

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

PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS ESTRUTURAS SANDUÍCHE
MOLDADAS POR RTM *LIGHT* E SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA INFILTRAÇÃO

Tese para obtenção do título de Doutor em Engenharia

Orientador: Prof. Dr. Sandro Campos Amico (UFRGS)
Co-orientador: Prof. Dr. Jeferson Avila Souza (FURG)

André Cechin Garay, M. Sc.

Porto Alegre, 2016.

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais-
PPGE3M

TESE DE DOUTORADO

PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS ESTRUTURAS SANDUÍCHE
MOLDADAS POR RTM *LIGHT* E SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA INFILTRAÇÃO

André Cechin Garay, M.Sc.

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

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Porto Alegre, 2016.

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

Orientador: Prof. Dr. Sandro Campos Amico (UFRGS)

Co-orientador: Prof. Dr. Jeferson Avila Souza (FURG)

Banca Examinadora:

Ademir Zattera (UCS), D. Sc.

Carlos Ferreira (PPGEM), D. Sc.

Elizaldo dos Santos (FURG), D. Sc.

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker

Coordenador do PPGE3M

“Seu trabalho vai preencher uma parte grande da sua vida, e a única maneira de ficar realmente satisfeito é fazer o que você acredita ser um ótimo trabalho. E a única maneira de fazer um excelente trabalho é amar o que você faz.”

Steve Jobs

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Sandro Campos Amico pela orientação durante a realização deste trabalho e por sempre estar disposto a discutir assuntos acadêmicos.

Ao professor Dr. Jeferson de Avila da FURG-RS pela co-orientação e pela ajuda acadêmica.

Aos professores do PPGEM e LAPOL por compartilharem seu conhecimento, auxiliando na minha qualificação profissional.

Ao professor Marcilio Alves e ao Rafael Caleghini (Laboratório de Mecânica dos sólidos e impacto- USP) pelos ensaios de impacto.

Aos amigos do Laboratório de Materiais Poliméricos (LAPOL) da Escola de engenharia da UFRGS, Álvaro, Cristiane Becker, Felipe Luz, Felipe Oliveira, Clarissa e Laís.

À minha noiva e amiga Priscila Sacilotto Crivellaro por me aguentar em todos os momentos, sempre com muita alegria e carinho, Te amo!!!

E principalmente para minha família, meu pai Francisco Garay, minha mãe Bernadete Cechin Garay e ao meu irmão Ricardo Cechin Garay. Por todos os momentos da minha vida, incentivos em momentos difíceis e ao amor compartilhado.

A todos que, de alguma forma, auxiliaram na elaboração deste trabalho.

TRABALHOS PUBLICADOS

Artigos Publicados

- A.C. Garay, J.A. Souza, S.C. Amico. Evaluation of mechanical properties of sandwich structures with PET and PVC core. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 2016.
- A.C. Garay, M. Franz, J. A. Souza, S.C. Amico. Numerical analysis of a sandwich composite using open foam software. *Journal of Materials Science and Engineering with Advanced Technology*, v.11, n.2, pp.49-67, 2015.
- A.C. Garay, J.A. Souza, S.C. Amico. Studies on thermal and viscoelastic properties of vinyl ester resin and its composites with glass fiber. *Revista Matéria (UFRJ)*, v.20, n.1, pp.64-71, 2015.

Trabalhos Publicados em congressos

- A.C. Garay, F. Sampert, F.H. de Oliveira, J.A. Souza, S.C. Amico. Estudo das características térmicas da resina éster-vinílica, 11º Congresso Brasileiro de Polímeros - CBPOL, Campos do Jordão/SP, 2011.
- A.C. Garay, F. Sampert, V. Moreira, J.A. Souza, S.C. Amico. Influência do núcleo e das faces nas propriedades mecânicas de materiais compósitos sanduíche. 11º Congresso Brasileiro de Polímeros - CBPOL, Campos do Jordão/SP, 2011.
- A.C. Garay, L. Paese, F.H. de Oliveira, J.A. Souza, S.C. Amico. Mechanical properties of sandwich structures using PET and PVC CORE. 1st Brazilian conference on composite materials – BCCM-1, Natal/RN, 2012.
- A.C. Garay, J.A. Souza, S.C. Amico. Modelagem e simulação numérica do processo RTM Light com diferentes tipos de faces em compósitos sanduíche. Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais - CBECIMAT, Joinville/SC, 2012.

SUMÁRIO

SUMÁRIO	7
1. INTRODUÇÃO	19
2. OBJETIVOS	22
2.1 Objetivo Geral	22
2.2 Objetivos Específicos	22
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
3.1. Materiais compósitos	23
3.2. Estruturas sanduíche.....	26
3.3. Moldagem líquida, RTM e RTM Light	30
3.4. Simulação da infiltração da resina.....	36
3.5. Características viscoelásticas das resinas poliméricas.....	38
3.6. Propriedades de estruturas sanduíche.....	40
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	50
4.1. Materiais	50
4.2. Métodos	52
4.2.1. Características da resina éster vinílica	52
4.2.2. Moldagens RTM tradicional.....	54
4.2.3. Projeto do molde para RTM Light.....	55
4.2.4. Moldagens por RTM Light	57
4.2.5. Modelagem Computacional do Processo RTM Light.....	59
4.2.6 Permeabilidade dos reforços.....	62
4.2.7. Ensaio das estruturas sanduíche.....	63
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	71
5.1. Estudo das características da resina éster vinílica.....	71
5.2. Estudos dos compósitos obtidos por RTM tradicional.....	75
5.3. Moldagens das estruturas sanduíche por RTM Light.....	80
5.4. Simulação numérica da moldagem RTM Light.....	84
5.5. Estudo das propriedades mecânicas das estruturas sanduíche	91
5.5.1. Dureza Barcol.....	91
5.5.2. Compressão longitudinal e transversal	92
5.5.3. Flexão em 3 pontos.....	95
5.5.4. Tração nas faces e cisalhamento no núcleo	97
5.5.5. Impacto em baixa velocidade.....	99
6. CONCLUSÕES	114
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	116
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	117

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura sanduíche.	19
Figura 2 - Proposta de classificação hierárquica de compósitos sintéticos e naturais (NETO, 2006).....	23
Figura 3 - (a) Tecido plano, (b) Tecido cetim (8 harnesses-8HS), (c) Tecido mão direita e (d) Tecido mão esquerda (NETO, 2006).....	24
Figura 4 - Reação química de formação da resina éster-vinílica (SINGH, 2015).	26
Figura 5 - Constituição de uma estrutura sanduíche (ALMEIRA, 2009).....	27
Figura 6 - Materiais do núcleo homogêneo e estruturados (FRANCO, 2008).....	28
Figura 7 - Núcleo de madeira balsa (a), espuma de PVC (b) e espuma de PET (NASSEH, 2007).	29
Figura 8 - Esquema da moldagem RTM tradicional (GARAY, 2010).	32
Figura 9 - Componentes do molde RTM Light (GARAY, 2010).	33
Figura 10 - Vista superior do molde RTM Light (GARAY, 2010).....	33
Figura 11 - Ensaio de compressão longitudinal de estruturas sanduíche: (a) Forma e dimensões (em mm) da amostra utilizada; (b) Amostra de poliéster no dispositivo de teste; (c) Vista lateral e de topo de uma amostra após o ensaio (WANG, 2010).....	41
Figura 12 - Falhas de (a) delaminação e (b) delaminação com trinca do núcleo em ensaio de compressão transversal (YANG, 2008).	42
Figura 13 - Dimensões da viga sanduíche e corte AA (à direita) (ALMEIRA, 2009).	43
Figura 14- Fotos das amostras após a ruptura: Painel de estrutura sanduíche com núcleo de PVC com uma distância entre os apoios de 330 mm (a) e 380 mm (b) e estrutura sanduíche com núcleo de poliéster com uma distância entre os apoios de 166 mm (c) e 300 mm (d) (RUSSO, 2007).....	45
Figura 15 - Teste de tensão nas faces: (a) Curva de tensão-deformação e imagens dos painéis sanduíche; (b) Núcleo de PVC e (c) Núcleo de poliéster após a ruptura (RUSSO, 2007).	46
Figura 16 - Ensaio de cisalhamento: (a) Dispositivo de carregamento, (b) Curvas tensão × deformação, foto dos núcleos de (c) de PVC e (d) de poliéster.....	46
Figura 17 - Imagens das superfícies de impacto e das secções transversais para os níveis de energia 1, 3 e 5 J (XIA, 2010b).....	47

Figura 18 - Imagens das superfícies de impacto e as secções transversais para os níveis de energia 7, 10 e 15 J (XIA, 2010b).....	48
Figura 19 - Curvas típicas de energia para um ensaio de impacto de queda de peso, quando o pêndulo ricocheteia em um painel perfurado ou não (SEVKAT, 2010).	49
Figura 20 - Curva exotérmica.	53
Figura 21 - Foto do aparato experimental RTM do GCOMP-UFRGS: (a) Vaso de pressão, (b) Molde superior em vidro reforçado, (c) Molde inferior em aço, (d) Controlador de pressão (Druck), (e) Transdutores de pressão, (f) Sistema de aquisição e monitoramento de dados e (g) Câmera.	54
Figura 22- Molde e contra molde RTM Light.	56
Figura 23 – Vistas do projeto do molde RTM Light utilizado.	57
Figura 24 - Sequência de fotos de montagem do aparato de RTM Light. (a) Molde com desmoldante, (b) Primeira camada de reforço, (c) Núcleo sobre o reforço, (d) Outra camada de reforço, (e) Fechamento do molde, (f) Molde fechado e pronto para injeção da resina.	58
Figura 25 - Geometria do molde RTM Light.....	61
Figura 26 - Discretização da geometria: a) Seção de entrada, b) Seção de saída.....	62
Figura 27 - Imagem típica da frente de fluxo do óleo de soja no reforço (tempo: 3 min e 10 s).	63
Figura 28 - Ensaio de compressão longitudinal da estrutura sanduíche.	64
Figura 29 - Ensaio de compressão transversal para as estruturas sanduíche.....	64
Figura 30 - Modos de falhas mais comuns observados nos ensaios de compressão transversal (ASTM C364/C64M-07).	66
Figura 31 - Ensaio de flexão em 3 pontos da estrutura sanduíche.	67
Figura 32 - Ensaio de resistência à tração das faces para as estruturas sanduíche.....	67
Figura 33 - Ensaio de cisalhamento da estrutura sanduíche.....	68
Figura 34 - Desenho esquemático do equipamento para o teste de impacto de baixa velocidade (a) e corpo de prova (b).	70
Figura 35 - Máquina de teste da Instron Dynatup 9250H (Laboratório de Mecânica dos Sólidos e Impacto em Estrutura/USP).....	70

Figura 36 - Viscosidade da resina vs temperatura (a) e Viscosidade da resina vs tensão de cisalhamento (b) Tensão de cisalhamento vs Viscosidade, para uma temperatura de 15 °C.....	71
Figura 37 - Curvas exotérmicas para diferentes proporções de iniciador - 1, 1,5 e 2,0 %.....	72
Figura 38 – Resultados para a resina sem e com pós-cura: a) DSC, b) DMA.....	74
Figura 39 - Curvas de Tan Delta vs temperatura vs. tempo, para diferentes frequências.....	75
Figura 40 - Módulo de armazenamento dos compósitos 4M para as frequências, 0,1, 1, 10 e 100 Hz: a) Sem pós-cura, b) com pós-cura.....	77
Figura 41 - Módulo de armazenamento dos compósitos 6M para as frequências 0,1, 1, 10 e 100 Hz: a) Sem pós-cura, b) Com pós-cura.....	77
Figura 42 - Módulo de perda dos compósitos 4M para as frequências 0,1, 1, 10 e 100 Hz: a) Sem pós-cura, b) Com pós-cura.	78
Figura 43 - Módulo de perda dos compósitos 6M para as frequências 0,1, 1, 10 e 100 Hz: a) Sem pós-cura, b) Com pós-cura.	78
Figura 44 - Tan Delta dos compósitos 4M para as frequências 0,1, 1, 10 e 100 Hz: a) Sem pós-cura, b) Com pós-cura.....	79
Figura 45 - Tan Delta dos compósitos 6M para as frequências 0,1, 1, 10 e 100 Hz: a) Sem pós-cura, b) Com pós-cura.....	79
Figura 46 - Sequência de fotos do processo RTM Light para o sistema PET-3M: (a) t = 0 s, (b) 120 s, (c) 160 s, (d) 180 s, (e) 210 s e (f) 300 s.	81
Figura 47 - Sequência de fotos do processo RTM Light para o sistema PET-3T: (a) t= 0 s, (b) 120 s, (c) 160 s, (d) 180 s, (e) 210 s e (f) 300 s.....	81
Figura 48 - Sequência de fotos do processo de RTM Light para o sistema PVC-2M: (a) t = 0 s, (b) 100 s, (c) 140 s, (d) 160 s, (e) 200 s e (f) 260 s.	81
Figura 49 - Imagens das seções transversais do sanduíche nas regiões de junção entre as faces e o núcleo para os sistemas: PET-2M (a), PET-3M (b) e PET-4M.	82
Figura 50 - Imagens das seções transversais do sanduíche nas regiões de junção entre as faces e o núcleo para os sistemas: PET-2T (a), PET-3T (b) e PET-4T..	83

Figura 51 - Imagens das seções transversais do sanduíche nas regiões de junção entre as faces e o núcleo para os sistemas: PVC-2M (a), PVC-3M (b) e PVC-4M (c).	83
Figura 52 - Imagens das seções transversais do sanduíche nas regiões de junção entre as faces e o núcleo para os sistemas: PVC-2T (a), PVC-3T (b) e PVC-4T (c).	83
Figura 53 - Perfil da infiltração da parte superior da moldagem experimental para diferentes tempos de preenchimento: (a) 1 s, (b) 3 s, (c) 5s, (d) 10 s, (e) 15 s, (f) 18 s.....	85
Figura 54 - Perfil da infiltração da parte superior do molde para diferentes tempos de preenchimento: (a) 1 s, (b) 3 s, (c) 5s, (d) 10 s, (e) 15 s.....	87
Figura 55 - Perfil numérico de infiltração para diferentes tempos.	88
Figura 56 - Perfil numérico de infiltração para os diferentes tempos de preenchimento.....	89
Figura 57 - Perfil numérico de infiltração para diferentes tempos de preenchimento: Dois pontos de vácuo.....	90
Figura 58 - Perfil numérico de infiltração para diferentes tempos de preenchimento: Um ponto de vácuo e sem conexão por tubos.....	91
Figura 59 - Dureza Barcol para as estruturas sanduíche de: (a) PET e (b) PVC.....	92
Figura 60 - Valores de resistência à compressão longitudinal para os sistemas: (a) PET, (b) PVC.....	93
Figura 61 - Valores de resistência à compressão transversal para os sistemas: (a) PET, (b) PVC.....	94
Figura 62 - Ruptura apresentada pela amostra PVC-3T (a), PVC-4T (b) e PVC-4T. 95	
Figura 63 - Resistência máxima ao cisalhamento no núcleo com: PET (a), PVC (b).	96
Figura 64 - Modo de falha da estrutura sanduíche submetida à flexão em 3 pontos: (a) PET-4M - cisalhamento no núcleo, (b) PET-2M - flambagem.	96
Figura 65 - Resistência máxima a tensão nas faces (a) PET e (b) PVC.	97
Figura 66- Compósitos com núcleo de PET (a) e PVC (b) ensaiados em tração.....	98
Figura 67- Compósito com núcleo de PVC (a) e PET (b) ensaiados em cisalhamento.	99

Figura 68 - Núcleo após o ensaio de impacto para dardo solto a 0,5 m (22 J): (a) PET, (b) PVC.....	100
Figura 69- Resultados do ensaio de impacto (com 22 J) para os núcleos: (a) PET, (b) PVC.	100
Figura 70- Núcleo após o ensaio de impacto para dardo solto a 1,0 m (44 J): (a) PET, (b) PVC.....	101
Figura 71 - Resultados do ensaio de impacto (com 44 J) para os núcleos: (a) PET, (b) PVC.	101
Figura 72 - Imagem superior, inferior e corte transversal para o PET-2M após impacto a: (a) 22 J, (b) 44 J.....	102
Figura 73 - Resultados do ensaio de impacto para o PET-2M para: (a) 22 J e (b) 44 J.....	102
Figura 74 - Imagem superior, inferior e corte transversal para o PET-2T após impacto a: (a) 22 J, (b) 44 J.....	103
Figura 75 - Resultados do ensaio de impacto para o PET-2T para: (a) 22 J e (b) 44 J.	103
Figura 76 - Imagem superior, inferior e corte transversal para o PET-3M após impacto a: (a) 22 J, (b) 44 J.....	104
Figura 77 - Resultados do ensaio de impacto para o PET-3M para: (a) 22 J e (b) 44 J.....	104
Figura 78 - Imagem superior, inferior e corte transversal para o PET-3T após impacto a: (a) 22 J, (b) 44 J.....	105
Figura 79- Resultados do ensaio de impacto para o PET-3T para: (a) 22 J e (b) 44 J.	105
Figura 80- Imagem superior, inferior e corte transversal para o PET-4M após impacto a: (a) 22 J, (b) 44 J.....	106
Figura 81- Resultados do ensaio de impacto para o PET-4M para: (a) 22 J e (b) 44 J.	106
Figura 82 - Imagem superior, inferior e corte transversal para o PET-4T após impacto a: (a) 22 J, (b) 44 J.....	106
Figura 83 - Resultados do ensaio de impacto para o PET-4T para: (a) 22 J e (b) 44 J.	107
Figura 84 - Amostra PVC-4T impactada, com círculo de delaminação.....	108

Figura 85- Imagem superior, inferior e corte transversal para o PVC-2M após impacto a: (a) 22 J, (b) 44 J.....	109
Figura 86 - Resultados do ensaio de impacto para o PVC-2M para: (a) 22 J e (b) 44 J.....	109
Figura 87 - Imagem superior, inferior e corte transversal para o PVC-2T após impacto a: (a) 22 J, (b) 44 J.....	109
Figura 88 - Resultados do ensaio de impacto para o PVC-2T para: (a) 22 J e (b) 44 J.	110
Figura 89- Imagem superior, inferior e corte transversal para o PVC-3M após impacto a: (a) 22 J, (b) 44 J.....	110
Figura 90- Resultados do ensaio de impacto para o PVC-3M para: (a) 22 J e (b) 44 J	111
Figura 91- Imagem superior, inferior e corte transversal para o PVC-3T após impacto a: (a) 22 J, (b) 44 J.....	111
Figura 92 - Resultados do ensaio de impacto para o PVC-3T para: (a) 22 J e (b) 44 J.	111
Figura 93 - Imagem superior, inferior e corte transversal para o PVC-4M após impacto a: (a) 22 J, (b) 44 J.....	112
Figura 94 - Resultados do ensaio de impacto para o PVC-4M para: (a) 22 J e (b) 44 J.....	112
Figura 95 - Imagem superior, inferior e corte transversal para o PVC-4T após impacto a: (a) 22 J, (b) 44 J.....	112
Figura 96 - Resultados do ensaio de impacto para o PVC-4T para: (a) 22 J e (b) 44 J.	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Nomenclatura utilizada para os sistemas estudados por RTM tradicional e RTM Light	51
Tabela 2- Valores de tempo e temperatura de gel e temperatura máxima de cura para diferentes teores de iniciador.....	73
Tabela 3- Valores de espessura, massa específica e volume de fibra ($\%V_f$) para as amostras 4M e 6M.	76
Tabela 4- Valores das espessuras das faces do sanduíche e o $\%V_f$ médio das faces.	84
Tabela 5- Propriedades físicas e condições de operação.	86
Tabela 6- Principais parâmetros de controle da solução numérica.	90
Tabela 7- Valores máximos das forças suportadas pelas estruturas sanduíche.....	93
Tabela 8- Velocidade incidente e residual e diâmetro de delaminação para sanduíches com PET.....	108
Tabela 9- Velocidade incidente e residual e diâmetro de delaminação para sanduíches com PVC.....	113

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

- A - área da seção, mm²
- b - largura da amostra, mm
- c - espessura do núcleo, mm
- CFD - *Computational fluid dynamics*
- d - espessura total do sanduíche, mm
- D - rigidez em flexão da viga
- DMA - análise dinâmico-mecânica
- E' - módulo de armazenamento (MPa)
- E'' - módulo de perda (MPa)
- e_c - espessura do núcleo (mm)
- E_c - módulo de elasticidade do material de núcleo (GPa)
- e_L - espessuras das lâminas (mm)
- E_L - módulo de elasticidade do material das lâminas (GPa)
- F_s^{ult} - resistência ao cisalhamento do núcleo, MPa
- F_z^{fcu} - resistência máxima à compressão longitudinal, MPa
- FE-CV - *finite element control volume*
- FV - fibra de vidro
- HD - alta ductilidade
- K - permeabilidade, m²
- L - comprimento da amostra, mm
- LM - moldagem líquida
- P - carga instantânea na amostra, N
- PET - poli(tereftalato de etileno)
- P_{inj} - pressão de injeção, bar
- P_{max} - força final antes da falha, N
- PU - poliuretano
- PVC - poli(cloreto de vinila)
- r_{ff} - raio da frente de fluxo
- RTM - Moldagem por transferência de resina
- S - comprimento entre os pontos de apoio, mm.

t - espessura das amostras, mm.
 t - espessura nominal da face, mm
 T_1 - temperatura na qual a curva muda bruscamente a curvatura, °C
 t_1 - tempo no qual a curva muda bruscamente a curvatura, s
 T_2 - temperatura máxima da reação, °C
 t_2 - tempo no qual a curva atinge a temperatura máximas, s
 $\text{Tan } \delta$ - fator de perda
 t_{ff} - tempo da frente de fluxo
 t_{fs} - espessura de umas das faces, mm
 T_g - temperatura de transição vítrea, °C
 u - deslocamento instantâneo entre as placas de carga, mm
 VOF - *volume of fluid*
 w - largura da amostra, mm.
 x_{ff} - posição da frente de fluxo, mm
 γ - tensão de cisalhamento no núcleo, MPa
 ΔP - gradiente de pressão, Pa
 ε - porosidade do meio fibroso
 μ - viscosidade dinâmica, cP
 ν - frequência, Hz
 ρ_c = massa específica do compósito, g/cm³
 ρ_f = massa específica da fibra de vidro, g/cm³
 ρ_m = massa específica da resina curada, g/cm³
 σ_c^* - resistência máxima à compressão transversal, MPa
 σ_f - tensão na face, MPa
 τ - tensão de cisalhamento instantânea no núcleo, MPa
 τ_{ij} - tensor de tensões, Pa
 u - velocidade da frente de fluxo, m/s
 $\%V_f$ - fração volumétrica de fibra

RESUMO

As estruturas sanduíche são formadas por duas faces externas (geralmente feitas com fibra sintética e resina) e um núcleo no meio. Estas estruturas possuem elevada rigidez em flexão, resistência ao cisalhamento e à compressão, e um peso muito baixo. São muitas vezes produzidos por moldagem líquida, como a infusão. Neste trabalho, foi utilizada resina éster-vinílica, manta e tecido de fibra de vidro e núcleos de PET e PVC, para obter estruturas sanduíche pelo processo de *RTM Light*. O principal objetivo desta tese é validar a utilização desse processo para a fabricação dessas estruturas utilizando combinações dos núcleos e da manta ou tecido nas faces. Buscou-se também estudar numericamente, utilizando o software OpenFOAM, o processo de *RTM Light* para estruturas sanduíches, sobre o qual há pouco estudo na literatura. A resina éster-vinílica apresentou propriedades adequadas para utilização nestes compósitos, como viscosidade intermediária e tempo de cura apropriado para o processo de *RTM Light*, sendo que sua pós-cura teve um efeito importante nas propriedades finais dos compósitos. Os dois núcleos demonstraram propriedades similares, como resistência à compressão transversal e longitudinal, mas o PVC apresentou uma resistência ao cisalhamento superior ao PET. Quanto ao tipo de reforço, também foram obtidos resultados similares, mas o tecido apresentou uma maior resistência à flexão que a manta. A simulação numérica do processo possibilitou prever o comportamento da resina dentro do molde de tal maneira a identificar padrões de preenchimento, bem como regiões mais propícias à formação de vazios. Sendo, portanto, uma ferramenta importante na construção de moldes, definição dos parâmetros de processo e na escolha das matérias-primas.

ABSTRACT

The sandwich structures are comprised of two external faces (usually made of synthetic fiber and resin) and a core in between. These structures have high stiffness in bending, shear and compression strength, with a very low weight. They are often produced by liquid molding, such as infusion. In this work, vinyl-ester resin, glass mats and cloths and PET and PVC cores were used to obtain sandwich structures by Light RTM process. The main objective of this thesis is to validate the use of this process for the manufacture of these structures produced with a combination of cores and mats/cloths on the faces. The study was also based on a numerical study of the RTM Light process using the OpenFOAM software, for sandwiches structures, about which very little is available in the literature. The vinyl ester resin showed suitable properties for use in these composites, such as intermediate viscosity and adequate curing time for the Light RTM process, and its post-cure had an important effect on the final properties of the composites. Both cores showed similar properties, such as resistance to the transverse and longitudinal compression, but PVC showed greater shear strength than PET. The two types of reinforcement also produced similar results, but the use of cloths increased flexural strength. Numerical simulation of the process enabled prediction of the behavior of the resin inside the mold in a way to identify the filling pattern, as well as regions more prone to void formation. Thus, being an important tool for mold construction, definition of process parameters and the selection of raw materials.

1. INTRODUÇÃO

O conceito de estrutura sanduíche envolve a combinação de duas faces (camadas) finas e rígidas, com um núcleo espesso de baixa densidade entre elas (Figura 1). A união das faces com o núcleo pode ser por ligação adesiva ou mecânica, e possui um papel importante de transferência de carga (SAHA, 2008). Estes materiais são normalmente utilizados em cascos de barcos, pás de turbinas eólicas e na indústria aeronáutica, para estruturas ou elementos estruturais que exijam alta rigidez, principalmente a cargas de flexão, combinado a baixo peso específico (ATAS, 2010). Caracterizam-se ainda pelas suas boas propriedades de isolamento térmico, pela sua durabilidade, mesmo em ambientes quimicamente agressivos, e por permitirem combinação de diferentes materiais possibilitando a criação de formas complexas (CORIGLIANO, 2000).

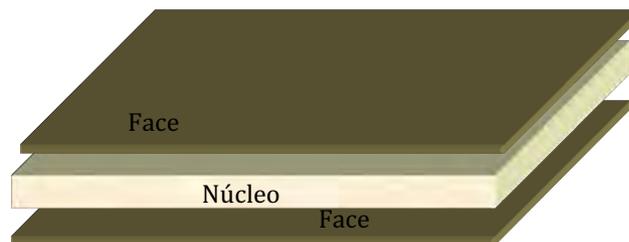


Figura 1 - Estrutura sanduíche.

Normalmente as duas faces externas são feitas de laminados de compósitos com matriz polimérica, tendo como reforço fibras de vidro ou carbono e como matriz uma resina termorrígida (ex. poliéster, epóxi ou éster-vinílica) (MITRA, 2010) e são responsáveis pelo carregamento por flexão. Os núcleos mais usados são os de madeira balsa (natural) e espumas de PU (poliuretano), PET (poli(tereftalato de etileno)) e PVC (poli(cloreto de vinila)) (sintéticos) (MITRA, 2010) e são responsáveis por resistir ao cisalhamento. Estruturas sanduíche devem ser projetadas para atender os critérios estruturais básicos, como as faces devem ser espessas o suficiente para suportar a tração, compressão e tensões de cisalhamento e o núcleo deve resistir o suficiente para suportar as tensões de cisalhamento induzidas pelas cargas de projeto.

As resinas éster-vinílicas são muito utilizadas em condições agressivas, como em ambientes marítimos e indústrias químicas. A reação de reticulação dessa resina é altamente exotérmica, mas pode ser controlada ajustando-se as condições de cura e conhecendo-se sua cinética (ITTNER, 2009). A viscosidade da resina varia com a sua massa molar e a quantidade de estireno dissolvido na mesma, sendo função também da temperatura.

Para se obter este tipo de compósito estrutural, pode-se usar processos que pertencem à categoria da moldagem líquida (LM), que consistem em injetar uma resina líquida no meio fibroso predisposto em um molde fechado, como por exemplo infusão e RTM (*Resin Transfer Molding*) (BROUWER, 2003). Este trabalho foca no processo RTM *Light*, que é uma variante do RTM tradicional, com algumas características distintas, como o uso de um molde menos rígido (compósitos). O RTM *Light* utiliza ainda um vácuo periférico como mecanismo de travamento do molde/contramolde, enquanto uma pressão positiva baixa em conjunto com o vácuo na cavidade do molde, produz um diferencial de pressão dentro do molde de até 1,5 bar, fazendo com que a resina preencha essa cavidade com facilidade, pois o gradiente de pressão no interior do molde é elevado.

Estudos desse processo foram realizados com modelagem numérica. Esta é uma importante ferramenta para o projeto de moldes e o controle do processo. Pode ser usada para a predição da infiltração de resina e o controle do tempo de processo. Este tempo de processo é um parâmetro importante que influencia não somente a produtividade, mas também a seleção dos materiais. O software livre OpenFOAM foi utilizado nesta tese para simular a infiltração de resina nas faces da estrutura sanduíche. Este software é um código geral de CFD (*Computational Fluid Dynamics*), que dispõe do modelo VOF (*Volume of Fluid*) para resolver problemas multifásicos de mecânica dos fluidos e transferência de calor. No método VOF, além das equações de conservação da massa e quantidade de movimento é adicionado ao modelo, para cada fase, uma equação de transporte para a fração volumétrica. No OpenFOAM, a discretização destas equações é feita com aplicação do método de Volumes Finitos (HIRT, 1981).

As propriedades mecânicas destes materiais estruturais vêm sendo estudadas na literatura, por exemplo para diferentes tipos de núcleos e combinações de faces. Na literatura, estas estruturas produzidas são obtidas por processo de

infusão e laminação manual e com resinas poliéster e epóxi, portanto, pouco existe sobre o processo *RTM Light* e a utilização de resina éster-vínilica neste tipo de compósito. Também não foram encontrados muitos estudos sobre a modelagem numérica do processo de *RTM Light* e ainda para estruturas sanduíches. Assim, este trabalho complementa estas áreas do conhecimento incluindo modelagem numérica do processo *RTM Light* e propriedades mecânicas das estruturas sanduíche.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Investigar propriedades mecânicas importantes de estrutura sanduíche com diferentes tipos de núcleos PVC e PET (sintéticos) e faces (mantas/tecidos) e validar o modelo numérico correspondente, comparando resultados experimentais e numéricos.

2.2 Objetivos Específicos

- Estudar as características térmicas e reológicas da resina éster-vinílica em diferentes condições de cura, utilizando os ensaios de DSC (calorimetria diferencial de varredura) e DMA (análise dinâmico-mecânica).
- Comparar a simulação numérica utilizando o software OpenFOAM com as moldagens experimentais para o processo de RTM *Light*.
- Verificar a influência dos núcleos de PVC e PET e das faces (tecido/manta para diferentes volumes de fibra) nas propriedades mecânicas como: compressão longitudinal e transversal, flexão em 3 pontos, tração nas faces, cisalhamento no núcleo e comportamento em impacto.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Materiais compósitos

A classe de materiais compósitos é bastante ampla e abrangente, compreendendo desde polímeros reforçados com fibras, materiais híbridos metal/compósito e até mesmo concretos estruturais. A característica básica dos compósitos consiste em combinar a nível macroscópico pelo menos dois materiais distintos, cada qual constituindo uma fase distinta. Estas fases são denominadas de fase matriz e fase dispersa (PRABHAKAR, 2005).

Em um contexto bem amplo, os compósitos podem ser divididos em naturais e sintéticos. Entre os compósitos sintéticos e considerando as diferentes classes relacionadas com as várias opções de matriz, pode-se classificar os tipos de arranjo dos reforços como mostra esquematicamente a Figura 2 (FLAMÍNIO, 2006). Nesta figura, vê-se que os reforços podem consistir de fibras curtas, contínuas ou de partículas.

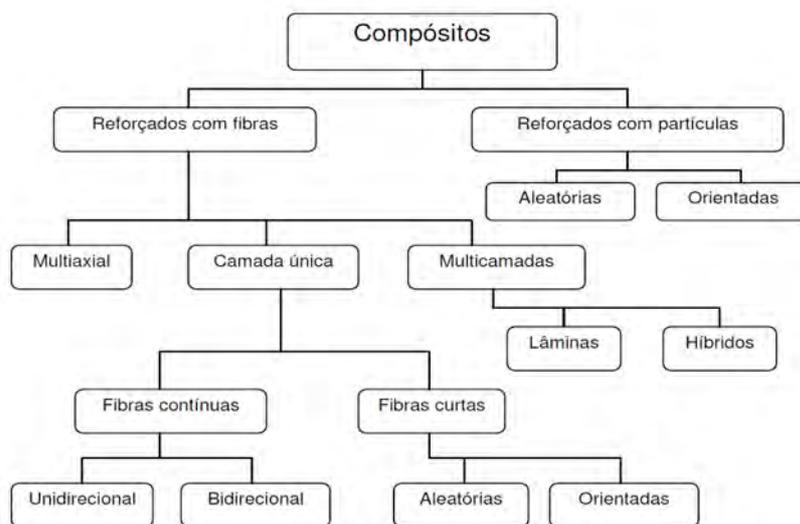


Figura 2 - Proposta de classificação hierárquica de compósitos sintéticos e naturais (NETO, 2006).

O reforço é adicionado à matriz para alcançar características como: aumento da resistência mecânica, diminuição da fragilidade, proteção contra degradação, aumento da condutividade térmica e diminuição de custos (pela economia de

matriz). Por outro lado, a matriz une as fibras, conservando a sua disposição geométrica, bem como protegendo-as do ambiente exterior (SGRICCIA, 2008).

As propriedades mecânicas de um compósito dependem de diversos fatores, como: propriedades dos materiais constituintes (fibra e matriz), orientação do reforço, fração volumétrica das fases (razão entre o volume ocupado por uma fase e o volume total do compósito) e geometria do reforço (forma e dimensões) (CARVALHO, 2006), principalmente a adesão entre os componentes.

Entre os reforços, são comuns mantas e tecidos. As mantas possuem sentido aleatório e normalmente são feitas de fibra de vidro com diferentes gramaturas, como: de 300, 450 ou até 1000 g/m². São isotrópicas e aplicadas normalmente em compósitos sem solicitações estruturais, sendo as propriedades dependentes do comprimento das fibras.

Quanto aos tecidos, são basicamente três tipos de padrões de tela, que dão origem a tecidos mais complexos: tipo plano, tipo cetim e tipo diagonal. O tipo de tela de tecido denominada plano (*plain-weave*) e suas variações são as formas mais simples de todos os tecidos de reforço estrutural. A tela consiste de cabos entrelaçados da trama que se dispõem em um padrão acima e abaixo dos cabos do urdume (Figura 3-a). Estes tecidos têm um maior número de entrelaçamentos (*crimp*) por unidade de área e isto pode reduzir a resistência e a rigidez do compósito.

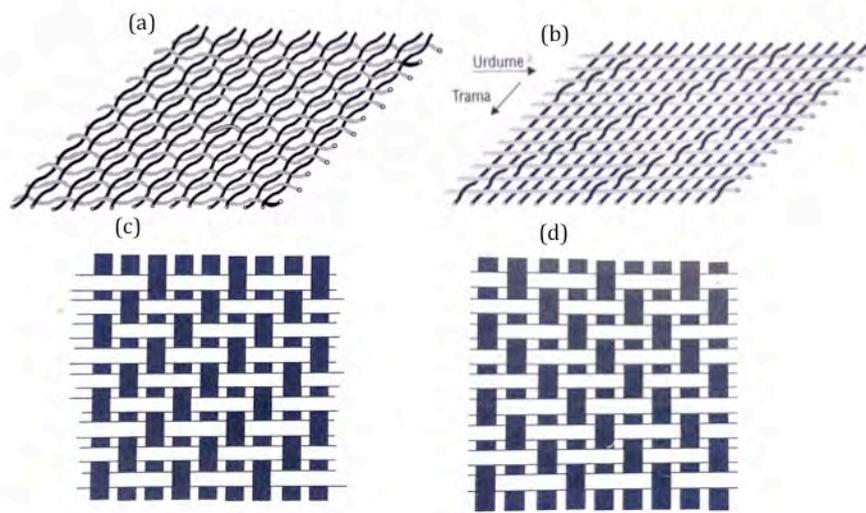


Figura 3- (a) Tecido plano, (b) Tecido cetim (8 harnesses-8HS), (c) Tecido mão direita e (d) Tecido mão esquerda (NETO, 2006).

Os tecidos do tipo cetim (*harness satin* – HS) ajustam-se mais a superfícies de contorno complexas, tendo sido criados inicialmente pela indústria têxtil para fins decorativos, pois conferiam um efeito brilhante ao produto. Estes são formados de tal forma que os cabos apresentem um comprimento maior sobre passagens (Figura 3-b), sendo que um lado do tecido tem predominantemente cabos do urdume, e o outro lado, cabos da trama. Camadas individuais deste tecido são assimétricas. Os tecidos do tipo laço diagonal (*twill*) são facilmente identificáveis por linhas diagonais que a tela forma na superfície do tecido. Os cabos nesse tipo de tecido são usualmente bem empacotados e espaçados na largura exata do mesmo e, dessa forma, mantêm-se firmes na posição (Figura 3-c e d).

Quanto à matriz utilizada neste trabalho, a resina éster-vinílica, sua química foi desenvolvida no final da década de 1950 e início de 1960, por vários pesquisadores e com formulação diferente. As primeiras eram tão reativas que não tinham tempo de vida suficiente para serem utilizadas. A resina éster-vinílica tem sua origem numa resina epóxi, que utiliza um radical bisfenol do tipo A e epicloridrina, diluído em derivados acrílicos e monômero de estireno (SINGH, 2015).

As resinas epóxi éster-vinílicas são produzidas a partir da reação de resina epóxi com bisfenol A ou Bisfenol F, para crescimento da cadeia, e posteriormente reagem com um ácido carboxílico insaturado (Figura 4). Este, na maioria dos casos, é o ácido acrílico que funciona como o doador de radicais éster-vinílicos.

Após sua obtenção, a resina é diluída com o monômero de estireno, até atingir a viscosidade e a concentração ideais. As resinas epóxi éster-vinílica são quimicamente mais resistentes que as resinas poliésteres pois suas insaturações reativas estão somente nas extremidades da cadeia, pois terminam as reações. Ainda no caso de impregnação, como em compósitos, as hidroxilas auxiliam a molhabilidade e a compatibilidade, principalmente com as fibras de vidro.

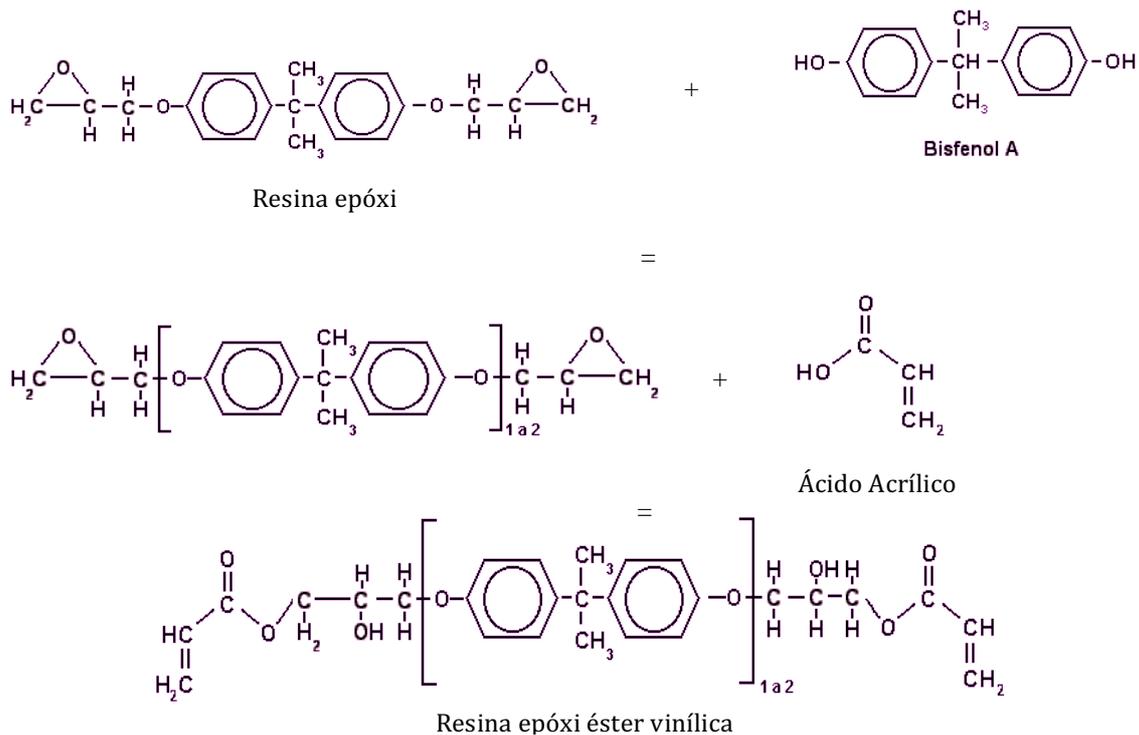


Figura 4 - Reação química de formação da resina éster-vinílico (SINGH et al., 2015).

3.2. Estruturas sanduíche

A inovação proporcionada pelas estruturas sanduíche teve início na segunda guerra mundial, com uma aplicação considerada revolucionária para a época. A necessidade de estruturas mais leves para a indústria aeronáutica propiciou o desenvolvimento de uma construção em que um núcleo de uma madeira extremamente leve oriunda da América Latina, a madeira Balsa, era envolvido por placas mais resistentes também de madeira. Esse conjunto apresentava baixo peso e elevada resistência para os padrões da época.

Atualmente, as aplicações utilizando estruturas sanduíche estão presentes em vários segmentos, com destaque para a indústria náutica, na produção de barcos pequenos ou grandes. Há também uma grande demanda na fabricação de carrocerias frigoríficas, onde são utilizadas estruturas com núcleo de poliuretano. Nos aviões comerciais de grande porte, são utilizados núcleos de colmeias na fabricação de peças do interior.

As estruturas sanduíche consistem de duas faces de um laminado de alta resistência e um núcleo de baixa densidade (Figura 5). O papel das faces na estrutura

é suportar momentos de flexão no painel, resistindo aos esforços de tração e compressão desenvolvidos nas camadas opostas quando o painel está sob carregamento. Além disso, as faces devem ter espessura suficiente para resistir à flambagem e a avarias por impactos localizados (ALMEIRA, 2009).

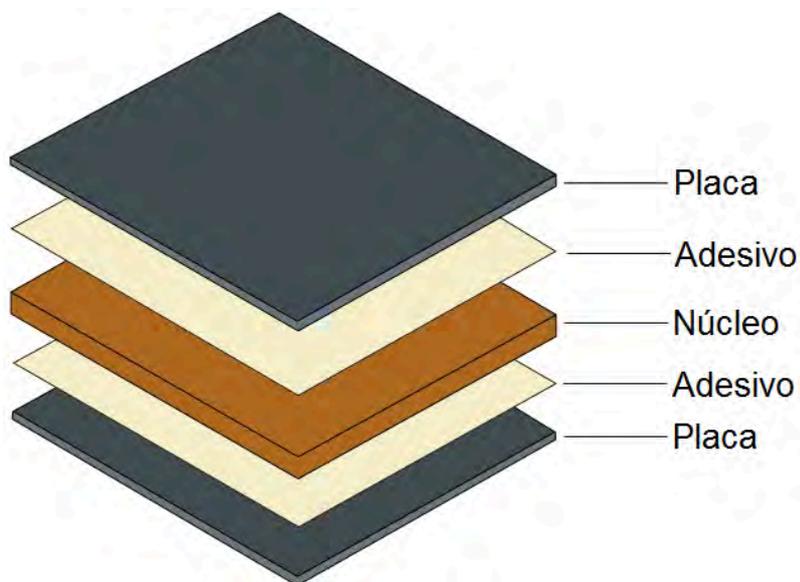


Figura 5 - Constituição de uma estrutura sanduíche (ALMEIRA, 2009).

Para as faces suportarem os esforços, elas devem ser mantidas na posição original em relação ao eixo neutro do painel e uma não deve se mover em relação à outra. Esta é uma função do material de núcleo, que deverá prover rigidez à compressão, além de ter resistência ao cisalhamento. Se o material tiver uma resistência baixa à compressão, as faces poderão se aproximar quando a estrutura estiver em flexão. Se a tensão de cisalhamento do material de núcleo for insuficiente, as faces poderão escorregar em relação à outra e a estrutura não trabalhará integrada. Neste caso, a integridade global da estrutura dependeria somente da resistência individual de duas faces muito finas.

Existem dois grupos de painéis sanduíche de acordo com grupos de materiais de núcleo: (a) núcleos homogêneos, e (b) núcleos não homogêneos ou estruturados. Entre os últimos, distinguem-se os núcleos canelados, os núcleos de favos de mel (*honeycomb*) e os painéis em que as lâminas são suportadas apenas por elementos pontuais. A Figura 6 apresenta os diferentes tipos de núcleos de acordo com a forma de suporte das lâminas.

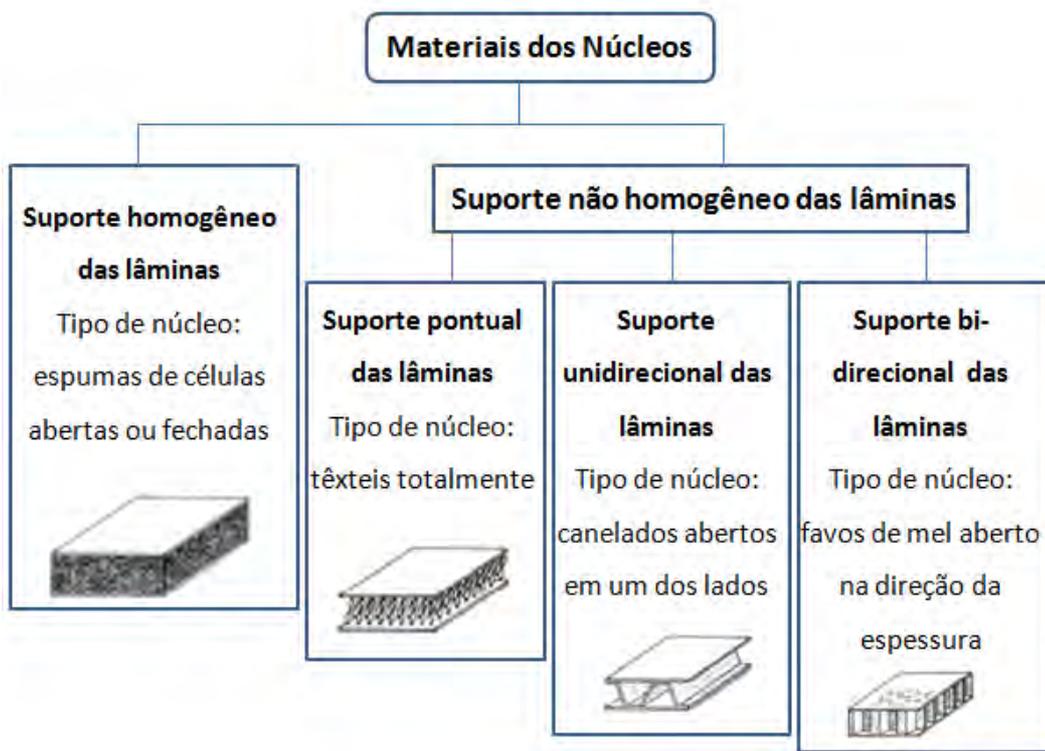


Figura 6 - Materiais do núcleo homogêneo e estruturados (FRANCO, 2008).

Na maioria das aplicações em estruturas sanduíche, o núcleo deve ser razoavelmente forte e de baixo peso, permitindo ao laminado ter espessura suficiente para aumentar a rigidez sem aumento excessivo do peso. Existe uma grande quantidade de núcleos disponíveis para aplicação em compósito sanduíche, como madeira balsa, compensado naval, uma variedade de materiais de espuma sintética e estruturas do tipo *honeycomb*.

Cada material de núcleo possui vantagens e desvantagens que são avaliadas de acordo com a aplicação. Mesmo que as propriedades mecânicas dos materiais de núcleo sejam diferentes entre seus vários tipos, geralmente, para um mesmo material, estas variam em função da densidade. Normalmente, quanto maior a densidade, melhores as propriedades mecânicas do material. Para aplicações de alto desempenho, quanto menor a densidade do material, mais eficiente será o dimensionamento da estrutura.

Assim, o material de núcleo ideal deve ser leve e com boas propriedades mecânicas de compressão e cisalhamento. Também, não deve ser friável, ou seja, não se esfarelar facilmente, e nem ser quebradiço para não causar a delaminação

das faces externas sob impacto. Deve ainda ter a habilidade de produzir uma boa linha de adesão com a resina de laminação ou adesivo, possuir boa resistência à fadiga, à corrosão e à deterioração causada pelo meio ambiente e a água, e não deve absorver ou reter umidade.

Seja qual for a técnica utilizada, as propriedades do adesivo que une as partes da estrutura sanduíche deve ser compatível com as propriedades das faces e do núcleo, pois a adesão entre essas camadas deve ser a melhor possível, possui um papel importante de transferência de carga. O adesivo deve ter boa resistência ao cisalhamento, de modo que possa transmitir essas cargas, prevenindo a delaminação da estrutura.

A madeira mais utilizada como núcleo para a construção em sanduíche é a balsa (Figura 7). Ela é um dos materiais mais baratos para esse tipo de construção. Mesmo possuindo propriedades muito boas de resistência à compressão e ao cisalhamento, a utilização de madeiras de balsa é sempre problemática em estruturas expostas ao ambiente marinho, pois uma rachadura nas faces é suficiente para que a madeira comece a absorver água, iniciando a saturação e o colapso da estrutura sanduíche. Outras desvantagens desse material são: (a) peso elevado, e por se tratar de um material natural, sua densidade é difícil de ser controlada, (b) baixa razão cisalhamento/densidade e compressão/densidade, dificultando seu uso em aplicações de alto desempenho. As placas de balsa podem ser rígidas ou cortadas em pequenos quadrados e presas a uma tela de fibra de vidro, o que permite que as chapas dessa madeira tomem em certa curvatura. Apesar de balsa ter sido um material popular no passado, sua natureza porosa pode levar à absorção de resina durante a laminação e a um aumento desnecessário em peso.



Figura 7 - Núcleo de madeira balsa (a), espuma de PVC (b) e espuma de PET (NASSEH, 2007).

Atualmente, as espumas de PVC são, provavelmente, o tipo de núcleo mais utilizado. As formulações mais recentes têm oferecido grandes vantagens para a construção de compósitos de alto desempenho. Algumas espumas de PVC oferecem quase o mesmo desempenho estrutural e o baixo peso dos *honeycombs*, com a facilidade de ser uma estrutura macroscopicamente sólida o que permite a laminação direta sobre a sua superfície, a um custo menor.

As espumas de PVC podem ser flexíveis (lineares) e ou semirrígidas (*cross linked*). As diferentes formulações possibilitam vários níveis de deformação na ruptura, alcançando 40%. No entanto, fatores como dificuldade de produção, baixa resistência às resinas poliéster e baixa resistência à temperatura fazem com que esse material tenha sua aplicação cada vez mais restrita. As espumas semirrígidas são formuladas para suportar grandes deflexões sem as penalidades de baixa resistência à temperatura e a produtos químicos, sendo conhecidas com HD (*high ductility*). Espumas de PVC são fabricadas em diversas densidades, sendo as mais comuns de 45, 60, 80, 100, 130, 160, 200 e 250 kg/m³, codificadas por cores (Figura 7-b). Suas espessuras variam de 3 a 75 mm e podem ser adquiridas em chapas planas ou cortadas em blocos de 40 × 40 mm, coladas em uma tela de fios de vidro.

Já as espumas de PET possuem elevado alongamento e boa adesão, o que resulta em boa resistência ao impacto e à fadiga (Figura 7-c). A espuma pode ser fabricada à temperatura ambiente, em formas simples, ou termoformada em peças 3-D mais complexas. Uma elevada resistência à temperatura permite ciclos curtos de transformação com sistemas de resina de cura rápida. Apresenta boa resistência a bases e ácidos fracos, bem como a maioria dos solventes atuais (álcool, acetona e percloroetileno). Possui excelente relação de célula e sua absorção de água ou resina é comparável às espumas de PVC e PU (NASSEH, 2007).

3.3. Moldagem líquida, RTM e RTM *Light*

O processo de moldagem líquida (LM) consiste na infiltração de uma resina líquida em um meio fibroso e é usada com sucesso em aplicações de grande volume de produção, porém a necessidade de ferramental de elevado custo e a dificuldade de controlar a orientação das fibras limitam sua aplicação em situações não-

estruturais. Os processos de moldagem líquida foram identificados com o potencial de minimizar/eliminar as dificuldades de fabricação envolvidas no processamento de compósitos, como: tempo de processamento, formação de bolhas, controle dimensional e controle de voláteis, sendo esta uma rota de processamento de custo aceitável (RUDD, 1997).

Nesta família de processos, a fração volumétrica de fibras ($\%V_f$) e a arquitetura da pré-forma fibrosa influenciam o processamento bem como as propriedades mecânicas. Estas podem ser melhoradas com o aumento da fração volumétrica de fibras, entretanto, requerendo maiores pressões de injeção, o que pode afetar as propriedades do componente final moldado (HE, 2006).

Outro fator importante em processos de LM é que, durante a moldagem, podem se formar vazios, pela entrada de bolhas de ar ou a impregnação deficiente do reforço, sendo que estes afetam diretamente as propriedades dos compósitos (LI, 2005). Alguns estudos abordam técnicas de diminuição de vazios nos compósitos através da análise de diferentes formas de reforços e parâmetros de injeção (mais precisamente pressão do fluido e perfil da frente de fluxo) (LECLERC, 2008). Dentre vários processos de LM, destacam-se o RTM, o RTM *Light* e a infusão. Neste estudo, serão abordados os dois primeiros, sendo que a proposta do estudo é a substituição do processo de infusão pelo RTM *Light* para fabricação de estruturas sanduíche (GOURICHON, 2008), pois o processo de infusão é pouco produtivo, difícil controle de espessura e gera muito resíduo, chamados de material de sacrifício.

O processo de Moldagem por Transferência de Resina (RTM) tem sido amplamente usado na indústria automobilística, aeroespacial (HAIDER, 2007), civil e naval, pois podem ser obtidos produtos com formatos complexos, grandes dimensões e com excelente controle de propriedades (HAN, 2000). Esta tecnologia consiste em injetar uma resina termofixa líquida pré-catalisada, em um molde fechado onde uma pré-forma fibrosa seca, normalmente fibra de carbono ou de vidro, foi previamente colocada (Figura 8) . A pressão de injeção é normalmente entre 1 e 10 bar, pois valores maiores podem causar o arraste de fibras (*fiber wash*), deflexão do molde/contramolde e a formação de vazios no compósito. A resina deve ter uma viscosidade baixa (≤ 1 mPa.s) para uma boa impregnação do reforço e para que o tempo de injeção não seja elevado. A cura da resina é *in-situ* (com molde à temperatura ambiente ou aquecido), e posteriormente o molde é aberto para a

desmoldagem do compósito, que pode ainda requerer operações de acabamento. Quando a estrutura possui grandes dimensões, o molde/contramolde deve ser reforçado ou pode-se usar uma prensa para que não ocorra sua deflexão no momento da injeção da resina.

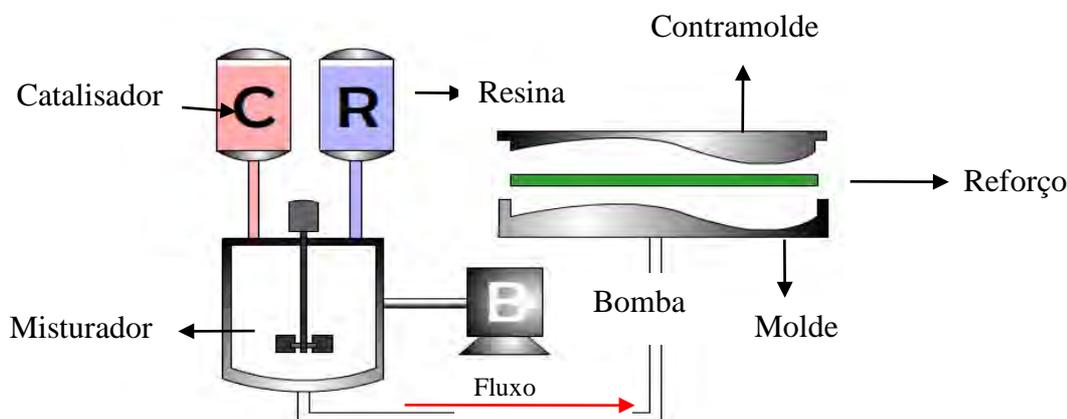


Figura 8 - Esquema da moldagem RTM tradicional (GARAY, 2010).

Este trabalho se diferencia do demais vistos na literatura no processamento das estruturas sanduíche, que normalmente ocorre por processo de infusão ou moldagem manual, que afeta diretamente as propriedades mecânicas finais das estruturas. O processo de RTM *Light* é uma tecnologia mais atual e de fácil aplicação que o RTM tradicional. A utilização de matérias-primas desenvolvidas exclusivamente para este processo e com bom controle dos parâmetros operacionais (pressão de injeção, vácuo de travamento do molde e vácuo no interior do molde para direcionamento do fluxo), componentes de boa qualidade podem ser fabricados.

O processo RTM *Light* começa pelo desenvolvimento do molde e do contramolde (Figura 9). O molde pode ser construído de maneira similar ao usado para a moldagem manual ou *spray-up*, já o contramolde é leve e pode ser translúcido para permitir a visualização do fluxo da resina, e nele é feito o canal periférico para injeção da resina além do sistema de travamento do molde/contramolde por vácuo. Por ser um processo à baixa pressão, o molde/contramolde é simples e de baixo custo, comparado a outros processos de moldagem líquida de alta pressão, e podem ser construídos de compósito, não sendo necessário o uso de reforço estrutural.

O ponto de injeção é um orifício localizado no contramolde, por onde é injetada a resina. Esta flui pela canaleta ao longo de toda a extensão do perímetro do contramolde convergindo eventualmente para o ponto de vácuo (Figura 10). O ponto onde será aplicada a pressão negativa (vácuo) também fica localizado no contramolde, e deve ser dimensionado corretamente para que nenhuma área da cavidade fique com ar aprisionado, dificultando a impregnação da resina.

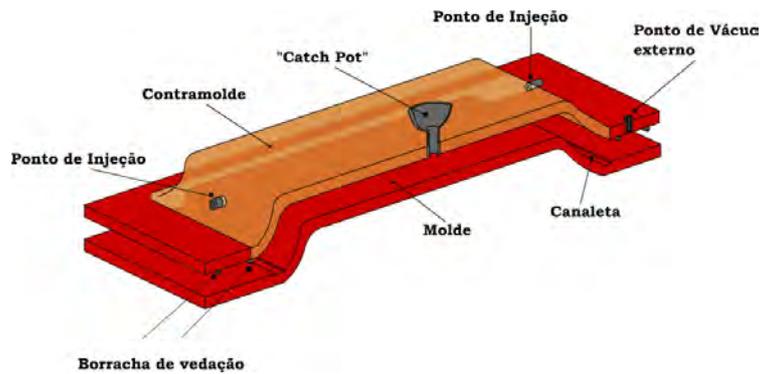


Figura 9 - Componentes do molde RTM *Light* (GARAY, 2010).

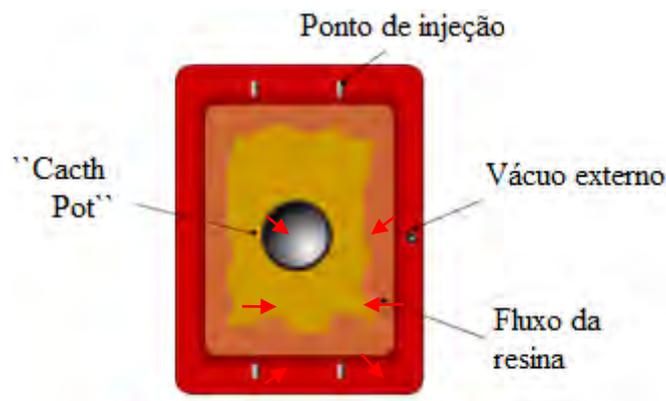


Figura 10 - Vista superior do molde RTM *Light* (GARAY, 2010).

Outro ponto importante na construção do contramolde, são as duas borrachas de vedação. A primeira tem como função evitar a passagem de resina e a entrada de ar, e a segunda veda a entrada de ar para que o vácuo faça o travamento do molde/contramolde. A aba entre as duas borrachas deve ter no mínimo 150 mm para que o fechamento seja eficaz.

O processo de RTM *Light* é considerado simples, mas os diferentes parâmetros como pressão de injeção e vácuo, a eficiência no travamento a vácuo do molde/contramolde e as matérias-primas devem ser cuidadosamente escolhidas. As vantagens que o processo RTM *Light* possui em relação aos processos manuais incluem: maior rapidez no processo, menor tempo de cura (resinas especiais), maior exatidão das peças, menor custo de matérias-primas, melhor acabamento e maior estabilidade dimensional. Comparando com o RTM tradicional, possui a vantagem de baixo custo de equipamento e moldes, embora não consiga fabricar peças de alto teor de fibras.

O processo RTM *Light* pode empregar mantas comuns de fibra de vidro, porém estas apresentam menor moldabilidade em relação às mantas moldadas para produção de peças de alta qualidade, até as chamadas mantas moldáveis, que consistem de duas mantas de fibra de vidro picada com um núcleo de não tecido sintético (em geral, polipropileno ou polietileno) com gramaturas variadas. As mantas superior e inferior conferem propriedades mecânicas ao laminado, e o núcleo de polipropileno promove o fluxo de resina (SCHIMIDT TM, G.M., 2009).

É muito importante nos processos de moldagem líquida em geral a determinação da permeabilidade do meio fibroso. Está é uma medida da resistência ao fluxo do fluido (resina) no reforço, sendo normalmente obtida por dois métodos de fluxo: retilíneo e radial (HAN, 2000). A infiltração retilínea é usada para medir de uma maneira simples e prática a permeabilidade na direção do fluxo unidirecional. Porém, a infiltração radial possui vantagens sobre a retilínea no que diz respeito à medição da permeabilidade, pois é possível determinar, simultaneamente, as duas componentes da permeabilidade e as direções principais de fluxo em reforços anisotrópicos (SCHIMIDT TM, G.M., 2009). A lei de Darcy (Eq. 1) é geralmente aceita para descrever o fluxo planar de um fluido Newtoniano incompressível em um meio poroso fibroso. Nesta equação, os efeitos capilares e gravitacionais são desprezíveis.

$$\vec{u} = \frac{1}{\mu} [\vec{K}] \cdot \Delta P$$

Equação 1

onde: \vec{u} = velocidade da frente fluxo (m); μ = viscosidade dinâmica (cP); \vec{K} = permeabilidade (m²); ΔP = gradiente de pressão (Pa).

Esta lei estabelece que a velocidade do fluido pelo meio fibroso é proporcional ao gradiente de pressão e inversamente proporcional à viscosidade do fluido. O coeficiente de proporcionalidade é conhecido como permeabilidade (K). Na infiltração retilínea, se a pressão de injeção P_{inj} for constante, o tempo (t_{ff}) requerido para frente de fluxo do fluido alcançar uma posição (x_{ff}) particular dentro do molde pode ser obtido pela , onde ε ($\varepsilon = 1 - V_f$, sendo V_f a fração volumétrica de fibras) é a porosidade do meio poroso fibroso antes da moldagem. Assim, em uma infiltração retilínea, a declividade da reta obtida em gráficos que relacionam o quadrado da posição da frente de fluxo do fluido com o tempo indica a permeabilidade do meio poroso, ou seja, do reforço de fibras.

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

Equação 2

Na infiltração radial a pressão de injeção P_{inj} constante, o tempo requerido para o fluido, que passa por uma porta de injeção com raio r_{inj} , preencher uma região de raio r_{ff} dentro do molde é dado pela Equação 3, sendo aplicada até que a frente de fluxo alcance a parede do molde.

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

Equação 3

(SCHIMIDT, 2009) apresenta o estudo de medida de permeabilidade em reforços híbridos, utilizando como reforço, fibras de vidro, sisal e de polipropileno. Foram utilizadas infiltrações retilíneas com pressão constante, e os autores concluem que os maiores valores de permeabilidade para reforços de multicamadas foram os obtidos quando utilizaram a fibra de sisal junto com a fibra de polipropileno. Isto ocorre porque as fibras vegetais possibilitam um caminho mais fácil para o fluxo do fluido. Outra conclusão apresentada é com relação à utilização de uma fibra mais permeável na camada inferior, mais próxima ao canal de injeção, pois dessa forma o tempo de preenchimento do molde diminui.

3.4. Simulação da infiltração da resina

A simulação numérica em mecânica dos fluidos e transferência de calor, também conhecida como CFD (dinâmica dos fluidos computacional), teve um desenvolvimento impressionante nos últimos 20 anos. Inicialmente como uma ferramenta para análise de problemas físicos em nível de investigação científica e, atualmente, como uma ferramenta poderosa para solução de importantes problemas aplicados da engenharia (MALISKA, 2004). O uso das técnicas numéricas para solução de problemas complexos de engenharia é hoje uma realidade, graças ao vertiginoso desenvolvimento de computadores de alta velocidade e da grande capacidade de armazenamento.

Através do estudo numérico, pode-se projetar de forma eficiente aspectos críticos do projeto como, no caso do RTM *Light*, o ponto de injeção (*inlet*) de pressão positiva, o ponto de saída (*outlet*) com pressão negativa, a pressão a ser utilizada para a moldagem a fim de que o escoamento seja feito de forma eficaz sem deixar áreas sem resina (vazios) ou com preenchimento parcial do molde devido à resina atingir o tempo de gel.

Segundo (SONG, 2007) a previsão precisa do fluxo é de grande importância para reduzir o tempo de processamento e melhorar as propriedades da peça, aumentando desta forma, sua qualidade final. Muitos métodos foram propostos para a simulação numérica do avanço da resina em um meio poroso ((ADVANI, 1990), (LUOMA, 2000), (MURAT SOZER, 2010)), contudo as duas metodologias mais utilizadas são: *Finite Element-Control Volume* (FE-CV) (FREDERICK R, 1997) e *Volume of fluid* (VOF) (HIRT, 1981).

Dentre os diversos trabalhos encontrados na literatura, pode-se citar a contribuição de (SHI, 2011), que descreveu uma técnica de volumes de controle usando o método de diferenças finitas para caracterizar o comportamento da linha de frente do fluxo no processo de RTM. Foi feita uma modelagem transiente de um escoamento bifásico em meios porosos onde o conceito de fração volume de fluido (VOF) é aplicado na descrição do escoamento dos dois fluidos envolvidos, ar e resina. Foram apresentados resultados experimentais, que foram obtidos com ensaios feitos com resina EPON 286 e reforço fibroso de mantas de fibra de vidro;

esses resultados foram comparados com os modelos numéricos desenvolvidos e mostraram uma boa concordância.

Pode-se citar também a contribuição de (SAOUAB et al., 2001) que apresenta o estudo do efeito sobre o compósito acabado decorrente dos casos onde é deixado uma folga entre o reforço fibroso e a borda do molde. Quando isso ocorre, forma-se um canal preenchido apenas com resina que certamente irá prejudicar a qualidade do compósito produzido. Foi apresentado um modelo matemático que considera o efeito da espessura da cavidade sobre o fluxo da resina que envolvem a interface entre o canal e o meio poroso. O método VOF foi aplicado para a determinação do fluxo de frente da resina. Para a validação do modelo numérico desenvolvido foi feita a comparação com dados experimentais. O estudo ainda contemplou os efeitos da largura da borda do canal e espessura da cavidade na frente de fluxo, além da pressão de injeção. Os resultados numéricos apresentaram boa concordância com os dados experimentais.

(FREDERICK R, 1997) apresentou um modelo numérico, baseado na Lei de Darcy, para a solução do escoamento em meios porosos. (FREDERICK R, 1997) pela técnica FE/CV com o objetivo de prever o movimento da superfície livre da resina. O método dos elementos finitos foi utilizado para resolver a equação de Laplace para a pressão. Esta resulta da combinação da Lei de Darcy com a equação de conservação da massa para um fluido incompressível e escoamento permanente. São apresentadas vantagens importantes para a época e muito valorizadas pela comunidade científica como por exemplo, a garantia da conservação da massa no escoamento e a simplicidade da solução. Foi demonstrada a importância da técnica através da simulação do processo de injeção em peças complexas. Estes resultados mostram o potencial da técnica FE/CV, a qual é capaz de prever, de forma rápida, possíveis problemas de propagação da resina no interior do molde.

Estas técnicas numéricas vêm sendo aplicadas na análise de vários problemas como por exemplo: efeito das borda (YANG, 2008a), formação de vazios (MOEINI, 2013) entre outros. Alguns trabalhos abordam esforços para melhorar a capacidade dos métodos em detectar zonas secas (vazios) no interior do compósito (BRÉARD, 2003). No método VOF, a formação de vazios é automaticamente detectada, no entanto, este método é muito mais demorado e possui alguns problemas de convergência. Os métodos FE-CV são mais rápidos e muito mais

estáveis em termos de convergência, no entanto não é capaz de determinar zonas secas, a menos que seja adicionado ao método uma formulação específica.

Para prever o processo de injeção com boa concordância em termos de tempo de enchimento, as propriedades físicas da resina e reforço fibroso precisam ser determinadas com precisão. Na maioria dos casos, ensaios experimentais são utilizados para a determinação da permeabilidade, no entanto, alguns trabalhos utilizam uma combinação de dados experimentais com solução numérica, como o trabalho de (SHI, 2011).

Em termos de projeto do molde de RTM, um dos problemas mais comuns está relacionado ao posicionamento dos pontos de injeção e de saída. O modelo numérico é uma ferramenta importante para reduzir custos e tempo no projeto de moldes (LAURENZI, 2014). Finalmente, há estudos aplicados que se concentram em estudo um problema de engenharia específico, propondo soluções eficientes em termos de operação de processo, projeto de molde ou a qualidade da peça final (ISOLDI, 2012). Os modelos numéricos desenvolvidos necessitam ser validados, o que geralmente é feito através da comparação com resultados experimentais.

Um diferencial desta tese é a proposta de estudar a modelagem numérica do RTM *Light*, pois esse processo tem uma especificidade que são as canaletas laterais, onde não há meio fibroso. Além disso, foi aplicada a estruturas sanduíche, que possuem duas faces permeáveis e um núcleo central impermeável, sobre o qual também não há estudos na literatura.

3.5. Características viscoelásticas das resinas poliméricas

A análise termo-dinâmico-mecânica (DMA) tem como um dos principais objetivos correlacionar as características macroscópicas, tais como as propriedades mecânicas, com as relaxações moleculares associadas a mudanças conformacionais e a deformações microscópicas geradas a partir de rearranjos moleculares (CANEVAROLO, 2004). Essa análise consiste, de modo geral, em se aplicar uma tensão ou deformação mecânica oscilatória, normalmente senoidal e de baixa amplitude, a um sólido ou líquido viscoso, medindo-se a deformação sofrida por este ou a tensão resultante, sob variação de frequência ou de temperatura (COWIE, 1973).

O comportamento mecânico ou dinâmico-mecânico de um material é governado por sua viscoelasticidade, e é função do tipo de ensaio e da solitação aplicada. Dependendo da resposta, o material pode ser classificado como elástico ou viscoso. Para um sólido perfeitamente elástico ou Hookiano a deformação é proporcional à tensão aplicada e vice-versa, segundo a lei de Hooke. Um material viscoso ideal obedece à lei de Newton, que estabelece que a tensão e a taxa de cisalhamento estão relacionadas através de uma característica intrínseca que é a viscosidade.

Materiais poliméricos apresentam comportamento intermediário ao elástico e ao viscoso, denominado viscoelástico. A contribuição elástica e viscosa para o comportamento mecânico do polímero dependerá da temperatura e da escala de tempo do experimento (HIEMENS, 1984). O comportamento viscoelástico de materiais poliméricos pode ser compreendido mais facilmente a partir de ensaios mecânicos, através do aumento da temperatura e da velocidade do ensaio (CASSU; FELISBERTI, 2005). Em experimentos termo-dinâmico-mecânicos conduzidos isotermicamente, quando a frequência é variada, as cadeias poliméricas absorverão energia em faixas de frequência características.

A absorção de energia só ocorre quando a escala de tempo do experimento, ditada pela frequência, for igual ao tempo necessário para que o material sofra uma determinada relaxação, denominado tempo de relaxação. Como a absorção de energia mecânica de polímeros ocorre em uma faixa de frequência ν ($1/\nu =$ tempo), o material apresenta uma distribuição de tempos de relaxação. Os tempos de relaxação são dependentes da temperatura, decaindo com o aumento desta. As relaxações normalmente estão associadas a mudanças conformacionais de grupos ou segmentos da cadeia polimérica, resultantes de rotações em torno de ligações químicas. O tempo de relaxação é uma medida da mobilidade das cadeias e depende da estrutura molecular, do grau de reforço, entre outros (FERRY, 1981). O módulo (E') é definido como a tensão em fase com a deformação cisalhante senoidal dividido pela deformação, e é uma medida da energia armazenada e recuperada por ciclo quando diferentes sistemas são comparados na mesma amplitude de deformação. O módulo (E'') é definido como a tensão defasada 90° (fora de fase) dividida pela deformação e é uma medida da energia dissipada ou perdida como calor por ciclo

da deformação senoidal, quando diferentes sistemas são comparados em uma mesma amplitude de deformação (ORNAGHI, 2011).

O efeito da variação da frequência e da temperatura sobre o comportamento dinâmico-mecânico de materiais poliméricos e compósitos pode ser resumido da seguinte forma: a) Em baixas temperaturas ou altas frequências, o polímero comporta-se como um material vítreo e, portanto, rígido, devido aos altos tempos de relaxação comparativamente à escala de tempo do experimento. Sob estas condições o módulo de armazenamento é alto e o de perda baixo; b) Em altas temperaturas ou baixas frequências, os movimentos internos respondem à tensão aplicada, e tanto o módulo de armazenamento como o de perda são baixos, correspondendo ao comportamento viscoso; 3) quando a frequência do experimento é comparável à frequência dos movimentos internos do material na temperatura na qual é feita a medida, o módulo de armazenamento diminui com o aumento da temperatura ou com a diminuição da frequência, e o módulo de perda exibe um máximo, correspondendo ao comportamento viscoelástico.

O experimento também pode ser executado, mantendo, a temperatura fixa e a frequência variada. Deste experimento, pode ser obtido o espectro de relaxação do material, a partir do qual se obtém todas as funções viscoelásticas sem a necessidade de experimentos adicionais (POTHAN, 2003).

Segundo (VISCO, 2010) é possível determinar o tempo de gel da resina pós caralisação através do pico máximo de $\tan \delta$, que nada mais é E'' (módulo de perda) por E' (módulo de armazenamento) ou cruzamento das duas curvas. Este critério é importante para validar a determinação via SPI, que será feita neste trabalho.

3.6. Propriedades de estruturas sanduíche

As propriedades mecânicas das estruturas sanduíche são de extrema importância, pois estas exercem funções estruturais em embarcações entre outras aplicações. Entre as propriedades mais importantes destacam-se a resistência à compressão transversal e longitudinal, à flexão em 3 pontos, tração nas faces, ao cisalhamento interlaminar e resistência ao impacto, que serão discutidas a seguir.

O teste de resistência à compressão longitudinal visa a determinação da

resistência à compressão entre as faces e o núcleo de estruturas sanduíche. Estas propriedades são determinadas na direção normal ao plano das faces (CORIGLIANO, 2000). Sendo assim o núcleo tem um papel importante em suportar esta carga e manter as duas faces paralelas e afastadas, o mesmo pode ser de material com superfícies de ligação contínuas (tal como madeira balsa e espumas), ou com superfícies de ligação descontínuas (como *honeycomb*), este último normalmente resiste mais a compressão. Normalmente, núcleos com superfícies descontínuas resistem mais à compressão que os demais. Já entre os núcleos com ligação contínua, como PVC, PET e madeira Balsa, aqueles com maior densidade resistem mais à compressão, por exemplo, a madeira balsa possui uma ótima resistência à compressão longitudinal pois possui uma alta densidade e as fibras são orientadas no mesmo sentido.

Este ensaio tem uma importância especial na avaliação do comportamento em pontos de fixação de parafusos entre outros apoios nas estruturas sanduíche, uma vez que o material, nesta zona, fica sujeito à compressão na direção longitudinal ao plano das lâminas (Figura 11). Existem alguns estudos que comparam o comportamento das estruturas sanduíche e dos núcleos sob esse carregamento, por exemplo comparando *honeycomb* e espumas ou diferentes espumas entre si, por exemplo madeira balsa e poliéster, pois as espumas são mais acessíveis economicamente, justificando o estudo (WANG, 2010).

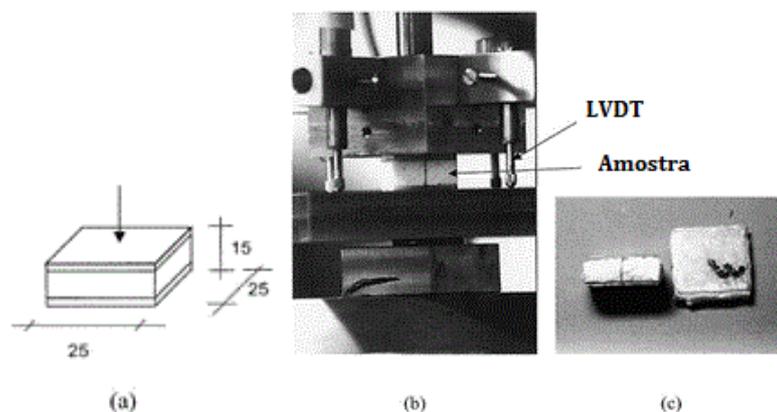


Figura 11 – Ensaio de compressão longitudinal de estruturas sanduíche: (a) Forma e dimensões (em mm) da amostra utilizada; (b) Amostra de poliéster no dispositivo de teste; (c) Vista lateral e de topo de uma amostra após o ensaio (WANG, 2010).

Smith e Shivakumar (2001) utilizaram Sandwich cracking Beam (CSB) de configuração de teste para testar cinco diferentes estruturas sanduíches fabricadas usando VARTM com diferentes densidades de núcleo de núcleos de PVC. Observou-se que a tenacidade à fratura aumentou com o aumento da densidade do núcleo, mas que não são dependentes do material da face.

No ensaio de resistência à compressão transversal, uma carga é aplicada no sentido transversal da amostra, com o objetivo de analisar o comportamento das faces mediante a flambagem e a adesão da face no núcleo. Como resultado do serviço de carga ou fabricação deficiente de uma peça em estrutura sanduíche, pode ocorrer uma delaminação (descolamento) das faces externas do núcleo. Com o aumento da carga o processo de delaminação começa acontecer, que leva à perda da adesão entre as faces e o núcleo, e as propagações destas delaminações ao longo da estrutura pode levar a um colapso estrutural (YANG, 2008).

Para núcleos de baixa densidade, normalmente a falha ou delaminação por compressão ocorre primeiramente no núcleo, com a formação de grandes trincas e em seguida ocorre o descolamento das camadas externas (Figura 12-a-b). Para núcleos com densidade elevada, normalmente ocorre o descolamento das camadas externas conforme pode ser visto na Figura 12-a, anteriormente à falha do núcleo, conforme a Figura 12-b. Outro fator que afeta neste tipo de carregamento é a resistência das faces perante a flambagem, sendo que quanto maior o volume de fibras, maior será a resistência.

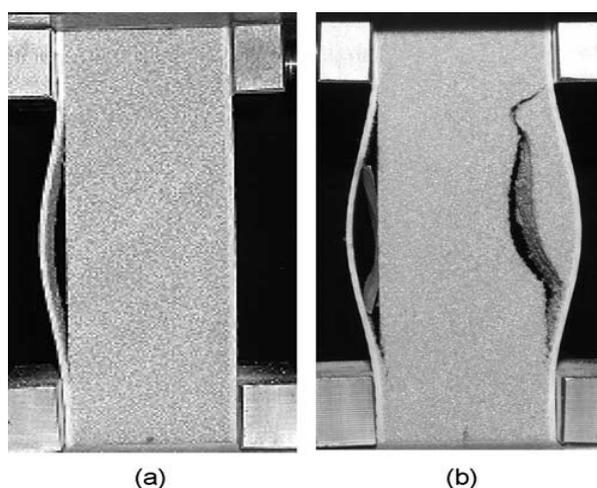


Figura 12 - Falhas de (a) delaminação e (b) delaminação com trinca do núcleo em ensaio de compressão transversal (YANG, 2008).

O comportamento de um painel ou de uma viga sanduíche pode ser comparado a uma viga em I. De fato, as lâminas funcionam como a flange da viga, suportando os esforços de tração e compressão e o núcleo funciona como a alma do perfil, estabelecendo a distância entre as lâminas e suportando os esforços de corte. As lâminas encontram-se ligadas ao núcleo por um adesivo ou por travamento mecânico, que transfere os esforços entre esses elementos (ALMEIRA, 2009).

Na estrutura sanduíche, a rigidez em flexão aumenta com a espessura do núcleo assim como, numa viga, a rigidez aumenta com a distância entre as extremidades. A teoria das vigas pode ser adaptada a vigas sanduíche, conforme a Figura 13, com as devidas modificações. A validade desta teoria baseia-se nas seguintes hipóteses (ALMEIRA, 2009): (a) As três camadas estão fortemente ligadas; (b) A rigidez das lâminas é muito superior à do núcleo; (c) As lâminas e o núcleo são isotrópicos; (d) A seção transversal é plana e ortogonal ao eixo longitudinal da viga e assim permanece quando a viga é fletida (hipótese de Bernoulli).

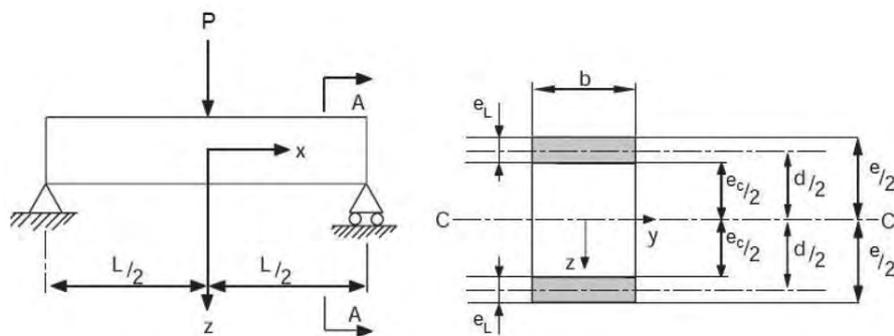


Figura 13 - Dimensões da viga sanduíche e corte AA (à direita) (ALMEIRA, 2009).

Pode-se notar que se deve considerar os efeitos causados pelas deformações por cisalhamento, por outro lado, alguns termos podem ser desprezados no cálculo de flexão. Em uma viga, a rigidez em flexão é o produto do módulo de elasticidade (em flexão) pelo momento de inércia. Em uma viga sanduíche, a rigidez de flexão é a soma da rigidez dos diferentes elementos que a constituem, medidas a partir do centroide do eixo de toda a seção (ALMEIRA, 2009), como mostra a Equação 4.

$$D = E_L \frac{be_L^3}{6} + E_L \frac{be_L d^2}{2} + E_c \frac{be_c^3}{12}$$

Equação 4

onde: D = rigidez de flexão da viga (GPa); E_L = módulo de elasticidade do material das lâminas (GPa); E_c = módulo de elasticidade do material de núcleo (GPa); b = largura da viga (mm); e_L = espessuras das lâminas (mm); e_c = espessura do núcleo (mm); d = distância entre os centros das lâminas (mm).

O primeiro termo da Eq. 4 corresponde à rigidez de flexão das lâminas segundo os seus próprios centroides e o segundo termo corresponde à transposição da rigidez para o eixo do centroide da secção. O terceiro termo corresponde à rigidez de flexão do núcleo segundo o eixo do centroide da secção.

Este ensaio é realizado com o objetivo de observar o mecanismo de falha da estrutura sanduíche, pois o ensaio replica muito bem as condições de uso. No estudo de (RUSSO, 2007), utilizou-se diferentes distâncias entre os apoios, 330 e 380 mm para núcleos de PVC e 166 e 300 mm para núcleos de poliéster. Nota-se na Figura 14a) e c) que para uma distância entre os apoios curto acontece cisalhamento no núcleo e também delaminação e para maior distância entre os apoios, acontece ruptura das camadas externas Figura 14-a) e c) (RUSSO, 2007).

Cantwell et al. (1999) desenvolveram geometria simples para teste a fim de testar a estruturas sanduíche de fibra de vidro/madeira balsa em vigas de sanduíche, carregados como no teste de três pontos-flexão. Em taxas de carga mais baixos a resistência à fratura interfacial verificou-se ser bastante elevada, mas a taxas de carga mais elevadas foram observadas reduções significativas para alguns dos materiais sanduíche. Este resultado foi significativo no geral.



Figura 14- Fotos das amostras após a ruptura: Painel de estrutura sanduíche com núcleo de PVC com uma distância entre os apoios de 330 mm (a) e 380 mm (b) e estrutura sanduíche com núcleo de poliéster com uma distância entre os apoios de 166 mm (c) e 300 mm (d) (RUSSO, 2007).

O ensaio de resistência à tração nas faces avalia a adesão entre as faces e o núcleo das estruturas e a resistência do núcleo à tração. Se a adesão entre a face e o núcleo for suficientemente forte, a resistência do núcleo pode ser determinada. A amostra é submetida a uma carga de tração em uma direção normal à face dos compósitos. Por exemplo, RUSSO, 2007 realizou ensaio de resistência à tração nas faces comparando os núcleos de PVC e poliéster. Na Figura 15-a é possível observar no gráfico tensão-deformação que o núcleo de PVC deformou e falhou de uma forma mais frágil. Observa-se também que o mesmo suportou maior tensão antes da falha. Já na, A estrutura sanduíche com núcleo de PVC rompeu na adesão entre a face e o núcleo (Figura 15-b) enquanto o sanduíche com núcleo de poliéster mostrou uma melhor adesão entre face e núcleo, pois a falha ocorreu no núcleo (Figura 15-c).

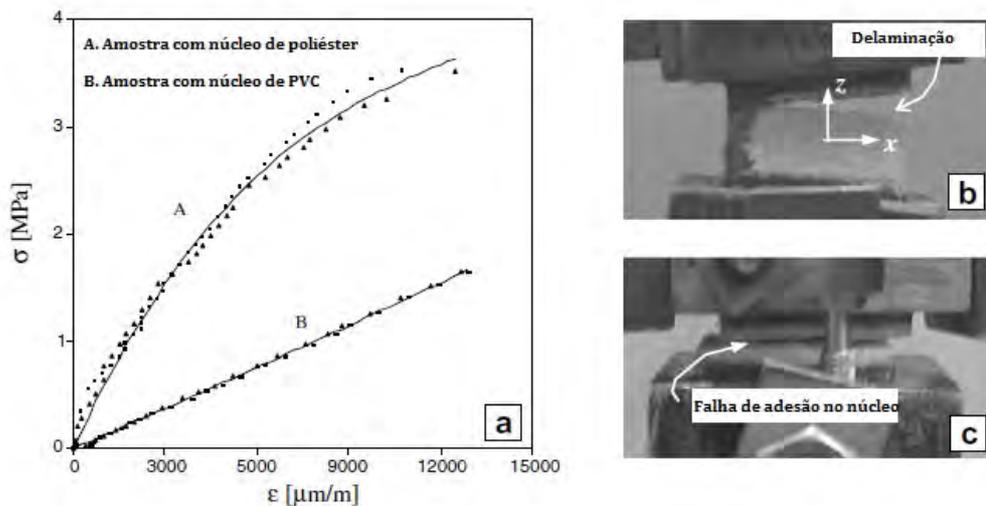


Figura 15 - Teste de tensão nas faces: (a) Curva de tensão-deformação e imagens dos painéis sanduíche; (b) Núcleo de PVC e (c) Núcleo de poliéster após a ruptura (RUSSO, 2007).

As estruturas sanduíche, em condições normais de uso, sofrem cisalhamento no núcleo, pois este é espesso e tem a função de suportar este esforço. Alguns estudos foram feitos para avaliar e comparar diferentes tipos de núcleos, sintéticos e não sintéticos (YANG, 2008). Em outro estudo, comparou-se núcleos de PVC e poliéster (Figura 16), onde se concluiu que o núcleo de poliéster se comportou de forma mais frágil, deformando menos antes de falhar (RUSSO, 2007). Já o de PVC teve uma deformação maior antes de falhar e resistiu menos à tensão cisalhante. Neste ensaio, também é possível observar se a falha ocorre no interior do núcleo ou na interface entre o núcleo e as faces, indicando que a interface não está adequada.

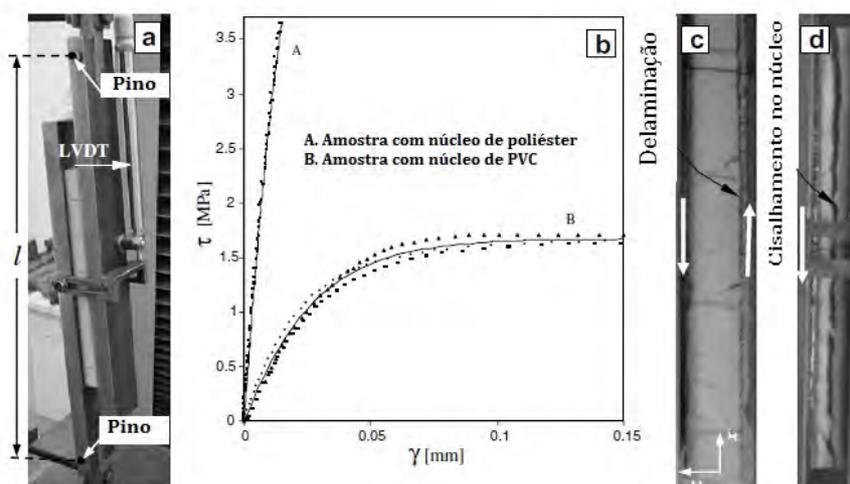


Figura 16 - Ensaio de cisalhamento: (a) Dispositivo de carregamento, (b) Curvas tensão \times deformação, foto dos núcleos de (c) de PVC e (d) de poliéster.

O ensaio de impacto com queda de dardo em baixa velocidade possui uma grande relevância entre os testes, pois pode avaliar a capacidade que as faces possuem de absorver ao impacto sem comprometer a estrutura. No trabalho de (XIA; 2010b), as estruturas sanduíche foram produzidas com núcleo de poliuretano (PU), tecidos de fibra de vidro e resina éster-vinílica. Não se observou danos visíveis na face superior e a profundidade de penetração, não evidente na vista transversal, foi de cerca de 0,1 mm para um nível de energia de impacto de 1 J (Figura 17). Uma pequena indentação e trincas apareceram na região de impacto, e a profundidade da penetração foi de 0,4 a 3,0 mm para níveis de energia de 3-7 J, e o esmagamento da espuma limitou-se a pequenas regiões abaixo da face superior.

Já para níveis de energia maiores, de 7 a 15 J, a penetração foi bem maior (Figura 18), com ruptura das fibras de vidro e da resina chegando até o núcleo e ocasionando dano acentuado. Ou seja, com o aumento dos níveis de energia, pode haver perfuração de toda a secção transversal, alcançando a outra extremidade do sanduíche (LASCROUP, 2010). Esta perfuração mesmo sendo somente na face superior acaba prejudicando a estrutura do sanduíche, assim algum reparo deve ser feito caso se deseje continuar utilizando essa estrutura (ZIKE, 2011).

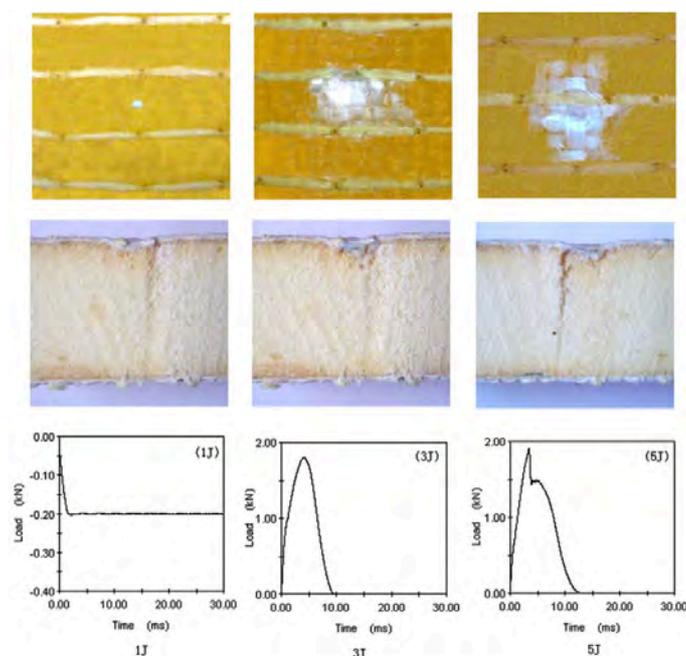


Figura 17 - Imagens das superfícies de impacto e das secções transversais para os níveis de energia 1, 3 e 5 J (XIA, 2010b).

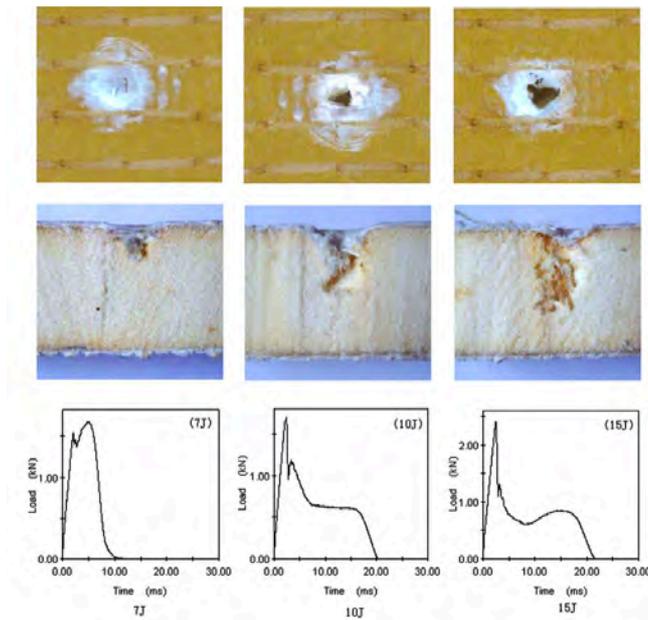


Figura 18 - Imagens das superfícies de impacto e as secções transversais para os níveis de energia 7, 10 e 15 J (XIA, 2010b).

Em um estudo relacionado com a absorção de energia no momento do contato de um pêndulo com a superfície da amostra (SEVKAT et al., 2010), foram observados dois modos de interação distintas entre o painel sanduiche e o pêndulo, de acordo com a capacidade de absorção de energia da superfície impactada (Figura 19-a). Se a energia absorvida pelo compósito foi baixa, o pêndulo ricocheteia, Figura 19-a. Se a maior parte da energia do pêndulo foi absorvida pelo compósito através de vários modos de danos (especialmente penetração, perfuração e propagação de trincas), o pêndulo não ricocheteia, Figura 19-b.

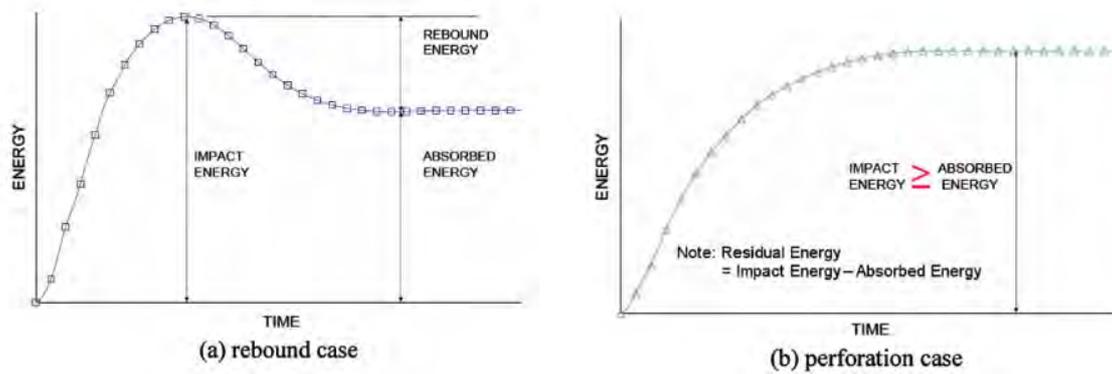


Figura 19 - Curvas típicas de energia para um ensaio de impacto de queda de peso, quando o pêndulo ricocheteia em um painel perfurado ou não (SEVKAT, 2010).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo foi dividido em duas partes, sendo que na primeira são apresentados os materiais e na segunda os métodos utilizados na caracterização da resina ester vínilica, das estruturas sanduíche e a descrição da simulação numérica do processo RTM *Light* utilizando o software OpenFOAM.

4.1. Materiais

Os seguintes materiais foram usados neste estudo:

(a) Matriz:

- Resina éster vínilica Derakane Momentum™ 411-350, Ashland.
- Iniciador peróxido de metil-etil-cetona (PMEK), 1, 1,5 e 2% em relação ao peso da resina.
- Catalisador (NafCO) a 0,6% Co em relação ao peso da resina. É misturado manualmente ao PMEK com um bastão de vidro por ≈ 1 min antes da moldagem.

(b) Reforços:

- Manta de fibra de vidro tipo E, gramatura 300 g/m^2 , da Owens Corning, chamada de “M” neste trabalho.
- Tecido bidirecional plano (*plain weave*) de fibra de vidro tipo-E, gramatura 330 g/m^2 , da Owens Corning, chamado de “T” neste trabalho.

(c) Núcleos:

- Espuma de PET modelo Nidafoam, densidade 80 kg/m^3 e com células fechadas (Nidacore).
- Espuma de PVC modelo Divinycell H, densidade 80 kg/m^3 e com células fechadas (DIAB).

(d) Outros:

- Chemlease®, limpador de molde: Mistura de solventes destinados a dissolver e remover a cera de moldes feitos de material compósito.

- Chemlease® 15 Sealer, selador molde: Tem a função de diminuir a porosidade da superfície do molde, preparando-o para receber o desmoldante.
- Chemlease® 15, desmoldante semi-permanente: Agente desmoldante de cura rápida que promove múltiplas liberações sem se transferir à parte moldada.
- Óleo de soja comercial, utilizado como fluido para as experiências de permeabilidade e moldagem RTM *Light*.

A nomenclatura utilizada para os diferentes sistemas sanduíche estudados é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1- Nomenclatura utilizada para os sistemas estudados por RTM tradicional e RTM *Light*

RTM Tradicional - Compósitos	Reforço	Nº de camadas
4M	Manta	4
6M	Manta	6
RTM <i>Light</i> - Estruturas sanduíche	Núcleo	Reforço (faces)
PVC 2M	PVC	2 mantas
PVC 3M	PVC	3 mantas
PVC 4M	PVC	4 mantas
PVC 2T	PVC	2 tecidos
PVC 3T	PVC	3 tecidos
PVC 4T	PVC	4 tecidos
PET 2M	PET	2 mantas
PET 3M	PET	3 mantas
PET 4M	PET	4 mantas
PET 2T	PET	2 tecidos
PET 3T	PET	3 tecidos
PET 4T	PET	4 tecidos

4.2. Métodos

4.2.1. Características da resina éster-vinílica

As análises abaixo foram realizadas nos diferentes sistemas de resina antes da cura:

- **Viscosidade:** Medidas de viscosidade e tensão de cisalhamento da resina foram realizadas nas temperaturas de 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 e 40 °C a uma velocidade de 10 rpm. O viscosímetro usado foi o Brookfield HBDV-II+C/P e o Spindle S51.
- **Tempo de gel e temperatura máxima de cura:** Foram determinadas conforme o método da *Society of the Plastics Industry* (SPI) em conjunto com a norma ASTM D2471. Este ensaio é realizado a partir de 25 °C, e a contagem do tempo começa a partir da adição do iniciador à resina. Foram feitas análises para 1,0, 1,5 e 2 % de PMEK até o momento que a temperatura começa a diminuir, após ter alcançado o valor máximo, sendo monitorada a variação da temperatura reacional com o tempo.

Os valores de tempo de gel (Eq. 5) e temperatura de gel (Eq. 6) são calculados conforme pode ser visto na Figura 20, fazendo uma média das medias de t_1 , t_2 e T_1 , T_2 . Conhecer o tempo de gel é importante, pois determina a janela de processamento do sanduíche, pois a resina não flui mais no reforço quando entra no estado de gel.

$$t_{gel} = \frac{t_2 - t_1}{2}$$

Equação 5

$$T_{gel} = \frac{T_2 - T_1}{2}$$

Equação 6

onde: t_1 e T_1 = tempo e temperatura na qual a curva muda bruscamente de curvatura (s, °C); t_2 e T_2 = tempo associado e temperatura máxima atingida na reação (s, °C).

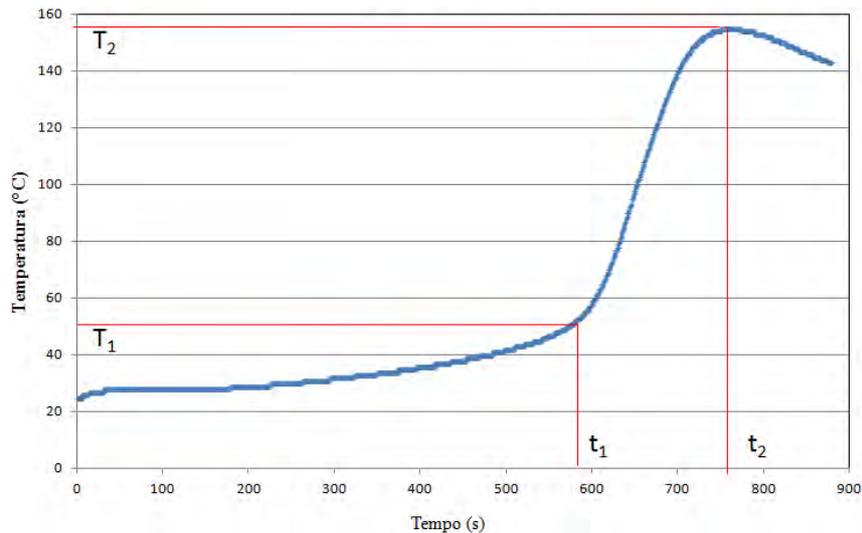


Figura 20 - Curva exotérmica.

Corpos de prova só de resina éster-vínilica foram moldados por vazamento (*casting*) em moldes de silicone com dimensões de 75 × 35 × 3 mm, com 1,5 % de iniciador com relação ao peso da resina. Após a moldagem, as amostras foram deixadas por 24 h à temperatura ambiente e a pós-cura foi realizada em estufa com circulação e renovação forçada de ar, modelo DLAF02-2, durante 6 h a uma temperatura de 90 °C. Os seguintes ensaios foram realizados na resina curada:

- **Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC):** A avaliação do comportamento de cura da resina éster-vínilica com P-MEK foi analisada no equipamento DSC (modelo Q20 V24.2 Build 107), na faixa de temperatura de 20 a 250 °C, sob atmosfera de nitrogênio, com taxa de aquecimento de 10 °C/min.
- **Dureza Shore D:** Foram realizadas 10 medidas em cada amostra segundo a norma ASTM D2240-05 no Durômetro Shore D da WOLTEST, modelo SD300.
- **Análise termo-dinâmico-mecânica (DMA):** Foi usada para avaliar as propriedades viscoelásticas da resina, obter a T_g , estimar o tempo de gel da resina em comparação à medida pelo método SPI, e a eficiência da pós-cura. Foi usado o equipamento TA Instruments Modelo 2980 (até 600 °C), nas frequências de 0,1; 1,0; 3,0; 10 e 30 Hz.

4.2.2. Moldagens RTM tradicional

4.2.2.1. Equipamento RTM

Na Figura 21 tem-se uma visão geral do aparato experimental RTM disponível no LAPOL/GCOMP/UFRGS e de alguns dos seus componentes. O molde é retangular com cavidade interna de 320 mm × 150 mm × 3,5 mm. A lista de equipamentos auxiliares inclui: compressor, vaso de pressão, molde superior em vidro reforçado, molde inferior em aço, controlador de pressão, transdutores de pressão, sistema de aquisição de dados e câmera digital.

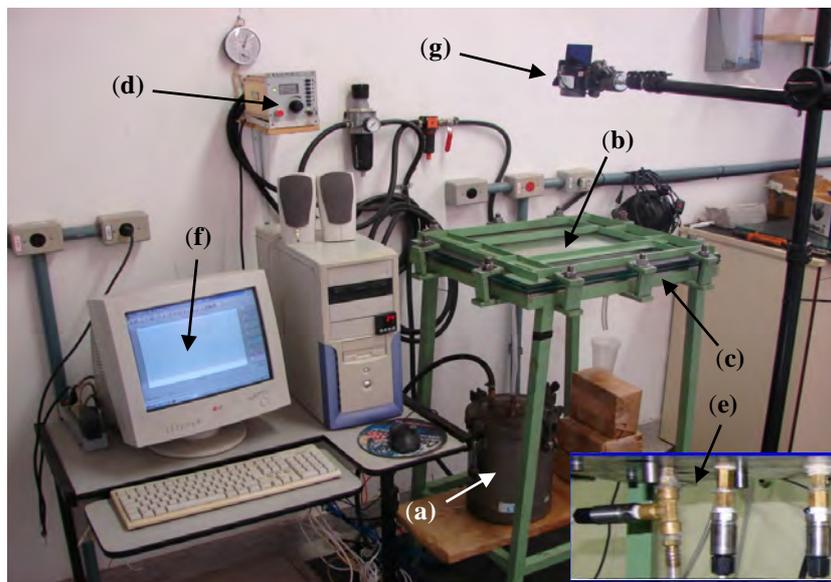


Figura 21 - Foto do aparato experimental RTM do GCOMP-UFRGS: (a) Vaso de pressão, (b) Molde superior em vidro reforçado, (c) Molde inferior em aço, (d) Controlador de pressão (Druck), (e) Transdutores de pressão, (f) Sistema de aquisição e monitoramento de dados e (g) Câmera.

O compressor fornece ar comprimido para o vaso de pressão que é utilizado para injetar a resina (pressão positiva) no molde. A parte superior de molde é de vidro para que seja possível visualizar o avanço da frente de fluxo da resina, com isso, podem ser coletados os dados de posição da frente de fluxo com o uso da câmera digital. No controlador de pressão (*druck*), é definida a pressão de injeção

da resina, que é medida com os transdutores de pressão. As medidas de pressão são enviadas para um computador equipado com sistema de aquisição de dados.

Os seguintes materiais foram utilizados para as moldagens por RTM: (a) Resina éster-vinílica, Derakane Momentum 470-300; (b) Iniciador peróxido de metil-etil-cetona (P-MEK) – 1% em relação ao peso da resina; (c) Catalisador naftenato de cobalto (NafCO) a 0,6% Co em relação ao peso da resina; (d) Manta de fibra de vidro tipo-E, gramatura de 300 g/m², da Owens Corning.

Foram realizadas 2 moldagens no molde RTM tradicional com mantas de fibra de vidro, uma com 4 camadas de fibra (4M) e outra com 6 camadas (6M). Foram retiradas 4 amostras de cada moldagem para realização dos ensaios de DMA, no equipamento TA Instruments Modelo 2980 (até 600 °C), nas frequências de 0,1; 1,0; 30; 10, 30 e 100 Hz, com amostras sem e com pós-cura.

A densidade da resina curada e dos compósitos 4M e 6M foi avaliada pelo método de Arquimedes e calculada segundo a .

$$\rho = \rho_0 \left(\frac{A}{A-B} \right)$$

Equação 7

onde: ρ_0 = massa específica (água) (g/cm³); A = peso da amostra (g); B = peso da amostra mergulhada no fluido (água) (g).

Existem vários métodos para se determinar o volume de fibra (%V_f) e, neste trabalho, optou-se novamente pelo método de Arquimedes, segundo a Equação 8.

$$\% V_f = \frac{\rho_c - \rho_m}{\rho_f - \rho_m}$$

Equação 8

onde: ρ_c = massa específica do compósito (g/cm³); ρ_m = massa específica da resina curada (g/cm³); ρ_f = massa específica da fibra de vidro (g/cm³).

4.2.3. Projeto do molde para RTM *Light*

O projeto do molde RTM *Light* foi desenvolvido pelo GCOMP/LAPOL/ UFRGS e produzido por uma empresa especializada. O molde foi projetado para obter uma

peça com o formato de uma placa plana, com dimensões de 620 × 310 mm e com espessura de 16 mm.

A imagem superior do molde pode ser vista na Figura 22, onde estão indicados os pontos de injeção (*inlet*) nas duas extremidades laterais, pontos de vácuo (*outlet*) na região central da cavidade, guias para posicionar molde/contramolde, borrachas de vedação, ponte de vácuo para travamento do molde e cavidade onde é colocado o reforço. O molde foi fabricado com resina poliéster contração 0% e fibra de vidro, pelo processo de spray up, com acabamento superficial de *gel coat* especial laranja. A parte superior do contramolde é translúcida para que seja possível observar a frente de fluxo.

Também na Figura 23, a vista do contramolde mostra detalhes importantes do projeto do molde, como a aba de travamento do molde e contramolde entre as duas borrachas de vedação. Se essa área onde o vácuo é aplicado não for suficiente, não haverá travamento eficiente do molde. A borracha mais externa tem a função de vedar a aba de travamento, juntamente com a intermediária. A borracha mais interna é de silicone duro para impedir a passagem do ar e da resina.

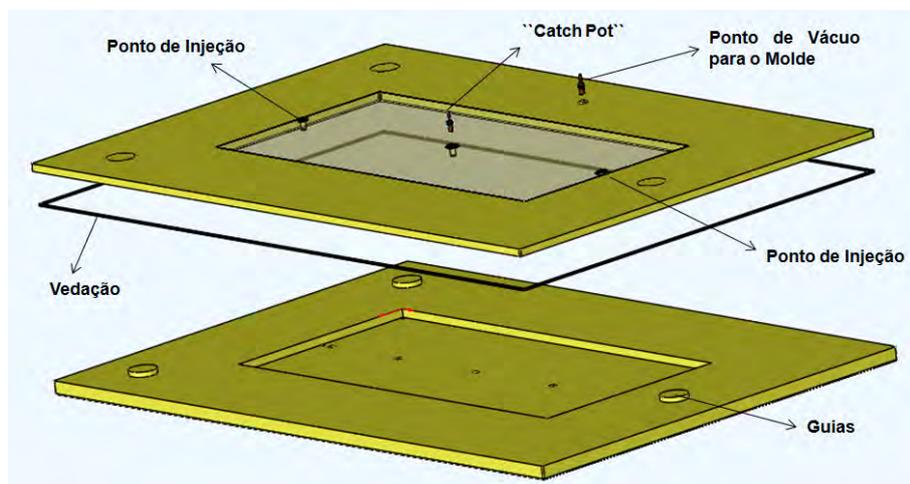


Figura 22- Molde e contra molde RTM *Light*.

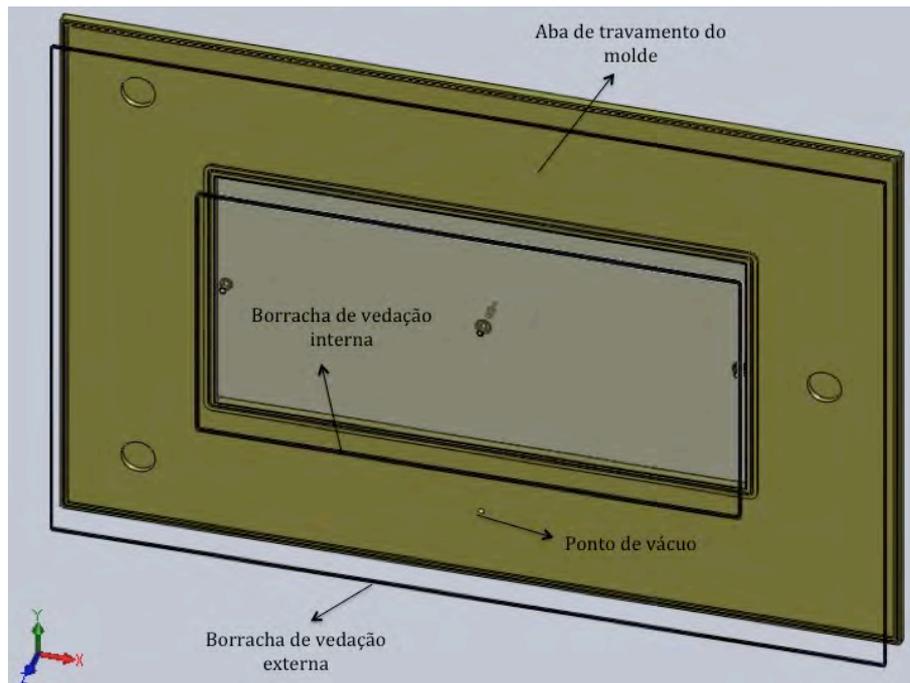


Figura 23 – Vistas do projeto do molde RTM *Light* utilizado.

4.2.4. Moldagens por RTM *Light*

Foram realizadas moldagens de estruturas sanduíche por RTM *Light* para cada sistema estudado (descritos na Tabela 1). Para a produção, o molde e o contramolde são preparados, a superfície é limpa com jato de ar para que não fiquem sujeiras que possam prejudicar o acabamento da peça. Logo após, é utilizado limpador, selador e desmoldante, que são aplicados sobre a superfície do molde para que a peça curada não adira e não prejudique a superfície do molde/contramolde (Figura 24-a). A(s) camada(s) de manta/tecido (reforço) é colocada com cuidado na cavidade do molde pois todos os espaços devem ser preenchidos pelo reforço fibroso e também não se pode exceder o limite da primeira borracha de vedação, que causaria escape de ar e resina (Figura 24-b). Sobre o reforço é colocado o núcleo, também do tamanho da cavidade do molde (Figura 24-c), e sobre o núcleo outra(s) camada(s) de reforço (Figura 24-d). Finalmente, o contramolde pode ser encaixado no molde (Figura 24-e-f).

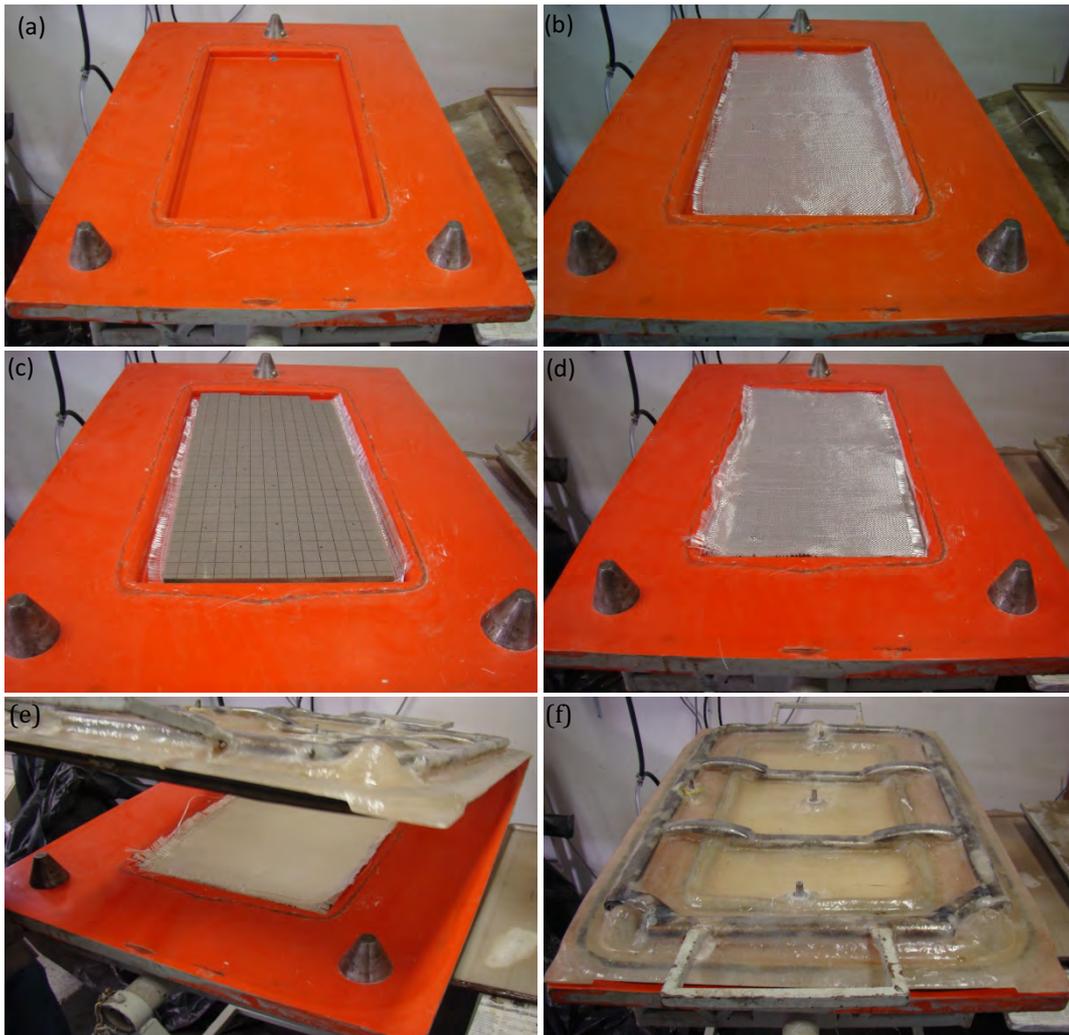


Figura 24 - Sequência de fotos de montagem do aparato de RTM Light. (a) Molde com desmoldante, (b) Primeira camada de reforço, (c) Núcleo sobre o reforço, (d) Outra camada de reforço, (e) Fechamento do molde, (f) Molde fechado e pronto para injeção da resina.

O molde/contramolde é travado por vácuo. Este é aplicado (pressão negativa de $\approx 0,7$ bar medida do vacuômetro) e verifica-se sua eficiência. Em seguida, a pressão de vácuo na cavidade é acionada (0,3 bar), seguida da pressão de injeção positiva da resina (0,3 bar), começando a impregnação do reforço. Quando a cavidade é totalmente preenchida, a resina chega até o recipiente (*catch pot*), a pressão de injeção é desligada e as mangueiras que levam a resina até o contramolde são bloqueadas e cortadas, para que não entre ar. A pressão de vácuo de vedação do molde permanece acionada até a cura da resina. Após esse tempo, o contramolde pode ser retirado e a peça desmoldada.

4.2.5. Modelagem Computacional do Processo RTM *Light*

Nesta tese, o método VOF (HIRT, 1981) foi utilizado para modelar o avanço da resina no interior do molde. Este método foi escolhido por permitir modelar o escoamento da resina tanto nas regiões com reforço fibroso (faces superior e inferior da estrutura sanduíche) como nas regiões sem reforço (bordas laterais de injeção de resina e furos que conectam as faces superior e inferior).

A modelagem do processo de RTM *Light* tem diferenciais em relação ao RTM tradicional e infusão por *vacuum bag*. No RTM *Light*, o molde é construído com uma canaleta lateral sem reforço fibroso por onde a resina pode escoar livremente. Após a resina preencher toda a canaleta, ela converge para o centro do molde, onde existe um ponto de vácuo. Normalmente, os modelos matemáticos utilizados para descrever o avanço da resina através do meio poroso nos processos de RTM e RTM *Light* se baseiam na Lei de Darcy para meios porosos, descrita pela Eq. 1.

O software OpenFOAM (OpenFOAM User Guide, 2011), é um pacote de sub-rotinas criadas em C++ que podem ser utilizadas para a criação de *solvers* para as mais diversas aplicações. A aplicação mais comum do OpenFOAM é na área de CFD (*Computational Fluid Dynamics*) onde o método VOF, proposto por (HIRT, 1981), está implementado com uma formulação em volumes finitos. Este aplica-se a escoamentos multifásicos de fluidos imiscíveis. No presente trabalho, utilizou-se um modelo bifásico onde as fases são o ar e a resina.

No VOF, as fases são bem definidas, ou seja, as fases são separadas e o volume de uma fase não pode ser ocupado por outra. Para se representar as várias fases dentro de um único volume de controle utiliza-se o conceito de fração volumétrica f_i , onde se supõe que essas frações de volume são contínuas no espaço e no tempo e sua soma, dentro de um volume de controle, é sempre igual a 1.

Na presente solução, f é a fração volumétrica de resina dentro de cada célula. Desta forma tem-se que:

- a) se $f = 0$, a célula está cheia de ar.
- b) se $f = 1$, a célula está cheia de resina.
- c) se $0 < f < 1$, a célula contém a interface entre ar e resina.

O problema de mecânica dos fluidos é resolvido com apenas um conjunto de equações de conservação da massa e quantidade de movimento. O mesmo campo de velocidades (e também de pressão) é “compartilhado” pelos dois fluidos e a fração volumétrica da resina, calculada para cada célula do domínio computacional, é rastreada através da adição de uma equação de transporte adicional para f .

A formulação para um problema incompressível é composta pelas equações da continuidade, quantidade de movimento e fração volumétrica (Equação 9, 10 e 11, respectivamente), como segue:

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

Equação 9

onde: ρ é a massa específica [kg/m^3] e \vec{V} é o vetor velocidade.

$$\frac{\partial (\rho f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho f \vec{V}) = 0$$

Equação 10

$$\frac{\partial (\rho \vec{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla P + \nabla \cdot [\tau] + \rho \vec{g} + \vec{F}$$

Equação 11

onde: \vec{g} = aceleração da gravidade (m/s^2); \vec{F} = termo fonte ou forças externas (N); τ_{ij} = tensor de tensões (Pa).

Na Eq. 11, o termo F é utilizado em problemas de meios porosos para incluir um termo de força resistiva na equação do movimento e, desta forma, simular o efeito da porosidade do escoamento. Desta forma, a partir da Lei de Darcy, pode-se escrever (Eq. 12).

$$\vec{F} = \nabla p = -\frac{\mu}{K} \vec{V}$$

Equação 12

As propriedades físicas precisam ser ponderadas em função da quantidade de cada fase dentro dos volumes de controle. Desta forma, segundo (SHI; DONG, 2011):

$$\rho = f \rho_{resina} + (1 - f) \rho_{ar} \quad \text{Equação 13}$$

$$\mu = f \mu_{resina} + (1 - f) \mu_{ar} \quad \text{Equação 14}$$

A Figura 25 mostra a geometria problema, o meio com reforço é representado pela parte verde enquanto os canais de injeção laterais, juntamente com os tubos que ligam a camada reforçada superior e inferior, estão representados em laranja. O espaço entre as duas camadas reforçadas é preenchido com um material permeável (não mostrado na Figura 25). As secções de entrada e saída são mostradas Figura 26.

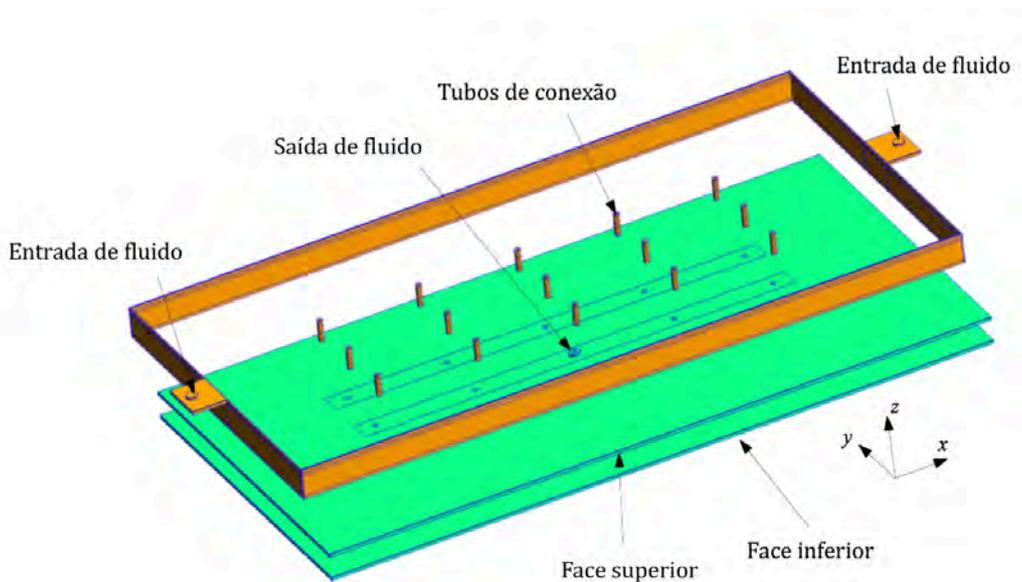


Figura 25 - Geometria do molde RTM Light.

A geometria do problema, mostrada na Figura 26, é uma representação aproximada do molde real, que foi construído em material compósito. O canal de injeção foi desenhado com retângulos, no entanto, estes canais são irregulares, isto é, a geometria apresentada na Figura 26 é uma representação idealizada do modelo construído. A geometria tem dimensões 0,64 m, 0,32 m e 0,016 m nas direções x, y

e z, respectivamente. Os pontos de injeção e de saída possuem diâmetros de 0,005 m enquanto os tubos que ligam as placas possuem diâmetro de 0,0025 m.

A geometria é simples, no entanto, há uma grande diferença de tamanho entre as faces maiores (lado, inferior e superior) e o diâmetro dos tubos que ligam as camadas superior e inferior. Esta disparidade de tamanho não causa problemas na criação de geometria, embora demande a utilização um grande número de elementos na discretização.

A malha foi feita de forma uniforme e, sempre que possível, utilizando elementos hexagonais na criação dos canais laterais de injeção (partes alaranjadas na Figura 26) e elementos prismáticos nos canais de comunicação (verde na Figura 26). O domínio computacional foi discretizado com cerca de 43000 elementos hexaedrais (6 faces) e 280000 prismas (5 faces). Geometria e discretização foram realizadas com software GMSH.

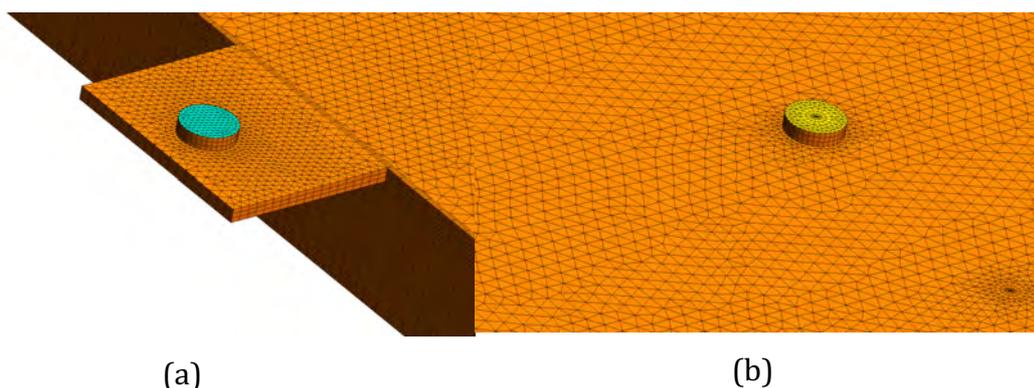


Figura 26 - Discretização da geometria: a) Seção de entrada, b) Seção de saída.

4.2.6 Permeabilidade dos reforços

A modelagem numérica do processo de injeção de resina por RTM *Light* necessita que a permeabilidade do reforço seja previamente determinada. Para tanto foi utilizado o processo de moldagem de RTM tradicional retilíneo para medição da permeabilidade dos reforços utilizados nas faces das estruturas sanduíche. As condições de entrada foram: (a) Pressão de injeção (positiva) = 0,103 bar, regulada no *druck*; (b) Viscosidade do óleo de soja (a 25 °C) = 65 cP; (c) Volume de reforço (% V_f) = 15 % (ou seja, porosidade de 85%).

O procedimento de determinação da permeabilidade do reforço fibroso inicia com o registro, através da câmera digital, do avanço da linha de frente da resina (x_f , m) (Figura 27). Foram tiradas fotos em intervalos regulares de tempo até que o fluido atingisse $x_f = 0,30$ m. Assim como em (SCHIMIDT TM, 2009), as leituras dos transdutores de pressão e o tempo foram sincronizados para permitir a determinação da permeabilidade planar (K) a partir da inclinação das curvas de x_f^2 , m^2 , em função do tempo, utilizando a Eq. 1.

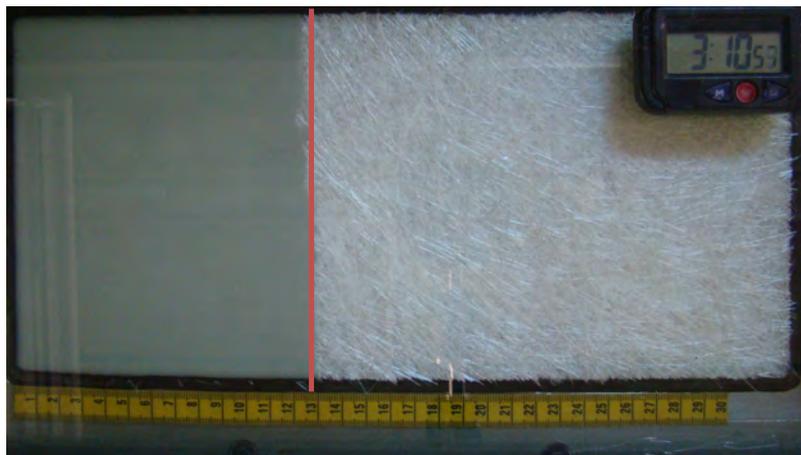


Figura 27 - Imagem típica da frente de fluxo do óleo de soja no reforço (tempo: 3 min e 10 s).

4.2.7. Ensaio das estruturas sanduíche

Foram retirados corpos de prova das estruturas sanduíche moldados por *RTM Light* e realizados os ensaios mecânicos descritos abaixo:

a) Compressão longitudinal:

Foi realizado ensaio de compressão longitudinal dos sanduíches segundo a norma (ASTM C365/C365M-05) e dos núcleos segundo a norma (ASTM D1621-10) na máquina de ensaio Instron – série 3382 – 100 kN, com o objetivo de determinar a rigidez na direção do plano do laminado. A Figura 28 ilustra esse ensaio.



Figura 28 - Ensaio de compressão longitudinal da estrutura sanduíche.

Para calcular a resistência máxima à compressão longitudinal, F_z^{fcu} , é utilizada a Eq. 15.

$$F_z^{fcu} = \frac{P_{\max}}{A} \quad \text{Equação 15}$$

onde: P_{\max} = Força máxima antes da falha, N; A = Área da seção, mm².

b) Compressão transversal:

Foi realizado ensaio de compressão transversal nos sanduíches segundo a norma (ASTM C364/C64M-07) na máquina de ensaios Instron, como se pode ver na Figura 29.



Figura 29 - Ensaio de compressão transversal para as estruturas sanduíche.

Foi utilizada a Eq. 16 para a determinação da resistência máxima a compressão transversal (σ) das amostras ensaiadas:

$$\sigma = \frac{P_{\max}}{[w(2t_{fs})]}$$

Equação 16

onde: P_{\max} = força final antes da falha (N); w = largura da amostra (mm); t_{fs} = espessura de umas das faces (mm).

Para a medição de espessura das camadas, foram tiradas fotos das faces e núcleos das amostras. Os corpos de prova foram cortados, lixados e posteriormente polidos. O equipamento usado foi o Microscópio ótico Carl Zeiss, Axio Scope com uma fonte de alimentação SNT 12 V 100 W e uma câmera Canon.

Na Figura 30, pode-se observar cinco modos de falha aceitáveis e um não-aceitável para a validação deste ensaio segundo a norma ASTM C364/C364M-07. Os modos de falha aceitáveis são:

- a) Falha por flambagem nas faces (*facesheet buckling failure*), com descolamento da face do núcleo.
- b) Falha por compressão na face (*facesheet compressive failure*), com falha em alguma das faces.
- c) Falha por deslocamento da face do núcleo.
- d) Falha do núcleo por compressão (*core compression failure*).
- e) Falha do núcleo por cisalhamento (*core shear failure*), onde as duas faces se movimentam em sentidos opostos.

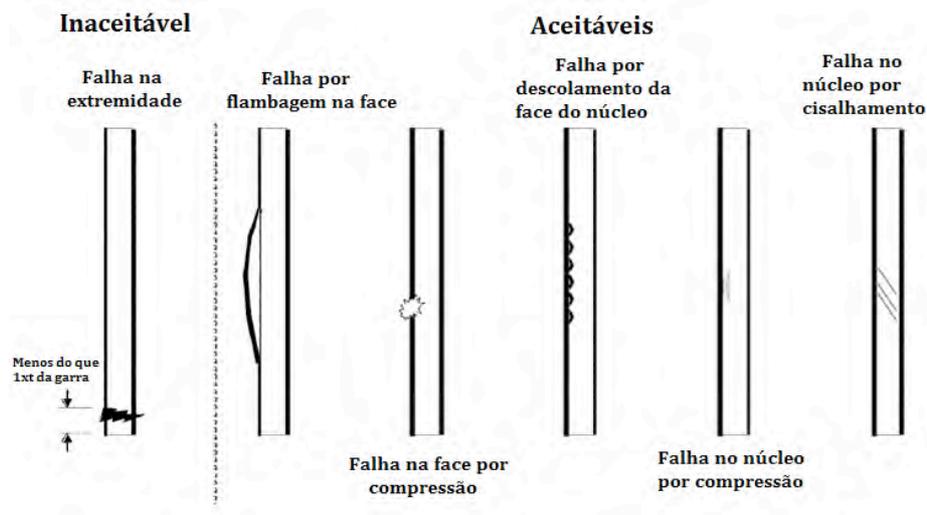


Figura 30 - Modos de falhas mais comuns observados nos ensaios de compressão transversal (ASTM C364/C64M-07).

c) Flexão em três pontos:

Foi realizado ensaio de flexão em 3 pontos (Figura 31) nos sanduíches segundo a norma (ASTM C393/C 393-06), na máquina de ensaio Instron, para determinação da tensão máxima de cisalhamento do núcleo e da tensão nas faces do compósito, e para identificação dos mecanismos de falha.

Com os dados do ensaio, pode-se calcular a resistência ao cisalhamento do núcleo, F_s^{ult} (Eq. 17) e a tensão na face, σ (Eq. 18) segundo a norma (ASTM C393/C 393-06).

$$F_s^{ult} = \frac{P_{max}}{(d+c)b} \quad \text{Equação 17}$$

$$\sigma = \frac{P_{max} S}{2t(d+c)b} \quad \text{Equação 18}$$

onde: P_{max} = força final antes da falha (N); t = espessura nominal da face (mm); d = espessura total do sanduíche (mm); c = espessura do núcleo (mm); b = largura da amostra (mm); S = comprimento do span (mm).



Figura 31 - Ensaio de flexão em 3 pontos da estrutura sanduíche.

d) Resistência à tração das faces:

Esse ensaio foi realizado segundo a norma ASTM C297/C297M-04 na máquina de ensaio Instron, com o objetivo de avaliar a qualidade da adesão entre as faces e o núcleo (Figura 32). A resistência máxima à tração de adesão das faces no núcleo, F_z^{ult} , pode ser calculado segunda Eq. 19.

$$F_z^{ult} = \frac{P_{max}}{A}$$

Equação 19

onde: P_{max} = força final antes da falha (N); A = área da seção (mm^2).



Figura 32 - Ensaio de resistência à tração das faces para as estruturas sanduíche.

e) Resistência ao cisalhamento do núcleo:

O ensaio de resistência ao cisalhamento do núcleo foi realizado em amostras com dimensões 270 × 50 × 16 mm segundo a norma (ASTM C273/C273M-11) na máquina de ensaio Instron, com velocidade de 0,5 mm/mim, e célula de carga de 5 kN. A montagem do sanduíche no suporte é apresentada na Figura 33.



Figura 33 - Ensaio de cisalhamento da estrutura sanduíche.

A tensão de cisalhamento instantâneo do núcleo, τ , é calculada pela Equação 20.

$$\tau = \frac{P}{(L b)}$$

Equação 20

onde: P = carga instantânea na amostra (N); L = comprimento da amostra (mm); b = largura da amostra (mm).

A tensão de cisalhamento no núcleo, γ , é calculada pela Equação 21:

$$\gamma = \frac{u}{t}$$

Equação 21

onde: u = deslocamento instantâneo entre as placas de carga (mm); t = espessura das amostras (m).

f) Ensaio de dureza:

A dureza pode ser definida como a resistência que um material oferece a uma deformação plástica na sua superfície. O ensaio foi realizado para avaliar indiretamente a resistência a choques em baixa velocidade de pequenos objetos, ou a arranhões de objetos flutuantes e à abrasão de calçados ou ferramentas no piso das embarcações.

O ensaio de dureza Barcol das faces foi realizado de acordo com a norma ASTM D2583 em um equipamento Bareiss Pruefgeraetebau GmbH D-89610 Oberdischingen. Foram realizadas 10 medidas em cada tipo de amostra, sempre fazendo medidas nos dois lados da estrutura sanduíche.

g) Ensaio de Impacto de baixa velocidade:

Neste ensaio, um impactador se desprende de uma altura pré-determinada e atinge o corpo de prova posicionado em um plano horizontal. Em geral, este evento de impacto não causa a destruição completa do corpo-de-prova, e o peso ricocheteia, possibilitando assim a determinação de uma energia residual. A velocidade de impacto pode ser obtida através de equações de movimento ou pelo uso de sensores ópticos localizados acima do equipamento. Geralmente, o impactador é instrumentado, possibilitando a obtenção da curva força x tempo e também pode haver um transdutor para a determinação da dissipação de energia. Na Figura 34 vê-se o desenho esquemático da configuração experimental dos testes de impacto de baixa velocidade.

Foi realizado o ensaio de impacto de baixa nos sanduíches segundo a norma ASTM D3763-10 na máquina de ensaio Instron Dynatup 9250H do laboratório

estruturas de sólidos-impactos da USP. Utilizou-se massa do impactador de 4,6 kg, impactador hemisférico de 20 mm de diâmetro, alturas de quedas 0,5 e 1,0 m, fator de escala do sensor de velocidade 1 (m/s)/V, sensor de deslocamento vibrometro a laser Polytec OFV-323, câmera de alta velocidade photron APX-RS e placa de aquisição de dados National Instruments PCI-6115 (Figura 34). Os testes foram realizados para todas as amostras de estruturas sanduíches citadas acima e também para os núcleos PVC e PET isolados.

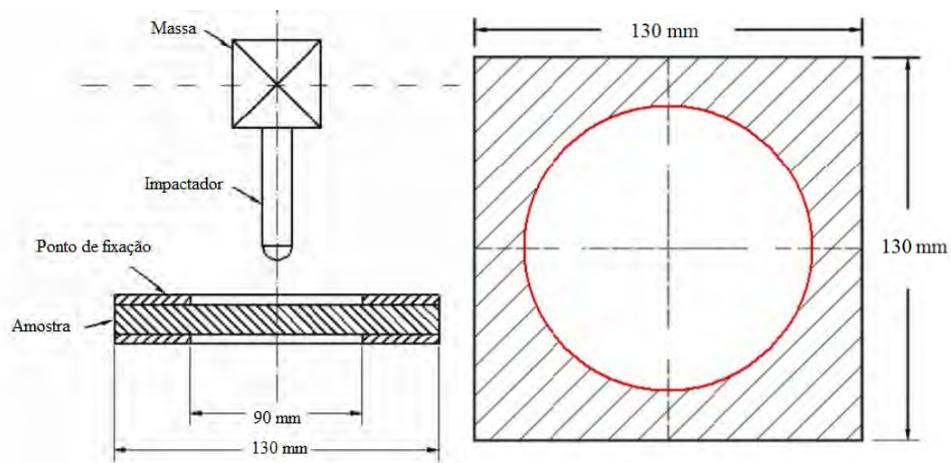


Figura 34 - Desenho esquemático do equipamento para o teste de impacto de baixa velocidade (a) e corpo de prova (b).



Figura 35 - Máquina de teste da Instron Dynatup 9250H (Laboratório de Mecânica dos Sólidos e Impacto em Estrutura/USP).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, serão discutidos os estudos relacionados às características de interesse da resina éster-vinílica e as propriedades viscoelásticas dos compósitos reforçados. Em seguida, será abordada a moldagem das estruturas sanduíche por *RTM Light* e sua caracterização mecânica. Então, será apresentada a modelagem computacional do processo *RTM Light* utilizando o software OpenFOAM.

5.1. Estudo das características da resina éster vinílica

A primeira parte deste estudo abordará o estudo da viscosidade da resina variando com a temperatura, característica muito importante considerando que se utiliza processos de moldagem líquida e a viscosidade é um parâmetro fundamental. Como pode ser visto na Figura 36-a, a viscosidade da resina éster-vinílica não catalisada diminui com o aumento da temperatura. Isso ocorre devido ao enfraquecimento gradativo das forças de interação (van der Waals ou dipolo-dipolo) entre as moléculas existentes na resina. Esta estrutura ainda pode ser enfraquecida com o aumento da taxa de cisalhamento, sendo facilmente recomposta quando esta taxa diminui (CERQUEIRA, 2011).

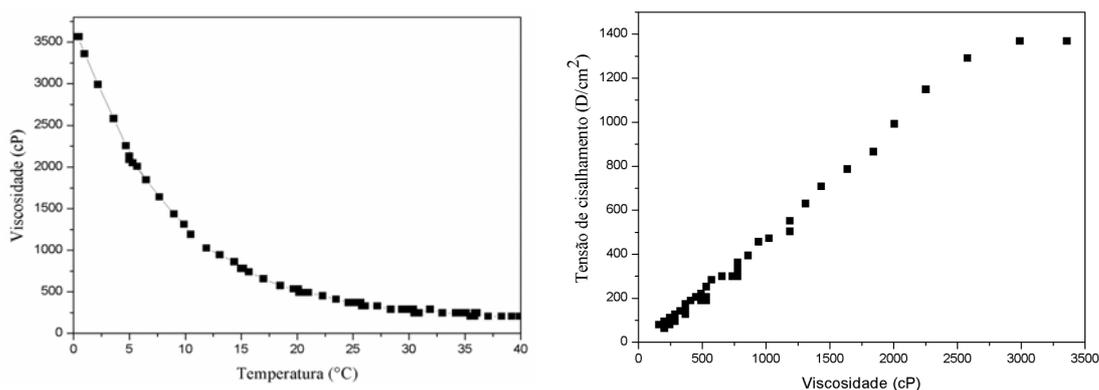


Figura 36 - Viscosidade da resina vs temperatura (a) e Viscosidade da resina vs tensão de cisalhamento (b) Tensão de cisalhamento vs Viscosidade, para uma temperatura de 15 °C.

Uma alta viscosidade é um agravante para processos de moldagem líquida, que se tornam inviáveis em baixas temperaturas (e.g. 0-10 °C), pois seria necessária uma pressão elevada para fazer com que a resina preencha todos dos espaços dentro do

molde, obrigando a projetar moldes rígidos (metálicos). Quanto à tensão de cisalhamento (Figura 36-b), verificou-se que o aumento deste parâmetro não influenciou expressivamente a viscosidade da resina (medida a 15 °C), pois houve apenas um pequeno aumento.

No ensaio com o método da SPI, foram feitas duas medidas para cada teor de iniciador (2 curvas), como pode ser visto nas curvas exotérmicas (Figura 37). Os resultados compilados na

indicam que o tempo de gel diminuiu e a temperatura máxima de cura aumentou com a quantidade de iniciador. A temperatura de gel aumentou e atingiu um máximo em ≈ 106 °C.

Um maior teor de iniciador acelera a reação de cura da resina, diminuindo o tempo de gel. Porém, se a quantidade de iniciador for maior que 2%, há uma excessiva aceleração da cura, produzindo bolhas e impedindo a cura completa da resina. Como este estudo utiliza processo de moldagem líquida, é de extrema importância saber o tempo de gel da resina, garantindo-se assim que ocorra o preenchimento total do molde antes que a resina entre no estado de gel, e interrompa o fluxo.

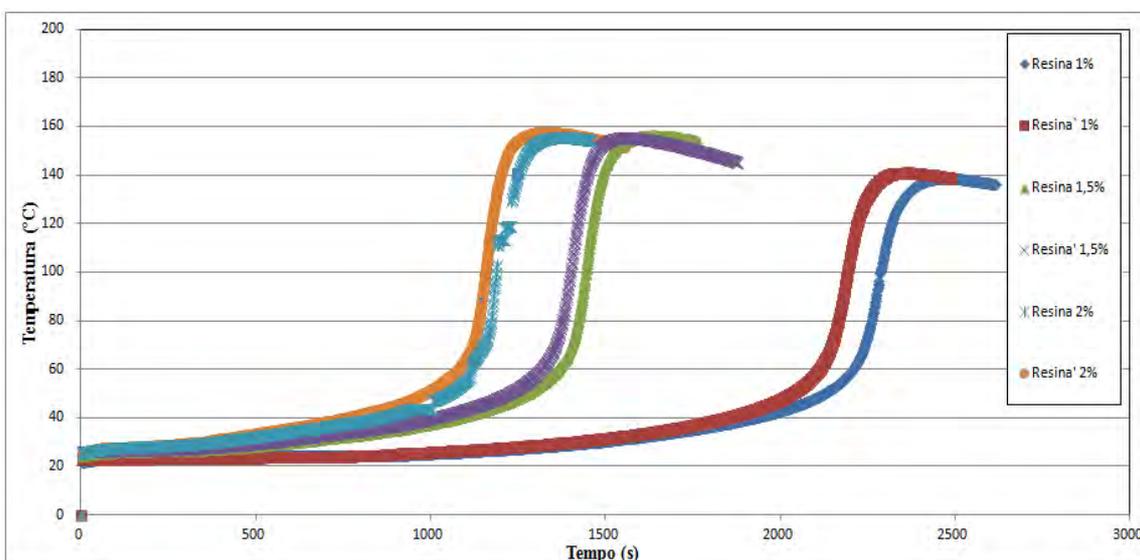


Figura 37 - Curvas exotérmicas para diferentes proporções de iniciador - 1, 1,5 e 2,0 %.

Tabela 2- Valores de tempo e temperatura de gel e temperatura máxima de cura para diferentes teores de iniciador.

	Tempo de gel (s)	Temperatura de gel (°C)	Temperatura máxima de cura (°C)
Resina 1,0 %	2208,0	93,7	138,3
Resina 1,5 %	1434,0	106,6	154,7
Resina 2,0 %	1182,0	104,9	156,5

As amostras moldadas pelo processo de *casting* foram utilizadas para fazer o estudo termo-mecânico. As curvas de fluxo de calor da resina curada e pós-curada são mostradas na Figura 38-a, onde nota-se que a resina sem pós-cura apresenta um grande pico, entre ~50-160 °C. A medida da área dos picos gerou 327,3 J/g de entalpia, com valor da T_g de ~ 110 °C. Já para a resina pós-curada o pico é pequeno, entre ~90-125 °C, com um valor de entalpia residual desprezível de 6,90 J/g e um valor de $T_g \approx 110^\circ\text{C}$.

Já para o ensaio de DMA, as curva de $\text{Tan } \delta$ da resina curada e da pós-curada são mostradas na Figura 38-b. A amostra curada apresenta dois picos distintos, um maior a uma temperatura de ~60 °C e outro ~120 °C e valores de $T_g \sim 65^\circ\text{C}$ e ~120 °C. O pico de menor temperatura diminui com a pós-cura, formando um só pico em ~115 °C e $T_g \sim 120^\circ\text{C}$. Estes resultados sugerem que a pós-cura completou a cura da resina, e a presença de dois picos de $\text{Tan } \delta$ pode ser atribuída à cura parcial das ligações cruzadas, enquanto a presença de apenas um pico mostra a cura total, e com isso uma só transição vítrea (T_g) (SCOTT, 2008).

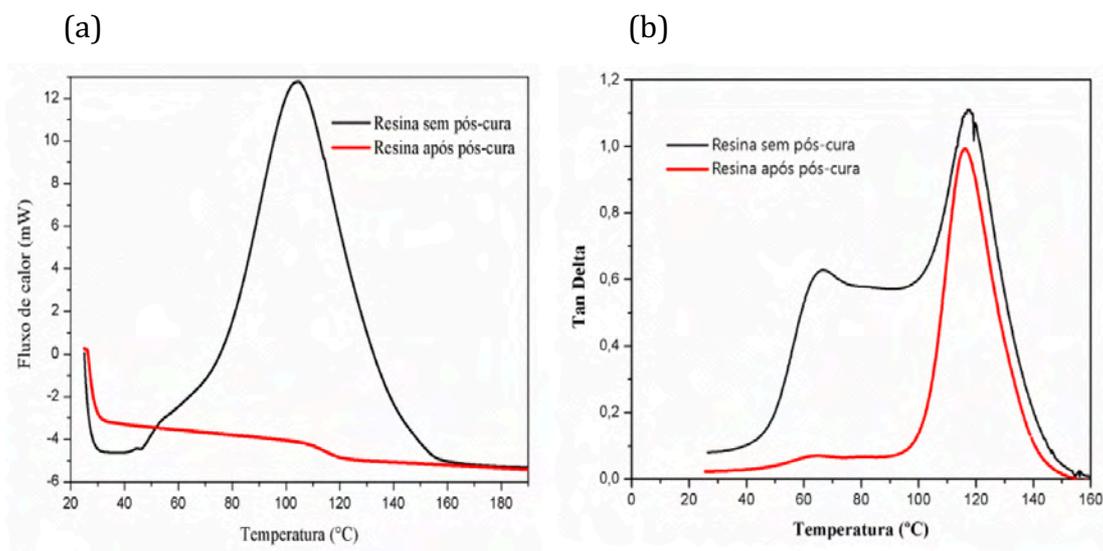


Figura 38 – Resultados para a resina sem e com pós-cura: a) DSC e b) DMA.

Com estes resultados, notou-se a importância e a necessidade de ser feita a pós-cura da resina, para eliminar reações residuais que podem interferir de modo negativo nas propriedades mecânicas dos materiais. Isso se comprovou também nas medidas de Dureza Shore D, para resina curada com valores de 1,55 ($\pm 0,13$) e para a pós-curada 1,62 ($\pm 0,11$) Shore D, pois com a pós-cura aumenta o número de ligações cruzadas, tornando a resina mais rígida e dura.

As curvas de Tan Delta vs. Temperatura e Tempo são apresentadas na Figura 39, para diferentes frequências: 1, 3, 10 e 30 Hz. Os valores de E' (módulo de armazenamento) permanecem inferiores a E'' (módulo de perda), confirmando que as características de um sólido elástico não são atingidas antes da região gel. Como esperado, o aumento da frequência, aumenta o módulo de armazenamento do material e com isso diminui o $\tan \delta$, apresentando uma resposta mais rígida.

O tempo de gel da resina pode ser determinado pelo critério do pico máximo de $\tan \delta$, que corresponde ao cruzamento das curvas de E' e E'' (MIJOVIĆ, 1993). Os valores do tempo de gel estão na faixa de 32 a 35 min e a temperatura de gel entre 115 e 125°C. Estes valores são parecidos com os encontrados pelo método SPI, e a diferença se deve à perda de calor excessiva na cura da resina em um reservatório. Assim, foi possível validar o método SPI para esta determinação, sendo este um método bem mais acessível que o DMA.

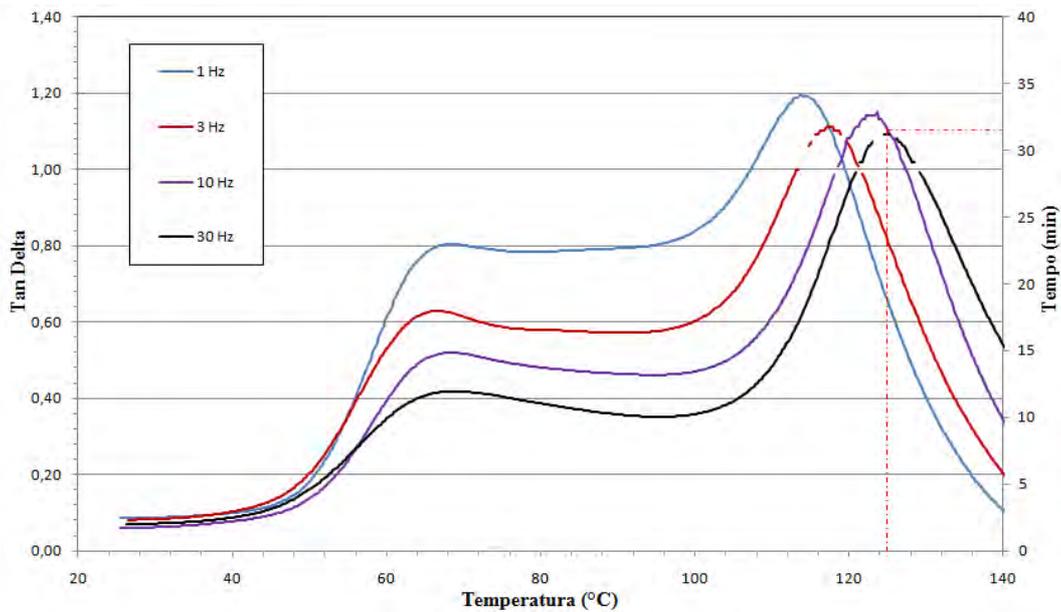


Figura 39 - Curvas de Tan Delta vs temperatura vs. tempo, para diferentes frequências.

5.2. Estudos dos compósitos obtidos por RTM tradicional

A densidade dos compósitos é uma propriedade importante para aplicações em setores como o automobilístico, naval e aeroespacial. Neste sentido esta propriedade foi medida para os compósitos, 4M e 6M utilizados neste trabalho. Utilizando a Eq. 7 foi obtida a densidade da resina, que é igual a $1,1850 \text{ g/cm}^3$. A densidade da fibra de vidro (ρ_f) foi medida no Multipicnômetro Modelo MVP-1 Marca: Quantachrome, sendo que o valor medido foi de $\rho_f = 2,61 \text{ g/cm}^3$.

Para medir a densidade dos compósitos foi usada a Equação 8, os valores obtidos para massa específica e fração volumétrica dos compósitos são mostrados na Tabela 3- Valores de espessura, massa específica e volume de fibra ($\% V_f$) para as amostras 4M e 6M.. Como esperado, o compósito 6M possui um V_f maior que o 4M, pois possuem a mesma espessura de 3,7 mm só que com um número maior de camadas de fibra, a diferença em entres os V_f dois, será vista nos ensaios de DMA. O volume de fibras nos compósitos são importantes nas propriedades mecânicas, como será visto posteriormente, flexão e tensão nas faces das estruturas sanduíches.

Tabela 3- Valores de espessura, massa específica e volume de fibra (% V_f) para as amostras 4M e 6M.

Amostra	Espessura compósito (mm)	Massa específica (g/cm³)	%V_f
4M	3,7	1,44	17
6M	3,7	1,53	23

No ensaio de DMA dos compósitos, foram analisados módulo de armazenamento (E'), módulo de perda (E'') e $\text{Tan } \delta$. As propriedades viscoelásticas de um material variam de acordo com a temperatura e a frequência (CASSU, 2005). Qualquer material quando sujeito a uma tensão constante sob um período de tempo sofre um decréscimo em seu módulo elástico devido ao rearranjo molecular a fim de minimizar a tensão localizada (CANEVAROLO, 2004). O $\text{Tan } \delta$ de um material muda de acordo com a frequência utilizada, obtendo-se maiores valores quando se utiliza maiores frequências.

Como pode-se observar na Figura 40, módulo de armazenamento (E') vs temperatura ($^{\circ}\text{C}$) para as amostras de 4M (Figura 40-a) com e sem pós-cura (Figura 40-b), ocorre aumento no módulo de armazenamento (E') com o aumento da frequência, para os dois casos. Para o sistema pós-curado aconteceu aumento no E' comparado com o sem pós-cura, pois a pós cura elimina reações residuais, deixando o material mais rígido. Também pode-se observar que, para ambos os casos, ocorre aumento no módulo de armazenamento com o aumento da frequência.

O mesmo comportamento foi observado para o compósito 6M (Figura 41), só que neste caso vê-se um aumento no E' em ambos os casos. Este sistema possui um maior % V_f (23 % de reforço) o que caracteriza um material com módulo maior, tornando-o assim mais rígido e resistente aos movimentos moleculares, pois as fibras possuem um papel importante neste travamento molecular.

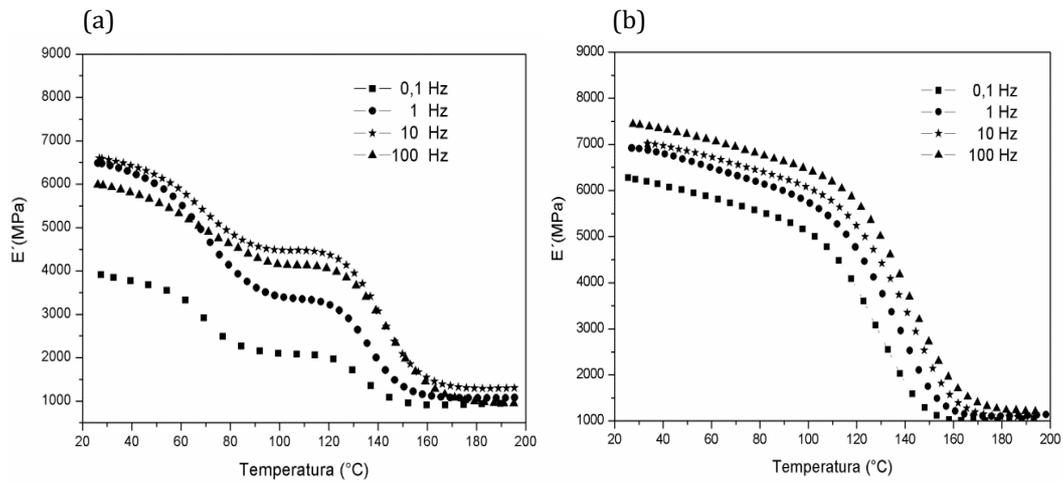


Figura 40 - Módulo de armazenamento dos compostos 4M para as frequências, 0,1, 1, 10 e 100 Hz:

a) Sem pós-cura, b) com pós-cura.

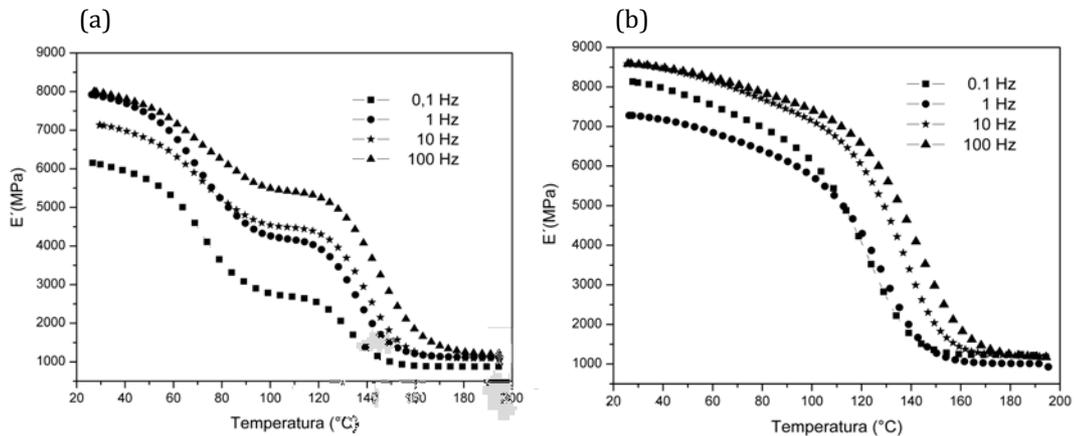


Figura 41 - Módulo de armazenamento dos compostos 6M para as frequências 0,1, 1, 10 e 100 Hz:

a) Sem pós-cura, b) Com pós-cura.

Já para os resultados de módulo de perda (E''), notou-se pouca diferença dos valores com e sem pós-cura. A diferença maior foi nas curvas onde a pós-cura eliminou reações residuais, 4M (Figura 42-b). O mesmo comportamento foi observado para o sistema 6M (Figura 43), só que neste ocorreu aumento no E'' , nos dois casos, pois este sistema possui um maior $\%V_f$ o que diminui seu módulo de perda.

O $\tan \delta$ de um material aumenta quando se utiliza maiores frequências. A variação de $\tan \delta$ com a variação de temperatura e da frequência é mostrada nas Figura 44 e 45, para os casos de 4M e 6M, respectivamente, com e sem pós-cura. Nestas figuras, percebe-se que há um deslocamento da T_g para maiores

temperaturas com o aumento da frequência. Isso ocorre pois quanto maior a frequência, mais defasada é a resposta do material submetido à tensão, devido ao maior tempo de relaxação (COWIE, 1973). Também ocorreu a eliminação de um dos picos do $\tan \delta$ devido à pós-cura do material, importante para eliminar pontos de concentração de tensão que podem levar à falha prematura no material.

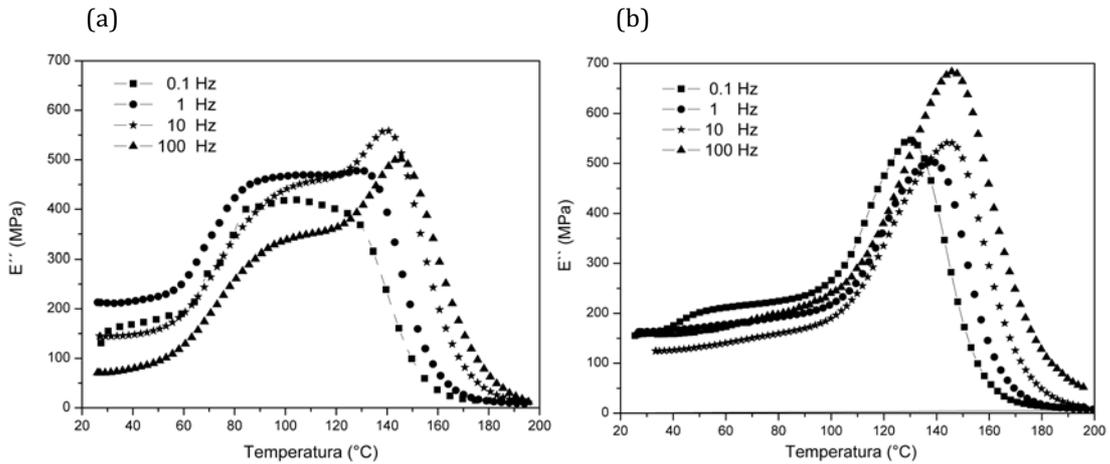


Figura 42 - Módulo de perda dos compósitos 4M para as frequências 0,1, 1, 10 e 100 Hz: a) Sem pós-cura, b) Com pós-cura.

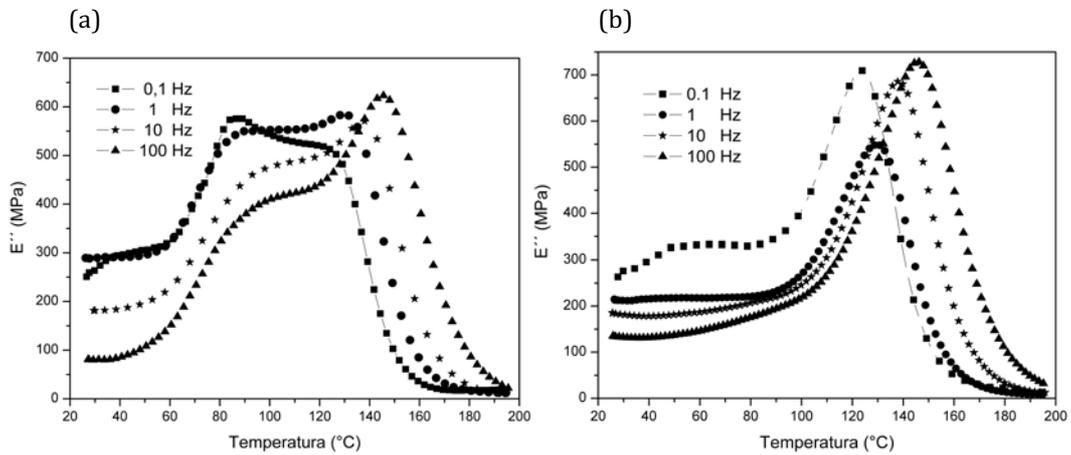


Figura 43 - Módulo de perda dos compósitos 6M para as frequências 0,1, 1, 10 e 100 Hz: a) Sem pós-cura, b) Com pós-cura.

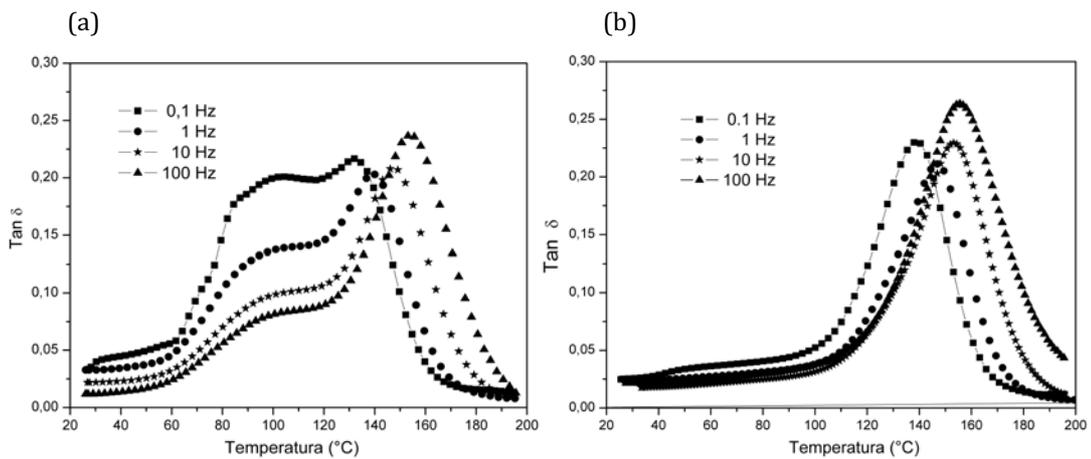


Figura 44 - Tan Delta dos compósitos 4M para as frequências 0,1, 1, 10 e 100 Hz: a) Sem pós-cura, b) Com pós-cura.

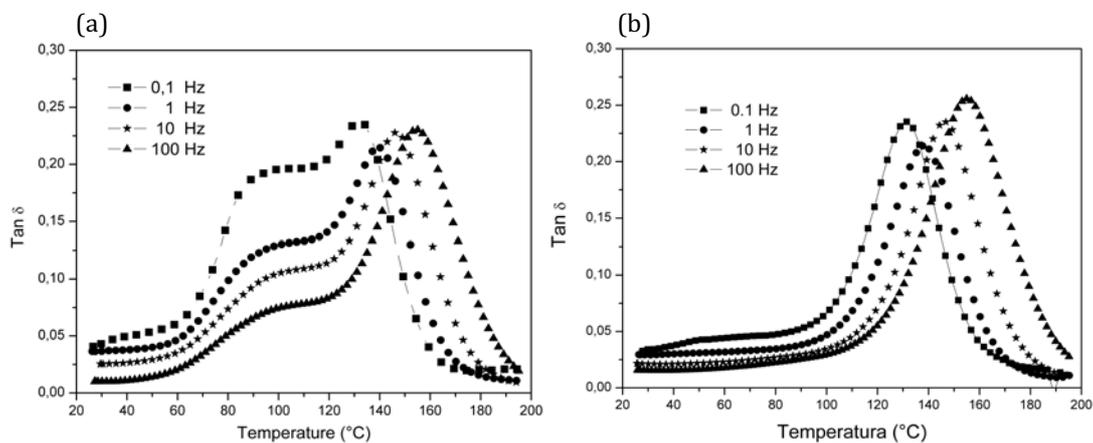


Figura 45 - Tan Delta dos compósitos 6M para as frequências 0,1, 1, 10 e 100 Hz: a) Sem pós-cura, b) Com pós-cura.

Os valores de T_g obtidos da curva de $\text{Tan } \delta$ são dados nas Figura 44 e Figura 45. Nota-se que há uma tendência para maiores valores para as amostras com maior teor de fibra de vidro ($\%V_f$). O aumento do volume de fibra também gera maiores valores de $\text{Tan } \delta$. Estes maiores valores se devem à maior restrição imposta pela fibra de vidro, que desloca a transição para maiores temperaturas (BERZOSA, 2004). A presença da fibra de vidro de alto módulo reduz a flexibilidade do material introduzindo amarras na mobilidade dos segmentos nas moléculas poliméricas das temperaturas de relaxação (SALMAN, 2015).

O estudo relacionado à análise dinâmico-mecânica dos materiais compósitos se justifica, pois, as faces do compósito sanduíche são formadas por compósitos

(resina/fibra). A adição de fibras de vidro à resina éster-vinílica, aumentou os módulos de perda e armazenamento, mas não influenciou tanto o $\text{Tan } \delta$.

5.3. Moldagens das estruturas sanduíche por RTM *Light*

Foram realizadas 12 moldagens usando o processo RTM *Light*, para os seguintes sistemas: PVC-2M, PVC-3M, PVC-4M, PVC-2T, PVC-3T, PVC-4T, PET-2M, PET-3M, PET-4M, PET-2T, PET-3T e PET-4T. Durante o processamento destes sistemas, foram feitas fotografias da parte superior do molde com o objetivo de avaliar a frente de fluxo e a influência do $\%V_f$ das camadas no tempo de preenchimento do molde. Dentre as moldagens, foram escolhidas as amostras de PET-3M, PET-3T, PVC-2M para representação.

A Figura 46 mostra o avanço da frente de fluxo na moldagem do sistema PET-3M. A Figura 46-a foi obtida antes de começar a injeção e a Figura 46-b mostra a resina fluindo nas bordas (canaletas). O fluxo da resina converge das canaletas em direção ao centro do molde (ponto de vácuo) e o preenchimento completo do molde por ser observado na Figura 46-f. Já na Figura 47, pode-se observar a frente de fluxo para o sistema PVC-3T, onde a frente é mais irregular, embora o tempo de preenchimento seja parecido. O tempo total de preenchimento variou entre 3-4 min para o processamento dos outros sistemas, não havendo a influência significativa do número de camadas e nem do tipo de reforço. Na Figura 48 pode-se observar a frente de fluxo para a moldagem do sistema PVC-2M, que foi mais irregular que para o PET-3M, porém o tempo de preenchimento também foi entre 3-4 min.

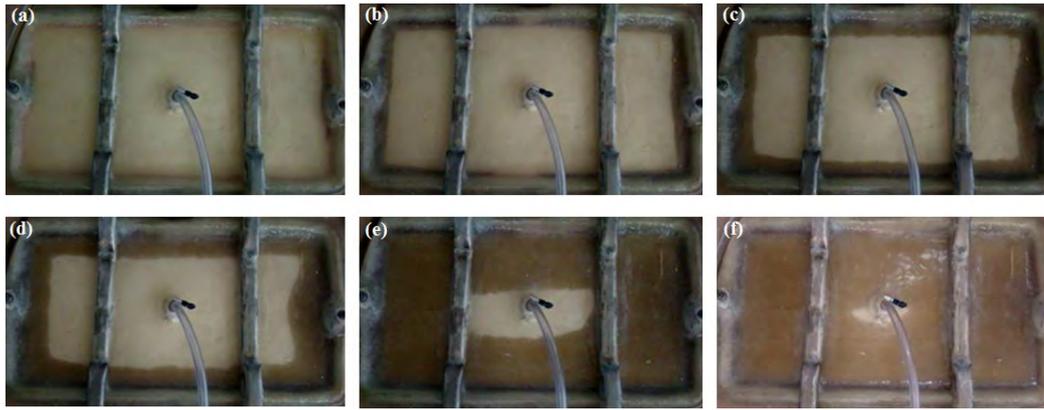


Figura 46 - Sequência de fotos do processo RTM *Light* para o sistema PET-3M: (a) $t = 0$ s, (b) 120 s, (c) 160 s, (d) 180 s, (e) 210 s e (f) 300 s.

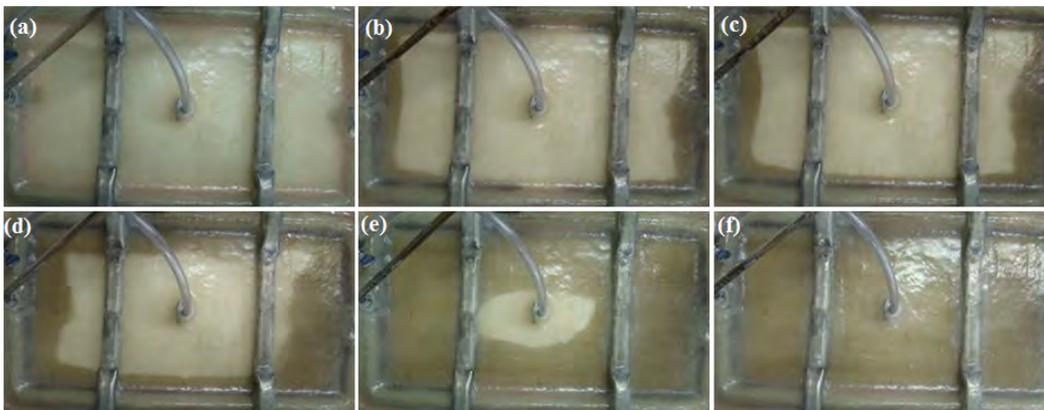


Figura 47 - Sequência de fotos do processo RTM *Light* para o sistema PET-3T: (a) $t = 0$ s, (b) 120 s, (c) 160 s, (d) 180 s, (e) 210 s e (f) 300 s.

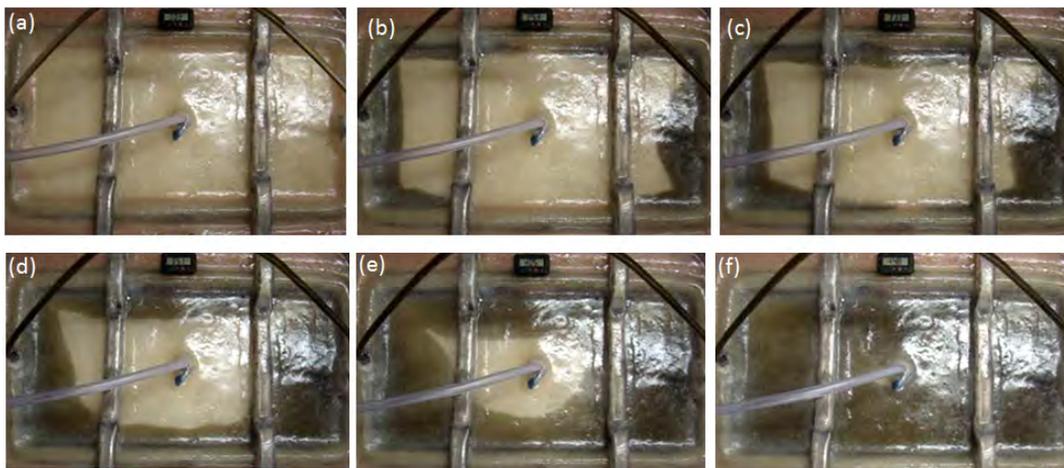


Figura 48 - Sequência de fotos do processo de RTM *Light* para o sistema PVC-2M: (a) $t = 0$ s, (b) 100 s, (c) 140 s, (d) 160 s, (e) 200 s e (f) 260 s.

Foram realizadas avaliações das camadas do sanduíche com um microscópio óptico para verificar a espessura das faces, o mecanismo adesão das faces no núcleo e também para possibilitar os cálculos de algumas propriedades mecânicas, como resistência à flexão nas faces. A adesão entre as faces e o núcleo de um sanduíche ocorre por adesivos ou por travamento mecânico. No caso dos sanduíches deste trabalho, a adesão é por agarramento mecânico nas células fechadas do núcleo, conforme pode ser observado nas Figura 49, Figura 50, Figura 51 e Figura 52. Nestas figuras, observa-se que a resina preenche as cavidades (porosidade) na superfície do núcleo, sendo que os núcleos são do tipo células fechadas, formando uma camada superficial que impede o avanço da resina. Este tipo de travamento é importante para evitar delaminação por cisalhamento ou mesmo tensão na face. Na Figura 49 é fácil verificar onde ocorre o travamento mecânico, pois as células escuras do núcleo são preenchidas por resina, a parte mais clara.

Como pode ser visto na Tabela 4, os valores das espessuras globais variaram. Pode-se notar que os compósitos com núcleo de PVC possuem espessura maior do que os com núcleo de PET, pois o primeiro tem uma espessura nominal menor, de 12 mm, enquanto o PET tem uma espessura de 13 mm. Mesmo assim, a diferença das espessuras dos dois sistemas não é muito diferente, pois quando o núcleo possui uma espessura maior, acaba deformando o molde e aumentando a espessura da cavidade do mesmo, que é originalmente de 16 mm. Esta é uma característica normalmente verificada em moldagens por RTM *Light* devido ao molde semi-rígido, que não ocorre com o RTM tradicional, com molde rígido.

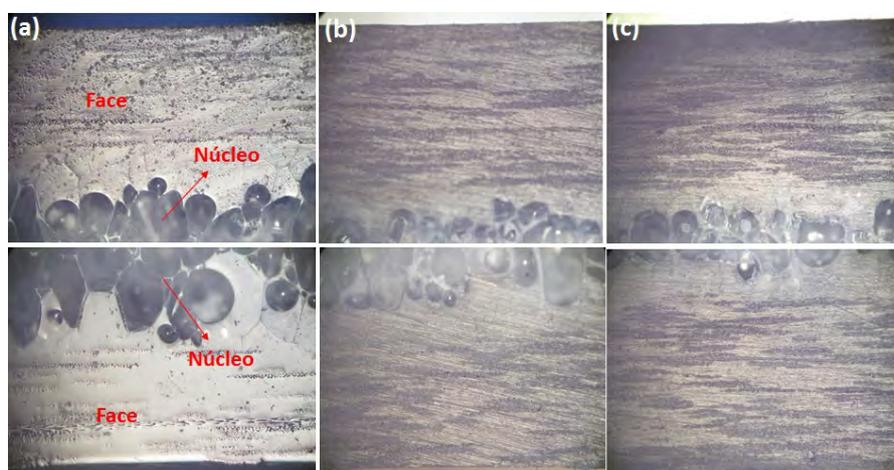


Figura 49 - Imagens das seções transversais do sanduíche nas regiões de junção entre as faces e o núcleo para os sistemas: PET-2M (a), PET-3M (b) e PET-4M.

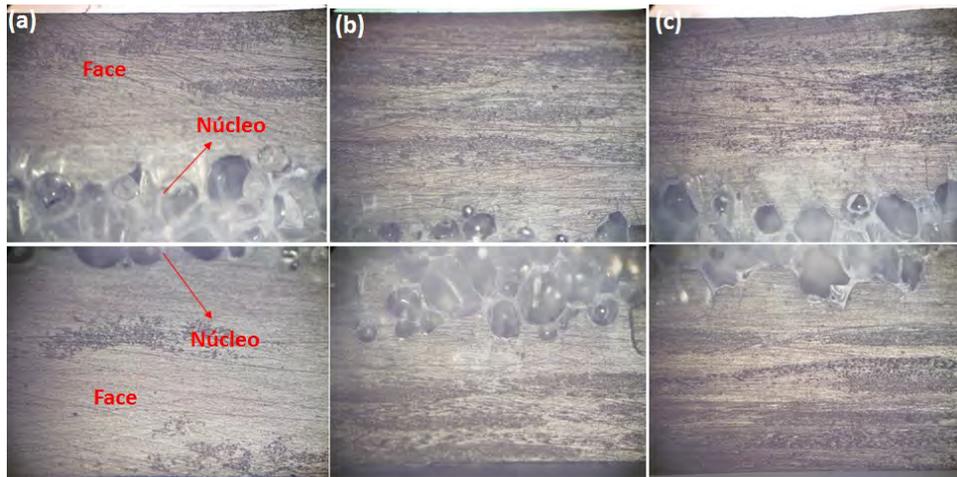


Figura 50 - Imagens das seções transversais do sanduíche nas regiões de junção entre as faces e o núcleo para os sistemas: PET-2T (a), PET-3T (b) e PET-4T.

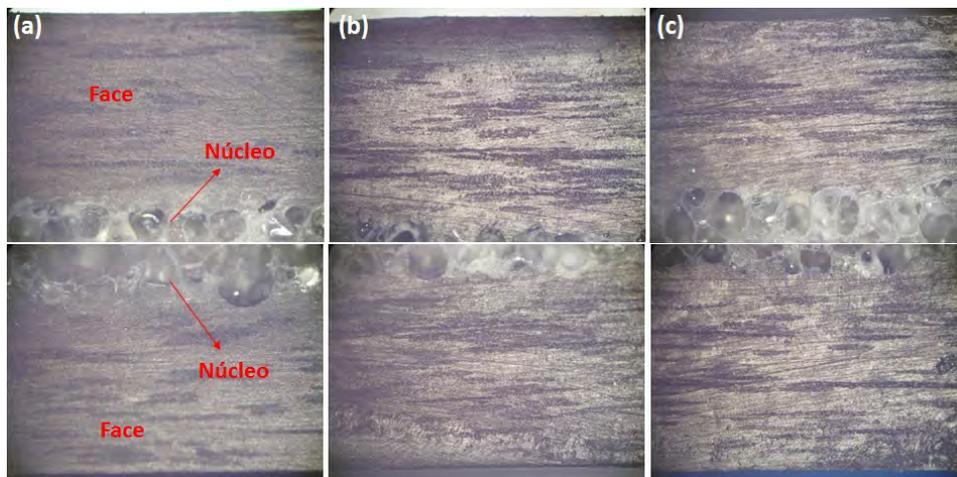


Figura 51 - Imagens das seções transversais do sanduíche nas regiões de junção entre as faces e o núcleo para os sistemas: PVC-2M (a), PVC-3M (b) e PVC-4M (c).

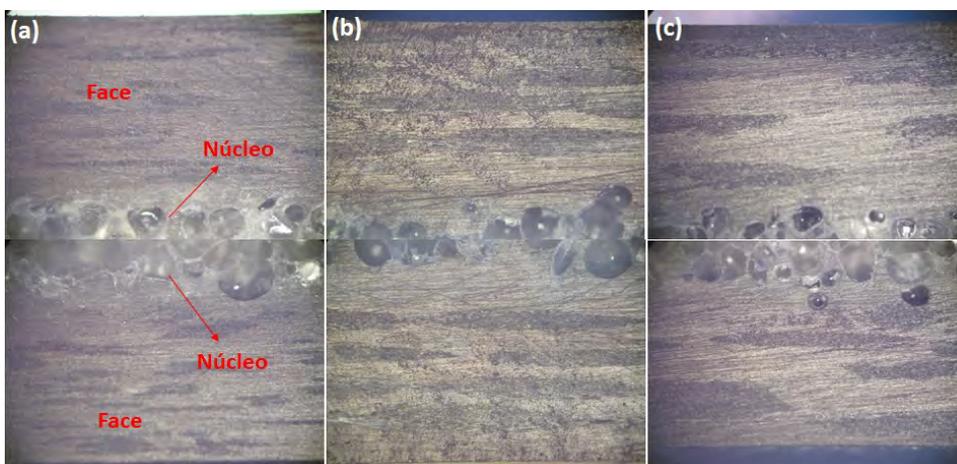


Figura 52 - Imagens das seções transversais do sanduíche nas regiões de junção entre as faces e o núcleo para os sistemas: PVC-2T (a), PVC-3T (b) e PVC-4T (c).

A Tabela 4 mostra todos os valores das espessuras das faces superiores e inferiores e do volume de fibras ($\%V_f$) das faces das estruturas sanduíche. É possível verificar que as espessuras variaram (sem uma tendência clara) pouco entre as diferentes estruturas.

Os valores de $\%V_f$ aumentaram com a adição de camadas de reforço, e as faces que utilizam manta possuem um $\%V_f$ maior, pois esta possui uma gramatura (massa por área) maior que o tecido. Os valores da Tabela 4 serão utilizados no cálculo de resistência à flexão nas faces e também em outras discussões das propriedades mecânicas e na simulação numérica.

Tabela 4- Valores das espessuras das faces do sanduíche e o $\%V_f$ médio das faces.

Espessura faces (mm)		PET-2M	PET-3M	PET-4M	PET-2T	PET-3T	PET-4T
		Superior	1,95	2,09	1,88	1,66	2,27
	Inferior	2,25	1,89	1,66	2,28	1,50	1,92
$\%V_f$	Média	13,23	13,96	15,69	12,89	13,47	13,80
Espessura faces (mm)		PVC-2M	PVC-3M	PVC-4M	PVC-2T	PVC-3T	PVC-4T
		Superior	2,32	1,89	1,97	2,10	2,17
	Inferior	2,13	2,17	1,88	2,19	2,24	1,86
$\%V_f$	Média	12,48	13,68	14,43	10,67	11,00	12,27

5.4. Simulação numérica da moldagem RTM *Light*

Conforme citado nos métodos, primeiramente foi realizada a injeção com óleo de soja com o propósito de validar a simulação numérica da moldagem RTM *Light*. O avanço da frente de fluxo para o processo de RTM *Light* possui a característica de fluir primeiramente pelas bordas do molde, chamadas de canaleta, onde o volume de fibra é zero, e posteriormente convergir para um ponto de vácuo, formando uma frente de fluxo aproximadamente radial. Este comportamento pode ser confirmado na Figura 53, onde é mostrada a frente de fluxo para diferentes de tempos de moldagem na face superior do sanduíche.

Na Figura 53-a o fluido começa a fluir pela canaleta em apenas 1 s. Já na Figura 53-b o canal está totalmente preenchido e o fluido começa a penetrar no meio

fibroso, em 3s. Na Figura 53-c, a frente de fluxo fica regular e começa a convergir para o centro e que, à medida que a frente começa a chegar no ponto de vácuo, nota-se que a parte inferior leva mais tempo que a superior, isso ocorre provavelmente pela entrada de ar nas borrachas de vedação ou alguma variação de espessura na cavidade. Na moldagem experimental é possível observar que a frente de fluxo não é perfeitamente radial quando converge para o centro de vácuo, porque há imperfeições na forma fibrosa que torna impossível permitir uma frente de fluxo perfeitamente regular ou outro fator de processo. Pode-se observar que, neste caso, o preenchimento da face superior finalizou no tempo de 18 s. A área de coloração menos amarela representa a região que não foi preenchida antes da chegada do óleo ao tubo de saída.

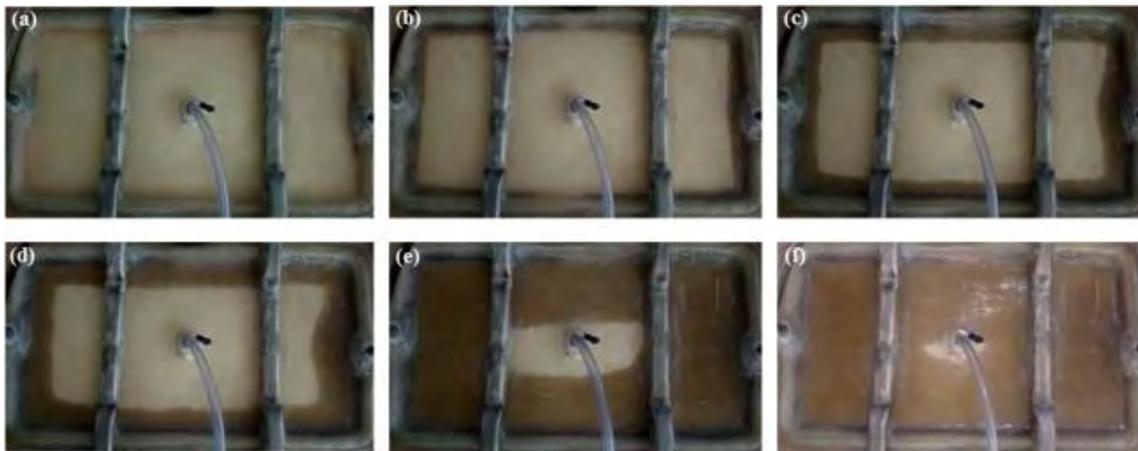


Figura 53 - Perfil da infiltração da parte superior da moldagem experimental para diferentes tempos de preenchimento: (a) 1 s, (b) 3 s, (c) 5s, (d) 10 s, (e) 15 s, (f) 18 s.

Como o objetivo de desenvolver uma solução numérica que pudesse ser utilizada para diminuir o número de experimentos em laboratório a serem realizados (variando as condições operacionais, geometria, e propriedades dos materiais), o software OpenFOAM foi utilizada na simulação de alguns outros casos. Em um primeiro teste, a solução numérica é apresentada para o caso mostrado na Figura 53.

Nesta simulação, são utilizados dois pontos de injeção e um ponto de vácuo. As condições operacionais e as propriedades físicas consideradas estão apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5- Propriedades físicas e condições de operação.

	Símbolos	Valores	Unidades
Courant Number	$Co = V \Delta t / \Delta x$	0,5	---
Pressão de injeção	P_0	0,7	bar
Densidade	ρ	919	kg/m ³
Viscosidade	μ	0,065	Pa s
Porosidade	ε	0,85	---
Permeabilidade	K	$1,83 \times 10^{-9}$	m ²

O tempo total obtido foi de aproximadamente 14,8 s, tendo sido necessário aguardar cerca de 4 dias para obter a resposta, rodando em paralelo (4 núcleos) em uma estação de trabalho com processador Intel(R) Xeon(R) CPU E31240 @ 3.30 GHz. O tempo simulado foi cerca de 18% menor que o tempo de preenchimento experimental.

A principal diferença entre a moldagem experimental e simulação numérica pode ser vista no início da injeção (Figura 54). Na simulação no tempo de 1s (Figura 54-a) o fluido já alcançou a preforma fibrosa antes preencher toda canaleta. Só com 5 s (Figura 54-c) a canaleta está totalmente preenchida. Quando toda a cavidade é preenchida, no instante 15 s (Figura 54-e), pequenos pontos perto da saída do fluido em amarelo, indicam o não preenchimento da cavidade devido ao acúmulo de ar.

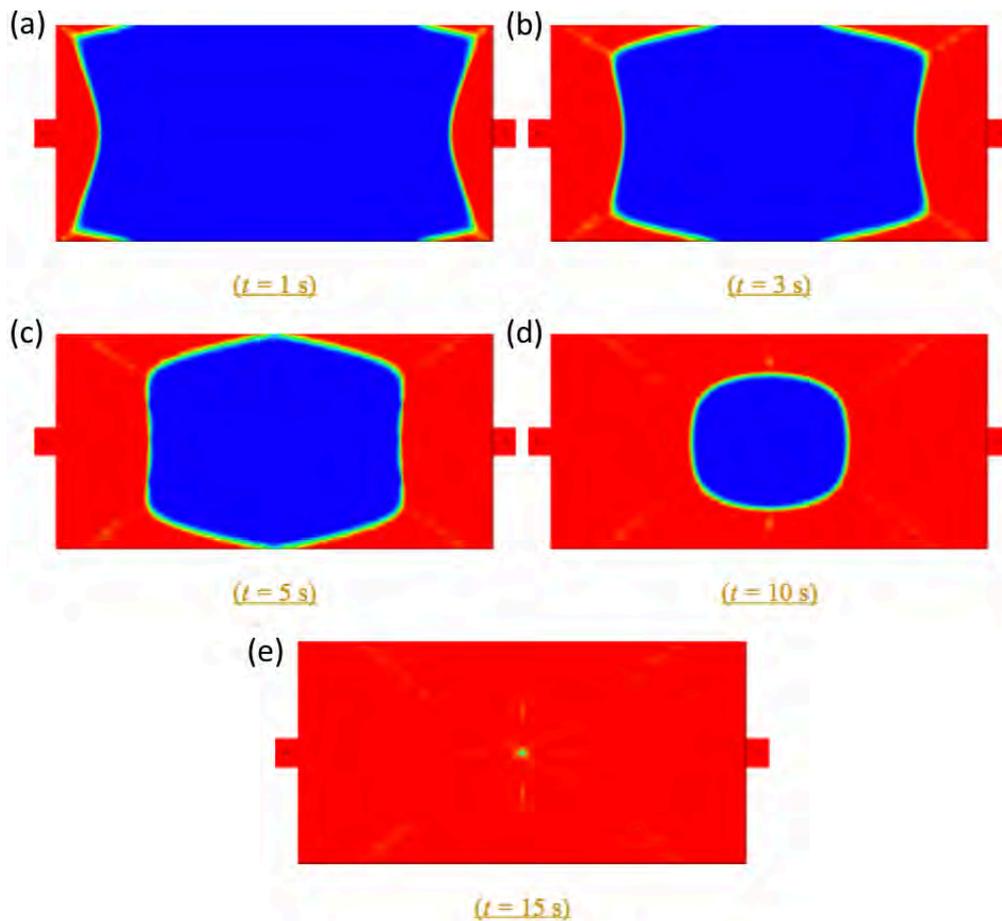


Figura 54 - Perfil da infiltração da parte superior do molde para diferentes tempos de preenchimento: (a) 1 s, (b) 3 s, (c) 5s, (d) 10 s, (e) 15 s.

Alguns fatores podem justificar a diferença verificada para o perfil da frente de fluxo e para o tempo total de preenchimento entre a moldagem experimental e o resultado numérico:

- a) Não heterogeneidade nas propriedades físicas do meio fibroso (porosidade e permeabilidade). É importante destacar que a permeabilidade do meio, que é função do tecido, do posicionamento no interior do molde e da compressão das fibras, foi obtido num experimento diferente, com um molde rígido (metálico).
- b) Na moldagem experimental, a pressão de entrada logo após a injeção não é constante, no entanto, é considerada constante na simulação numérica.
- c) A geometria do canal lateral no molde experimental é irregular e, em algumas partes, difere consideravelmente da geometria idealizada.

O molde experimental foi construído com apenas uma saída posicionada na parte superior do meio do contramolde. Assim, foi necessário fazer furos no núcleo impermeável, permitindo que o ar flua desde a camada inferior até a camada superior e assim permitir que o ar e o fluido escoem até a saída. Estes orifícios são mostrados em corte ao longo de um dos eixos principais de simetria da Figura 55. Nesta figura, pode ver-se o fluxo de resina dentro de ambas as faces superior e inferior com a mesma velocidade. No final da simulação (15 s), bolhas de ar podem ser visualizada no interior dos tubos de ligação.

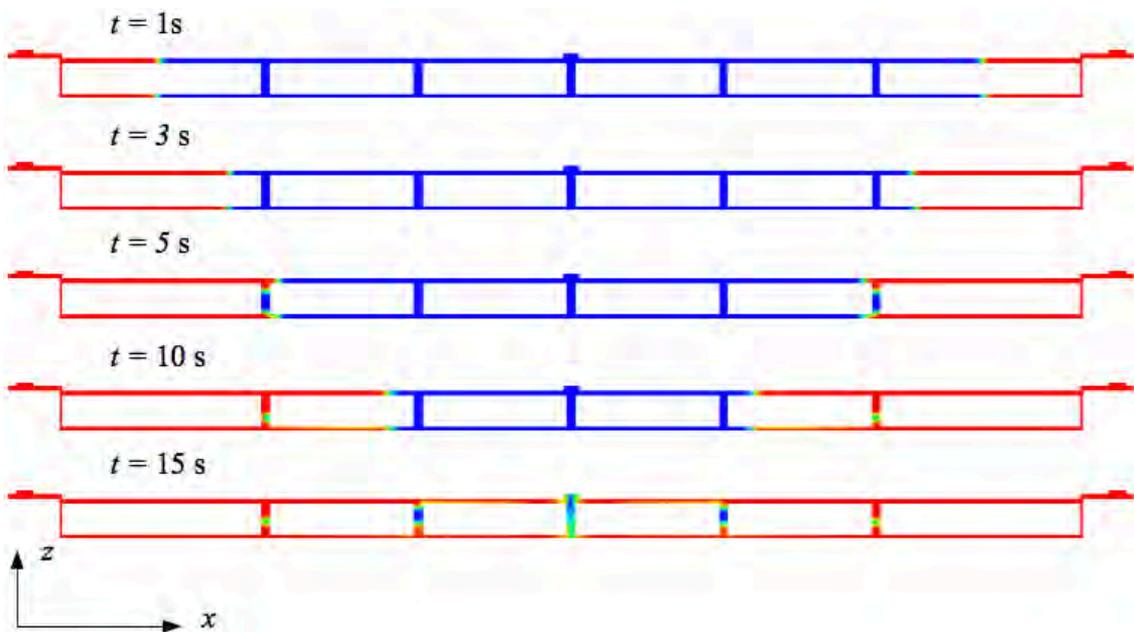


Figura 55 - Perfil numérico de infiltração para diferentes tempos.

Na Figura 56, a região próxima à seção de saída é amplificada. Ela mostra que a injeção deve durar mais que 15 s para garantir que todas as regiões estejam completamente preenchidas com resina. A simulação no entanto prevê que as bolhas de ar aprisionadas no interior dos tubos de ligação irão começar a se mover, produzindo uma peça final com regiões contendo vazios indesejáveis (ver partes laranja na Figura 56).

Como mostrado na Figura 25, o diâmetro dos tubos de ligação é 240 vezes menor que o comprimento do molde na direção x, assim, a grade mostrada na Figura 28 acaba sendo "forçadamente" bastante refinada já na sua 1ª versão. A independência espacial e temporal da solução é obtida através do *Courant Number*

o qual é mantido sempre com um valor baixo, conforme mostrado na Tabela 5. O Número máximo de *Courant* recomendado para o solver *interFoam* é de 0,5, nas regiões de interface dos dois fluidos e 1 em todas as outras regiões.

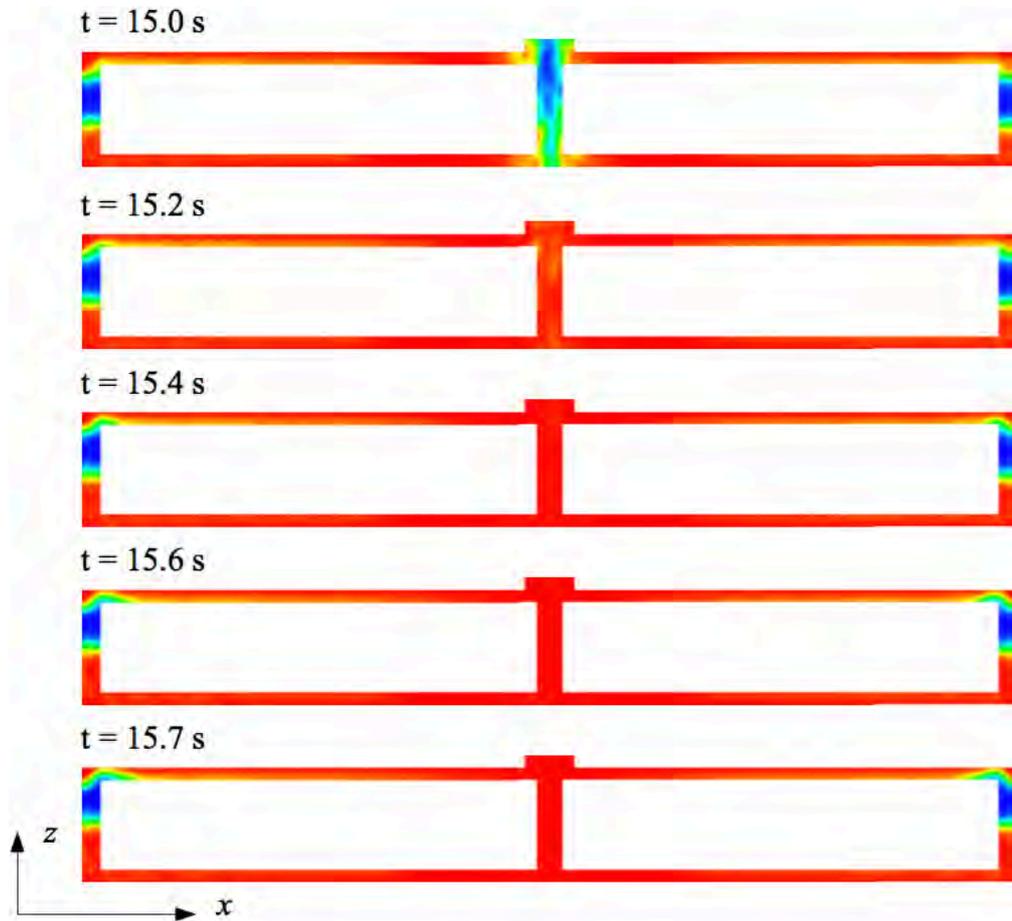


Figura 56 - Perfil numérico de infiltração para os diferentes tempos preenchimento.

Como o tamanho dos elementos da malha não muda, o *time step* foi definido para 1×10^{-8} s no início e deixado livre para variar durante a simulação, a fim de garantir $C_0 \leq 0,5$. Normalmente, o *time step* máximo alcançado foi de 1×10^{-4} s, porém, a fim de evitar possíveis problemas de solução, o *time step* máximo permitido foi ajustado para 1×10^{-3} s. Foram mantidos os valores padrões da maioria dos parâmetros de controle do *solver*, embora alguns deles tenham sido alterados para facilitar a convergência. Os parâmetros modificados e outras variáveis importantes são mostrados na Tabela 6.

Na simulação seguinte, foi investigado o impacto de uma segunda saída de resina posicionada na face inferior do molde. Neste caso, os tubos de ligação não são

necessários porque o ar na face inferior vai fluir por esta segunda saída. Era esperada uma diminuição do tempo total de preenchimento, entretanto este comportamento não foi observado. A única vantagem em incluir a segunda saída está relacionada com a formação de bolhas de ar, que não aparecem nesta simulação. Na Figura 57, os perfis de resina obtidos para diferentes instantes são mostrados.

Tabela 6- Principais parâmetros de controle da solução numérica.

Variável	Parâmetros
Algoritmo	PIMPLE
Solvers	
Velocidade	PBiCG
Pressão	PCG
Interpolação	
Transiente	Euler
Gradiente	cellMDLimited Gauss linear 1.0;
Divergente	
div(phi,rb,alpha)	Gauss interfaceCompression
div(rho*phi,U)	Gauss upwind
div(phi,alpha)	Gauss upwind

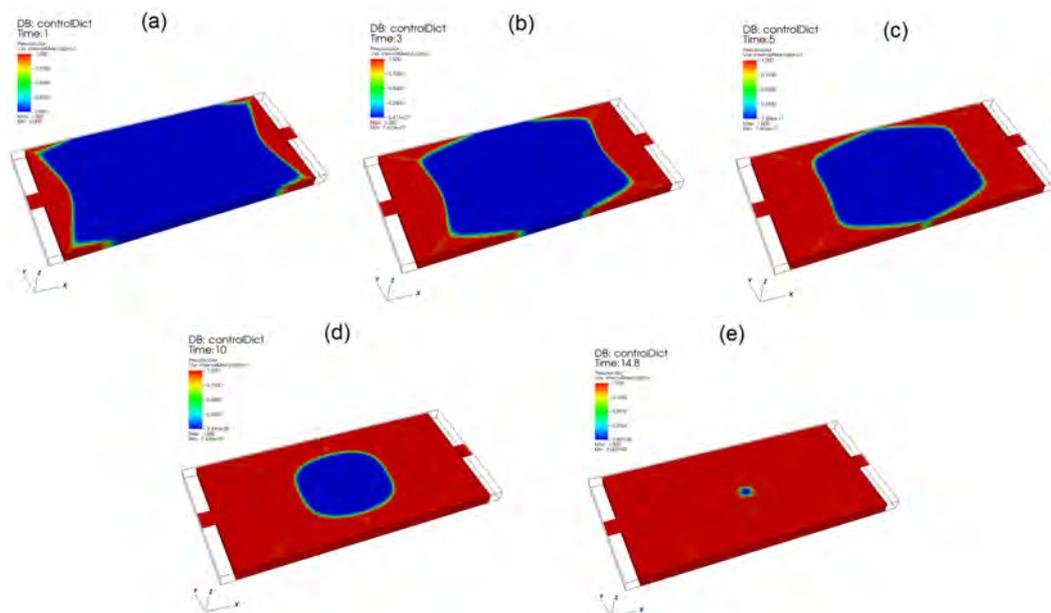


Figura 57 - Perfil numérico de infiltração para diferentes tempos de preenchimento: Dois pontos de vácuo.

No último caso simulado, tanto a saída inferior como os tubos de ligação foram removidos. A ideia foi simular um caso "extremo", com um erro de projeto de molde previsível, em que uma grande área sem impregnação de resina era esperada na face inferior. A bolha de ar prevista é mostrada na Figura 58. Como pode ser visto nesta figura, a resina começa a avançar no interior do molde, normalmente nos primeiros segundos e, em seguida, o ar contido na placa inferior fica aprisionado formando uma grande região não preenchida.

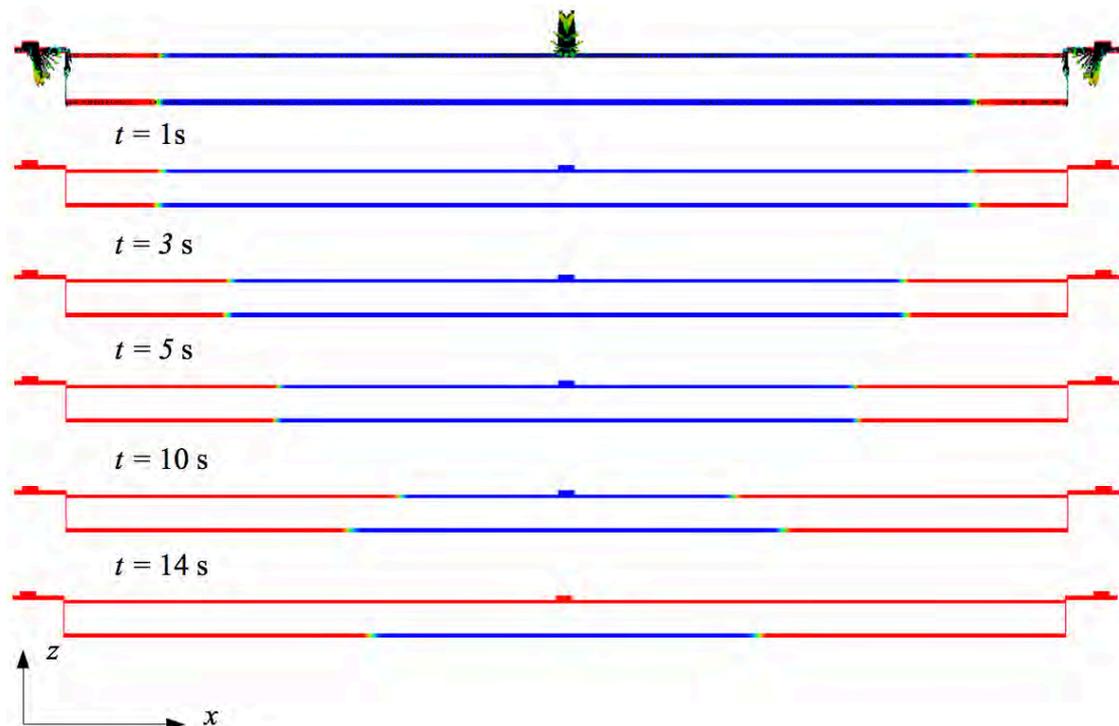


Figura 58 - Perfil numérico de infiltração para diferentes tempos de preenchimento: Um ponto de vácuo e sem conexão por tubos.

5.5. Estudo das propriedades mecânicas das estruturas sanduíche

5.5.1. Dureza Barcol

A dureza Barcol é uma propriedade muito importante de ser medida em estruturas sanduíche, pois estes materiais devem suportar o choque de materiais pontiagudos sem que ocorra a perfuração da superfície deixando o núcleo exposto à entrada de umidade, o que causaria delaminação entre faces/núcleo. É esperado o aumento da dureza superficial do compósito com a adição de mais camadas de fibra

de vidro (ver Tabela 4), pois aumenta na superfície a quantidade de fibras que é um material inorgânico de dureza elevada.

Os valores de dureza Barcol medidos na superfície dos compósitos estão mostrados na Figura 59, onde se nota um aumento da dureza com adição de camadas para os sanduíches com núcleo de PET, como esperado (Figura 59-a). Já para as estruturas sanduíche de PVC não aconteceu o mesmo. Em alguns casos, como para PVC-2M, PVC-3M e PVC-4M, os valores tendem a diminuir com o aumento das camadas. Já para os de PVC com tecido seguiu a tendência de aumentar a dureza com o aumento das camadas. Mesmo que, em ambos os casos, os valores estejam dentro do desvio (Figura 59-b).

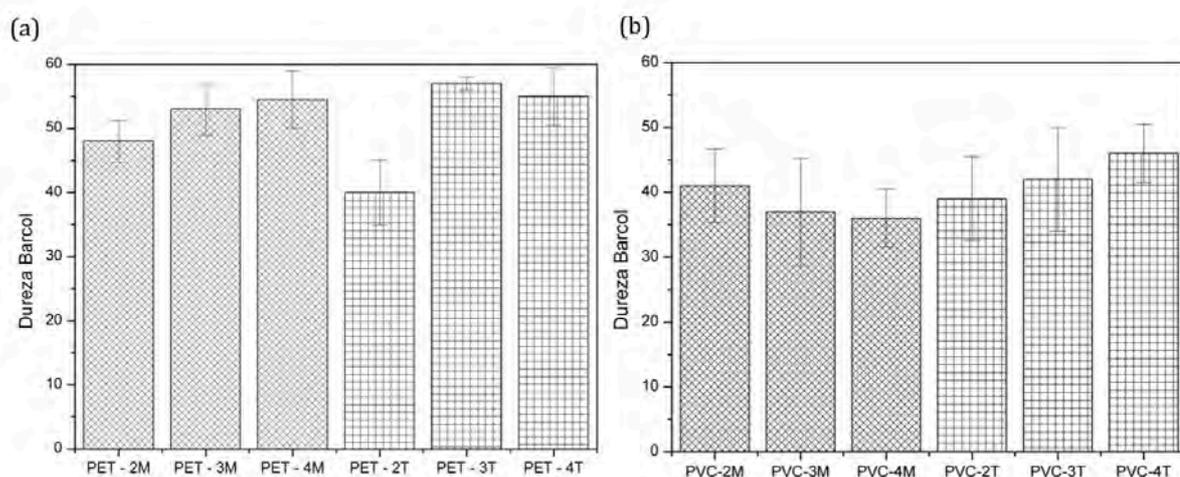


Figura 59- Dureza Barcol para as estruturas sanduíche de: (a) PET e (b) PVC.

5.5.2. Compressão longitudinal e transversal

Os ensaios de compressão longitudinal foram realizados primeiramente nos núcleos isolados, isto é, sem as faces da estrutura sanduíche. Os valores encontrados para os núcleos de PVC e PET foram de 2,47 ($\pm 0,08$) MPa e 2,30 ($\pm 0,04$) MPa, respectivamente, sendo que os valores de massa específica são iguais (80 kg/m^3). Valores parecidos indicam que os núcleos exercerão pouca influência nas medidas realizadas no ensaio com as faces.

Os valores de resistência à compressão longitudinal dos compósitos podem ser vistos na Figura 60-a e b para PET e PVC, respectivamente. Observa-se nestas figuras que os valores de resistência diminuem com relação aos núcleos sozinhos,

pois as faces ajudam a comprimir o material. Não foi possível verificar uma influência clara do tipo de face do compósito nos resultados.

Comparando com núcleos comerciais como a madeira Balsa, os valores de resistência à compressão variam de 8,2 a 13,9 MPa (GARAY, 2011), pois o núcleo de madeira balsa possui uma massa específica elevada (densidade 155 kg/m³) e as fibras estão orientadas no sentido longitudinal. Também foi possível observar que os valores são menores para os materiais com núcleo de PVC.

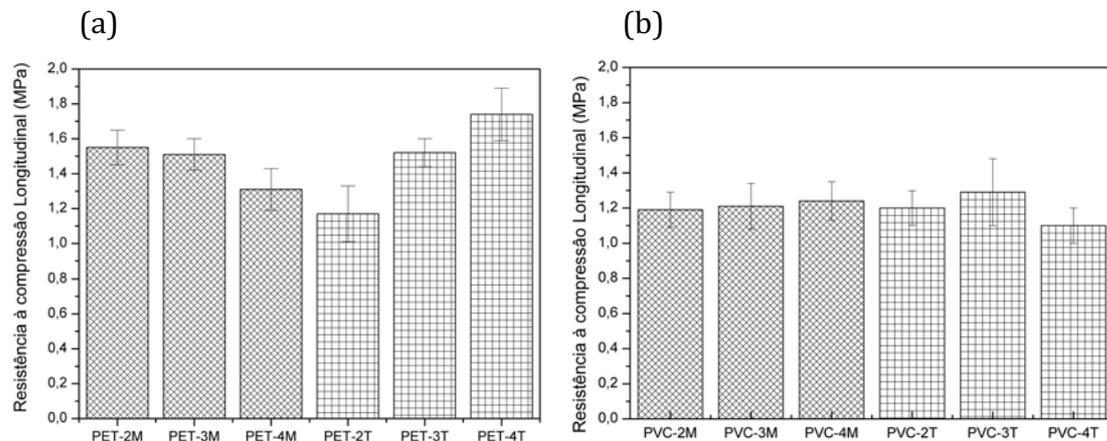


Figura 60- Valores de resistência à compressão longitudinal para os sistemas: (a) PET, (b) PVC.

A resistência à compressão é uma propriedade importante no que diz respeito ao sanduíche resistir a pressões antes de falhar (por esmagamento). O esmagamento do sanduíche cria uma região com alto potencial de falha no material quando este estiver sofrendo flexão ou compressão longitudinal. A Tabela 7 mostra os valores das forças máximas suportadas pelos compósitos. Onde os maiores valores de resistência são para as amostras PET, onde o maior é a amostra PET-2T, já amostras com núcleo de PVC apresentaram valores menores, onde o maior é PVC-3T. Estes valores podem ser utilizados para projetos de estruturas sanduíche.

Tabela 7- Valores máximos das forças suportadas pelas estruturas sanduíche.

Sistema	PET-2M	PET-3M	PET-4M	PET-2T	PET-3T	PET-4T
Força máxima (N)	1255	1209	1130	1308	1003	1235
Sistema	PVC-2M	PVC-3M	PVC-4M	PVC-2T	PVC-3T	PVC-4T
Força máxima (N)	718	784	807	840	993	752

Os valores da resistência à compressão transversal das estruturas sanduíche estão mostradas na Figura 61. Como pode-se notar, existe uma forte influência da resistência da face nesta propriedade, sendo que os maiores valores são para as amostras PET-4M e PET-4T (Figura 61-a) e PVC-4T (Figura 61-b), pois possuem valores maiores de $\%V_f$. O volume elevado de fibras nas faces, torna as mesmas mais resistentes a flambagem, e com isso aumenta a resistência no sentido onde a força é aplicada. Normalmente as faces com tecido resistem mais à compressão antes de falhar, pois os tecidos possuem orientação longitudinal, aumentando a resistência neste sentido, mesmo que não foi notado muita diferença entre a manta e o tecido.

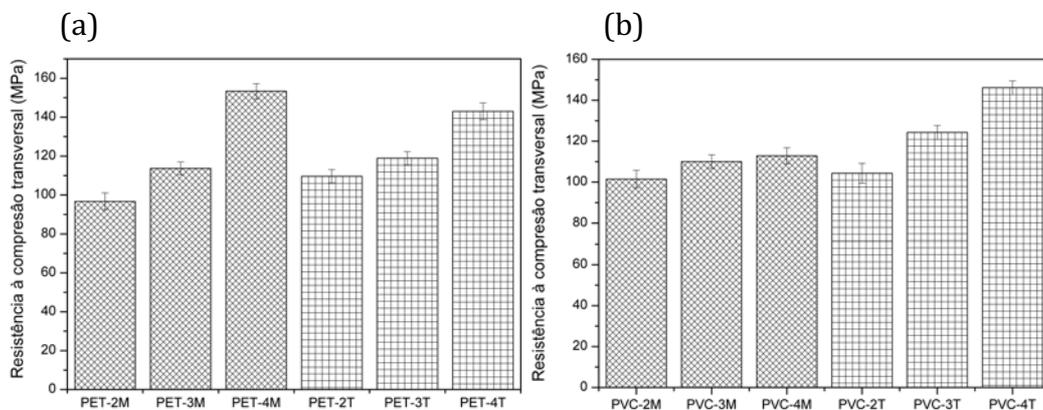


Figura 61 - Valores de resistência à compressão transversal para os sistemas: (a) PET, (b) PVC.

Na Figura 62, vê-se alguns tipos de falhas notados nas amostras. Na Figura 62-a, uma amostra de PVC-3T sofreu uma falha na face esquerda e logo após uma pequena flambagem, sem que houvesse falha no núcleo. Já na amostra de PVC-4T, mostrada na Figura 62-b, a falha de cisalhamento ocorreu no núcleo e depois nas faces, também aceitável para este ensaio. Outra situação comum foi a flambagem sem uma falha visível, como é mostrado na Figura 62-c. Neste caso, não foi observada delaminação das faces. Como pode ser visto na literatura (YANG, 2008), isto comprova uma boa adesão entre as faces e o núcleo.

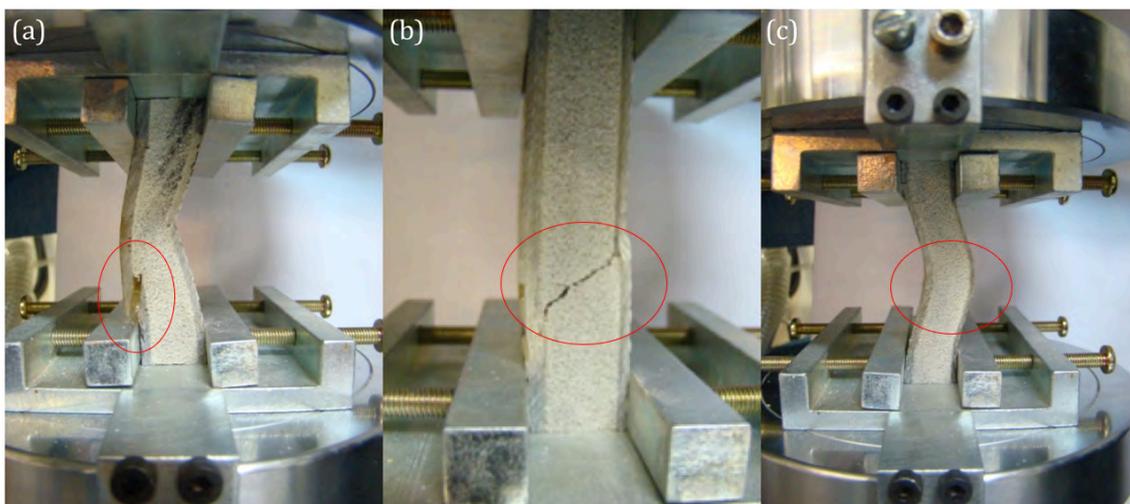


Figura 62 - Ruptura apresentada pela amostra PVC-3T (a), PVC-4T (b) e PVC-4T.

5.5.3. Flexão em 3 pontos

Uma estrutura sanduíche sob carregamento em flexão em 3 pontos pode ser comparado a uma viga em forma de I, em que as faces atuam como a flange e os materiais do núcleo atuam como a alma de cisalhamento de vigas. A face superior sofre compressão e a face inferior sofre tração enquanto o núcleo deve apresentar resistência ao cisalhamento e rigidez.

A Eq. 17 foi utilizada para calcular a tensão máxima de cisalhamento no núcleo, sendo que os valores estão apresentados na Figura 63-a. Como as espessuras das faces variaram, mesmo que pouco, não é possível fazer uma comparação direta entre a influência das faces nesta propriedade. Também não houve influência significativa do tipo de reforço (manta ou tecido) e do $\%V_f$ nas faces nos resultados, mesmo que com valores elevados de fibras nas faces, limitem a flexão. Para os sanduíches com núcleo de PVC (Figura 63-b), os resultados foram similares. Mas em comparação aos sanduíches com núcleo o PVC, a resistência ao cisalhamento do PET foi maior, sendo esta uma propriedade importante para aplicações estruturais, pois falhas no núcleo prejudicam o desempenho da estrutura.

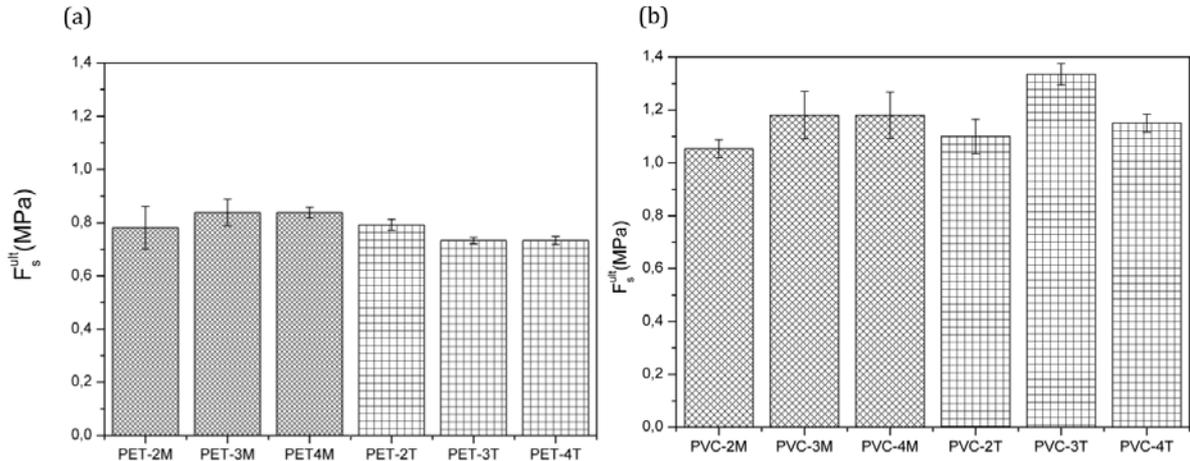


Figura 63 - Resistência máxima ao cisalhamento no núcleo com: PET (a), PVC (b).

Os dois principais modos de falha observados neste trabalho estão apresentados na Figura 64. Na Figura 64-a é possível ver a falha por cisalhamento do núcleo antes de ocorrer a flambagem, pois a face é muito rígida e não deforma o suficiente. Para o mesmo caso, ocorreu a falha paralela à face inferior, não caracterizando uma delaminação entre face/núcleo, pois o núcleo continua aderido a face inferior. Para o caso da Figura 64-b, a face possui um $\%V_f$ baixo tornando possível a deformação do sanduíche suficiente para ocorrer a falha na face. Também é importante notar que não ocorreu esmagamento da superfície em contato com os pontos de carregamento durante os ensaios. Neste caso não ocorreu falha no núcleo e delaminação nas faces.

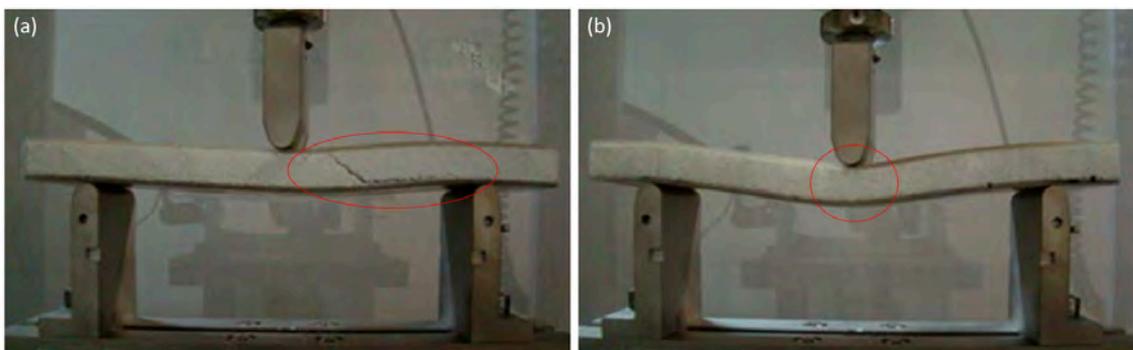


Figura 64 – Modo de falha da estrutura sanduíche submetida à flexão em 3 pontos: (a) PET-4M - cisalhamento no núcleo, (b) PET-2M - flambagem.

A resistência à tensão nas faces foi medida utilizando a Eq. 17 e os resultados estão compilados na Figura 65. Conforme esperado, o $\%V_f$ e o tipo de reforço utilizado, manta ou tecido, influenciaram diretamente esta propriedade, de modo que, quanto maior o $\%V_f$, maior a resistência à flexão. Sendo que os valores são maiores para manta do que para tecido.

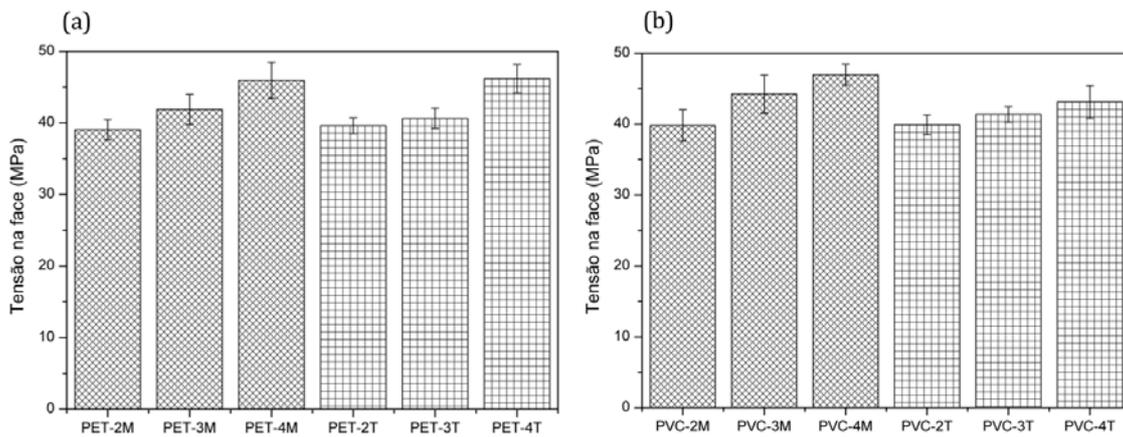


Figura 65 - Resistência máxima a tensão nas faces (a) PET e (b) PVC.

Em alguns casos, como para PET-3T e PET-4T, foi observada uma variação significativa nas espessuras das faces e isso afeta diretamente estas propriedades, pois com espessuras maiores as faces ficam com $\%V_f$ menores, resistindo menos à flexão. É também possível observar a pouca influência do tipo de núcleo na flexão, pois a fratura ocorre sempre primeiro nas faces e depois nos núcleos.

5.5.4. Tração nas faces e cisalhamento no núcleo

O objetivo do ensaio de resistência à tração nas faces foi verificar a qualidade da adesão entre as faces e os núcleos e também comparar os núcleos PVC e PET. A carga máxima suportada pelo PVC foi de 3743 N (± 09) e a do PET 2998 N (± 13), em torno de 20 % menor. Utilizando a Eq. 19, o valor calculado de para o PVC foi de 1,50 MPa ($\pm 0,08$) e para o PET de 1,20 MPa ($\pm 0,06$). A resistência à tração do núcleo de PET também foi ≈ 20 % menor que o de PVC.

Conforme pode ser visto na Figura 66-a, a falha aconteceu inteiramente no núcleo e não na interface núcleo/face, o que mostra uma boa adesão entre estes, ou seja, a tensão necessária para romper o núcleo é menor que para delaminar as faces.

Já para o núcleo de PVC aconteceu uma falha limitada do núcleo (Figura 66-b), diferentemente do PET, juntamente com falha nas faces/núcleo.

Para o ensaio de cisalhamento no núcleo, as duas faces devem ser coladas nos suportes, como pode ser visto na Figura 67, e as faces são forçadas na mesma direção e intensidade mas com sentidos opostos, produzindo assim o cisalhamento do núcleo. Nesta figura, é possível verificar que o PVC teve falha paralela ao longo das faces e também no ângulo de 45°. Já para o sanduíche com núcleo de PET, ocorreu falha no núcleo característica de cisalhamento, com um ângulo de 45°. Em ambos os casos, não ocorreu delaminação das faces com o núcleo, um resultado positivo muito importante.

Para o núcleo de PET, considerando que $L = 270$ mm, $b = 50$ mm e $P = 10398,8$ N e utilizando a Eq. 21, obteve-se resistência ao cisalhamento no núcleo instantânea de 0,77 MPa ($\pm 0,10$) e resistência ao cisalhamento de engenharia de 0,24 MPa ($\pm 0,13$) (para $u = 3,84$ mm e $t = 16$ mm). Já para o PVC, a carga máxima foi de 12101,3 N, a resistência ao cisalhamento de 0,90 MPa ($\pm 0,08$) e a resistência ao cisalhamento de engenharia de 0,31 (MPa) ($\pm 0,17$).

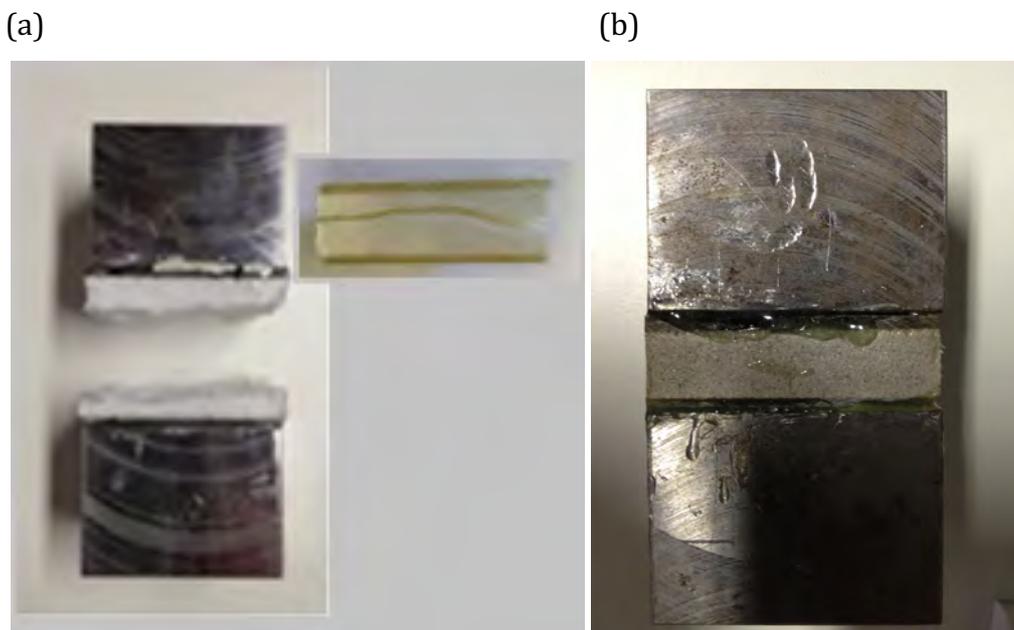


Figura 66- Compósitos com núcleo de PET (a) e PVC (b) ensaiados em tração.

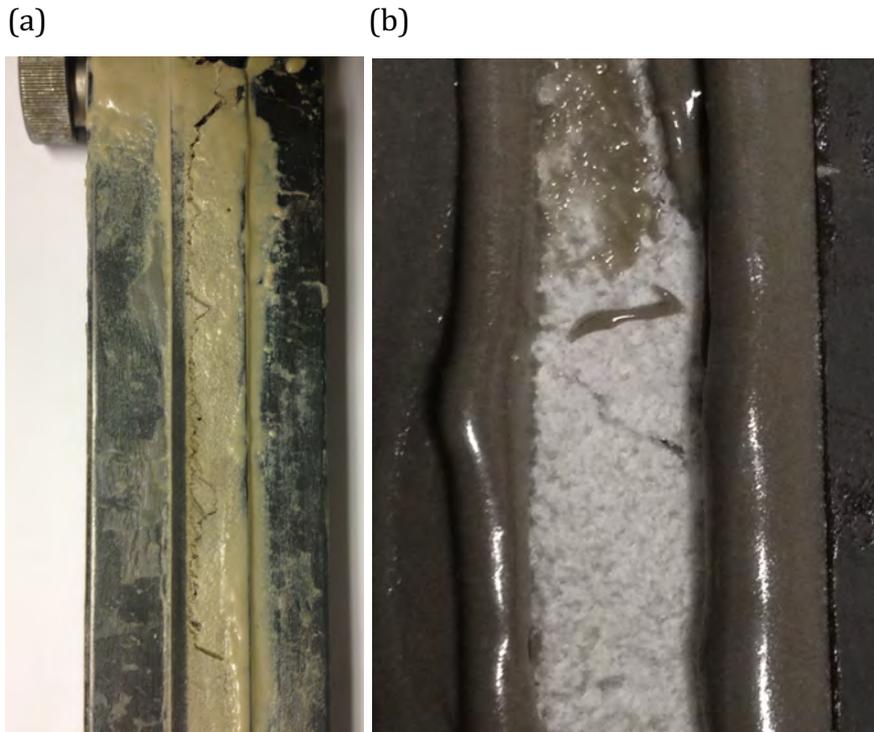


Figura 67- Compósito com núcleo de PVC (a) e PET (b) ensaiados em cisalhamento.

5.5.5. Impacto em baixa velocidade

Nos ensaios de impacto em baixa velocidade, vários fatores como a configuração do empilhamento das camadas de reforço, espessura das faces, volume de fibras nas faces, tamanho do pêndulo e forma, as propriedades constituintes: temperatura, velocidade e energia de impacto, podem afetar a resposta e o padrão do dano. Neste trabalho, primeiramente foram ensaiados os núcleos de PET e PVC, sem as faces e é sempre importante comentar, que o núcleo só vai sofrer este impacto, após o rompimento da face impactada. Conforme pode ser visto na Figura 68-a e b, o PET resistiu mais que o PVC na condição onde o dardo foi solto a uma altura de 0,5 m (22 J). O PET mostrou trincas pouco visíveis, já o PVC apresentou um dano maior. É importante destacar que o núcleo só sofreria este tipo de impacto, se o dardo rompesse a face superior da estrutura sanduíche e penetrasse no núcleo.

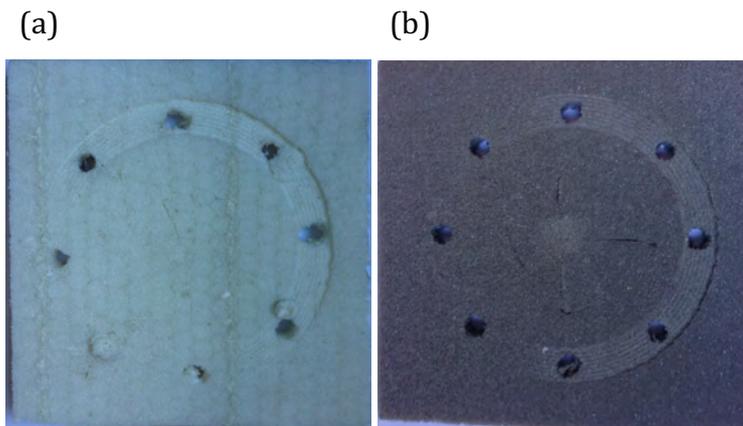


Figura 68 - Núcleo após o ensaio de impacto para dardo solto a 0,5 m (22 J): (a) PET, (b) PVC.

Na Figura 69, é possível ver as curvas de força \times tempo \times energia para os ensaios dos núcleos citados acima. De fato, o núcleo de PET suportou mais ao impacto que o PVC, pois o pico de força foi $\approx 4,5$ kN contra $\approx 4,0$ kN. É possível observar no eixo da direita que o núcleo de PET absorveu menos energia após o impacto do dardo, pois a energia residual chega ≈ 5000 kJ, enquanto o PVC absorveu mais o impacto e a energia residual é de ≈ 2400 kJ.

Para a condição onde o dardo é solto a 1,0 m de altura (equivalente a 44 J), os danos são maiores. Como pode ser visto na Figura 70, ambos os núcleos sofrem ruptura completa e, no caso do PET, houve descolamento parcialmente. Foi possível observar que o núcleo de PET resistiu mais ao impacto, mas teve uma falha com característica mais frágil. Nas curvas da Figura 71, vê-se que os valores máximos das forças são maiores, como esperado. O pico de força para o PET é $\approx 5,5$ kN já para o PVC é $\approx 5,8$ kN. A energia absorvida pelo núcleo de PET foi menor que pelo PVC.

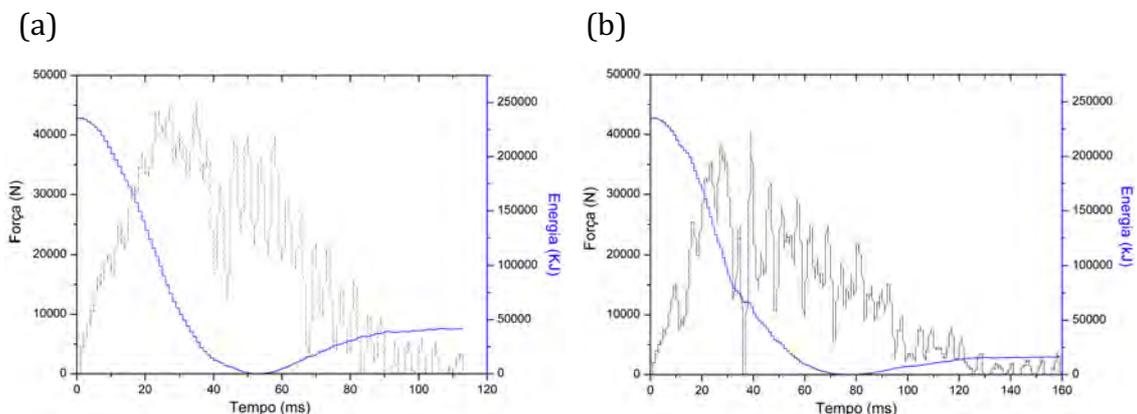


Figura 69- Resultados do ensaio de impacto (com 22 J) para os núcleos: (a) PET, (b) PVC.

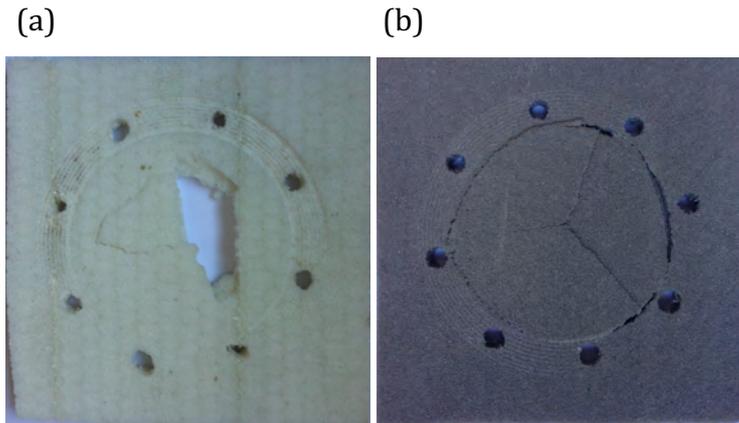


Figura 70- Núcleo após o ensaio de impacto para dardo solto a 1,0 m (44 J): (a) PET, (b) PVC.

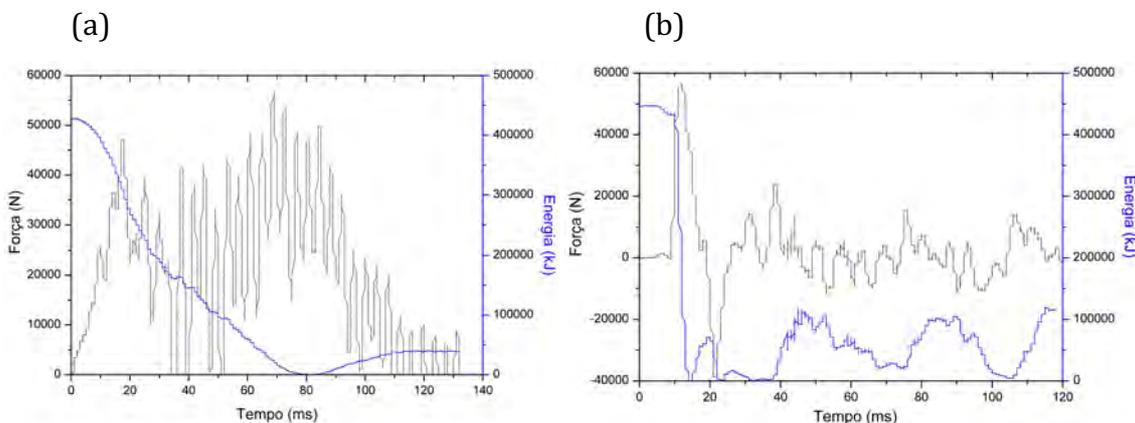


Figura 71 - Resultados do ensaio de impacto (com 44 J) para os núcleos: (a) PET, (b) PVC.

Os ensaios realizados com as estruturas sanduíche, faces + núcleo, estão discutidos abaixo e nas imagens pode-se observar o aspecto da face superior, onde o dardo impactou o sanduíche, da face inferior e do corte transversal no local impactado. Dois casos são apresentados, após impacto com dardo a 0,5 m (22 J) e 1,0 m (44 J).

Na Figura 72 o compósito PET-2M foi impactado. O $\%V_f$ das faces deste material é de 13,23 %, um valor muito baixo para compósitos estruturais. Conforme pode ser visto, para 22 J o dano na face superior é mínimo, e não há dano na face inferior ou no núcleo. Já para 44 J, uma energia maior, o impacto danificou as faces superiores, inferiores e o núcleo.

Nos gráficos de força \times tempo \times energia para o caso onde a energia de impacto é menor (22 J), como a face não sofreu dano, conclui-se que ela absorveu muito da energia do impacto, o que é comprovado na Figura 73-a, pois o dardo não

ricocheteia. Já no caso Figura 73-b, com uma energia de impacto maior, as faces e o núcleo sofreram um maior dano, e como a energia é maior, o dardo ricocheteia. Como as faces são reforçadas com manta de vidro, espera-se uma distribuição homogênea da energia.

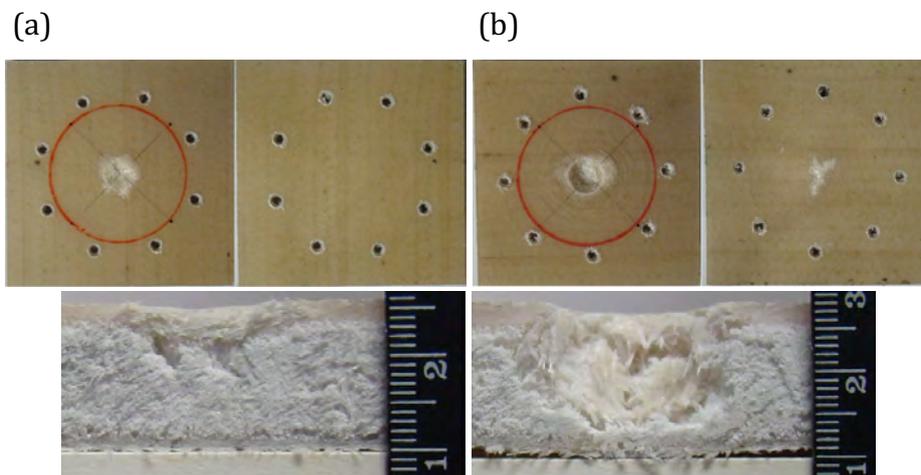


Figura 72 - Imagem superior, inferior e corte transversal para o PET-2M após impacto a: (a) 22 J, (b) 44 J.

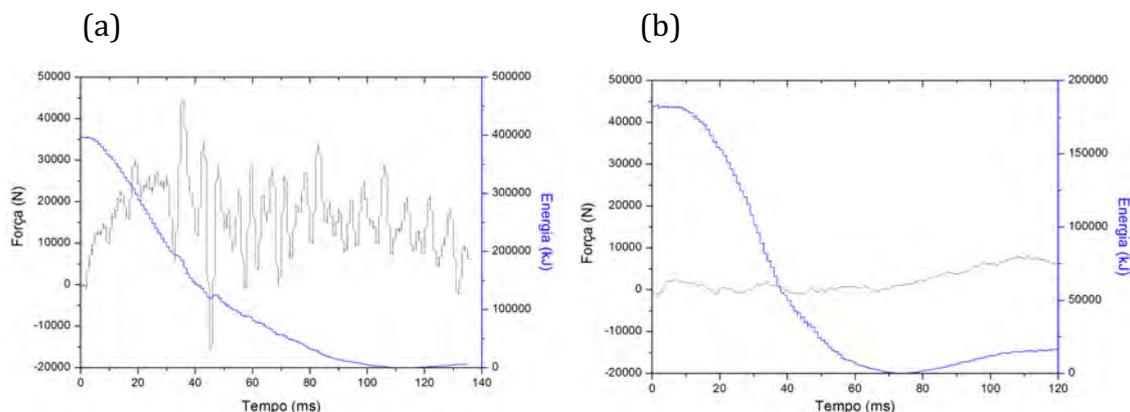


Figura 73 - Resultados do ensaio de impacto para o PET-2M para: (a) 22 J e (b) 44 J.

No ensaio realizado no compósito PET-2T, onde o $\%V_f$ é de 12,89 %, os danos são maiores para 22 J ou 44 J (Figura 74-a e b), pois o $\%V_f$ sendo menor a resistência ao impacto é menor. Nota-se a perfuração total da face superior, chegando até a inferior, assim, esse sanduíche estaria comprometido para qualquer utilização. Em ambos os casos, os dardos ricochetearam.

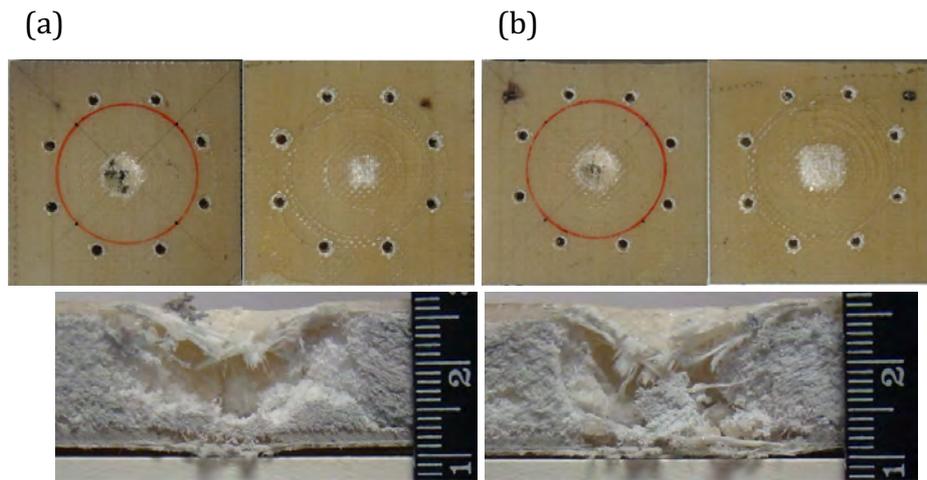


Figura 74 - Imagem superior, inferior e corte transversal para o PET-2T após impacto a: (a) 22 J, (b) 44 J.

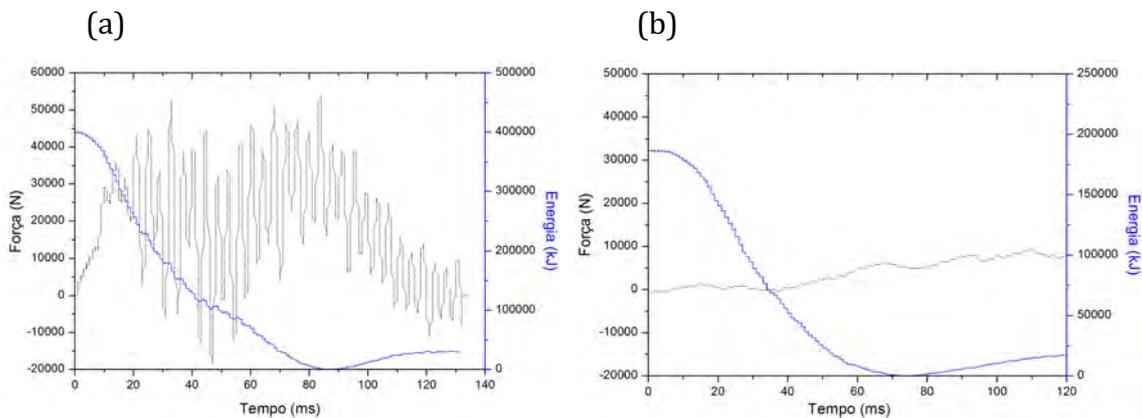


Figura 75 - Resultados do ensaio de impacto para o PET-2T para: (a) 22 J e (b) 44 J.

Já para as amostras de PET-3M, que possuem $\%V_f$ de 13,96 %, um pouco maior que para a amostra PET-2M, o dano pós-impacto é muito similar, pois o volume de fibra nas faces é similar, então a resistência ao impacto deve ser similar. Já o pós-impacto como o esperado é diferente para os dois casos, no caso II, o dardo ricocheteia com mais intensidade, então a energia residual é maior, Figura 77.

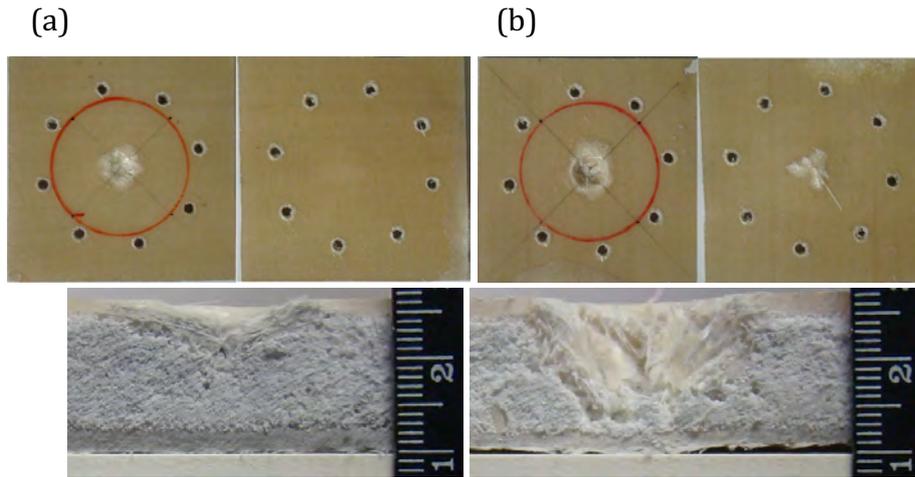


Figura 76 - Imagem superior, inferior e corte transversal para o PET-3M após impacto a: (a) 22 J, (b) 44 J.

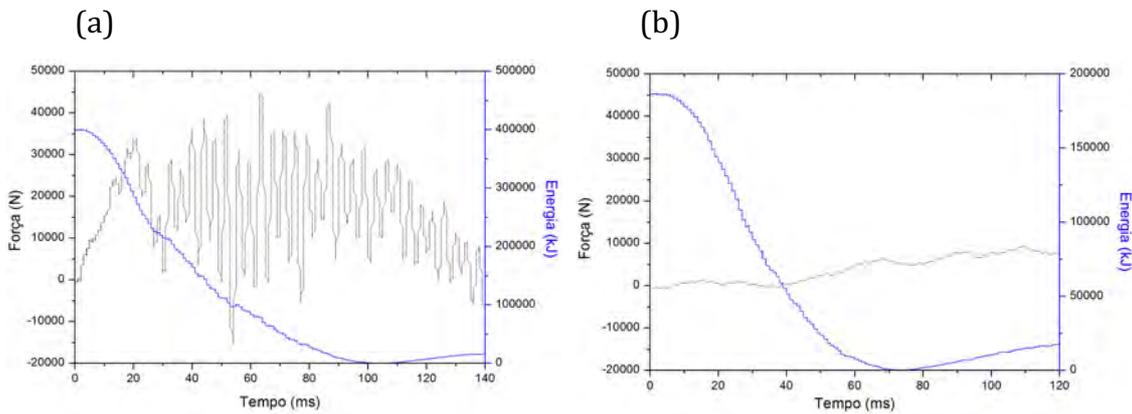


Figura 77 - Resultados do ensaio de impacto para o PET-3M para: (a) 22 J e (b) 44 J.

Na Figura 78-a, amostra PET-3T possui um $\%V_f$ de 13,47, e para 22 J o dano foi somente na face superior enquanto para 44 J, o dano chegou na face inferior. Esta estrutura sanduíche com 3 camadas de tecido, ainda não suporta o dano causado pelo dardo em ambos os casos. Também para estas amostras, para 44 J a energia residual é maior que no caso I, conforme pode ser visto na Figura 79.

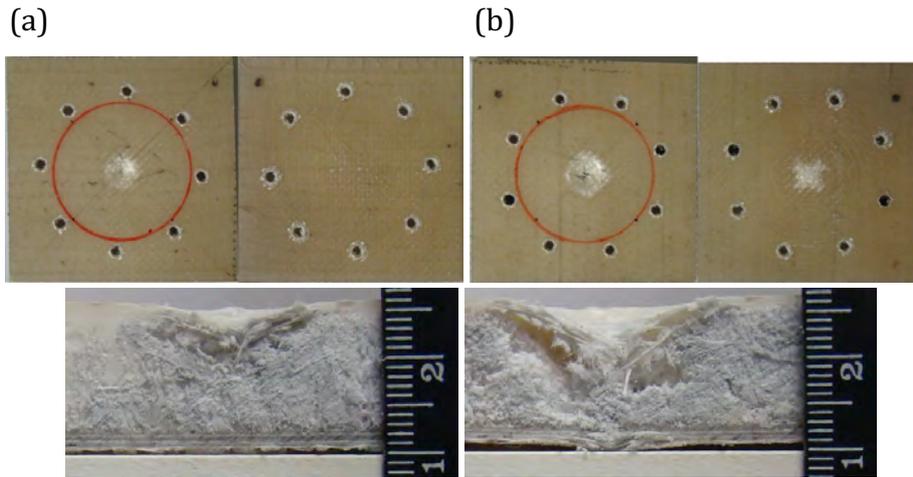


Figura 78 - Imagem superior, inferior e corte transversal para o PET-3T após impacto a: (a) 22 J, (b) 44 J.

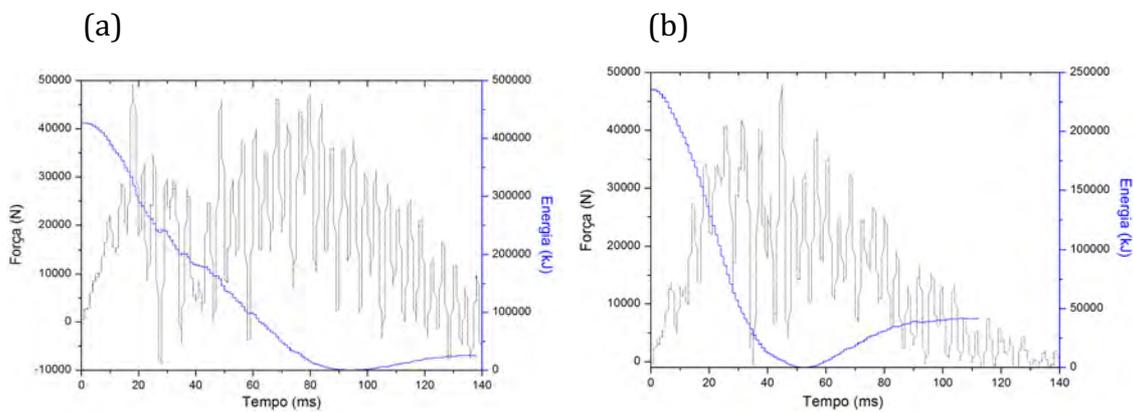


Figura 79- Resultados do ensaio de impacto para o PET-3T para: (a) 22 J e (b) 44 J.

Já para as amostras PET-4M e PET-4T (Figura 80, 81, 82 e 83), com $\%V_f$ de 15,69 e 13,80, respectivamente, o dano a 22 J é mínimo, e não causa rompimento da face superior, com apenas um pequeno esmagamento do núcleo. Já a 44 J, o dano é crítico em ambas as faces. No caso da amostra PET-4T (a 44 J), como a face tem um $\%V_f$ elevado, esta resiste mais ao impacto antes de romper, assim levando ao esmagamento do núcleo.

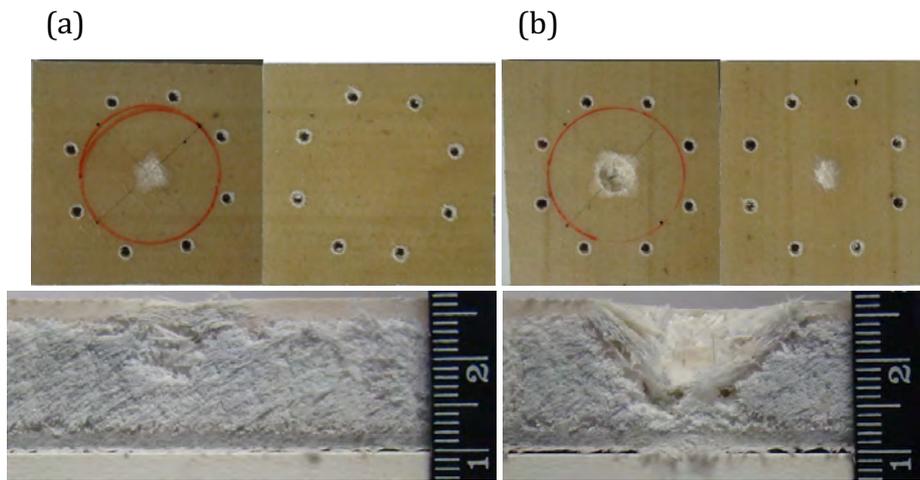


Figura 80- Imagem superior, inferior e corte transversal para o PET-4M após impacto a: (a) 22 J, (b) 44 J.

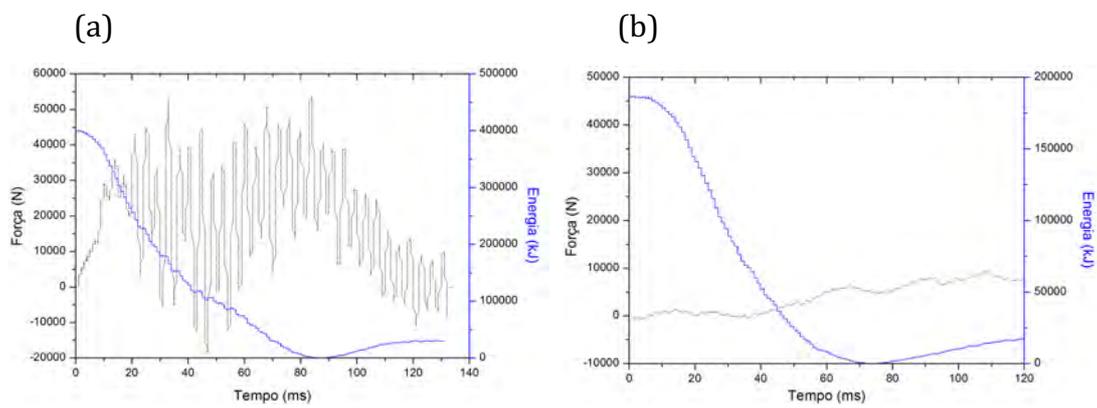


Figura 81- Resultados do ensaio de impacto para o PET-4M para: (a) 22 J e (b) 44 J.

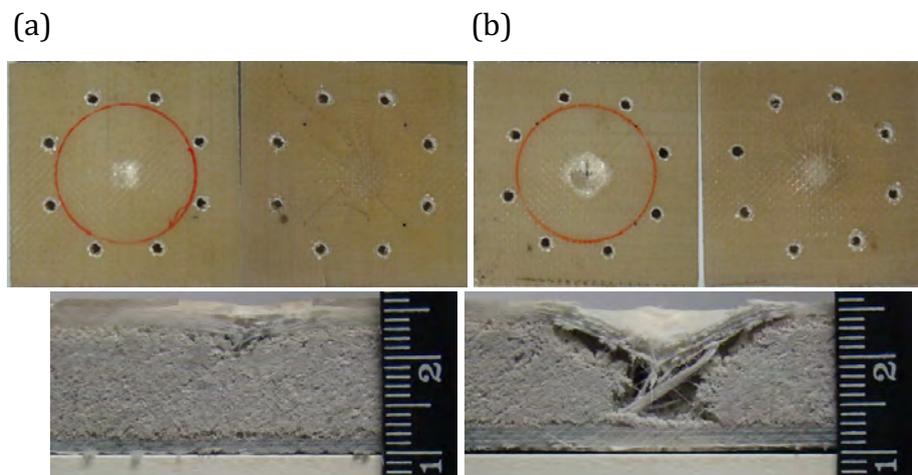


Figura 82 - Imagem superior, inferior e corte transversal para o PET-4T após impacto a: (a) 22 J, (b) 44 J.

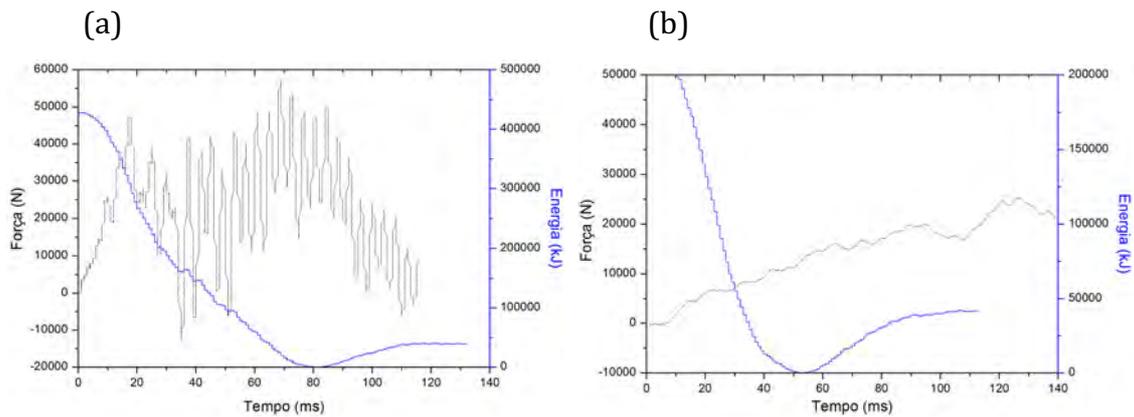


Figura 83 - Resultados do ensaio de impacto para o PET-4T para: (a) 22 J e (b) 44 J.

Na Tabela 8, os valores da velocidade no momento que o dardo impacta a face superior (incidente), após o primeiro impacto o dardo sobe e impacta novamente na face (residual), para as diferentes alturas (0,5 e 1,0 m). A velocidade incidente é igual para todas as amostras, mas a velocidade residual varia com a altura e com o comportamento da amostra em absorver a energia de impacto. Pode-se notar que para os ensaios onde a altura é maior a velocidade residual é maior, mesmo que o material sofra mais dano que para uma altura menor.

Também são mostrados na Tabela 8 os valores de diâmetro de delaminação observados, conforme marcação realizada após o ensaio ao redor da área danificada. Conforme apresentado na Figura 84, vê-se um círculo demarcando a área na qual a energia de impacto se propagou a partir do ponto de impacto e ocasionou a delaminação da face no núcleo. Como é esperado, quanto maior a altura que o dardo é solto, maior são os danos nas estruturas sanduíche e maior o diâmetro de delaminação, podemos variar um para outro, possivelmente por defeitos internos do material. Não são todos os casos em que o dano ocorre na superfície inferior e quando ocorre o raio de delaminação é mínimo, mostrando o papel do núcleo que também é de absorver o impacto.

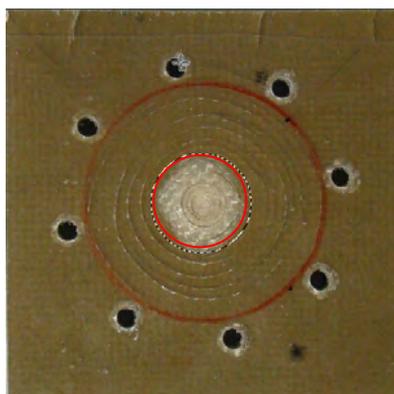


Figura 84 - Amostra PVC-4T impactada, com círculo de delaminação.

Tabela 8- Velocidade incidente e residual e diâmetro de delaminação para sanduíches com PET.

Amostra	Altura (m)	Velocidade incidente (m/s)	Velocidade residual (m/s)	Diâmetro de delaminação (m)	
				Face superior	Face inferior
PET 2T	0,5	-2,77	0,82	2,10	1,81
PET 2T	1,0	-4,17	0,98	2,41	2,52
PET 3T	0,5	-2,80	0,89	1,75	0
PET 3T	1,0	-4,17	1,11	2,32	2,13
PET 4T	0,5	-2,77	0,97	1,57	0
PET 4T	1,0	-4,18	1,30	2,33	2,16
PET 2M	0,5	-2,80	0,60	2,14	0
PET 2M	1,0	-4,15	0,65	2,62	2,11
PET 3M	0,5	-2,80	0,83	2,25	0
PET 3M	1,0	-4,17	0,95	2,62	2,09
PET 4M	0,5	-2,80	1,01	1,74	2,40
PET 4M	1,0	-4,17	1,16	2,40	1,72

Com relação as estruturas sanduíches com núcleo de PVC, conforme mostrado na Tabela 4, os valores de $\%V_f$ para as faces destas estruturas são menores, assim é esperado que as estruturas suportem menos ao impacto. Pode ser visto na Figura 85 que a 22 J os danos foram similares ao PET, mas a 44 J o dano foi crítico, já que na parte inferior da amostra ocorreu uma delaminação da face. Isso pode ter ocorrido devido à adesão não muito boa entre face/núcleo. Para a amostra PVC-2T (Figura 87) que possui um $\%V_f$ de 10,67%, inferior ao da amostra PVC-2M, os danos foram maiores, já a 22 J o dardo danificou a parte inferior da amostra.

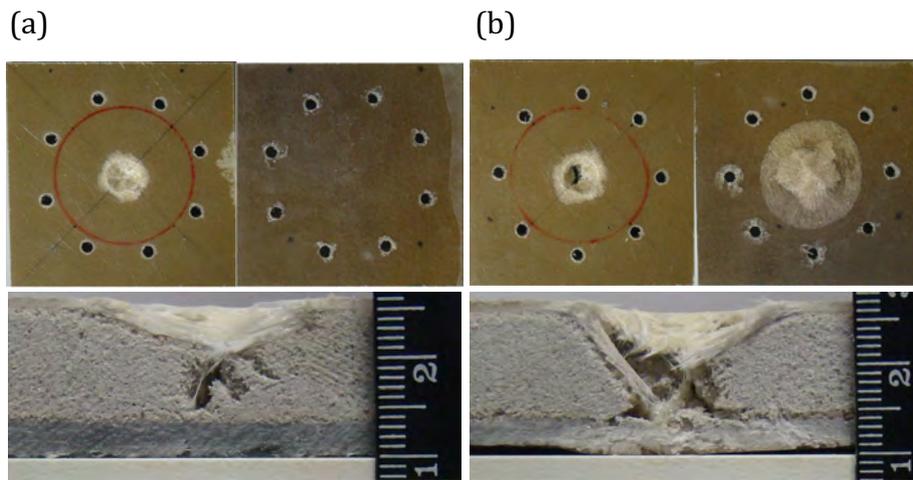


Figura 85- Imagem superior, inferior e corte transversal para o PVC-2M após impacto a: (a) 22 J, (b) 44 J.

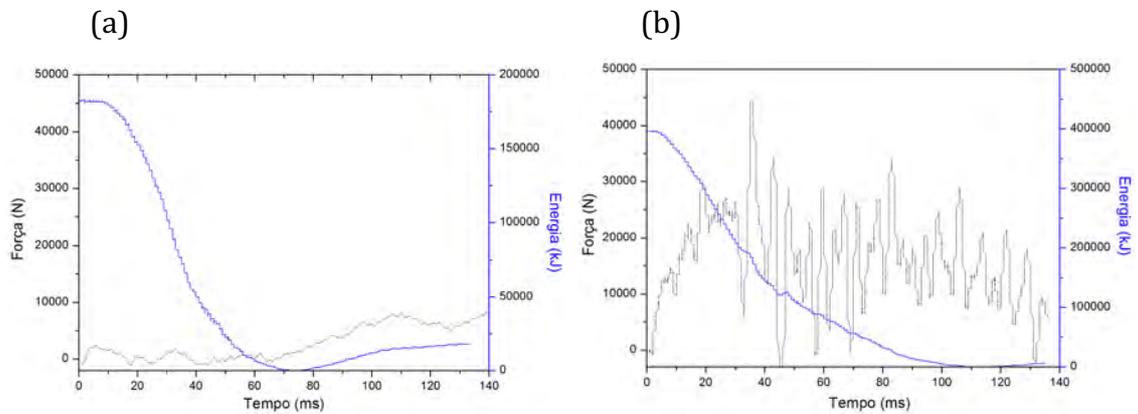


Figura 86 - Resultados do ensaio de impacto para o PVC-2M para: (a) 22 J e (b) 44 J.

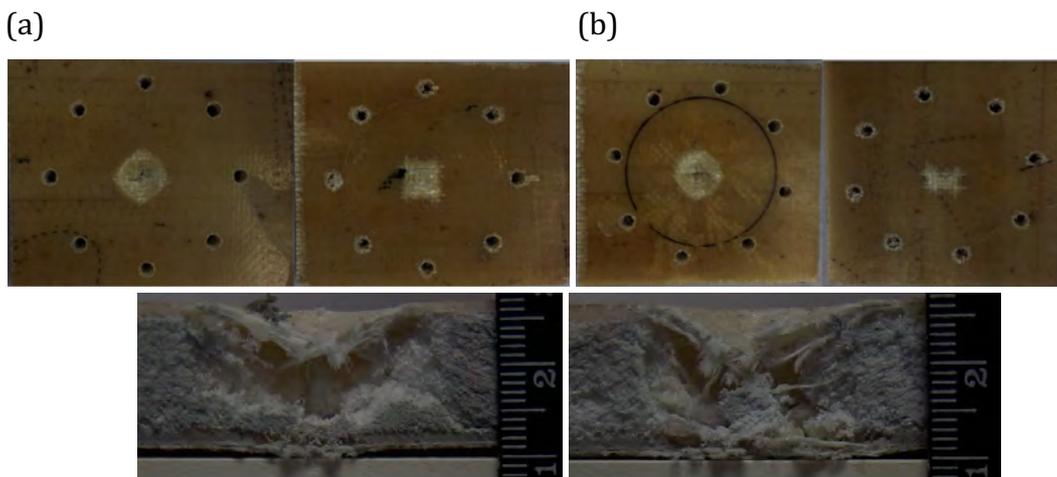


Figura 87 - Imagem superior, inferior e corte transversal para o PVC-2T após impacto a: (a) 22 J, (b) 44 J.

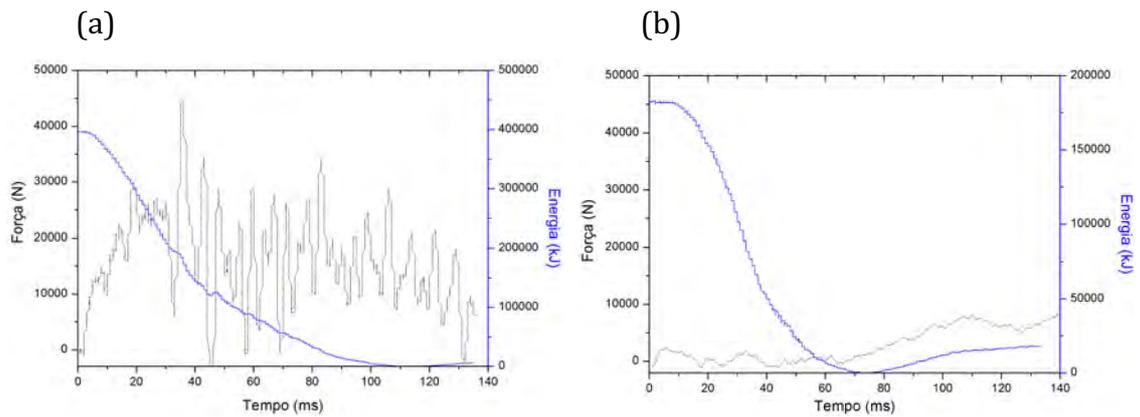


Figura 88 - Resultados do ensaio de impacto para o PVC-2T para: (a) 22 J e (b) 44 J.

Em geral, para as outras amostras estudadas, os danos foram bem maiores que para as amostras com PET, isso devido aos menores valores de $\%V_f$ das faces em relação às amostras com PVC. É possível notar que as faces inferiores sofreram uma delaminação ao redor do ponto central, isso ratifica os resultados de resistência à tração das faces.

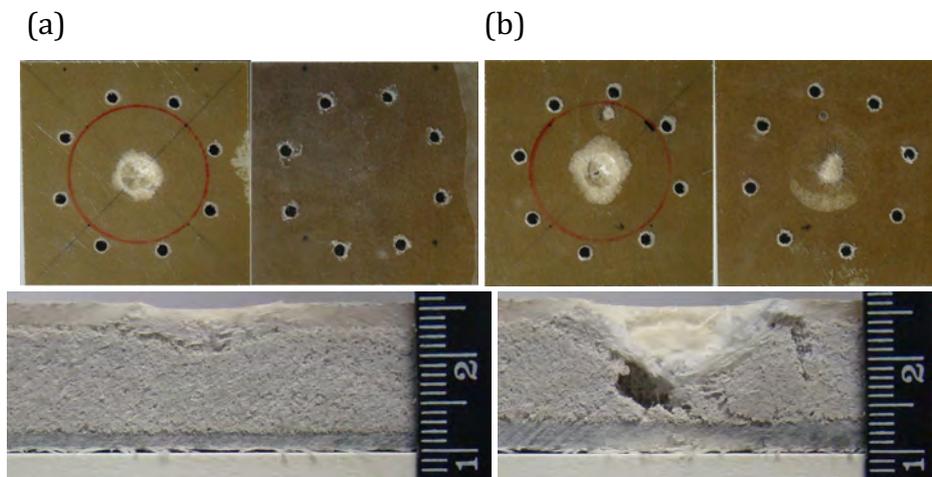


Figura 89- Imagem superior, inferior e corte transversal para o PVC-3M após impacto a: (a) 22 J e (b) 44 J.

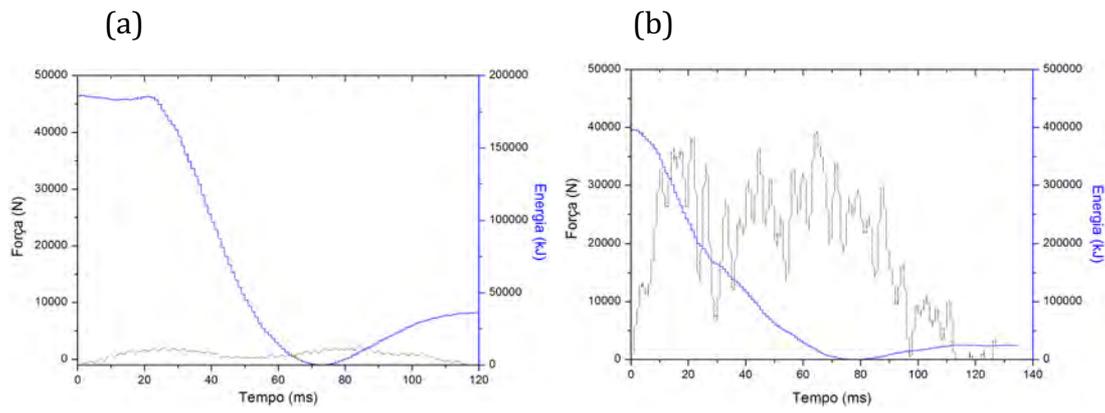


Figura 90- Resultados do ensaio de impacto para o PVC-3M para: (a) 22 J e (b) 44 J

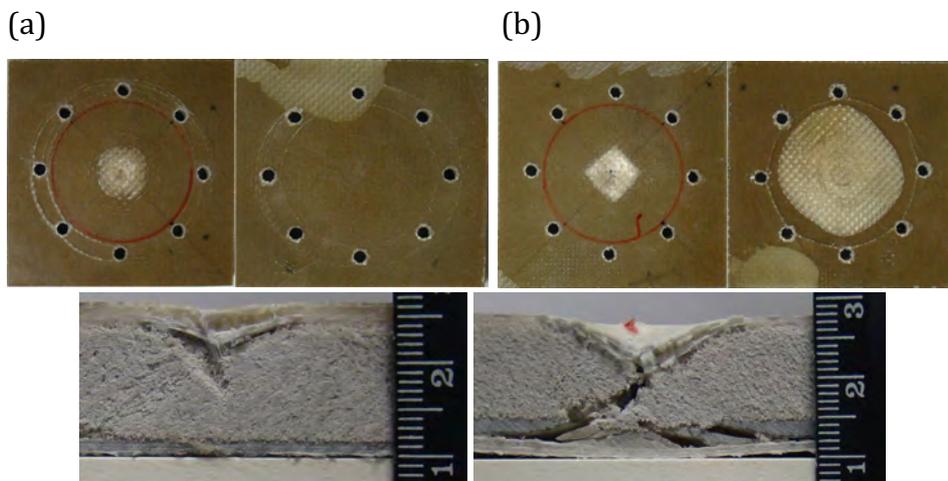


Figura 91- Imagem superior, inferior e corte transversal para o PVC-3T após impacto a: (a) 22 J, (b) 44 J.

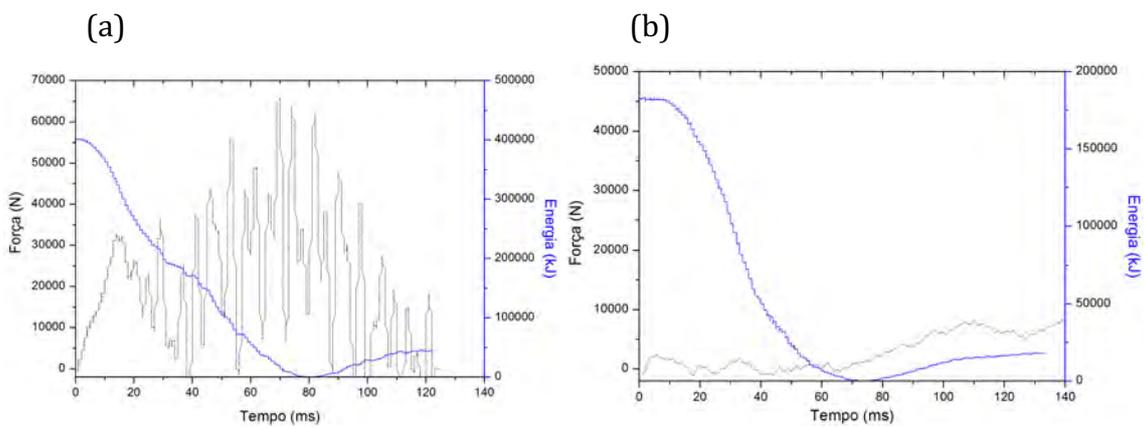


Figura 92 - Resultados do ensaio de impacto para o PVC-3T para: (a) 22 J e (b) 44 J.

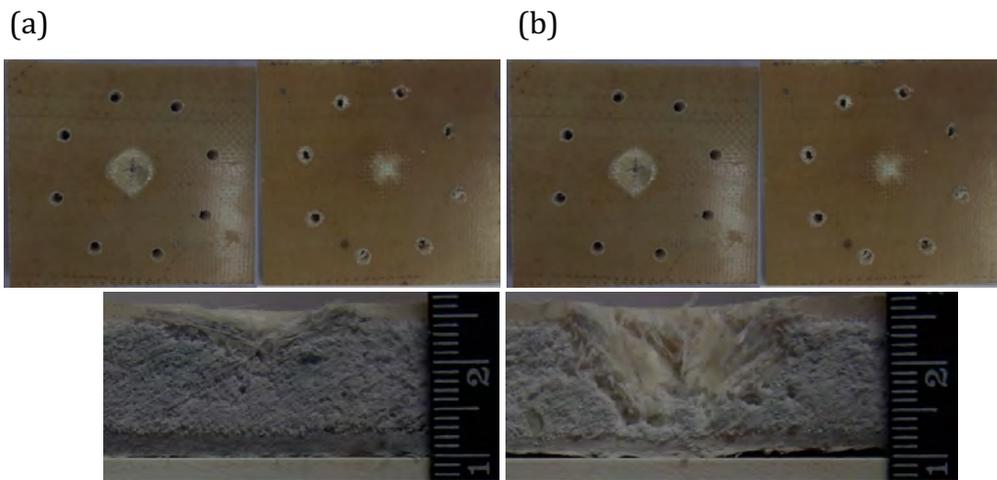


Figura 93 - Imagem superior, inferior e corte transversal para o PVC-4M após impacto a: (a) 22 J, (b) 44 J.

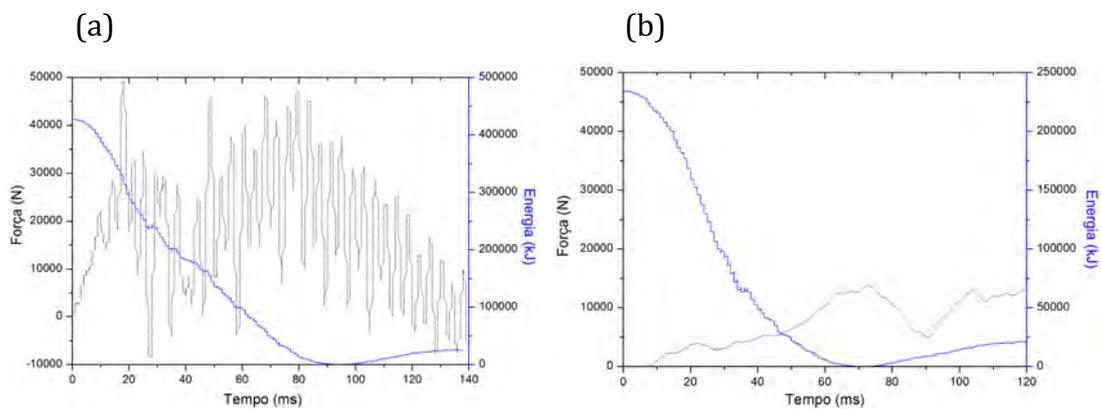


Figura 94 - Resultados do ensaio de impacto para o PVC-4M para: (a) 22 J e (b) 44 J.

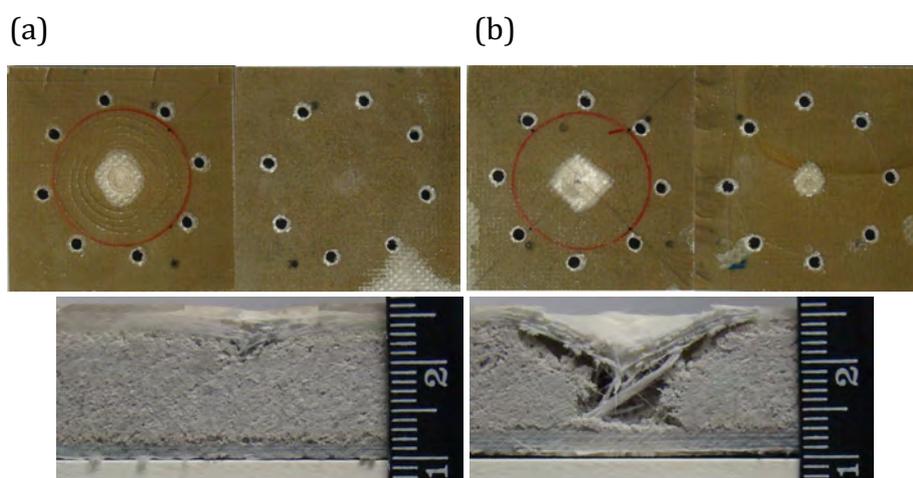


Figura 95 - Imagem superior, inferior e corte transversal para o PVC-4T após impacto a: (a) 22 J, (b) 44 J.

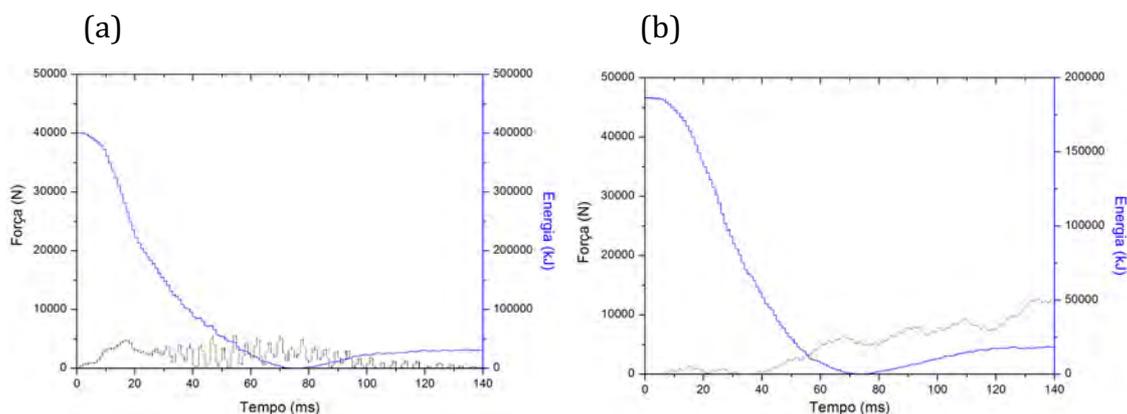


Figura 96 - Resultados do ensaio de impacto para o PVC-4T para: (a) 22 J e (b) 44 J.

Também são mostrados na Tabela 9 os valores de diâmetro de delaminação observados, conforme marcação realizada após o ensaio ao redor da área danificada. Conforme pode ser visto nos valores abaixo, as velocidades residual apresentaram valores maiores que os de PET, pois possivelmente estas estruturas absorveram menos ao impacto, refletindo maiores velocidades residuais e também diâmetros maiores de delaminação consequentemente, por exemplo no PVC-3T, com um diâmetro de 5,77 cm.

Tabela 9- Velocidade incidente e residual e diâmetro de delaminação para sanduíches com PVC.

Amostras	Altura (m)	Velocidade incidente (m/s)	Velocidade residual (m/s)	Diâmetro de delaminação (cm)	
				Face superior	Face inferior
PVC-2T	0,5	-2,80	---	2,11	1,79
PVC-2T	1,0	-4,17	---	2,45	1,35
PVC-3T	0,5	-2,80	1,25	2,07	0
PVC-3T	1,0	-4,17	1,43	2,53	5,77
PVC-4T	0,5	-2,77	0,67	2,57	0
PVC-4T	1,0	-4,18	0,74	2,85	1,49
PVC-2M	0,5	-2,84	1,27	2,16	0
PVC-2M	1,0	-4,15	1,04	2,82	4,74
PVC-3M	0,5	-2,73	1,50	2,06	0
PVC-3M	1,0	-4,17	1,37	3,02	3,65
PVC-4M	0,5	-2,80	1,54	2,41	1,23
PVC-4M	1,0	-4,17	1,41	2,65	1,30

6. CONCLUSÕES

Considerando o que foi apresentado referente às estruturas sanduíche, como os diferentes tipos de núcleos, os diferentes tipos de reforços, os processos de manufatura utilizados e as propriedades mecânicas analisadas e a modelagem numérica do RTM *Light*, esta tese ganha relevância e apresenta muitas características originais.

O conceito básico deste tipo de compósito é importante, pois para a seleção de um núcleo é fundamental levar em conta que este material tenha uma baixa densidade e uma alta resistência ao cisalhamento, entre outras propriedades. Os núcleos utilizados foram os sintéticos de PVC e PET, pois os naturais como madeira balsa possuem uma densidade alta e absorvem muita umidade. O núcleo de PVC mostrou-se melhor na propriedade de resistência ao cisalhamento do núcleo que é uma propriedade muito importante para este tipo de compósito. Já para outras propriedades como resistência a compressão longitudinal, os resultados são similares para ambos os núcleos, o mesmo foi verificado para o impacto, sendo que o PET mostrou-se levemente melhor.

Também na escolha da resina é importante saber em que ambiente o compósito irá trabalhar. Neste caso, o ambiente é marinho, então a resina éster vinílica foi escolhida. A viscosidade se mostrou adequada para o tipo do processo, sendo viável utiliza-la em uma faixa ampla de temperatura. Quanto a propriedades viscoelásticas, também apresentaram resultado satisfatórios.

Quanto às propriedades mecânicas mais solicitadas destes materiais, destaca-se a resistência à compressão transversal, pois neste teste pode-se verificar as possíveis falhas por delaminação, que é um dos principais defeitos dos compósitos tipo sanduíche. Como um dos objetivos do trabalho foi verificar a viabilidade do núcleo PET perante a outros núcleos, como PVC e madeira balsa, o núcleo PET possui boa resistência a compressão longitudinal, a compressão transversal também não mostrou falhas por delaminação, comprovando boa aderência com a resina.

Na parte relacionada à simulação numérica do processo de RTM *Light*, os resultados confirmaram que é possível prever antecipadamente o fluxo e formação de vazios em compósitos RTM usando técnicas numéricas. Três estudos de caso

foram executados. O primeiro foi utilizado para validar a solução numérica por comparação com uma corrida experimental. Tempo da solução numérica com 18% de diferença a mais que o fluxo experimental, com as frente de fluxos semelhantes. Estes resultados foram considerados bons, devido à geometria irregular do canal de injeção real e pela permeabilidade do meio ter sido estimada em um experimento distinto.

O segundo estudo de caso investigou a viabilidade de reduzir o tempo de preenchimento com a adição de uma segunda saída para a seção inferior do molde. Enquanto o terceiro estudo de caso, a primeira corrida, com apenas uma saída, foi simulada novamente, porém desta vez os tubos de ligação utilizados para facilitar o escape do ar a partir da face inferior foi removida. Neste caso, conforme o esperado, foi previsto numericamente que uma grande quantidade de ar ficaria retido na parte inferior do molde.

As considerações finais do trabalho são as seguintes, a resina éster vínilica é uma ótima alternativa melhor a poliéster e com propriedades comparadas a epóxi. O processo de moldagem líquida por RTM *Light* se mostrou positivo comparando a processos como laminação manual e infusão. Isso refletindo nas propriedades finais das estruturas sanduíche, principalmente a não delaminação. Foi possível validar o modelo numérico da infiltração do processo, podendo agora projetar e estudar outros moldes.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudar outros tipos de núcleo, por exemplo, núcleo de cortiça, para isolamento térmico e acústico, como uma alternativa aos sintéticos.
- Com a validação do processo de RTM *Light* realizada, pode-se estudar diferentes formas de projetar os moldes utilizando os recursos da modelagem numérica. Por exemplo, utilizar dois pontos de vácuo, um na parte superior e outro na parte inferior da cavidade do molde.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADVANI, S. G.; BRUSCHKE, M. V. **A finite element/control volume approach to mold filling in anisotropic porous media** *Polymer Composites*, 1990.

ALMEIRA, M. I. A. DE. **Comportamento estrutural de painéis sanduíche compósitos para aplicações na indústria da construção** *Engenharia Civil*. [s.l.: s.n.].

ATAS, C.; SEVIM, C. On the impact response of sandwich composites with cores of balsa wood and PVC foam. **Composite Structures**, v. 93, n. 1, p. 40–48, 2010.

BERZOSA, A.E.R., J. L. G.; KRIPOTOU, S. PISSIS, P. Relaxation spectrum of polymer networks formed from butyl acrylate methyl methacrylate monomeric units. **Macromolecules**, v. 37, n. 6472-6479., 2004.

BRÉARD, J.; SAOUAB, A.; BOUQUET, G. Numerical simulation of void formation in LCM. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 34, n. 6, p. 517–523, jun. 2003.

BROUWER, W. .; VAN HERPT, E. C. F. .; LABORDUS, M. Vacuum injection moulding for large structural applications. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 34, n. 6, p. 551–558, 2003.

CANEVAROLO, S. V. **Técnicas de Caracterização de Polímeros**. [s.l.] E. Artiber, 2004.

CARVALHO, L. H. DE. Propriedades Mecânicas de Tração de Compósitos Poliéster / Tecidos Híbridos Sisal / Vidro. v. 16, p. 33–37, 2006.

CASSU, S. N.; FELISBERTI, M. I. Comportamento Dinâmico-Mecânico E Relaxações Em Polímeros E Blendas Poliméricas. **Quim. Nova**, v. 28, n. 2, p. 255–263, 2005.

CORIGLIANO, A.; RIZZI, E.; PAPA, E. Experimental characterization and numerical simulations of a syntactic-foam / glass- @ bre composite sandwich. **Composites Science and Technology**, v. 60, p. 2169–2180, 2000.

COWIE, J. M. G. **Polymers: Chemistry and Physics of Modern Materials**. [s.l.] I. books, 1973.

FERRY, J. **Viscoelastic Properties of Polymers** Jhon Wiley & Sons, Inc., 1981.

FLAMÍNIO LEVY NETO, L. C. P. **Compósitos Estruturais -Ciência e Tecnologia**. 1 ed. ed. São Paulo: Blücher. 2006., 2006.

FREDERICK R, P. **Simulation of the Injection Process in Resin Transfer** *Polymer Composites*, 1997.

GOURICHON, B. et al. Dynamic void content prediction during radial injection in liquid composite molding. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 39, n. 1, p. 46–55, 2008.

HAIDER, M.; HUBERT, P.; LESSARD, L. Cure shrinkage characterization and modeling of a polyester resin containing low profile additives. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 38, n. 3, p. 994–1009, 2007.

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

HE, F. et al. Preparation and mechanical properties of 3-D braided glass fiber reinforced light-cured resin composites. **Materials Letters**, v. 60, n. 28, p. 3339–3341, 2006.

HIEMENS, P. C. **Polymer Chemistry: The Basic Concepts**. [s.l.] M.D. Inc., 1984.

HIRT, C. .; NICHOLS, B. . Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. **Journal of Computational Physics**, v. 39, n. 1, p. 201–225, 1981.

ISOLDI, L. A. et al. Three-dimensional numerical modeling of RTM and LRTM processes. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 34, n. 2, p. 105–111, 2012.

ITTNER MAZALI, C. A.; FELISBERTI, M. I. Vinyl ester resin modified with silicone-based additives: III. Curing kinetics. **European Polymer Journal**, v. 45, n. 8, p. 2222–2233, 2009.

LASCOUP, B. et al. Impact response of three-dimensional stitched sandwich composite. **Composite Structures**, v. 92, n. 2, p. 347–353, 2010.

LAURENZI, S.; CASINI, A.; POCCHI, D. Design and fabrication of a helicopter unitized structure using resin transfer moulding. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 67, p. 221–232, dez. 2014.

LECLERC, J. S.; RUIZ, E. Porosity reduction using optimized flow velocity in Resin Transfer Molding. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 39, n. 12, p. 1859–1868, 2008.

LI, J. et al. Statistical characterization and robust design of RTM processes. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 36, n. 5, p. 564–580, 2005.

LUOMA, J. A.; VOLLER, V. R. An explicit scheme for tracking the filling front during polymer mold filling. **Applied Mathematical Modelling**, v. 24, n. 8-9, p. 575–590, jul. 2000.

M. CERQUEIRA, M.L., E. C. **Compósitos Estruturais, Tecnologia e Prática**. [s.l.: s.n.].

MALISKA, C. R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. 2 Edição ed. [s.l.] LTC, 2004.

MIJOVIĆ, J.; KENNY, J.; NICOLAIS, L. Comparison of kinetic and rheological evaluation of gel time for an amine-epoxy system. **Polymer**, v. 34, n. 1, p. 207–209, jan. 1993.

- MITRA, N. A methodology for improving shear performance of marine grade sandwich composites: Sandwich composite panel with shear key. **Composite Structures**, v. 92, n. 5, p. 1065–1072, 2010.
- MOEINI SEDEH, M.; KHODADADI, J. M. Interface behavior and void formation during infiltration of liquids into porous structures. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 57, p. 49–65, dez. 2013.
- MURAT SOZER, S. G. A. **Process_Modeling_in_Composites_Manufactu**348 B/W Illustrations, , 2010.
- NASSEH, J. **Barcos - Métodos Avançados de Construção em Composites**. Rio de Janeiro: [s.n.]. v. 33
- OpenFOAM User Guide.** , 2011.
- ORNAGHI, H. L. et al. Hybridization effect on the mechanical and dynamic mechanical properties of curaua composites. **Materials Science and Engineering: A**, v. 528, n. 24, p. 7285–7289, 2011.
- PARA, S.; MARÍTIMAS, A. Evaluation of different cores and faces in sandwich composite constructions for marine applications. n. 1, [s.d.].
- POTHAN, L. A.; OOMMEN, Z.; THOMAS, S. Dynamic mechanical analysis of banana fiber reinforced polyester composites. **Composites Science and Technology**, v. 63, n. 2, p. 283–293, 2003.
- PRABHAKAR, R. L.; BROCCINI, S.; KNOWLES, J. C. Effect of glass composition on the degradation properties and ion release characteristics of phosphate glass—polycaprolactone composites. **Biomaterials**, v. 26, n. 15, p. 2209–2218, 2005.
- RUDD C. D., L.A.C., KENDALL K. N. AND MANGIN C. G. E. **Liquid moulding, structural reaction injection moulding and related processing techniques**. [s.l.] Woodhead Publishing Limited., 1997.
- RUSSO, A.; ZUCCARELLO, B. Experimental and numerical evaluation of the mechanical behaviour of GFRP sandwich panels. **Composite Structures**, v. 81, n. 4, p. 575–586, 2007.
- SAHA, M. C.; KABIR, E.; JEELANI, S. Study of debond fracture toughness of sandwich composites with nanophased core. **Materials Letters**, v. 62, n. 4-5, p. 567–570, fev. 2008.
- SALMAN, S. D. et al. Physical , Mechanical , and Morphological Properties of Woven Kenaf / Polymer Composites Produced Using a Vacuum Infusion Technique. **International Journal of Polymer Science**, p. 1–11, 2015.
- SAOUAB, A. et al. Injection simulations of thick composite parts manufactured by the RTM process. **Composites Science and Technology**, v. 61, n. 3, p. 445–451, 2001.
- SCHIMIDT TM, G.M., A. S. AND L. C. Permeability of hybrid reinforcements and mechanical properties of their composites molded by resin transfer molding. **J.**

Reinf Plast Compos, v. 28, n. 2839-2850, 2009.

SCOTT, T.F., W.D. COOK, AND J. S. F. Effect of the degree of cure on the viscoelastic properties of vinyl ester resins. **European Polymer Journal**, v. 44, n. 3200-3212, 2008.

SEVKAT, E. et al. Effect of repeated impacts on the response of plain-woven hybrid composites. **Composites Part B: Engineering**, v. 41, n. 5, p. 403–413, 2010.

SGRICCIA, N.; HAWLEY, M. C.; MISRA, M. Characterization of natural fiber surfaces and natural fiber composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 39, n. 10, p. 1632–1637, 2008.

SHI, F.; DONG, X. 3D numerical simulation of filling and curing processes in non-isothermal RTM process cycle. **Finite Elements in Analysis and Design**, v. 47, n. 7, p. 764–770, 2011.

SINGH, A. P. et al. Fatty acid based waterborne air drying epoxy ester resin for coating applications. **Progress in Organic Coatings**, v. 87, p. 95–105, out. 2015.

SONG, Y. S.; YOUN, J. R. Flow advancement through multi-layered preform with sandwich structure. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 38, n. 4, p. 1082–1088, abr. 2007.

VISCO, A. M.; CAMPO, N.; CIANCIAFARA, P. Composites : Part A Comparison of seawater absorption properties of thermoset resins based composites. 2010.

WANG, B. et al. Experimental investigation of 3D sandwich structure with core reinforced by composite columns. **Materials & Design**, v. 31, n. 1, p. 158–165, jan. 2010.

XIA, F.; WU, X. Study on impact properties of through-thickness stitched foam sandwich composites. **Composite Structures**, v. 92, n. 2, p. 412–421, 2010.

YANG, J. et al. Enhancements of the simulation method on the edge effect in resin transfer molding processes. **Materials Science and Engineering: A**, v. 478, n. 1-2, p. 384–389, 2008a.

YANG, S. Q. et al. Experimental investigation on strength and failure behavior of pre-cracked marble under conventional triaxial compression. **International Journal of Solids and Structures**, v. 45, n. 17, p. 4796–4819, 2008b.

ZIKE, S. et al. An Experimental and Numerical Study of Low Velocity Impact of Unsaturated Polyester / Glass Fibre Composite. v. 17, n. 4, 2011.