ocorre devido os processos de fabricação por molde fechado proporcionarem emissões bem inferiores aos tradicionais métodos de molde aberto, ressaltando o processo RTM, que apresenta valores de emissões em torno de 30%, quando comparados aos processos tradicionais.

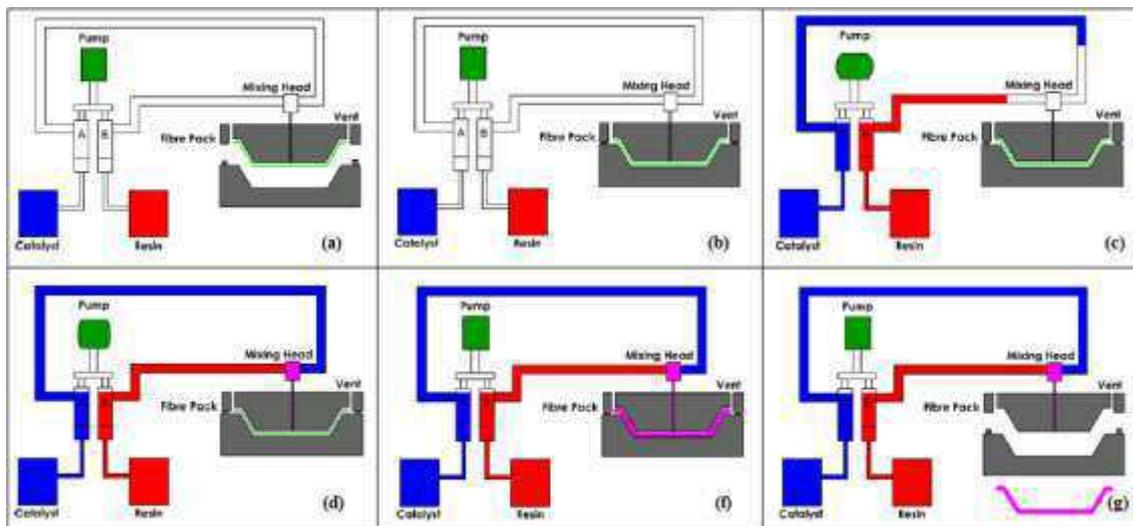


Figura 15 – Esquema representativo do processo RTM. Nascimento (2009).

O processo RTM (Figura 15), se caracteriza por em seu processamento o reforço ser inicialmente posicionado no interior do molde (a), que então é fechado para

consequentemente ser comprimido, e assim obter-se a fração volumétrica desejada de fibras (b), após essa primeira etapa, ocorre a mistura da resina com o catalisador (c) para que então possa ser iniciada a injeção da resina no molde (d), proporcionando as fibras a impregnação, logo, com o completo preenchimento do interior do molde (e), o compósito aguarda o tempo de desmoldagem, para que seja possível a sua retirada do molde (f) e então ocorra a cura do material de forma integral. Se necessário, um tratamento de pós-cura pode ser realizado para obtenção do máximo de suas propriedades.

Para Amorim (2007), fatores como, o processo permitir arquiteturas diversas com moldes de peças de grande tamanho utilizando as mais variadas resinas e com alta fração volumétrica de fibra, possuir baixa pressão de injeção (0 a 1,7 MPa), possibilitar diversos tipos de acabamentos superficiais, apresentar boa tolerância dimensional com baixo custo dos equipamentos para produção (molde e sistema de injeção) comprovam que o processamento por RTM é uma das mais promissoras técnicas de fabricação de materiais compósitos. Ampliando ainda as vantagens apresentadas pelo processo, a viabilidade de o projetista desenvolver materiais para aplicações específicas, ou seja, projetar o material compósito com propriedades previamente estabelecidas para satisfazer condições locais e específicas de carregamento, isso através da separação do processo de moldagem e do tipo de arquitetura dos tecidos da peça, onde o arranjo e a colocação dos tecidos ocorre na direção e ordem planejadas no molde, para assim, se inicie a injeção de resina e o processo de cura.

Ainda conforme Amorim (2007), 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.

Visto assim os diferentes tipos de processamento de materiais compósitos, a sua adequada escolha deve ocorrer a partir da possibilidade de processamento, e não apenas do desempenho desejado, onde, é de fundamental importância o total envolvimento da equipe de desenvolvimento do produto para o sucesso do projeto, analisando simultaneamente a performance e a processabilidade, buscando uma otimização desses parâmetros para proporcionar a produção de produtos com boa relação custo/benefício,

valendo ainda prolongar este pensamento para a escolha dos itens como a resina e reforço, além de enfatizar na produção de adequado sistema de injeção e molde, itens mais detalhados no decorrer do trabalho.

2.3. Sistemas de Injeção (SI) para RTM

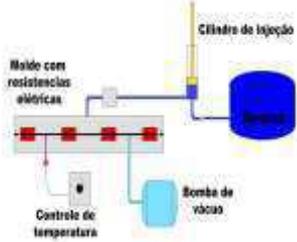
O SI se trata basicamente de um equipamento que realiza o trabalho necessário para que a resina seja injetada no molde, geralmente compostos por um subsistema de injeção, uma mesa suporte para o molde além de um sistema de aquisição de dados. Existem disponíveis no mercado alguns modelos aos quais podem ser adquiridos em contato com o fabricante, conforme exemplificado na Figura 16, onde estão ilustrados alguns dos modelos presentes no catálogo da empresa GLASCRAFT. Especificações sobre os equipamentos presente na figura citada podem ser encontrado no ANEXO A.



Figura 16 - Modelos de Sistema de Injeção da GLASCRAFT.

A partir do grande interesse na capacitação do desenvolvimento de materiais compósitos processados via RTM, fica possível verificar que uma gama de projetos foram desenvolvidos em busca de análises mais detalhadas e específicas do processo, onde para o qual a Tabela 1 apresenta alguns desses equipamentos desenvolvidos e identificados a partir de dissertações de mestrado, teses de doutorado e congressos, além daqueles que estão disponíveis nos catálogos de empresas do setor, como também algumas de suas características peculiares.

Tabela 1 – Equipamentos desenvolvidos para processamento RTM.

Equipamento	Características
<p>1</p> <p>Laboratório de Compósitos da Universidade Federal do Rio de Janeiro com apoio do Centro de Tecnologia do Exército – CTEEx. AMORIM (2007).</p> 	<p>O equipamento para processar placas compósitas é composto por uma mesa de processamento que tem como função principal servir como estação de processamento de placas compósitas. Na mesa de processamento localizam-se o molde e as câmeras filmadoras, estas últimas com a função de registrar a frente de escoamento que se desenvolve quando a resina é injetada no mesmo. O equipamento possui também um sistema de injeção do tipo câmpnula com auxílio de uma bomba de vácuo para retirar o ar presente no interior do molde, evitando assim, formação de vazios no interior dos compósitos processados.</p>
<p>2</p> <p>Centro de Estudos Aeronáuticos da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. (OLIVEIRA 2007).</p> 	<p>O equipamento utilizado é composto inicialmente por um molde metálico com múltiplas entradas e saídas, equipado com resistências elétricas proporcionando um processo de cura otimizado através do controle da temperatura do processo. Para injetar a resina no interior do molde, um sistema de injeção do tipo pistão com controle da pressão e bomba de vácuo foi empregado.</p>
<p>3</p> <p>Laboratório de Materiais Poliméricos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. GARAY (2010).</p> 	<p>Este equipamento é composto por um molde metálico possui múltiplas entradas de resina e saídas de ar ou descarte. A resina é bombeada através de um sistema de injeção de fluidos, tipo vaso de pressão com auxílio de um compressor (não mostrado na figura) e de um controlador de pressão, para manter a infusão a uma pressão de injeção constante. A injeção é permitida ou não por um registro situado entre o vaso de pressão e o molde o qual possui uma conexão de entrada.</p>

Laboratório de Materiais Poliméricos da
Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
JUNIOR (2009).

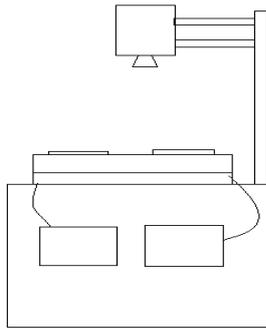
4



Neste equipamento consta de um computador instalado em conjunto a um sistema de aquisição de dados para que assim possa verificar a temperatura e a pressão do processo de injeção. O sistema de injeção tipo vaso de pressão que está situado abaixo do molde serve para que assim o caminho da resina até a cavidade possa seja minimizado. O equipamento é abrigado em uma estrutura feita de perfis metálicos, possuindo rodízios em sua base.

Laboratório de Sensores, Energia e Automação
da Universidade de Washington (SEAL).

5



Este equipamento inova no monitoramento da frente de fluxo da resina no interior do molde, com sensores dielétricos dispostos na superfície da placa superior do molde e uma câmera instalada na própria estação de processamento. Molde este, formado por uma placa superior transparente de Lexan® e uma placa inferior de alumínio. O molde possui múltiplas entradas e saídas, onde um equipamento de injeção do tipo vaso de pressão e um dreno são conectados às cavidades, respectivamente.

Grupo de Materiais Compósitos da
Universidade de Montana. ROSSEL (2004).

6



Este equipamento é formado por um sistema de injeção de resina altamente automatizado chamado Spartan VR3, que opera uma série de cilindros pneumáticos que força a resina e o catalisador através de um misturador estático com pressão e taxa de fluxos controlados através de um painel de controle. O misturador estático proporciona ainda uma recirculação de materiais antes de iniciar a injeção e um sistema de limpeza que bombeia solvente e ar através das conexões para evitar depósito de resina curada, despejando no reservatório de impurezas.

O molde da Figura é composto uma placa inferior de alumínio e duas placas superiores de vidro, o conjunto é preso por grampos do tipo C e instalado numa bancada de testes.

O segundo equipamento é composto por um sistema de injeção chamado de Radius 2100cc



semelhante a uma grande seringa que injeta em um só ciclo, toda a resina existente no reservatório. A injeção se dá através de um longo cilindro pneumático acoplado a um servopistão, onde por meio de controles alternados podem-se controlar a extensão, retração e a localização do pistão.

Radius Engineering. (CATÁLOGO 2011).

7



Este é um dos equipamentos no mercado com maior tecnologia na aplicação do RTM. O equipamento conta com cilindro de armazenamento de resina equipado com um sistema de aquecimento direto. Além de um sistema de desgaseificação à vácuo. A resina é injetada a elevada pressão (na faixa de 400 psi) graças a um sistema duplo de vedação por meio de um sistema tipo pistão impulsionado por um motor pneumático. Todas as variáveis de processo, como pressão e velocidade de injeção, temperatura da resina no interior do cilindro podem ser monitoradas e gravadas através de um painel de controle acoplado juntamente com o conjunto por meio de uma estrutura de sustentação.

JHM Technologies Incorporation. JHM
(CATÁLOGO 2010).

8



O equipamento consiste numa estação de processamento onde podemos encontrar ajuste da razão de catalisador, recipiente de armazenamento para resina e catalisador, regulador das pressões de injeção e da pressão do motor pneumático, este último leva a resina através de um conjunto de mangueiras, válvulas e conexões até o bico de injeção que realiza a mistura entre a resina e o catalisador na proporção pré-programada inicialmente.

GLASSCRAFT Spartan.
(CATÁLOGO 2011).

9



Sistema de injeção de maior porte, o Spartan injeta uma gama de resinas à baixa pressão, sendo esta monitorada por um painel de controle posicionado na parte superior de toda a estrutura. O equipamento conta com reservatórios de líquidos, com capacidades variáveis.

As inovações que acompanham este equipamento são o sistema de recirculação de resina na cabeça de injeção, evitando que a mesma cure no interior das conexões.

2.4. Matrizes Poliméricas

Conforme afirma Marinucci (2011), os materiais poliméricos tem origem orgânica e são constituídos por cadeias de carbono, que ligados a átomos como nitrogênio, hidrogênio, oxigênio entre outros, formam as molécula elementares, denominadas de monômeros, que por sua vez quando encadeadas em um grande número, formam os polímeros.

Na Figura 17, é possível observar as referentes ligações apresentadas pela resina poliéster ortoftálica, que faz parte de um dos quatro grupos distintos de resinas poliésteres

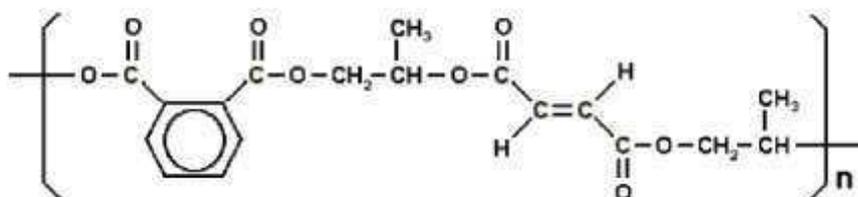


Figura 17 - Resina Poliéster Ortoftálica Insaturada. Ornaghi (2009).

A classificação dessas se dá de acordo com suas características específicas e diferenciados basicamente conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Diferentes tipos de resinas poliésteres. Ornaghi 2009.

Tipos	Observações
Ortoftálica	Resina mais popular e de menor custo para usos não nobres.
Tereftálica	Com baixa resistência UV, porém com resistência física um pouco superior a Ortoftálica.
Isoftálica	Melhores características mecânicas, químicas e térmicas que as anteriores.
Bisfenólica	Possui as melhores características químicas e térmicas.

Conforme já citado, as resinas poliméricas estão subdivididas em dois grupos, os dos termoplásticos, que se destacam por possuírem elevada tenacidade, elevado volume de produção, baixa densidade, possibilidade de reciclo e baixo custo de produção, devido fundirem e fluírem sob o efeito da temperatura e possuírem propriedades físicas reversíveis, ao exemplo do policloreto de vinila (PVC), e o dos termofixos (termorrígidos), que solidificam por meio de agentes de cura (catalisadores, endurecedores ou aceleradores) ou por temperatura, formando ligações cruzadas entre as cadeias poliméricas, proporcionando-os propriedades mecânicas superiores quando comparados aos termoplásticos, além de ampla vida útil, porém tornando-os infusíveis e insolúveis, vetando assim a possibilidade de reciclo, grupo ao qual pode ser bem exemplificado pelo poliéster insaturado.

A escolha da adequada composição está relacionada as propriedades físicas que estes materiais apresentarão, como propriedades químicas, propriedades mecânicas, temperatura de fusão e densidade. Na Tabela 3, estão presentes algumas dessas das propriedades típicas das resinas termofixas poliéster (baixa reatividade), viniléster (45% estireno) e epóxi com cura a quente, o que possibilita uma análise prévia de qual matriz adotar, visto as necessidade apresentadas pelo produto.

Tabela 3 - Propriedades das resinas poliéster, viniléster e epóxi. Marinucci (2011).

	Unidade	Poliéster	Viniléster	Epóxi
Densidade	g/cm ³	1,2	1,0	1,2
Resistência a tração	MPa	60,0	80,0	80,0
Resistência a compressão	MPa	145,0	112,0	112,0
Resistência a flexão	MPa	115,0	121,0	100,0
Deformação na fratura	%	2,0	5,0	2,7
Temperatura de transição vítrea	°C	65,0	105,0	115,0
Dureza Barcol	-	40	35	40
Viscosidade (Brookifield) 25°C	mPa.s	400-500	520-620	500-600

2.4.1. Cura de Matrizes Poliméricas

A reação de cura ocorre devido ao rompimento das instaurações presentes nos átomos de carbono do ácido insaturado, devido a formação de radicais livres pelos agentes de cura (substâncias responsáveis por acelerar a reação química) que rompem facilmente estas instaurações por estas serem altamente reativas.

A Caracterização do processo de cura é realizada a partir das seguintes etapas:

1. Tempo de gel (*gel time*): A partir da adição do agente de cura, é o tempo em que a temperatura da matriz praticamente não sofre variação, possibilitando a manipulação da resina em estado líquido;
2. Pico exotérmico: Temperatura máxima alcançada pelo material após atingido o tempo de gel;
3. Tempo de desmoldagem: É o tempo necessário para permitir o desmolde do produto sem promover empenos ou distorções e possui relação direta com a sua dureza Barcol;
4. Tempo de cura: É tempo necessário para que as ligações cruzadas se completem, dotando ao material suas propriedades, tais quais, resistência mecânica e química.

A Equação 1, apresenta o tempo de gel (Ge), também conhecido tempo de gelificação, retrata a influência do calor gerado na reação durante o processo de injeção (t_{inj}), com o tempo necessário para o início da reação (t_{reac}), onde se faz possível verificar que quão menor seja este índice, menor é a influência do t_{reac} no processamento.

$$Ge = \frac{\text{Tempo de injeção}}{\text{Tempo de reação}} = \frac{t_{inj}}{t_{reac}} < 1 \quad (1)$$

Assim, o processo de cura torna-se fator fundamental na escolha da matriz, visto que suas etapas tem considerável interferência no processo, como o tempo de processamento (tempo de gel) e pós-processamento (tempo de desmoldagem para viabilizar o preparo do sistema para uma nova injeção) e temperatura de trabalho (elevadas temperaturas podem acarretar em danos ao sistema).

Quanto a seleção do ciclo de cura, a escolha dos parâmetros tempo e temperatura estão relacionadas a uma introdução mínima de tensões residuais no produto, de forma a garantir uma cura completa no menor tempo possível, assim a adequada seleção desta etapa também é essencial a qualidade final do produto, visto que a adoção de um ciclo longo, com baixas temperaturas, influenciariam no custo de produção, além de possivelmente não possibilitarem a formação das ligações cruzadas de forma completa, enquanto que, a adoção de ciclos curtos com elevadas temperaturas, tendem a reduzir o custo de produção, porém, com uma maior probabilidade de acúmulo das tensões internas, que conseqüentemente fragilizariam o material, seja com o surgimento de trincas ou com a pré-solicitação do material durante o processo de cura.

2.5. Fibras

Com papel fundamental na atribuição das propriedades mecânicas do material compósito, as fibras são selecionadas conforme condições de projeto, visto que fatores como tipo de carregamento e esforços vão estabelecer os tipos de propriedades necessárias ao produto, assim, com o conhecimento do desempenho necessário,

juntamente associado aos fatores custo e técnica de fabricação, é possível então realizar a correta seleção do tipo de fibra a ser adotada. Entre os principais elementos de reforço adotados, as fibras de vidro, as fibras de aramida e as fibras de carbono possuem destaque em níveis de comercialização, onde para as quais a fibra de vidro apresenta uma melhor razão entre o custo e o benefício, devido a abundância de sua matéria prima disponível e pelo processo de fabricação.

As fibras de vidro, assim como as demais, possuem classificação específica de acordo com características especiais, onde para cada uma, de acordo com a variação de sua composição, propriedades como resistência química, resistência a temperatura e resistência mecânica são alteradas de acordo com as necessidades de aplicação, assim podendo ser exemplificadas pela maior resistência química da fibra tipo C, maior resistência elétrica a tipo E e com maior resistência mecânica e a temperatura a tipo S. Na Figura 18, pode-se observar a classificação das fibras de vidro quando sua forma de apresentação, (a) fios, (b) manta e (c) para tecidos.



Figura 18 - Classificação das fibras de vidro quanto a sua forma de apresentação.

Mantas de fibra de vidro tem destaque quando se tratam quesitos como custo, molhabilidade e moldabilidade, além de apresentar boa inércia química e considerável resistência mecânica, porém, quando comparados aos demais tipos de reforços, suas propriedades mecânicas e elásticas são relativamente baixas.

2.6. Interface Fibra/Matriz

Elo entre as fases do material compósito, a interface fibra/matriz tem por função compatibilizar a transferência dos esforços dos carregamentos entre as fases, visto a significativa diferença existente entre ambas (Figura 19), que mostra a relação entre a tensão e a deformação dos materiais compósitos em relação as suas fases.

Normalmente os materiais compósitos são submetidos a testes como de torção e arrancamento (*pull out*) para análise de resistência a tração e ao cisalhamento na interface fibra/matriz, devido a não existência de método normalizado que possibilite a verificação da adesão entre as fases na sua interface. Pesquisas nesse campo têm despendido anos na análise desse fenômeno interfacial, Shiino (2011).

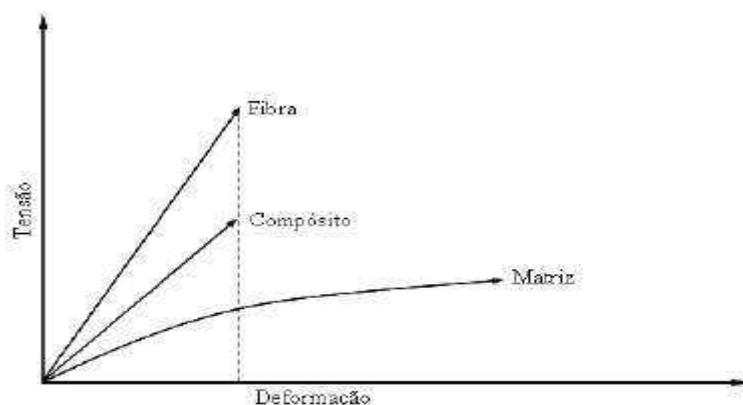


Figura 19 - Representação do gráfico tensão x deformação dos materiais compósitos em relação as suas fases. Nascimento (2009).

2.7. Molde

Segundo Amorim (2007), o molde tem fundamental importância na produtividade e na determinação da qualidade da peça, pois somente um molde bem projetado pode garantir um bom índice de produtividade, assim como também um bom acabamento da peça produzida, a Figura 20 apresenta um modelo de molde de injeção.



Figura 20 - Modelo de Molde de Injeção. GLASCRAFT.

A variedade de materiais disponíveis para a composição do molde, ao exemplo do aço, alumínio e dos polímeros, fazem com que a escolha adequada material a ser adotado para a confecção do molde, item do projeto, tenha que ser feita conforme os fatores de máxima pressão no interior do molde, temperatura do molde, acabamento superficial desejado, tamanho e geometria.

A Tabela 4, demonstra representativamente uma graduação entre 1 e 10 para qualificação do item de acordo com suas características, para materiais de moldes para RTM.

Tabela 4 – Materiais de Moldes para RTM.

	Custo	Condutividade Térmica	Durabilidade	Qualidade Superficial
Aço	10	5	10	10
Alumínio	8	5	8	10
Polímero (Nitalen)	2	4	5	9

O ponto de injeção da resina no molde é outro fator importante a ser ressaltado quanto ao projeto do molde, visto que a adequada escolha é feita de acordo com aspectos como permeabilidade da pré-forma, viscosidade da resina utilizada e, geometria da peça, para que assim ocorra o correto dimensionamento e posicionamento,

na Figura 21 é possível observar algumas simulações as quais mostram a frente de fluxo de acordo com a variação dos pontos de entrada.

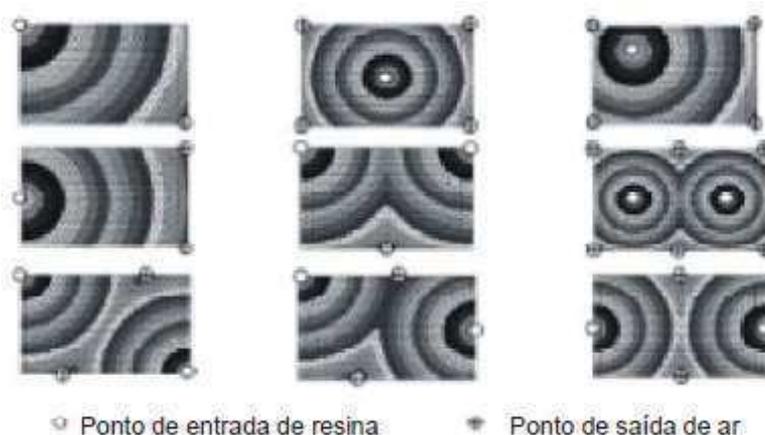


Figura 21 – Simulação do fluxo de acordo com os pontos de injeção. Amorim (2007).

2.8. Agente desmoldante

Como já retratado por seu nome, o agente desmoldante tem a óbvia função de evitar a aderência do compósito em produção com o seu molde, para assim evitar danos aos próprios (principalmente ao molde) e afetar o processo produtivo. Apesar de tarefa simples, a mesma exige alto nível de atenção e cuidado por parte do operador, para garantir a qualidade do produto final, visto que alguns tipos de desmoldantes tem influência direta na qualidade superficial do produto.

Embora existam várias possibilidades de utilização de desmoldantes, em geral estas podem se qualificar em duas classes, a primeira dos desmoldantes de sacrifício ou de aplicação repetitiva, que normalmente devem ser reaplicados a cada ciclo de produção e são recomendados para peças com baixa escala de produção, as quais podem ser exemplificadas pelas ceras a base de carnaúba e sintéticas, óleo de silicone, álcool polivinílico (PVA) e fitas ou filmes adesivos, quanto a segunda classe, a dos desmoldantes semipermanentes, pode-se afirmar que diferentemente da classe anteriormente citada, esta sim permite a fabricação de uma grande quantidade de peças sem a necessidade de preparação do molde, porém, possui custo superior.

2.9. Caracterização Mecânica

Uma das mais tradicionais formas de caracterização e análise mecânica aplicada para materiais compósitos, o ensaio de flexão tem destaque por proporcionar uma adequada avaliação do produto através da determinação de suas propriedades de resistência.

2.9.1. Ensaio de flexão

O ensaio mecânico de flexão consistem em aplicar uma tensão através de uma carga perpendicularmente ao eixo do corpo de prova, na qual vai proporcionar o esforço físico de flexão e conseqüentemente uma deformação ao mesmo, este pode ser dotado de 3 (Figura 22) ou 4 pontos de apoio, onde apesar de o ensaio de 4 pontos apresentar uma melhor distribuição da tensão aplicada, com resultados mais precisos, o ensaio de 3 pontos se sobressaem por serem mais populares e assim proporcionarem uma mais abrangente análise e comparação com outras publicações.

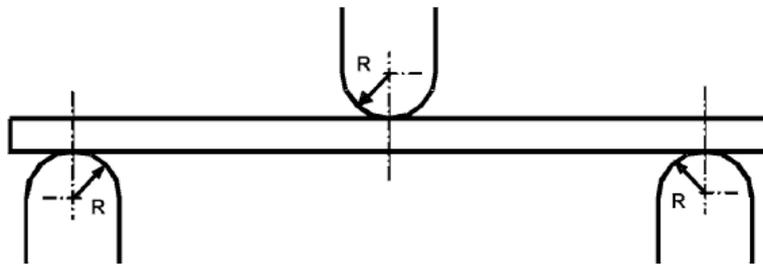


Figura 22 - Representação de ensaio de flexão em 3 pontos. ASTM D7264/D7264M.

Parâmetro fundamental para a caracterização de materiais ortótropos, o módulo de Young, também conhecido como módulo de elasticidade (E) é calculado levando-se em conta a relação da porção elástica da curva com a deformação, onde a partir da inclinação de uma reta tangente a curva é possível obter o módulo de elasticidade conforme a Equação 2, regida pela norma ASTM D7264/D7264M, e apresentada a seguir.

$$E = \frac{L^3 m}{4bd^3} \quad (2)$$

Para o qual L [mm] é o comprimento do “*span*”, b [mm] é a largura, d [mm] é a espessura e m representa a inclinação da curva carregamento – deslocamento da flecha.

Conforme verificado por Shiino (2011), compósitos laminados de alto grau de anisotropia, como os adotados por manta de fibra de vidro, podem apresentar alto nível de divergência das propriedades mecânicas, devido esta característica, além de que, como explicado anteriormente, esta propriedade tem relação direta com as variáveis da fibra, da interface fibra matriz e características morfológicas, que por sua vez dependem das condições de processamento, geometria e temperatura de reação.

2.10. Caracterização Microestrutural

A caracterização e análise microestrutural das placas compósitas se apresenta como passo importante na verificação da qualidade do produto e do processo devido a possibilidade de a partir de uma adequada microscopia ótica e a simples análise de fotos digitais fazer-se a verificação da existência de vazios no interior do processo, como também verificar a dimensão e proporção as quais estes se apresentam. Os processos de análises citados são considerados suficientemente adequados para caracterização dos elementos em análise.

2.11. Caracterização Térmica

Fundamentais para caracterização e avaliação de materiais poliméricos, por disponibilizarem informações as quais não poderíamos ter acesso por outros tipos de ensaios, as técnicas de análise térmica permitem medir as variações de propriedades físicas ou químicas do material, através do controle da temperatura e atmosfera, seja

esta variando através de ciclos ou constante, logo, a análise térmica é assim conceituada como um conjunto de técnicas capazes de medir essas variações, em função da temperatura ou do tempo. Se destacam como técnicas de análise térmica (Figura 23) a Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC, do Inglês “Differential Scanning Calorimetry”) e a Análise Dinâmico-Mecânica (DMA, do Inglês “Dynamic Mechanical Analysis”).

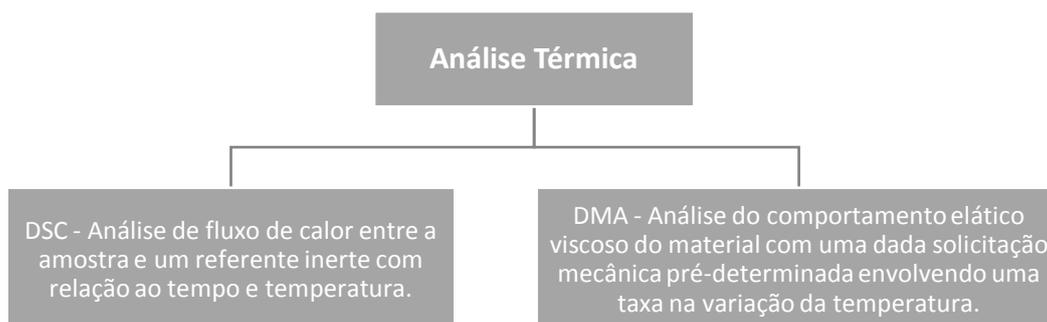


Figura 23 - Técnicas de análises térmicas.

2.11.1. Calorimetria Diferencial de Varredura

A calorimetria diferencial de varredura (DSC) é uma técnica usada para medir temperaturas de fusão, calor de fusão, energia e temperatura de reações endotérmicas e exotérmicas, temperatura de transformação vítrea (T_g), temperatura de cristalização (T_c), temperatura de fusão (T_m), transformações de fase e medições de calor ou capacidade calorífica, através de uma diferença de taxa de fluxo de calor entre uma amostra e uma referência inerte em função do tempo e da temperatura. A Figura 24 expõe três desses importantes parâmetros, a T_g , a T_c e a T_m .

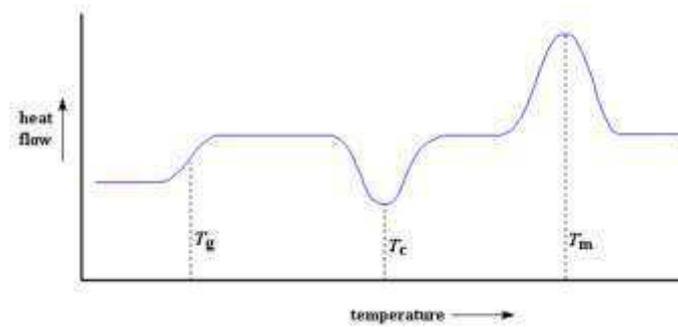


Figura 24 - Curva característica do DSC.

2.11.2. Análise Dinâmico Mecânica

A análise dinâmico mecânica (DMA) é uma ferramenta muito importante na caracterização dos materiais que apresentam forte dependência da temperatura e frequência de aplicação de carregamento mecânico, como é o caso dos materiais poliméricos. Assim como no DSC, o DMA é capaz de obter informações sobre as faixas de transições termodinâmicas como a T_g , a T_c e a T_m . A Figura 25 apresenta a definição de T_g de acordo com a norma ASTM E 1640-09.

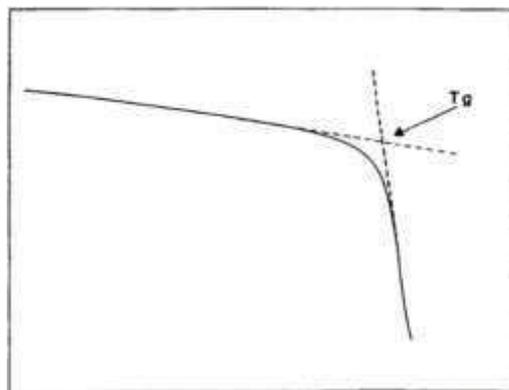


Figura 25 - Definição de T_g de acordo com a norma ASTM E1640-09.

Se faz importante ressaltar a importância do conhecimento da T_g , devido ser nessa faixa de temperatura, que o comportamento mecânico de polímeros amorfos variam de material rígido para material elastômero, onde, essa faixa de temperatura de

cada material varia de acordo com fatores tais como composição, massa molar do polímero, grau de cristalinidade, entre outros. Ornaghi (2009).

2.12. Permeabilidade

Conforme abordado por Amorim (2007), as operações do processamento RTM podem ser divididas em duas categorias independentes, uma primeira representada pelas operações de molde aberto, a qual se encaixam atividades como preparação do molde, aplicação do desmoldante e posicionamento da pré-forma, e uma segunda, representada pelas operações de molde fechado, onde o processo de injeção e cura se enquadram, assim esclarecido, fica afirmado que apesar de as atividades da primeira categoria serem responsáveis por demandarem de um tempo significativo para o preparo do processamento, as atividades da segunda categoria é quem vão controlar a performance do produto, afetando a taxa de produção e o custo da operação.

Visto que os principais fatores que influenciam nas operações de molde fechado são os parâmetros de processo, ao qual se incluem a pressão de injeção, tipo de sistema de injeção e velocidade de injeção, além obviamente da resina e da permeabilidade, este que por sua vez surge como variável importante no processamento RTM e tem sua definição como sendo a resistência ao escoamento que um fluido exerce através de um meio sólido poroso, sendo tratada ainda como uma propriedade do material. Amorim (2007).

O meio sólido poroso em questão é formado pelo tecido, assim, características como a arquitetura, tipo, porosidade, fração volumétrica das fibras no compósito, número de camadas e presença de tecido são variáveis que influenciam no cálculo da permeabilidade, já os parâmetros de injeção e o tipo de resina são outras variáveis com influência.

2.12.1. Modelo Físico-Matemático da Permeabilidade

Em 1856, o cientista francês Henry Darcy propôs o modelo matemático voltado para análise de escoamento em meios porosos, e ao qual é amplamente adotado para o estudo fluidodinâmico do escoamento de resina no interior de um molde, e denominada como equação de Darcy, onde para o fluxo unidimensional, a qual é forma mais simples para a sua determinação, essa pode ser reescrita conforme a Equação 3.

$$Q = - \frac{KA\Delta P}{\mu\Delta L} \quad (3)$$

Onde:

Q = Vazão do fluido;

K = Permeabilidade;

μ = Viscosidade da resina;

A = Área;

ΔP = Variação de Pressão;

ΔL = Distância percorrida pelo fluido.

Para o modelo citado é necessário respeitar hipóteses como a de que o fluido é newtoniano, incompressível e o processo de cura não se inicia até o fim do preenchimento do molde, apresenta viscosidade constante com escoamento laminar ($Re < 1$), pressão ou vazão constante e o material poroso é imóvel e não sofre deformações, como também o fato de bolhas de ar, forças gravitacionais e capilares serem ignoradas.

Amorim (2007) apresenta analogia referente a adequação da equação de Darcy para o cálculo da permeabilidade no processamento RTM em placas finas (são consideradas apenas duas dimensões), onde hipóteses como a permeabilidade se apresentando através de um tensor em forma de matriz diagonal e o termo vazão sendo

substituído pela velocidade do fluido são adicionadas. Portanto a Equação 4 representa o incremento dessas recentes afirmadas hipóteses.

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = -\frac{1}{\mu} \begin{bmatrix} K_{xx} & 0 \\ 0 & K_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \partial P / \partial x \\ \partial P / \partial y \end{bmatrix} \quad \text{(Erro! Indicador não definido.)}$$

A Figura 26 apresenta as componentes de uma vista superior do tensor K em um plano nas direções X e Y, como sendo K_x e K_y .

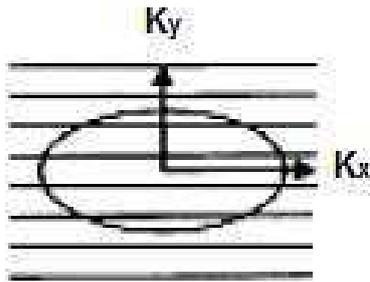


Figura 26 – Componentes do tensor K apresentados de uma vista superior no plano X,Y. Amorim (2007).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo do trabalho estão descritos os materiais adotados para o processamento das placas compostas presentes nessa dissertação (Resina, catalisador, manta de fibra de vidro e elemento desmoldante), como também o detalhamento dos métodos para execução de cada etapa, desde o processamento das placas, até os testes de validação do processo (Caracterização mecânica, microestrutural, térmica e cálculo da permeabilidade).

3.1. Materiais

3.1.1. Matriz Polimérica

A Matriz polimérica adotada, de nome químico monômero de estireno, é a resina poliéster saturada, tixotrópica pré-acelerada MEKOL®, adequadas para trabalhos associados compostos que possuem como reforço mantas de fibra de vidro e produzida pela Induspol Indústria e Comércio de polímeros Ltda.

Na Figura 27 é possível verificar a resina pré-processamento, ainda enquanto no estado líquido.



Figura 27 - Resina Poliéster Insaturada MEKOL®.

Conforme boletim técnico presente no ANEXO B, esta resina se apresenta na cor âmbar com viscosidade entre 250 a 400 cps, Tempo de Gel entre 9 e 13 minutos (para adoção de 1% de catalisador e temperatura ambiente de 25°C) e densidade na faixa de 1,09 - 1,13g/cm³. O anexo ainda traz detalhes a respeito de outras características, usos principais, modo de preparo e precauções.

3.1.2. Catalisador

Denominado de metil etil cetona, o catalisador MEKOL® em uso é indicado como iniciador de cura adequado para o processo em temperatura ambiente, de resinas poliéster insaturada e também produzido pela Induspol Indústria e Comércio de polímeros Ltda. Estes agentes transformadores se qualificam por apresentarem altos índices de repetibilidade nos mais variados processos de fabricação, e conforme ANEXO D, estes apresentam oxigênio ativo total em torno de 8,5 à 9,0%, densidade entre 1,00 e 1,05g/cm³ e se apresentam de forma límpida, líquida e incolor, além de possuírem um teor máximo de água de 4%.

3.1.3. Fibra

Como reforço, é utilizada uma manta de fibra de vidro (Figura 28), especificada como manta para laminação MEKOL®, a qual é formada basicamente por fibra de vidro tipo E, composta por filamentos agregados e com aplicação destinada para reforços plásticos, este, tem produção realizada pela OCV Capivari Fibras de Vidro Ltda.

Esta manta apresenta como destaque características como rápida molhabilidade, redução no consumo de resinas, aumento de produtividade e baixa marcação no elemento desmoldante.

Ela apresenta gramatura de 450g/m², no seu boletim técnico (ANEXO C), outras características como valor de perda de fogo, largura e peso são apresentadas, além de informações a respeito das adequadas precauções necessárias.

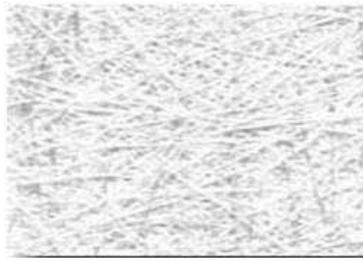


Figura 28 - Manta de fibra de vidro

3.1.4. Agente Desmoldante

São utilizados para a fabricação das placas compósitas fitas e filmes adesivos de uso colegial, de modo distinto e em etapas diferentes, para função de elemento desmoldante, visto estes plausíveis para a função e adotados devido a qualidade proporcionada as placas e aos seus baixos custos.

3.2. Métodos

3.2.1. Projeto do Equipamento RTM

O projeto de um equipamento para a produção de um produto industrial é desenvolvido solucionando problemas, a modo de prever e evitar falhas, assim, para o projeto de um equipamento RTM e seus moldes, não se faz de forma diferente, logo, para este deve-se seguir uma sequência cronológica através de etapas principais conforme representado no fluxograma da Figura 29.

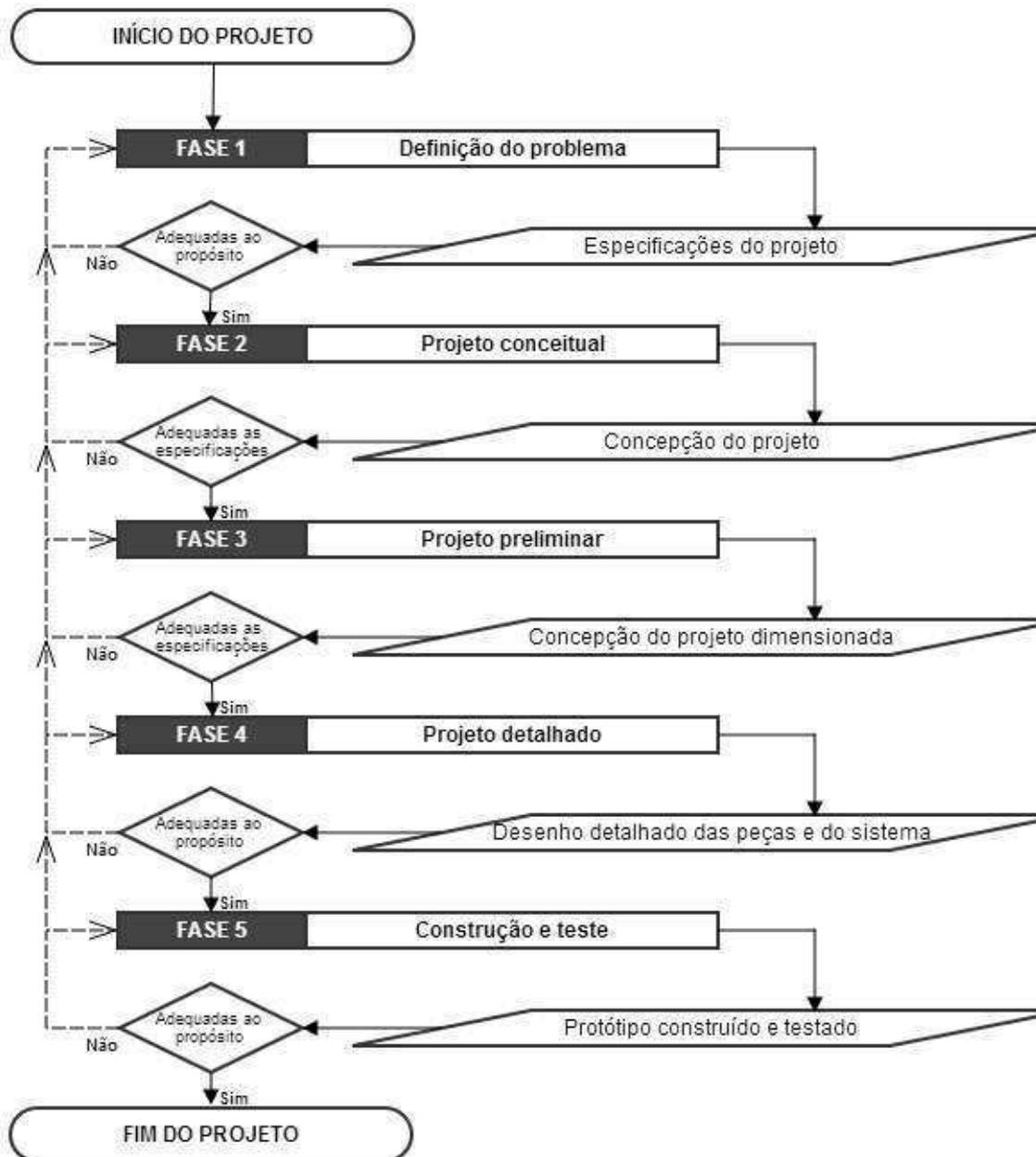


Figura 29 - Fluxograma do projeto.

O projeto informacional trata da definição do problema, onde ocorre a interpretação e a verificação das limitações dos requisitos disponíveis de forma clara e objetiva. Para tanto, são reunidas as possíveis informações necessárias ao desenvolvimento do trabalho através de uma pesquisa sobre informações referentes aos requisitos do projeto do dispositivo a ser desenvolvido, que tem como fontes principais

de informação, o levantamento teórico e o levantamento de equipamentos já existentes. Neste estão inclusos as especificações do projeto.

No projeto conceitual ocorre sua concepção, este, através de croquis, fotografias, diagramas, desenhos esquemáticos a visualização da(s) ideia(s) que melhor atendem à demanda de projeto.

Na etapa seguinte, a do projeto preliminar, onde se dimensiona a concepção do projeto, são estabelecidos os materiais adequados ao uso, transporte que suportem aos esforços solicitados em conformidade com os processos de fabricação e as normas vigentes no país, considerando à segurança operacional e a confiabilidade do produto.

Para o projeto detalhado, são desenvolvidas as documentações para a construção do protótipo (desenhos detalhados de fabricação das peças e do sistema).

Na etapa final, onde ocorre a fabricação do protótipo, faz-se uso dos recursos disponíveis em termos de fabricação e montagem, para a obtenção da forma física estabelecida e dimensionada nas fases anteriores, pôr fim, devem ser realizados os testes de validação, com intuito de que sejam verificadas se às especificações de projeto foram atendidas e, conseqüentemente, se obedeceram a demanda inicial.

3.2.2. Estudo da resina a ser utilizada no processamento por RTM

Apesar de a resina apresentar catálogo com especificações a respeito das características do produto (ANEXO B), para o desenvolvimento do SSI Tipo II, se fez necessário uma ampliação dos conhecimentos sobre as temperaturas de cura da mesma, a partir da variação do percentual de catalisador adotado, logo, para esta atividade, foi utilizado o sistema de aquisição Agilent (Figura 30), modelo 34970A, associado a um conjunto de termopares tipo K, para verificar as temperaturas máximas atingidas durante seu processo de cura.



Figura 30 – Sistema de Aquisição Agilent, Modelo 34970A.

Quatro amostras foram submetidas simultaneamente e nas mesmas condições de temperatura para esta análise, onde a variação do percentual de catalisador presente em cada amostra foi de 0,5% de catalisador para a amostra A, 1,0% para a amostra B, 2,5% para a amostra C e 5,0% para a amostra D. Cada amostra é composta 50 ml da resina em trabalho.

3.2.3. Processamento das placas compósitas por RTM

Para o processamento das placas compósitas por RTM, se faz necessário criar um cronograma das atividades a serem executadas, visando permitir que, para todas as placas o procedimento operacional fosse idêntico, possibilitando assim, uma adequada analogia entre estas, para avaliá-las e validar o conjunto do processo.

Visto o interesse amplo no processo, não se poderia deixar de realizar o detalhamento das etapas do cronograma, aos quais se apresentam subdivididos em duas tabelas de acordo com o seu mais adequado agrupamento, obedecendo critérios como, características particulares das atividades e sequência cronológica de execução. As Tabelas 5 e 6 apresentam este detalhamento.

Tabela 5 – Cronograma das atividades durante o processo RTM.

Atividades	
Molde	<ul style="list-style-type: none"> • Posicionar o molde; • Nivelar bancada do molde.
SSI	<ul style="list-style-type: none"> • Posicionar SSI na INSTRON 5582; • Posicionar pistão do SSI;
Processo	<ul style="list-style-type: none"> • Fixação da mangueira; • Preparar vedação das saídas de ar; • Verificar programação da INSTRON 5582; • Posicionar reservatório de descarte; • Posicionar câmera; • Preparar resina; • Inserir a resina no SSI; • Iniciar programação da INSTRON 5582; • Acompanhar injeção da resina no molde; • Pausar injeção após preenchimento completo do molde; • Vedar saídas de ar do molde; • Cortar mangueira; • Vedar mangueira; • Terminar curso do pistão (evitar cura de resina no SSI);

Com o início da produção das placas compósitas por RTM, fica perceptível que as atividades pré e pós processamento ou atividades de molde aberto, como são conhecidas, demandavam de um tempo significativo na operacionalização do processamento RTM desenvolvido, visto que para este trabalho de pesquisa, a taxa de produção é fator controlador do processo, faz-se necessário observar, assim como já especificado na revisão bibliográfica, a divisão do processamento nas atividades de molde aberto e nas atividades de molde fechado (Tabela 5), onde, um detalhamento com as atividades de molde aberto podem ser visualizadas na Tabela 6 a seguir.

Tabela 6 – Cronograma de atividades pré e pós processamento RTM.

Atividades	
Montagem do Molde	<ul style="list-style-type: none"> • Limpeza do molde; • Aplicar elemento desmoldante; • Ajustar elemento desmoldante; • Cortar manta; • Posicionar camadas da manta no molde; • Fechar sistema com parafusos; • Conferir aperto dos parafusos;
Montagem do SSI	<ul style="list-style-type: none"> • Fixar SSI no suporte; • Fixar mangueira no SSI e no molde; • Conferir aperto da fixação.
Processo de injeção	<ul style="list-style-type: none"> • Observar processo na Tabela 5.
Desmoldagem da placa	<ul style="list-style-type: none"> • Remover parafusos; • Remover placa processada; • Remover elemento desmoldante.
Manutenção do molde	<ul style="list-style-type: none"> • Remover resina sobressalente; • Remover elemento desmoldante; • Reabrir furo da entrada da resina; • Reabrir saídas de ar.
Manutenção do SSI	<ul style="list-style-type: none"> • Remover resina sobressalente; • Reabrir conexão.

Como já afirmado os dois cronogramas foram criados com base nas atividades realizadas durante o processamento de placas compósitas (Tabela 5) e as atividades pré e pós processamento (Tabela 6), visando, facilitar o entendimento de todo o processo. A Tabela 6 ainda apresenta a etapa do processo de injeção, mesmo esta não pertencendo ao cronograma de atividades descrito, porém, vinculado a mesma com forma de facilitar o entendimento de quais atividades são pré processamento e quais atividades são pós processamento.

A programação elaborada para a INSTRON consiste em que a mesma disponibilizasse um deslocamento constante do pistão de injeção a uma velocidade de 50 mm/min.

As câmeras são posicionadas em um plano paralelo a superfície do molde para assim proporcionar imagens aptas de serem analisadas para o cálculo da permeabilidade. As fotografias são capturadas a partir da câmera fotográfica comuns existentes em smartphones (Modelo GT-i9300 Samsung).

A matriz polimérica utilizada para esta dissertação é preparada conforme orientação do fabricante e adota 1% do iniciador da cura, onde para o total de 300 ml de resina utilizados por ciclo eram adicionados 3 ml do catalisador (Testes com outros percentuais de iniciador de cura foram realizados e podem ser verificados no desenvolvimento da resina).

Para a manutenção do molde e do SSI são utilizados solventes para tintas, com a finalidade de remoção do excesso de resina e aplicados com auxílio de estopas, e uma furadeira de topo para a reabertura dos furos do molde e da conexão do SSI, além de outras ferramentas universais como tesouras, estiletes, chaves allen e chaves de boca disponíveis na oficina mecânica.

O detalhamento dos SSI utilizados estão presentes nos resultados deste.

3.2.4. Dimensionamento das Placas

Como primeiras atividades pós-processamento a serem realizadas com as placas compósitas produzidas, o dimensionamento das mesmas consiste em realizar a aferição das medidas e pesagem, atividades as quais foram realizadas com auxílio de um paquímetro e da balança de precisão (Shimadzu, modelo AUY220) respectivamente, ambos disponíveis no LaMMEA.

Se faz viável ressaltar que para todas as medidas são realizadas três aferições, onde seu valor real é obtido a partir da média aritmética destes.

Já para realizar a retifica das placas é necessário a utilização de esmeril de bancada, lima e alicate de corte, além logicamente das adequada utilização dos Equipamentos de Proteção Individual (EPI).

3.2.5. Caracterização Mecânica

O teste de flexão em três pontos foi o escolhido para a atividade de realizar a caracterização mecânica das placas processadas, instruído pela norma ASTM D7264/D7264M, onde neste a amostra é submetida a um carregamento constante até que a mesma alcance seu limite de ruptura, quantitativamente representado pela tensão máxima suportada, além de possibilitar calcular o valor do módulo de elasticidade das mesmas, conforme apresentado previamente na revisão bibliográfica.

Para cada placa injetada, foram selecionadas 3 amostras (corpos de prova) para o ensaio de flexão em 3 pontos, estas retiradas das placas através de processo de corte por disco e igualmente dimensionadas, sendo uma da região central e as outras duas das laterais das placas compósitas. Conforme destacado na Figura 31.

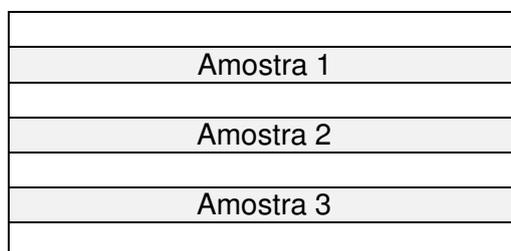


Figura 31 – Posição das amostras retiradas das placas para realização do ensaio de flexão.

Para os testes é utilizada a máquina de ensaios INSTRON 5582, disponível no LaMMEA, com uma célula de carga de 100 KN e apresentando uma taxa de deslocamento constante de 1mm/min. O dimensionamento das amostras obedece a mesma norma na qual indica uma razão de ao menos 1/32 entre a espessura e o comprimento da mesma, logo, as amostras retiradas das placas possuem 5 mm de

espessura e 175 mm de comprimento, visto que a distância entre os apoios inferiores (“span”) é de 160mm, estas apresentam ainda largura de 13mm.

A Figura 32 ilustra o modelo de disposição do sistema, apresentando o posicionamento dos esforços e esclarecendo o comprimento do “span”, representado por L.

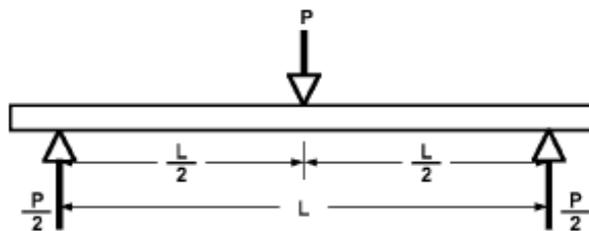


Figura 32 – Modelo de disposição do sistema. ASTM D7264/D7264M.

Para base do cálculo da tensão de flexão máxima, fica considerado que o material seja homogêneo e com proporção entre tensão e deformação até o ponto de ruptura, dados estes apresentados conforme a norma, assim como, a seguinte equação adotada.

$$\tau = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (4)$$

Onde:

τ = Tensão de flexão máxima [MPa];

P = Carga aplicada [N];

b = Largura do corpo de prova [mm];

h = Espessura do corpo de prova [mm];

L = “Span” [mm].

Já na Figura 33, tanto é possível ver a disposição do ensaio em início de sua execução como o modelo do dispositivo utilizado para o mesmo.



Figura 33 – Ensaio de flexão em 3 pontos.

Já para a caracterização mecânica do perfil fabricado é utilizado o método de ensaio considerado disponível e mais próximo da situação crítica que poderá ser encontrada em operação, onde engastou-se uma das abas do perfil, aplicando-se uma carga linear sobre a extremidade da outra aba. A máquina de ensaios INSTRON 5582 é empregada também na realização deste ensaio. A disposição do sistema adotado e o modelo do dispositivo utilizados na montagem são mostrados na Figura 34.



Figura 34 - Montagem utilizada para a realização do ensaio.

3.2.6. Caracterização Microestrutural e Superficial

Como apresentado na revisão bibliográfica, uma análise microscópica óptica associada a uma também análise de fotos digitais formaram a caracterização microestrutural e Superficial dos compósitos fabricados.

Para a análise por microscopia óptica, a qual possibilita verificar a incidência de vazios no interior das placas e o grau de impregnação das fibras, foi utilizado o microscópio Olympus BX51M (Figura 33), disponível no LaMMEA, com taxa de ampliação das imagens de 500 para 1.



Figura 35 - Microscópio Olympus BX51M.

Além das imagens obtidas da superfície das placas, também foram capturadas imagens nas regiões laterais das amostras cortadas para o ensaio de flexão, estas com intuito de verificar com maior clareza a proporção de vazios existentes.

3.2.7. Caracterização Térmica

A caracterização térmica das amostras ocorre por meio de ensaios utilizando as técnicas de Calorimetria Exploratória Diferencial e Análise Dinâmico-Mecânica, detalhadas a seguir.

DSC

A equipamento adotado para realizar o ensaio de Calorimetria Exploratória Diferencial se trata do DSC Q20 da TA Instruments (Figura 36), ao qual se encontra disponível no LaMMEA.



Figura 36 – Equipamento DSC. TA Instruments.

Como amostras para o ensaio, é utilizada um fragmento de 3,5g da resina das placas processadas. Os ensaios foram realizados no modo dinâmico, com taxa de aquecimento de 2°C/min, na faixa de 20°C a 350°C, para a determinação da faixa de temperatura de processamento até a cura e do calor de reação da resina.

DMA

A equipamento adotado para realizar o ensaio de Análise Dinâmico-Mecânica se trata do DMA Q800 da TA Instruments (Figura 37), ao qual se encontra disponível no LaMMEA.



Figura 37 - Equipamento DMA. TA Instruments.

Para realização deste ensaio as amostras apresentaram dimensionamento aproximado de 17x11,2x4,8 mm, e foram obtidas a partir da injeção de uma placa composta unicamente pela matriz polimérica (Placa 6), por meio de corte realizado via ferramenta de corte manual e podem ser visualizadas na Figura 38.



Figura 38 – Amostra para ensaio DMA.

Para este ensaio se utilizou do suporte de um fluido refrigerante de uso ortodôntico, aplicado na região de ensaio, visando possibilitar que para o ensaio fossem fornecidos resultados mais confiáveis, devido ao baixo valor de temperatura de transição apresentado pela resina.

Os ensaios foram realizados no modo dinâmico, com taxa de aquecimento de 2°C/min, na faixa de 9°C a 250°C, frequência de 1Hz e amplitude de 10 microns, para a determinação da faixa de temperatura de processamento até a cura e do calor de reação da resina.

3.2.8. Cálculo Preliminar da Permeabilidade

Para o cálculo preliminar da permeabilidade nesta dissertação, foi adotado a metodologia de permeabilidade radial no plano, a qual, utiliza da medição por imagem (filmagem) para verificar a velocidade de escoamento da resina no interior do molde. Adotando essa metodologia se é capaz de medir a permeabilidade filmando a frente de avanço do escoamento sobre a superfície da pré-forma previamente posicionada. Observar esquema na Figura 39.

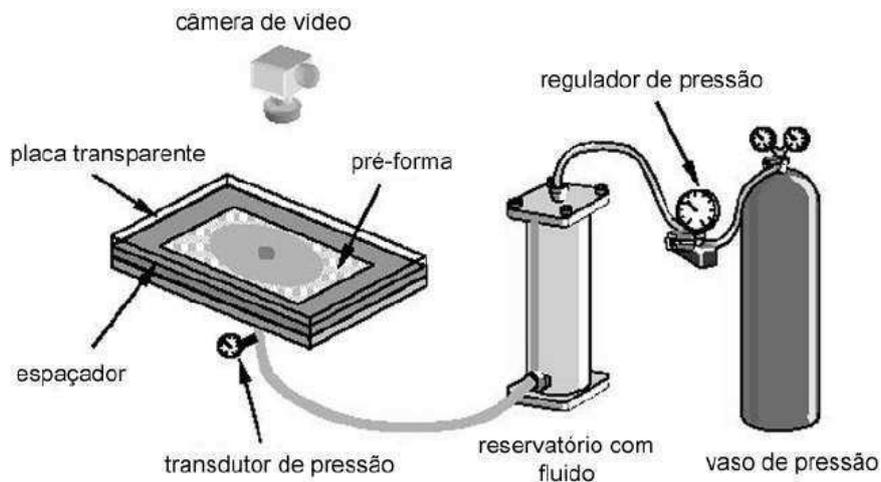


Figura 39 - Esquema da metodologia utilizada para cálculo da permeabilidade radial no plano. Amorim (2007).

Para esta metodologia, as frentes de avanço no eixo x e y são levadas em consideração, logo a permeabilidade (K_x , K_y) assume valores de acordo com estas. A Figura 40 apresenta no plano as duas frentes de avanço existentes.

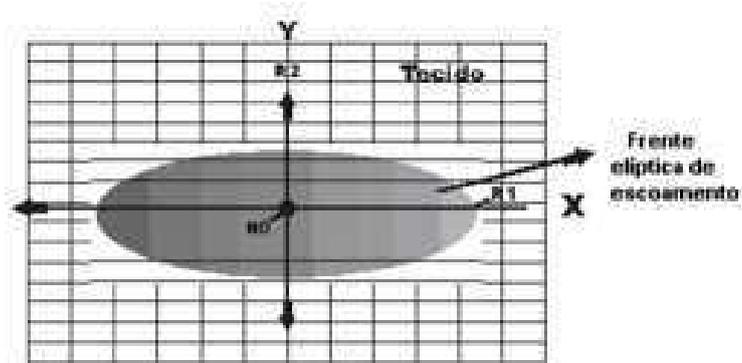


Figura 40 - Representação das frentes de avanço. Amorim (2007).

Porém conforme verificado por Amorim (2007), é plausível afirmar que permeabilidade sofre grande influência pela variação na arquitetura dos tecidos, logo para tecidos isotrópicos, ao exemplo da adotada manta de fibra de vidro, o formato das frentes de avanço são circulares (Figura 41) e idênticas, não apresentando variações no

escoamento da resina até o encontro de barreiras físicas ao exemplo do molde, enquanto que para tecidos anisotrópicos, o formato apresentado pelas frentes de avanço é elíptico.

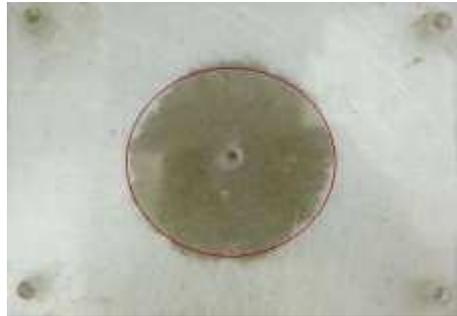


Figura 41 – Formato circular das frentes de avanço apresentado para processos dotados de mantas de fibra de vidro.

Conforme apresentado na revisão bibliográfica, a equação de Darcy é quem rege o cálculo da permeabilidade, que neste, se faz possível através da obtenção do parâmetro velocidade obtido pela captação das imagens do processo de injeção.

Apresentando fluxo constante de injeção e um monitoramento da pressão de injeção, através do sistema de aquisição, o modelo matemático usado por Bickerton (1999), derivado da lei de Darcy unidimensional, foi escolhido para relacionar a forma dos círculos apresentadas pela resina durante o processo de injeção. Este modelo é descrito pela Equação 6.

$$K = \frac{\phi\mu}{\frac{dP}{dt}} \left(\frac{Q}{A}\right)^2 \quad (5)$$

Onde:

K = Permeabilidade;

Φ = Porosidade da pré-forma;

μ = Viscosidade do fluido;

Q = Fluxo de injeção;

A = Área da seção do molde preenchida;

dP/dt = Variação da pressão pelo tempo.

Para determinação da equação representativa da variável P, se faz necessário a utilização dos dados de injeção de cada placa, onde a partir do ajuste da curva realizado com auxílio software computacional Origin é possível fazer essa representação através do modelo polinomial (Equação 7). O coeficiente de correlação aceito para essa determinação é igual ou superior a 90%.

$$P = B_0 + B_1x + B_2x^2 + B_3x^3 + \dots + B_kx^k \quad (6)$$

Para o qual P representa a variável dependente da equação e X a variável independente relacionada ao tempo, B são os valores dos coeficientes da equação fornecidos pelo software.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentadas detalhadamente as etapas principais para o desenvolvimento e a concepção dos subsistemas de injeção (Tipo I e Tipo II), dos seus elementos constituintes, dos moldes (placas e perfil estrutural), da resina, das placas e perfis concebidos, como também, os testes adotados para adequada caracterização e sua consequente validação.

4.1. Desenvolvimento de Equipamentos e Dispositivos para o Processamento por RTM

Para este trabalho foram desenvolvidos dois Subsistemas de Injeção (SSI), um primeiro modelo denominado de SSI Tipo I (provisório) e um segundo de SSI Tipo II (definitivo), fato ocorrido devido as várias oportunidades de melhorias identificadas após testes de validação do primeiro modelo, além das oportunidades de aperfeiçoamento e inovação vislumbradas no decorrer do trabalho.

Todo o detalhamento a respeito dos modelos de SSI estão presentes nos tópicos que se seguem.

4.1.1. Desenvolvimento do SSI Tipo I

Neste, estão presentes e são explanadas detalhadamente todas as etapas do projeto.

Projeto Informacional do Equipamento de Injeção por RTM Tipo I

O desenvolvimento do SSI se dá a partir de uma demanda preliminar, onde os interesses e necessidades do projeto são interpretadas, para então ser iniciada a construção do mesmo.

Visto a necessidade de produzir um equipamento capaz de processar placas compósitas, que permitisse o monitoramento de variáveis como escoamento no interior do molde, vazão da resina, pressão de injeção e permeabilidade, o projeto foi elaborado.

A sistemática para o projeto adotada neste trabalho, consiste em uma divisão em subsistemas do equipamento para processamento de compósitos (Sistema de Injeção) em três partes, as quais estão representadas em formato de estrutura conforme ilustrado na Figura 42.

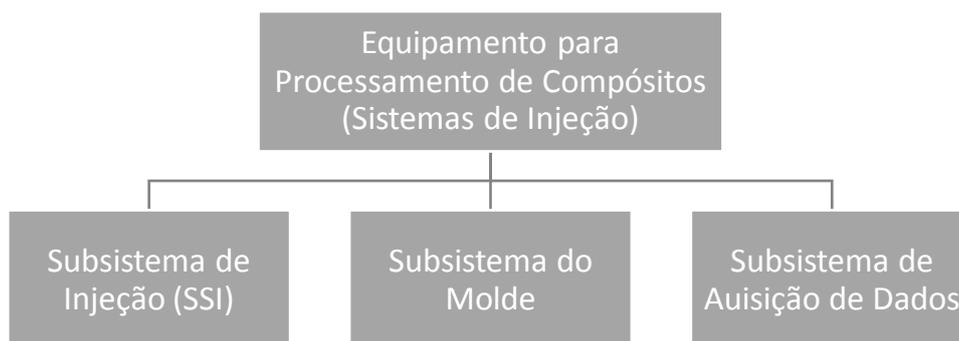


Figura 42 - Estrutura da divisão do Sistema de Injeção.

Observado que a aquisição de um modelo presente nos catálogos de empresas do setor, ou a elaboração de um sistema completo, demandaria de um elevado investimento inicial, originou-se o interesse de elaborar um subsistema capaz de executar com precisão a atividade almejada, isto, em conjunto com uma máquina de ensaios universal, denominada de INSTRON 5582, sendo empregada como estação de processamento e aquisição de dados.

Portanto, a partir dos estudos realizados na fase de projeto informacional, que para o desenvolvimento de um equipamento deste tipo é importante realizar estudo detalhado nos seguintes subsistemas:

- Equipamento de injeção, responsável por transferir a resina até o molde é composto por um sistema de armazenamento de resina. Este equipamento possui mangueiras e conexões para transportar a resina do reservatório de armazenamento até o molde.

- Molde, pois é nele onde as peças vão ser fabricadas;
- Aquisição de dados, a importância de monitorar as variáveis do processo é essencial para este projeto.

Na Figura 43, são apresentados o sistema de aquisição de dados, a máquina de ensaio e o posicionamento onde se localizará o SSI (1), no lugar das garras de ensaio mecânico. Maiores detalhes a respeito das especificações do subsistemas de aquisição de dados e de ensaios INSTRON 5582, podem ser encontradas no ANEXO E.



Figura 43 - Sistema de testes universal INSTRON 5582.

Projeto Conceitual do Equipamento de Injeção por RTM Tipo I

Após análise dos modelos já existentes, o SSI proposto para realizar a injeção de resina no molde é de concepção própria do tipo cilindro-pistão. Os requisitos adotados para o projeto do SSI são:

- Injetar resina suficiente para o completo preenchimento do molde;
- Permitir o controle de uma vazão constante de resina na saída do pistão;
- Não demandar elevados custos.

A composição do SSI é dada conforme apresentado na Figura 44.

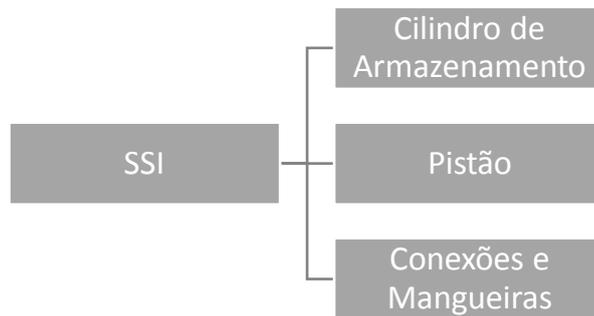


Figura 44 – Composição do SSI.

Os cilindros são comumente adotados na engenharia como meio para transferência de trabalho, ao exemplo da pneumática e da hidráulica, onde para os quais o pistão trabalha linearmente em relação ao eixo de simetria, assim estes devem ser projetados de modo a suportar os efeitos internos aos quais estão sujeitos, como a pressão de trabalho. Deve-se também ter atenção quanto ao acabamento interno, visto que o excesso de atrito reduziria sua vida útil por meio de um desgaste desnecessário, e quanto a seleção dos materiais componentes, ter atenção para que os mesmos sejam inertes quimicamente.

A concepção gerada para o pistão é apresentada na Figura 45.

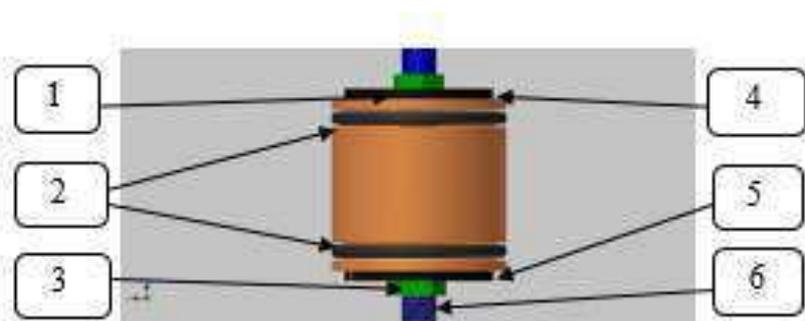


Figura 45– Concepção proposta para o sistema pistão.

Observa-se na Figura 45 que o pistão concebido é composto por uma haste guia (6) que tem com função transportar o pistão ao longo do cilindro de armazenamento. As porcas (1, 3) e as arruelas (4, 5) conferem aperto ao conjunto pistão – haste. Pensando em obter um sistema de vedação eficaz, optou-se por utilizar dois anéis de vedação (2) distanciados simetricamente. A utilização deste tipo de sistema garante também que o curso do pistão não sofrerá oscilações nos eixos X e Y.

A concepção do reservatório de armazenamento do subsistema de injeção é mostrada na Figura 46.

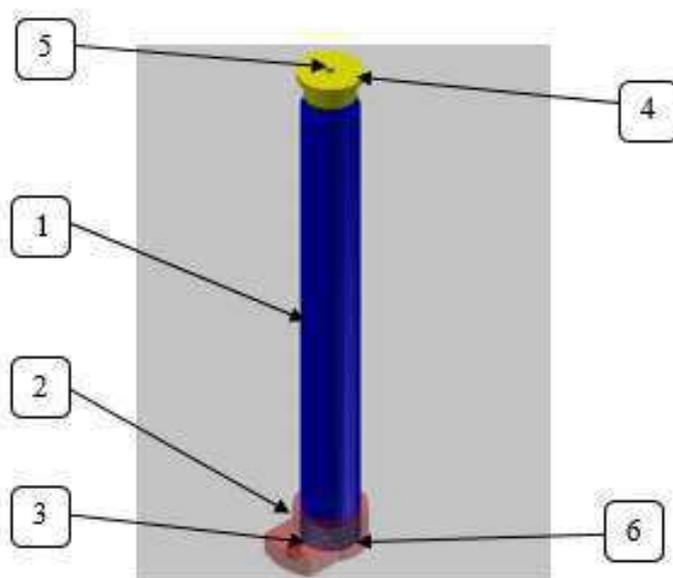


Figura 46 - Concepção proposta para o reservatório de armazenamento.

O cilindro de armazenamento de resina é composto por um cilindro (1) que atuará como o reservatório e tampas que fecham o cilindro para garantir que nenhuma impureza chegue até a resina. Onde a tampa superior (4) possui um furo ao centro (5) por onde a haste que fixa o pistão (haste-guia) possa deslizar facilmente. Esta por sua vez é acoplada ao cilindro por meio de encaixe de pressão. Na tampa inferior (2) existe um furo rosqueado (3) que irá receber a mangueira do sistema (que transporta a resina do reservatório de armazenamento ao molde). A tampa inferior (2) se liga a mangueira de injeção por meio de uma conexão do tipo espigão, e a mesma é ainda acoplada ao reservatório de armazenamento por meio do furo rosqueado (6), para garantir completa

vedação. Estes foi projetado com o auxílio do software Inventor 2013, versão de estudante.

Projeto Preliminar do Equipamento de Injeção por RTM Tipo I

Diversas áreas de engenharia foram utilizadas para se projetar e fabricar o equipamento de injeção por RTM desenvolvido como por exemplo: resistência dos materiais, usinagem, técnicas de desenho geométrico, seleção de materiais, dimensionamento de sistema de vedação do tipo o-ring e elementos de máquinas.

Os materiais selecionados para compor o SSI Tipo I consistem em um pistão proveniente de uma peça cilíndrica de nylon, um cilindro de armazenamento em aço (tubo), assim como a haste e um conjunto de estabilidade constituído de uma luva de nylon e base metálica, com função de evitar que o mesmo sofra deslocamento do eixo de aplicação de força. O resultado do projeto preliminar, além da especificação de outros materiais adotados serão apresentados nas seções seguintes.

Ainda seguindo as indicações da Figura 46, as tampas foram confeccionadas em nylon e o cilindro é composto por um aço-carbono, assim como a haste-guia do pistão, devido apresentarem fácil usinagem e baixo custo, obedecendo os principais critérios de projeto. Ainda foi desenvolvido um conjunto de estabilidade para o processo, munido de uma luva em nylon e uma base em ferro carbono, aos quais são apresentados na construção do protótipo.

Os acessórios necessários ao equipamento consistem basicamente em conexões e mangueiras adotados por Amorim (2007), onde, a mangueira e o bico de injeção (peça que une a mangueira de injeção ao molde) foram selecionados de componentes disponíveis no mercado após uma consulta técnica na empresa Floresta Ltda, (Figura 47).



Figura 47 - Conjunto Conexão-Mangueira.

Na Figura 48, pode-se observar que a mangueira de injeção (1) é do tipo trançada de nylon de $\frac{1}{4}$ '' de diâmetro comumente adotada em linhas de gás, a qual suporta uma faixa de pressão moderada e que devido ao seu baixo custo, permite-se que esta seja descartada após o processo. O bico de injeção é composto de duas partes, um espigão (3) de $\frac{1}{4}$ '' fixo a tampa superior do molde (4) por meio de rosca e um engate rápido (2) de $\frac{1}{4}$ '' fixo na mangueira de injeção por meio de abraçadeira. Estas conexões devem proporcionar facilidade de manuseio e conferir segurança ao sistema, precavendo algum tipo de vazamento durante o processo no equipamento de injeção.

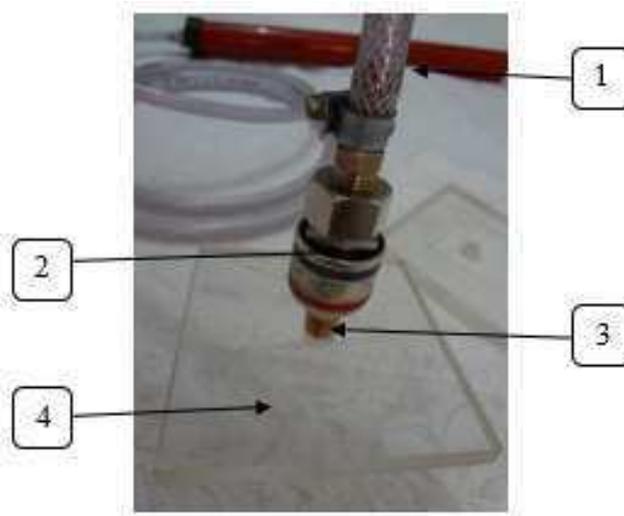


Figura 48 - Conexões utilizadas.

Projeto Detalhado do Equipamento de Injeção por RTM Tipo I

Os desenhos de fabricação do equipamento de injeção por RTM Tipo I estão no ANEXO F.

Construção de Protótipo do Equipamento de Injeção por RTM Tipo I

O equipamento de injeção por RTM Tipo I desenvolvido foi construído com base em consultas técnicas realizadas em diversas empresas: Floresta, Caroca, Cometal, Kromme, Casa dos Retentores, Lojão dos Parafusos e Vinícius Uchôa, todas essas localizadas no município de Campina Grande, Paraíba. As concepções de componentes e subsistemas foram todas efetivamente fabricadas e testadas.

A Figura 49 apresenta o SSI do Tipo I desenvolvido e posicionado, pronto para o início do processo de injeção, no qual é possível observar os principais componentes desse subsistema, como o cilindro de armazenamento (3) que está acoplado à máquina de ensaios mecânicos INSTRON 5582 (1) por meio da haste-guia (2) e de um conjunto de estabilidade (7). A mangueira de injeção (5) conecta-se ao SSI Tipo I e ao bico de injeção (tipo engate rápido), que logo é acoplado ao molde (6). Segue agora a descrição dos componentes do Equipamento de RTM desenvolvidos.



Figura 49 - Equipamento para processamento por RTM.

Na Figura 50 é possível observar vários detalhes do equipamento desenvolvido, como a peça cilíndrica de nylon que foi adotada para a fabricação do pistão de injeção (a), o detalhe do duplo o-ring presente no pistão (b), proporcionando assim um menor desgaste ao sistema devido a redução do atrito durante sua operação, o tubo em aço empregado como cilindro de armazenamento (c), o conjunto de estabilidade constituído de uma luva de nylon e base metálica (d), com função de evitar que o mesmo sofra deslocamento do eixo de aplicação de força, por fim, a figura ainda apresenta a haste em aço (e).

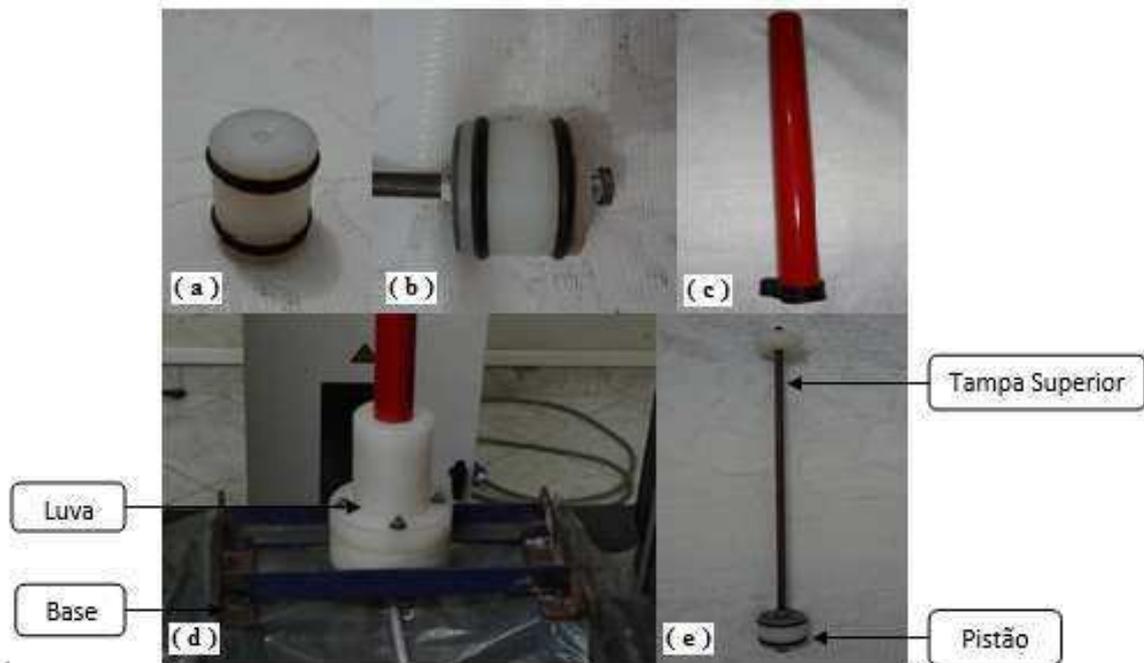


Figura 50- Componentes do sistema de injeção.

Teste e validação do Protótipo do Equipamento RTM

Após a fabricação do equipamento de RTM, foram realizados os testes injeção de resina, através do processamento das placas 1, 2 e 3, além do primeiro perfil estrutural compósito.

Conforme já afirmado, antes de iniciar o processo de infusão da resina, foi necessário configurar a máquina de ensaios mecânicos INSTRON 5582 para trabalhar numa velocidade de deslocamento de 50 mm/min, proporcionando o fluxo de resina constante desejado.

A Figura 51 apresenta a primeira placa compósita processada pelo SSI Tipo I no LaMMEA.



Figura 51 - Placa compósita injetada pelo SSI Tipo I.

4.1.2. Desenvolvimento do SSI Tipo II

Visto que o protótipo inicial (SSI Tipo I) apresentou diversas oportunidades de aperfeiçoamento no projeto que poderiam facilitar o processo e melhorar a qualidade do produto, um novo modelo de subsistema de injeção foi desenvolvido de maneira inovadora e apresentando baixo custo, fatores estes, motivadores do desenvolvimento deste novo subsistema.

Projeto Informacional do Equipamento de Injeção RTM Tipo II

O projeto informacional deste novo SSI, adotou as mesmas diretrizes apresentadas pelo seu antecessor, observado que fatores como a divisão do sistema de injeção e a utilização da INSTRON 5582 como sistema de teste não variaram, assim como seus interesses e necessidades apresentados.

Projeto Conceitual do Equipamento de Injeção RTM Tipo II

Conceitualmente o novo SSI também não apresenta variação quanto aos seus requisitos e a sua composição, formada pelo cilindro de armazenamento, pelo pistão e pelas conexões e mangueiras, porém a adoção de uma nova concepção mecânica.

A nova concepção surgiu como forma de facilitar a montagem e manutenção desse SSI, visto que o tempo para essas atividades eram bastante representativos (dados apresentado posteriormente) e que estas atividades eram árduas e cansativas. Assim o novo SSI consiste de uma montagem simples de peças encaixáveis. Onde na Figura 52 pode-se observar seus elementos constituintes, para o qual estão presentes a placa base (1), a conexão (2), o reservatório (3), a luva (4), o pistão (5) e a chaveta (6).

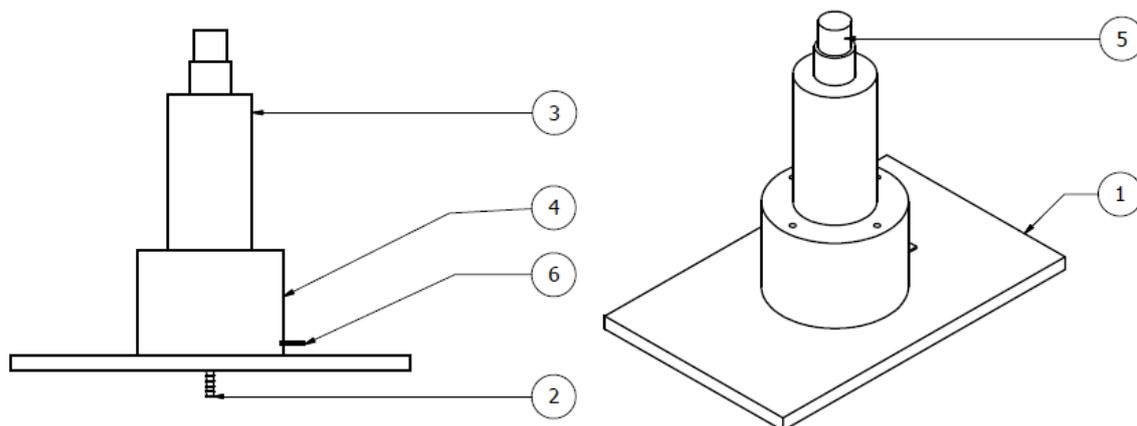


Figura 52 – Concepção do novo SSI.

Apesar de conservar características como área da base do reservatório, volume do reservatório e dimensionamento da conexão de saída de resina do SSI Tipo I, o que possibilita uma analogia entre os SSI por proporcionar características semelhantes no fluxo da resina, fica claro a partir desse novo esboço, que existem variações na concepção do novo SSI, ao qual agora apresenta agora uma placa base que fornecerá o adequado suporte e estabilidade ao sistema quando este posicionado na INSTRON 5582, um pistão de corpo único sem a presença de uma haste e a existência de uma chaveta, que auxilia no processo proporcionando a este um controle sobre início e fim do parâmetro vazão de resina.

Projeto Preliminar do Equipamento de Injeção por RTM Tipo II

Os materiais selecionados para compor o SSI Tipo II consistem de um conjunto de plásticos industriais produzidos pela Nitaplast[®] e comercializados pela empresa local Cometal, associados a fusos, porcas e arruelas. A adoção desses plásticos industriais proporcionam uma maior facilidade de manutenção do sistema devido a resina processada na mesma não apresentar impregnação nestes materiais, oportunidade vislumbrada e posta em prática para este projeto de dissertação. A ideia de utilizar materiais comercialmente conhecidos como Nitanyl[®], Nitacetal[®], Nitalen[®] e Nitapro[®] foi oriunda de uma análise técnica das características apresentada pelos mesmos, onde a partir do uso adequado das propriedades destes, foi possível produzir esse novo SSI com características e qualidades inovadoras. A Tabela 7 pode-se ver a alocação desses materiais de acordo com o tipo de componente do subsistema SSI Tipo II.

Tabela 7 – Alocação dos materiais adotados para cada elemento do SSI Tipo II.

Item	Descrição
1	Placa base (Nitalen [®])
2	Conexão (Nitapro [®])
3	Reservatório (Nitanyl [®])
4	Luva (Nitanyl [®])
5	Pistão (Nitacetal [®])
6	Chaveta (Nitalen [®])

Para a adoção desses materiais no SSI Tipo II, foram levados em consideração parâmetros térmicos como ponto de fusão e condutividade térmica e parâmetros mecânicos como resistência e coeficiente de atrito, estes fornecidos e disponibilizados

no site da empresa (www.nitaplast.com.br), onde todos apresentam características peculiares a sua função no sistema, justificando assim suas escolhas.

Na Figura 53, é possível verificar os detalhes de alguns dos elementos do SSI Tipo II, como a placa base (a), o reservatório de resina (b) e a luva (c), onde ainda são apontados os furos que fazem a fixação do sistema (1 e 4), o furo para encaixe da conexão (2) e os rasgos existentes para passagem da chave (3). Vale ressaltar que um dos furos que servem para realizar a fixação do sistema (4) também foi projetado para servir como guia da chave.

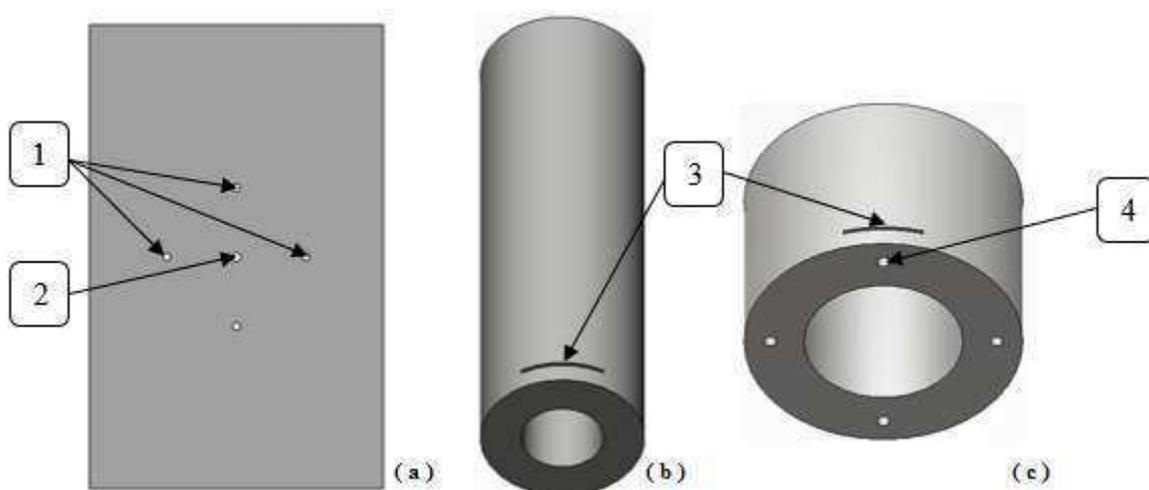


Figura 53 - Detalhes da placa base (a), reservatório de resina (b) e luva (c) do SSI Tipo II.

Já na Figura 54, são apresentados os outros elementos que compõe o subsistema, ilustrando o pistão de injeção (a, c), a conexão desenvolvida (b) e a chave adotada pelo mesmo (d), indicando características específicas como o a região do pistão (1), possibilitando justo encaixe com a INSTRON 5582, detalhe da região do outro extremo do pistão (2), que proporciona a adequada vedação do sistema além de uma redução da área de contato do mesmo com o reservatório sem a necessidade de o-rings, o desenho da área de encaixe da mangueira na conexão (3), seguindo o modelo utilizado no primeiro subsistema e ainda o guia presente na chave (4), que indica o curso a qual a mesma é submetida.

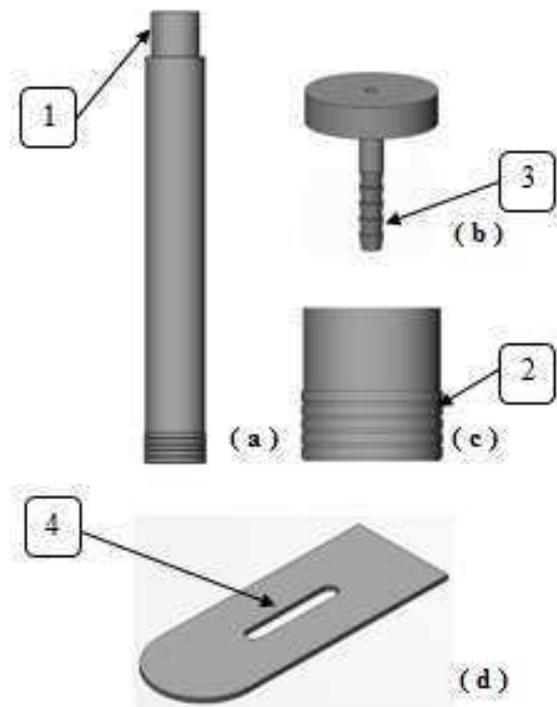


Figura 54 - Detalhes do pistão de injeção (a, c), da conexão (b) e da chaveta (d) do SSI Tipo II.

Assim, a Figura 55 ilustra o subsistema montado a partir do projeto realizado no software computacional Inventor 2013 da Autodesk, versão de estudante.

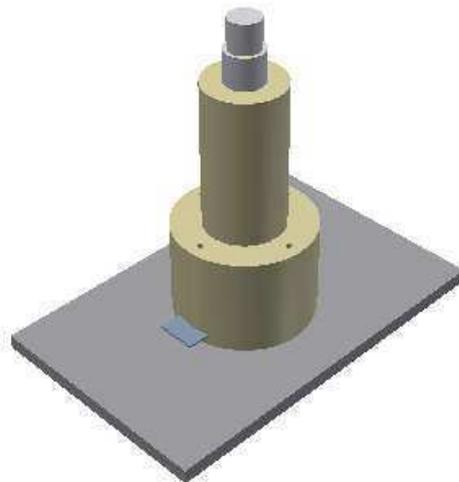


Figura 55 - Esboço do SSI Tipo II montado.

Quanto a um maior detalhamento do desenho do projeto, os ANEXO F e I apresenta um complemento destes detalhes, tais quais suas as cotas de desenho.

A fixação do SSI Tipo II é feita de maneira pratica e rápida por meio de 4 conjuntos de fusos e roscas de 6”, associados a arruelas, que permitem a montagem deste. E no que se refere aos acessórios como mangueira e braçadeiras, estes não apresentaram variação em relação ao projeto do SSI do Tipo I.

Projeto Detalhado do Equipamento RTM;

Os desenhos de fabricação do equipamento de injeção por RTM Tipo II estão no Anexo F.

Construção de Protótipo do Equipamento RTM;

O novo equipamento de RTM também foi desenvolvido e construído com base em consultas técnicas realizadas nas empresas previamente citadas. Assim como no primeiro subsistema, as concepções dos componentes foram todas efetivamente fabricadas e testadas.

A figura 56 apresenta o SSI do Tipo II desenvolvido, pronto para o processo de injeção, no qual é possível observar os principais componentes do equipamento de injeção por RTM, ao exemplo do pistão de injeção (1), do reservatório de resina (2), da chaveta (3) e da placa base (4), assim como detalhado anteriormente.

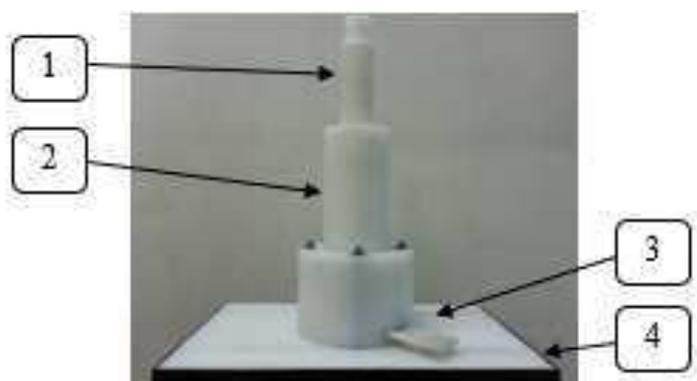


Figura 56 - Novo Equipamento para processamento por RTM.

Teste e validação do Protótipo do Equipamento RTM;

Após a fabricação do novo equipamento de RTM (SSI Tipo II), foram realizados os testes injeção de resina, através do processamento das placas 4, 5 e 6, além do segundo perfil estrutural compósito que serão apresentados nas seções posteriores.

Assim como durante todo o projeto, programação da INSTRON 5582 não sofreu alteração para estes ensaios, atuando com velocidade constante de 50mm/min.

A figura 57 apresenta o segundo perfil estrutural compósito processado nesta dissertação, pelo SSI Tipo II no LaMMEA.

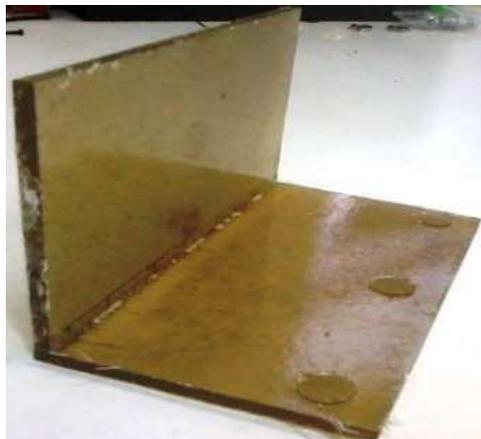


Figura 57 – Perfil estrutural compósito injetado pelo SSI Tipo II.

4.2. Desenvolvimento dos Moldes

Para esta etapa do trabalho, os moldes transparentes são fundamentados a partir do trabalho de Garay (2007), para os quais foram elaborados segundo fluxograma apresentado na Figura 29, que retrata o passo a passo para o projeto, estes foram elaborados com o auxílio do software Inventor 2013 da Autodesk, versão de estudante.

4.2.1. Molde Placa RTM Tipo I (MP1)

Conforme foi definido no projeto inicial, o molde foi projetado para a fabricação de um compósito na forma de placa, para o qual foram geradas duas concepções de moldes. A primeira concepção (Figura 58) tinha a finalidade de testar conceitos como: sistema de vedação, ponto de injeção e saída da resina, como também testar o material selecionado e seu processo de usinagem.

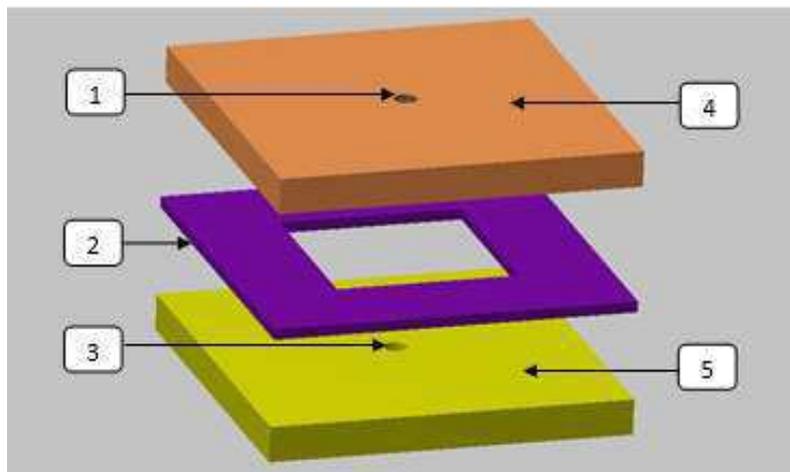


Figura 58 - Primeira concepção proposta para o molde de RTM.

O molde proposto é composto por três placas paralelas: a placa inferior (5) servirá de base para o molde, placa superior que fecha o molde (4), e outra placa em forma de moldura (2), que servirá de cavidade para a pré-forma. A fixação das placas ocorre por meio de parafusos (furos não mostrados na figura). Os furos (1) e (3) são os pontos de entrada de resina e saída de ar, respectivamente, sendo o primeiro com rosca interna onde será acoplada a mangueira de injeção.

A Figura 59 (a, b) apresenta o primeiro protótipo do molde de injeção fabricado para os testes iniciais relacionados à vedação, desmoldagem do compósito, usinagem de materiais e visualização do escoamento.



Figura 59 - Primeiro molde fabricado.

Foi projetado e fabricado um novo protótipo de molde a partir dos resultados deste, o que caracteriza o projeto de MP1 como de caráter conceitual.

4.2.2. Molde Placa RTM Tipo II (MP2)

A segunda concepção de molde RTM Tipo II (MP2) foi gerada e é mostrada na Figura 60, apresentando as variações que não foram encontradas em M1, onde MP2 possui além das placas superior e inferior (2) e a moldura para a placa compósita (1), uma placa base (3). MP2 ainda atende à necessidade de uma melhor vedação, fator que não foi atendido com eficácia na primeira concepção.

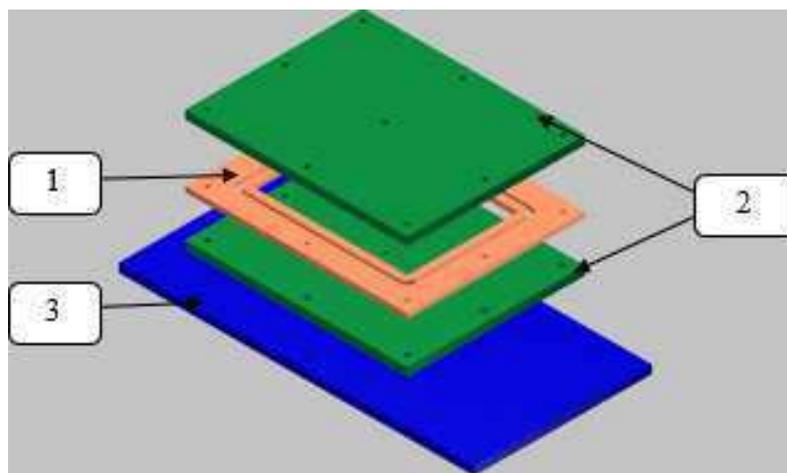


Figura 60 - Segunda concepção proposta para o molde de RTM.

Para uma mais adequada vedação, foi projetado um esquema de montagem conforme Figura 61 detalha, onde as duas molduras (1 e 2) formam uma cavidade (A), a qual é acoplado a um anel do tipo o-ring para promover uma adequada vedação entre a moldura e as superfícies superior e inferior das placas. A partir da adoção deste, fez-se necessário então, um arredondamento nos vértices de contato das molduras (1 e 2), em formato de arco, o qual foi dimensionado com base no diâmetro da seção transversal do anel o-ring, possuindo este arco o dobro do diâmetro do anel de vedação. O ANEXO G apresenta o projeto de forma detalhada.

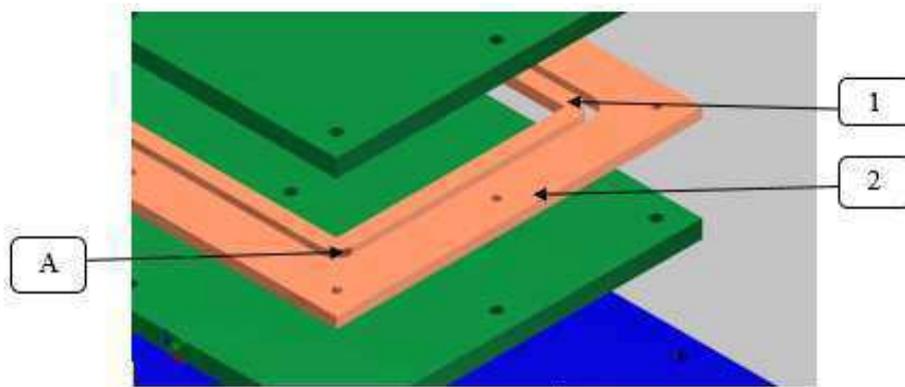


Figura 61 - Detalhe da solução proposta.

A Figura 62 apresenta MP2 construído e montado (c), para o processamento das placas compósitas, já com as camadas da manta de fibra de vidro. O molde MP2 foi usinado a partir de corte a laser de alta precisão pela gráfica Kromme, localizada no município de Campina Grande-PB, método que permite realizar a usinagem do acrílico com agilidade e o mínimo de desperdício.

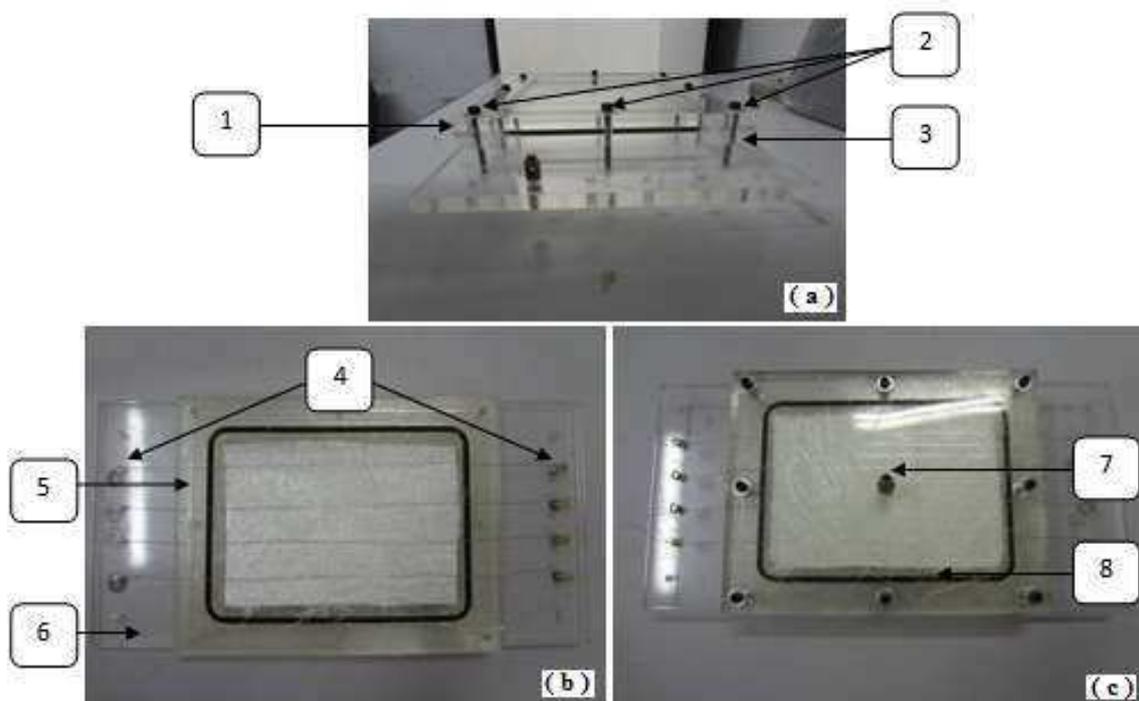


Figura 62 – MP2 fabricado (a, b) e montado (c).

Assim, o molde MP2 é constituído por placa superior (1) e placa inferior (3), por uma placa intermediária (Moldura) (5), e por uma placa de base (6). Estas placas serão fixadas umas às outras por meio de 8 parafusos allen 3/16'' (2), que também auxiliam na vedação do molde, pressionando o anel o-ring (8). O Molde Tipo 2 foi utilizado para a injeção da placa 1, apresentada em seção posterior.

4.2.3. Molde Placa RTM Tipo III (MP3)

Diferenciado unicamente pelo fato de a placa inferior do molde apresentar 4 furos simétricos nos eixos X e Y, ao invés de um único furo central, o molde denominado de MP3 foi desenvolvido, visando proporcionar uma melhor saída de ar do molde e conseqüentemente uma menor resistência a infusão da resina, melhorando a sua distribuição e reduzindo assim o número de vazios nos compósitos processados. A Figura 63 apresenta em detalhe os furos na placa inferior do molde M3 e o ANEXO H apresenta seu detalhamento.

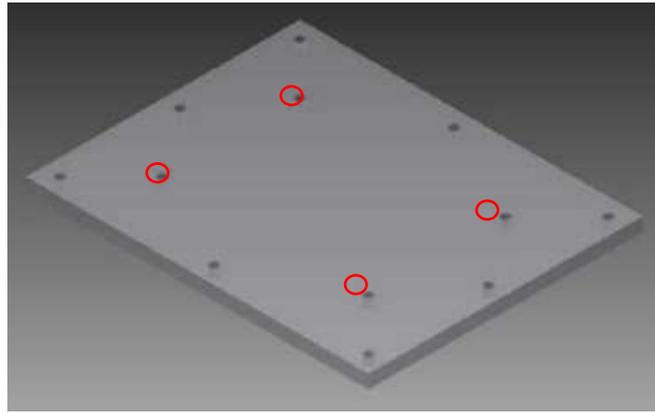


Figura 63 - Placa Inferior de MP3 com 4 saídas de ar.

A Figura 64 apresenta os detalhes para a placa base de MP3 com 4 furos de saída de ar no projeto (a) e na placa concebida (b).

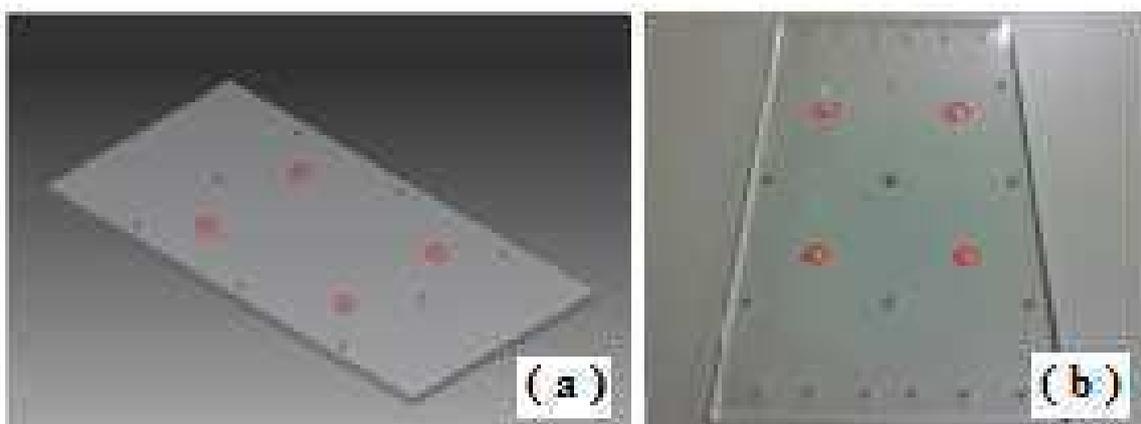


Figura 64 - Modificação Realizada na Base do Molde.

Conforme a Figura 65 pode-se verificar como se apresentam as duas placas inferiores, para MP2 e MP3, onde se tem a esquerda a placa inferior de MP3, com quatro furos e a direita a placa inferior de MP2, com um furo.

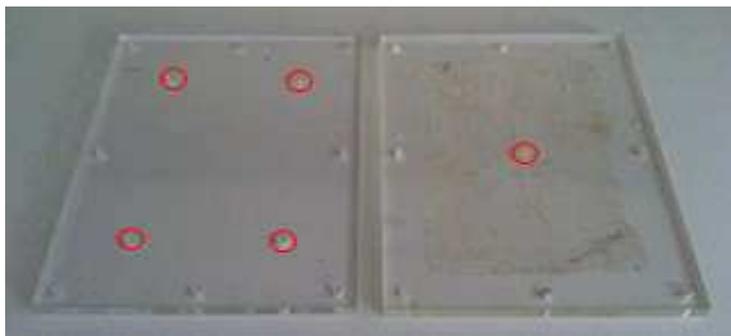


Figura 65 - Apresentação da Diferença entre as Placas Inferiores dos Moldes MP2 e MP3.

Faz-se importante citar que todas as placas são de acrílico translúcido com espessura de 10mm, com exceção da moldura, que por sua vez possui a mesma espessura da placa compósita em produção, 5mm.

O molde MP3 foi utilizado para a injeção das placas compósitas 2, 3, 4, 5 e 6, apresentadas em seções posteriores.

Falha na Moldura do Molde

Após a injeção de terceira placa, ficou visível a fragilidade apresentada pela moldura de acrílico adota, diferentemente do restante dos componentes do molde, fato ocasionado pela considerável diferença de espessura entre estas. A Figura 66 (1 e 2) apresenta o detalhe da moldura de acrílico danificada após o repetidos processo de injeção de resina.

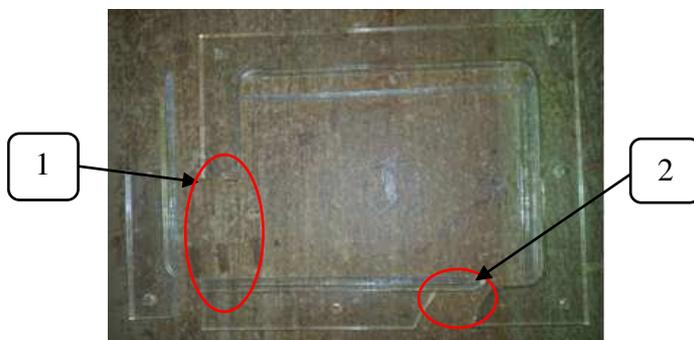


Figura 66 - Moldura de acrílico danificada.

Oriundo do desgaste da moldura e visando inovar no material utilizado no molde, uma nova moldura de Nitanyl[®] foi desenvolvida e testada (obedecendo projeto original). Visto que a mesma não alteraria os resultados e não influenciaria na análise da permeabilidade, os teste foram realizados. A nova moldura pode ser observado na Figura 67 (1). Essa nova moldura foi utilizada para a fabricação da Placa 6 (2) compósita, que é apresentada em seção posterior.

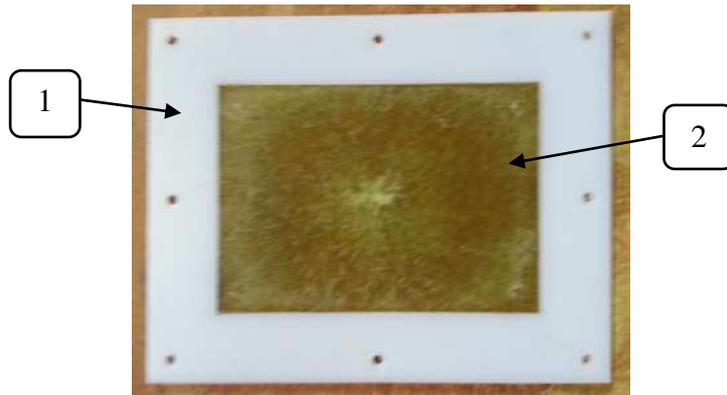


Figura 67 - Moldura do molde de Nitanyl[®].

Fica observado que a não impregnação da resina no Nitanyl[®] capacitou ainda desenvolver um novo molde, apresentado na seção a seguir.

4.2.4. Molde Placa RTM Tipo IV (MP4)

Verificada a possibilidade de utilização do Nitanyl[®] para a confecção da moldura do molde, foi desenvolvido um novo molde RTM, denominado de MP4, ao qual obedece o dimensionamento do desenho técnico do seu antecessor (MP3), contudo, com a utilização do novo material (Nitanyl[®]) (1) no lugar do acrílico e com as quatro saídas de ar na placa superior do molde (2), isto, devido a facilidade impunha ao operador do processo quanto as etapas de desmoldagem da placa e manutenção do molde. Sua validação é realizada a partir dos experimentos efetuados com o SSI Tipo II e com a moldura no processo de injeção da Placa 6. A Figura 68 apresenta a disposição do novo molde a partir das vistas superior (a) e lateral (b).

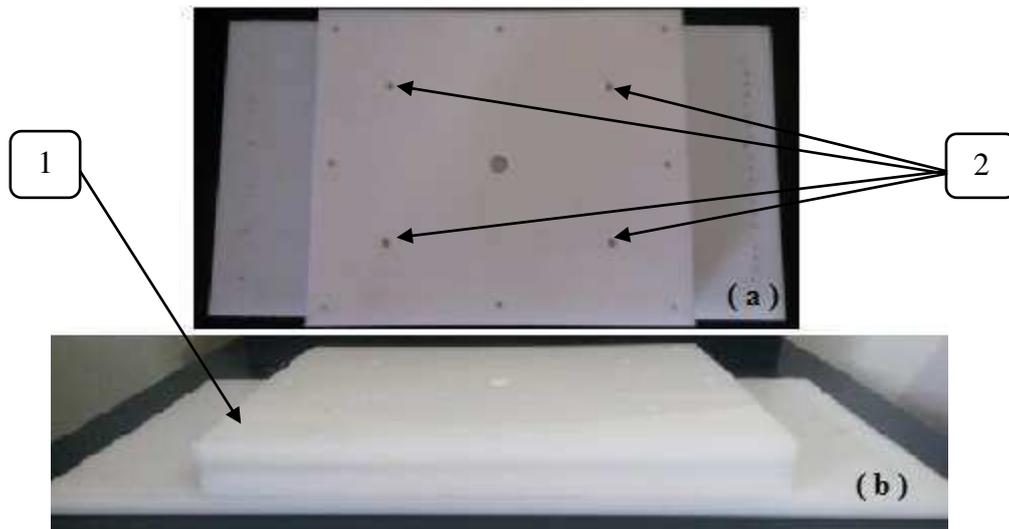


Figura 68 – Vistas superior (a) e Lateral (b) do Molde RTM MP4.

4.2.5. Molde Perfil Estrutural (MPE)

Por permitirem a confecção de elementos estruturais mais complexos (Figura 69), a partir da associação com as placas, o desenvolvimento de um perfil estrutural em material compósito foi desenvolvido, onde inicialmente optou-se por produzir um molde de teste (Perfil Estrutural I) visando a aquisição de um mínimo de experiência a respeito do seu processamento, em termos dos parâmetros da injeção, além de validação da geometria e estanqueidade, para só então pode-se ser produzido esse elemento de forma definitiva (Perfil Estrutural II).

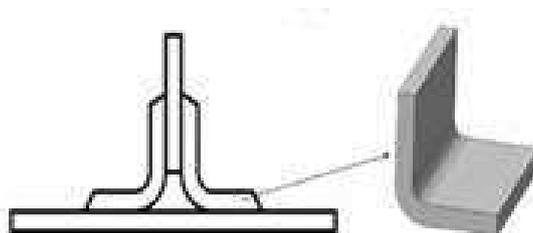


Figura 69 – Modelo de associação do perfil com a placa.

Molde Perfil Estrutural 1 (MPE1)

As dimensões do Perfil Estrutural 1 produzido para teste foram 48x60x100x3mm, conforme Figura 70.

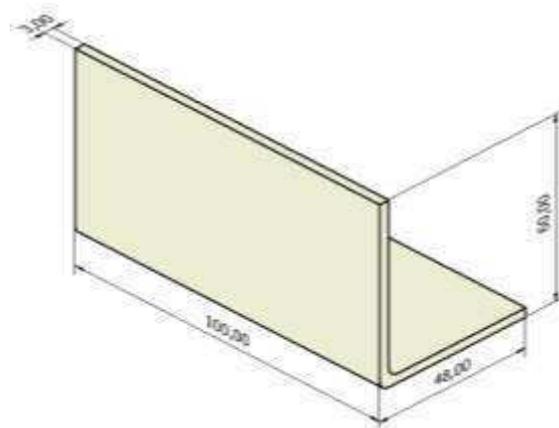


Figura 70 - Dimensões do Perfil Estrutural para teste.

A geometria proposta pelo molde consiste em duas formas em L espaçadas conforme espessura da peça (Figura 71). Nas laterais placas de borracha associadas a pequenas chapas de aço (a, b) foram empregadas, possibilitando o adequado fechamento do molde (d).

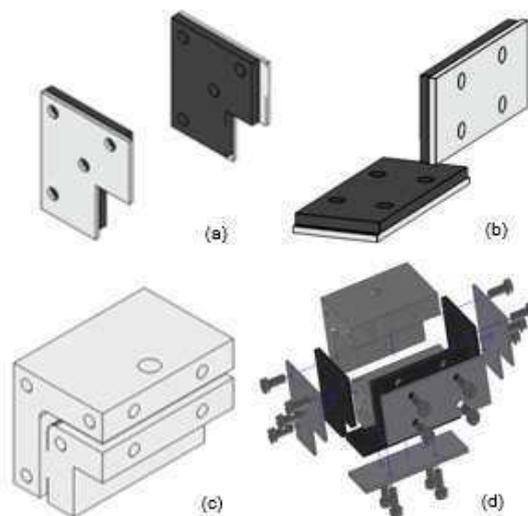


Figura 71 - (a) Selamentos laterais; (b) Selamentos frontal e inferior; (c) Elementos da geometria em L; (d) Molde de teste em vista explodida.

Contando com o auxílio da ferramenta computacional (*Mold Desing*), foi possível determinar o ponto ideal de injeção (c), sendo este definido no centro da peça e a 15 mm de sua face vertical. A Figura 72 esboça a localização do ponto de injeção no perfil composto processado por RTM.

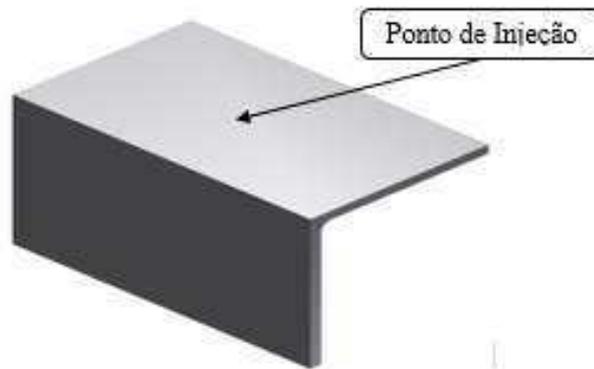


Figura 72 - Ponto de Injeção do MPE1.

Na fabricação do molde teste, produzido em plástico ABS, foi empregada a tecnologia de prototipagem rápida através da impressora 3D Dimension Elite, disponível no LaMMEA e conforme apresentado na Figura 73.



Figura 73 - Formatos em L do molde produzidos com a tecnologia de prototipagem rápida.

A Figura 74 mostra o MPE1 montado (a), como também apresenta o bico injetor com válvula esférica foi empregado (b), visando o controle do tempo de injeção de resina além de evitar o fenômeno da capilaridade.



Figura 74 - (a) Molde montado; (b) Molde com bico injetor.

Molde Perfil Estrutural 2 (MPE2)

A partir dos resultados e da experiência obtida a partir da injeção realizada no MPE2, partiu-se para o projeto de um molde definitivo, aprimorado a partir do anterior.

O projeto de MPE2 (Figura 75) disponibiliza ao processo uma variada gama de combinações no que se refere a posição de injeção e posição da saída de ar do molde, visto que este molde conta com seis desses pontos, porém, de acordo com ferramenta computacional de auxílio (*Mold Desing*), o ponto ideal de injeção se apresenta semelhante ao do MPE1.

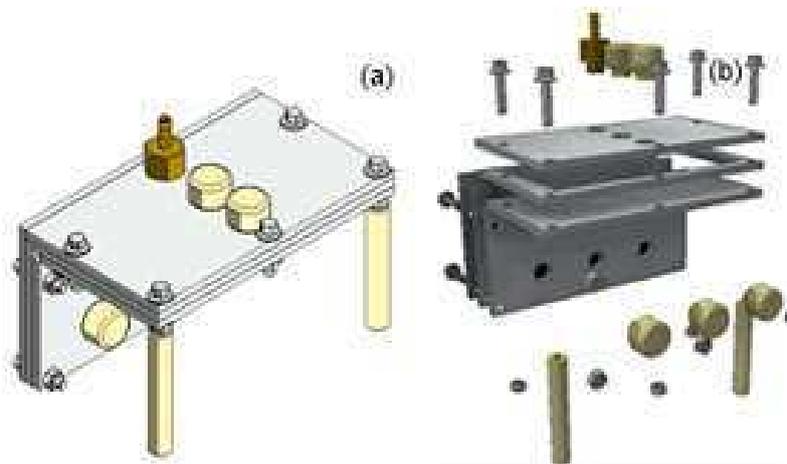


Figura 75 - (a) Molde definitivo; (b) Vista explodida com os pontos de entrada e/ou saída.

Desenvolvimento do Suporte para o Molde

Visando facilitar a operação do processo, um suporte para o molde foi desenvolvido (Figura 76), possibilitando uma melhor ergonomia ao operador, seu desenho técnico pode ser visualizado no ANEXO J desta dissertação e o benefício do uso desse suporte ao processo é apresentado em forma de redução de tempo de operação (detalhes no tópico 4.6).



Figura 76 - Suporte para Molde.

4.3. Estudos para Definição do Sistema de Resina a ser Usado no Processamento por RTM

Conforme já afirmado no decorrer desta dissertação, a resina poliéster adotada foi desenvolvida com intuito de avaliar alguns critérios apresentados pelo fabricante (ANEXO B), onde inicialmente, na Tabela 8, é possível verificar os resultados provenientes da variação na composição resina/acelerador, como temperatura máxima atingida durante o processo de cura, além dos novos tempos de trabalho durante fase de gel.

Tabela 8 – Análise da resina a partir da variação do % de catalisador.

Amostra	% Volume Catalisador	Temperatura máxima (°C)	Tempo de gel (min)
A	0,5	76,2	18'04''
B	1,0	89,9	10'48''
C	2,5	193,1	6'39''
D	5,0	205,4	4'12''

Conforme verificado no catálogo do fabricante da resina, para as condições ambiente, com 1% do volume de catalisador, os critérios de temperatura máxima e tempo de gel foram atingidos.

Já para as variações do percentual de catalisador, se faz necessário uma análise dos resultados, visto que, para uma redução desse percentual de catalisador, se ampliaria o tempo de trabalho com a resina, que conseqüentemente acarretaria em uma diminuição na taxa de produção, enquanto que para o aumento desse percentual, além de ocorrer o inverso, a resina apresenta um aumento considerável das temperaturas máximas obtidas durante essa fase, atingindo valores próximos a sua temperatura de autoignição (285°C).

Também foram realizados ensaios de DMA e DSC para a resina após processo de cura, devido a disponibilidade de ambos os equipamentos no laboratório, e como forma de validar os resultados obtidos para a T_g do material identificada.

Também foram realizados ensaios de DMA e DSC para a resina após processo de cura, e como forma de obter a T_g da mesma.

Para o primeiro ensaio DMA, partindo da temperatura ambiente (25°C), a Figura 77 apresenta os resultados do ensaio, onde utilizando o método das tangentes, o valor da T_g obtido é de 72,51°C.

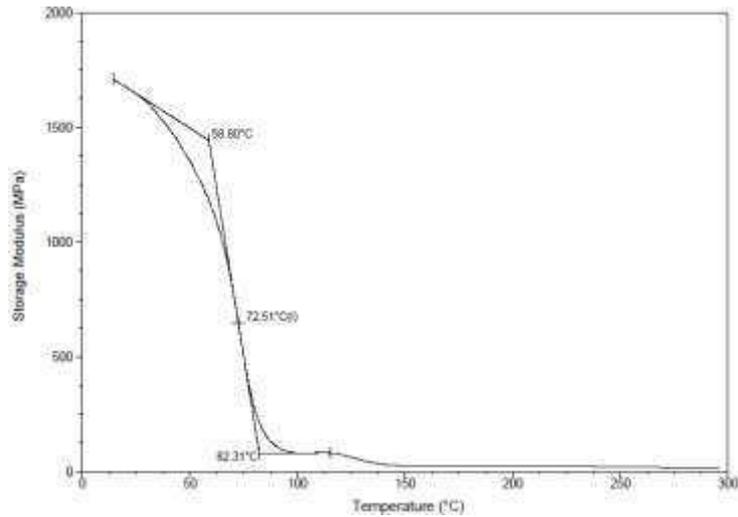


Figura 77 – Ensaio DMA para a primeira amostra, sem influência do fluido refrigerante.

Já a Figura 78, através do mesmo método (DMA), fica identificado para o material uma T_g de $66,62^\circ\text{C}$, apresentando variação para o valor desse parâmetro do material devido este ensaio partir de uma temperatura inferior a ambiente (9°C), transmitindo ao método uma maior confiabilidade pôr o gráfico se apresentar de forma mais regular e ampla, o ambiente é gerado devido a um pré tratamento da câmara de teste com aplicação de um fluido refrigerante.

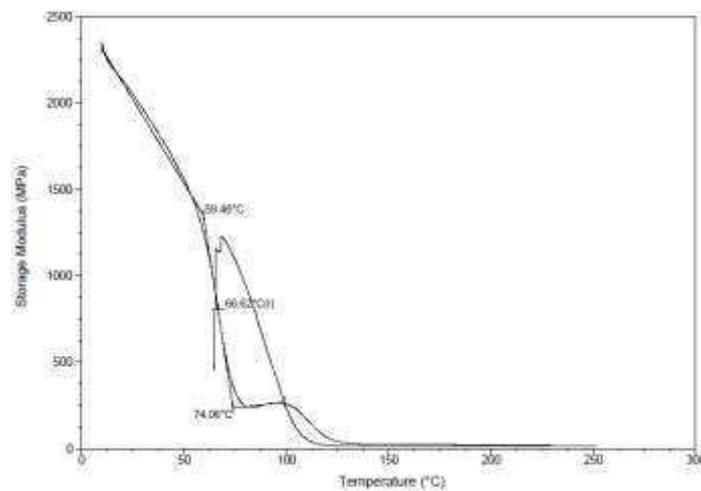


Figura 78 – Ensaio DMA para a segunda amostra, com influência do fluido refrigerante.

O ensaio realizado no DSC confirma a expectativa da T_g obtida pelo DMA, onde para este o seu valor foi de $62,56^\circ\text{C}$ e está apresentado na Figura 79.

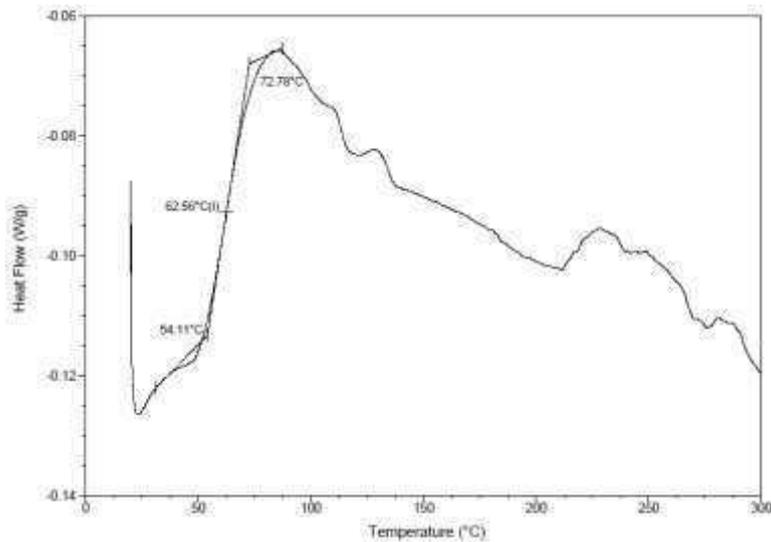


Figura 79 – Ensaio DSC realizado para amostra da resina.

Dessa forma, para a resina utilizada neste trabalho, adotando 1% do volume de catalisador, os valores dos parâmetros temperatura máxima, tempo de gel e T_g são respectivamente 89,9°C, 10'48" e 64,59°C.

Teste para Medição de Variação de Temperatura no Molde

Nesta etapa, termopares tipo K foram posicionados no interior do molde, na parte superior e inferior, para avaliar o comportamento da variação de temperatura apresentado durante o processo de preenchimento da placa pela resina, possibilitando assim verificar um possível gradiente gerado no eixo da espessura da placa (eixo z), porém os resultados de leitura dos termopares comprovam que estes não apresentam variação, portanto, para critérios de avaliação do processo, este gradiente é desconsiderado.

4.4. Tempo Total de Processamento dos Compósitos Fabricados

Tendo em consideração que o tempo de processamento dos compósitos afetam diretamente na taxa de produção, a qual é um dos focos proposto para este trabalho, visto que se enquadra no desenvolvimento da capacitação do processamento desses materiais, as tabelas que se seguem servem para mostrar a evolução que o processo de injeção por RTM sofreu com as alterações no projeto e no processo.

As tabelas apresentadas nessa seção mostram as variações dos tempos de operações para as atividades em molde aberto e molde fechado, sendo adotadas as tabelas para processamento da Placa 1 (Tabelas 9 e 11) e Placa 6 (Tabelas 10 e 12), como explanação comparativa dessa evolução.

A Tabela 9 apresenta o tempo necessário para realizar as atividades de molde fechado para a Placa 1.

Tabela 9 - Atividades de molde fechado Placa 1.

Atividade		Tempo (s)
Molde	• Posicionar o molde;	300
	• Nivelar bancada do molde.	160
SSI	• Montar SSI (Tabela 10);	240
	• Posicionar SSI na INSTRON 5582;	220
	• Posicionar pistão do SSI;	

Processo	• Fixação da mangueira no SSI e no molde;	240
	• Preparar vedação das saídas de ar;	180
	• Verificar programação da INSTRON 5582;	180
	• Posicionar reservatório de descarte;	30
	• Posicionar câmera;	30
	• Preparar resina;	360
	• Inserir a resina no SSI;	80
	• Iniciar programação da INSTRON 5582;	60
	• Acompanhar injeção da resina no molde;	300
	• Pausar injeção após preenchimento completo do molde;	20
	• Vedar saídas de ar do molde;	60
	• Cortar mangueira;	20
	• Vedar mangueira;	60
	• Terminar curso do pistão (evitar cura de resina no SSI);	180
Tempo Total (s)		2720

Para a Tabela 10, são considerados os tempos das atividades realizadas com o molde aberto para a Placa 6.

Tabela 10 - Atividades de molde fechado Placa 6.

Atividade		Tempo (s)
Molde	• Posicionar o molde;	90
	• Conferir nível da bancada do molde.	90
SSI	• Montar SSI (Tabela 11);	
	• Posicionar SSI na INSTRON 5582;	180
	• Posicionar pistão do SSI;	30

Processo	• Fixação da mangueira no SSI e no molde;	240
	• Preparar vedação das saídas de ar;	180
	• Verificar programação da INSTRON 5582;	180
	• Posicionar reservatório de descarte;	30
	• Posicionar câmera;	30
	• Preparar resina;	360
	• Inserir a resina no SSI;	80
	• Iniciar programação da INSTRON 5582;	60
	• Acompanhar injeção da resina no molde;	300
	• Pausar injeção após preenchimento completo do molde;	20
	• Vedar saídas de ar do molde;	60
	• Cortar mangueira;	20
	• Vedar mangueira;	60
	• Terminar curso do pistão (evitar cura de resina no SSI);	180
Tempo Total (s)		2190

Inicialmente já pode-se observar a variação no posicionamento do molde, redução oriunda a existência do suporte do molde projetado, este que também influenciou no nivelamento deste. Para o posicionamento do pistão do SSI na INSTRON 5582, o projeto de encaixe do pistão fez desnecessária a utilização de uma base de contato superior, excluindo assim sua montagem, enquanto que o SSI Tipo II, agora em corpo único, também excluiu a atividade de posicionamento da antiga base metálica. Para o processo, as alterações foram desconsideradas, porém ficou apresentado para estas atividades uma redução de 530s (8,33min) ou 19,49%, onde o tempo total para o processamento da Placa 1 foi de 2720s (45,33min) e para a Placa 6, foi de 2190s (36,5min).

A Tabela 11, assim como a Tabela 9, se refere ao tempo de execução das atividades para o processamento da Placa 1, porém, agora em referência as atividades realizadas com molde aberto.

Tabela 11 - Atividades de molde aberto Placa 1.

Atividades		Tempo (s)
Montagem do Molde	• Limpeza do molde;	600
	• Aplicar elemento desmoldante;	720
	• Ajustar elemento desmoldante;	240
	• Cortar manta;	520
	• Posicionar camadas da manta no molde;	240
	• Fechar sistema com parafusos;	300
	• Conferir aperto dos parafusos;	220
Montagem do SSI	• Fixar SSI;	200
	• Fixar mangueira no SSI e no molde;	220
	• Conferir aperto da fixação.	40
Processo de injeção	• Observar processo na Tabela 8.	
Desmoldagem da placa	• Remover parafusos;	660
	• Remover placa processada;	340
	• Remover elemento desmoldante.	180
Manutenção do molde	• Remover resina sobressalente;	1200
	• Remover elemento desmoldante;	540
	• Reabrir furo da entrada da resina;	140
	• Reabrir saídas de ar.	340
Manutenção do SSI	• Desmontar SSI;	200
	• Remover resina sobressalente;	1800
	• Reabrir conexão.	60
Tempo Total (s)		8760

A Tabela 12 apresenta os novos tempos de processamento, das atividades de molde aberto, aferidos durante o processamento da Placa 6, levando em consideração o tempo corte (*) e posicionamento da manta (**) aferido para o processo da Placa 5, visto que sua ausência afetaria diretamente na analogia das atividades.

Tabela 12 - Atividades de molde aberto Placa 6.

Atividades		Tempo (s)
Montagem do Molde	• Limpeza do molde;	420
	• Aplicar elemento desmoldante;	480
	• Ajustar elemento desmoldante;	240
	• *Cortar manta;	520
	• **Posicionar camadas da manta no molde;	240
	• Fechar sistema com parafusos;	300
	• Conferir aperto dos parafusos;	220
Montagem do SSI	• Fixar SSI;	240
	• Fixar mangueira no SSI e no molde;	180
	• Conferir aperto da fixação.	40
Processo de injeção	• Observar processo na Tabela 9.	
Desmoldagem da placa	• Remover parafusos;	660
	• Remover placa processada;	340
	• Remover elemento desmoldante.	180
Manutenção do molde	• Remover resina sobressalente;	940
	• Remover elemento desmoldante;	180
	• Reabrir furo da entrada da resina;	140
	• Reabrir saídas de ar.	340
Manutenção do SSI	• Desmontar SSI;	240
	• Remover resina sobressalente;	300
	• Reabrir conexão.	60
Tempo Total (s)		6260

Durante a montagem do molde é possível se verificar que as atividades de limpeza do molde e aplicação do elemento desmoldante, já proporcionaram uma considerável redução no tempo de trabalho, estes justificados principalmente pela mudança do elemento desmoldante, deixando de ser utilizado fita adesiva, para ser utilizado filme adesivo, o que reduz consideravelmente o trabalho de aplicação, além de

evitar que um excesso de resina entre em contato com o molde, fato que amplia a tarefa de limpeza do molde. Durante a montagem do SSI, apesar de não apresentar diferença nos tempos de trabalho, a atividade passou a ser mais simples, facilitando o acesso para a fixação da mangueira, embora necessitando o encaixe dos elementos para o SSI Tipo II, vale salientar que a fixação de ambos os subsistemas é realizada por 4 conjuntos de fusos, porcas e arruelas. Para a desmontagem da placa, não foram verificadas alterações, enquanto que para a manutenção do molde, mais uma vez a mudança do elemento desmoldante foi fundamental, visto também a sua facilidade empregada para a sua devida remoção, além de reduzir a quantidade de resina impregnada ao molde ao final da operação.

A grande vantagem que também motivou o desenvolvimento desse novo SSI, está principalmente relacionada a redução do tempo necessário para sua manutenção, visto que, por se tratar de um sistema facilmente desmontável, se fez capaz facilitar a operação de remoção de resina sobressalente no mesmo, vale ainda destacar, que o fato de o material empregado para a produção do novo SSI também influencia drasticamente neste tópico, devido não proporcionar impregnação entre a resina e o SSI Tipo II.

Assim, é possível verificar uma redução de 2500s (41,66min) ou 28,54% nas atividades de molde aberto, tendo em vista que para a Placa 1 foram necessários 8760s (146min), enquanto que para a Placa 6 foram necessários 6260s (104,34min).

Somando os tempos totais das atividades de molde aberto, com as atividades de molde fechado, a redução foi da ordem de 26,4%, sendo de 3030s (50,5min). Ainda se faz válido observar que a utilização do Molde 6, faria desnecessário a utilização do elemento desmoldante, por não apresentar impregnação de resina no tipo de material adotado, reduzindo o número de atividades e conseqüentemente o tempo de operação total.

4.5. Caracterização das Placas Compósitas processadas pelos equipamentos de injeção de RTM desenvolvidos

A caracterização das placas compósitas produzidas se subdivide em tópicos, apresentando as características destas, ao exemplo do dimensionamento, peso, densidade, análise óptica, processo de injeção, permeabilidade e ensaio destrutivo. É importante expor que o parâmetro tempo de injeção é uma variável que não apresenta variações consideráveis, visto a existência de um padrão para o procedimento de injeção das placas, as quais como já afirmado, obedece uma programação e a um cronograma.

Variação dimensional das placas compósitas processadas

Este tópico apresenta introdutoriamente imagens referentes a atividade de retifica que se fez necessário realizar as placas, com intuito de remoção do excesso de resina nas laterais das placas, onde conforme as Figuras 80 e 81, pode-se observar o exemplo da placa 1 pré e pós retificação.



Figura 80 – Placa 1 pré retificada.



Figura 81 - Placa 1 pós retificada.

Os valores dimensionais médios obtidos pelas 6 placas compósitas produzidas se encontram na Tabela 13 (Onde o SSI adotado, assim como o molde e disposição de injeção estão apresentados na Tabela 15).

Tabela 13 – Verificação dimensional das placas compósitas.

Placa	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)
01	174,43	124,90	4,87
02	174,31	124,37	4,91
03	173,98	124,98	4,82
04	174,01	124,63	4,89
05	174,92	125,00	5,00
06	174,86	124,97	4,99

Visto que, por se tratar de um molde rígido, estas não apresentaram variação (175x125x5mm com volume total de 109.375mm³ ou 109,375cm³) significativas, porém, para efeito de cálculos futuros, estas foram adotadas.

Peso e Densidade

A Tabela 14 é composta pelas respectivas características de peso e densidade obtidas para cada placa.

Tabela 14 – Peso e densidade das placas compósitas processadas.

Placa	Peso (g)	Densidade (g/cm³)
01	151,841	1,4311

02	153,987	1,4466
03	149,812	1,4294
04	154,215	1,4542
05	158,197	1,447
06	96,726	0,887

Relacionado as placas de 1 a 5, estas apresentaram boa concordância quanto ao peso individual de cada, observado que a maior variação foi de 5,3% do peso. Vale lembrar que a Placa 6 é composta unicamente pela matriz polimérica, critério adotado para efeito de analogia, por isso apresentasse em discrepância como restante das outras.

Caracterização Microestrutural e Superficial

A Figuras neste tópico apresentam a caracterização microestrutural realizada, através da análise óptica dos poros, como também, a caracterização da qualidade superficial das placas, através das imagens registradas.

Na Figura 82, referente a Placa 1, é possível verificar a existência de vazios diversos micro vazios, com até 2 mm de espessura.



Figura 82- Fotografias microscópica ópticas digitais da placa 1.

Já para a Placa 2, os vazios apresentaram-se com dimensões semelhantes, porém com menor índice de micro vazios, fator visível na Figura 83.

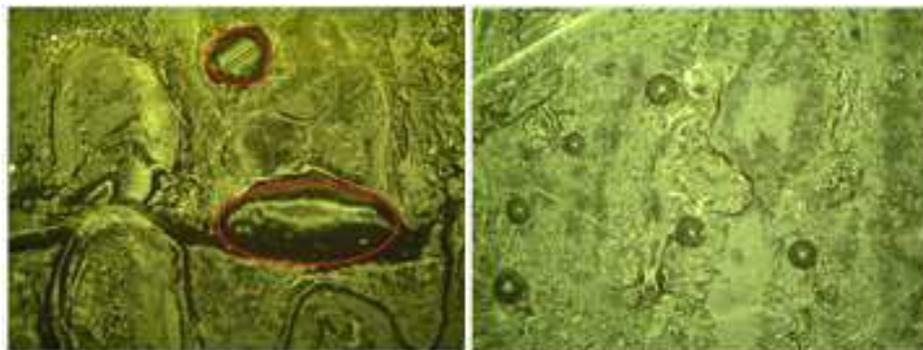


Figura 83 - Fotografias microscópica ópticas digitais da placa 2.

Para as Placa 3 e 4, não foram verificadas a existência de vazios superiores a 0,5 mm de espessura, porém para a placa 4, uma região apresentou uma sequência destes, conforme apontado na Figura 84.

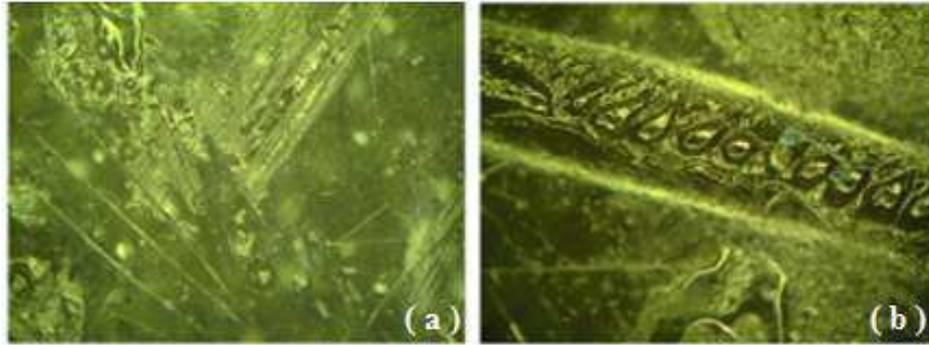


Figura 84 - Fotografias microscópica ópticas digitais das placas 3 (a) e 4 (b).

Na Figura 85, pode-se observar que a Placa 5 apresentou de forma melhor distribuída, com menor proporção de vazios.

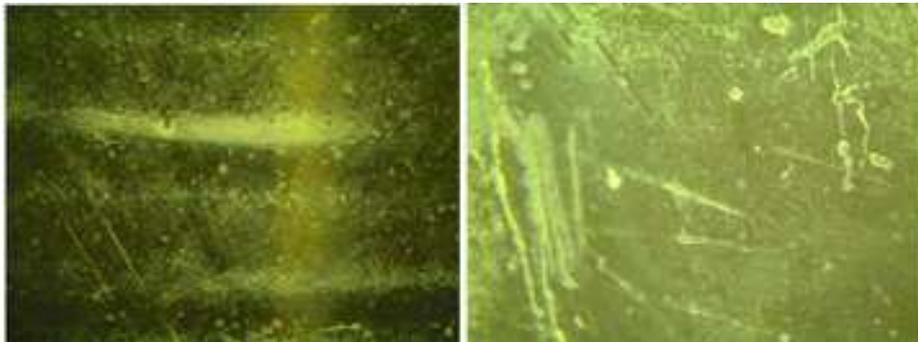


Figura 85 - Fotografias microscópica ópticas digitais da placa 5.

O fato de adotarem diferentes elementos desmoldantes em seus processos faz-se com que seja notória a diferença da qualidade superficial apresentadas pelas placas, onde para a Placa 2, a qual apresentou melhor característica no quesito, tem-se que suas superfícies se apresentassem com um menor nível de deformidades, conforme Figura 86.



Figura 86 - Apresentação da diferença entre o acabamento superficial das placas 1 e 2.

A diferença de coloração observada na Figura 86 entre as placas se deve apenas a pigmentação diferente para ambas, sem variação das suas outras características.

Processo de Injeção

Inicialmente a Tabela 15 apresenta as principais variações do processo, quanto ao tipo de SSI, ao molde e a posição de injeção da resina, facilitando a identificação das variações a serem apresentadas.

Tabela 15 – Variações do processo.

Placa	SSI	Molde	Posição de Injeção
01	Tipo I	MP2	Superior
02	Tipo I	MP3	Superior
03	Tipo II	MP3	Superior
04	Tipo II	MP3	Inferior
05	Tipo II	MP3	Inferior
06	Tipo II	MP3	Superior

Conforme explicado na seção 4.2.3. (Falha na moldura do molde RTM), para a injeção da placa 6, a moldura utilizada foi confeccionada em Nitanyl[®], material adotado para o Molde RTM MP4.

A Figura 87 representa o avanço da resina no interior do molde, desde seu início (1), quando a resina após preenchida completamente a mangueira entra no molde, passando por etapas de avanço e preenchimento dentro do molde RTM (2,3,4 e 5) até a conclusão do processo de injeção com o completo preenchimento deste molde (6).

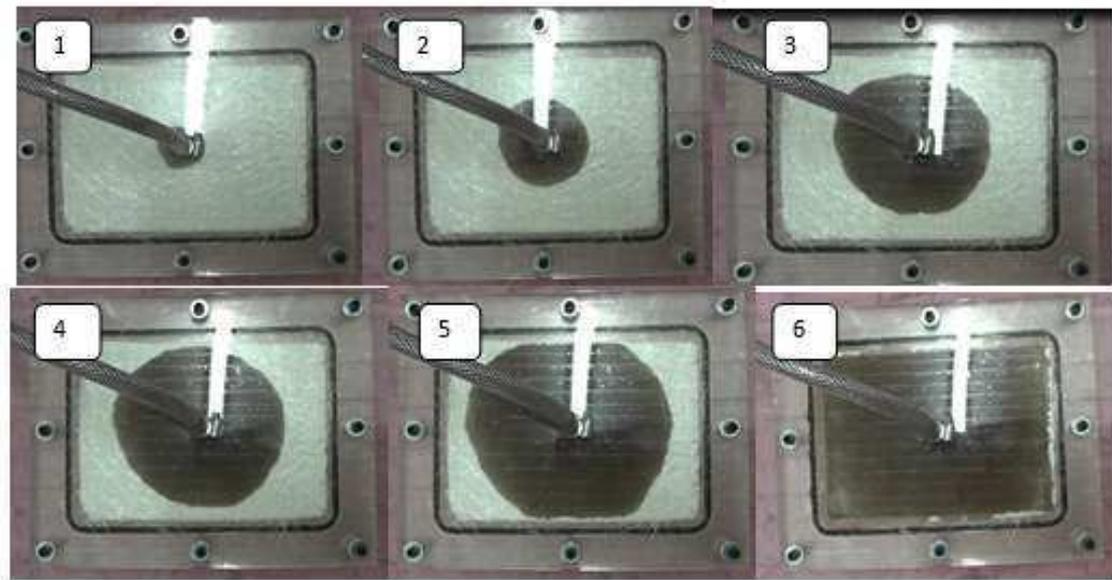


Figura 87 - Escoamento da resina no interior no molde.

Para a injeção de cada placa, uma detalhada análise é exposta neste tópico, onde todos os gráficos tem como coordenadas a força de injeção impressa pela carga compressiva (N) no pistão do SSI RTM, desenvolvido ao longo do seu deslocamento, dados estes, captados pelo sistema de aquisição de dados.

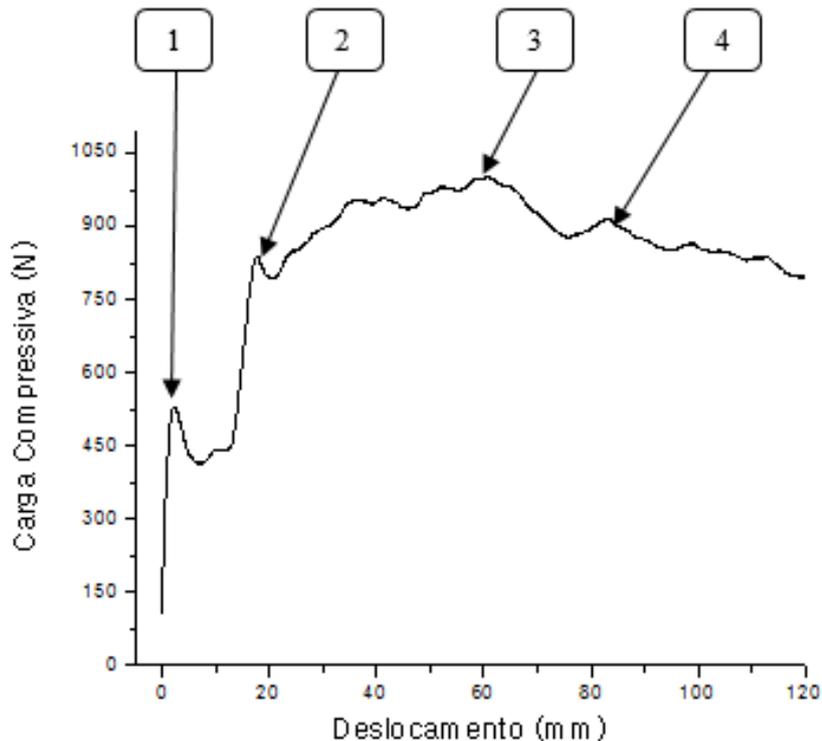


Figura 88 - Gráfico da força injetada no pistão ao longo do seu deslocamento (Placa 1).

Para a Placa 1, utilizando o SSI Tipo I, a Figura 88, que demonstra a evolução do gráfico que este representa, inicialmente existe uma evolução da carga compressiva até 521N (1) para que seja rompida a inércia do sistema, seguido de um decaimento no esforço justificado pelo curso não efetivo do pistão (14,8mm), ou seja, sem deslocar a resina. A carga retorna a crescer até o índice de 834N (2) quando se inicia o deslocamento da resina para o completo preenchimento da mangueira do sistema, (gravidade já preencheu parte da mangueira ao início do processo) atingindo mais um pico de esforço seguido por uma nova descaída instantânea, este momento no qual ocorre o aumento da seção de escoamento localizada na entrada do molde, a partir daí, a força de injeção apresenta variações devido a irregularidade apresentada pelo reforço da manta de fibra de vidro, alcançando o patamar de 1007N (3).

Por fim, observa-se que a carga começa a apresentar uma taxa de redução do seu esforço por já existir o escoamento de resina pela saída de ar do molde (4).

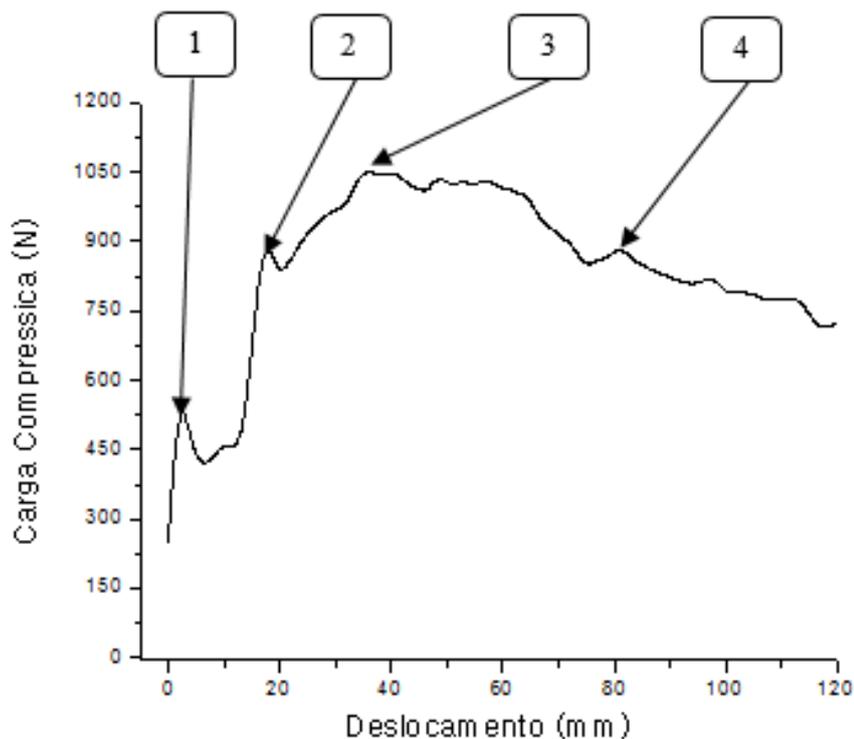


Figura 89 - Gráfico da força injeção no pistão ao longo do seu deslocamento (Placa 2).

Na Figura 89, para a Placa 2, utilizando o mesmo SSI, pode-se verificar que o gráfico apresentou basicamente com o mesmo comportamento (1), porém apresentando um acréscimo na carga compressiva no segundo pico (892N) de 6,95% (2), com uma região central mais uniforme, fato devido à disposição das fibras da manta. Além de uma carga máxima de 1052N (3), também é capaz de se identificar uma queda na força de injeção de aproximadamente 8,98% para fase final do processo (4) pela agora existência de 4 furos para saída de ar no molde.

Com a mudança do SSI, a partir da injeção da Placa 3, já se é possível verificar a sua influência no processo, onde na Figura 84, estão estas apresentadas e detalhadas.

Para a Placa 3, conforme apresentado na Tabela 15, o Molde RTM MP3 (4 saídas de ar) foi adotado para um processo de injeção realizada pela parte superior do molde.

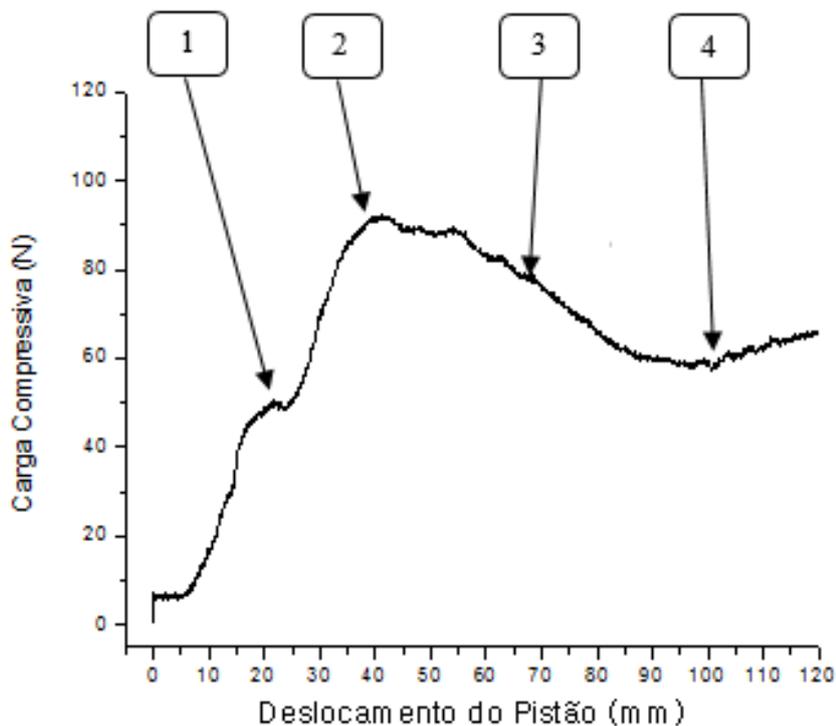


Figura 90 - Gráfico da força injeção no pistão ao longo do seu deslocamento (Placa 3).

Para a Figura 90, o primeiro aspecto notável a ser ressaltado se refere a redução na taxa de 10 vezes da carga compressiva máxima aplicada (92,8N) (2), onde o novo SSI desenvolvido, por apresentar menor coeficiente de atrito entre a parede do reservatório e o pistão, um segundo ponto a ser abordado se refere a semelhança no comportamento apresentado pelo gráfico com seus antecessores, onde estão presentes os dois picos (1 e 2) iniciais e posteriormente um declínio (3).

No gráfico apresentado para a Placa 3, fica observado ainda um crescimento na força de injeção a partir dos 100mm de deslocamento do pistão, fato oriundo do ajuste do acabamento interno do novo SSI, fator perceptível também na injeção das placas posteriores.

Outra diferença apresentada para o novo SSI, foi que a região entre os dois primeiros picos de carga, ficou mais suave devido a existência da chaveta, que controla a liberação da resina para a mangueira, reduzindo o curso não efetivo do pistão, sem que haja deslocamento da resina.

Com o intuito de analisar a influência da posição de injeção, a Placa 4 adotou uma nova disposição, passando esta de uma injeção superior para inferior, fato possibilitado apenas pela inversão do molde.

A Figura 91 apresenta o comportamento força de injeção pelo deslocamento do pistão para a Placa 4.

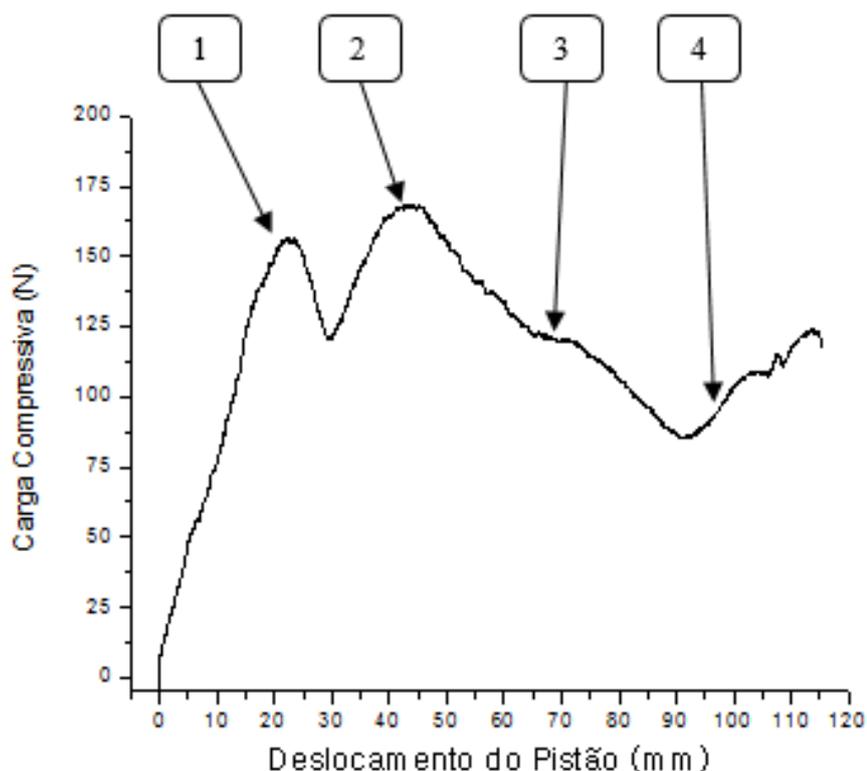


Figura 91 - Gráfico da força injeção no pistão ao longo do seu deslocamento (Placa 4).

Com a inversão da disposição da injeção, pôde-se observar que tal fator apresentou influência direta na carga aplicada para a injeção da Placa 4, onde a partir do rompimento da inércia do sistema, temos um aumento gradativo da carga até 22,24mm do deslocamento do pistão, atingindo o índice de 156,33N (1) devido ao efeito da gravidade, para então a resina alcançar a entrada da placa, até a carga apresentar um novo pico (169,25N) (2) quando a resina escoar pelo plano inferior do molde completamente, logo a carga passa a se apresentar em declive (3) pela já explicada

existência de novas saídas de ar do molde RTM M3, o crescimento da força verificado ao fim do processo (4) já foi explanado no o gráfico anterior.

A Figura 92 mostra a evolução da carga para o processamento da Placa 5.

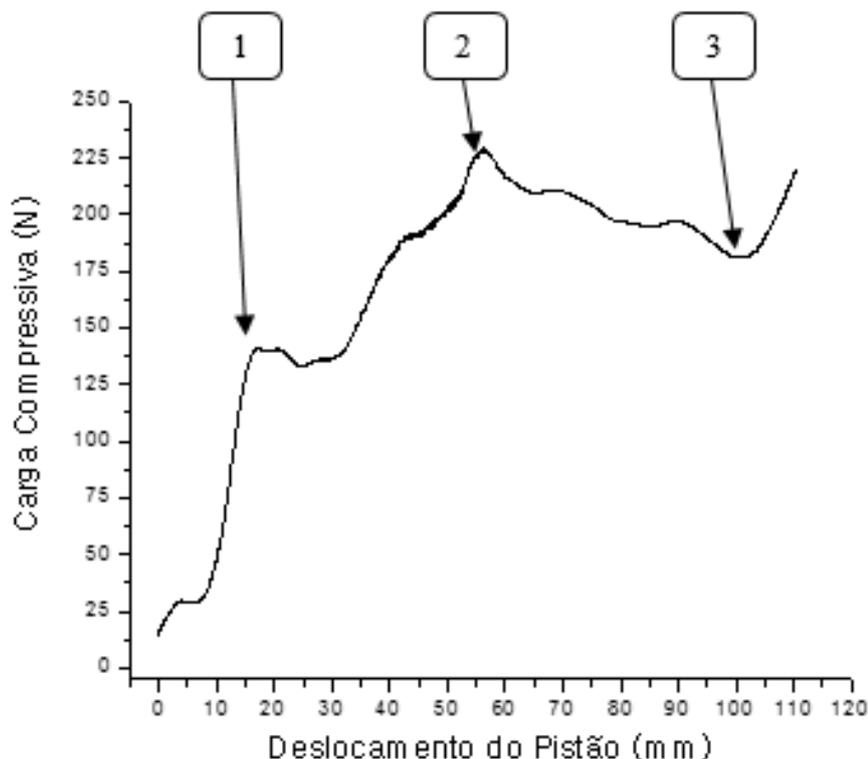


Figura 92 - Gráfico da força injeção no pistão ao longo do seu deslocamento (Placa 5).

Até um deslocamento de 22mm (1), o comportamento da carga para a injeção da Placa 5, apresentou-se de forma similar a Placa 4, porém a partir deste ponto, o crescimento da carga se apresentou de forma diferente, necessitando de um maior esforço, com um segundo pico de tensão da ordem de 236,84N (2), com a permeabilidade do meio sendo o fator determinante para essa mudança de comportamento. Com 100mm de deslocamento do pistão (3), o crescimento do esforço característico para o SSI Tipo II mais uma vez se apresentou.

Para Placa 6, a qual não existe a manta de fibra de vidro e a injeção volta a ser superior, a Figura 93 apresenta o modelo ao qual a carga se comportou durante seu processo de injeção, com dois picos de carga, um com 20mm (1) e o outro com 50mm

(2) de deslocamento do pistão. Onde é visível que durante o curso do pistão para o preenchimento da mangueira existe uma redução de 6,72%, quando comparado com a injeção da Placa 3 (mesma disposição e molde) proveniente do espaço vazio no interior do molde, que facilita o deslocamento do ar e conseqüentemente exige um menor esforço para o deslocamento da resina, assim como para o restante do escoamento, onde valores mínimos foram atingidos para esse processo devido a inexistência de meio poroso no interior do molde.

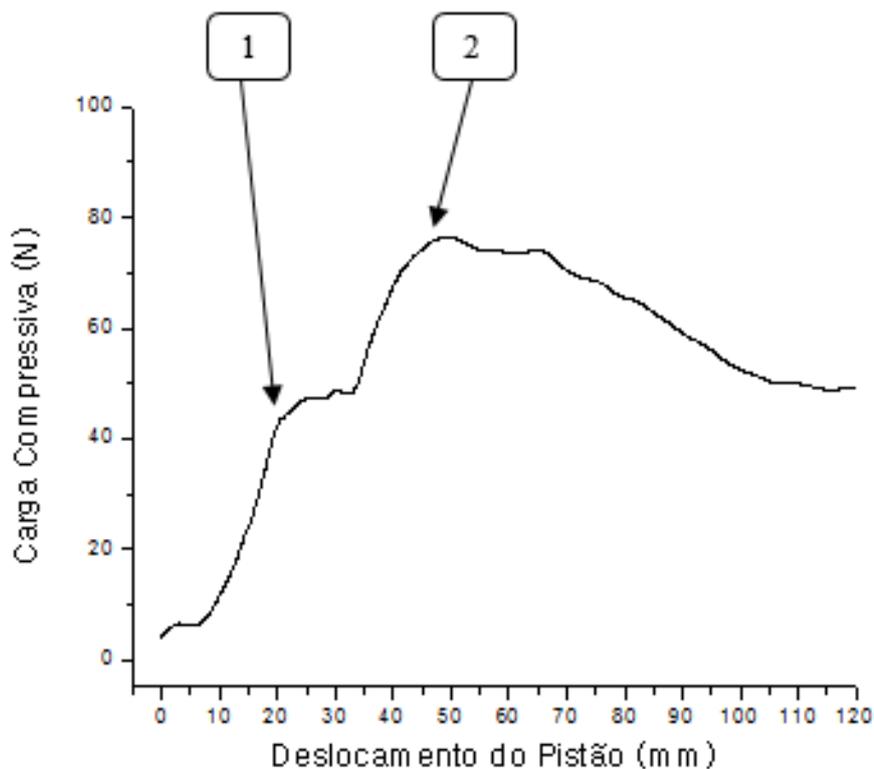


Figura 93 - Gráfico da força injeção no pistão ao longo do seu deslocamento (Placa 6).

Cálculo Preliminar da Permeabilidade

A análise preliminar da permeabilidade nesse trabalho é realizada a partir da Equação 6 apresentada na seção 3.2.8, onde os parâmetros viscosidade da resina (μ), porosidade (Φ) e fluxo de injeção (Q) que se apresentam como constantes para todos os

ensaios, devido ao fato de que em todos estes, a mesma resina ser adotada, assim como a mesma manta com o mesmo número de camadas e estes ainda apresentarem velocidade constante do pistão de injeção, assim os mesmos assumem valor 1 para efeito de cálculo.

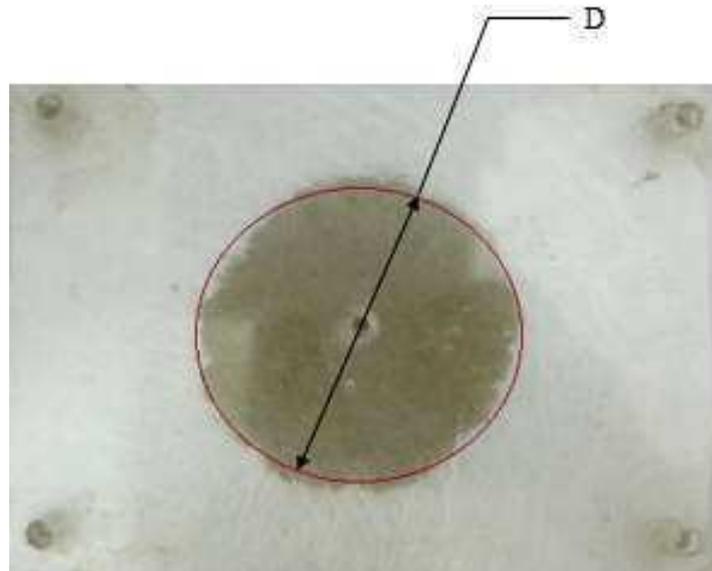


Figura 94 – Determinação da área da secção do molde RTM preenchido a partir do seu diâmetro.

Na Figura 94 é possível verificar como é obtido a área da secção do molde RTM preenchida a partir do seu diâmetro. A variável tempo corresponde ao instante no qual a imagem foi capturada.

A variável pressão de injeção é obtida a partir do ajuste de cada curva de injeção da carga compressiva x deslocamento do pistão, apresentadas nas Figuras 88, 89, 90, 91, 92 e 93.

Assim a Tabela 16 nos apresenta os valores preliminares das permeabilidades obtidas para as Placas 1,2,3,4 e 5, como também o raio da secção preenchida no molde pela resina para o tempo de preenchimento de 30s.

Tabela 16 – Cálculo preliminar da permeabilidade das placas compósitas e seus raios da seção preenchida para o tempo de preenchimento de 30s.

Placa	Fator Permeabilidade (Darcy*)	Raio da seção preenchida (mm)
1	$15,51 \times 10^6$	3,91
2	$10,17 \times 10^6$	4,23
3	$12,16 \times 10^6$	5,12
4	$18,17 \times 10^6$	4,78
5	$15,96 \times 10^6$	4,47

*Darcy = $9,869233 \times 10^{-13} \text{m}^2$

Com os dados apresentados, tem-se que o fator permeabilidade apresentou variação de 44,33% para o qual o processo de injeção da Placa 4, apresentou maior valor ($18,17 \times 10^6$ Darcy), enquanto que o processo para a Placa 3, apresentou maior avanço do processo de preenchimento da placa para o tempo de 30s (5,12mm), onde a variação para este parâmetro foi de 23,64%.

Ensaio de Flexão

Neste tópico estão presentes os resultados dos ensaio de flexão realizados para as três amostras retiradas de cada placa compósita produzida, onde conforme citado na seção de materiais e métodos, estes ensaios foram realizados conforme norma ASTM D7264/D7264M, com as amostras apoiadas em três pontos, se é aplicado um deslocamento (no ponto central) e se é verificada o comportamento apresentado por cada uma destas. Observar a Figura 95 o esquema do avanço do deslocamento do apoio central.

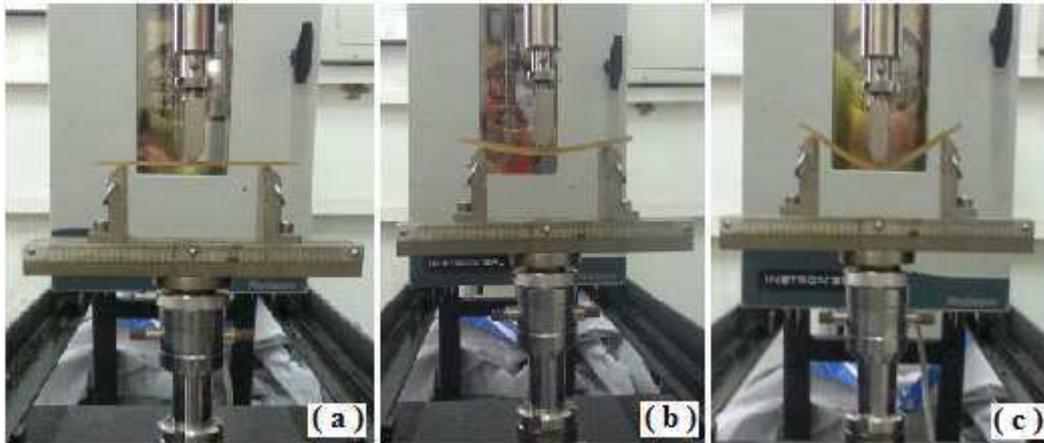


Figura 95 - Esquema do avanço do deslocamento do apoio central.

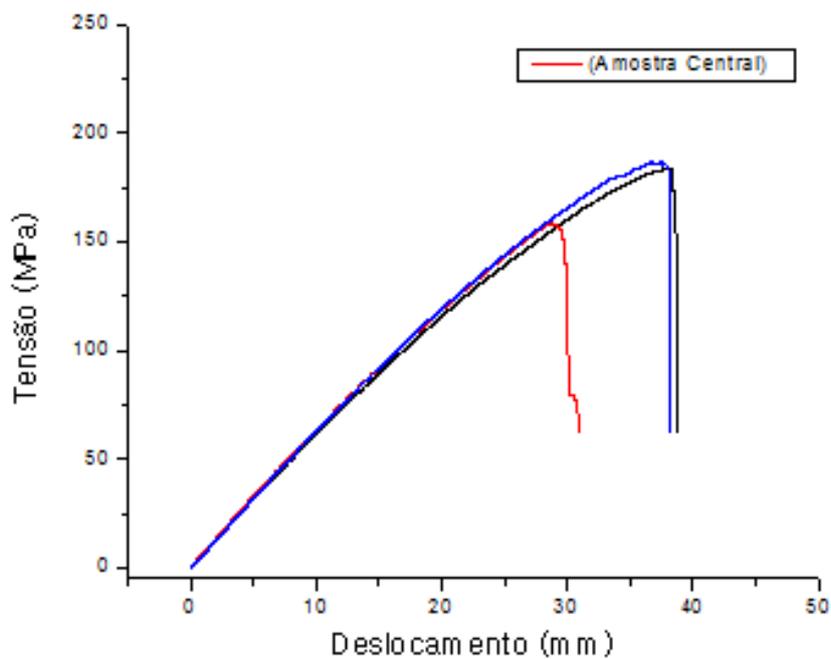


Figura 96 – Ensaio de flexão para as três amostras da Placa 1.

A Figura 96, apresenta os resultados para a Placa 1, onde as amostras se apresentam com comportamento linear com falhas abrupta legítima de materiais frágeis, onde as amostras laterais apresentaram melhor desempenho por suportarem uma maior tensão aplicada de 187,82MPa e 184,42MPa, para um deslocamento de aproximadamente 38,4mm, enquanto que para a amostra central essa falha ocorre após

deslocados 29,16mm a uma tensão de 157,44MPa. A variação máxima de tensão suportada apresentada foi de 16,18%, com média de 177,56MPa.

A Figura 97, mostra os resultados para os ensaios na Placa 2.

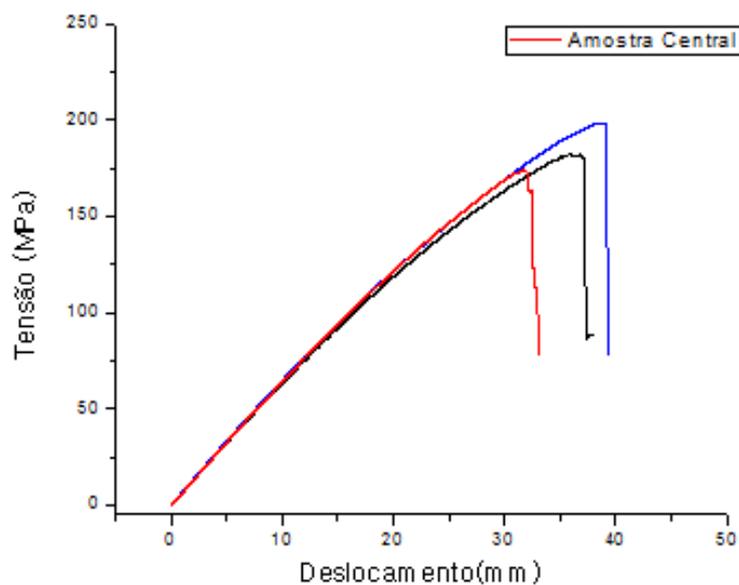


Figura 97 - Ensaio de flexão para as três amostras da Placa 2.

Assim como para a Placa 1, a mostra central se apresentou mais frágil, onde para o deslocamento de 31,88mm e uma tensão de 176,09MPa, ocorreu sua falha. Para as amostras laterais esses índices foram respectivamente de 181,62MPa e 199,43MPa de tensão para o deslocamento de 36,9mm e 38,82mm. A variação máxima de tensão suportada apresentada foi de 11,71%, com média de 185,71MPa.

Na Figura 98, pode-se serem observados os resultados para os ensaios na Placa 3.

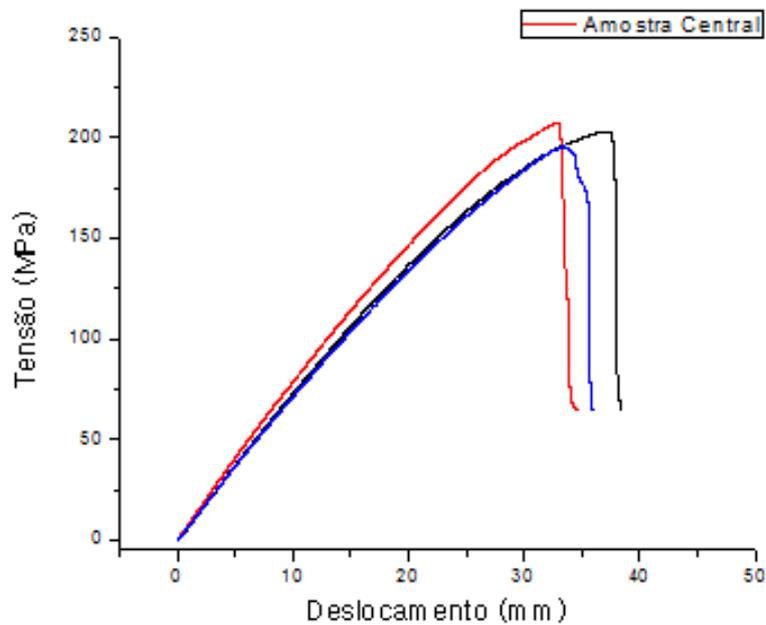


Figura 98 - Ensaio de flexão para as três amostras da Placa 3.

Para a Placa 3, os resultados se apresentaram em maior uniformidade, onde para a amostra central, apesar de suportar a tensão de 207,81MPa, apresentou o menor deslocamento (32,97mm), enquanto que para as amostras laterais as tensões máximas suportadas foram da ordem de 195,25MPa e 203,07MPa, para respectivos deslocamentos de 35,47mm e 179,61mm.

Para esta placa, a variação máxima de tensão suportada entre as amostras foi de 6,05%, com média de 202,04MPa.

Os resultados para o ensaio de flexão da Placa 4, encontram-se na Figura 99.

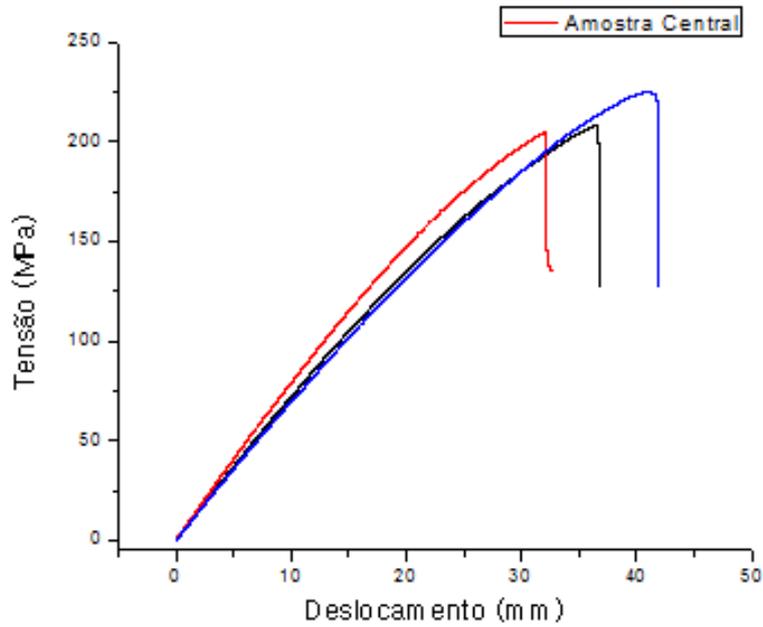


Figura 99 - Ensaio de flexão para as três amostras da Placa 4.

Com resultado aproximado ao encontrado para a placa 2, no que se refere a desigualdade entre o deslocamento suportado entre as amostras, a Placa 4 apresentou para as amostras laterais valores de tensão máxima suportada da ordem de 208,52MPa e 225,53MPa, para deslocamentos de 36,53mm e 41,81mm, respectivamente. Já para a amostra central esses valores foram de 205,08MPa e 31,97mm, onde o valor da variação da tensão máxima suportada foi de 9,7%, para uma tensão média de 213,04MPa.

A Figura 100, mostra os resultados para os ensaios na Placa 5.

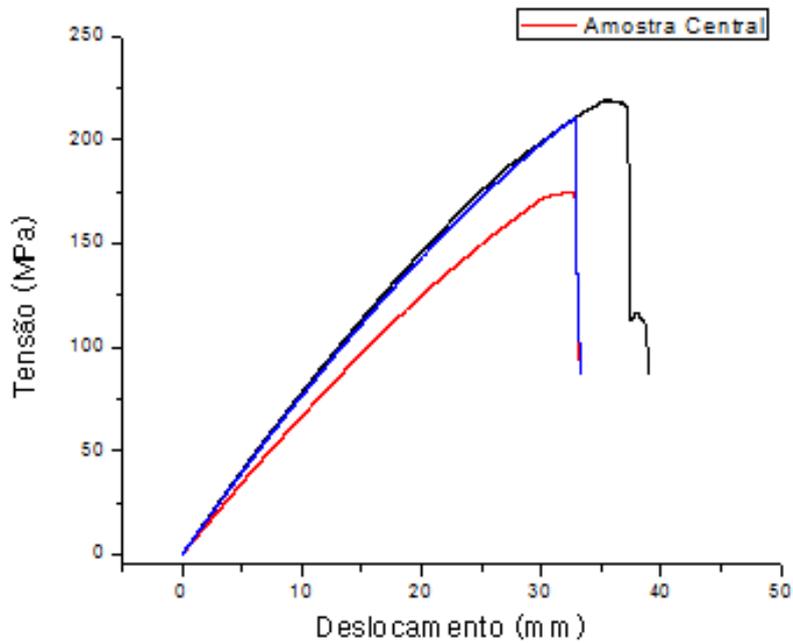


Figura 100 - Ensaio de flexão para as três amostras da Placa 5.

Nos resultados para a Placa 5, é visível que uma das amostras laterais rompe a um aproximado mesmo deslocamento da amostra central, de 32,85mm, porém com uma tensão suportada bem inferior, com 173,87MPa contra 211,54Mpa. Para a outra amostra lateral os valores apresentados para tensão máxima suportada e deslocamento foram respectivamente de 220,36MPa e 37,28mm. Para a Placa 5, a variação máxima foi de 21,1%, para a tensão de ruptura das placas, enquanto a média foi de 201,92MPa.

A amostra da Placa 6, munida apenas da matriz polimérica, apresentou resultados mais brandos para cargas suportadas, porém apresentando deslocamentos bem superiores, conforme pode ser visualizado na Figura 101.

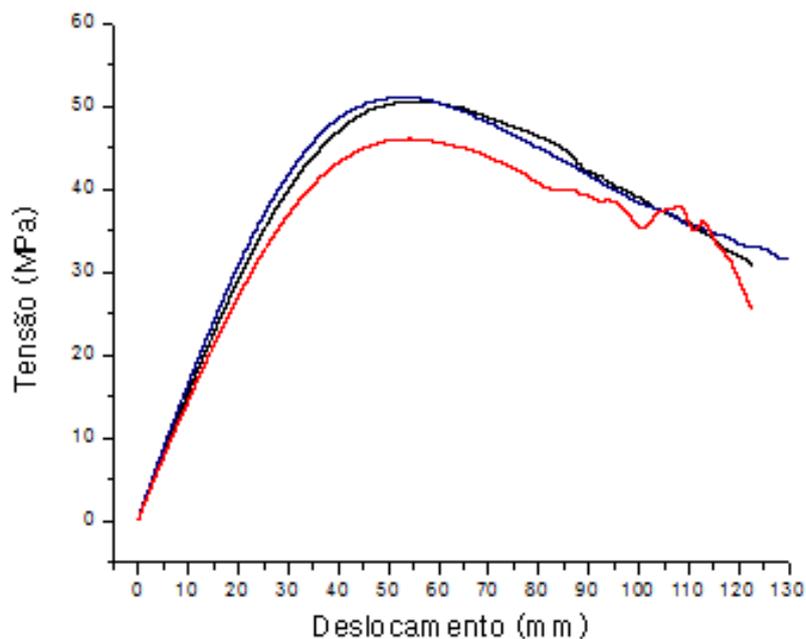


Figura 101 - Ensaio de flexão para as três amostras da Placa 6.

Para a Placa 6, os resultados se apresentam de forma diferente as demais placas, pois como está é composta unicamente por resina (material de elevada capacidade elasticidade), os valores de tensão máxima aqui não equivalem aos valores de tensão de ruptura, logo, os valores de tensão máxima suportada foram de 51,18Mpa, 50,52MPa e 46,08MPa (amostra central), onde a primeira placa só chega a ruptura após percorridos 120mm de deslocamento do punção do ensaio.

4.6. Caracterização dos Perfis Estruturais

Perfil Estrutural I

Como resultado do processamento, foi obtida uma pequena cantoneira com acabamento superficial de baixa qualidade e sem apresentar um adequado preenchimento total.

A Figura 102, além de apresentar o Perfil Estrutural I produzido (a) a partir do molde teste (Molde RTM MPE1), também apresenta sua disposição como elemento básico de para a formação de um perfil em T (b), conforme disposição apresentada na Figura 69.



Figura 102 – Perfil Estrutural I (a) e sua disposição como elemento estrutural (b).

A partir da identificação de falhas como um sistema com baixa estanqueidade, foi-se desenvolvido um novo projeto de molde para o perfil estrutural.

Quanto ao acabamento superficial, a alteração do elemento desmoldante, assim como para as placas, também solucionou esta falha.

Perfil Estrutural II

A Figura 103 mostra o resultado do processo para o novo perfil produzido, com bom acabamento superficial, totalmente preenchido e visualmente sem a presença de bolhas. O Perfil Estrutural II apresenta 131,252g, com espessura aproximada do dimensionado no molde (molde rígido).



Figura 103 – Perfil Estrutural II.

Além disso, o novo molde demonstrou total estanqueidade, não apresentando nenhum ponto de vazamento.

A Figura 104 apresenta o gráfico da força de injeção x deslocamento do pistão oriundo do processamento do Perfil Estrutural II pelo SSI Tipo II, utilizando o Molde RTM MPE2.

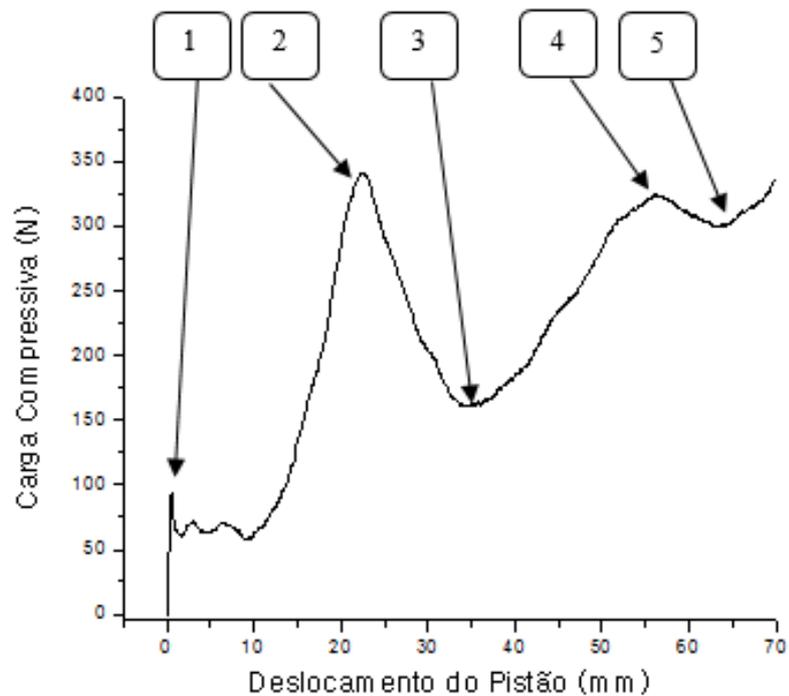


Figura 104 - Gráfico da força injeção no pistão ao longo do seu deslocamento (Perfil Estrutural II).

Para este, é visível que o início do deslocamento do pistão, para retirada do sistema da inercia, resulta em um primeiro pico de carga (1), até notar que até aproximadamente 10,3mm de curso do pistão, não houveram variações significativas na carga exercida, o que indica, que até esse ponto, ocorreu o deslocamento do pistão não efetivo, sem o escoamento da resina. A partir de então há um aumento rápido da carga (341,19N), atingindo seu índice máximo (2), proporcionado pelo início do deslocamento da resina e sua respectiva entrada da resina no molde. A carga volta a reduzir, a partir de 22,68mm até 33,72mm de deslocamento, tal comportamento é justificado pelo início do escoamento da resina ao longo da aba vertical, o qual é favorecido pela gravidade, acarretando em uma redução da carga compressiva. Mais uma vez a carga volta a subir (3), uma vez que o preenchimento da aba horizontal encontrava-se em finalização. Aproximadamente após 57,13mm, ocorre uma pequena queda da pressão (4), uma vez que a resina alcançou os pontos de saída na base da aba horizontal. O crescimento a seguir (5) se refere ao ajuste existente no SSI, fato já esclarecido anteriormente.

A Figura 105 apresenta os resultados do ensaio de flexão realizados nas amostras do Perfil Estrutural II.

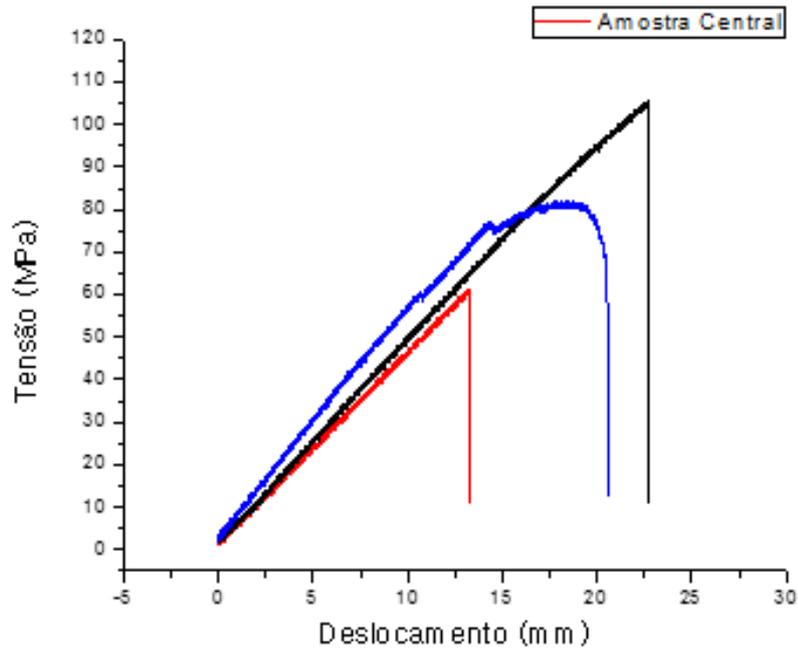


Figura 105 - Ensaio de flexão para as três amostras do Perfil Estrutural II.

Conforme pode ser visto, os gráficos apresentaram considerável discrepância entre si, onde para uma das regiões laterais nota-se o comportamento de linear e uma falha típica de materiais frágeis, a uma carga de 105,61MPa com deslocamento de 22,65mm, por provavelmente nessa região existir uma maior concentração de resina. Para a outra região lateral, nota-se uma ampla região linear com a normalização da curva ao deslocados 14,25mm com carga de 77,51Mpa, seguindo para uma queda da força não tão abruptamente quanto nas outras regiões, indicando uma falha gradativa do compósito, com a falha da matriz ao ser alcançado 20,46mm de deslocamento do punção do ensaio.

Para a amostra central, a ruptura desta ocorre após 13,23mm de deslocamento do punção e a uma carga de 61,05MPa.

Logo, em termos de carga suportada, nota-se que a carga máxima foi de 105,61Mpa obtida para uma amostra lateral, enquanto que a mínima foi de 61,05MPa obtida na amostra central.

5. CONCLUSÃO

Foi possível desenvolver o processamento de compósitos por RTM de baixo custo, através do desenvolvimento de subsistema de injeção acoplado a uma máquina de ensaios universal para a produção de placas com total preenchimento pela resina, bom acabamento superficial e dimensões uniformes.

Ambos subsistemas de injeção foram capazes de processar compósitos por RTM, porém o segundo projeto foi definitivo por apresentar maior facilidade de manuseio por parte do operador, reduzindo os tempos das atividades de processamento e conseqüentemente ampliando a taxa de produção. O SSI Tipo II também apresentou redução da ordem de 90% para a carga de injeção.

Fica validada a utilização do Nitanyl[®], Nitalen[®], Nitacetal[®] e Nitapro[®] como elementos constituintes do SSI Tipo II e do Molde RTM MPE5, por não apresentarem aderência com a resina, por serem de baixo custo, de fácil usinagem, possuírem menor coeficiente de atrito relativo e suportarem as temperaturas de trabalho.

Pode-se afirmar que percentual adequado de catalizador adicionado a resina, para a realização desse trabalho foi de 1%, visto que a temperatura (89,9°C) e o tempo gel de trabalho (10'48") se apresentam em níveis adequados para o processamento.

O teste para a medição da variação de temperatura no interior do molde, comprova que esse gradiente é bem próximo a zero quando adotamos o eixo da espessura da placa como critério de avaliação. A condução de temperatura através do SSI Tipo II também se apresentou irrelevante para o trabalho.

Para o tempo total de processamento, as atividades de molde fechado apresentaram para o processo uma redução de 8,33min em um total de 45,33min para o processamento da Placa 1 e 36,5min para Placa 6, enquanto que as atividade de molde aberto apresentaram uma redução de 41,66min, tendo em vista que para a Placa 1 foram necessários 146min, enquanto que para a Placa 6 foram necessários 104,34min. Portanto a redução total foi da ordem de 26,4%, sendo de 50,5min.

Visto que, por se tratar de um molde rígido, as placas compósitas não apresentaram variação (175x125x5mm) dimensional, assim como estas também mostraram boa concordância quanto ao peso individual de cada, observado que a maior

variação foi de 5,3% do peso (Exceto Placa 6 que não possui reforço de manta de fibra de vidro).

A adoção do filme como elemento desmoldante faz-se com que seja notória a diferença da qualidade superficial apresentadas pelas placas, onde para, a partir da Placa 2, tem-se que suas superfícies se apresentassem com um menor nível de deformidades.

A mudança proporcionada na saída de ar do molde (de um furo central para 4 furo equidistantes) chegou a apresentar uma redução de 30% para carga aplicada, sendo assim adotado o Molde RTM MP3 como definitivo para o processo.

Pode-se afirmar que no quesito carga máxima aplicada durante os processos de injeção, o SSI Tipo I exige uma maior carga, quando comparado com o SSI Tipo II, aos quais seus índices apresentados foram inferiores. A variação chegou a 91,17% entre os processamentos das Placas 2 (SSI Tipo I) e 3 (SSI Tipo II).

Quanto aos testes de flexão, tem-se que para a Placa 5, ficou apresentado maior variação na carga máxima suportada (21,1%), enquanto que a variação para a Placa 3, foi menor (6,05%). Referente a maior e menor média de carga suportada, as Placas 4 e 1 se destacaram com índices de 213,1MPa e 177,56MPa respectivamente, ou seja, variação da ordem de 16,68%.

O processo de injeção definitivo para o processamento de placas compósitas portanto foi o adotado para a injeção da Placa 5, que utilizou o SSI Tipo II, com Molde RTM MP3 e injeção de disposição inferior.

Para os perfil estrutural pode-se concluir que foi possível desenvolver um molde para a produção desse elemento estrutural por RTM, esse com total preenchimento pela resina, bom acabamento superficial, nenhuma ponto com rebarba e espessura uniforme. Para o teste de flexão adotado, a carga máxima suportada apresentou variação de 42,2%, com 105,61Mpa para uma amostra lateral e 61,05MPa para a amostra central.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, tem-se a possibilidade do processo para placas compósitas embebidas de fios de memória de forma, ampliando as análises ao campo de estudo de estruturas ativas.

Utilizar diferentes combinações da posição dos pontos de injeção e de vácuo para o estudo de processamento de materiais compósitos por RTM.

Realizar de forma aprofundada o estudo da permeabilidade do processo, através da validação de método e modelo matemático.

Realizar injeção de placa compósita utilizando o Molde RTM MP5 desenvolvido, para sua adequada validação.

Desenvolvimento de sistema para o adequado descarte para a resina, reduzindo o trabalho do operador durante o processo RTM.

Variações na matriz polimérica são indicadas para a capacitação e controle sobre o processo RTM.

Variações no reforço, como tipo, arquitetura e número de camadas, para verificar suas influências na avaliação dos produtos compósitos produzidos por RTM.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, A. L. S., **Processamento de Placas Compósitas pela Técnica de Moldagem por Infusão de Resina de SEEMANN (SCRIMP)**, Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE, Universidade Federal do Rio De Janeiro, 2006.

AMORIM, W. F. Jr., **Processamento de Placa Espessa de Compósito através de Moldagem por Transferência de Resina**, Tese de Doutorado, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE, Universidade Federal do Rio De Janeiro, 2007.

BELBUTE, P. M. G. **Estudo do Comportamento em Flexão de Vigas Compósitas Sandwich**. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2010.

CARVALHO, P., **Análise do Comportamento Mecânico e Identificação do Tipo de Falha em Estruturas Sandwich com Núcleos de Cortiça**, Tese de Mestrado, IST/UTL, Lisboa, 2008.

CALLISTER Jr, et al. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. John Wiley & Sons, Inc., 5ª Edição, Nova York, NY, 1991.

DANIEL, I. M. et al. **Permeability and resin flow measurements and simulations in composite performs**.

FELIPE, R. C. T. S., **Materiais Compósitos**, Departamento Acadêmico de Tecnologia Industrial, Curso Superior em Tecnologia da Fabricação Mecânica, Centro Federal de Educação Tecnológica do RN, 2008.

FONTOURA, C. M. **Desenvolvimento de Hélice de Material Compósito Polimérico Utilizando a Moldagem por Transferência de Resina.** Dissertação de Mestrado. UFRS: Porto Alegre, 2009.

GOMES, E. S. et al. **Permeabilidade.** Faculdade do Sul da Bahia, 2010.

GARAY, André Cechin. **Efeito da Adição de Carbonato de Cálcio em Compósitos Poliméricos Moldados pro RTM e RTM Ligth.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (PPEGEM/UFRGS), Rio Grande do Sul, 2010.

JUNIOR, Heitor luiz Ornaghi. **Caracterização Mecânica e Dinâmico – Mecânica de Compósitos Híbridos Vidro/Sisal Moldados por RTM.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (PPEGEM/UFRGS), Rio Grande do Sul, 2009.

LEVY NETO, F. el al. **Compósitos Estruturais: Ciência e Tecnologia.** 1ª ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2006.

MARINUCCI, G. **Materiais Compósitos Poliméricos, Fundamentos e Tecnologia.** Artliber Editora, 2011.

NASCIMENTO, R. L. E., **Produção e Caracterização de Compósitos Inteligentes,** Dissertação de Mestrado, Engenharia de Materiais, Lisboa, Portugal, 2009.

OGISU, T. et al. **A Basic Study of CRFP Laminates with Embedded Prestrained SMA Foils for Aircraft Structures.** Graduate School of Frontier Science, The University of Tokyo, 2005.

OLIVEIRA, José Henrique Inscold. **Desenvolvimento do Processo de Fabricação de Laminados de Material Composto Polimérico de Fibra de Vidro para a Aplicação na Construção Aeronáutica.** Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2007.

ORNAGHI, Heitor L. J. **Caracterização Mecânica e Dinâmico-Mecânica de Compósitos Híbridos Vidro/Sisal Moldados por RTM.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

PAGANO, R. L. **Modelagem, Simulação e Otimização de Processos Contínuos de Produção de Materiais Compósitos.** Tese de Doutorado. Programa de Engenharia Química, COPPE, UFRJ, 2009.

PEREIRA, J. C. **Curso de Projeto Estrutural com Materiais Compósitos.** Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.

PEREIRA, N. C. **Caracterização de Compósitos de Resina Poliéster, Fibra de Vidro e Wollastonita Moldados pelo Processo RTM Light.** Universidade Presbiteriana Mackenzie, Revista Mackenzie de Engenharia e Computação, v.11, nº 1, Edição Especial. São Paulo.

POTTER, K. D. **The Early History of the Resin Transfer Moulding Process for Aerospace Applications,** Composites: Part A, 1999.

REBENFELD L. et al. **Permeability Characteristics of Multiplayer Fiber Reinforcements. Part II: Theoretical Model,** Polymer Composites, v.12, n.3, 1991.

REZENDE, M. C. et al. **Caracterização Mecânica de Compósitos de Poliamida/Fibra de Carbono via Ensaio de Cisalhamento Interlaminar e de Mecânica da Fratura**, Polímeros: Ciência e Tecnologia, v. 12, n. 3, 2002.

ROSSEL, Scott M. **Fluid Flow Modeling of Resin Transfer Molding for Composite Material Wind Turbine Blade Structures**. Department of Chemical Engineering. Montana State University. Bozeman, 2004.

SHIINO, Marcos Yutaka. **Desenvolvimento e Caracterização de Compósitos Processados por RTM para Aplicação Aeroespacial**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá. Universidade Estadual de São Paulo (UNESP), Guaratinguetá, 2011.

SKRAMSTAD, J. D. **Evaluation of Hand Lay-up and Resin Transfer Molding in Composite Wind Turbine Blade Manufacturing**. Montana State University-Bozeman, 1999.

VENTURA, A. M. F. M. **Os Compósitos e suas Aplicações na Reabilitação de Estruturas Metálicas**. Departamento de Engenharia Química e Biológica, Instituto Superior Técnico, Portugal, 2009.

VILAR, Z. T. **Comportamento Eletro-Termomecânico de um Compósito Ativo de CFRP com Fios Ni-Ti Embebidos**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Ciência e engenharia de Materiais, UFCG, 2009.

VILAR, Z. T. **Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibras de Carbono Incorporando Fios Atuadores de NiTi com Memória de Forma: Caracterização Termomecânica Usando Análise Mecânica dinâmica**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Ciência e engenharia de Materiais, UFCG, 2013.

WENDHAUSEN, P. A. P. **Análises Térmicas.** Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.

XU, Ya. et al. **A New Method for fabricating SMA/CFRP Smart Hybrid Composites.** Smart Structure Research Center AIST, Japan, 2002.

ZHENG, Y. J. et al. **Basic Desing Guidelines for SMA/Epoxy Smart Composites.** Department of Material Co. Universidade of Petroleum, Beijing. 2004.

ANEXO A

FICHA DOS SISTEMAS DE INJEÇÃO DA GLASCRAFT

						
	Spartan	Spartan II Basic	Spartan II Deluxe	Spartan 3 PLC	Spartan 3 PLC with PAC	Spartan 3 PLC with PAC & RED
Features	Entry level design of the STM high-pressure injection	For all forms of closed molding	For all forms of automated closed molding	For all forms of automated closed molding with touch-screen programming	For all forms of high-end uses, a low cost closed molding	For all forms of closed molding designed to a high fly-fight-on-line production release resources as of release are used
Complete solution	*	*	*	*	*	*
Passive trigger	*	*	*	*	*	*
High-speed flush	*	*	*	*	*	*
Low-pressure injection	*	*	*	*	*	*
System bypass head	*	*	*	*	*	*
Positive head DP catalyst dispensing	*	*	*	*	*	*
Stroke counter	*	*	*	*	*	*
Auto valve ready	*	*	*	*	*	*
Low-pressure injection with flow sensor	*	*	*	*	*	*
Use ready control panel	*	*	*	*	*	*
Dispense flow	*	*	*	*	*	*
Adjustable high water level flush	*	*	*	*	*	*
Independent flush logic with	*	*	*	*	*	*
Adjustable gel time	*	*	*	*	*	*
Touch-screen programmable	*	*	*	*	*	*
High-pressure injection settings	*	*	*	*	*	*
Programmable digital stroke control	*	*	*	*	*	*
Programmable automatic cycle	*	*	*	*	*	*
Programmable valve frequency identification	*	*	*	*	*	*
Unlimited programming	*	*	*	*	*	*
Reserved	*	*	*	*	*	*

Ordering Information

21650-00	Spartan	25280-02	Spartan 3 PLC
23200-00	Spartan II Basic	25280-00	Spartan 3 PLC w/PAC
23240-00	Spartan II Deluxe	25280-01	Spartan 3 PLC w/PAC & RED

Specifications

Air consumption	35 cfm @ 100 psi (9.1 lpm @ 6.9 bar) at maximum pump output
Mixing tank capacity	2.5 gpm (9.5 lpm)
Pump output	.15 gal per cycle 20 cycles = 1 gal 5 cycles = 1 liter
Max Output Pressure	1,500 psi (99 bar; 8.9MPa)
Catalyst Range	0.5% to 3.5%

Repair Kits

Catalyst Pump	LPA-190-RK Catalyst rebuild kit LPA-190-3K Seal kit
Air Motor (5-in)	2D101-00 Catalyst service kit 2D107-00 Filter valve kit 2D106-00 Mix valve kit 2D105-00 Gasket kit 2D104-00 Stroke signal repair kit 2D103-00 Rod seal kit 2D102-00 Platen rod seal kit
Fluid Section	21570-00 5:1/1:1 Repair kit

Check Valves

21675-00	Resin check valve
21684-00	Solvent/Air purge check valve
23547-01	Catalyst check valve
21676-00	Mixer, crush, nylon, 1/2 ID
22904-00	Stem check valve
21044-02	Silicone o-ring
23540-00	Catalyst body check valve
22905-00	Mixer, crush, nylon, 3/4 ID
23524-01	Compression spring
22909-00	Round nut
Mixer	
20625-00	Stable mixer

Call today for product information or to request a demonstration.
800-746-1334 or visit us at www.graco.com.

© 2018 Graco Inc. 340010 Rev A 1/2018. All other brand names or marks are used for identification purposes and are trademarks of their respective owners. All errors and omissions contained in this document are based on the latest product information available at the time of publication. Graco reserves the right to make changes at any time without notice.



ANEXO B

BOLETIM TÉCNICO DA RESINA POLIÉSTER



BOLETIM TÉCNICO RESINA PARA LAMINAÇÃO

INFORMAÇÕES GERAIS

Viscosidade	250 a 400 cps
Gel Time a 25°C	9 – 13' c/ 1% catalisador
Cor	Âmbar
Densidade	1,09 – 1,13 g/cm ³
Sólidos	54 - 56%

COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Resina Poliéster Insaturada, Tixotrópica, Pré Acelerada.

CARACTERÍSTICAS E USOS PRINCIPAIS

RESINA PARA LAMINAÇÃO é utilizada para laminados em geral, peças de fibra de vidro, laminação com manta de fibra de vidro, etc.

MODO DE PREPARAR

Utilize 25 gotas(1%) de catalisador quando calor (temperatura maior que 25°C), para cada 100 gramas de resina poliéster. Obs.: O excesso de catalisador provoca bolhas na aplicação.

PRECAUÇÕES

Manter a embalagem fechada, em temperatura abaixo de 25°C, fora do alcance de crianças e animais.

Não reutilizar ou incinerar a embalagem.

Evite contato com a pele ou olhos (caso ocorra, lavar com água corrente em abundância).

Em caso de irritação da pele, olhos ou ingestão (NÃO provocar vômito) e procurar auxílio médico.

Use EPI's.

Atenção: Produto desenvolvido para uso profissional. O uso por pessoas não habilitadas isenta a empresa de futuras reclamações.

ANEXO C

BOLETIM TÉCNICO DA MANTA PARA LAMINAÇÃO



BOLETIM TÉCNICO MANTA PARA LAMINAÇÃO

INFORMAÇÕES GERAIS

Gramagem	450g/m ²
Largura	+/- 0,70 cm ²
Perda ao Fogo	2,4%
Peso	+/- 320 g

COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Fibra de Vidra.

CARACTERÍSTICAS E USOS PRINCIPAIS

MANTA PARA LAMINAÇÃO é um material de reforço obtido de fibras de vidro, cortadas, aglutinadas umas às outras através de ligante de alta solubilidade em monômero de estireno, com compatibilidade com resinas poliéster, viniléster epóxi. As fibras são cortadas e distribuídas de maneira uniforme e aleatória, originando, no plano de mantas, laminados com propriedades isotrópicas.

Este produto foi desenvolvido para ser usado como reforço para peças que são fabricadas no processo de laminação manual em molde aberto (hand lay-up)

Destaques: Utilização com resinas contendo carga mineral
Rápida molhagem
Redução no consumo de resinas
Aumento de produtividade
Baixa marcação no gel coat.

PRECAUÇÕES

As fibras de vidro devem ser armazenadas em sua embalagem original, em local fresco e seco. Não reutilizar ou incinerar a embalagem.

Evite contato com a pele ou olhos (caso ocorra, lavar com água corrente em abundância).

Em caso de irritação da pele, olhos ou ingestão (NÃO provocar vômito) e procurar auxílio médico. Use EPI's.

Garantia de uso: Sem prazo de validade.

Atenção: Produto desenvolvido para uso profissional. O uso por pessoas não habilitadas isenta a empresa de futuras reclamações.

ANEXO D

BOLETIM TÉCNICO DO PERÓXIDO DE METIL ETIL CETONA



BOLETIM TÉCNICO

CATALISADOR AVULSO 12G

Peróxido de Metil Etil Cetona

ESPECIFICAÇÕES

Oxigênio ativo total	8,50 - 9,00%
Densidade (25°C)	1,00 - 1,05 g/cm ³
Aspecto	Líquido, límpido e incolor
Flash Point	acima de 60°
Solúvel em	ftalatos, água, cetonas, álcoois e glicóis
Insolúvel em	hidrocarbonetos aromáticos clorados e alifáticos
Tempo de gel	7 - 10 min.
Teor de Água (máx %)	4,0

CARACTERÍSTICAS E USOS PRINCIPAIS

Peróxido de MEKP indicado à polimerização em temperatura ambiente, de resinas de poliéster insaturado. Pode ser utilizado nos processos de laminação manual (hand lay-up), laminação por projeção (spray-up), laminação contínua (telhas) e enrolamento filamental (filament winding), além da transformação de compósitos em moldes fechados. Indicados à polimerização, em temperatura ambiente, de resinas de poliéster insaturado e éster-vinílicas. Caracterizados pelo alto grau de pureza e baixíssima presença de água nas suas formulações, atendem às mais rigorosas exigências quanto ao tempo de gel (gel time) e de cura das resinas produzidas por todos os fabricantes nacionais. Ao usá-los, os transformadores de plástico reforçado com fibras de vidro (PRFV) ou compósitos obtêm elevados índices de repetibilidade nos processos de moldagem aberta, como laminação manual (hand lay-up), laminação por projeção (spray-up), laminação contínua (telhas), enrolamento filamental (filament winding), massa plástica e moldagem fechada. Confira no verso as principais características técnicas e as tabelas de propriedades típicas dos peróxidos de MEKP

APLICAÇÃO

A maior parte das resinas de poliéster insaturado é fornecida pré-acelerada. Contudo, caso seja necessária a adição de promotores/aceleradores de reação, deve-se misturá-los bem à resina antes da inclusão do peróxido do MEKP. O promotor/acelerador mais utilizado pelos transformadores brasileiros é o octoato de cobalto, em concentrações de 8 a 12%. Aminas terciárias, a exemplo do DMA, também podem ser utilizadas em conjunto com o promotor.

A quantidade de peróxido de MEKP usada varia entre 1% a 2,5% da massa da resina que se deseja polimerizar. uma dosagem inferior (menor que 0,75%) ou superior (maior que 3%) pode determinar um baixo índice de polimerização, também conhecido como "cura pobre". Vale ressaltar que toda a adição de peróxidos de MEKP deve ser feita respeitando todos os cuidados que a Polinox detalha nos rótulos das suas embalagens.

Durante a utilização dos peróxidos de MEKP, os transformadores devem estar cientes que o tempo de gel, o índice de polimerização e a qualidade do produto final não dependem exclusivamente do tipo e quantidade de peróxido aplicado. Entre as causas que mais afetam o desempenho do processo de transformação de compósitos, destaque às temperaturas do molde, da resina e do ambiente. Dimensões, espessuras e quantidades de peças que se deseja produzir também influenciam nos resultados finais.

ANEXO E

ESPECIFICAÇÕES DO EQUIPAMENTO INSTRON 5582

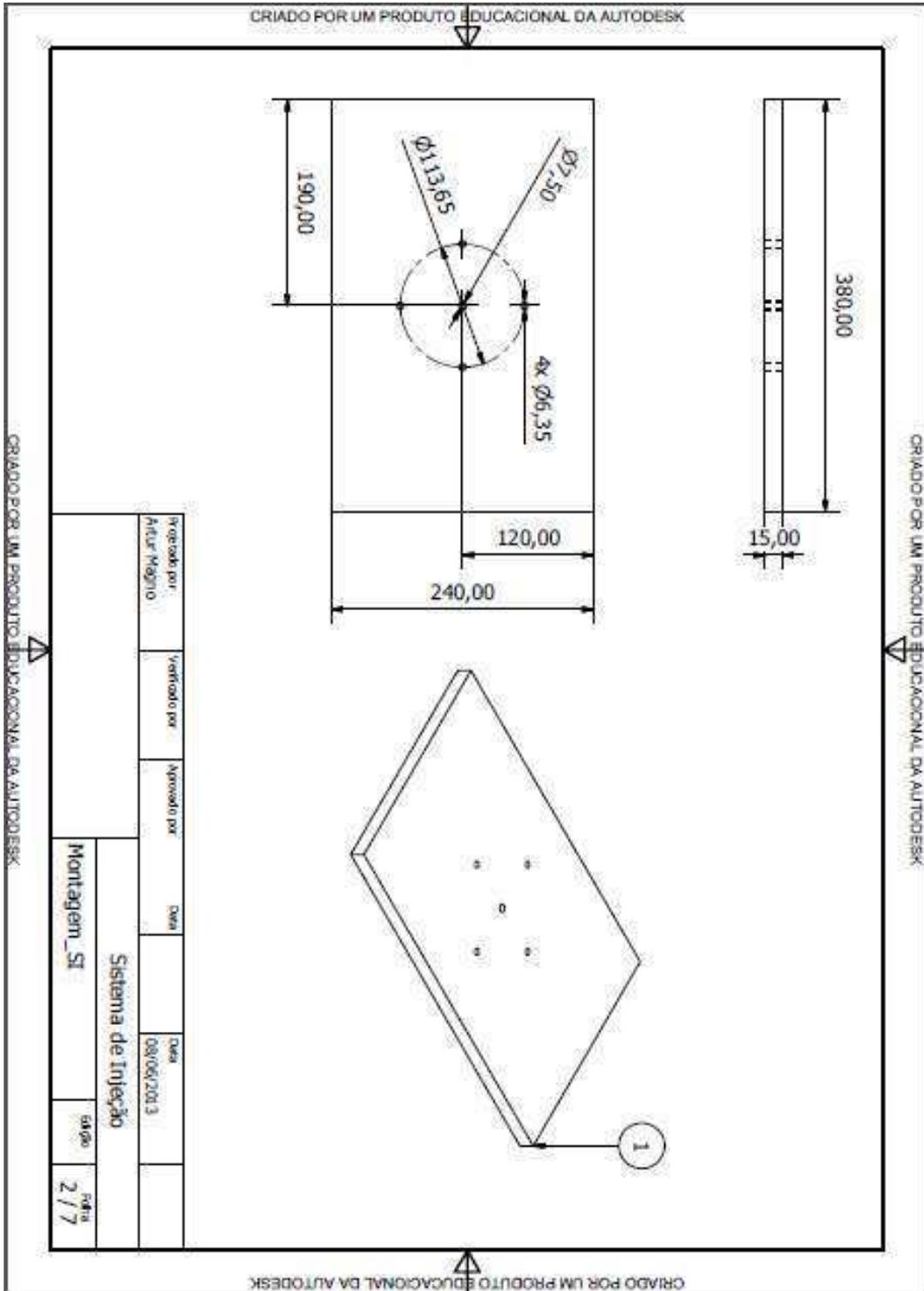
Specifications

		Single Column Table Top Models			Twin Column Table Top Models				Floor Standing Models			
		5542	5543	5544	5565	5566	5567	5569	5581	5582	5584	5585H
Lead Capacity	kN	0.5	1	2	5	10	30	50	50	100	150	250
	kgf	50	100	200	500	1000	3000	5000	5000	10000	15000	25000
	lbf	112.5	225	450	1125	2250	6750	11250	11250	22500	33750	56200
Maximum Speed	mm/ min	1000	1000	1000	1000	500	500	500	1000	500	750	500
	in/ min	40	40	40	40	20	20	20	40	20	30	20
Minimum Speed	mm/ min	0.05	0.05	0.05	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	in/ min	0.002	0.002	0.002	0.00004	0.00004	0.00004	0.00004	0.00004	0.00004	0.00004	0.00004
Maximum Force at Full Speed	kN	0.5	1	2	5	10	30	25*	35	75	110	100
	lb	112.5	225	450	1125	2550	6750	5620	7870	16860	24730	22500
Maximum Speed at Full Load	mm/ min	1000	1000	1000	1000	500	500	250**	500	250	375	200
	in/ min	40	40	40	40	20	20	10	20	10	15	8
Return Speed	mm/ min	1500	1500	1500	1200	600	600	500	1000	600	800	500
	in/ min	60	60	60	48	24	24	20	40	24	32	20
Position Control Resolution	µm	0.156	0.156	0.208	0.118	0.057	0.054	0.063	0.100	0.060	0.075	0.060
	µin	6.1	6.1	8.2	4.6	2.2	2.1	2.5	3.9	2.4	2.9	2.4
Total Crosshead Travel	mm	500	917	917	1135	1135	1135	1135	1235	1235	1180	1180
	in	19.7	36.1	36.1	44.6	44.6	44.6	44.6	48.6	48.6	46.5	46.5
Total Vertical Test Space ^{mm†}	mm	659	1076	1076	1249	1249	1205	1205	1309	1309	1256	1256
	in	25.9	42.4	42.4	49.2	49.2	47.4	47.4	51.5	51.5	49.4	49.4
Depth Daylight	mm	100	100	100	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	in	3.9	3.9	3.9								
Space Between Columns	mm	NA	NA	NA	420	420	420	420	575	575	575	575
	in				16.5	16.5	16.5	16.5	22.6	22.6	22.6	22.6
Height ^{mm†}	mm	875	1275	1275	1597	1597	1597	1597	2092	2092	2092	2092
	in	34.4	50.2	50.2	62.9	62.9	62.9	62.9	82.4	82.4	82.4	82.4
Width	mm	375	375	375	909	909	909	909	1300	1300	1300	1300
	in	14.75	14.75	14.75	35.8	35.8	35.8	35.8	51.2	51.2	51.2	51.2
Depth	mm	500	500	500	700	700	700	700	756	756	756	756
	in	19.7	19.7	19.7	27.5	27.5	27.5	27.5	29.8	29.8	29.8	29.8
Weight	kg	32	37	37	136	136	162	240	862	862	952	952
	lb	70	80	80	300	300	400	530	1900	1900	2100	2100
Maximum Power Requirement	VA	225	225	400	300	300	600	700	1400	1400	2600	2800
												VA

Note: Common Specifications are on the back page

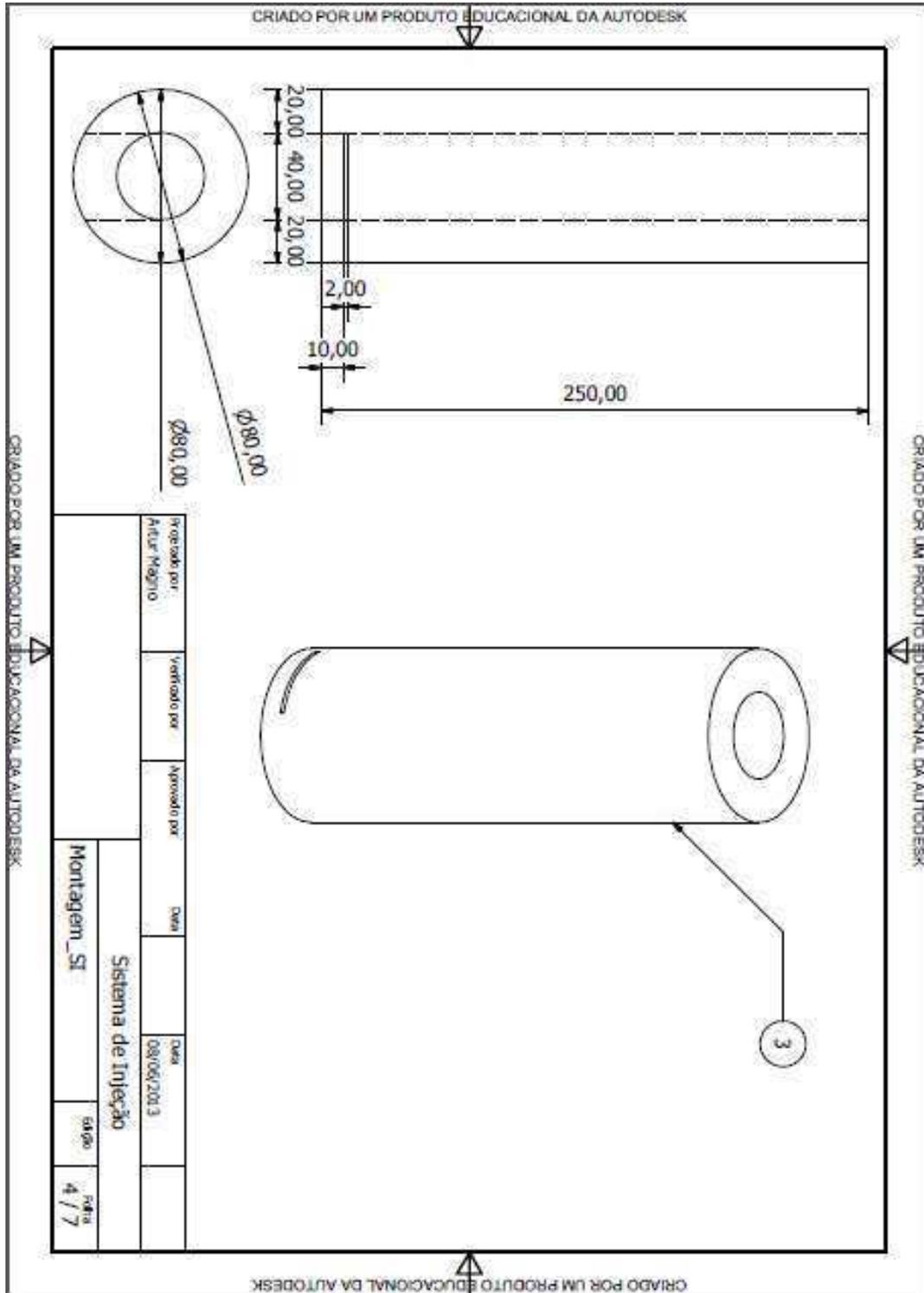
ANEXO F

PROJETO SSI Tipo II



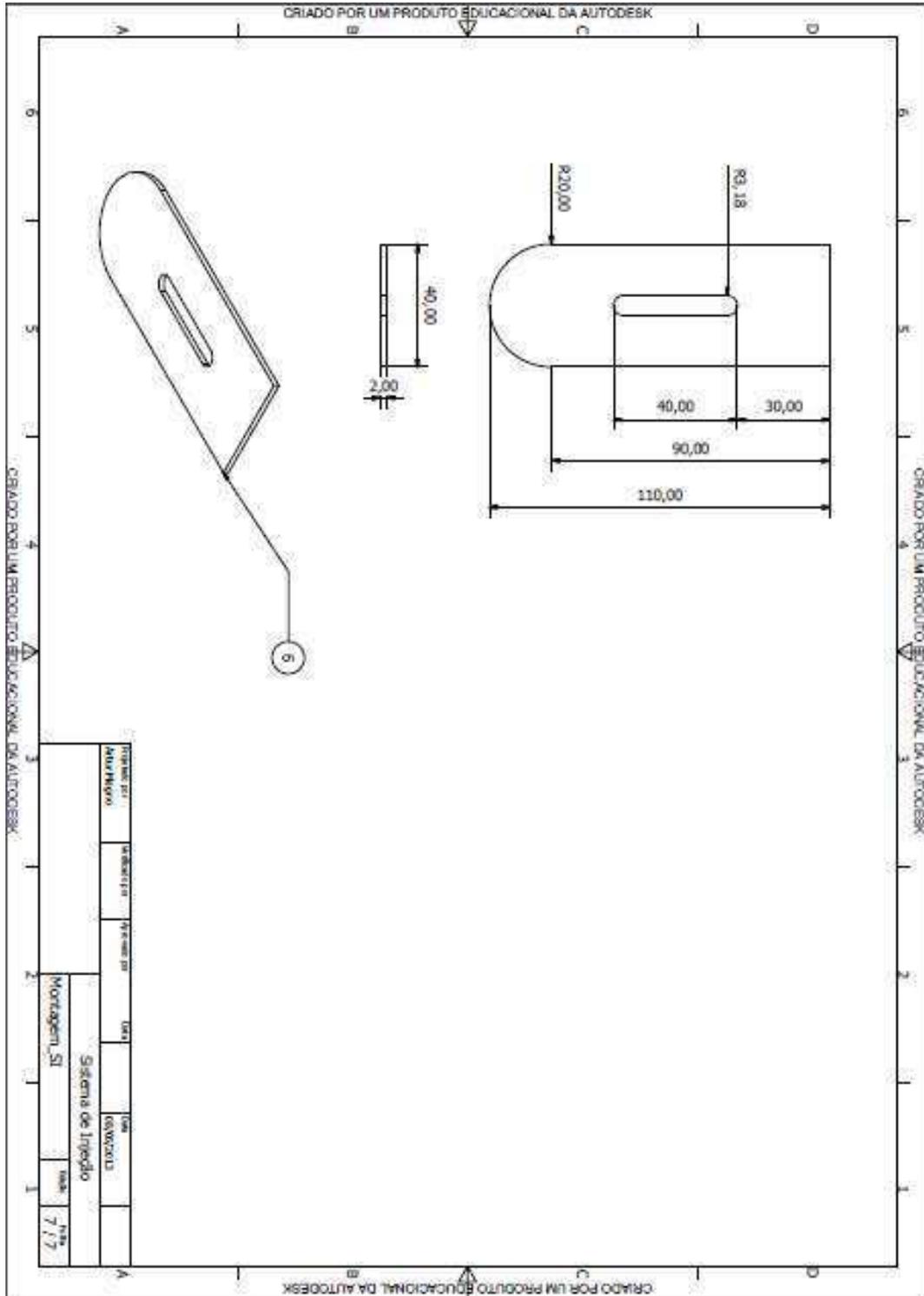
ANEXO F

PROJETO SSI Tipo II



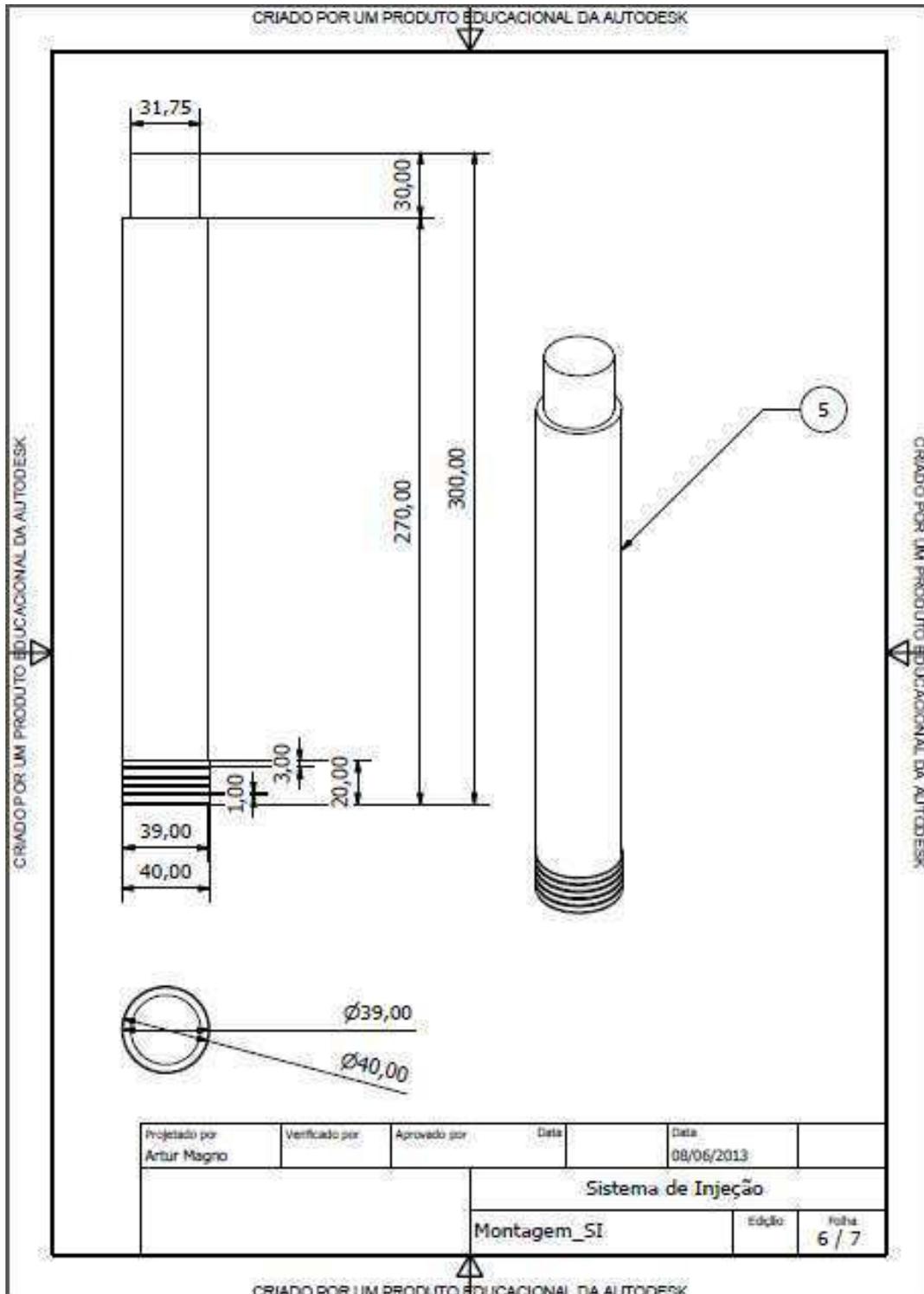
ANEXO F

PROJETO SSI Tipo II



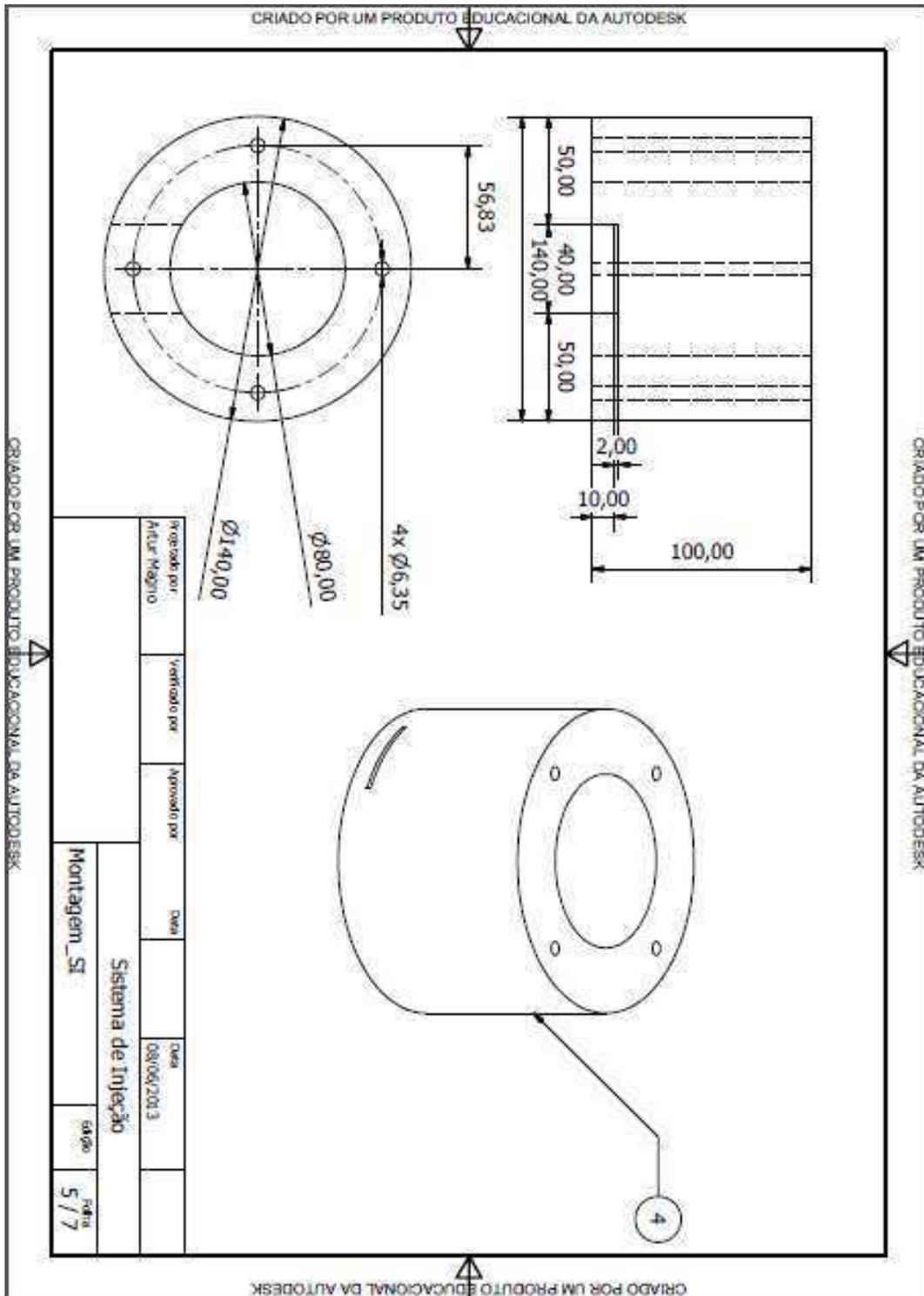
ANEXO F

PROJETO SSI Tipo II



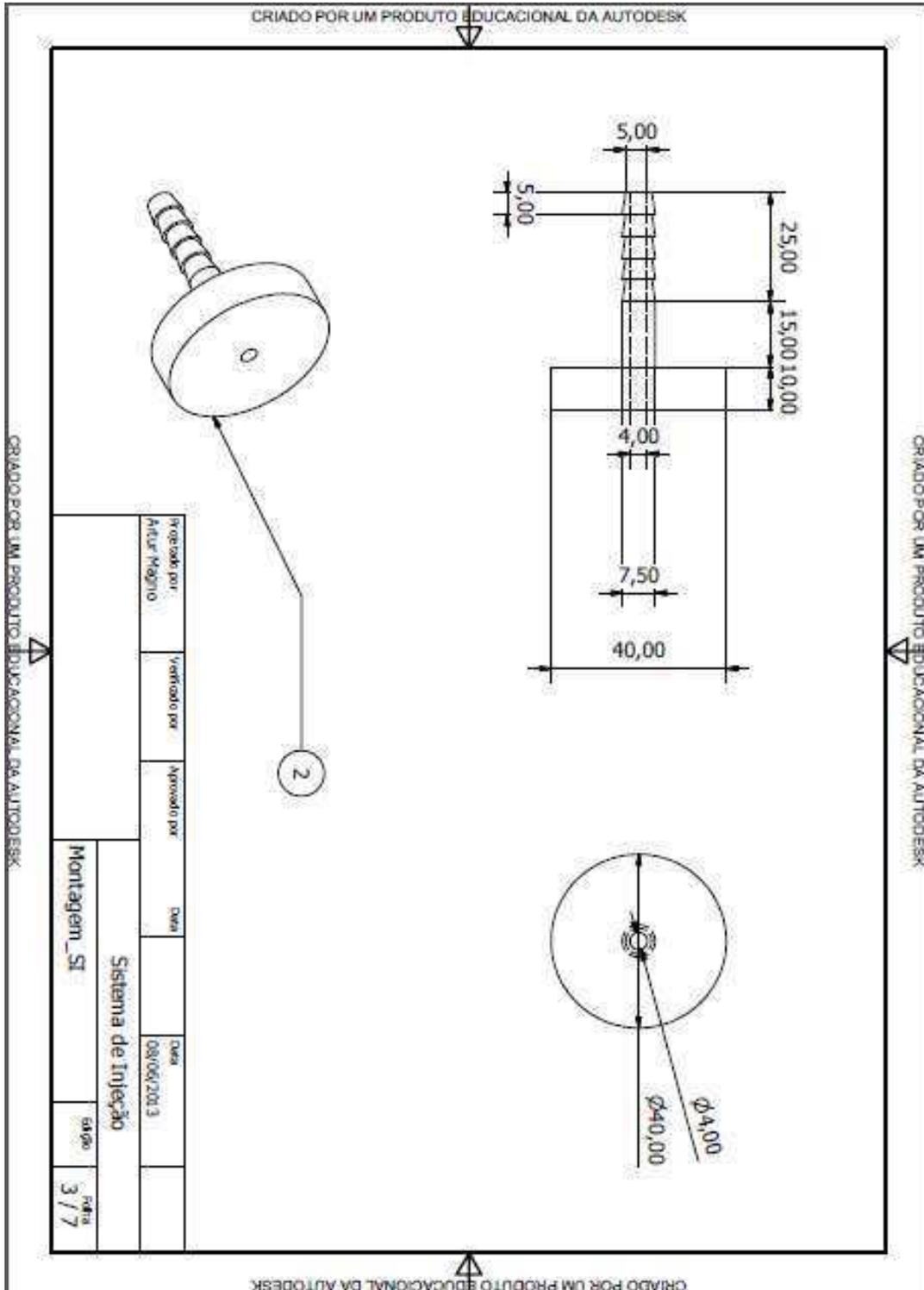
ANEXO F

PROJETO SSI Tipo II



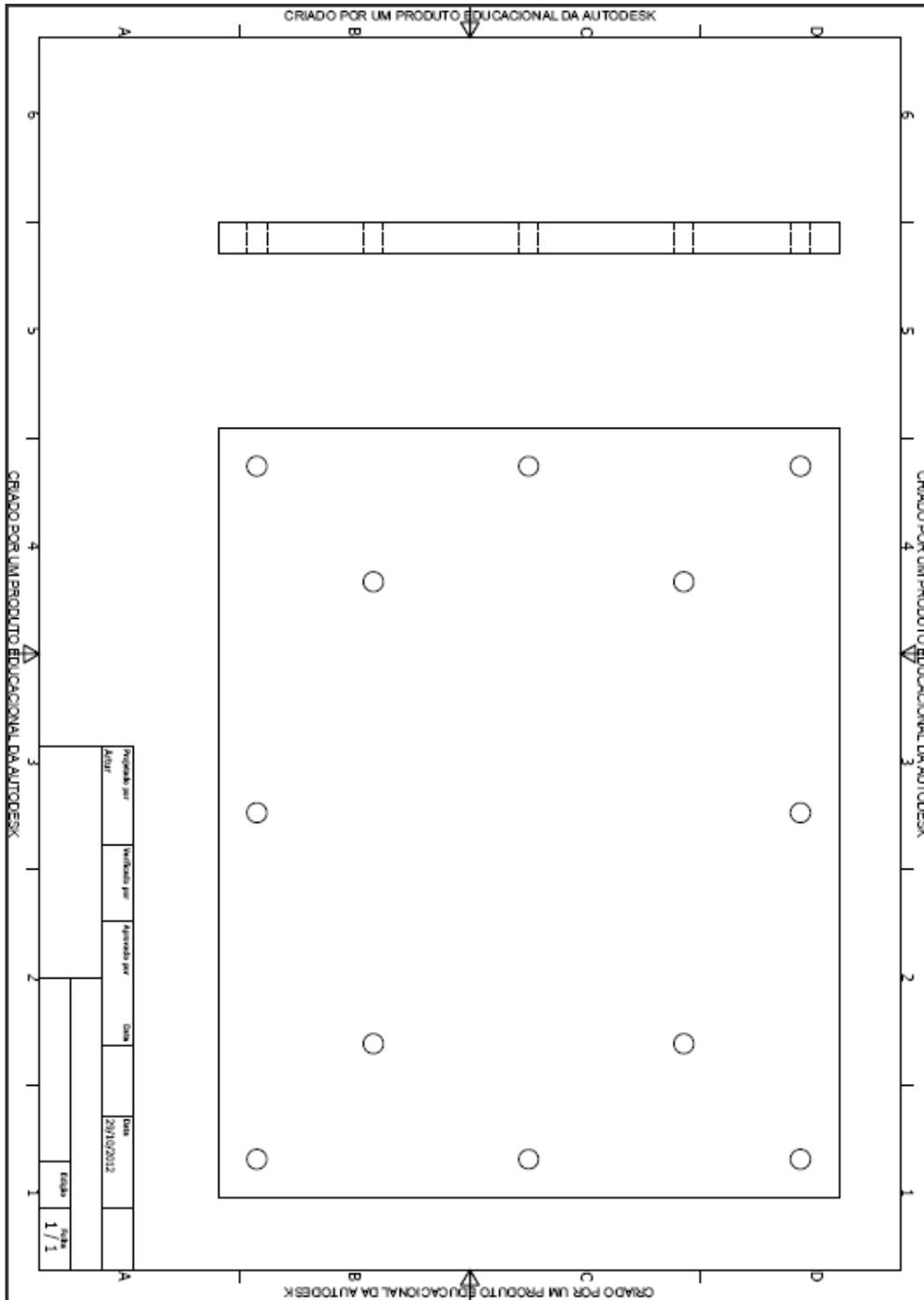
ANEXO F

PROJETO SSI Tipo II



ANEXO H

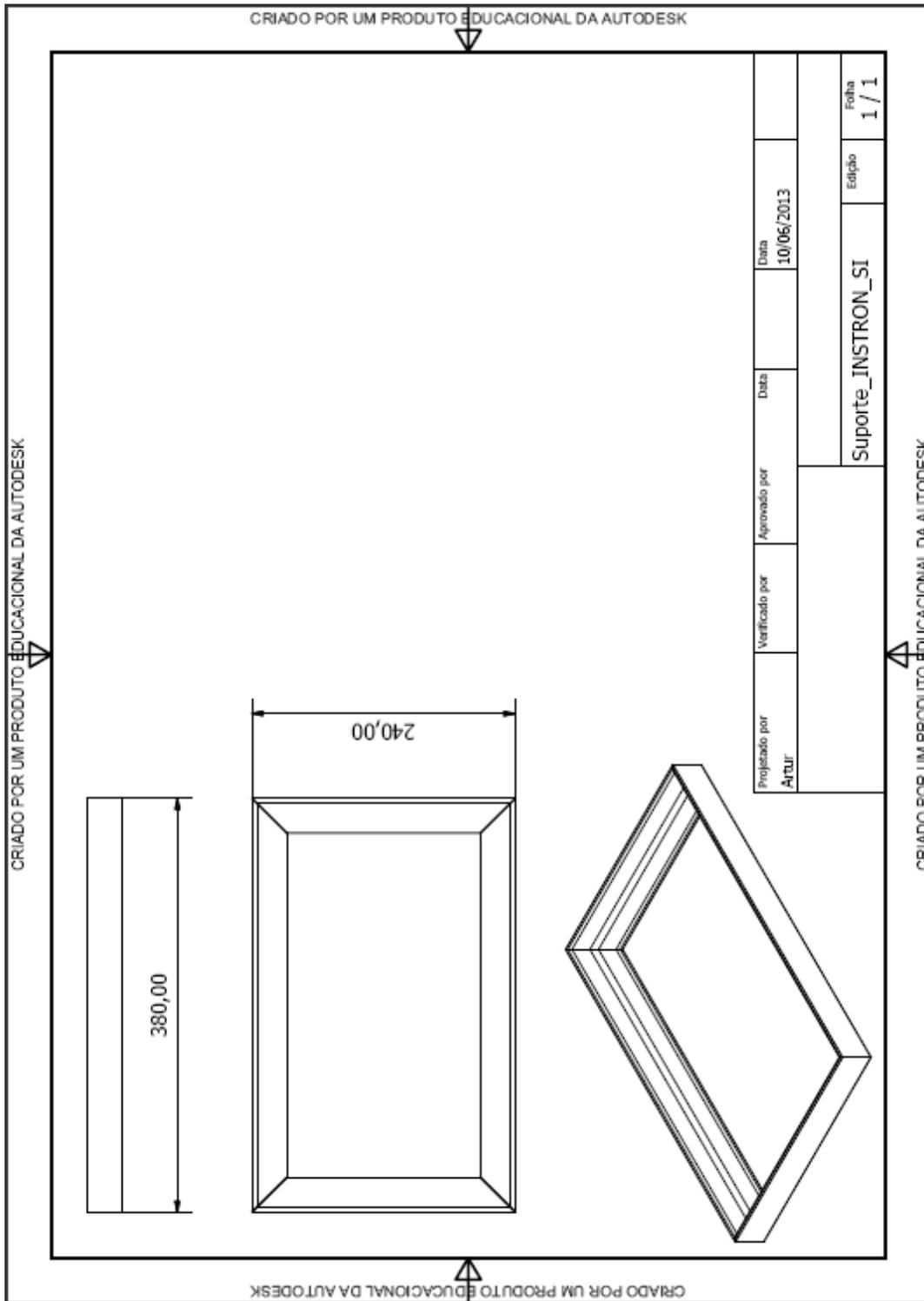
PROJETO Molde Tipo III



Obs.: Moldes Tipo II e III obedecem ao mesmo desenho técnico de fabricação, com exceção das placas inferior e base. Já os desenhos dos Moldes Tipo IV e III são dimensionados identicamente.

ANEXO I

PROJETO Suporte para SSI Tipo II



ANEXO J

PROJETO Suporte para Molde

