

unesp  **UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

MARCELO MAJEWSKI

**COMPARAÇÃO DE COMPÓSITOS OBTIDOS VIA RTM DE RESINA EPÓXI E FIBRA
DE CARBONO COM E SEM DESCONTINUIDADE NOS TECIDOS**

Guaratinguetá

2012

MARCELO MAJEWSKI

**COMPARAÇÃO DE COMPÓSITOS OBTIDOS VIA RTM DE RESINA EPÓXI E FIBRA
DE CARBONO COM E SEM DESCONTINUIDADE NOS TECIDOS**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia de Materiais da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia de Materiais.

Orientador: Marcos Yutaka Shiino

Coorientador: Maria Odila Hilário Cioffi

Guaratinguetá

2012

M23 Majewski, Marcelo
3c Comparação de compósitos obtidos via RTM de resina epóxi e fibra
de carbono com e sem descontinuidades nos tecidos / Marcelo Majewski –
Guaratinguetá : [s.n], 2012.
49 f. : il.

Bibliografia: f. 46 - 49

Trabalho de Graduação em Engenharia de Materiais – Universidade
Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2012.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Yutaka Shiino
Coorientadora: Prof^a Dr^a Maria Odila Hilário Cioffi

1. Materiais compostos 2. Análise térmica I. Título

CDU 620.1

**COMPARAÇÃO DE COMPÓSITOS OBTIDOS VIA RTM DE RESINA EPÓXI
E FIBRA DE CARBONO COM E SEM DESCONTINUIDADE NOS TECIDOS**

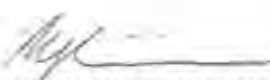
MARCELO MAJEWSKI

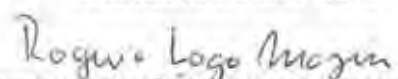
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS"

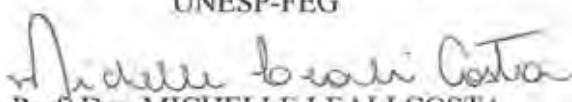
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

Prof. MARCOS VALÉRIO RIBEIRO
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


MARCOS YUTAKA SHIINO
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. ROGÉRIO LAGO MAZUR
UNESP-FEG


Prof. Dra. MICHELLE LEALI COSTA
UNESP-FEG

Agosto de 2012

DADOS CURRICULARES

MARCELO MAJEWSKI

NASCIMENTO	23.05.1986 – TAUBATÉ - SP
FILIAÇÃO	Stefan Majewski Marta Majewski
2007/2011	Curso de Graduação Engenharia de Materiais / UNESP – FEG

DEDICATÓRIA

A todos que me deram apoio para que
pudesse chegar aonde cheguei.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, pela ajuda, confiança, compreensão, amor e, em especial, por todo carinho ao longo deste percurso, ensinando-nos a persistir em nossos objetivos e ajudando a alcançá-los. Eles que foram à base de tudo pra nós, apoiando-nos nos momentos difíceis.

Aos meus queridos irmãos, que mesmo distantes se fizeram presentes em todos os momentos. A todos os meus amigos e colegas de curso pela cumplicidade, ajuda e amizade.

A Paula Moraes de Freitas Oliveira que esteve ao meu lado em todos os momentos, que me ajudou nas horas difíceis tanto com a amizade quanto na parceria.

A república Masmorra e todos que moraram comigo, onde cresci e aprendi muito durante todos esses anos.

Aos meus queridos Orientadores deste trabalho, Marcos Yutaka Shiino e Maria Odila Hilário Cioffi, pela oportunidade, confiança, ajuda e amizade.

A todos os professores da FEG pelo conhecimento, carinho, dedicação e entusiasmo mostrado ao longo do curso.

E por fim, a todos aqueles que não foram mencionados aqui, mas que fizeram e fazem parte do nosso sucesso pela conclusão desta etapa de nossas vidas.

MAJEWSKI, M., **Comparação de compósitos obtidos via RTM de resina epóxi e fibra de carbono com e sem descontinuidades no tecido**, 2012. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia de Materiais) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

RESUMO

Atualmente é crescente o interesse tecnológico no uso dos compósitos, devido à exigência de materiais mais leves e mais resistentes, fatores essenciais para atender as especificações de projetos e reduzir o custo operacional. Na produção de compósitos estruturais de alto desempenho, considerando os critérios aeronáuticos, a indústria nacional tem mostrado interesse no processo de moldagem por transferência de resina (RTM) pela reprodutibilidade e baixo custo. Este processo é adequado para produzir componentes de compósitos poliméricos com geometrias relativamente simples, espessuras consistentes, com alta qualidade de acabamento sem limitações de tamanho. O objetivo do presente trabalho foi usar um molde em aço carbono para ser utilizado no processamento via RTM de duas placas de compósito de resina epóxi e tecido de fibra de carbono com e sem descontinuidades induzidas, comparando as diferenças na impregnação das fibras através de ensaios de ultrassom, suas propriedades via ensaios de tração e análise térmica. Os compósitos produzidos foram inspecionados por ultrassom, para verificação da impregnação da resina e visualização das falhas existentes no compósito. Na inspeção por ultrassom, verificou-se a impregnação das fibras de ambos os compósitos. Na análise térmica foi possível verificar a temperatura de degradação dos compósitos, a temperatura de transição vítrea e verificou-se que os compósitos não apresentaram os ciclos de cura eficientes, porém apresentaram bom desempenho no ensaio de tração quando comparados com a liga de alumínio 7050 T7451. Os resultados mostraram que a estratégia de injeção foi adequada já que o laminado apresentou boa qualidade para a aplicação proposta.

PALAVRAS CHAVE: Processo RTM, Compósito carbono/epóxi, Ultrassom, análise térmica.

MAJEWSKI, M., **Comparison of composites via RTM epoxy resin and carbon fiber with and without discontinuities in the tissue**, 2012. Graduate Work (Graduate in Materials Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

ABSTRACT

Technology is growing interest in the use of composites, due to the requirement of lighter materials and more resistant, factors essential to meet the project specifications and reduce the operational cost. In the production of high performance structural composites, considering the aerospace criteria, the domestic industry has shown interest in the process of resin transfer molding (RTM) for reproducibility and low cost. This process is suitable for producing components of polymeric composites with relatively simple geometries, consistent thicknesses, high quality finish with no size limitations. The objective of this work was machined carbon steel to make a matched-die tooling for RTM and produce two composite plates of epoxy resin and carbon fiber fabric with and without induced discontinuities, which were compared towards their impregnation with ultrasound, their properties via tensile tests and thermal analysis. In ultrasonic inspection, it was found good impregnation of the preform of both composites. In the thermal analysis it was possible to check the degradation temperature of the composites, the glass transition temperature and it was found that the composites showed no effective cure cycles, but presented good performance in the tensile test when compared with aluminum alloy 7050 T7451 . The results showed that the injection strategy was appropriate since the laminate exhibited a good quality for the proposed application.

KEYWORDS: RTM process, Carbon/Epoxy composite, Ultrasonic test, Thermal analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Princípio básico de inspeção por ultrassom.....	22
Figura 2 – Molde para o processamento via RTM.....	27
Figura 3 – Conexão da injeção no molde, da saída do molde para o <i>trap</i> e do <i>trap</i> para a bomba de vácuo.....	28
Figura 4 – Entrada na parte inferior e saída na parte superior	28
Figura 5 – Direcionamento do tecido: a) laminação sem descontinuidades; e b) com descontinuidades	29
Figura 6 – Desmoldagem do compósito.....	30
Figura 7 – Ultrassom tipo pulso eco imerso em água	31
Figura 8 – Dimensões dos corpos de prova	31
Figura 9 – C-scan placa sem descontinuidade no tecido, <i>Gate 1</i>	33
Figura 10 – C-scan placa sem descontinuidade no tecido, <i>Gate 2</i>	33
Figura 11 – Espectro de atenuação em percentual de ganho.....	34
Figura 12 – C-scan placa com descontinuidade no tecido, <i>Gate 1</i>	34
Figura 13 – C-scan placa com descontinuidade no tecido, <i>Gate 2</i>	34
Figura 14 – Espectro de atenuação em percentual de ganho.....	35
Figura 15 – TGA e DTG Compósito sem descontinuidade no tecido	35
Figura 16 – TGA e DTG Compósito com descontinuidade no tecido.....	36
Figura 17 – DSC Compósito sem descontinuidade no tecido.....	37
Figura 18 – DSC Compósito com descontinuidade no tecido	37
Figura 19 – DMA Resina do compósito sem descontinuidade no tecido	39
Figura 20 – DMA Resina do compósito com descontinuidade no tecido.....	39
Figura 21 – Corpos de prova antes do ensaio de tração	41

Figura 22 – Corpos de prova após os ensaios de tração.....	41
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de carga máxima e de módulo de elasticidade no compósito sem falhas no tecido 42

Tabela 2 – Valores de carga máxima e de módulo de elasticidade no compósito com falhas no tecido 42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

RTM	Moldagem por Transferência de Resina
TGA	Termogravimetria
DTG	Derivada Termogravimétrica
DSC	Calorimetria exploratória diferencial
DMA	Análise Dinâmico Mecânico
MPa	Mega Pascal
GPa	Giga Pascal
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
UNESP	Universidade Estadual de São Paulo
DMT	Departamento de Materiais e Tecnologia
FEG	Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá

LISTA DE SÍMBOLOS

E'	Módulo elástico
E''	Módulo de dissipação viscosa ou de perda
$\tan\delta = E''/E'$	Amortecimento mecânico ou atrito interno
$\sigma_{\text{máx}}$	Tensão máxima de ruptura
E	Módulo de elasticidade
T_g	Temperatura de transição vítrea
T_m	Temperatura de fusão
$^{\circ}\text{C}$	Unidade de temperatura em graus Celsius
bar	Pressão em unidade de bar
Hz	Unidade de frequência em Hertz
mg	Unidade de massa em miligrama
Min	Minuto
mm/s	Unidade de velocidade em milímetros por segundo

SUMÁRIO

1 - JUSTIFICATIVA	15
2 - OBJETIVO	17
3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1 - Materiais compósitos estruturais e processo RTM	18
3.1.1 - Compósitos	18
3.1.2 - Resina epóxi	19
3.1.3 - Reforço de fibra de carbono	19
3.1.4 - Processo de moldagem por transferência de resina (RTM).....	20
3.2 - Caracterização por Ultrassom	21
3.3 - Análise Térmica	23
3.3.2 - Termogravimetria (TGA) e Derivada Termogravimétrica (DTG)	23
3.3.2 - Calorimetria exploratória diferencial (DSC)	24
3.3.3 - Análise Dinâmico Mecânico (DMA)	25
3.4 - Ensaio de tração	25
4 - MATERIAIS E MÉTODOS.....	26
5 - MÉTODOS	26
5.1 - Confecção do Molde	26
5.2 - Processamento RTM	27
5.3 - Inspeção por Ultrassom	29
5.4 - Termogravimetria (TGA/DTG)	30

5.5 - Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)	30
5.6 - Análise Dinâmico Mecânico (DMA)	31
5.7 - Ensaio de Tração	31
6 - RESULTADOS	32
7 - CONCLUSÃO	44
8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46

1. JUSTIFICATIVA

Historicamente os metais têm sido utilizados em aplicações estruturais, mas isso vem mudando com o surgimento dos compósitos. Atualmente o interesse demonstrado pela indústria aeronáutica no uso destes materiais é crescente. Este fato ocorre devido às propriedades específicas desses materiais, como menor massa específica e com alta rigidez e resistência mecânica, abrangendo uma gama de pré-requisitos para os projetos de engenharia em geral (MCILHAGGER, BROWN, HILL, 2000). Uma das maiores vantagens dos compósitos é a possibilidade de, na manufatura, combinar determinadas propriedades interessantes para a aplicação, produzindo um sistema de características únicas (HULL, 1981; REZENDE, COSTA, BOTELHO, 2011).

O processo RTM (Resin Tranfer Molding) é uma alternativa ideal para substituir os processos de fabricação de compósitos mais tradicionais, considerando o fato de ser um sistema de injeção de molde fechado que garante curto ciclo de processamento quando comparado com processos similares. Este processo produz componente de alta qualidade e apresenta repetibilidade, além de uma boa velocidade de produção comparada com outros processos, devido à possibilidade de automação (LEVY, PARDINI, 2006; REZENDE, COSTA, BOTELHO 2011).

Nos séculos passados, como a construção dos objetos era essencialmente artesanal, não havia um controle de qualidade regular dos produtos fabricados. Avaliava-se a qualidade de um objeto simplesmente pelo próprio uso. Um desgaste prematuro que conduzissem à rápida quebra da ferramenta era o método racional que qualquer um aceitava para determinar a qualidade das peças, ou seja, a análise da qualidade era baseada no comportamento do objeto depois de pronto. O acesso a novas matérias-primas e o desenvolvimento dos processos de fabricação obrigaram à criação de métodos padronizados de produção em todo o mundo. Ao mesmo tempo, desenvolveram-se processos e métodos de controle de qualidade dos produtos. Entende-se que o controle de qualidade precisa começar pela matéria-prima e deve ocorrer durante todo o processo de produção, incluindo a inspeção e os ensaios finais nos produtos acabados (VINSON, SIERAKOWSKI, 1993; SANIHYL, 2009). Para este fim, geralmente, são utilizados como

ensaios não destrutivos do tipo ultrassônicos ou sobre o comportamento térmico (VINSON, SIERAKOWSKI, 1993).

Existem projetos de engenharia com peças de geometria mais complexa e requisitos de propriedades mecânicas elevadas que necessitam da elaboração de moldes e disposição dos reforços na forma de tecido, que requerem sobreposição ou união das partes do reforço, o que pode induzir falhas no compósito (LUNDSTRÖM, 2000). Nesses projetos, existem as sobras de retalhos que geralmente são descartadas, devido ao menor tamanho. Assim o presente trabalho estuda a possibilidade de reaproveitar as sobras e retalhos de tecidos em peças, fazendo a montagem dos tecidos em um molde, induzindo-se as falhas no tecido, comparando as propriedades e as qualidades deste compósitos produzidos com retalhos de tecidos com compósitos sem falhas nos tecidos.

2. OBJETIVO

O objetivo do presente trabalho foi confeccionar um molde em aço carbono, em uma fresadora semi automática da FERRO STAAL, para o processamento de duas placas de compósito pelo processo de moldagem por transferência de resina (RTM), com resina epóxi bicomponente da POLIPOX e fibra de carbono na forma de tecido 5HS da SIGMATEX. Uma placa foi produzida com o tecido inteiro e outra com descontinuidades, simulando o uso de sobras de tecidos e/ou peças de geometrias complexas que não permitem o uso de tecidos inteiros. Ensaio de ultrassom foi realizado para verificação da impregnação da resina e verificação das falhas existentes no tecido e consequentemente no compósito. Por último, foi verificado o grau de cura dos compósitos produzidos por técnicas de análise térmica. Os ensaios mecânicos de tração foram realizados para comparar as tensões máxima de ruptura e os módulos de elasticidade entre os compósitos produzidos, e ainda comparando estes resultados com a liga de alumínio 7050 T7451.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Materiais compósitos estruturais e processo RTM

3.1.1 Compósitos

Os compósitos são materiais economicamente competitivos para as aplicações das engenharias, devido a sua grande versatilidade como: boas propriedades físicas, resistência química, mecânica e economicamente viável, apresentando, assim, uma gama de aplicações nos projetos de engenharia (LEVY, PARDINI 2006).

Isso se deve, principalmente, a possibilidade de dispor de materiais que exibam os maiores valores de resistência mecânica e de rigidez específicas entre os materiais disponíveis. Porém, qualquer nova tecnologia vem acompanhada de problemas, e no caso dos compósitos os mais importantes surgem nos processos de fabricação mecanizados, no desenvolvimento de sistemas de fabricação, e no estabelecimento de dados básicos para projetos; O que gera a necessidade do estudo e do aprimoramento dos materiais compósitos avançados (ANTONUCCI, GIORDANO, NICOLAIS, DI VITA 2000).

A grande vantagem dos compósitos está na possibilidade de combinar dois ou mais materiais com determinadas propriedades, que consiste em usar um material que complementa a do outro, como por exemplo, a resina epóxi e a fibra de carbono. A fibra de carbono é um material resistente à fratura que combinado com a matriz de resina epóxi, que é um material frágil mas quimicamente resistente, produz, assim, um sistema de características únicas. Este material pode substituir ligas de alumínio, que são empregadas em larga escala nas aeronaves, e quando substituídos permitem uma redução de peso de 20 a 30%, além de 25% na redução do custo final de obtenção das peças (REZENDE, 2000; LEVY, PARDINI, 2006; REZENDE, COSTA, BOTELHO, 2011).

3.1.2 Resina epóxi

A classe das resinas sugeridas é a resina epóxi, que é utilizada em compósitos avançados, devido à alta resistência mecânica, resistência a ataques químicos, boa adesão com vários substratos, fácil processamento e suas propriedades se manterem inalteradas em altas temperaturas. Além disso as resinas termorrígidas impregnam facilmente as fibras, sem necessidade de processamentos especiais, como altas temperaturas ou grandes pressões, viabilizando, assim, sua aplicação estrutural (JANG, SHIN, 1995). Estas características as tornam candidatas ideais como matrizes para compósitos reforçados com fibras de carbono de alto desempenho no processo RTM (LARSSON, SVENSSOM, 2002).

O sistema epóxi foi recomendado como o mais adequado para a impregnação de fibras secas no processo RTM. Assim, diversas companhias vêm desenvolvendo sistemas epóxis especialmente para este processo, objetivando, principalmente, a produção de componentes aeronáuticos (HILLERMEIER, SEFERIS, 2001). Exemplos deste tipo de sistema é a resina epóxi modificada livre de solventes com aduto de amina ciclo alifática da POLIPOX, que se trata de uma resina desenvolvida para laminação com tecido de fibra de vidro, fibra de aramida, fibra de carbono e fibras naturais. Este sistema é excelente para revestimentos de superfície de pranchas de surf, de equipamentos esportivos em geral, de pás de energia eólica, indústria náutica e aeronáutica, deixando uma superfície transparente (POLIPOX, 2012).

3.1.3 Reforço de fibra de carbono

As fibras usadas como reforço em compósitos são responsáveis pela resistência e rigidez, que variam em função do material, tamanho, concentração e disposição das fibras na matriz. A fibra de carbono, que embora a tecnologia de produção seja complexa, apresenta propriedades interessantes como: baixa massa específica; boa estabilidade térmica; alta resistência a ataques químicos e, principalmente, boas propriedades mecânicas, resistência à tração e o comportamento a fadiga, sendo, assim, largamente utilizada em diversas áreas, onde cerca de 40% da produção mundial anual de fibras de carbono é usada nas indústrias aeronáutica e

aeroespacial (ENGINEERED MATERIALS HANDBOOK).

As fibras de carbono são predominantemente utilizadas sob a forma de tecidos, estes materiais recebem frequentemente uma pré-impregnação, geralmente de resina epóxi, para formar os pré-impregnados (*prepregs*) (YASHIRO, TAKATSUBO, TOYAMA, 2007). Contudo, na maioria das aplicações de uso de *prepregs* estão envolvidos altos custos e limitações quanto à complexidade geométrica de alguns artefatos, tornando a sua utilização limitada quando comparada a de tecidos secos, estes geralmente utilizados nos processos RTM (HASIM, NIHAT, 2002).

Considerando a impregnação de tecidos secos nos processos de moldagem por injeção, sabe-se que o fluxo de resina se comporta de acordo com a lei de Darcy e o fato de que nestes reforços as fibras são cabos constituídos de filamentos, ficam estabelecidos dois tipos de fluxos durante o processo de moldagem para o compósito: o fluxo em micro escala ocorrendo dentro do feixe de fibras e o fluxo em mesoescala que acontece entre os cabos de fibras. A relação entre estes tipos de fluxo é muito importante para identificar os fenômenos que ocorrem na frente do fluxo de resina. Para competir com materiais tradicionais, têm sido desenvolvidos novos tecidos para os processamentos via RTM, que permitem uma impregnação completa da preforma (LEVY, PARDINI, 2006). Exemplo é o tecido de carbono *plain weave* e os tipo 5HS e 8HS.

3.1.4 Processo de moldagem por transferência de resina (RTM)

O processo de moldagem por transferência de resina (RTM) é utilizado nas produções de compósitos de alto desempenho, como estrutura e peças complexas de aeronaves, apresentando muitas vantagens sobre outros processos de fabricação, como baixo custo de mão de obra, ciclo de processamento baixo, ferramental simples, fabricação de geometrias complexas e produção de peças de grande escala. Além disso o fluxo de resina no processo RTM é de longo alcance, penetrando no tecido através dos poros do reforço seco fibroso e de não requer o uso de pré-impregnados (*prepregs*) (HILLERMEIER, SEFERIS, 2002). Outra vantagem é o de ser um processo que não contamina o ambiente de trabalho (HILLERMEIER, SEFERIS, 2002). Para Stephen, (STEPHEN, 2000), o RTM será o processo de compósito para aplicações futuras já que

a legislação exigirá um local de trabalho saudável, sem emissão de produtos voláteis e utilização de moldes fechados. Sendo, então, um forte candidato à automatização em escala industrial, eficaz devido à alta velocidade de produção e de usar moldes fechados, (LAWRENCE, HSIAO, DON, SIMACEK, ESTRADA, SOZER, STADFELD, ADVANI, 2002).

O processamento por RTM obedece a seguinte sequência: colocação da preforma no molde; compactação da preforma no interior do molde por ocasião de seu fechamento; impregnação do reforço seco pelos orifícios pré-selecionados no molde, em uma posição previamente estudada, de acordo com a forma final da peça, criando um gradiente de pressão da parte impregnada para a não impregnada da fibra. Após o preenchimento, inicia-se o ciclo de cura que depende do tipo de resina utilizada seguida do desmolde da peça, (LEVY, PARDINI, 2006).

O ciclo de cura é geralmente o estágio mais crítico e caro na produção de estruturas de compósitos via RTM. Muitas complicações podem surgir se o processo pode não ocorrer com precisão, considerando-se a complexidade da peça ou os constituintes do material. Geralmente este estágio é baseado na recomendação do fabricante, o qual toma como referência a resina não reforçada. Desvios não esperados para o ciclo de cura, como variações na espessura do laminado, causam gradientes de temperatura e, em consequência disso, variações no grau de cura, que podem introduzir tensões residuais na peça (GOROVAYA, KOROTKOK, 1996).

3.2 Caracterização por Ultrassom

Técnicas de ensaios não destrutíveis são essenciais para detectar delaminações e falhas na impregnação nos compósitos estruturais. Estas técnicas são aplicadas em inspeções de aeronaves, nas quais o operador move o equipamento ao redor das estruturas. Todavia, este método de inspeção tem um dispêndio muito grande de tempo, requer cuidados para análise de dados e é realizado por um engenheiro experiente e habilidoso (RICARDO, 2008).

A técnica não destrutiva por ultrassom tem como princípio de funcionamento a emissão de ondas com frequência acima de 20 kHz que se propagam por um meio elástico, como a água.

As ondas ao se encontrarem com as discontinuidades ou falhas no caminho percorrido na peça, cuja interpretação é feita por um transdutor de sinal, muda a característica da onda inicial (RICARDO, 2008).

As mudanças das características iniciais da onda se devem aos fenômenos de dispersão, absorção e reflexão, que causam redução da energia inicial da onda ao percorrer um material. A dispersão ocorre pelo fato da matéria não ser homogênea, contendo pontos com características elásticas diferentes que mudam a forma da onda (RICARDO, 2008).

Existem duas técnicas de inspeção por ultrassom: uma delas é por pulso-eco (ou pulso-eco), a qual consiste em utilizar somente um transdutor que tem o papel de emitir e realizar a leitura das ondas ultrassônicas. Outra técnica é a de inspeção por transmissão, que utiliza dois transdutores alinhados entre si, um para emissão e outro para recepção das ondas ultrassônicas. As duas técnicas fornecem informações qualitativas do material, geralmente, comparando-se com padrões com e sem defeitos (RICARDO, 2008).

A Figura 1 ilustra o método pulso-eco detectando uma discontinuidade, na qual o transdutor envia um sinal e o mesmo retorna ao transdutor com maior amplitude em relação ao material sem a discontinuidade, mostrando um pico no gráfico de A-Scan. O eixo Y corresponde ao ganho, e o eixo X corresponde à profundidade do defeito. Pelo A-Scan também é possível verificar que o sinal nas extremidades do defeito é menor que o do centro do defeito, devido à dispersão das ondas. E assim é possível determinar discontinuidades e defeitos, como trincas, fissuras, falhas na impregnação, delaminações entre outros defeitos (DON, RODERIC, 2000; RICARDO, 2008).

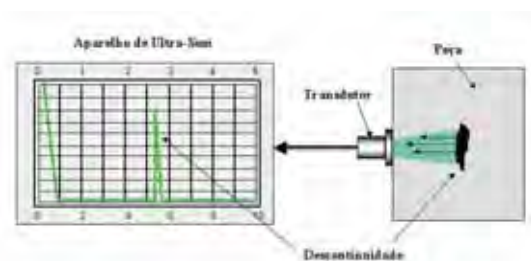


Figura 1 – Princípio básica de inspeção por ultrassom (RICARDO, 2008).

Para materiais não isotrópicos, como compósitos, principalmente os quase isotrópicos, a inspeção utilizando a técnica da transmissão não é eficiente. Considerando como a principal característica dos compósitos a união de materiais de propriedades químicas e físicas diferentes, a técnica de inspeção citada não é capaz de detectar uma descontinuidade do tipo delaminação entre duas lâminas, ou mesmo um espaço vazio por falta de impregnação. Para este caso, o mais indicado é um equipamento de ultrassom C-scan, que possibilita a automatização imerso em água com movimentação no plano x e y (RICARDO, 2008).

O C-Scan é um meio efetivo para se obter dados de defeitos profundos, formando-se um diagrama de cores que se correspondem ao nível de atenuação. Através de um padrão de cores é possível determinar as diferenças de ganho das ondas de ultrassom, possibilitando a determinação dos defeitos e descontinuidades. Esse método pode ser utilizado na inspeção de corrosão em tubulações, vasos de pressão, na detecção de delaminações em materiais compósitos entre outros (RICARDO, 2008).

3.3 Analise Térmica

3.3.1 Termogravimetria (TGA) e Derivada Termogravimétrica (DTG)

A termogravimetria (TGA) é a análise térmica que se determina o ganho ou perda de massa causada pela oxidação ou pela degradação, em função da taxa de aquecimento ou a permanência em temperaturas controladas em uma amostra, com a possibilidade de se controlar a atmosfera, selecionando gases inertes como, por exemplo, o nitrogênio. O TGA também avalia na amostra: seu teor de umidade, estabilidade térmica, composição de blendas poliméricas e copolímeros, e decomposição térmica segundo Canevarolo (CANEVAROLO, 2004).

Com a curva de TGA, é possível conhecer a temperatura de início de uma degradação e a de finalização, como normalmente é difícil definir essas temperaturas, usa-se o extrapolamento do gráfico, informando-se as temperaturas *onset* e *offset*, que se aproximam dos valores reais e são relativamente fáceis de serem encontradas. Com as análises das curvas da derivada

termogravimétrica (TGA) isotérmicas, pode-se prever o tempo que o material leva para ser degradado (CANEVAROLO, 2004).

A DTG é a derivada do TGA, ela é capaz de nos fornecer quantas reações ocorrem durante a degradação/oxidação, o que apenas pelo gráfico de termogravimetria nem sempre é possível observar. Através da curva de DTG, é possível obter a temperatura de pico, onde a taxa de variação de massa é máxima (CANEVAROLO, 2004).

3.3.2 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

A Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) é utilizada para obtenção da temperatura de transição vítrea (T_g), temperatura de fusão (T_m), temperatura de cristalização, temperatura de cura, capacidade calorífica do material. Além destas análises é possível identificar a mistura, miscibilidade de blendas poliméricas e o grau de cristalinidade do polímero. Esse método é utilizado principalmente para caracterizar polímeros, blendas e copolímeros. Na T_g iniciam-se os movimentos de segmentos da cadeia polimérica, variando-se a capacidade calorífica do material. As fusões cristalinas aparecem como picos endotérmicos apenas em análises de polímeros semicristalinos, pois é neste momento que a cristalinidade dos polímeros se desfaz. Já a cristalização são picos exotérmicos, que ocorrem antes da fusão cristalina, e também ocorrem apenas em polímeros semicristalinos. A cura de resinas são picos exotérmicos, podendo o grau de cura da resina ser quantificado (CANEVAROLO 2004, LUCAS, SOARES, MONTEIRO, 2001).

A presença de aditivos interfere na T_g e no processo de fusão, por isso pode ser identificado, se há ou não aditivos na amostra. Outras propriedades que podem ser analisadas através da curva de DSC são: grau de cristalinidade do polímero e identificação de misturas poliméricas permitindo calcular a fração de cada polímero na mistura (CANEVAROLO, 2004).

3.3.3 Análise Dinâmico-Mecânico (DMA)

A análise dinâmico-mecânica (DMA) é mais sensível que a DSC. A análise por DMA associa propriedades macroscópicas do material às suas relaxações moleculares, e as mudanças conformacionais às deformações microscópicas (CANEVAROLO, 2004).

A técnica fornece informações a respeito do módulo elástico (E'), do módulo de dissipação viscosa (E'') e do amortecimento mecânico ou atrito interno ($\tan\delta = E''/E'$) de um material quando sujeito a uma sollicitação dinâmica. A partir dessas variáveis, pode-se correlacionar propriedades como tenacidade, resistência ao impacto, envelhecimento, tempo de vida em fadiga, rigidez, resistência à propagação de trincas, grau de cura, efeitos de aditivos e plastificantes, miscibilidade de blendas, entre outras (CANEVAROLO, 2004; SOARES, MONTEIRO, 2001).

3.4 Ensaio de tração

O ensaio de tração é um dos métodos de caracterização de propriedades mecânicas de grande importância quando se trata de materiais de alta qualidade e desempenho, principalmente em se tratando de materiais como compósitos estruturais (LEVY, PARDINI, 2006). Com esse tipo de ensaio é possível determinar parâmetros importantes para a realização de projetos de engenharias, como tensão máxima de ruptura e módulo de elasticidade (CANEVAROLO, 2004; LEVY, PARDINI, 2006).

A tensão de ruptura corresponde ao carregamento ao qual o material suporta até o rompimento, já a deformação elástica de um material corresponde à deformação reversível quando aplicada uma carga, ou seja, o material se deforma na aplicação da carga, retornando-se ao seu estado inicial com a retirada da carga, obedecendo à lei de Hooke (CANEVAROLO, 2004; LEVY, PARDINI, 2006).

Alguns parâmetros que interferem no valor final de tensão podem ser citados como: sequencia de empilhamento, fração volumétrica de fibras (FVF), volume de vazios, preparação do corpo de prova, entre outros (LEVY, PARDINI, 2006).

A quantidade de reforço juntamente com seu direcionamento e sentido na matriz são um dos principais parâmetros na determinação da intensidade de aplicação da carga (LEVY, PARDINI, 2006).

Para a realização do ensaio, a norma ASTM-D3039 sugere que a taxa de deformação deve ser selecionado de modo a produzir o rompimento dentro de 1 a 10 min., com velocidade em torno de 1,5 mm/min.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O molde foi usinado em aço carbono 1020 e suas superfícies retificadas para garantirem um melhor acabamento dos laminados.

O material compósito foi fabricado com tecido 5HS (fibra de carbono de módulo intermediário) fornecido pela SIGMATEX e o sistema de resina epóxi tipo Bicomponente fornecido pela POLIPOX, na proporção de 30% de endurecedor. Esta resina tem como característica principal cura a temperatura ambiente e baixa viscosidade, aproximadamente 130 mPa.s, o que possibilita a injeção em altas frações volumétricas em fibra de carbono.

5. MÉTODOS

5.1 Confeção do Molde

O molde foi confeccionado a partir de três chapas de aço em uma fresadora semi automática da FERRO STAAL modelo FBPlus3-b situada na empresa MAJEW-TEC em São José dos Campos – SP, constituindo as seguintes medidas finais da parte inferior e superior: (210x295x25) mm; e espaçador de (210x295x3) mm. Foram feitas três cavidades no molde, uma

na parte inferior, para a injeção da resina, outro na parte superior, para a saída da resina, e no espaçador, para o alojamento das fibras de carbono, como ilustra na Figura 2.

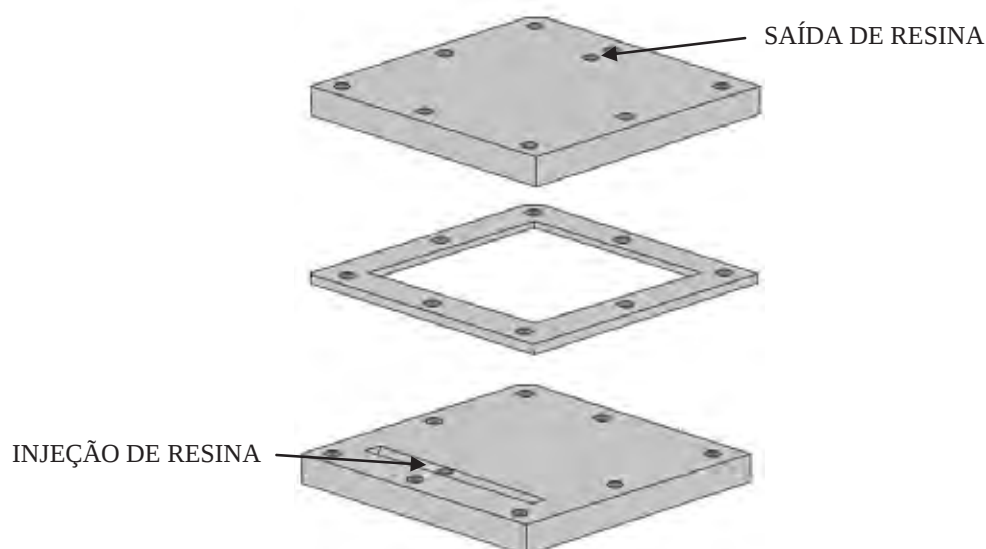


Figura 2 – Molde para o processamento via RTM.

5.2 Processamento RTM

O sistema RTM foi montado com uma injetora, adquirido no processo FAPESP 2006/02121-6.

Antes do início das injeções, foi necessária a preparação do molde: primeiramente foi aplicado silicone entre o espaçador e a parte inferior, e então aguardado o tempo de cura do silicone; em seguida foi colocado os tecidos de fibra de carbono na cavidade do espaçador, aplicando silicone entre o espaçador e a parte superior para o fechamento do molde com os tecidos no molde.

A injetora foi conectada ao molde através de uma válvula abre/fecha na parte inferior, e em seguida a saída na parte superior do lado oposto ao da injetora foi conectado ao *trap*, para

armazenar o excesso de resina após a injeção, como ilustrado nas Figuras 3 e Figura 4, que por sua vez foi conectada na bomba de vácuo, para a remoção de voláteis presente no molde e/ou na mistura de resina e endurecedor. Este equipamento encontra-se disponível no laboratório do DMT/FEG/UNESP em Guaratinguetá.



Figura 3 – Conexão da injeção no molde, da saída do molde para o *trap* e do *trap* para a bomba de vácuo.



Figura 4 – Entrada na parte inferior e saída na parte superior.

Foram processadas duas placas de compósitos, com empilhamento de 8 camadas de tecido 5HS (considerando 90° como trama e 0° como urdume), sendo que em uma das placas, os tecidos foram colocados com descontinuidades na parte central, sobrepondo sempre um tecido sem corte em ambos os lados, exemplificado na Figura 5.

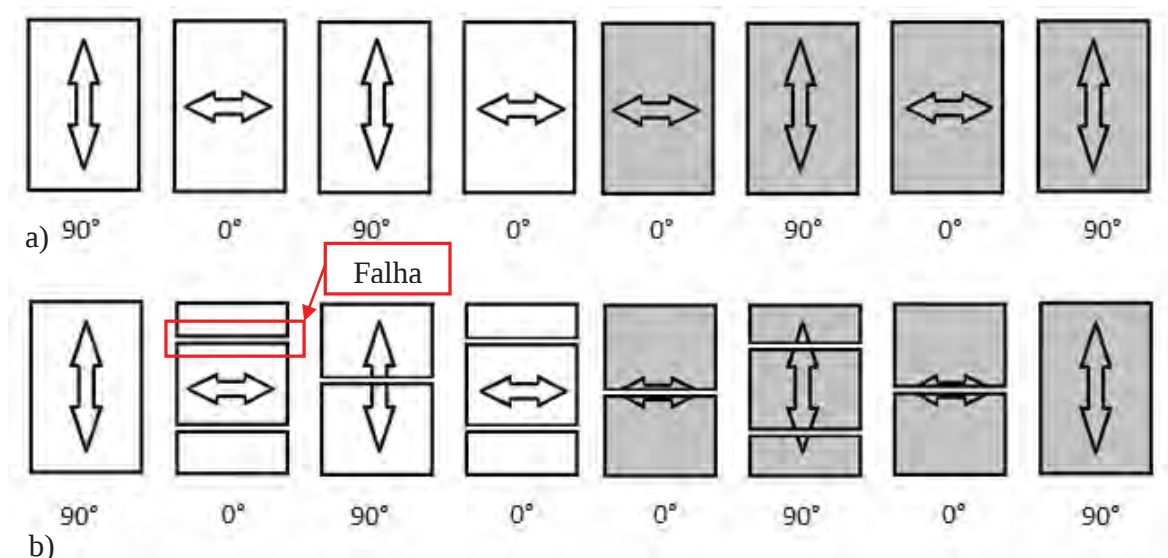


Figura 5 – Direcionamento do tecido: a) laminação sem descontinuidades; e b) com descontinuidades.

A resina foi preparada em três etapas: primeiramente 300 ml de resina foi desgaseificada sob vácuo de 0,75 bar a 25°C durante 15 min.; em seguida foram misturados 105 ml de endurecedor; e depois a mistura foi desgaseificada ao vácuo de 0,75 bar a 25°C durante 15 minutos. A mistura foi vertida no cilindro de injeção para prosseguimento do processo.

Com o sistema preparado, as injeções foram realizadas sob vácuo de 500 mbar e pressão de injeção em torno de 1,5 a 3,0 bar. Foi encerrado o ciclo de injeção quando houve completa homogeneização da resina na saída de vácuo, sem presença de bolhas. O tempo de injeção foi de aproximadamente 20 min. O ciclo de cura estabelecido para esse processo foi de 12 horas a temperatura de 60°C, e após a cura foi realizada a desmoldagem do compósito, Figura 6.

O mesmo procedimento de preparação para obtenção do compósito foi utilizado para a produção das duas placas de laminados com e sem descontinuidades.



Figura 6 – Desmoldagem do compósito.

5.3 Inspeção por Ultrassom

O equipamento utilizado para inspeção por ultrassom foi o modelo PSS-600 da MATEC INSTRUMENTS adquirido no projeto jovem pesquisador FAPESP processo 2006/02121-6. Este equipamento encontra-se disponível no Laboratório de Fadiga II do DMT/FEG/UNESP. A inspeção por ultrassom foi realizada no modo pulso-eco pelos métodos *A-Scan* e *C-scan*. A análise foi realizada por imersão em água, Figura 7, com resolução de 1x1 mm, velocidade de 100 mm/s e com transdutor de frequência de 2,25 MHz.

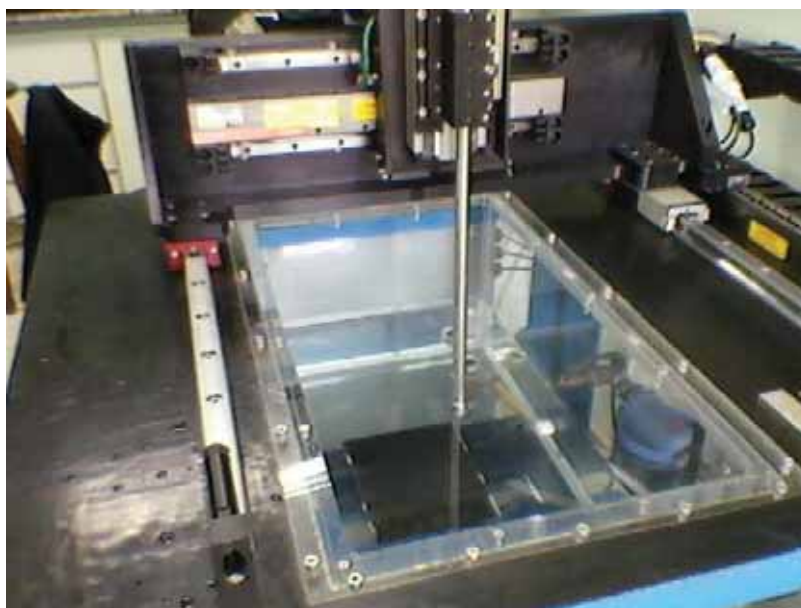


Figura 7 – Ultrassom pela técnica pulso eco imerso em água.

5.4 Termogravimetria (TG/DTG)

As amostras foram analisadas em uma termobalança marca SII Nanotechnology Seiko modelo TG/DTA 200, disponível no DMT/FEG/UNESP, adquirido no Projeto FAPESP 08/00171-1, com uma taxa de aquecimento de $10^{\circ}\text{C}.\text{min}^{-1}$, em atmosfera inerte de nitrogênio de 10 mL/min no intervalo de temperatura de 25 a 800°C , utilizando aproximadamente 10 mg de cada amostra. A análise foi aplicada aos compósitos sem e com descontinuidades no tecido, o que determinou a temperatura de degradação e a perda de massa em cada evento térmico, de acordo com a norma ASTM E2550 – 07.

5.5 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

As análises por calorimetria exploratória diferencial (DSC) dos compósitos sem e com descontinuidades foram realizadas em um calorímetro DSC marca SII Nanotechnology Seiko modelo 6220, disponível no DMT/FEG/UNESP adquirido no Projeto FAPESP 08/00171-1. As

análises foram realizadas sob atmosfera inerte de nitrogênio de 20 mL/min a uma taxa de aquecimento $10^{\circ}\text{C}.\text{min}^{-1}$, aquecendo de 30°C a 300°C , resfriando na mesma faixa de temperatura e reaquecendo novamente de 30°C a 300°C a $10^{\circ}\text{C}.\text{min}^{-1}$ cerca de 10 mg de cada amostra em porta amostra hermético para a verificação do grau de cura da resina e a temperatura de transição vítrea (T_g), de acordo com a norma ASTM D3418 – 08. A faixa de temperatura para as análises foi obtida a partir das temperaturas de degradação dos materiais.

5.6 Análise Dinâmico-Mecânico (DMA)

As análises dinâmico mecânico (DMA) dos compósitos sem e com descontinuidades foram realizadas por um analisador dinâmico-mecânica da SII Nanotechnology Inc. modelo DMS 6100, disponível no DMT/FEG/UNESP também adquirido no Projeto FAPESP 08/00171-1. Os parâmetros viscoelásticos foram obtidos por meio de uma excitação senoidal com frequência de 1 Hz da temperatura ambiente até 100°C a uma taxa de $3^{\circ}\text{C}.\text{min}^{-1}$. A faixa de temperatura para as análises foi obtida a partir das temperaturas de degradação dos materiais. As análises foram realizadas de acordo com as normas ASTM D7028 – 07 e ASTM D5418 – 07.

5.7 Ensaio de Tração

Os ensaios mecânicos foram realizados em uma máquina universal de ensaios da SHIMADZU modelo Autograph AG-X com célula de carga de 50 kN do Laboratório de Propriedades Mecânicas do DMT/FEG/UNESP. Os corpos de provas para os ensaios de tração foram confeccionados de acordo com a norma ASTM D3039, com as dimensões de (175x3x25) mm e velocidade de tração de 2 mm/min, Figura 8.

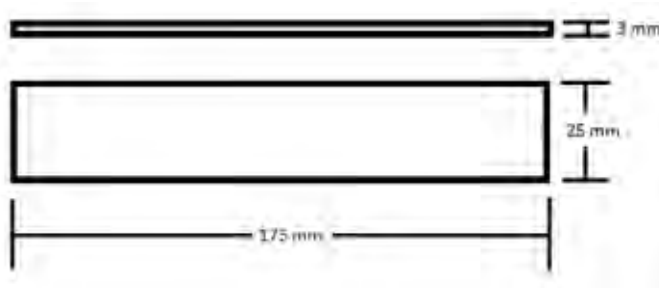


Figura 8 – Dimensões dos corpos de prova.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os compósitos obtidos no processo *RTM* foram inspecionados visualmente, sendo possível observar bom acabamento superficial, distribuição homogênea de resina em ambas as placas e ausente de empenamento.

No ensaio de ultrassom no modo *C-scan*, observou-se diferenças nas atenuações ao longo das placas de compósito sem falhas e com descontinuidades. No compósito sem descontinuidade no tecido, essa diferença é notada na parte superficial da placa pelo *Gate 1*, Figura 9, na qual observa-se o sinal de ganho entre 80 e 100 %. Também podendo ser observada na parte central da placa *Gate 2*, Figura 10, onde observa-se que o sinal de ganho está entre 40 e 80%, quando tomado como referência o espectro de atenuação na Figura 11, que significa a porcentagem recebida no transdutor. Isso mostra que a quantidade de onda absorvida pelos defeitos ou descontinuidades foi baixa, mostrando que não ocorreram diferenças significativas nas atenuações superficiais e no núcleo da placa de compósito. Porém, a parte superior do *Gate 1* e *Gate 2* recebeu maior sinal, onde essa diferença pode ser devido à diferença na impregnação da preforma, explicada pela localização de apenas um ponto de injeção e pelo sentido de injeção da resina, formando um gradiente de pressão de injeção.

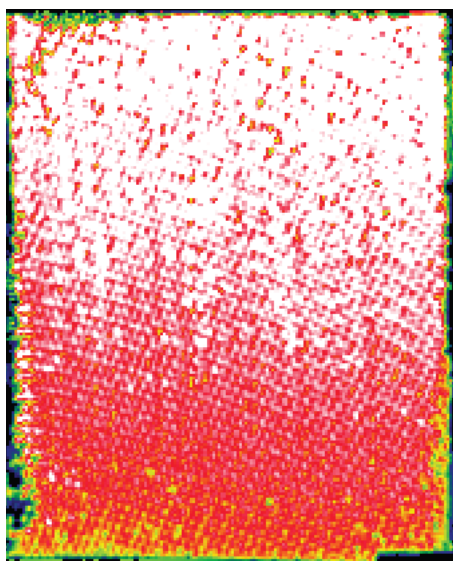


Figura 9 – C-scan placa sem descontinuidade no tecido, *Gate 1*.

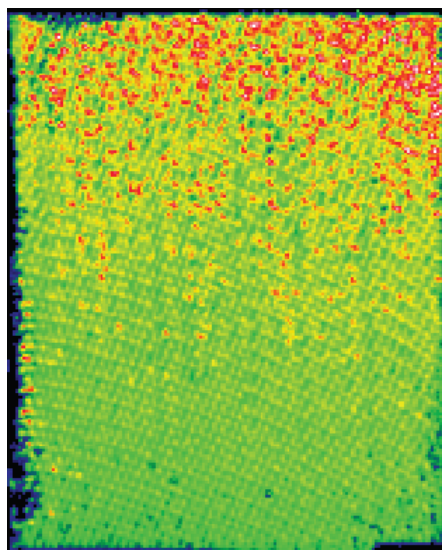


Figura 10 - C-scan placa sem descontinuidade no tecido, *Gate 2*.



Figura 11- Espectro de atenuação em percentual de ganho.

No compósito com discontinuidades, a diferença de atenuação é notada no centro da placa pelo *Gate 1*, Figura 12, na qual mostrou o sinal de ganho entre 40 e 100 %. No *Gate 2*, Figura 13, o centro da placa também mostrou o sinal de ganho entre 20 e 90 %. A atenuação detectou também a existência de discontinuidades nas posições em que foram realizados o empilhamento dos tecidos seccionados, onde as atenuações nos cortes foram de aproximadamente 100% no *Gate 1*, mostrada pelo alinhamento da coloração branca na região central da placa, e aproximadamente 20% no *Gate 2*, Figura 13, mostrada pela coloração azul na região central da placa. Já a diferença de sinal ao longo da placa, ocorreu devido a pequenas mudanças na permeabilidade da preforma, explicado pela descontinuidade do tecido.

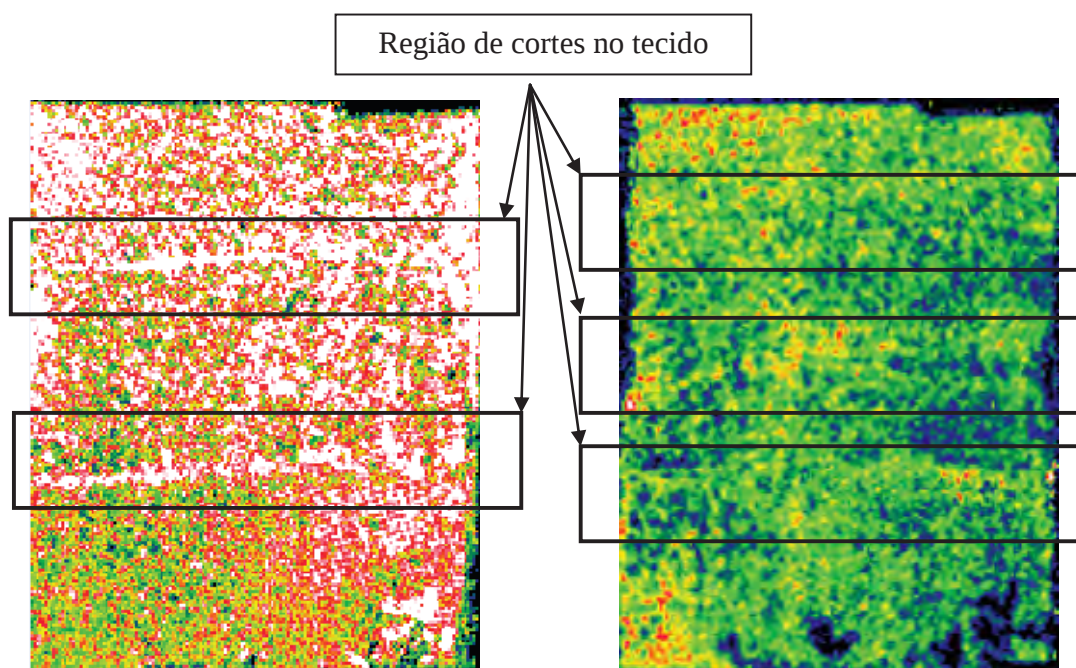


Figura 12 - C-scan placa com descontinuidade no tecido, *Gate 1*.

Figura 13 - C-scan placa com descontinuidade no tecido, *Gate 2*.



Figura 14 - Espectro de atenuação em percentual de ganho.

Na análise de TGA do compósito sem descontinuidade no tecido, gráfico da Figura 15, é possível observar uma perda de massa de 1,2% até a temperatura de 339,6°C. A maior perda de massa foi de 67,6%, que ocorreu entre as temperaturas de 339,6°C a 406,6°C, mostrando a degradação da matriz. Pela análise da DTG, é possível observar que estabilidade térmica pode ser considerada de 250°C, e também, que o compósito apresentou uma etapa de degradação, onde a maior velocidade ocorreu à temperatura de 372,0°C.

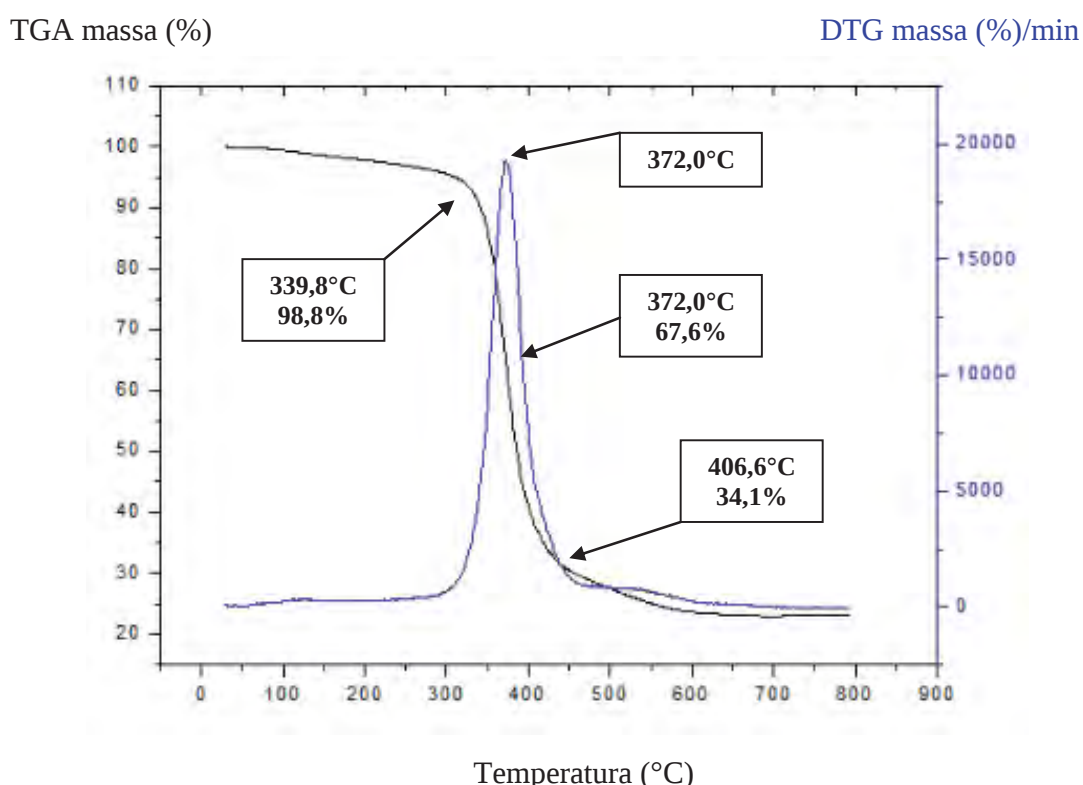


Figura 15 – TG e DTG do compósito sem descontinuidade no tecido.

Na análise de TGA do compósito com descontinuidade no tecido, gráfico da Figura 16, é possível observar uma perda de massa de 3,1% até a temperatura de 340,1°C, a maior perda de massa foi de 43,3%, que ocorreu entre as temperaturas de 340,1°C a 465,2°C, indicando a degradação da matriz. Pela análise da DTG, é possível observar que a estabilidade térmica pode ser considerada de 250°C, e também, que o compósito apresentou uma etapa de degradação, onde a maior velocidade ocorreu à temperatura de 376,3°C..

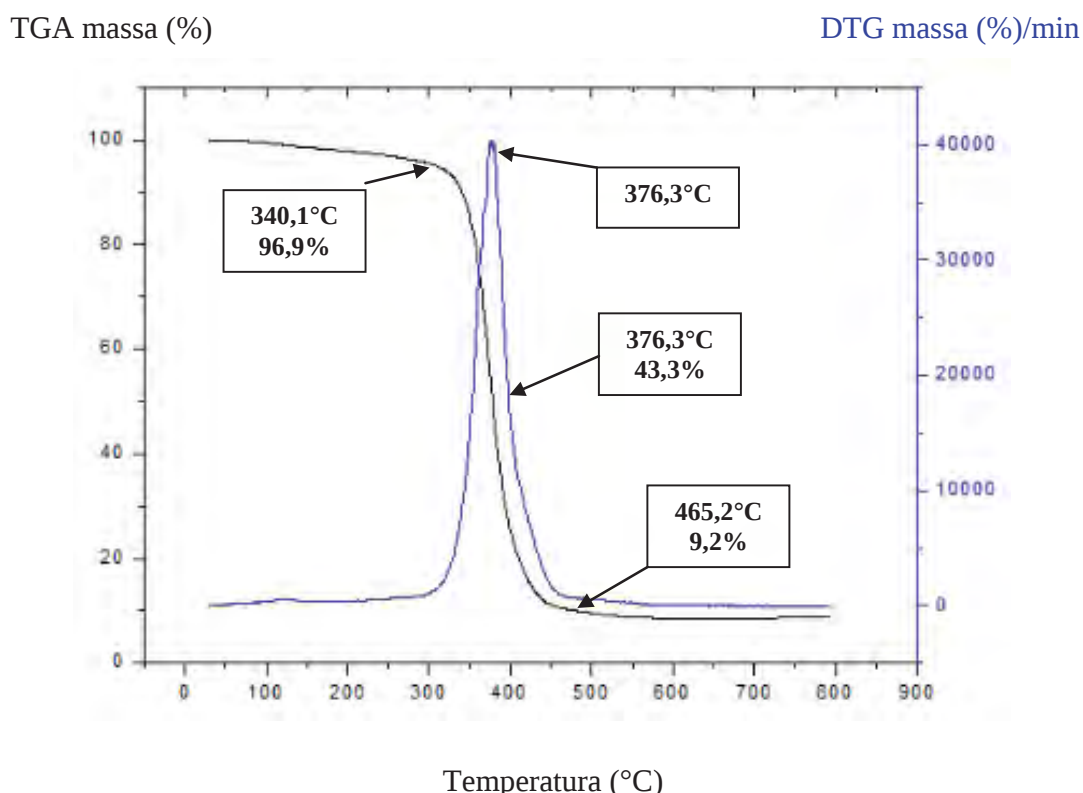


Figura 16 – TG e DTG do compósito com descontinuidade no tecido.

Na análise de DSC do compósito sem descontinuidade no tecido, de acordo com a Figura 17, no primeiro aquecimento é possível observar na curva picos exotérmicos as temperatura de aproximadamente 150°C e 180°C, as quais representam a energia liberada de ligações cruzadas remanescentes do polímero, e então a estabilidade até 300°C, sem apresentar outros picos exotérmicos ou endotérmicos. Fatos que mostram que o compósito não estava completamente

curado, pois apresentou diferença de calor residual entre os aquecimentos, efeito causado pela formação do polímero. Também é possível observar que no segundo aquecimento apresentou um desvio da linha base, apresentando a temperatura de transição vítrea (T_g) a temperatura de 73°C, e também, uma relaxação de tensão do material a temperatura de 140°C.

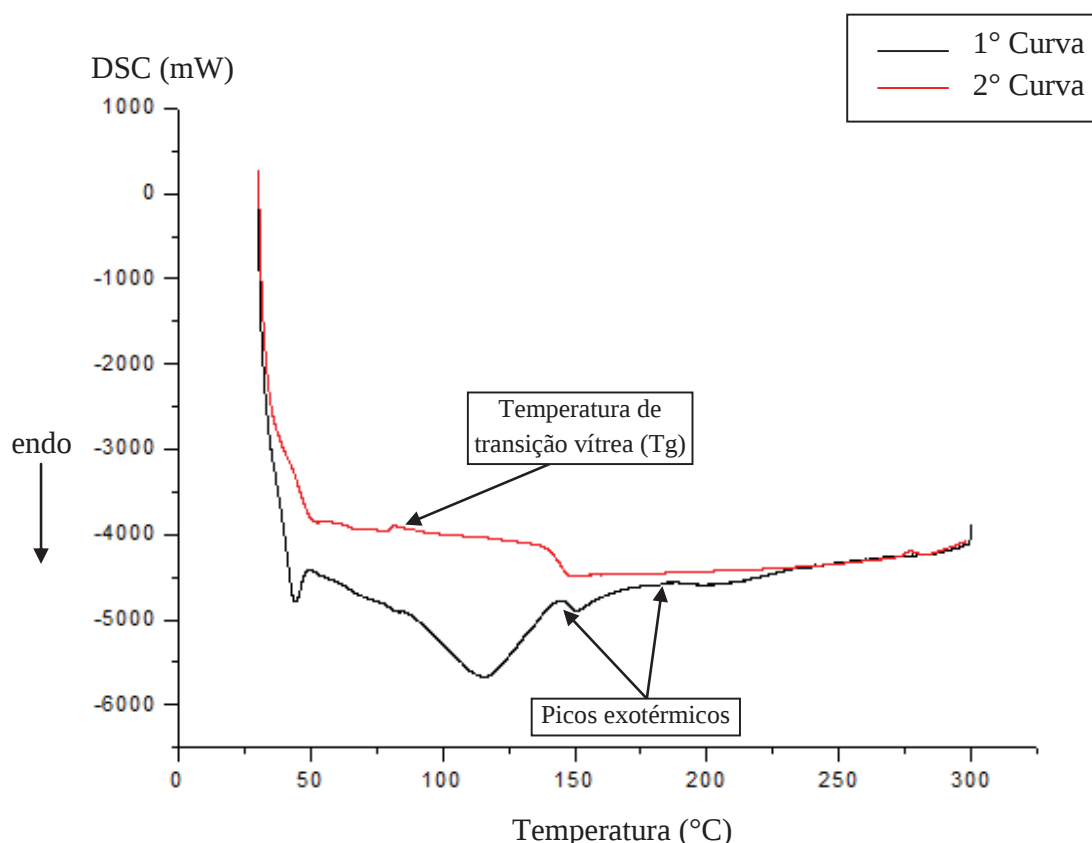


Figura 17 – DSC do compósito sem descontinuidade no tecido.

Na análise de DSC do compósito com descontinuidade no tecido, de acordo com a Figura 18, no primeiro aquecimento é possível observar na curva picos exotérmicos as temperatura de aproximadamente 175°C e 225°C que se diferem do compósito sem descontinuidade. Os picos representam as energias liberadas de ligações cruzadas remanescentes do polímero, após o pico a 225°C a amostra não apresentou outros picos exotérmicos ou endotérmicos. Assim como no compósito sem descontinuidade. É possível observar que no segundo aquecimento a curva

apresentou um desvio da linha base, apresentando a temperatura de transição vítrea (T_g) a temperatura de 73°C, assim como no compósito sem descontinuidades.

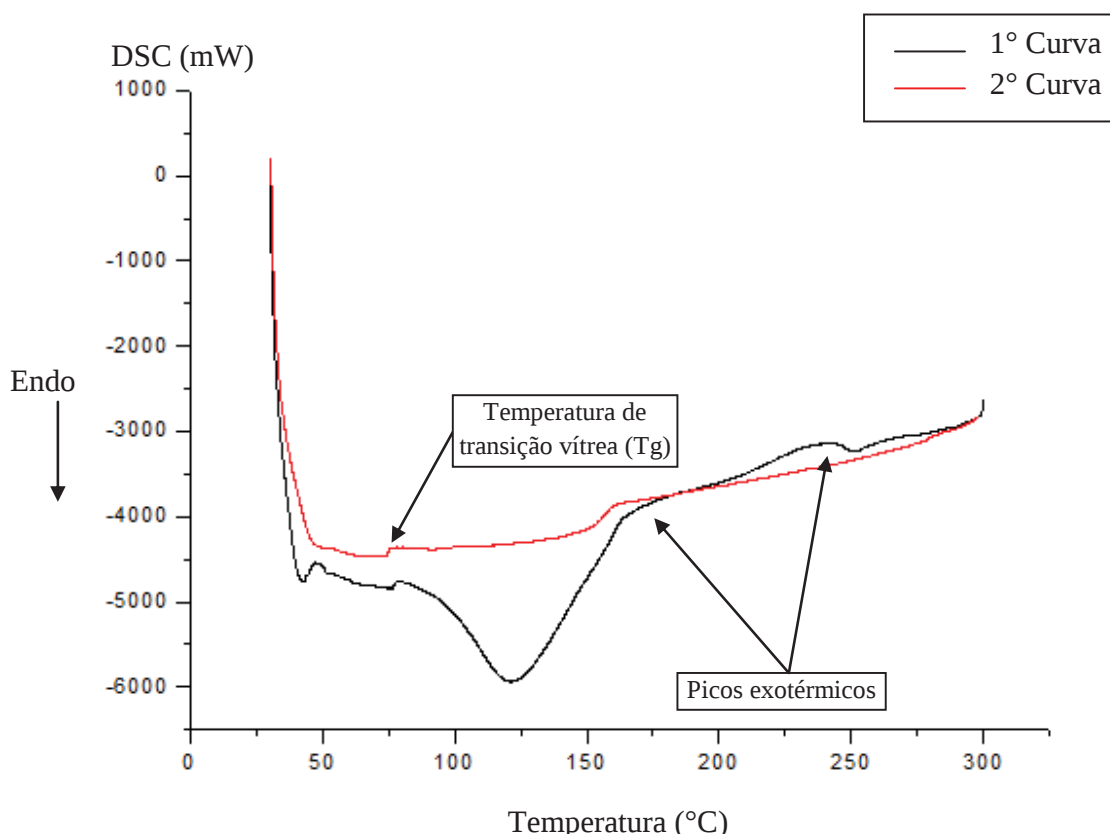


Figura 18 – DSC do compósito com descontinuidade no tecido.

Na análise de DMA do compósito sem descontinuidade no tecido, de acordo com a Figura 19, foi possível observar que a característica relacionada ao entrecruzamento da matriz está relacionada ao perfil do pico da curva E'' , que apresentou um leve alargamento, ocasionado devido ao grau de cura adicional ou residual do compósito, comprovado nas análises de DSC. Pode-se considerar que a amostra apresentou decréscimo no módulo E' até a temperatura de cerca de 70°C, ocasionando mudanças em suas propriedades mecânicas devido a passagem pela temperatura de transição vítrea. Já as curvas de E'' e $\tan\delta = E''/E'$ apresentaram picos nas temperaturas de 51,8°C e 59°C.

A Tg do compósito sem descontinuidade no tecido foi em torno de 47,7°C, considerando-se como a determinação da Tg pelo encontro das tangentes de E', também observado nas análises de DSC, na qual mostrou a Tg em torno de 50°C.

Assim, pela análise da curva de DMA pode-se considerar 35°C como temperatura máxima de aplicação intermitente para este material, sem alteração de suas propriedades.

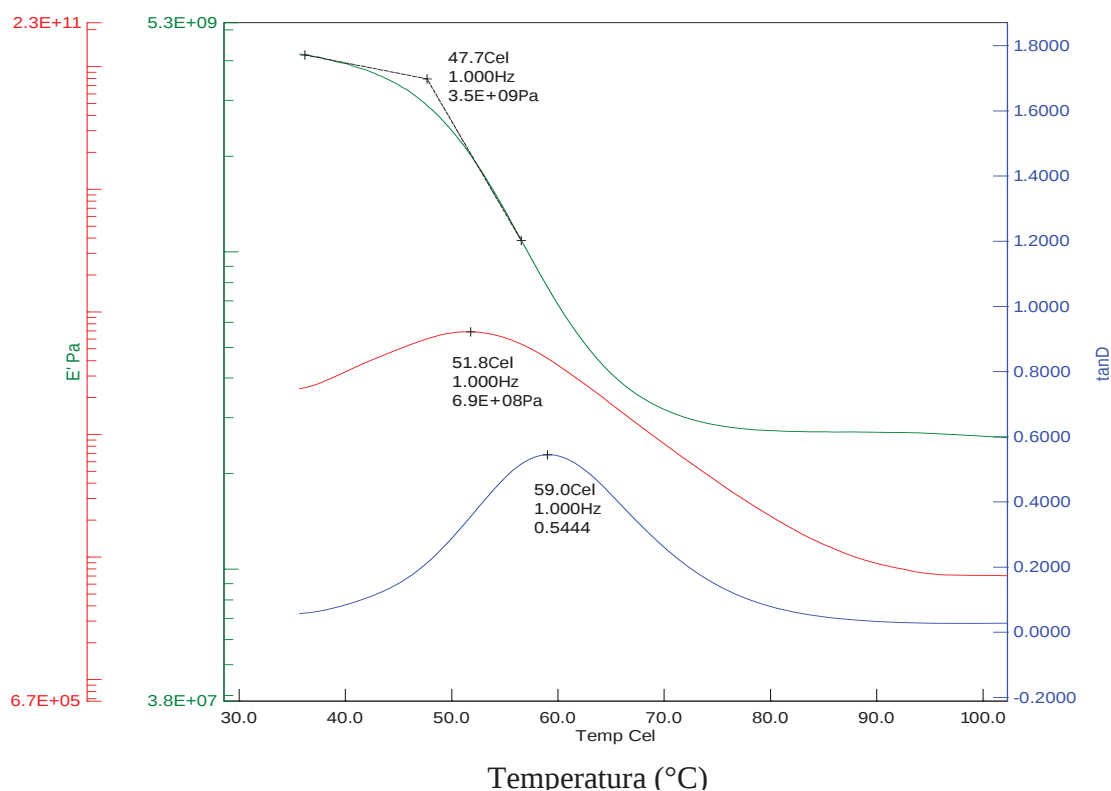


Figura 19 – DMA do compósito sem descontinuidade no tecido.

Na análise de DMA do compósito com descontinuidade no tecido, baseando-se na Figura 20, observou-se eventos térmicos parecidos com o compósito sem descontinuidades, pelo fato de utilizarem o mesmo ciclo de cura, apresentando Tg a temperatura de 49,1°C, picos de E'' e tanδ em 52,9°C e 60,9°C.

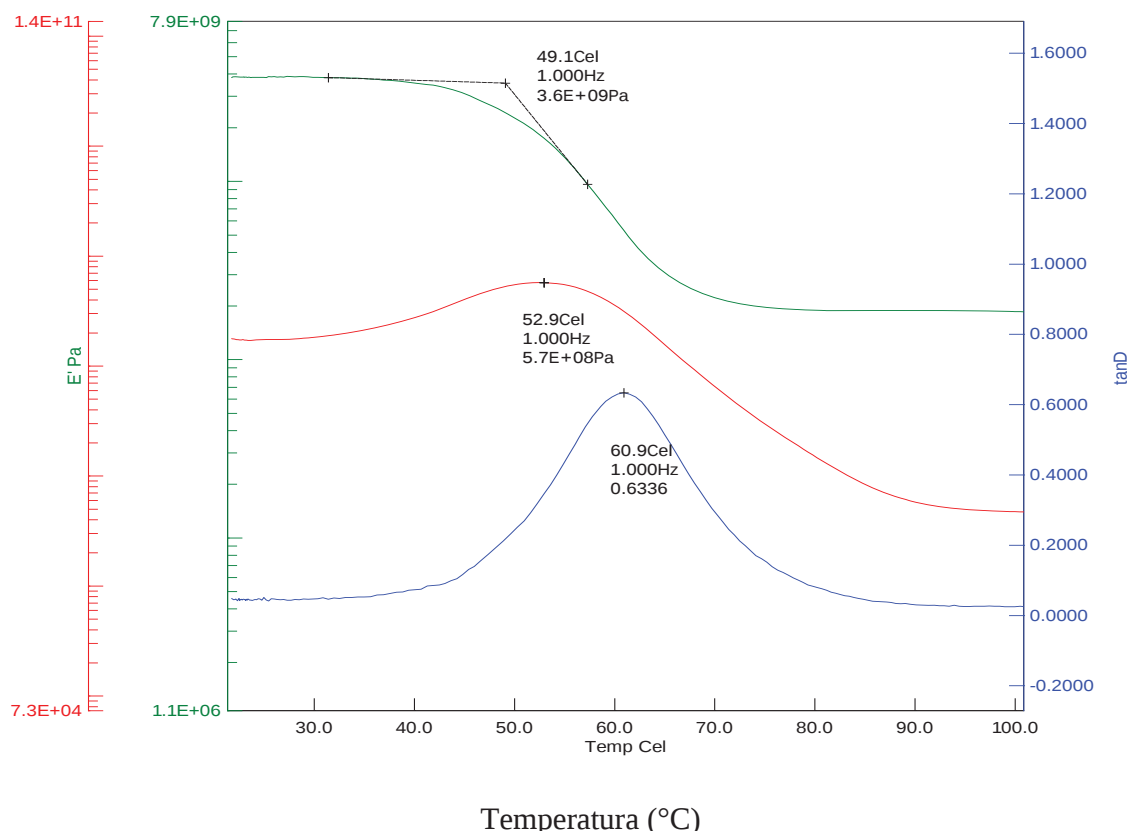


Figura 20 – DMA do compósito com descontinuidade no tecido.

Para a caracterização mecânica foram realizados ensaios de tração em cinco corpos de prova retirados de diferentes partes de ambas as placas, totalizando dez corpos de prova, sendo de 1 a 5 os corpos de provas referentes à primeira placa, sem cortes, e de 6 a 10 referentes à segunda placa, já com cortes propositalmente entre as camadas, como mostra a Figura 21 antes do ensaio e na Figura 22 após o ensaio.

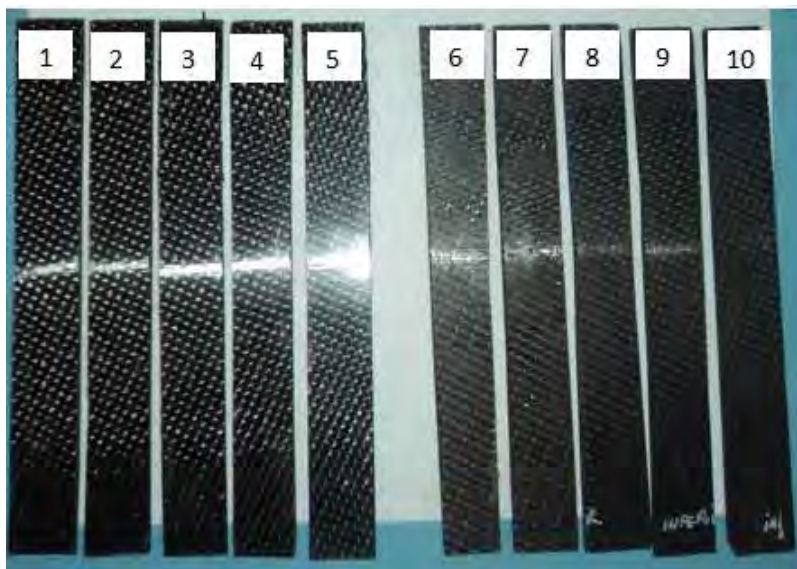


Figura 21 – Corpos de prova antes do ensaio de tração.

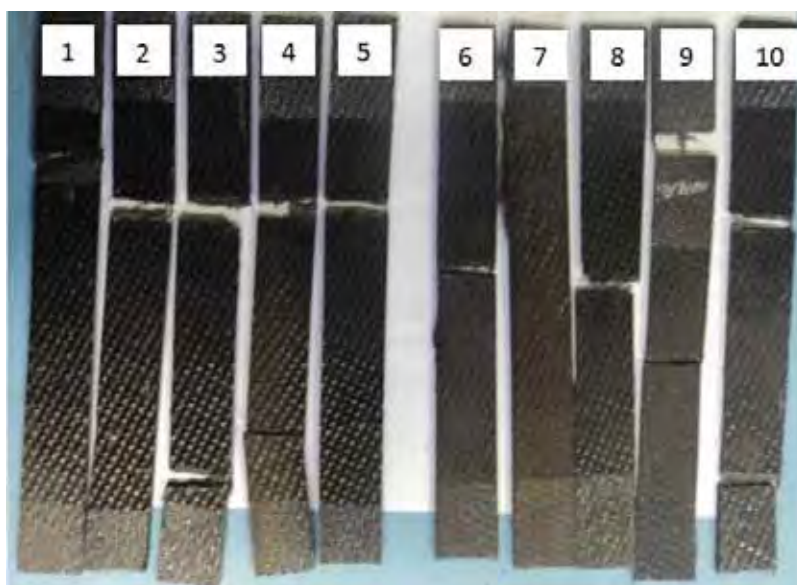


Figura 22 – Corpo de prova após do ensaio de tração.

Os resultados do ensaio de tração realizados para avaliar o valor da tensão máxima ($\sigma_{\text{máx}}$) e o módulo de elasticidade (E) teórico dos corpos de prova encontram-se nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1- Valores de carga máxima e de módulo de elasticidade no compósito sem falhas no tecido.

Amostras	1	2	3	4	5	Média	Desvio padrão
$\sigma_{\text{máx}}$(MPa)	583	479	506	611	620	559	63
E(GPa)	70	58	70	76	74	70	6

Tabela 2- Valores de carga máxima e de módulo de elasticidade no compósito com descontinuidades.

Amostras	6	7	8	9	10	Média	Desvio padrão
$\sigma_{\text{máx}}$(MPa)	464	428	495	421	434	448	31
E(GPa)	63	56	64	55	56	49	11

O compósito sem descontinuidade no tecido apresentou tensão máxima média entre os corpos de prova de (559 ± 63) MPa e módulo de elasticidade de (70 ± 6) GPa, já o compósito com descontinuidades apresentou tensão máxima média de (448 ± 31) MPa e módulo de elasticidade de (49 ± 11) GPa.

Observou-se que o compósito sem descontinuidade no tecido apresentou maior tensão máxima, porem maior desvio padrão, em relação ao compósito com descontinuidade, que obteve mais repetibilidade nos ensaios. O módulo de elasticidade também apresentou maior valor, porém menor desvio padrão que o compósito com descontinuidade. As baixas diferenças nos desvios padrões dos dois tipos de compósitos, mostraram que a infiltração da resina entre os espaços das fibras dos tecidos foram homogêneas, até mesmo no compósito com descontinuidade no tecido, onde a tendência da resina seria caminhar por espaços vazios, onde foi mostrado no C-scan uma maior variação na atenuação, Figura 12 e 13, causadas pelas

descontinuidades nos tecidos. Outro fator que poderia influenciar na variação dos resultados poderiam ser as preparações dos corpos de provas com pequenas imperfeições, causando concentrações de tensões e influenciando nos resultados finais, porém essas diferenças não causaram grandes influências nos resultados finais devido ao baixo desvio padrão.

Comparando-se os valores com a liga de alumínio 7050 T7451, que se trata de uma liga para construções de aeronaves, a qual apresenta tensão máxima de 502 MPa e módulo de elasticidade de 65 GPa. O compósito sem descontinuidade apresentou maior tensão máxima e módulo de elasticidade, enquanto que o compósito com descontinuidades apresentou valores de tensão máxima 52 MPa menor e módulo de elasticidade menor que a liga de alumínio, mostrando que é possível a substituição da liga de alumínio por compósitos, em aplicações com cargas estáticas (CIOFFI, VOORWALD, CAMARGO, REZENDE, ORTIZ, AMBROSIO, 2010).

7. CONCLUSÃO

O molde apresentou bom acabamento superficial após a usinagem, o que refletiu em um bom acabamento superficial dos compósitos obtidos. Seu manuseio foi fácil, por se tratar de um molde relativamente pequeno, leve, de fácil desmoldagem e limpeza.

Por inspeção visual foi possível observar que a distribuição de resina nos compósitos foi bem sucedida, com bom acabamento superficial e completa impregnação.

As variações nas atenuações das imagens do *C-scan* no compósito sem descontinuidades no tecido mostraram que ocorreram diferenças de sinal nos *Gates 1, 2*, indicando que houve diferença na impregnação, devido ao gradiente de pressão da resina. Já no compósito com falhas no tecido, foi observado que ocorreram diferenças de sinal no meio da placa, comprovando as falhas no tecido, mostrando mudanças significativas referentes as diferenças de permeabilidade ao longo da placa.

Nas análises das curvas de TGA, foi possível observar que não houveram diferenças significativas nas temperaturas de degradação dos compósitos sem e com descontinuidades no tecido, além de terem mostrado nas curvas de DTG que os compósitos se degradaram em uma única etapa.

Nas análises das curvas de DSC, foi possível observar picos exotérmicos nos primeiros aquecimentos mostrando deficiência no ciclo de cura empregado. Nas análises das curvas de DMA, os compósitos apresentaram mesmo ponto de transição vítrea mostrada pelos picos do módulo de dissipação viscosa também verificado pelo DSC, e que confirmou a deficiência no ciclo de cura, devido aos picos levemente alargados.

A deficiência do ciclo de cura dos compósitos, podem ser explicado pelas matrizes serem de resina bicomponente, e conseqüentemente a preparação das mesmas não ter atendido a proporção exigida.

Nos ensaios mecânicos de tração, observou-se que o compósito sem descontinuidade apresentou maior tensão máxima com maior variação nos resultados em relação ao compósito com descontinuidade, e maior módulo de elasticidade com menor variação nos resultados em relação ao compósito com descontinuidade.

Em comparação realizada com a liga de alumínio 7050 T7451, foi possível obter

resultados satisfatórios em ambos os compósitos, com desempenhos comparáveis em tração na direção do urdume. O compósito com descontinuidades apresentou um decréscimo nas propriedades mecânicas, o que já era esperado. Mesmo assim, os resultados demonstraram que é possível utilizar sobras e retalhos para os projetos de engenharia obtidos via RTM, mas que ainda é necessário realizar estudos aprofundados para aperfeiçoar as técnicas do processo, principalmente, nas técnicas de empilhamento das peças remanescentes de tecido.

8. REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E2550-07**: Standard Test Method for Thermal Stability by Thermogravimetry. West Conshohocken. 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D7028 - 07e1**: Standard Test Method for Glass Transition Temperature (DMA Tg) of Polymer Matrix Composites by Dynamic Mechanical Analysis (DMA). West Conshohocken. 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3418 - 08**: Standard Test Method for Transition Temperatures and Enthalpies of Fusion and Crystallization of Polymers by Differential Scanning Calorimetry.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D5418 - 07**: Standard Test Method for Plastics: Dynamic Mechanical Properties: In Flexure (Dual Cantilever Beam). West Conshohocken. 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3039 / D3039M**: Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. West Conshohocken. 2008.

ANTONUCCI, V., GIORDANO, M., NICOLAIS, L., DI VITA, G. A simulation of the non isothermal resin transfer molding process. **Polymer Engineering and Science**, Napoli, dez. 2000. c. 40, p. 2471-2481.

CANEVAROLO, Jr.,S.V. **Técnicas de Caracterização de Polímeros**. 1. ed. São Paulo: Artliber, 2004. 448 p.

CIOFFI, M. O. H.; VOLPIANO, G.; VOORWALD, H. J. C. ; REZENDE, M.C. Carbon fiber non-crimp multi-axial reinforcement and epoxy mono-component system composite: fatigue behavior. **Procedia Engineering**, 2010. v. 2, p. 341-348.

DON, E. B., RODERIC, K. S. **Nondestructive Evaluation: A Tool in Design, Manufacturing, and Service Revised Edition**. 1. ed. Texas: CRC, 2000, 608 p.

GOROVAYA, T. A., KOROTKOK, V. N. Quick cure of thermosetting composites. **Composites part A: Applied Science and Manufacturing**, Moscow, 1996. Vol. 27, cap. 10, p. 953-960.

HASIM, P., NIHAT, T. Effect of load and speed on the wear behaviour of woven glass fabrics and aramid fibre-reinforced composites. **Wear**, Elazığ, jul, 2002. v. 252, cap. 11-12, p. 979-984.

HILLERMEIER, R. W., SEFERIS, J. C. Interlayer toughening of resin transfer molding composites. **Composites part A: Applied Science and Manufacturing**, Seattle, mai. 2001. v. 32, cap. 5, p. 721-729.

HULL, D. **An Introduction to Composite Materials**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1981. 246 p.

JANG, J., SHIN, S. Toughness improvement of tetrafunctional epoxy resin by using hydrolysed poly(ether imide). **Polymer**, Seoul, jul. 1995. v. 36, cap. 6, p. 1199-1207.

KUMAR, A. A., ALAGAR, M., RAO, R. M. V. G. K. Synthesis and characterization of siliconized epoxy-1,3bis(maleimido)benzene intercrosslinked matrix materials. **Polymer**, Chennai, fev. 2002. v. 43, cap. 3, p. 693-702.

LARSSON, F., SVENSSOM, L. Carbon, polyethylene and PBO hybrid fibre composites for structural lightweight armour. **Composites part A: Applied Science and Manufacturing**, Tumba, fev. 2002. v. 33, cap. 2, p. 221-231.

LAWRENCE, J. M., HSIAO, K. T., DON, R. C., SIMACEK, P., ESTRADA, G., SOZER, E. M., STADFELD, H. C., ADVANI, S. G. An approach to couple mold design and on-line control

to manufacture complex composite parts by resin transfer molding. **Composites part A: Applied Science and Manufacturing**, Newark, jul. 2002. v. 33, p. 981-990.

LEVY, F. N., PARDINI, L. C. **Compósitos estruturais - Ciência e tecnologia**. 1. ed. São Paulo: Edgar Blücher, 2006. 336 p.

LUCAS, E. F.; SOARES, B. G.; MONTEIRO, E. **Caracterização de polímeros – Determinação de peso molecular e análise térmica**. 1. ed. Rio de Janeiro: E-paper, 2001.

LUNDSTRÖM, T. S. The permeability of non-crimp stitched fabrics. **Composites part A: Applied Science and Manufacturing**, dez. 2000. v. 31, cap. 12, p. 1345-1353.

McILHAGGER, A., BROWN, D., HILL, B. The development of a dielectric system for the on-line cure monitoring of the resin transfer moulding process. **Composites part A: Applied Science and Manufacturing**, Newtownabbey, dez. 2000. v. 31, cap. 12, p. 1373-1381.

MIRACLE, D. B., DONALDSON, S. L. **ASM Handbook: Composites**. 1. ed. Ohio: ASM International. v. 21, 1201 p.

POLIPOX – Tecnologia em polímeros técnicos. Disponível em: <<http://www.polipox.com.br>>. Acesso em 16 jan. 2012.

REZENDE M. C. O uso de compósitos estruturais na indústria aeroespacial. **Polímeros - Ciência e Tecnologia**, São José dos Campos, jun. 2000. v. 10, n°2, p. e4-e10.

RICARDO, A. **Ensaio por Ultra-som**. Ed. Jul./2008. São Paulo: Abende, 2008. 97 p.

SANIHYL R. W. **Controle Estatístico de Qualidade**. 1. ed. Rio de Janeiro: Campus, 2009. 352 p.

VINSON, J. R., SIERAKOWSKI, R. L. **Mechanics of Structural Systems – The Behavior of Structures Composed of Composite Materials**. 1. ed. Waterloo: Kluwer Academic Publishers, 1993. 336 p.

YASHIRO, S.; TAKATSUBO, J.; TOYAMA, N. An NDT technique for composite structures using visualized Lamb-wave propagation. **Composites Science and Technology**, Matsuyama, dez. 2007. v. 67, cap. 15-16, p. 3202–3208.