**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO CICLO DE CURA
NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
COMPÓSITOS FABRICADOS PELO PROCESSO
DE INFUSÃO DE RESINA**

Caetano Belda Martinez

**Dissertação apresentada à Escola de
Engenharia de São Carlos, da Universidade
de São Paulo, como parte dos requisitos
para a obtenção do Título de Mestre em
Engenharia Mecânica**

Orientador: Prof. Dr. Jonas de Carvalho

**São Carlos
2011**

CAETANO BELDA MARTINEZ

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO CICLO DE CURA
NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
COMPÓSITOS FABRICADOS PELO PROCESSO
DE INFUSÃO DE RESINA**

**Dissertação apresentada à Escola de
Engenharia de São Carlos, da Universidade
de São Paulo, como parte dos requisitos
para a obtenção do Título de Mestre em
Engenharia Mecânica**

Área de Concentração: Projeto Mecânico

Orientador: Prof. Dr. Jonas de Carvalho

**São Carlos
2011**

**ESTE EXEMPLAR TRATA-SE DA
VERSÃO CORRIGIDA.
A VERSÃO ORIGINAL
ENCONTRA-SE DISPONÍVEL
JUNTO AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA DA
EESC-SP**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

M385e Martinez, Caetano Belda
 Estudo da influência do ciclo de cura nas propriedades
mecânicas de compósitos fabricados pelo processo de
infusão de resina / Caetano Belda Martinez ; orientador
Jonas de Carvalho. – São Carlos, 2011.

Dissertação (Mestrado-Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica e Área de Concentração em Projeto
Mecânico) -- Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo, 2011.

1. Compósitos. 2. Processo de cura. 3. Variação de
propriedades. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): Engenheiro CAETANO BELDA MARTINEZ.

Dissertação defendida e julgada em 02/05/2011 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Associado **JONAS DE CARVALHO - (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO

Prof. Associado **JOSÉ RICARDO TARPANI**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO

Prof. Dr. **CARLOS ALBERTO CIMINI JUNIOR**
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

APROVADO

Prof. Associado **MARCELO AREIAS TRINDADE**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica

Prof. Associado **PAULO CÉSAR LIMA SEGANTINE**
Presidente da Comissão da Pós-Graduação da EESC

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Jonas de Carvalho, pela paciência e apoio durante o desenvolvimento e orientação deste trabalho.

À Escola de Engenharia de São Carlos, pela oportunidade de realização deste trabalho.

À Universidade de São Paulo, pela estrutura oferecida ao desenvolvimento das habilidades necessárias ao desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores Walter Ponge e Raul Gonzalez Lima, pelos ensinamentos e recomendação no ingresso ao curso.

Ao Sr. Edouard Zurstrassen, pelo apoio e ensinamentos.

Às empresas Owens Corning e Tecsis, pela oportunidade e estrutura oferecidas.

A minha esposa Beatriz Martinez, pelo suporte nesta importante fase de minha vida.

À minha família, pelo apoio incondicional em todas as etapas de minha vida.

RESUMO

MARTINEZ, C. B. – **“Estudo da influência do ciclo de cura nas propriedades mecânicas de compósitos fabricados pelo processo de infusão de resina”** – Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2011.

Este trabalho apresenta conceitos da fabricação de compósitos com o objetivo de avaliar a influência das condições do processo de fabricação nas propriedades mecânicas do laminado.

É comum utilizar ensaios mecânicos para determinar as propriedades do produto final a fim de otimizar e adicionar confiabilidade ao projeto e o objetivo deste trabalho é estudar uma das fontes de variação das características em compósitos estruturais, que é o processo de cura.

Embora pela regra das misturas se considere que a relação ponderada entre os elementos de matriz e reforço resulte na propriedade final do laminado, é necessário entender que existe influência do processo de fabricação para a obtenção deste potencial.

O processo de cura é uma das etapas mais importantes na fabricação de componentes em polímeros reforçados e consiste na utilização de certo nível de energia que propicia a polimerização da matriz e formação da estrutura monolítica do material compósito.

Para a simulação desta variação, através de ensaios laboratoriais são definidas condições de cura que reflitam uma diferença razoável de temperatura de transição vítrea. Com a definição dos parâmetros de cura, laminados bi diagonais são fabricados por processo de moldagem por transferência de resina assistida por vácuo e as características mecânicas destes laminados são mensuradas em ensaios que seguem padrões normalizados pela ISO em condições de tração, compressão e flexão. Os resultados destes ensaios são comparados entre si, a fim de direcionar o projetista em compósitos para a relevância e impacto do processo produtivo na vida do componente.

Palavras-chave: Compósitos. Processo de cura. Variação de propriedades.

ABSTRACT

MARTINEZ, C. B. – **“Study of curing cycle influence on mechanical properties for composites manufactured by resin infusion process”** – Dissertation (M. Sc.). Universidade de Sao Paulo. Sao Carlos, 2011.

This work introduces manufacturing concepts for composites parts targeting to evaluate the influence of manufacturing process conditions in the final mechanical properties of the laminates.

It is usual to utilize mechanical tests to define and predict properties of the actual component aiming to optimize and add reliability to the design. The main purpose of this study is to evaluate one of the main sources of variation that becomes form the curing process.

Although from the mixture rules is possible to consider the final product property as the weighted relation between matrix and reinforcement properties, its needed to understand that the manufacturing process affects the achievement of this potential.

Curing is one of the most important steps on the composites manufacturing and consists in the use of some source of energy to start matrix polymerization and formation of a monolithic structure with at least two phases from when becomes the composites concept.

To simulate this variation through laboratorial tests, firstly the curing condition was defined to reflect a reasonable difference of glass transition temperature between the samples. After the definition of the curing condition bi diagonal laminate panels were prepared through vacuum assisted resin transfer molding and their mechanical characteristics evaluated by laboratory tests following international ISO standards in tensile, compression and flexural trials. Results of the tests are compared for the purpose of guiding composites designers for the relevance of manufacturing process and its impact on the component life.

Keywords: Composites. Curing Process. Properties Variation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Famílias de materiais compósitos (CALLISTER, 1985)	4
Figura 2 - Produtividade e performance (AZOM, 2001)	9
Figura 3 – Infusão (OWENS CORNING, 2010a)	10
Figura 4 – Pultrusão (OWENS CORNING, 2010b)	10
Figura 5 - Enrolamento filamentar (AZOM, 2001)	11
Figura 6 - Esquema de cura em autoclave (JONES, 1994)	12
Figura 7 - Medição de temperatura em estufa de pós-cura	16
Figura 8 - Imagem térmica de um molde aquecido a 40°C	17
Figura 9 - Imagem térmica de um molde a 60°C	17
Figura 10 - Estruturas em compósitos no A380 (FAA, 2009)	20
Figura 11 - Tendência do mercado eólico	22
Figura 12 - Seção de uma pá eólica	23
Figura 13 - Vaso de pressão (WWW.ADOPTTECH.COM, 2010)	24
Figura 14 – Curva de ensaio de tração	27
Figura 15 - Corpos de prova tipo 3 (ISO 527-4:1997)	i
Figura 16 - Fabricação dos corpos de prova (Fonte: ISO 527-4:1997)	28
Figura 17 - Corpo de provas solicitado	29
Figura 18 - Preparação de corpos de prova do com <i>tab</i> (ISO 14126:1999)	30
Figura 19 - Dispositivo de compressão ITRII (ISO 14126:1999)	31
Figura 20 - Dimensões do corpo de prova (ISO 14126:1999)	32
Figura 21 - Ensaio de flexão (IDES, 2010)	33
Figura 22 – Análise DSC	34
Figura 23 – Preparação da amostra para medição de Tg	40
Figura 24 – Prensagem do cadinho	40
Figura 25 – Colocação dos cadinhos no equipamento	41
Figura 26 – Esquema de infusão de painéis	42
Figura 27 – Limpeza do molde	43
Figura 28 – Corte da camada com auxílio do gabarito de corte	45
Figura 29 – Posicionamento e alinhamento das camadas	45
Figura 30 – Posicionamento da fita elastomérica para vedação	47
Figura 31 – Posicionamento da arruela calibrada	47
Figura 32 – Sistema antes do fechamento	48
Figura 33 – Fechamento do molde	48
Figura 34 – Tara do cadinho	51
Figura 35 – Pesagem da amostra	51
Figura 36 – Processo de calcinação	52
Figura 37 – Resfriamento em ambiente seco	52
Figura 38 – Pesagem após a calcinação	52
Figura 39 – Condição de cura das amostras 6 e 7	55
Figura 40 – Condição de cura	57
Figura 41 – Tração a 45°	59
Figura 42 – Tração a 0°	59

Figura 43 - Tração a 0° e baixa cura	60
Figura 44 - Corpos de prova 0° e baixa cura.....	61
Figura 45 - Tensão a 0° e alta cura.....	62
Figura 46 - Corpos de prova a 0° e alta cura.....	63
Figura 47 - Tração a 45° e baixa cura	64
Figura 48 - Corpos de prova a 0° e baixa cura.....	65
Figura 49 - Tração a 45° e alta cura	66
Figura 50 - Corpos de prova ensaiados em tração a 45° e alta cura.....	67
Figura 51 - Corpos de prova a 45° e 0°	68
Figura 52 - Compressão a 0° e baixa cura.....	69
Figura 53 - Corpos de prova em compressão a 0° e baixa cura	70
Figura 54 - Compressão a 0° e alta cura.....	71
Figura 55 - Corpos de prova a 0° e alta cura.....	72
Figura 56 - Compressão a 45° e baixa cura.....	73
Figura 57 - Corpos de prova de compressão a 45° e baixa cura	74
Figura 58 - Compressão a 45° e alta cura.....	75
Figura 59 - Corpos de prova de compressão a 45° e alta cura	76
Figura 60 - Flexão em corpos de prova a 45°	77
Figura 61 - Flexão em corpos de prova a 0°	77
Figura 62 - Flexão a 0° e baixa cura.....	78
Figura 63 - Corpos de prova em ensaio de flexão a 0° e baixa cura	79
Figura 64 - Flexão a 0° e alta cura	80
Figura 65 - Corpos de prova de flexão a 0° e alta cura	81
Figura 66 - Flexão a 45° e baixa cura.....	82
Figura 67 - Corpos de prova em flexão a 45° e baixa cura	83
Figura 68 - Flexão a 45° e alta cura	84
Figura 69 - Corpos de prova ensaiados em flexão a 45° e alta cura	85
Figura 70 - Comparação da condição de cura e propriedades de tração a 0°.....	86
Figura 71 - Comparação das propriedades de tração a 45°	86
Figura 72 - Comparação das propriedades para compressão a 0°.....	87
Figura 73 - Comparação das propriedades em compressão a 45°.....	87
Figura 74 - Comparação das propriedades de flexão a 0°.....	88
Figura 75 - Comparação das propriedades em flexão a 45°.....	88

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1.	Matérias primas.....	3
2.1.1.	Fibra de vidro	5
2.1.2.	Resina epóxi.....	7
2.2.	Processos produtivos.....	8
2.2.1.	Infusão.....	9
2.2.2.	Pultrusão	10
2.2.3.	Enrolamento filamentar	10
2.2.4.	Autoclave	11
2.3.	Fontes de variação.....	12
2.3.1.	Preparação.....	14
2.3.2.	Impregnação.....	14
2.3.3.	Cura.....	15
2.4.	Aplicações.....	18
2.4.1.	Aeronáutica	19
2.4.2.	Pás para rotores eólicos.....	20
2.4.3.	Tubos e vasos de pressão	24
2.5.	Avaliação dos painéis em compósitos	25
2.5.1.	Ensaio de tração	26
2.5.1.1.	Tensão de cisalhamento	28
2.5.2.	Ensaio de compressão	29
2.5.3.	Ensaio de flexão	32
2.5.4.	Análise térmica	33
2.5.4.1.	Temperatura de transição vítrea.....	33
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.1.	Materiais	35
3.2.	Delineamento de experimento para a determinação das condições de cura	37
3.3.	Avaliação da temperatura de transição vítrea	39

3.4.	Infusão do laminado.....	41
3.5.	Medição do teor de fibra e resina.....	50
3.6.	Determinação das propriedades mecânicas	53
3.7.	Comparação dos resultados.....	53
4.	RESULTADOS.....	55
4.1.	Determinação das condições de cura	55
4.1.1.	Comparação dos resultados.....	57
4.2.	Ensaaios mecânicos	58
4.2.1.	Ensaaios de tração.....	58
4.2.1.1.	Esforço a 0°	59
4.2.1.2.	Esforço a 45°	63
4.2.2.	Ensaaios de compressão	67
4.2.2.1.	Esforço a 0°	68
4.2.2.2.	Esforço a 45°	72
4.2.3.	Ensaaios de flexão	76
4.2.3.1.	Esforço a 0°	77
4.2.3.2.	Esforço a 45°	81
4.2.4.	Comparação dos resultados.....	85
5.	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	89
	REFERÊNCIAS.....	91

1. INTRODUÇÃO

O projeto de componentes em materiais compósitos traz diversas vantagens frente à utilização de materiais convencionais como aço, madeira e concreto, estas vantagens estão especialmente associadas à elevada relação entre propriedades mecânicas e peso, excelente resistência à corrosão e intempéries, alta durabilidade e custos reduzidos de manutenção. A vantagem advém da definição dos materiais compósitos, a possibilidade de se misturar dois ou mais materiais diferentes obtendo um terceiro produto com características compostas dos materiais utilizados. Em contrapartida a estas vantagens implicam-se diversos desafios à utilização destes materiais, inerentes justamente às suas características não convencionais, como sua natureza anisotrópica e importância da garantia dos processos de fabricação para obtenção das propriedades projetadas.

Teorias já dominadas como a teoria clássica de laminados, as regras das misturas e até mesmo a evolução dos softwares de soluções numéricas vêm contribuindo com o crescimento do mercado desta família de materiais, que associados ao efeito de escala culminam na redução dos preços das matérias primas e atratividade desta classe de materiais e seu infindável leque de oportunidades.

Com a acessibilidade das matérias primas e o aumento do domínio das técnicas de projeto, o mercado se volta para a necessidade de desenvolvimento e aperfeiçoamento de técnicas de produção que tragam maior competitividade através do efeito de escala e maior produtividade.

Este trabalho busca avaliar o impacto do processo produtivo na qualidade do produto fabricado em materiais compósitos poliméricos. O objetivo é chamar a atenção para a importância do projeto do processo produtivo a fim de se garantir a obtenção das

propriedades mecânicas do produto final, neste estudo o impacto será medido através de ensaios mecânicos em laminados com diferentes condições de cura.

A avaliação da influência de variáveis de processo no laminado será realizada em compósitos de fibra de vidro e matriz polimérica de base epóxida, largamente utilizada na fabricação de peças estruturais e, a variação destas condições buscará refletir heterogeneidades típicas de processo. Estas variações ocorrem tanto entre diferentes peças de um mesmo processo produtivo como também em diferentes regiões de uma única peça, especialmente quando se consideram peças técnicas de grandes dimensões como barcos, tubos, aviões e pás para rotores eólicos.

Peças estruturais projetadas pressupõem propriedades conhecidas do material. É esperado que o produto final reproduza o comportamento dos modelos matemáticos e dos protótipos, sendo que freqüentemente estas variações, muitas vezes inerentes aos processos produtivos, impedem que a resistência projetada seja efetivamente alcançada, o que implica na super utilização de fatores de segurança e reduzindo a atratividade de se projetar em materiais compósitos estruturais.

Os compósitos poliméricos reforçados exigem normalmente processos de catalisação, impregnação e cura, e justamente destas etapas podem surgir grandes variações com impacto no resultado do componente. O foco deste trabalho é quantificar o efeito das variações do processo de cura em diferentes propriedades mecânicas de um laminado fabricado por processo de infusão e discutir causas e efeitos destas variações no comportamento das peças. São abordados também aspectos importantes que devem ser considerados quando um processo é selecionado em detrimento de outro e, alguns riscos que podem e devem ser gerenciados durante a fase de projeto do processo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Embora os conceitos aqui abordados possam ser extrapolados para diversas outras famílias de materiais compósitos, a orientação deste trabalho será a explanação das matérias primas avaliadas neste estudo que são matriz epóxi e reforço de fibra de vidro, são descritos os processos de fabricação relevantes sendo eles a moldagem, pultrusão, *filament winding* e autoclave, algumas possíveis fontes de variações, especificamente a preparação, impregnação e cura e os ensaios de tração, flexão, compressão e análise térmica, a fim de embasar o direcionamento e ressaltar a importância deste estudo.

2.1. Matérias primas

O compósito polimérico é definido como um material multifase exibindo uma combinação de propriedades que o torna superior a cada fase (CALLISTER, 1985). É de particular interesse deste trabalho, apresentar a família definida como compósitos poliméricos estruturais laminados.

Figura 1 - Famílias de materiais compósitos (CALLISTER, 1985)

Os polímeros estruturais reforçados são basicamente caracterizados por um elemento de reforço normalmente fibroso e um elemento polimérico que fundidos caracterizam um terceiro material com propriedades físico-químicas mistas destes dois constituintes.

Os esforços são transferidos pela matriz e suportados pelo reforço, sendo que a sinergia entre os materiais é normalmente garantida pelos elementos de ligação presentes no tratamento superficial das fibras.

O projeto de componentes em compósitos reforçados é marcado pela característica anisotrópica, ou seja, propriedades distintas em diferentes direções, o que dificulta a previsão dos modos de falha, implicando no uso de elevados coeficientes de segurança, subutilizando as potencialidades do material (TITA, CARVALHO e LIRANI, 2003).

É importante ressaltar, ainda dentro da classe de compósitos estruturais a presença das estruturas do tipo sanduíche, com núcleos porosos como madeiras, espumas e estruturas do tipo colméia, que conferem alta rigidez flexional aliada a baixas densidades e consequentemente baixo peso estrutural.

Os representantes dos elementos fibrosos mais relevantes são as fibras de carbono, aramida e vidro, sendo a fibra de vidro do tipo E a referência primária para este estudo.

A matriz polimérica pode ser constituída basicamente por qualquer classe de polímeros termorrígidos ou termoplásticos, sendo as termofixas as mais comuns para uso estrutural por apresentarem características finais particularmente interessantes.

Embora as fibras de reforço mais importantes sejam as de carbono, aramida e vidro, muitos estudos vem sendo conduzidos para a utilização de fibras vegetais, porém sua aplicação ainda não está suficientemente desenvolvida para concorrer em projetos estruturais com as fibras tradicionais, restringindo sua aplicação basicamente a itens de baixa solicitação mecânica.

2.1.1. Fibra de vidro

As fibras de vidro são atualmente o reforço filamentar mais utilizado do mercado, devido principalmente à boa relação entre peso e propriedades, custo acessível e oferta considerável. É importante mencionar que as fibras de vidro são na realidade uma grande família de materiais que contempla, por exemplo, os tecidos tramados, tecidos costurados, mechas do tipo *roving*, mantas e fios picados denominados *chopped strands*, sendo cada componente desta família desenhado para atender alguns níveis de requisito de projeto e processo. Além da variação da forma construtiva, a fibra de vidro é

especificada quanto ao diâmetro de filamentos, número de filamentos (ou densidade linear), tipo de vidro utilizado e tratamento superficial aplicado.

A fibra de vidro do tipo E é a mais comum e o tratamento superficial, normalmente à base de silanos, é quem determina a compatibilidade e a eficiência da interação com a resina, sendo parte fundamental da escolha por um tipo específico de material. Além do vidro do tipo E, existem os vidros de propósito especial que podem ser bastante interessantes para aplicações técnicas, dentre eles pode-se citar os tipos S, R e Te de alta performance, o D de baixa constante dielétrica e o E-CR com propriedades do vidro E e maior resistência a corrosão.

O diâmetro de filamento tem impacto nas propriedades finais do laminado à medida que para uma mesma densidade linear e comparando a uma referência de 17 microns de diâmetro, um conjunto de filamentos de 10 microns apresenta 70% mais área de contato com a resina enquanto um conjunto de filamentos de 21 microns apresenta 19% menos área de contato com a matriz. Esta redução na área de contato não significa necessariamente uma mudança das propriedades finais do produto, visto que pode ser equilibrada pelo teor de tratamento superficial e eficiência do mesmo.

O tratamento superficial não é responsável somente pela ponte química entre reforço e matriz, mas também por características de processabilidade como, por exemplo, a resistência ao atrito, resistência ao corte, maleabilidade e velocidade de impregnação.

Os filamentos de vidro são formados a altas temperaturas, fiados através de fiéis com temperatura controlada para garantir a viscosidade necessária à fiação, resfriados a temperatura ambiente e banhados com os elementos químicos de ligação com a resina a ser utilizada.

2.1.2. Resina epóxi

As resinas poliéster insaturada, estervínlica, fenólica e epoxídica são as matrizes termofixas mais relevantes para os projetos em compósitos reforçados, selecionadas para atenderem requisitos de resistência mecânica e química, sendo a epoxídica a que apresenta maiores vantagens para o desenvolvimento de projetos técnicos. LUCATO (1991) definiu algumas destas características como sendo, principalmente: baixa viscosidade (processabilidade), baixa contração (tensões residuais), cura a temperatura ambiente (processabilidade), alto módulo de elasticidade e compressão (desempenho).

Em contrapartida as resinas epóxidas são definidas como desvantajosas por BLASS (1985) devido à alta aderência aos moldes e impossibilidade de reciclagem.

Para que ocorra a cura, estas matrizes dependem de agentes de cura que catalisam a formação das ligações cruzadas. Dependendo da resina e do agente de cura, estas reações podem ocorrer em temperatura ambiente ou precisar de energia.

As matrizes termoplásticas de alto desempenho devem ser aquecidas até a temperatura de amolecimento que normalmente é superior a 300°C, o que por vezes dificulta sua utilização.

Embora as propriedades mecânicas dos compósitos sejam dominadas pelo elemento fibroso, a matriz deve ser selecionada de acordo com necessidades relacionadas à processabilidade e desempenho, sendo que uma das propriedades mais importantes na seleção de uma matriz polimérica é a temperatura de transição vítrea, que seja pelo menos 30°C acima da temperatura de serviço (CAMPBELL, 2006).

As resinas epoxídicas são muito utilizadas para a fabricação de circuitos impressos, pisos, adesivos, revestimentos, moldes, encapsulamentos elétricos entre outros, associadas a reforços fibrosos se pode citar diversas aplicações industriais, entre as quais componentes aeronáuticos, aeroespaciais, automotivos e navais, aplicadas através de processos de pultrusão, enrolamento filamental, moldagem e infusão entre outros.

O processo de cura deve obedecer a mistura em quantidades estequiométricas e a homogeneização da mistura, a fim de garantir as propriedades esperadas para o material.

2.2. Processos produtivos

A produtividade limitada ainda é uma das barreiras para o desenvolvimento dos materiais compósitos. A Figura 2 - Produtividade e performance posiciona alguns dos processos produtivos em um cenário de produtividade contra desempenho, onde é possível observar que os modelos de autoclave e enrolamento filamental, que apresentam alto desempenho estrutural, são limitados em termos de produtividade (100 a 1 mil peças por ano) se comparados por exemplo a um processo de pultrusão que pode entregar cerca de 100 mil peças por ano. É conveniente fazer esse tipo de comparação devido ao alto custo atualmente atribuído a manufatura de componentes em compósitos, especialmente para mercados de altos volumes, como os automotivos e de bens de consumo, com volumes de produção da ordem de 1 milhão de unidades por ano. Os processos produtivos mais importantes em compósitos em termos estruturais são os de autoclave, enrolamento filamental, pultrusão e *resin transfer molding* (RTM). Na Figura 2 são apresentados ainda os processos de moldagem por contato, laminação manual, *sheet moulding compound* (SMC) e *bulk moulding compound* (BMC)

Figura 2 - Produtividade e performance (AZOM, 2001)

2.2.1. Infusão

Infusão é o nome genérico para uma classe de processos que basicamente consistem em processos de moldagem, onde as camadas e os materiais de núcleo são empilhados e a resina é forçada através de pressão, sugada através de vácuo ou uma combinação dos dois para completar o processo de impregnação da fibra. Posteriormente um processo de cura é aplicado a fim de garantir as propriedades do sistema.

Estes processos, que podem ser realizados em moldes fechados ou em variações com contra moldes flexíveis, vêm se desenvolvendo largamente nos últimos anos como uma alternativa eficaz e barata aos processos de autoclave.

Figura 3 – Infusão (OWENS CORNING, 2010a)

2.2.2. Pultrusão

O processo de pultrusão envolve a pré-impregnação do roving em uma banheira de resina e posterior passagem por uma ferramenta aquecida que promove a moldagem e cura da resina, formando o perfil em compósitos, a parte curada é utilizada para tracionar as fibras e consequentemente impregná-las. O processo permite a fabricação de formas perfis complexos e é similar aos processos convencionais de extrusão de plásticos.

Figura 4 – Pultrusão (OWENS CORNING, 2010b)

2.2.3. Enrolamento filamentar

O processo de enrolamento, do inglês *filament winding* é limitado em relação às formas admissíveis, porém possibilita um alto nível de automação e consiste no enrolamento de ordenado de filamentos pré-impregnados em ângulos pré-determinados sobre um mandril. O filamento é impregnado passando por uma banheira de resina catalizada e

acomodado com tensionamento definido. Os parâmetros chave são a tensão da fibra, a eficiência de impregnação da fibra e a geometria de enrolamento (MIDDLETON, 1994), a principal limitação em termos de projeto é o fato de que o filamento seguirá sempre a trajetória geodésica, ou seja, a de menor distância.

Dentre diversas aplicações destacam-se o reforço de tubos e vasos, capazes de resistir a altas cargas.

Figura 5 - Enrolamento filamentar (AZOM, 2001)

2.2.4. Autoclave

Considerado o processo de fabricação que melhor garante as propriedades do laminado e, conseqüentemente, o processo mais utilizado pela indústria aeroespacial, o processo de autoclave consiste no empilhamento de camadas pré-impregnadas, chamadas *prepregs*, em uma câmara e subsequente aplicação de pressão em ordens típicas de 1 a 2 MPa enquanto energia e vácuo são aplicados para propiciar a redução de vazios e a cura do

sistema. Para facilitar a eliminação de vazios, um pré aquecimento é realizado para reduzir a viscosidade da resina (JONES, 1994).

Figura 6 - Esquema de cura em autoclave (JONES, 1994)

2.3. Fontes de variação

Diversos fatores podem implicar negativamente nas propriedades finais do componente, advindas das diversas fases produtivas do mesmo. A grande dependência das características finais dos compósitos vindas de seu processo produtivo associadas a dificuldade de controle de algumas destas etapas trazem desafios adicionais ao projetista que busca a otimização de projetos estruturais em poliméricos reforçados, que deve considerar na performance do material as variações implicadas pelo processo de fabricação.

A imprecisão de equipamentos, variação de matérias primas, alterações climáticas, métodos não refinados, dependência excessiva de operadores e dificuldade de medição de parâmetros fundamentais podem contribuir sobre maneira na variação complexa das características críticas do processo e do produto.

Para discutir as fontes de variação, as etapas de processo serão divididas genericamente como:

- Preparação, onde as camadas de reforço, materiais de núcleo e auxiliares de processo são preparadas;
- Impregnação, momento onde ocorre o contato entre o reforço e a matriz polimérica;
- Cura, etapa caracterizada pela polimerização controlada e consolidação dos materiais em uma estrutura monolítica;
- Acabamento, finalização do processo que pode incluir, por exemplo, rebarbações, montagens e pintura dos componentes.

Diversas técnicas empregadas ao longo do projeto e processo buscam garantir a qualidade do produto final como, por exemplo, a utilização do FMEA (Análise do Tipo e Efeito de Falha) e a certificação em requisitos normativos como os da ISO 9001:2008, que através de padronização e controle de métodos e registros, ciclos de melhoria e comunicação com os clientes busca garantir as características críticas de desenho.

É fato que toda essa demanda por ferramentas da qualidade que garantam um produto robusto, com baixa variabilidade e atendendo os requisitos de projeto vem da observação de variações acima do desejado, altos custos provenientes de desvios de características importantes e até mesmo necessidade de projetos sobre estimados para garantir estes desvios de produção.

Ishikawa propôs em 1943 e aperfeiçoou nos anos seguintes (ISHIKAWA, 1976) o diagrama de causa e efeito, que classifica as causas de defeitos como originárias dos 6Ms da qualidade: método, matéria prima, mão de obra, máquina, medição e meio ambiente.

2.3.1. Preparação

Na etapa de preparação podem surgir desvios advindos principalmente de problemas relacionados à qualidade dos materiais utilizados, erros de empilhamento e contaminação. Estes problemas podem tranquilamente ser controlados através de métodos bem determinados, rigor na seleção e acompanhamento da aquisição de materiais, cuidados na manipulação, treinamento dos operários e correto dimensionamento de máquinas, equipamentos e dispositivos utilizados nesta etapa.

2.3.2. Impregnação

A fase de impregnação é criticamente afetada por fatores como a imprecisão na mistura de resinas bi componentes e aspectos produtivos mal projetados que dificultam a solubilização do tratamento superficial da fibra como temperatura inadequada, baixa eliminação de bolhas causando excesso de vazios.

Através de uma ampla experimentação, Judd & Wright (1978) concluíram que dependendo da variedade de fibra e de resina, a tensão de cisalhamento interlaminar do material composto se reduz em cerca de 7% para cada 1% de vazios, para uma fração volumétrica de vazios de aproximadamente 4%.

Estes vazios são geralmente provenientes de duas origens, ar no sistema devido a uma impregnação incompleta da fibra pela resina no processo de fabricação, ou, pela presença de voláteis residuais de solventes, provenientes de reações químicas ou frações de baixo peso molecular.

A fração de vazios pode ser definida pela equação 1, que relaciona a fração de vazios às frações volumétricas de fibra e de resina.

$$V_v = 1 - \left(\frac{W_f}{\rho_f} + \frac{W_r}{\rho_r} \right) \quad (1)$$

2.3.3. Cura

Por ser a etapa de consolidação da estrutura do laminado esta etapa pode ser considerada uma das mais críticas, onde são experimentadas grandes variações de temperatura, mudança de estado físico, mudanças drásticas de viscosidade, mudança de densidade, surgimento de tensões residuais e consolidação de defeitos provenientes das etapas subseqüentes.

A reação de cura de resinas epoxídicas bi-componentes é realizada através da promoção pelo endurecedor da formação de ligações cruzadas tridimensionais denominadas termofixas, com necessidade ou não de energia externa. O perfil térmico ao qual o sistema é submetido é chamado de ciclo de cura e é constituído por fases de aquecimento, patamares de temperatura e resfriamento controlados para que a matriz seja curada.

A mudança de densidade, viscosidade e fenômenos de contração podem trazer efeitos de tensão residual ao laminado curado.

A operação de cura pode ser acompanhada de um ciclo denominado de pós-cura, onde se busca atingir as propriedades finais da matriz polimérica, como o mais elevado grau de cura. É conveniente definir uma temperatura de transição vítrea mínima onde se busca atingir a estabilidade térmica e mecânica do laminado.

Alem das variações de cura de peça a peça, para grandes estruturas em compósitos é possível observar variações dentro de uma mesma peça o que pode em situações extremas afetar cronicamente a durabilidade do componente. A Figura 7 - Medição de temperatura em estufa de pós-cura mostra a distribuição de temperatura em estufa de pós-

cura de um componente exemplificando a grande variação entre pontos distintos de uma estufa convectiva convencional.

Figura 7 - Medição de temperatura em estufa de pós-cura

A Figura 8 e a Figura 9 demonstram as variações de temperatura da superfície de um molde através da utilização de um equipamento de varredura térmico, quando aquecidos a 40°C e 60°C respectivamente.

Figura 8 - Imagem térmica de um molde aquecido a 40°C

Figura 9 - Imagem térmica de um molde a 60°C

A medição da temperatura de transição vítrea exposta na Tabela 1 demonstra a variação da propriedade em amostras submetidas ao mesmo ciclo de pós-cura em diferentes pontos de uma peça, com valor mínimo de 1º aquecimento encontrado de 65°C e máximo de 73,7°C, com média de 67°C, desvio padrão de 4,5% e diferença entre limites inferior e superior de especificação de 20% com intervalo de confiança de 95%.

Tabela 1 - Análise DSC de amostras pós-curadas

Identificação	Primeira Tg (°C)	Segunda Tg (°C)
P01 - 1º Aquecimento	65	70,2
P01 - 2º Aquecimento	73,4	82,8
P02 - 1º Aquecimento	66,9	72
P02 - 2º Aquecimento	75,7	85,4
P03 - 1º Aquecimento	65,3	70,4
P03 - 2º Aquecimento	74,2	83,7
P04 - 1º Aquecimento	66	72,9
P04 - 2º Aquecimento	75,5	84,6
P05 - 1º Aquecimento	73,7	79,2
P05 - 2º Aquecimento	76,3	85,7
P06 - 1º Aquecimento	68	75,5
P06 - 2º Aquecimento	75,3	85
P07 - 1º Aquecimento	65,3	82,3
P07 - 2º Aquecimento	77,7	87

2.4. Aplicações

A indústria de compósitos vem ganhando volume e força em aplicações técnicas, especialmente quando o peso é um fator decisivo. O avanço de técnicas de projeto e confiabilidade das estruturas projetadas em plástico reforçado, principalmente herdadas do setor aeroespacial atrai hoje a atenção dos projetistas de diversos outros setores.

A indústria naval desempenhou também importante papel no desenvolvimento de técnicas produtivas para estruturas de grandes dimensões, com processos otimizados de laminação e infusão, sendo também um importante segmento do desenvolvimento destes materiais.

O mercado de energia eólica é hoje um dos principais gatilhos da forte expansão observada nos últimos anos e a aposta de grande parte dos especialistas, trazendo um grande fluxo de recursos que se pressupõe originará um rápido desenvolvimento tecnológico.

Os tubos e vasos de pressão são também uma aplicação em franco desenvolvimento que utiliza a flexibilidade dos projetos em compósitos para, sem agregar peso desnecessário à estrutura reforçar estes componentes nas direções principais do esforço, através principalmente da técnica de enrolamento filamentar.

Todas estas e outras tantas aplicações estão sujeitas em maior ou menor escala às variações típicas de processo que produzem variações em características consideradas críticas para o desempenho da estrutura conforme projetado e no intuito de reforçar a importância da confiabilidade do desempenho final do produto algumas aplicações são explanadas nos itens a seguir.

2.4.1. Aeronáutica

Pioneira no desenvolvimento de projetos técnicos em compósitos, atraída pela ótima relação entre peso e resistência e o conseqüente potencial de redução de peso, a indústria aeroespacial tornou os compósitos extremamente atrativos às indústrias correlatas.

Aliando boas propriedades mecânicas, resistência à corrosão e durabilidade, o plástico reforçado tornou-se uma opção obrigatória no leque de materiais considerados para o

projeto de aeronaves. A Figura 10 mostra a presença de estruturas em compósitos laminados e sanduíches no Airbus A380.

Devido a relativa baixa produtividade do setor e altíssima demanda por confiabilidade, o processo produtivo mais utilizado é o de autoclave.

Figura 10 - Estruturas em compósitos no A380 (FAA, 2009)

Com o domínio das técnicas de projeto, a tendência é de aumento da utilização de polímeros reforçados no projeto de aeronaves, especialmente em um mercado com alta demanda por eficiência, autonomia e impacto ambiental reduzido.

2.4.2. Pás para rotores eólicos

A conversão da energia a partir de fontes renováveis tem estado em pauta nos diversos meios de comunicação, estudos científicos e fóruns mundiais com uma demanda cada vez maior por soluções ambientalmente corretas e que gerem o menor impacto possível. A busca por uma alternativa sustentável é o alvo das discussões e dentre as alternativas economicamente viáveis da atualidade desponta a geração de energia elétrica a partir dos

moinhos de vento. O crescimento do mercado de energia eólica em todo o mundo tem atraído bilhões de dólares em investimentos, consequentemente, um rápido desenvolvimento tecnológico no setor vem sendo percebido nas últimas décadas. Os ventos são uma fonte renovável consequência do efeito da variação da radiação solar nos diversos macro ambientes terrestres. O potencial global de geração de energia para rotores instalados em terra chega perto dos 50×10^{12} kWh por ano, esta capacidade equivale a três vezes a demanda atual do planeta, sendo ainda adicionados a estes todo o potencial oceânico, ainda maior do que o terrestre.

Nos anos 80, início da exploração eólica em grande escala, o dimensionamento das turbinas não ultrapassavam os 100kW, chegando no final dos anos 90 a potências de até 2,5MW e diâmetros de hélice de mais de 100 metros. Na atualidade, é possível encontrar geradores de 5MW, embora os altos custos logísticos sejam ainda um grande obstáculo a instalação destas grandes turbinas.

O sucesso na escolha do site eólico é função da constância dos ventos e da média anual dos ventos, sendo que tanto períodos de ventos excessivamente fortes quanto momentos de calmaria são problemas para a implementação da tecnologia.

Dentre as tendências de projeto, existe uma vertente de aumento do diâmetro dos rotores, visto que a energia capturada dos ventos é proporcional ao quadrado do raio do rotor e ao cubo da velocidade do ar, sendo previsto pela lei de Betz um limite teórico de geração avaliado em 59% da energia cinética do fluido incidente sobre o gerador, sendo ainda reduzido pelas eficiências do sistema eletro-mecânico. Como referência, um gerador de 128 metros de diâmetro sob o efeito de ventos de 10 m/s, é capaz de gerar 4,6MW ante os

7,9MW incidentes, uma turbina nesta condição pode suprir energia elétrica para uma cidade de cerca de 30 mil habitantes.

Figura 11 - Tendência do mercado eólico

Fonte: ECN (Energy research centre of New Zealand)

Os grandes desafios da indústria de energia dos ventos estão ligados principalmente a longevidade dos componentes mecânicos, as pás estão sujeitas aos esforços do vento e de seu peso próprio em carregamento cíclico, muitas vezes ultrapassando as 10 toneladas estas grandes estruturas sofrem grandes solicitações devido aos carregamentos estáticos e dinâmicos.

Em termos de projeto estrutural, o grande esforço é desenvolver pás leves e que combinem as propriedades mecânicas necessárias e as características aerodinâmicas que garantam uma boa eficiência aerodinâmica e resistência em fadiga por toda a vida útil do equipamento. Uma turbina deve ser avaliada quanto aos esforços gravitacionais, dinâmicos, efeitos inerciais e operacionais. Adicionalmente, o desenvolvimento de projetos em materiais compósitos ainda traz dificuldades inerentes ao desconhecimento

de técnicas apuradas de análise de falha em fadiga em laminados, embora tenham sido desenvolvidos nos últimos anos diversos modelos de falhas este aspecto é especialmente agravado pela influência do processo de fabricação nas propriedades finais do material.

Figura 12 - Seção de uma pá eólica

Há uma grande dependência no desempenho mecânico do rotor com o processo de fabricação de seus componentes, especialmente quando se trata dos geradores de grande porte, fabricados geralmente em materiais compósitos. Os processos produtivos têm sido desenvolvidos enormemente nos últimos anos, baseados na experiência da indústria aeronáutica e adaptados a grande demanda do setor, a larga escala vem dando suporte ao desenvolvimento de processos de infusão assistida por vácuo, tecidos pré-impregnados, tecidos pré-formados, processos com molde fechado e molde aberto, como também a inclusão de diferentes tecnologias em materiais, como fibras de carbono, aramida, boro, vidros de alto desempenho, tecidos híbridos, diversas resinas, diferentes tipos de núcleos e de material sanduíche.

Para um desenvolvimento efetivo da tecnologia no que tange o custo total da energia gerada, cada vez mais os fabricantes de sistemas de geração tem utilizado ferramentas

numéricas no desenvolvimento de soluções, como o método dos elementos finitos, volumes finitos e fluido mecânica computacional.

Ainda em relação ao projeto dos sistemas de geração eólica, é necessário prever mecanismos de compensação aos fatores adversos à operação normal do sistema, como intempéries, fenômenos climáticos e variações normais da intensidade do vento. Normalmente as pás contam com sistemas de freio, de adequação do posicionamento da hélice na direção do vento, rotação da pá para alterar controle do ângulo de ataque.

2.4.3. Tubos e vasos de pressão

Devido à geometria dos tubos e vasos de pressão, vide Figura 13, torna-se conveniente utilizar reforços do tipo filamental, pois um tubo de paredes finas carregado com pressão interna está sujeito a esforços de tração no sentido circunferencial como descrito na Equação 2, sentido esse que pode ser facilmente reforçado através de enrolamento filamental.

Figura 13 - Vaso de pressão (WWW.ADOPTTECH.COM, 2010)

$$\sigma_{\theta} = \frac{pr}{t} \quad (2)$$

Onde p = pressão, r = raio e t = espessura do tubo.

2.5. Avaliação dos painéis em compósitos

Para avaliar as propriedades dos laminados em materiais compósitos existem diversos métodos consagrados de experimentação, dentre os quais é possível citar ensaios de tração, compressão, cisalhamento, flexão, fadiga, impacto, fragilidade, dureza, rigidez entre tantos outros. Diversos métodos normalizados pela ASTM, ISO e DIN são disponíveis para a avaliação padronizada das propriedades de painéis compósitos e ainda alguns padrões específicos das indústrias interessadas, como por exemplo: normas militares, aeronáuticas, da construção civil, eletrônicas, associações específicas de compósitos.

Para normalização dos resultados é comum estabelecer a fração volumétrica de fibra nominal e ajustar os resultados obtidos através da aplicação da regra das misturas, representado pela equação 3. A fração volumétrica de fibra é obtida indiretamente através da medição da fração em peso de fibra, cujo procedimento pode, por exemplo, seguir a norma ASTM D2584:2008. Para tecidos não tramados bi-diagonais de fibra de vidro, é comum utilizar-se o valor nominal de 67,5%, ou seja, as propriedades de tensão e módulo são ajustadas às de um painel padrão com 67,5% de fibra em massa para fins de comparação.

$$X_{ajustado} = X_{medido} \frac{V_{f \text{ normalizado}}}{V_{f \text{ encontrado}}} \quad (3)$$

Onde X é a propriedade ajustada e V_f é a fração volumétrica de fibra.

Para o cálculo da fração volumétrica de vidro deve-se utilizar a equação 4, sendo importante reforçar é aceitável considerar o teor de vazios nulos em processos com resina desgaseificada por exemplo.

$$V_f = \frac{\rho_m \cdot W_f}{\rho_f \cdot W_m + \rho_m \cdot W_f} \quad (4)$$

Onde V é a fração volumétrica, ρ a densidade e W a fração em peso, sendo f e m os índices relativos a fibra e matriz respectivamente.

2.5.1. Ensaio de tração

Através do ensaio de tração podem se mensurar as propriedades de tensão, módulo de elasticidade e alongamento. A norma ISO 527-4:1997 determina as condições sugeridas para a realização do ensaio de tração em corpos de prova isotrópicos e ortotrópicos, para laminados unidirecionais é sugerida a utilização da versão ISO 527-1:1993.

Para a curva de ensaio mostrada na Figura 14, a norma especifica o módulo de elasticidade como a tangente da curva tensão deformação entre a deformação de 0,05% e 0,25%.

Figura 14 – Curva de ensaio de tração

A Figura 15 define o corpo de provas do tipo 3 com reforços laminados (tabs) na área de contato com as garras do dispositivo e a Tabela 2 detalha as dimensões dos requeridas para o ensaio de tração pela ISO 527-4:1997 Tipo 3.

Figura 15 - Corpos de prova tipo 3 (ISO 527-4:1997)

Tabela 2 – Dimensões dos corpos de prova

	Propriedade	Dimensão (mm)
L_3	Comprimento	≥ 250
L_2	Distância entre tabs	150 ± 1
b_1	Largura	$25 \pm 0,5$
H	Espessura	2 a 10
L_o	Comprimento padrão (para o extensômetro)	50 ± 1
L	Distância inicial entre garras	136
L_t	Comprimento dos tabs	≥ 50
h_t	Espessura dos tabs	1 a 3
D	Diâmetro dos furos de centro (opcionais)	$3,00 \pm 0,25$

A Figura 16 demonstra esquematicamente a preparação dos corpos de prova a partir de um laminado reforçado com *tabs*.

Figura 16 - Fabricação dos corpos de prova (Fonte: ISO 527-4:1997)

2.5.1.1. Tensão de cisalhamento

Em laminados bi diagonais, é possível calcular as propriedades de cisalhamento no plano para compósitos bi diagonais ($\pm 45^\circ$) solicitados na direção do laminado (0°), como exemplificado na Figura 17, através de equações simplificadas padronizadas como a da Equação 5, conforme descrita na norma ISO 14129:1997.

Figura 17 - Corpo de provas solicitado

$$\tau_{12} = \frac{F}{2bh} \quad (5)$$

Onde τ é a tensão de cisalhamento no plano, F a força aplicada, b a largura e h a espessura do corpo de prova.

2.5.2. Ensaio de compressão

O ensaio de compressão, como o próprio nome diz, avalia o comportamento do material em carregamento axial de compressão, para o caso específico de compósitos que normalmente apresentam alta rigidez e estrutura esbelta este é um ensaio particularmente complicado dado o fenômeno de flambagem. Diversos dispositivos são especificados para a confiabilidade do ensaio, alguns deles podem ser encontrados na norma ISO 14126:1999.

Os corpos de prova podem dependendo do dispositivo a ser aplicado apresentar ou não os tabs (laminados que auxiliam na transferência de esforços), sendo que a própria norma especifica a fabricação dos corpos de prova, conforme Figura 18.

Figura 18 - Preparação de corpos de prova do com *tab* (ISO 14126:1999)

Um dos dispositivos mais utilizados é o chamado ITRII, esquematizado na Figura 19, que utiliza cunhas e um robusto sistema de centralização para garantir paralelismo da aplicação do esforço.

Figura 19 - Dispositivo de compressão ITRII (ISO 14126:1999)

O comportamento do corpo de prova enquanto ensaiado é muito semelhante ao do ensaio em tração, e a norma especifica as dimensões do corpo de prova conforme Figura 20 e Tabela 3.

Figura 20 - Dimensões do corpo de prova (ISO 14126:1999)

Tabela 3 - Dimensões do corpo de prova do tipo B1

	Propriedade	Dimensão (mm)
L_0	Comprimento total	110 ± 1
h	Espessura	2 a 10
b	Largura	$10,0 \pm 0,5$
L	Distância entre os tabs	≥ 50
d_t	Espessura dos tabs	0,5 a 2

A ISO 14126:1999 especifica também critérios para a flambagem, através de uma relação máxima admissível entre a deformação de cada uma das faces do corpo de prova.

2.5.3. Ensaio de flexão

Ensaio de flexão buscam avaliar as propriedades mecânicas através de esforços aplicados fora do plano, diferente dos ensaios de tração e flexão já mencionados.

Para a determinação destas propriedades em compósitos pode ser utilizada a ISO 178:2010, que originalmente se aplica a plásticos e determina as condições padronizadas para a execução do ensaio apoiado em uma base com distância entre os apoios e velocidade de ensaio determinadas. A Figura 21 - Ensaio de flexão exemplifica o modo de falha comumente encontrado neste tipo de ensaios, com a primeira ruptura da fibra

externa inferior que está sujeita ao maior nível de tensão em tração, enquanto a fibra externa superior está sujeita a esforços de compressão.

Figura 21 - Ensaio de flexão (IDES, 2010)

2.5.4. Análise térmica

Análise térmica é um termo definido como um grupo de técnicas que mensura a mudança de propriedades químicas ou físicas em função da temperatura. Entre as diversas análises pode-se mencionar a determinação de decomposição, grau de pureza, entalpia de reação, pureza, oxidação, temperatura de transição vítrea, calor específico, temperatura de fusão, condutividade térmica, entre outras.

2.5.4.1. Temperatura de transição vítrea

A temperatura de transição vítrea (T_g) é uma transição termodinâmica intermolecular que ocorre em regiões amorfas de um material polimérico, indicando a transição de uma estrutura rígida para flexível e que resulta em mudanças de propriedades, como a variação do calor específico. Em temperaturas abaixo do T_g as macromoléculas não apresentam energia para mudanças conformacionais, mantendo-se em estado vítreo.

Uma técnica importante de análise térmica é o DSC (*Differential Scanning Calorimetry*), que mede a diferença de energia fornecida para a amostra e para uma referência inerte sobre uma curva de aquecimento controlada.

Duas técnicas diferentes de DSC podem ser empregadas, a primeira, mantendo as amostras em fornos separados e a segunda, chamada de DSC de fluxo de calor, a diferença de fluxo é medida conforme a temperatura aumenta ou diminui. O fluxo diferencial de calor da amostra e da referência é monitorado através da medição direta pelo termopar Chromel-Alumel colocado sob o disco de Chromel.

Da medição DSC, exemplificada na Figura 22, são obtidas as informações de 1º Tg (primeira deflexão da curva), 2º Tg (ponto médio entre o 1º e 3º Tg), 3º Tg (segunda deflexão) para o primeiro aquecimento, que reflete a condição das amostras recebidas e do segundo aquecimento, que mensura o potencial de cura da amostra (Tg máximo).

Figura 22 – Análise DSC

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção serão descritos os materiais utilizados, os processos aplicados e a metodologia do trabalho.

3.1. Materiais

Dada sua ampla aplicação, para a fabricação dos painéis compostos foram selecionados tecido de fibra de vidro de tipo E e resina epóxi certificados pela Germanischer Lloyd (GL), reconhecido órgão certificador das indústrias naval e de energia. O tecido selecionado é um tecido não tramado costurado com padrão biaxial de 1000 g/m² e construção descrita na Tabela 4. A resina utilizada, com propriedades definidas na Tabela 5, foi desenvolvida especialmente para processos de infusão, dada sua baixa viscosidade. O sistema polimérico selecionado será catalisado com uma mistura de endurecedores na proporção de 20% rápido, descrito na Tabela 6, e 80% lento, exposto na Tabela 7.

Tabela 4 – Construção do tecido não tramado costurado

Construção	Gramatura (g/m ²)	Tolerância	Material
- 45°	473	5%	Vidro E
+ 90°	30	5%	Vidro E
+ 45°	473	5%	Vidro E
Costura	6	5%	PES

Tabela 5 – Propriedades da resina

Densidade(g/cm ³)	1,13 – 1,17
Viscosidade (m.Pa.s)	700 – 1100
Epoxi equivalente (g/equivalente)	166 – 185
Valor epóxi (equivalente/100g)	0,54 – 0,60

Tabela 6 – Propriedades do endurecedor rápido

Densidade (g/cm ³)	0,93 – 1,00
Viscosidade (m.Pa.s)	10 – 80
Valor amina (mg KOH/g)	550 – 700

Tabela 7 – Propriedades do endurecedor lento

Densidade (g/cm ³)	0,93 – 0,98
Viscosidade (m.Pa.s)	10 – 50
Valor amina (mg KOH/g)	400 – 600

A mistura de endurecedores foi selecionada com base na ficha técnica do produto para um tempo de gel de aproximadamente 4 horas a temperatura ambiente, tempo suficiente para a infusão de peças consideravelmente grandes, dependendo dos parâmetros utilizados.

Além das propriedades acima descritas, tomou-se o cuidado de selecionar um conjunto tecido e resina compatíveis e indicados para a aplicação em infusão a temperaturas entre 10°C e 50°C. A razão de mistura entre resina e endurecedor recomendada é de 30 partes de endurecedor para 100 partes de resina, com 2 partes de tolerância, o efeito de uma razão fora destas especificações pode afetar a cura de forma irreversível.

Este sistema de resina tem potencial de temperatura de transição vítrea da ordem de 80°C após cura completa.

3.2. Delineamento de experimento para a determinação das condições de cura

Para avaliar o grau de cura de um laminado, um parâmetro mensurável é a temperatura de transição vítrea (T_g) do laminado. Para levantar a correlação entre o T_g e as condições de cura, foi realizado um delineamento de experimento (DOE) com tempo e temperatura como fatores e a medição do T_g como resposta, seguindo 3 fatores de temperatura: A,B,C = 60°C, 70°C, 80°C e 3 fatores de tempo: a,b,c = 5h, 7h, 9h, seguindo ordem aleatória definida no software Minitab conforme Tabela 8, os fatores de tempo e temperatura foram definidos com base na ficha técnica do fabricante do sistema polimérico. Cada ensaio foi realizado com duas amostras e o DOE realizado com repetição.

Tabela 8 – DOE para definição de cura

Corpo de provas	Fator temperatura	Temperatura de cura (°C)	Fator tempo	Tempo de cura (h)
CDP 01	A	60	c	9
CDP 02	A	60	c	9
CDP 03	A	60	a	5
CDP 04	A	60	a	5
CDP 05	B	70	a	5
CDP 06	B	70	a	5
CDP 07	A	60	b	7
CDP 08	A	60	b	7
CDP 09	B	70	b	7
CDP 10	B	70	b	7
CDP 11	B	70	c	9
CDP 12	B	70	c	9
CDP 13	C	80	a	5
CDP 14	C	80	a	5
CDP 15	C	80	b	7
CDP 16	C	80	b	7
CDP 17	C	80	c	9
CDP 18	C	80	c	9
CDP 19	C	80	a	5
CDP 20	C	80	a	5
CDP 21	A	60	a	5
CDP 22	A	60	a	5
CDP 23	C	80	b	7
CDP 24	C	80	b	7
CDP 25	B	70	c	9
CDP 26	B	70	c	9
CDP 27	B	70	a	5
CDP 28	B	70	a	5
CDP 29	C	80	c	9
CDP 30	C	80	c	9
CDP 31	B	70	b	7
CDP 32	B	70	b	7
CDP 33	A	60	c	9
CDP 34	A	60	c	9
CDP 35	A	60	b	7
CDP 36	A	60	b	7

3.3. Avaliação da temperatura de transição vítrea

A análise do Tg é realizada no equipamento de DSC (Differential Scanning Calorimetry) por uma técnica termo analítica, porém poderia também ser avaliada através de uma análise em equipamento DMA (Dynamic Mechanical Analysis). O método DSC foi utilizado por uma questão de disponibilidade do recurso.

O procedimento seguido para a análise DSC é descrito abaixo:

1. Observar os prazos de calibração dos equipamentos utilizados;

- DSC; Balança Analítica;

2. Avaliar o estado de conservação dos utensílios;

- Cadinho e tampa de alumínio; Pinças; Ferramentas; Prensa;

3. Verificar e registrar a identificação das amostras;

4. As amostras devem conter no mínimo 2g, e estar livre de contaminantes.

5. Preparação das amostras (Figura 23):

- Manter as ferramentas limpas;
- Lixar a amostra para garantir a área de contato da amostra com o cadinho;
- Colocar o cadinho e a tampa na balança analítica.
- Zerar a balança analítica;
- Pesar de 10 a 15 mg de amostra na balança analítica;

- Registrar o peso;

Figura 23 – Preparação da amostra para medição de Tg

- 6. Prensar o cadinho para finalizar a preparação da amostra, conforme Figura 24.**

Figura 24 – Prensagem do cadinho

7. Preparação do sistema

- Ligar o computador e aguardar a inicialização;
- Ligar o equipamento de DSC;
- Abrir e aguardar a inicialização dos programas de ensaio e de análise;

8. Colocação da amostra no equipamento conforme Figura 25.

- Colocar o cadinho no aparelho DSC ao lado direito (o esquerdo é para a referência);

- Colocar o cadinho padrão do lado esquerdo (cadinho vazio).

Figura 25 – Colocação dos cadinhos no equipamento

9. Programação da análise com duas corridas com amplitude de 0 a 200°C. Com taxas de aquecimento e resfriamento de 20°C por minuto.

- Inicial – 0°C
- Dynamic – 200°C - 20°C /minutos
- Isothermal – 2 minutos
- Dynamic – 0°C – 20°C /minutos
- Isothermal - 2 minutos
- Dynamic – 200°C - 20°C /minutos
- Isothermal - 2 minutos
- Dynamic – 20°C - 20°C /minutos
- Isothermal – 5 minutos
- Final – 230°C
- Standby – 20°C /minutos.

3.4. Infusão do laminado

Para garantir as propriedades propostas na preparação dos painéis compósitos, o processo selecionado é o de moldagem por transferência de resina assistida por vácuo (VARTM)

com dois moldes de aço, entrada para resina e saída para o vácuo, seguindo o procedimento descrito abaixo e o esquema da Figura 26.

Figura 26 – Esquema de infusão de painéis

Procedimento seguido para a fabricação dos painéis:

1. Observar a data e o prazo de calibração de todos os equipamentos utilizados:

- Estufa;
- Balança 10 kg;
- Termo-higrômetro;
- Termômetro Infravermelho;
- Bomba de vácuo;

2. Avaliar o estado de conservação e disponibilidade dos utensílios:

- Molde para VARTM;
- Desgaseificadora;
- Gabarito de corte;

- Linha para alinhamento;
- Cordão de silicone;
- Arruelas calibradas;
- Tesoura (ou outra ferramenta de corte);
- Bandeja para camadas

3. Verificar a superfície do molde, parafusos, espigões e arruelas calibradas:

- Planicidade e imperfeições (riscos/depressões);
- Riscos de vazamento;
- Sujeiras.

4. Aplicar desmoldante semi-permanente nas superfícies do molde conforme Figura 27. Realizar duas aplicações com intervalos de 15 minutos.

Figura 27 – Limpeza do molde

5. Pré-aquecer a mesa à temperatura de 40°C.

6. Verificar estanqueidade da bomba de vácuo e da desgaseificadora

Aplicar vácuo por 10 minutos e desligar a bomba. A pressão deve ser mantida por 20 minutos.

7. Preparação das camadas

- Verificar integridade do tecido, descartar partes com imperfeições, sujeiras ou outros pontos de problemas. Substituir a camada suspeita
- Realizar teste de gramatura;
- Garantir alinhamento com os filamentos;
- Posicionar o gabarito de acrílico de 350x350mm sobre o tecido e marcar a região de corte conforme Figura 28;
- Cortar garantindo a integridade do tecido.
- O tecido não deve ser enrolado ou manuseado;
- Registrar a umidade relativa do ambiente, que deve estar abaixo de 50%;
- Posicionar a 1ª linha nos pinos guias junto ao molde;
- Posicionar a 1ª camada alinhando um *roving* ou linha de costura com a linha guia;
- Posicionar o restante das camadas sempre paralelas ou perpendiculares à linha de acordo com Figura 29;
- As camadas devem ser colocadas conforme a Tabela 9.

Figura 28 – Corte da camada com auxílio do gabarito de corte

Figura 29 – Posicionamento e alinhamento das camadas

Tabela 9 – Empilhamento das camadas

1ª camada	- 45°
	+45°
2ª camada	- 45°
	+45°
3ª camada	- 45°
	+45°
4ª camada	- 45°
	+45°

Embora seja recomendável o empilhamento espelhado para ensaios mecânicos a fim de evitar reações fora do plano do esforço, com a utilização de tecidos bi-diagonais costurados esta configuração dificultaria o alinhamento das camadas e considerou-se preferível comprometer o balanceamento ao alinhamento, até porque com a repetição de camadas o efeito do não espelhamento torna-se reduzido.

8. Vedação do sistema

- Posicionar a fita elastomérica nas laterais das camadas encostando-a no tecido, paralela ao fluxo de resina conforme Figura 30.
- Colocar o cordão de silicone para vedação (deve ser de ao menos 1 mm mais espesso que os espaçadores utilizados) rente a fita elastomérica, cuidar para que o cordão não se sobreponha as arruelas. O cordão deve ser posicionado externamente em relação às entradas de vácuo e resina.
- De acordo com a gramatura de cada camada deve ser obtida a espessura dos calços (arruelas calibradas) para garantir o teor de fibra resina esperado através da Equação 6.
- Posicionar as arruelas selecionadas em todos os parafusos ao redor do molde de acordo com a Figura 31 e a Figura 32.

Figura 30 – Posicionamento da fita elástica para vedação

$$Espessura = \frac{Peso_das_camadas(g)}{Fibra_de_Vidro_Vol. \times \acute{A}rea_da_camadas(mm) \times densidade_da_Fibra(g/cm^3) \times 10^{-3}} \quad (6)$$

Figura 31 – Posicionamento da arruela calibrada

Figura 32 – Sistema antes do fechamento

9. Fechamento do sistema

- O molde deve ser fechado com uma placa sobre a outra conforme Figura 33.
- Os parafusos devem ser apertados alternadamente;
- Utilizar espaçador com as mesmas medidas das arruelas, para checar o espaço entre as duas placas do molde.
- Fechar a entrada de resina e verificar a estanqueidade através da manutenção do vácuo (queda máxima de 500 Pa em 20 minutos);

Figura 33 – Fechamento do molde

10. Pré-aquecimento do molde

O molde deve ser colocado na estufa (pré-aquecida) para aquecer a temperatura de 50 a 55°C.

11. Preparação para a infusão

Aplicar vácuo no sistema por 60 minutos antes da infusão;

Verificar a estanqueidade do molde novamente e conferir o espaçamento entre as placas com o passa não passa.

12. Preparação da resina

Misturar a resina com o sistema de endurecedores conforme especificação do fornecedor, na proporção de 100:30 em massa;

- Desgaseificar a mistura por 20 minutos e confirmar a desgaseificação através da ausência de bolhas por inspeção visual.

13. Manter a temperatura do molde em 30°C;**14. Infusão**

- Imersão da mangueira no recipiente de resina evitando a entrada de bolhas no sistema;

- Quando a resina estiver saindo pela mangueira de vácuo, reduzir o vácuo através da abertura da válvula de alívio lentamente até estabilizar o nível da resina e estrangular a mangueira com um alicate na saída e posteriormente na entrada de resina;

15. Cura

- Levar o molde para a estufa pelo tempo e temperatura pré-determinados.

3.5. Medição do teor de fibra e resina

Como sabido da regra das misturas, é fundamental que se conheça a fração de fibra do laminado para que as propriedades mecânicas sejam normalizadas para um teor de fibra padrão. Um parâmetro bastante aceito é de 67,5% em massa para laminados biaxiais e 71% em massa para laminados unidirecionais. Esta diferença se deve à geometria do empilhamento.

O procedimento para a quantificação da fração de fibra resina seguirá o seguinte procedimento:

1. Verificar prazo de calibração de todos os equipamentos utilizados:

- Mufla;
- Balança Analítica;
- Cronômetro;

2. Avaliar o estado de conservação dos utensílios:

- Dessecador;
- Cadinhos de porcelana;
- Arco de serra;

3. Garantir identificação e rastreabilidade das amostras

- As amostras devem pesar no mínimo 10 gramas e sendo compostas por apenas resina e fibra de vidro

4. Pré-aquecer a mufla à 625°C;

5. Colocar os cadinhos vazios e limpos na balança e anotar o peso de cada um deles conforme Figura 34.

Figura 34 – Tara do cadinho

6. Inserir a amostra no cadinho e pesar, registrar o peso inicial, como na Figura 35.

Figura 35 – Pesagem da amostra

7. Levar os cadinhos com as amostras devidamente identificados para dentro da Mufla a uma temperatura de 625°C durante 1 hora e 30 minutos, referenciado na Figura 36.

Figura 36 – Processo de calcinação

8. Retirar os cadinhos e colocá-los no dessecador até resfriamento a temperatura ambiente, ilustrado na Figura 37;

Figura 37 – Resfriamento em ambiente seco

9. Pesar novamente amostra e registrar (P2), exemplificado na Figura 38.

Figura 38 – Pesagem após a calcinação

10. Levar os cadinhos com as amostras devidamente identificados novamente para dentro da Mufla repetindo o procedimento de calcinação, resfriamento e pesagem,

até que a diferença entre o peso final e P2 seja inferior a 0,1% e calcular a fração de vidro em massa (F_w) segundo a Equação 7.

$$F_{w\%} = \frac{(PESO_INICIAL) - (PESO_FINAL) \times 100}{(PESO_INICIAL)} \quad (7)$$

3.6. Determinação das propriedades mecânicas

Para comparação das propriedades mecânicas dos laminados serão realizados ensaios mecânicos de tração, compressão e flexão a 0° e 45°, utilizando procedimentos normalizados descritos nas normas ISO 527-4:1997 para tração, ISO 14126:1999 para compressão, ISO 178:2010 para flexão, ASTM D2584:2008 para determinação de fração de fibra.

3.7. Comparação dos resultados

Para a comparação dos resultados de ensaio será adotada uma metodologia de normalização pelo teor de vidro para as propriedades de tensão e módulo de elasticidade, através de uma ponderação simples entre o valor obtido para o teor de fibra de vidro em volume e o valor nominal especificado.

Os resultados serão comparados estatisticamente através dos limites inferior e superior de especificação com intervalo de confiança de 95% de acordo com as Equações 8 e 9 para adicionar representatividade estatística às amostras avaliadas.

$$x^* = x - \sigma \cdot z \left(1 + \frac{1}{\sqrt{n}} \right) \quad (8)$$

$$x^* = x + \sigma \cdot z \left(1 + \frac{1}{\sqrt{n}} \right) \quad (9)$$

Onde:

x^* = valor calculado

x = média

σ = desvio padrão

$z = 1,645$ (para 95% de intervalo de confiança);

n = número de amostras

4. RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos neste trabalho, primeiramente o ensaio DOE para determinação das condições de cura e posteriormente o resultado dos ensaios mecânicos.

4.1. Determinação das condições de cura

Do DOE foram retiradas as condições de cura, variando o tempo e a temperatura nos intervalos de 5, 7 e 9 horas e 60°C, 70°C e 80°C.

Os corpos de prova foram submetidos às condições de cura conforme Figura 39 – Condição de cura das amostras 6 e 7, medidos com termopares calibrados, do sistema de monitoramento da estufa:

Figura 39 – Condição de cura das amostras 6 e 7

Das amostras retiradas foram avaliadas as temperaturas de transição vítrea, explicitadas na Tabela 10.

Tabela 10 - Análise térmica dos corpos de prova

Corpo de provas	Temperatura de cura (°C)	Tempo de cura (h)	Tg (onset °C)
CDP 01	60	9	73
CDP 02	60	9	73,2
CDP 03	60	5	61,3
CDP 04	60	5	67
CDP 05	70	5	71,9
CDP 06	70	5	72,1
CDP 07	60	7	71,4
CDP 08	60	7	70,5
CDP 09	70	7	80,4
CDP 10	70	7	79,4
CDP 11	70	9	76,4
CDP 12	70	9	82,1
CDP 13	80	5	78,6
CDP 14	80	5	78,1
CDP 15	80	7	82
CDP 16	80	7	81,5
CDP 17	80	9	84,3
CDP 18	80	9	84,3
CDP 19	80	5	70,6
CDP 20	80	5	70,8
CDP 21	60	5	68,5
CDP 22	60	5	69
CDP 23	80	7	81,2
CDP 24	80	7	80,1
CDP 25	70	9	81
CDP 26	70	9	83,3
CDP 27	70	5	71,9
CDP 28	70	5	68
CDP 29	80	9	80,1
CDP 30	80	9	82,1
CDP 31	70	7	74,4
CDP 32	70	7	78
CDP 33	60	9	72,4
CDP 34	60	9	71,8
CDP 35	60	7	75,3
CDP 36	60	7	69,7

Os valores de primeiro Tg apresentados na Tabela 10 foram extraídos de análises como a da Figura 22 e são plotadas no gráfico da Figura 40 para avaliação da correlação entre tempo de cura, temperatura e Tg.

Figura 40 – Condição de cura

4.1.1. Comparação dos resultados

Apesar de os ensaios terem apresentado variação relativamente alta dos resultados é possível identificar claramente a tendência de aumento do Tg com a maior duração do período de cura e também da temperatura. Para o prosseguimento do estudo foram definidas condições de cura baseadas em uma variação de Tg da ordem de 10 a 15°C, tendo sido selecionadas as condições de baixa cura definida por um ciclo de 5 horas a 60°C e de alta cura definida por um ciclo de 9 horas a 80°C.

É importante mencionar além de definir as condições de processo para os ensaios mecânicos, o objetivo deste experimento era constatar a variação do Tg com a mudança dos parâmetros de temperatura e período de processo.

Não é esperado para o laminado a mesma relação dadas as características físicas distintas do laminado e do corpo de prova avaliados, sendo que o laminado é definido por cerca de 50% em volume de resina e pequena espessura enquanto os corpos de prova representavam um volume concentrado de resina, o que implica em uma cura acelerada devido à maior dificuldade de dissipação da energia proveniente da reação exotérmica de polimerização.

4.2. Ensaios mecânicos

Como já mencionado, foi realizado um programa de ensaios considerando-se duas situações de cura e duas direções do reforço.

As situações de cura estão relacionadas com o Tg medido nos painéis e as direções dos reforços serão chamadas de 0° e 45°, expostos nas seções 4.2.1, 4.2.2 e 4.2.3.

Todos os resultados são calculados através do software EMIC e todas as medições consideradas incoerentes foram inutilizadas.

4.2.1. Ensaios de tração

A relação entre as fibras de reforço e dos esforços para o ensaio de tração está definido conforme esquema da Figura 41 e Figura 42, sendo que a direção da fibra será chamada de 45° dado o fato de os painéis terem sido construídos com tecidos bi-diagonais e a direção do laminado ter sido tomada como referência para o eixo local.

Figura 41 – Tração a 45°

Figura 42 – Tração a 0°

4.2.1.1. Esforço a 0°

Os resultados do ensaio de tração dos painéis de baixa cura estão consolidados nas Tabela 11 e Figura 43, a foto dos mesmos é apresentada na Figura 44 e os resultados relacionados aos corpos de prova do laminado curados em condição de alta cura podem ser vistos na Tabela 12 e Figura 45 e as amostras ensaiadas na Figura 46.

Tabela 11 - Resultados 0° e baixa cura

Fração de vidro (vol): 48,4%			TG 58°C		
	Tensão (MPa)	Módulo (MPa)	Deformação (%)	Tensão ajustada (MPa)	Módulo ajustado (MPa)
CDP 01	131,7	12822,9	10,9	128,0	12463,8
CDP 02	119,9	12442,6	11,7	116,6	12094,3
CDP 03	137,5	11581,4	10,6	133,7	11257,2
CDP 04	123,0	11608,7	12,3	119,5	11283,7
CDP 05	ND	10240,1	10,2	ND	9953,4
CDP 06	ND	ND	11,0	ND	ND
CDP 07	117,2	12602,4	11,7	113,9	12249,5
CDP 08	133,3	12782,6	12,0	129,6	12424,8
CDP 09	133,6	13743,8	10,8	129,8	13359,0
CDP 10	123,9	14166,3	12,6	120,4	13769,7
Média	127,5	12443,4		123,9	12095,0
Desvio	7,4	1185,2		7,2	1152,0
LL (95%)	111,0	9843,8		107,9	9568,2
UL (95%)	144,0	15043,0		140,0	14621,9

Figura 43 - Tração a 0° e baixa cura

Figura 44 - Corpos de prova 0° e baixa cura

Tabela 12 - Resultados a 0° e alta cura

Fração de vidro (vol): 46,8%

TG 73°C

	Tensão (MPa)	Módulo (MPa)	Deformação (%)	Tensão ajustada (MPa)	Módulo ajustado (MPa)
CDP 01	127,0	12722,6	ND	127,7	12784,7
CDP 02	122,5	12655,9	ND	123,1	12717,7
CDP 03	120,5	12160,7	10,5	121,1	12220,0
CDP 04	124,5	12577,6	ND	125,1	12639,0
CDP 05	129,9	13002,5	ND	130,5	13066,0
CDP 06	110,8	13461,6	ND	111,3	13527,3
CDP 07	126,0	12186,7	ND	126,7	12246,2
CDP 08	122,0	13062,7	10,4	122,6	13126,5
CDP 09	116,9	12117,8	ND	117,4	12177,0
CDP 10	124,6	12560,8	12,2	125,2	12622,1
CDP 11	124,8	13063,1	10,4	125,4	13126,8
Média	122,7	12688,3		123,3	12750,3
Desvio	5,2	431,7		5,3	433,8
LL (95%)	111,4	11764,1		112,0	11821,5
UL (95%)	133,9	13612,6		134,6	13679,1

Tensão (MPa) **Figura 45 - Tensão a 0° e alta cura**

Figura 46 - Corpos de prova a 0° e alta cura

4.2.1.2. Esforço a 45°

Os resultados do ensaio de tração dos painéis com período de cura de 5 horas a 60°C está consolidado na Tabela 13 e Figura 47, a foto dos mesmos é apresentada na Figura 48 e os resultados relacionados aos corpos de prova do laminado curada por 9 horas a 80°C podem ser vistos na Tabela 14 e Figura 49, as amostras ensaiadas na Figura 50.

Tabela 13 – Resultados de tração a 45° e baixa cura					
Fração de vidro (vol): 47,0%			TG 61°C		
	Tensão (MPa)	Módulo (MPa)	Deformação (%)	Tensão ajustada (MPa)	Módulo ajustado (MPa)
CDP 01	386,6	19226,2	ND	386,6	19224,8
CDP 02	401,7	20532,0	ND	401,6	20530,4
CDP 03	357,0	24831,3	1,8	357,0	24829,4
CDP 04	352,0	21357,9	ND	351,9	21356,3
CDP 05	392,1	ND	ND	392,1	ND
CDP 06	387,1	ND	1,4	387,1	ND
CDP 07	ND	22511,3	ND	ND	22509,5
CDP 08	392,1	22680,7	2,1	392,1	22679,0
CDP 09	ND	20951,4	ND	ND	20949,8

Média	381,2	21727,3		381,2	21725,6
Desvio	19,0	1806,5		19,0	1806,4
LL (95%)	338,2	17632,3		338,2	17631,0
UL (95%)	424,3	25822,2		424,2	25820,2

Figura 47 - Tração a 45° e baixa cura

Figura 48 - Corpos de prova a 0° e baixa cura

Tabela 14 - resultados em tração a 0° e baixa cura

Fração de vidro (vol):		48,9%		TG 74°C	
	Tensão (MPa)	Módulo (MPa)	Deformação (%)	Tensão ajustada (MPa)	Módulo ajustado (MPa)
CDP 01	379,4	23518,2	ND	364,6	22601,9
CDP 02	ND	20322,2	1,7	ND	19530,3
CDP 03	394,5	21530,0	2,1	379,2	20691,1
CDP 04	394,2	23207,7	2,3	378,8	22303,5
CDP 05	360,6	20106,9	ND	346,5	19323,5
CDP 06	379,6	22560,5	ND	364,8	21681,4
CDP 07	381,8	19835,7	1,7	366,9	19062,8
CDP 08	385,9	23315,7	ND	370,8	22407,3
CDP 09	ND	ND	ND	ND	ND
CDP 10	ND	ND	ND	ND	ND
CDP 11	383,9	24116,1	ND	369,0	23176,4
Média	382,5	22057,0		367,6	21197,6
Desvio	10,6	1641,7		10,2	1577,7
LL (95%)	358,8	18456,2		344,8	17737,1
UL (95%)	406,2	25657,8		390,4	24658,1

Figura 49 - Tração a 45° e alta cura

Figura 50 - Corpos de prova ensaiados em tração a 45° e alta cura

4.2.2. *Ensaio de compressão*

Para os ensaios de compressão a nomenclatura dos corpos de prova segue o mesmo princípio do estabelecido no ensaio de tração, e é exemplificado no esquema da Figura 51.

Figura 51 - Corpos de prova a 45° e 0°

4.2.2.1. Esforço a 0°

Os resultados dos ensaios de compressão dos painéis com período de cura de 5 horas a 60°C está consolidado nas Tabela 15 e Figura 52, a foto dos mesmos é apresentada na Figura 53 e os resultados relacionados aos corpos de prova do laminado curada por 9 horas a 80°C podem ser vistos nas Tabela 16 e Figura 54 e as amostras ensaiadas nas Figura 55.

Tabela 15- Resultados de compressão a 0° e baixa cura

Fração de vidro (vol): 48,3%			TG 61°C		
	Tensão (MPa)	Módulo (MPa)	Deformação (%)	Tensão ajustada (MPa)	Módulo ajustado (MPa)
CDP 01	122,5	12240,4	ND	119,3	11917,6
CDP 02	116,6	ND	ND	113,5	ND
CDP 03	112,5	11857,2	ND	109,5	11544,5
CDP 04	124,3	14959,8	ND	121,0	14565,4
CDP 05	120,0	ND	ND	116,8	ND
CDP 06	122,7	ND	ND	119,5	ND
CDP 07	123,3	15801,2	ND	120,0	15384,5
CDP 08	112,4	ND	ND	109,5	ND
CDP 09	115,7	15334,8	ND	112,7	14930,4
CDP 10	114,6	ND	ND	111,6	ND
Média	118,5	14038,7		115,3	13668,5
Desvio	4,6	1845,8		4,5	1797,1
LL (95%)	108,5	9644,5		105,6	9390,2
UL (95%)	128,5	18432,9		125,1	17946,8

Força (N) **Figura 52 - Compressão a 0° e baixa cura**

Figura 53 - Corpos de prova em compressão a 0° e baixa cura

Tabela 16 - Resultados de compressão a 0° e alta cura

Fração de vidro (vol): 44,6%		TG 71°C			
	Tensão (MPa)	Módulo (MPa)	Deformação (%)	Tensão ajustada (MPa)	Módulo ajustado (MPa)
CDP 01	122,32	ND	ND	128,8916767	ND
CDP 02	129,62	6688,65	ND	136,5838712	7047,999617
CDP 03	134,34	ND	ND	141,5574546	ND
CDP 04	134,56	ND	ND	141,7892741	ND
CDP 05	126,33	6156,4	ND	133,1171151	6487,154335
CDP 06	126,4	7043,61	ND	133,1908758	7422,029943
CDP 07	123,66	7715,41	ND	130,3036685	8129,922589
CDP 08	128,84	6409,92	ND	135,7619655	6754,294769
CDP 09	132,92	6466,44	ND	140,0611647	6813,851322
CDP 10					
CDP 11					
Média	128,8	6746,7		135,7	7109,2
Desvio	4,5	560,4		4,7	590,5
LL (95%)	118,9	5448,5		125,3	5741,2
UL (95%)	138,6	8045,0		146,1	8477,2

Força (N) **Figura 54 - Compressão a 0° e alta cura**

Figura 55 - Corpos de prova a 0° e alta cura

4.2.2.2. Esforço a 45°

Os resultados dos ensaios de compressão dos painéis com período de cura de 5 horas a 60°C está consolidado nas Tabela 17 e Figura 56, a foto dos mesmos é apresentada na Figura 57 e os resultados relacionados aos corpos de prova do laminado curada por 9 horas a 80°C podem ser vistos nas Tabela 18 e Figura 58 e as amostras ensaiadas nas Figura 59.

Tabela 17 - Compressão a 45° e baixa cura

Fração de vidro (vol): 46,1%			TG 60°C		
	Tensão (MPa)	Módulo (MPa)	Deformação (%)	Tensão ajustada (MPa)	Módulo ajustado (MPa)
CDP 01	391,8	14635,1	4,1	399,4	14922,6
CDP 02	358,7	14096,1	5,4	365,7	14373,0
CDP 03	393,6	15287,4	4,8	401,4	15587,7
CDP 04	342,4	16707,3	3,5	349,1	17035,5
CDP 05	377,1	14888,9	4,0	384,5	15181,3
CDP 06	371,2	15592,1	ND	378,5	15898,4
CDP 07	371,5	13636,6	4,4	378,8	13904,5
CDP 08	345,6	14081,7	3,4	352,4	14358,3
CDP 09	336,0	15929,1	ND	342,6	16242,0
CDP 10	ND	12665,9	ND	ND	12914,7
CDP 11					
CDP 12					
CDP 13					
CDP 14					
CDP 15					
Média	365,3	14752,0		372,5	15041,8
Desvio	21,0	1188,3		21,4	1211,7
LL (95%)	319,2	12179,1		325,5	12418,3
UL (95%)	411,4	17324,9		419,5	17665,3

Força (N) **Figura 56 - Compressão a 45° e baixa cura**

Figura 57 - Corpos de prova de compressão a 45° e baixa cura

Tabela 18 - Resultados de compressão a 45° e alta cura

Fração de vidro (vol): 46,7%			TG 71°C		
	Tensão (MPa)	Módulo (MPa)	Deformação(%)	Tensão ajustada (MPa)	Módulo ajustado (MPa)
CDP 01	500,9	ND	ND	504,5	ND
CDP 02	ND	19431,5	4,3	ND	19573,8
CDP 03	440,5	19113,1	ND	443,7	19253,1
CDP 04	490,5	19214,5	ND	494,1	19355,2
CDP 05	ND	18452,3	3,4	ND	18587,5
CDP 06	447,4	ND	4,3	450,7	ND
CDP 07	479,4	ND	ND	482,9	ND
CDP 08	448,5	19496,7	ND	451,8	19639,5
CDP 09	520,4	ND	3,9	524,2	ND
CDP 10	ND	19501,9	3,5	ND	19644,8
CDP 11	461,3	ND	3,9	464,6	ND
CDP 12	477,0	21261,0	ND	480,5	21416,7
CDP 13	ND	18389,1	4,2	ND	18523,8
CDP 14	455,5	19256,4	3,5	458,9	19397,4
CDP 15	ND	ND	ND	ND	ND
Média	472,1	19346,3		475,6	19488,0
Desvio	26,1	830,3		26,3	836,4
LL (95%)	415,6	17525,1		418,6	17653,5
UL (95%)	528,7	21167,5		532,5	21322,5

Força (N)

Figura 58 - Compressão a 45° e alta cura

Figura 59 - Corpos de prova de compressão a 45° e alta cura

4.2.3. Ensaios de flexão

Para os ensaios de flexão, os carregamentos são aplicados em direção perpendicular ao plano das fibras, foi então considerado o mesmo princípio para nomenclatura dos painéis, porém com relação mais direta com a maior direção do corpo de prova. Esta relação segue o esboço definido nas Figura 60 e Figura 61.

Figura 60 - Flexão em corpos de prova a 45°

Figura 61 - Flexão em corpos de prova a 0°

4.2.3.1. Esforço a 0°

Os resultados dos ensaios de compressão dos painéis com período de cura de 5 horas a 60°C está consolidado nas Tabela 19 e Figura 62, a foto dos mesmos é apresentada na Figura 63 e os resultados relacionados aos corpos de prova do laminado curada por 9 horas a 80°C podem ser vistos nas Tabela 20 e Figura 64 e as amostras ensaiadas nas Figura 65.

Tabela 19 - Resultados de flexão a 0° e baixa cura

Fração de vidro (vol): 48%			TG 59°C	
	Tensão (MPa)	Módulo (MPa)	Deformação (%)	
			Tensão ajustada (MPa)	Módulo ajustado (MPa)
CDP 01	297,8	26484,0	290,0	25785,6
CDP 02	ND	ND	ND	ND
CDP 03	294,5	21695,8	286,7	21123,7
CDP 04	287,3	23524,5	279,8	22904,2
CDP 05	285,3	20465,9	277,8	19926,2
CDP 06	323,8	26821,5	315,3	26114,2
CDP 07	289,1	21768,8	281,4	21194,7
CDP 08	285,2	24459,1	277,7	23814,2
CDP 09	289,5	23185,5	281,9	22574,2
CDP 10	301,9	24384,0	293,9	23741,0
CDP 11	289,1	24109,5	281,4	23473,8
Média	294,3	23689,8	286,6	23065,2
Desvio	11,7	2033,2	11,4	1979,6
LL (95%)	269,0	19287,5	261,9	18778,9
UL (95%)	319,7	28092,2	311,2	27351,5

Figura 62 - Flexão a 0° e baixa cura

Figura 63 - Corpos de prova em ensaio de flexão a 0° e baixa cura

Tabela 20 - Resultados de flexão a 0° e baixa cura

Fração de vidro (vol): 45%

TG 70°C

	Tensão (MPa)	Módulo (MPa)	Deformação (%)	Tensão ajustada (MPa)	Módulo ajustado (MPa)
CDP 01	ND	22583,1		ND	23796,4
CDP 02	269,0	15374,8		283,5	16200,8
CDP 03	265,6	17323,1		279,8	18253,8
CDP 04	274,6	17368,5		289,3	18301,7
CDP 05	257,7	17535,7		271,6	18477,9
CDP 06	263,6	18120,1		277,7	19093,6
CDP 07	266,8	20815,6		281,1	21933,9
CDP 08	287,9	21008,0		303,3	22136,6
CDP 09	292,5	21935,7		308,2	23114,2
CDP 10	303,4	21326,8		319,6	22472,6
CDP 11	286,9	19958,2		302,3	21030,4
CDP 12	302,0	19763,5		318,2	20825,3
CDP 09					
CDP 10					
CDP 11					
Média	279,1	19426,1		294,1	20469,8
Desvio	16,1	2237,2		16,9	2357,4
LL (95%)	244,7	14683,5		257,8	15472,4
UL (95%)	313,5	24168,7		330,3	25467,1

Tensão (MPa) **Figura 64 - Flexão a 0° e alta cura**

Figura 65 - Corpos de prova de flexão a 0° e alta cura

4.2.3.2. Esforço a 45°

Os resultados dos ensaios de compressão dos painéis com período de cura de 5 horas a 60°C está consolidado nas Tabela 21 e Figura 66, a foto dos mesmos é apresentada na Figura 67 e os resultados relacionados aos corpos de prova do laminado curada por 9 horas a 80°C podem ser vistos nas Tabela 22 e Figura 68 e as amostras ensaiadas nas Figura 69.

Tabela 21 - Resultados de flexão a 45° e baixa cura

Fração de vidro (vol): 45%			TG 61°C		
	Tensão (MPa)	Módulo (MPa)	Deformação (%)	Tensão ajustada (MPa)	Módulo ajustado (MPa)
CDP 01	708,2	32024,9		738,2	33379,1
CDP 02	624,9	29199,3		651,3	30434,1
CDP 03	673,4	32994,6		701,9	34389,8
CDP 04	797,8	45526,2		831,5	47451,3
CDP 05	785,8	44714,7		819,1	46605,5
CDP 06	671,0	39519,4		699,3	41190,6
CDP 07	671,0	38125,8		699,3	39738,0
CDP 08	686,9	32454,9		716,0	33827,3
CDP 09	709,6	42645,9		739,6	44449,2
CDP 10	740,1	32643,3		771,4	34023,7
CDP 11					
Média	706,9	36984,9		736,8	38548,9
Desvio	54,2	5897,1		56,5	6146,5
LL (95%)	589,6	24216,5		614,5	25240,5
UL (95%)	824,2	49753,3		859,1	51857,2

Figura 66 - Flexão a 45° e baixa cura

Figura 67 - Corpos de prova em flexão a 45° e baixa cura

Tabela 22 - Resultados de flexão a 45° e alta cura

	Fração de vidro (vol): 51%		TG 73°C		
	Tensão (MPa)	Módulo (MPa)	Deformação (%)	Tensão ajustada (MPa)	Módulo ajustado (MPa)
CDP 01	890,5	52685,8		822,6	48668,6
CDP 02	941,7	56819,2		869,9	52486,8
CDP 03	990,1	59208,0		914,6	54693,4
CDP 04	988,7	59017,9		913,3	54517,8
CDP 05	1038,3	56645,7		959,1	52326,6
CDP 06	962,6	57900,8		889,2	53485,9
CDP 07	858,1	47105,4		792,7	43513,7
CDP 08	894,4	49155,6		826,2	45407,5
CDP 09	882,6	49237,7		815,3	45483,4
CDP 10	856,7	51285,6		791,3	47375,1
CDP 11	781,7	44225,7		722,1	40853,6
CDP 12	936,7	55491,5		865,3	51260,4
CDP 13	940,6	58100,4		868,9	53670,4
CDP 14					
CDP 15					
Média	920,2	53606,1		850,0	49518,7
Desvio	68,6	4981,7		63,4	4601,8
LL (95%)	776,0	43138,4		716,8	39849,2
UL (95%)	1064,4	64073,7		983,2	59188,2

Figura 68 - Flexão a 45° e alta cura

Figura 69 - Corpos de prova ensaiados em flexão a 45° e alta cura

4.2.4. Comparação dos resultados

Para a comparação dos resultados, nesta seção serão plotados os valores médios encontrados e os limites superior e inferior com intervalo de confiança de 95%.

A Figura 70 compara as propriedades em tração a 0° e demonstra equivalência estatística entre as amostras de baixa e alta cura.

Figura 70 - Comparação da condição de cura e propriedades de tração a 0°

A Figura 71 compara as propriedades em tração a 45° e demonstra equivalência estatística entre as amostras de baixa e alta cura.

Figura 71 - Comparação das propriedades de tração a 45°

As propriedades das amostras a 0° (Figura 72) em compressão apresentaram diferença estatística, com viés de aumento da propriedade de tensão admissível e de queda em relação ao módulo com o aumento da condição de cura.

Figura 72 - Comparação das propriedades para compressão a 0°

A Figura 73 compara as propriedades das amostras a 45° em compressão, onde é possível afirmar com 95% de certeza de que houve aumento das propriedades mecânicas com o aumento da cura.

Figura 73 - Comparação das propriedades em compressão a 45°

A Figura 74 compara as propriedades das amostras a 0° em flexão, demonstrando que não há diferença estatística entre as amostras avaliadas.

Figura 74 - Comparação das propriedades de flexão a 0°

A Figura 75 compara as propriedades das amostras a 45° em flexão, embora exista um viés de alta nas propriedades avaliadas, não é possível afirmar que existe diferença entre as amostras com baixo e alto ciclo de cura.

Figura 75 - Comparação das propriedades em flexão a 45°

5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com os resultados obtidos neste estudo é possível afirmar que as condições de cura exercem influência nas propriedades mecânicas do compósito estudado, principalmente nos aspectos de compressão.

É evidente que muitos cuidados básicos além do processo de cura devem ser tomados quando se está projetando utilizando compósitos. Entre eles podem-se citar variações com influências já conhecidas como a do correto posicionamento e alinhamento das fibras, correto tensionamento dos filamentos, nível controlado de vazios, garantia do nível correto de impregnação, correta seleção da matriz e reforço entre outros.

O impacto mais significante da condição de cura observado foi nas propriedades em compressão, onde os resultados obtidos sugerem um aumento de propriedades da ordem de 15 a 30% em tensão 50% a menos módulo a 0° e 30% a mais a 45° com o aumento da temperatura de transição vítrea.

Um fator adicional bastante interessante foi o fato de as dispersões observadas nos corpos de prova de baixa cura ser consistentemente maior, possivelmente devido a variações mais significativas na microestrutura do laminado e suas zonas amorfas.

Genericamente as propriedades melhoraram com o aumento da cura, o que era esperado, com exceção do módulo elástico na direção da fibra, uma possível explicação para este fato inesperado é de que a resina menos rígida age como um eficiente transmissor de esforços para a fibra em cisalhamento, até que a falha catastrófica ocorra.

É conveniente frisar que o intuito deste trabalho é justificar a necessidade de uma avaliação completa do processo produtivo nas características da peça final e reforçar a importância de se considerar na fase de projeto as características do compósito que será

obtido pelo processo produtivo em questão. Também, pode-se reforçar a importância de se analisar criticamente a modificação dos parâmetros produtivos de acordo com as características de cada processo.

Neste trabalho não foram consideradas características fundamentais como a de fadiga, onde possivelmente seria possível justificar, por exemplo, a redução da vida útil de um componente aeronáutico em centenas de horas de voo.

Seria interessante desenvolver este estudo considerando condições diferentes de cura, com temperaturas de transição vítrea mais baixas ou ainda condições de ensaio mais próximos da temperatura de transição vítrea, note que estes ensaios foram realizados a temperatura ambiente, ou seja, cerca de 25°C abaixo do Tg mais baixo o que traz maior estabilidade ao laminado do que se os mesmo ensaios fossem realizados a cerca de 40°C. Outra possibilidade seria a de avaliar a resistência ao impacto em temperaturas sub-ambientais, da ordem de 40°C abaixo de zero, condição onde estruturas aeronáuticas são frequentemente submetidas.

Um estudo adicional que pode ser proposto é o impacto desta cura parcial na condição de resistência a intempéries como ambientes salinos, excessiva umidade, pHs alcalinos ou ácidos, estruturas submersas e tantas outras.

REFERÊNCIAS

- ADOPTTECH, **Filament Wound Pressure Vessel Design**
<<http://www.adopttech.com/pressure-vessels/main.htm>>, acessado em 11 de Junho de 2011.
- ANTONIOU, A.E., KENSCHKE, C. & PHILIPPIDIS, T.P. 2009, "**Mechanical behavior of glass/epoxy tubes under combined static loading. Part I: Experimental**", *Composites Science and Technology*, vol. 69, no. 13, pp. 2241-2247.
- ASTM D2584 - 08 **Standard Test Method for Ignition Loss of Cured Reinforced Resins**, ASTM, 2008.
- AZOM, 2001 – "**Thermosetting Composites - Processing**"
<<http://www.azom.com/Details.asp?ArticleID=352>>, acessado em 15 de Novembro de 2010.
- BLASS, A. **Processamento de Polímeros**. Florianópolis, Editora da UFSC, 1985.
- CALLISTER Jr, W. D. **Materials science and engineering**, New York, John Wiley & Sones, 1985.
- CAMPBELL, F. C., **Manufacturing technology for aerospace structural materials**, Elsevier, Great Britain, p. 273-327, 2006.
- FAA, 2009 "**New Large Aircraft Composite Fire Fighting**"
<<http://www.airporttech.tc.faa.gov/Safety/Patterson2.asp>>, acessado em 20 de Novembro de 2010
- HANSEN, P. & GIANNIS, S. 2008, "**Advanced composite materials in wind turbine applications: Recent r&d activities**", *Energy Materials: Materials Science and Engineering for Energy Systems*, vol. 3, no. 1, pp. 1-4.
- IDES, 2010 "Flexural Properties - ISO 178"
<http://www.ides.com/property_descriptions/ISO178.asp>, acessado em 04 de Janeiro de 2011.
- ISHIKAWA, **Guide to quality control**, Asian Productivity Organization, 1976
- ISO 14126:1999 **Fibre-reinforced plastic composites -- Determination of compressive properties in the in-plane direction**, ISO, 1999.

- ISO 14129-1997 **Fibre-reinforced plastic composites -- Determination of the in-plane shear stress/shear strain response, including the in-plane shear modulus and strength, by the plus or minus 45 degree tension test method**, ISO, 1997.
- ISO 178 :2010 **Plastics -- Determination of flexural properties**, ISO, 2010.
- ISO 527-1:1993 **Plastics -- Determination of tensile properties -- Part 1: General principles**, ISO 1993.
- ISO 527-2:1993 **Plastics -- Determination of tensile properties -- Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics**, ISO 1993.
- ISO 527-4:1997 **Plastics -- Determination of tensile properties -- Part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites**, ISO 1997.
- ISO 9001:2008 **Quality management systems – Requirements**, ISO, 2008.
- JONES, F. R. Handbook of polymer–fibre composites, ed. Longman Group, UK ISBN 0582 065 542, 418 pp., 1994.
- JOSELIN HERBERT, G.M., INIYAN, S., SREEVALSAN, E. & RAJAPANDIAN, S. "A review of wind energy technologies", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 11, no. 6, pp. 1117-1145, 2007.
- JUDD, N.C.W and WRIGH, W. W. "Voids and Their Effects on the mechanical Properties of Composites – An Appraisal" SAMPE J., 14, 10, 1978
- LUCATTO, D. – **Contribuição ao projeto e validação de trem de pouso, tipo Wittman, em lâminas ortotópica transversa de material compósito de vidro e epóxi, para aeronaves enquadradas no FAR PART-23**. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo 1991.
- MIDDLETON, V **Filament Winding**, Handbook of polymer fibre composites. F. R. JONES (ed.) Longman: Harlow pp154-60, 1994.
- MOMENTIVE – **“EPIKOTE™ Resin MGS® RIMR 135 and EPIKURE™ Curing Agent MGS® RIMH 134–RIMH 137”** – Ficha técnica do produto, 2006
- NAM, Y., YOON, T.J. & YOO, N.S. "Dynamic characteristic analysis of a wind turbine depending on varying operational conditions", *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, A*, vol. 33, no. 1, pp. 42-48, 2009.
- OWENS CORNING, **Double Bias Fabrics ($\pm 45^\circ$)** - Ficha Técnica de Produto, 2008.

OWENS CORNING, **Resin Infusion (Scrip)**

<http://www.owenscorning.com/composites/processes/Resin_Infusion_Scrip.asp>, acessado em 04 de Setembro de 2010a.

OWENS CORNING, **Pultrusion**

<<http://www.owenscorning.com/composites/processes/Pultrusion.asp>>, acessado em 04 de Setembro de 2010b

RAJADURAI, J.S., CHRISTOPHER, T., THANIGAIYARASU, G. & RAO, B.N.

"Finite element analysis with an improved failure criterion for composite wind turbine blades", *Forschung im Ingenieurwesen/Engineering Research*, vol. 72, no. 4, pp. 193-207., 2008.

SAERTEX – **BIDIAGONAL-GLASS-FABRIC 1000g/m2** - Ficha Técnica de Produto, 2004.

TARNOPOL'SKII, Yu. M; PETERS, S. T.; BEIL', A. I. **Filament Winding**. London; Chapman & Hall, 1998.

THOMSEN, O.T., **"Sandwich materials for wind turbine blades - Present and future"**, *Journal of Sandwich Structures and Materials*, vol. 11, no. 1, pp. 7-26, 2009.

TITA, V. ; CARVALHO, J. ; LIRANI, J. . **Theoretical and experimental dynamic analysis of fiber reinforced composite beams**. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Brazil, v. XXV, n. 3, p. 306-310, 2003

VEERS, P.S., ASHWILL, T.D., SUTHERLAND, H.J., LAIRD, D.L., LOBITZ, D.W., GRIFFIN, D.A., MANDELL, J.F., MÚSIAL, W.D., JACKSON, K., ZUTECK, M., MIRAVETE, A., TSAI, S.W. & RICHMOND, J.L, **"Trends in the design, manufacture and evaluation of wind turbine blades"**, *Wind Energy*, vol. 6, no. 3, pp. 245-259, 2003.

VITALE, A.J. & ROSSI, A.P., **"Computational method for the design of wind turbine blades"**, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 33, no. 13, pp. 3466-3470., 2008.

WANG, J., Qin, D. & Zhang, Q., **"Mathematical model for predicting the blade behaviour of horizontal axis wind turbine"**, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 222, no. 9, pp. 1661-1694, 2008.