

Pérsio Mozart Pinto

**AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE PULTRUDADOS
COM DIFERENTES TIPOS DE MATRIZES PARA
APLICAÇÃO EM CABOS CONDUTORES**

Guaratinguetá
2012

Pérsio Mozart Pinto

AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE PULTRUDADOS COM DIFERENTES TIPOS DE MATRIZES PARA APLICAÇÃO EM CABOS CONDUTORES

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.

Orientadora: Prof^a. Dra. Michelle Leali Costa
Co-orientador: Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho

Guaratinguetá
2012

P659a	Pinto, PÉrsio Mozart Avaliação de sistemas de pultrudados com diferentes tipos de matrizes para aplicação em cabos condutores / PÉrsio Mozart Pinto – Guaratinguetá : [s.n], 2012. 86 f. : il. Bibliografia: f. 81-86 Trabalho de Graduação em Engenharia de Materiais – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2012. Orientadora: Profa. Dra. Michelle Leali Costa Coorientador: Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho 1. Resinas epóxi 2. Fibras de carbono I. Título CDU 665.9
-------	---

**AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE PULTRUDADOS COM DIFERENTES TIPOS DE
MATRIZES PARA APLICAÇÃO EM CABOS CONDUTORES**

Pérsio Mozart Pinto

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

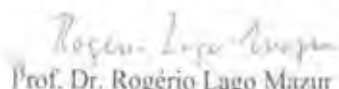
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Profa. Dra. Michelle Leali Costa
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho
Co-orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. Rogério Lago Mazur
UNESP/FEG

Dezembro de 2012

Dedico este trabalho aos meus pais Wilson Roberval Pinto e Vera Lúcia Vidal Pinto, aos meus familiares, amigos, mestres e aos colaboradores das instituições pelas quais passei, pois estas pessoas me ensinaram de formas diferentes e fizeram de mim o que sou hoje.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por tudo que me deu e possibilitou-me a fazer e a ser.

A meus pais Wilson Roberval Pinto e Vera Lúcia Vidal Pinto, por terem me concebido como fruto de seu amor e me ensinado por palavras e gestos. Aos meus familiares e amigos, os quais junto com meus pais me ajudaram a construir minha história com seus momentos alegres e tristes que me ajudaram a ser mais compreensível, tolerante, a fortalecer a minha psique contra maus estímulos e a buscar prazer nas coisas mais simples.

Aos meus mestres, por terem me ensinado a raciocinar, a descobrir o mundo que me cerca, terem despertado a sede do saber e me dado todo o conhecimento o qual me norteou na vida acadêmica,

Aos professores Ana Paula Rosifini Alves Claro e Edson Cocchieri Botelho, por terem me orientado em minhas pesquisas acadêmicas, através das quais aprendi muito do que sei na prática do curso de Engenharia de Materiais.

Ao CPqD, em especial ao Gibran da Cunha Vasconcelos, pela oportunidade de adquirir minha primeira experiência profissional, me ensinado a como ser um Engenheiro de Materiais e ter me apresentado amigos dentro desta instituição, os quais juntamente com ele ajudaram-me a desenvolver minha carreira.

A CEMIG e ao programa de P&D Aneel, pelo suporte financeiro no projeto “Desenvolvimento de novos condutores com novas estruturas e com uso de materiais alternativos e funções autossensoriais”, que permitiram a realização deste trabalho.

Aos colaboradores das instituições por onde passei, os quais indiretamente me proporcionaram um ambiente harmonioso.

PINTO, P. M. **Avaliação de sistemas de pultrudados com diferentes tipos de matrizes para aplicação em cabos condutores.** 2012. 86f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia de Materiais) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

RESUMO

Têm-se observado nas últimas décadas um aumento gradativo no consumo de energia elétrica por parte das sociedades ao longo de todo o mundo. Em consequência, as concessionárias de energia elétrica têm transmitido maiores quantidades de energia elétrica ao longo dos cabos de transmissão de energia, o que tem aumentado a flecha nas torres de transmissão. Além disso, a construção de mais torres de transmissão esbarra em barreiras constitucionais de proteção ao meio ambiente, devido ao impacto ao mesmo que a construção daquelas pode gerar. Assim, visando aumentar a quantidade de energia transmitida pelos cabos de condução, reduzir o número de torres construídas e a flecha sobre as mesmas, propõe-se no presente trabalho a substituição do núcleo tradicional dos cabos de condução utilizados, confeccionado em aço, por um núcleo de material compósito, o qual é constituído por fibras de carbono pultrudadas com resinas poliméricas como matrizes. Visando avaliar se as resinas mais utilizadas em compósitos estruturais podem ser utilizadas como matrizes, com as propriedades visadas para aplicação do material compósito, confeccionaram-se os sistemas de pultrudados de fibra de carbono com resinas epóxi, fenólica e poliéster como matriz e realizou-se a caracterização físico-química e mecânica dos mesmos, por meio dos ensaios de tração e Poisson, análise termogravimétrica (TGA), calorimetria exploratória diferencial (DSC) e espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), segundo suas respectivas normas.

Palavras-chave: Pultrudados de Fibra de carbono. Resina epóxi. Resina fenólica. Resina poliéster. Cabos condutores.

PINTO, P. M. **Evaluation of pultruded systems with diferentes types of matrixs for conductor cables application.** 2012. 86f. Graduate Work (Graduate in Materials Engeneering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

ABSTRACT

In the last decades it has been observed a substantial developing of the electrical energy demand in the societies all over the World. In consequence the electrical energy distribution companies are increasing the quantity of electrical energy through the electrical energy conductor cables, which had grown the sag in the towers of energy transmission. Furthermore, the construction of more transmission towers brings a lot of troubles due environmental protection laws. In this way, looking forward to increase the quantity of electrical energy transmitted through electrical cables conductors, reduce the need of constructing new transmission towers and the sag in them, we suggest in this work the replace of the traditional core of the conductors cables commonly used, made of steel, by a core made by a composite material, which one is made by carbon fibers pultruded with polymeric resins as matrix. In a order to evaluate if the resins more commonly used in structural composites can be applied as matrix to make possible to use the composite material as a core, we made carbon fibers systems pultruded with epoxy, phenolic and polyester resins as matrix and a mechanic and physic-chemistry characterization was done on the systems by Tensile and Poisson tests, differential sprobe calorimetry (DSC), thermogravimetric analysis (TGA) and Fourier transformed infrared spectroscopy (FTIR), following their correspondents standards.

Key-words: Carbon fibers pultruded. Epoxy resins. Phenolic resins. Polyester resins. Conductor cables.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	Considerações Iniciais.....	9
1.2	Motivação.....	9
1.3	Justificativa	10
1.4	Objetivo.....	11
2	DESENVOLVIMENTO	11
2.1	Materiais compósitos.....	11
2.2	Matrizes Poliméricas	14
2.2.1	Matrizes Termorrígidas	16
2.3	Fibras de carbono	29
2.4	Cabos Condutores	31
2.5	Pultrusão.....	36
2.6	Ensaio de Tração e Poisson.....	38
2.7	Análise Termogravimétrica (TGA).....	40
2.8	Calorimetria Diferencial Exploratória (DSC)	43
2.9	Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR).....	45
2.10	Análise de variância (ANOVA)	54
3	MATERIAIS E MÉTODOS	59
3.1	Materiais.....	59
3.2	Métodos.....	60
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	62
4.1	Ensaio de tração e Poisson	62
4.2	Espectroscopia de infravermelho (FTIR)	71
4.3	Análise Termogravimétrica (TGA).....	73
4.4	Calorimetria Diferencial Exploratória (DSC)	77
4.5	Densidade	78

5	CONCLUSÕES.....	79
6	PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	80
7	REFERÊNCIAS	81

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

Ao longo dos últimos anos verificou-se um significativo aumento da população mundial, o qual tem gerado consequentemente aumento do consumo de recursos naturais e de energia, para que as necessidades da humanidade sejam saciadas (KOPSIDAS, ROWLAND, 2009; MAKHKAMOVA et. al., 2003; BURKS, ARMENTROUT, KUMOSA, 2010).

Em todas as áreas muitos esforços têm sido realizados para atender as necessidades e desejos da sociedade, consequentemente as grandes empresas têm investido muito no seu campo de atuação para reduzir seus gastos e aumentar a produtividade aliada ao aumento da demanda no mercado.

Uma das áreas a qual vem apresentando alguns problemas é a de transmissão de energia elétrica. Esta área atende tanto as grandes empresas como a população, os quais estão em crescimento constante. Porém, sua infraestrutura tem apresentado limitações que barram o crescimento no fornecimento de energia elétrica (KOPSIDAS, ROWLAND, 2009; MAKHKAMOVA et. al., 2003; BURKS, ARMENTROUT, KUMOSA, 2010; LOBRY, GUÉRY, 2012).

Por isto este setor tem investido em pesquisas para superar estas limitações, e uma linha de pesquisa a qual tem crescido é a de novos materiais para cabos de condução de energia, na qual o presente trabalho está focado.

1.2 Motivação

Tendo em vista o aumento da demanda de energia elétrica no mundo, um desafio se estabeleceu para as empresas distribuidoras (KOPSIDAS, ROWLAND, 2009; MAKHKAMOVA et. al., 2003; BURKS, ARMENTROUT, KUMOSA, 2010; LOBRY, GUÉRY, 2012), uma vez que o aumento da quantidade de energia elétrica transmitida nos

cabos de condução atuais tem acarretado problemas nos mesmos ao longo das linhas de transmissão de energia elétrica, como por exemplo, aumento da flecha e da temperatura de trabalho (ALAWAR; BOSZE; NUTT, 2005), a qual tem gerado a recristalização do alumínio fazendo com que o mesmo perca suas propriedades.

Tais problemas inspiraram a busca por novos materiais para serem utilizados na fabricação de cabos de condução de energia. Os materiais devem possuir menor densidade, maior temperatura de trabalho, resistência a intempéries e a corrosão (ALAWAR, BOSZE, NUTT, 2005; LOBRY; GUÉRY, 2012).

Uma classe de materiais que vem despertando muito interesse na engenharia, por apresentar boa relação peso e resistência e por aliar sinergicamente as propriedades de dois materiais diferentes, são os materiais compósitos. Essa classe de materiais tem sido muito utilizada para fins estruturais como grades para plataformas de petróleo, componentes de aviões e de carros, próteses humanas, entre outros (TSAO; CHIU, 2011).

Os problemas apresentados nas linhas de condução de energia elétrica e as boas propriedades mecânicas e físico-químicas dos materiais compósitos, que por serem materiais constituídos de dois materiais agindo em sinergia apresentam inúmeras vantagens sobre as outras classes de materiais, motivaram a realização do presente trabalho o qual busca caracterizar três tipos de compósitos existentes no mercado para verificar se os mesmos se adequam as necessidades de transmissão de energia atuais.

1.3 Justificativa

Por se verificar grande interesse por parte das empresas distribuidoras de energia em reduzir as limitações impostas pelos materiais que compõem os cabos de condução de energia, o presente trabalho foi proposto para avaliar se os materiais compósitos comercialmente utilizados se adequam para a confecção de cabos de condução de energia com a finalidade de reduzir os problemas gerados pelo aumento na condução de energia elétrica.

1.4 Objetivo

O presente trabalho objetiva caracterizar materiais compósitos na forma de tarugo pultrudado, composto por fibras de carbono e com matrizes de resina epóxi, poliéster e fenólica. Além disso, objetiva-se verificar se os materiais escolhidos podem ser aplicados na transmissão de energia elétrica de forma a amenizar os problemas ocorridos nas linhas de transmissão de energia, quando estas são severamente requisitadas, devido ao aumento da demanda de energia elétrica, seguido pelo aumento da transmissão dessa pelas linhas de condução.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Materiais compósitos

Materiais compósitos são materiais que possuem no mínimo duas fases bem definidas, podendo conter mais de duas, sendo uma responsável por transmitir a força mecânica aplicada ao material e a outra responsável por resistir à mesma (PATNAIK et. al., 2009).

A fase responsável por transmitir a força mecânica ao longo do material é denominada matriz. O material da matriz pode ser cerâmico, metálico ou polimérico de acordo com a necessidade (PATNAIK et. al., 2009).

A fase responsável por resistir à força mecânica aplicada é denominada de reforço. Um dos principais tipos de reforço são as fibras, que podem ter diferentes tamanhos com nomenclatura específica para cada um, sendo eles fibras curtas e fibras longas. As fibras podem apresentar orientações variáveis ao longo do material e também distribuição homogênea ou heterogênea (PATNAIK et. al., 2009).

A matriz e o reforço que compõem o material compósito podem ou não ser do mesmo material, e de maneira geral trabalham em sinergia, ou seja, a união das duas fases melhora as

propriedades de ambas em relação a elas de maneira separada (PATNAIK et. al., 2009; XIE et. al. 2012; NOHARA et. al., 2007).

Entre a matriz e a fibra existe uma região denominada interface que pode ser definida como a superfície limite entre ambas, por meio da qual ocorre descontinuidade de alguns parâmetros, e onde ocorre a interação entre a matriz e a fibra (MARIETA et. al. 2005; REZENDE, COSTA, BOTELHO, 2011). Uma boa adesão interfacial é essencial para que ocorra a transferência de esforços no material compósito, melhorando as propriedades dos mesmos. Uma maneira de melhorar esta interação é realizando um tratamento superficial na fibra, de modo a aumentar a sinergia entre os dois materiais (MARIETA et. al. 2005; REZENDE, COSTA, BOTELHO, 2011).

Diferentes tipos de compósitos apresentam características bem diversas entre si, e os seus usos em diferentes aplicações dependem de fatores tais como: desempenho estrutural, preço e disponibilidade das matérias-primas, cadência do processo de fabricação, grau de cura, para matrizes termorrígidas, entre outros parâmetros (GUO et. al., 2005; SHARMA, RAO, BIJWE, 2009; NETO, PARDINI, 2006).

Nos compósitos reforçados com fibras longas, outro fator que influencia as propriedades do material é a orientação das fibras no mesmo. Fibras unidirecionais possuem algumas vantagens em relação às bidirecionais, que por sua vez são de difícil processamento (SHARMA, RAO, BIJWE, 2009). Os problemas observados em materiais compósitos constituídos de fibras bidirecionais encontra-se numa possível impregnação imprópria das fibras pela matriz nos pontos em que as fibras se cruzam, o que não ocorre no caso das fibras unidirecionais (SHARMA, RAO, BIJWE, 2009).

Nas últimas décadas, o aumento da demanda em vários setores da indústria, como aeroespacial, automobilística, marítima, equipamento de processamento químico e esporte, por melhor desempenho e estruturas de baixo peso tem estimulado uma forte expansão no desenvolvimento de compósitos laminados de fibras com matriz polimérica, tornando-os uma importante classe de materiais (LIU, TANG, CONG, 2012; KHAN et. al., 2011; KWON et. al., 2012; TSAO, CHIU, 2011; IQBAL, DINGEMANS, 2011). Por possuírem consideráveis vantagens, eles têm sido usados para substituir os materiais metálicos convencionais em vários ramos da indústria tais como: a aeroespacial, a aeronáutica e a defesa, as quais

requerem materiais estruturais com propriedades superiores como elevada relação força/peso e rigidez/peso (LIU; TANG; CONG, 2012).

Segundo NETO E PARDINI (2006), o setor industrial tem investido significativamente em equipamentos de processo para utilização de matrizes predominantemente termorrígida. Mais recentemente, têm sido concentrados muitos esforços em pesquisas com o intuito de utilizar mais intensamente as matrizes termoplásticas (poli-éter-éter-cetona, poliimidas, etc.), metálicas (alumínio, magnésio, titânio, etc.) e cerâmicas (carbeto de silício, mulita, etc.). Porém as aplicações comerciais destes compósitos ainda não são significativas.

Formidáveis avanços têm sido realizados no campo de fibras de alto desempenho na última metade do século 20 (CHAWLA, 2012). A chamada era das fibras iniciada com o advento das fibras sintéticas como o nylon, poliéster, etc., começou no fim dos anos de 1930 e começo dos anos de 1940 (CHAWLA, 2012). Companhias como a DuPont, Monsanto, Basf, Hoechst, ICI, etc. contribuíram em peso nesta área (CHAWLA, 2012). Muitas fibras de polímeros sintéticos como poliéster, nylon, etc. tem propriedades muito uniformes e reproduzíveis (CHAWLA, 2012). Mas seus baixos módulos de elasticidade os restringem para o mercado de vestuário e têxtil (CHAWLA, 2012).

Trabalhos de pesquisa objetivando fazer fibras poliméricas sintéticas fortes e rígidas, para serem utilizadas como reforços em polímeros, começaram a ser realizadas nos anos de 1960 (CHAWLA, 2012). Estas pesquisas resultaram em fibras fortes e rígidas, comercialmente disponíveis como fibras de aramida e polietileno. Em paralelo, ocorreu um grande progresso na criação de fibras de carbono, que realmente começou no século 19 com os trabalhos de Tomas Edson envolvendo a conversão de fibras de algodão em fibras de carbono (CHAWLA, 2012). As fibras de carbono podem ser consideradas estabelecidas como material de engenharia; uma prova é o avião Boeing 787 o qual é feito de compósitos de fibra de carbono com matriz de resina epóxi (50% do peso) (CHAWLA, 2012).

Ainda segundo NETO E PARDINI (2006), tradicionalmente tem se utilizado extensivamente nos compósitos sintéticos polímeros termorrígidos (epóxi, poliéster, fenólica, etc.) como matriz e fibras de vidro, carbono e aramida como reforços. As matrizes termoplásticas ainda têm sido pouco empregadas em compósitos, mas possuem a vantagem de poderem ser recicladas.

No campo dos reforços, as fibras de vidro-E apresentam módulo de elasticidade (E) próximo ao das ligas de alumínio estruturais, de ~ 72 GPa, as de aramida (poliamida aromática, p. ex. Kevlar 49© da DuPont) são um pouco mais rígida que o titânio, tendo um módulo de elasticidade de ~ 130 GPa, e as fibras de carbono de alta resistência são mais rígidas que os aços em geral, tendo um módulo de elasticidade maior que 230 GPa. As fibras de carbono são o único tipo de reforço que podem apresentar um largo espectro de resistência à tração e módulo de elasticidade dependendo da temperatura de tratamento térmico (500-2.500°C). Estas fibras utilizadas em compósitos como reforço são muito leves e apresentam densidades próximas de: $2,5 \text{ g/cm}^3$ (vidro-E); $1,4 \text{ g/cm}^3$ (aramida) e $1,75 \text{ g/cm}^3$ (carbono). As fibras de carbono e de vidro são as mais comumente utilizadas como reforço em processamento de materiais compósitos com matriz polimérica (CHAWLA, 2012; LÓPEZ et. al., 2012).

2.2 Matrizes Poliméricas

Atualmente, os polímeros são materiais bem populares e largamente utilizados. As principais razões desta popularidade é a sua grande diversidade de polímeros sintéticos disponíveis, variedade de técnicas de processamento que pode ser aplicada a eles, e a possibilidade de adicionar substâncias a eles enquanto são processados. Estas circunstâncias são responsáveis pelo uso de polímeros sintéticos em um grande número de aplicações (ASENSIO et. al., 2009).

A natureza química do polímero não é o único fator que influencia suas propriedades e comportamento ao longo período. Outros fatores são: o tamanho molecular, grau de cristalinidade, e a natureza e proporções de certos materiais, os quais são adicionados no processamento do polímero como aditivos, reforços e enchimentos. Há uma larga variedade destes aditivos que desempenham várias funções no polímero final. Por exemplo, alguns são usados para aumentar a elasticidade, como retardante de chama, como antioxidante, etc. (ASENSIO et. al., 2009).

A forma de processamento do polímero é outro fator que está diretamente relacionado com a sua utilização. Muitos métodos de processamento podem levar a filmes, fibras,

espumas, plásticos ondulados, folhas, multicamadas, compósitos, blendas e reforço de materiais. Materiais multicamadas podem ter um núcleo de plástico ondulado, núcleo de plástico celular ou núcleo na forma de colmeia (ASENSIO et. al., 2009).

Muitos destes materiais são conhecidos pelos seus nomes comerciais, os quais possuem sua composição muito conhecida. Mesmo que os fabricantes informem a composição química de seus produtos, eles não a informam completamente, porque muitos destes materiais são supostamente patentes. Portanto, é absolutamente necessário caracterizar analiticamente qualquer material para checar sua composição (ASENSIO et. al., 2009).

Os materiais poliméricos podem ser divididos em termoplásticos e termorrígidos. Estes materiais são aplicados em diferentes condições de serviço, alguns deles apresentam um segmento especial com alto desempenho que oferecem propriedades especiais (MADUGU; ABDULWAHAB; AIGBODION, 2009). Quando apropriadamente formulados, eles podem ser conformados em componentes mecanicamente funcionais ou componentes estruturais (MADUGU, ABDULWAHAB, AIGBODION, 2009; VARGA et. al., 2010). Componentes mecânicos funcionais são partes que podem estar sujeitas a esforços mecânicos, impacto, flexão, vibração, atrito, temperaturas extremas, ambientes hostis, etc., em trabalho contínuo. Este grupo de polímeros é denominado de polímeros de engenharia (MADUGU, ABDULWAHAB, AIGBODION, 2009; VARGA et. al., 2010).

Segundo NETO e PARDINI (2006), as resinas epóxi têm maior custo, dentre as matrizes termorrígidas, porem apresentam resistências ao calor e umidade e propriedades mecânicas ligeiramente superiores às resinas poliéster, e ambas são de fácil processamento. Já as resinas fenólicas têm baixo custo (~US\$2/Kg), contudo seu processamento é mais trabalhoso, uma vez que ocorre grande eliminação de voláteis durante o processo de endurecimento, mas nem por isso são menos importantes, sendo utilizadas em estruturas que necessitam de alta resistência ao calor ou mesmo como matrizes precursoras de compósitos de carbono reforçados com fibras de carbono.

2.2.1 Matrizes Termorrígidas

2.2.1.1 Resinas Poliéster

Segundo NETO e PARDINI (2006), a família de polímeros originados pela reação de ácidos orgânicos dicarboxílicos e glicóis, os quais depois de reagidos dão origem a moléculas de cadeia longas lineares, são denominados de resinas poliéster. A reação de polimerização, ou síntese, da resina poliéster é uma reação de polimerização por condensação. Se um ou ambos constituintes que participam da reação de polimerização são insaturados, ou seja, contêm uma ligação dupla reativa entre átomos de carbono, a resina obtida será insaturada. A reação de um ácido com um álcool (base orgânica) resulta em uma reação de esterificação, formando um éster e água, como mostrado na Figura 1.

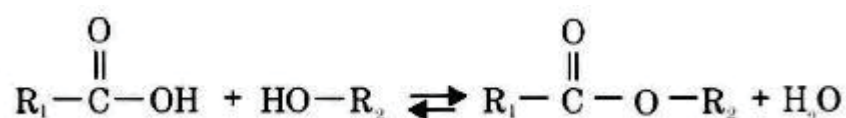


Figura 1: Representação Esquemática da síntese de um éster insaturado (retirado de NETO; PARDINI, 2006).

Da Figura 1 o grupo funcional [-COO-] é o grupo éster, e a reação mostrada é reversível, sendo que naturalmente o equilíbrio da mesma é deslocado na direção da esterificação com eliminação de água. Se for utilizado um biálcool e um biácido para processar a reação, o produto dela contará com diversos grupos éster, originando um poliéster, conforme ilustra a molécula da Figura 2, na qual as unidades são unidas entre si por ligações “éster” (NETO; PARDINI, 2006).

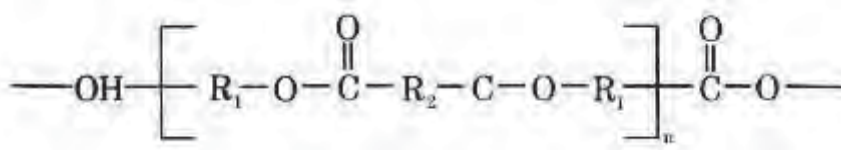


Figura 2: Representação esquemática de uma molécula de poliéster (retirado de NETO; PARDINI, 2006).

As resinas de poliéster são fornecidas para serem moldadas como desejar o usuário na forma de um líquido viscoso, e ao serem processadas se transformam em um sólido rígido infusível (termorrígido) através da reação de polimerização ou cura, que é exotérmica. Porém, as moléculas constituintes da resina poliéster têm pequena mobilidade, e a probabilidade de que duas insaturações se aproximem o necessário para dar origem às ligações intermoleculares é muito pequena, portanto a cura se processaria muito lentamente. Esse problema é resolvido adicionando-se à resina poliéster unidades monoméricas insaturadas de baixa massa molar, aumentando assim a probabilidade das insaturações se aproximarem o suficiente para ocorrer às ligações intermoleculares (NETO; PARDINI, 2006).

Para iniciar a reação de polimerização, é necessário que as duplas ligações (insaturações) sejam rompidas para dar origem as interligações, ou seja, as duplas ligações rompidas possibilitam que os elétrons delas sejam compartilhados com outra molécula e, portanto, outras ligações serão formadas. Para tal, pode-se aquecer a resina, aplicar radiações eletromagnéticas, ou adicionar catalisadores e aceleradores de reação. Os radicais livres do catalisador reagem com as insaturações no poliéster ou nos monômeros de baixa massa molar, por exemplo, estireno, iniciando a reação de polimerização em cadeia, a qual dá origem a um copolímero estireno-poliéster, gerando uma rede tridimensional termorrígida, demonstrada na Figura 3 (NETO; PARDINI, 2006).

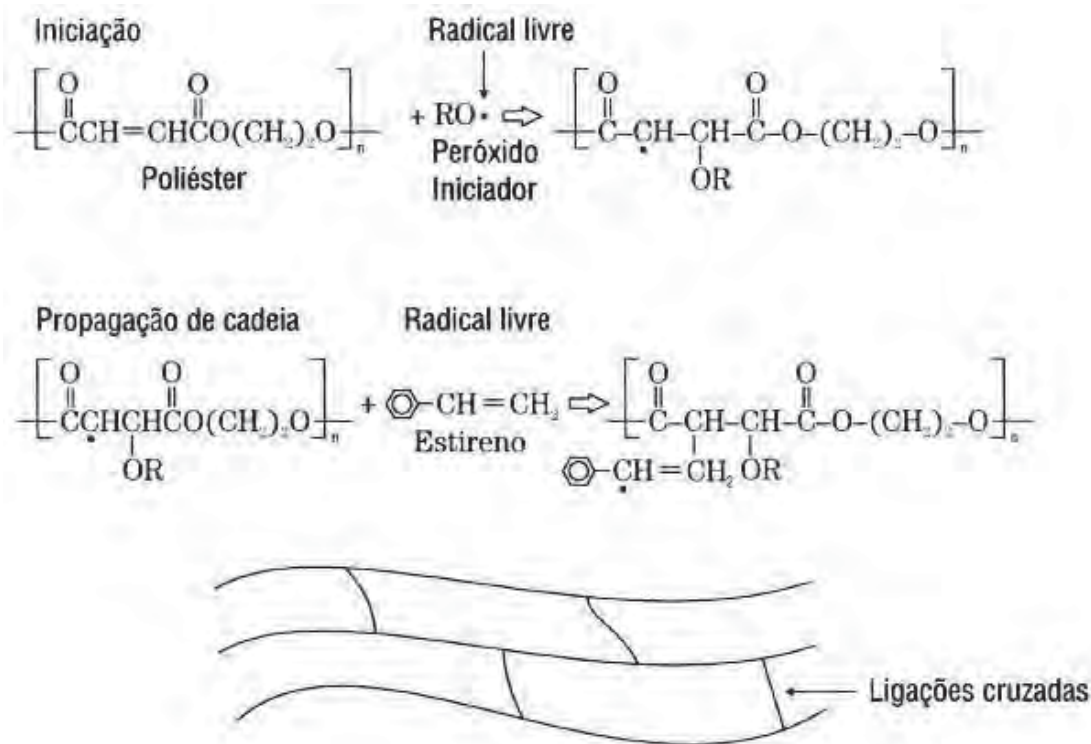


Figura 3: diagrama esquemático das reações durante o processo de cura de resinas de poliéster insaturado (retirado de NETO; PARDINI, 2006).

Por se tratar de uma reação de adição em cadeia, não há formação de subprodutos, uma vez que o radical livre de uma molécula vai reagir com a insaturação da próxima unindo-as e assim sucessivamente até acabarem-se os monômeros. O catalisador mais utilizado para cura à temperatura ambiente é o peróxido de metil-etil-cetona (MEKP), utilizado juntamente com os aceleradores naftenato de cobalto (CoNap), ou dimetilnilina (DMA), na proporção de 0 a 0,3% em massa. O peróxido citado é uma mistura de peróxidos, conforme mostra a Figura 4, o que possibilita variar a reatividade do produto modificando as proporções de cada componente. As resinas de poliéster insaturado são comercializadas já com a adição do acelerador, de tal forma que o sistema reativo seja formado pela mistura pré-acelerada com o catalizador (NETO; PARDINI, 2006).

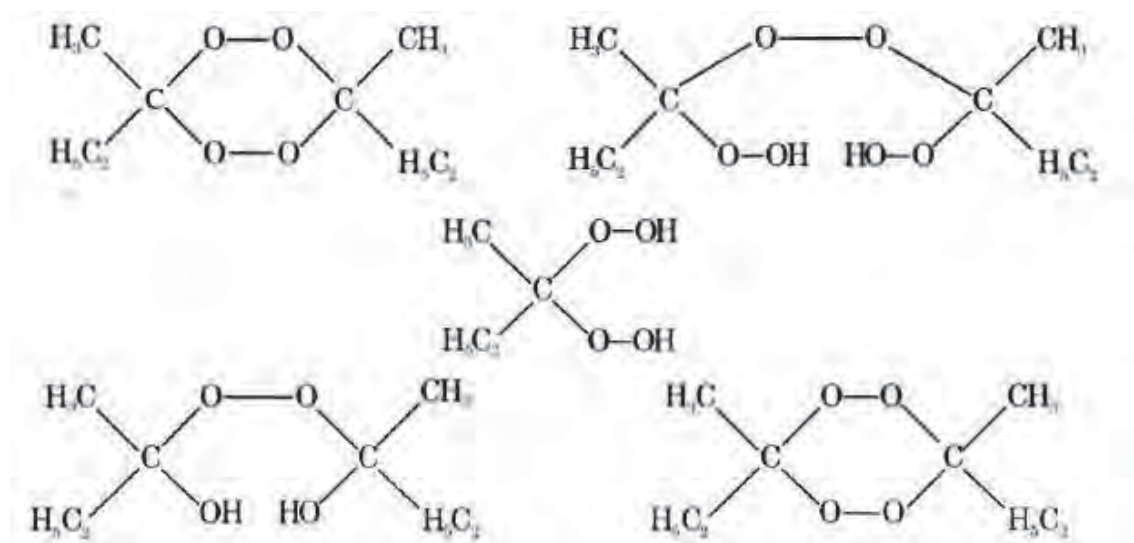


Figura 4: estruturas moleculares de peróxidos componentes do catalizador metil-etilcetona (retirado de NETO; PARDINI, 2006).

A temperatura máxima atingida durante a reação, o tempo de gel e a velocidade da reação de polimerização, são controlados pela quantidade de acelerador e catalizador presentes no meio reativo. Porém, observa-se que na prática à temperatura ambiente, a cura da resina não ocorre completamente, necessitando-se a elaboração de uma pós cura a uma determinada temperatura e um determinado tempo, para que a mesma ocorra completamente (NETO; PARDINI, 2006).

Ainda segundo NETO e PARDINI (2006), um grande número de variações de resinas poliésteres pode ser obtido, devido à existência de muitos precursores para a realização da reação de polimerização das mesmas. Porém este número é reduzido quando se leva em consideração o custo e a facilidade de processamento. Mas se a polimerização fosse realizada apenas com biácidos, a resina final obtida seria muito frágil e quebradiça devido ao curto espaçamento entre as duplas ligações. Sendo assim, necessita-se que a formulação básica da resina poliéster tenha biácidos saturados para agirem como extensores da cadeia. Quanto maior a quantidade e proporção de ácido saturado, será observada menor retração durante a cura e maior tenacidade na resina final.

Na reação de polimerização de resinas poliéster, os ácidos saturados mais comumente empregados são o orto-ftálico (na forma de anidrido) e seu isômero, o ácido iso-ftálico, apresentados na Figura 5.

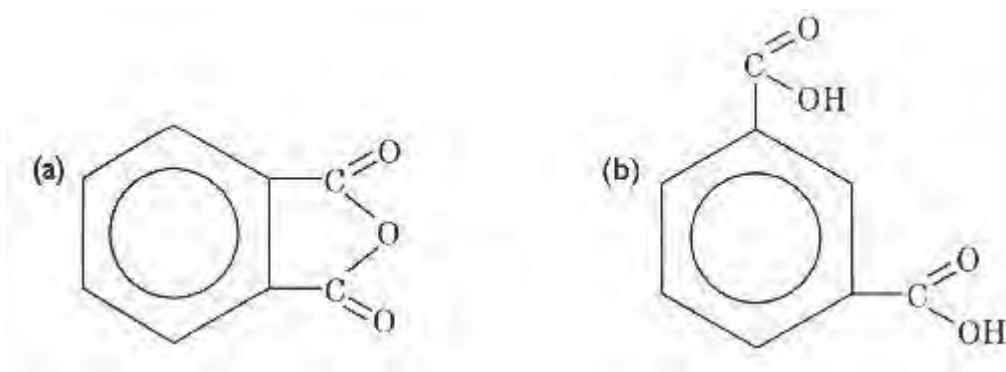


Figura 5: estrutura molecular do anidrido ftálico a) e do ácido isoftálico b) (retirado de NETO; PARDINI, 2006).

As resinas de poliéster ortoftálicas são em relação às resinas isoftálicas, mais rígidas, possuem tempo de gelificação mais longos, possuem menor resistência química, apresentam resistência ao impacto e à tração menores, e são menos viscosas (NETO; PARDINI, 2006).

Dentre os ácidos insaturados empregados na síntese de resinas poliéster os mais utilizados estão apresentados na Figura 6, os quais são o ácido maléico, na forma de anidrido (anidrido maléico), e seu isômero ácido fumárico, obtido da poliesterificação do anidrido maléico em presença de polipropileno glicol (NETO; PARDINI, 2006).

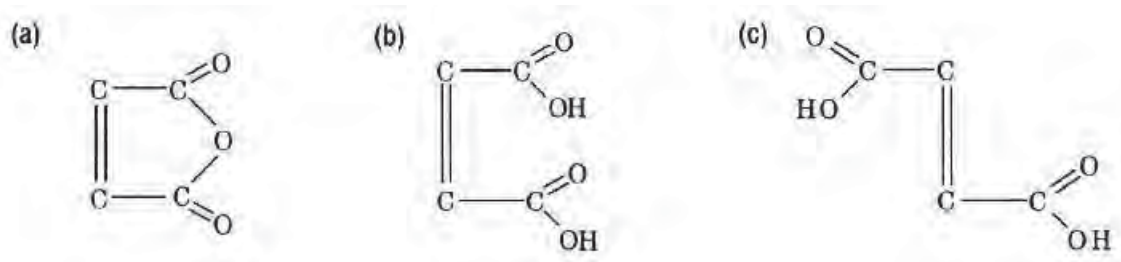


Figura 6: estruturas moleculares de anidridos utilizados na síntese de resinas poliéster, a) anidrido maléico, b) ácido maléico, C) ácido fumárico (retirado de NETO; PARDINI, 2006).

As propriedades finais da resina poliéster também estão atreladas a escolha de um glicol adequado, por exemplo, quanto maior a cadeia molecular destes maiores será a tenacidade do poliéster. Dentre os mais utilizados apresentam-se o etileno glicol, embora por ser uma molécula simétrica apresente a tendência à cristalização, e propileno glicol, o qual apresenta

cadeia mais ramificada oferecendo ao polímero final maior resistência ao impacto, apresentados na Figura 7. Outro glicol é o n-pentil glicol o qual origina resinas com boa resistência a intempéries (NETO; PARDINI, 2006).

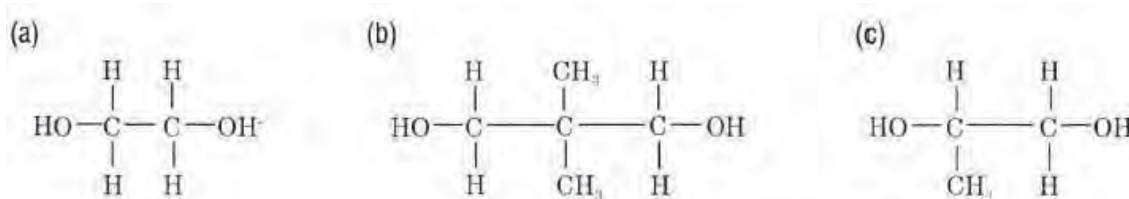


Figura 7: representação molecular de glicóis mais utilizados na síntese de resinas de poliéster (retirado de NETO; PARDINI, 2006).

Outros reagentes que originam resinas poliésteres insaturadas são o ácido carboxílico insaturado, comumente denominado ácido metacrílico, e o glicídio éter do bisfenol A (DGEBA), que quando reagidos originam resinas poliésteres, denominadas éster vinílica apresentada na Figura 8, que apresentam somente uma instauração terminal, grupos hidroxílicos pendentes, e a ausência de grupos terminais carboxílicos e hidroxílicos, sendo elas mais resistentes a ataques químicos que as resinas poliésteres comuns (NETO; PARDINI, 2006).

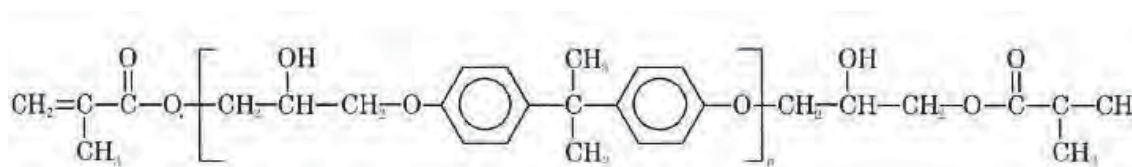


Figura 8: estrutura molecular de uma resina de éster vinílica (retirado de NETO; PARDINI, 2006).

As resinas de poliéster insaturado têm resistência à tração na faixa de 40 a 90 MPa, módulo de elasticidade em tração na faixa de 2 a 4,5 GPa, e deformação de ruptura de 3-5%. A resistência à compressão situa-se na faixa de 90 a 250 MPa (NETO; PARDINI, 2006).

2.2.1.2 Resinas Epóxi

Segundo NETO e PARDINI (2006), as resinas epóxi são polímeros que contêm pelo menos dois grupos epóxi terminais por molécula, denominados também como grupos oxirano ou etoxilina, e têm sido utilizados como matérias primas em vários setores da indústria, como recobrimentos protetivos, adesivos, equipamentos para indústria química, compósitos estruturais, laminados elétricos e encapsulados eletrônicos, (MUKHERJEE, 2012).

As resinas epóxi mais utilizadas têm como precursores a epicloridrina e o bisfenol-A cuja reação dá origem ao diglicidil éter do bisfenol A (DGEBA), ilustrado na Figura 9.

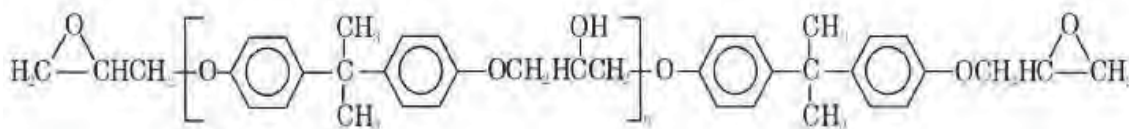


Figura 9: estrutura química de uma resina epóxi diglicidil éter do bisfenol-A (DGEBA) (retirado de NETO; PARDINI, 2006).

As propriedades da resina são influenciadas pelo número de unidades repetidoras (monômeros) incorporadas à molécula, por isso a relação molar entre epicloridrina/bisfenol A pode variar de 10:1 até 1,2: 1, produzindo desde resinas líquidas até resinas sólidas (NETO; PARDINI, 2006).

As resinas epóxi comercializadas do tipo DGEBA são misturas de oligômeros com unidades de repetição (n) variando de 0 a 25, podendo obter-se resinas líquidas de alto desempenho. (BAUER, 1989).

Ainda segundo NETO e PARDINI (2006), as resinas epóxi podem ser obtidas com características multifuncionais como as resinas glicidil éter de novolaca, glicidil de aminas trifuncionais ou tetra funcionais, mostradas nas Figuras 10 a 12, as quais apresentam alta viscosidade a temperaturas ambiente, permitindo obter-se materiais com maior grau de reticulação comparadas com as resina do tipo DGEBA, conferindo-lhes melhor desempenho em altas temperaturas, por isso são utilizados na confecção de pré-impregnados na indústria aeronáutica.

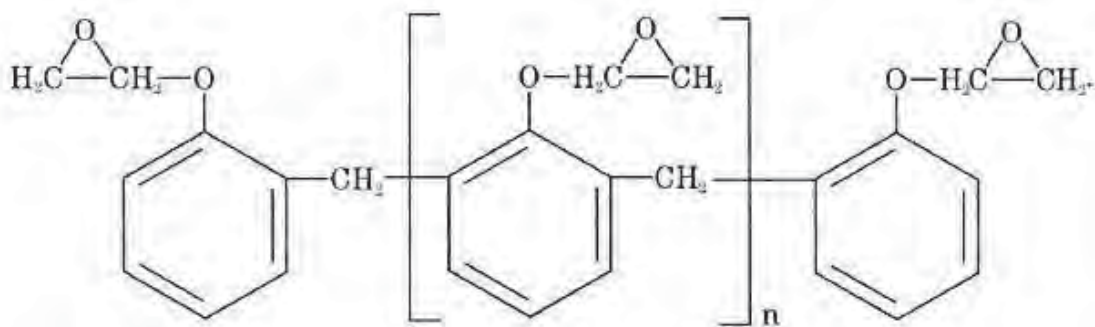


Figura 10: estrutura química da resina epóxi novolaca (REPN) (retirado de NETO; PARDINI, 2006).

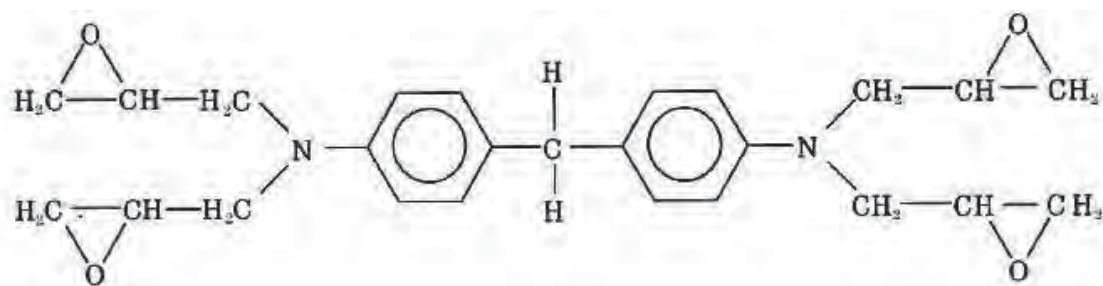


Figura 11: Tetraglicidil metileno dianilina (TGMDA) (retirado de NETO; PARDINI, 2006).

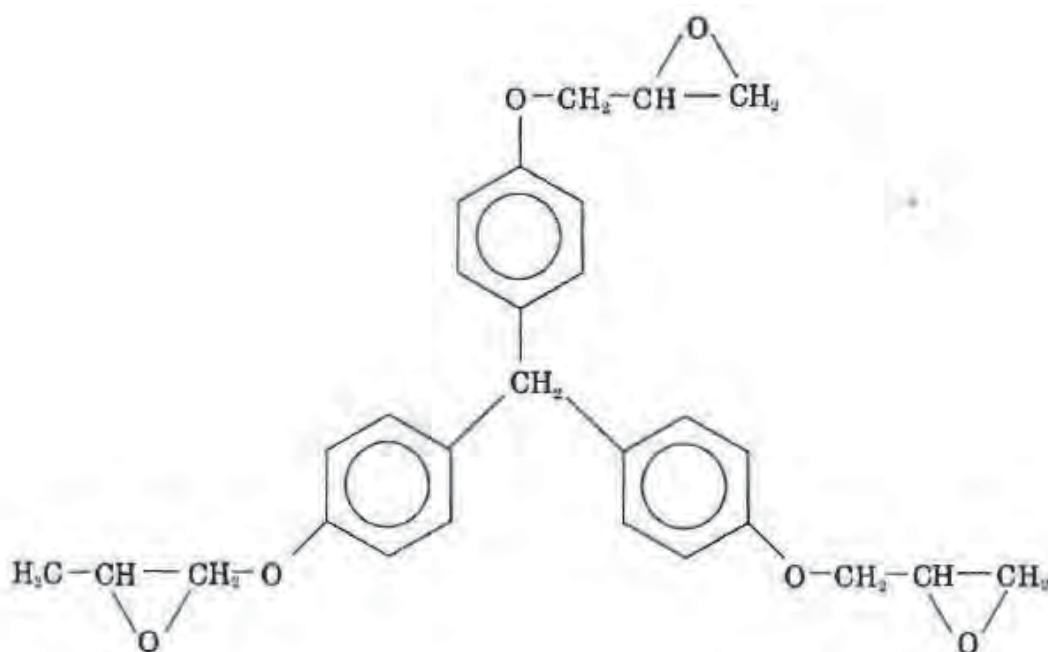


Figura 12: Triglicidil tris(hidroxifenil) metano (TTHM) (retirado de NETO; PARDINI, 2006).

Existe uma grande variedade de agentes de curas empregados no processamento de resina epóxi adequados ao mesmo, os quais determinam o tipo de reação de cura que ocorre,

influenciando na cinética de cura, ciclo de processamento (viscosidade em função do tempo), gelificação e consequentemente nas propriedades do material final. Dentre eles encontram-se os amínicos, divididos em amins alifáticas, altamente reativas com tempo de gel relativamente curto à temperatura ambiente na qual são líquidas e voláteis, apresentadas na Figura 13, e amins aromáticas, que são menos reativas, precisam de altas temperaturas de cura sendo, portanto, endurecedores de cura a quente permitindo serem utilizadas por longo tempo durante o processamento, apresentadas na Figura 14 (NETO; PARDINI, 2006).

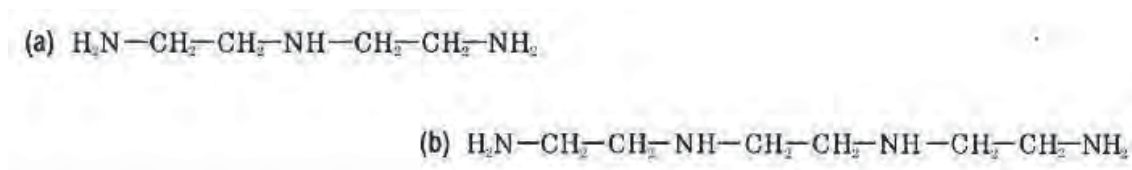


Figura 13: endurecedores de amina alifática: A) dietileno triamina (DETA) e b) tetraetileno triamina (TETA) (retirado de NETO; PARDINI, 2006).

As amins aromáticas podem ser encontradas na forma de pó ou flocos, e para serem adicionadas a resina precisam ser fundidas. Dentre os endurecedores de amins aromáticas pode-se empregar o endurecedor 4,4 Diaminodifenilmetano (DDM), que apresenta massa equivalente em hidrogênio ativo de 50 e temperatura de fusão de $\sim 94^\circ\text{C}$, e o endurecedor diaminodifenilsulfona (DDS), que apresenta massa equivalente de hidrogênio ativo de 62 e temperatura de fusão de $\sim 175^\circ\text{C}$. Uma característica interessante dos endurecedores amínicos é a possibilidade de formarem com a resina epóxi estágios de cura parcial, sendo então empregadas na confecção de pré-impregnados (NETO; PARDINI, 2006).

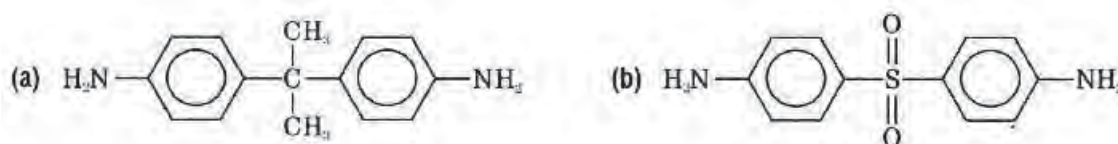


Figura 14: endurecedores de resina epóxi do tipo amina aromática: 4,4 Diaminodifenilmetano (DDM), b) diaminodifenilsulfona (DDS) (retirado de NETO; PARDINI, 2006).

Outro agente de cura, apresentado na Figura 15, menos reativo que as amins aromáticas é o do tipo anidrido, o qual possibilita longo tempo de utilização durante o processo, apresenta ciclos de cura relativamente longos e baixa exotermia e em geral são

utilizados em conjunto com aceleradores (1% em peso) do tipo benzildimetilamina (BDMA) (NETO; PARDINI, 2006).

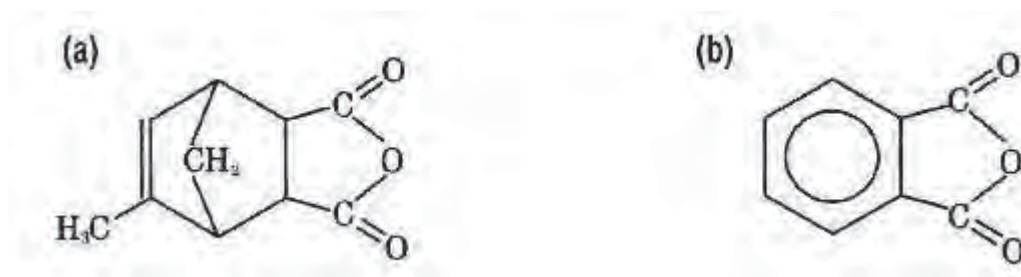


Figura 15: Endurecedores para resina epóxi do tipo anidrido: a) anidrido metil ná dico, b) anidrido ftálico (retirado de NETO PARDINI, 2006).

As propriedades da resina epóxi curada são dependentes da estequiometria da mistura epóxi/endurecedor, sendo que, objetivando obter propriedades otimizadas, nenhum dos dois deve estar presente sem reagir depois de completada a cura. Para tal a Equação (1) mostra a percentagem de endurecedor que deve ser adicionada a cem partes de resina epóxi:

$$\% \text{endurecedor} = ((\text{peso equivalente H reativo}) \cdot 100) / (\text{EEW resina}) \quad (1)$$

Portanto a relação epóxi/endurecedor, após a cura, vai interferir na transição vítrea, módulo de elasticidade, variando entre 2,5 a 6,0 GPa com a deformação de ruptura variando na faixa de 1 a 6%, e resistência mecânica, com resistência tração variando entre 40 a 90 MPa e a compressão entre 100 a 220 MPa (NETO; PARDINI, 2006).

2.2.1.3 Resinas Fenólicas

As resinas fenólicas são resinas termorrígidas mais antigas que se conhece e elas têm sido usadas em muitas aplicações industriais em setores como automotivo, computacional, aeroespacial e construção civil (CARDONA; KIN-TAK; FEDRIGO, 2012). Segundo NETO e PARDINI (2006), sua síntese é realizada utilizando-se formaldeído, o qual é bifuncional e por isso pode formar duas ligações, e fenol, que é trifuncional podendo formar três ligações, na proporção 3:2 para que se proceda à reação completa, como esquematizado na Figura 16.

Na Figura 17 apresenta-se um gráfico onde é mostrado o tipo de resina fenólica obtida em função da razão molecular formaldeído/fenol, e qual massa molecular obtida após a reação de polimerização. Por meio dele é possível notar a divisão das resinas fenólicas em dois tipos: novolacas e resóis (NETO; PARDINI, 2006).

As resinas fenólicas do tipo novolacas são conhecidas como resinas de dois estágios, e são polimerizadas com menor quantidade de formaldeído ($<0,88$ mol formaldeído/ mol fenol), sendo necessária à adição de um reagente que seja capaz de fornecer o formaldeído em déficit para que a cura ocorra, tendo como subproduto normalmente amônia. O reagente mais utilizado para fornecer o formaldeído à reação é o hexametileno tetramina ($C_6H_6N_4$), que age como uma mistura de formaldeído e amônia (NETO; PARDINI, 2006).

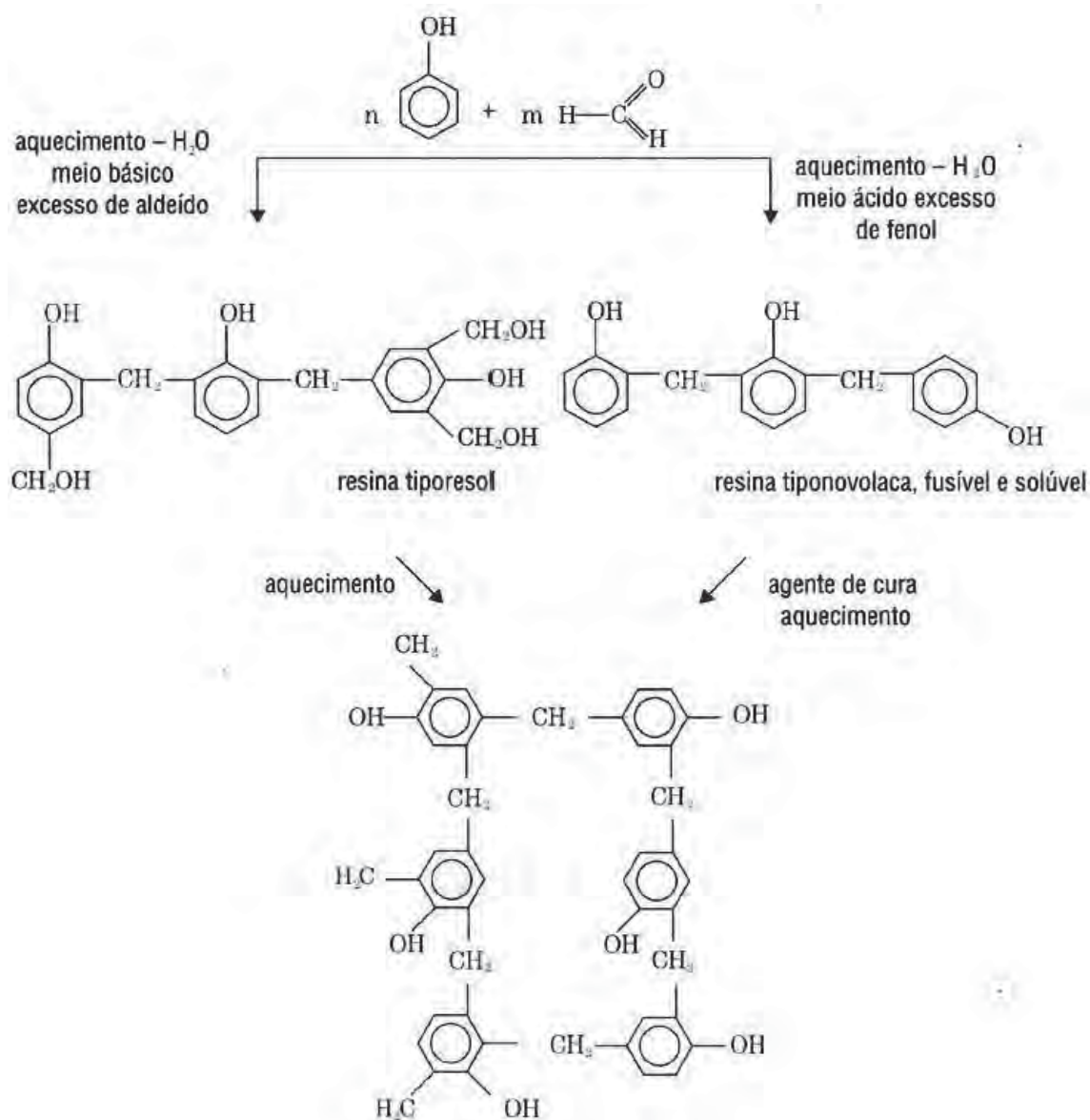


Figura 16: diagrama esquemático da síntese e reações de cura de resinas fenólicas do tipo resol e novolacas (retirado de NETO; PARDINI, 2006).

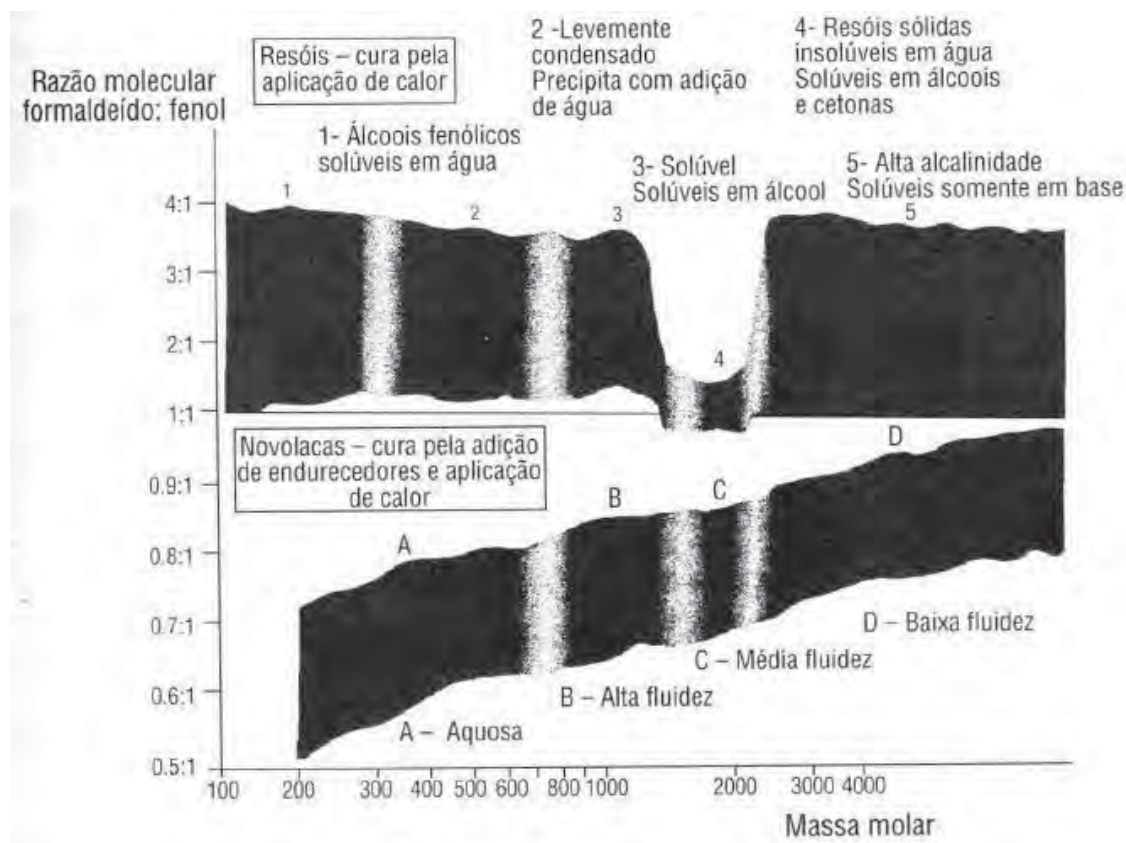


Figura 17: Tipos de resinas fenólicas obtidas em função da razão formaldeído/fenol e peso molecular resultante (retirado de NETO; PARDINI, 2006).

Já as resinas fenólicas do tipo resol são conhecidas como resinas de um estágio e são polimerizadas com catalisadores básicos com formaldeído na quantidade necessária para permitir reação completa, sendo a reação interrompida com resfriamento logo que algumas ligações cruzadas estão presentes, o que representa um risco se a reação é levada a um ponto onde a resina torna-se sólida à temperatura ambiente. Assim as aplicações destas resinas geralmente utilizam soluções líquidas ou resinas parcialmente reagidas (NETO; PARDINI, 2006).

Outro elemento importante na reação de síntese das resinas fenólicas são os catalisadores. Catalisadores ácidos não são utilizados para resinas resóis porque não permitem o acúmulo de álcoois fenólicos e ésteres dibenzílicos, os quais predominam em resinas resóis (parcialmente reagidas). Catalisadores alcalinos são utilizados na síntese de resinas novólacas, mas requerem a presença de excesso de fenol para suprimir o acúmulo destes intermediários, que devem ser removidos e reciclados posteriormente. As resinas fenólicas são utilizadas para

obtenção de compósitos estruturais, com reforço de fibras de vidro e carbono, devido ao caráter auto extingüível. Estas resinas são também muito utilizadas como matrizes precursoras de carbono, devido ao seu baixo custo e facilidade de processamento (NETO; PARDINI, 2006).

2.3 Fibras de carbono

Segundo NETO e PARDINI (2006), as fibras de carbono são manufaturadas pela pirólise controlada de precursores orgânicos em forma de fibras. O primeiro documento que reportou a existência das fibras de carbono data de 1880, quando Thomas Edson obteve uma patente sobre a manufatura de filamentos de carbono para lâmpadas elétricas. Entretanto, somente no início da década de 60 teve início a produção comercial de fibras de carbono, com requisitos para aplicação na indústria aeroespacial em estruturas de baixo peso e alta resistência.

Uma grande variedade de fibras precursoras pode ser utilizada para produzir fibras de carbono, conferindo diferentes morfologias e diferentes características específicas. Os precursores mais comuns, entretanto, são a poliacrilonitrila (PAN), fibras de celulose (viscose rayon, algodão), e piches de petróleo e alcatrão de hulha. As fibras de carbono podem ser classificadas quanto ao tipo de precursor, ao módulo de elasticidade, à resistência e quanto à temperatura de tratamento térmico final (NETO; PARDINI, 2006).

Considerando o módulo de elasticidade, podem-se agrupar as fibras de carbono em quatro tipos (NETO; PARDINI, 2006):

- Ultra alto módulo (UHM): fibras com módulo de elasticidade maior que 500 GPa.
- Alto módulo (HM): fibras com módulo de elasticidade entre 300-500 GPa, tendo razão resistência/módulo de $5-7 \cdot 10^{-3}$.
- Módulo intermediário (IM): fibras com módulo de elasticidade até 300 GPa, tendo razão resistência/módulo de 10^{-2} .
- Baixo módulo (LM): fibras com módulo de elasticidade menor que 100 GPa, tendo baixo valor de resistência à tração.

Considerando a resistência à tração, as fibras de carbono são classificadas em dois tipos:

-Ultra alta resistência (UHS): fibras com resistência à tração maior que 5 GPa, e razão resistência/rigidez entre $2-3 \cdot 10^{-2}$.

-Alta resistência (HS): fibras com resistência à tração maior que 2,5 GPa, e razão resistência/rigidez entre $1,5-2 \cdot 10^{-2}$.

Considerando a temperatura de tratamento térmico final, as fibras de carbono podem ser classificadas em três tipos:

-Tipo I: temperatura de tratamento térmico final acima de 2000°C, sendo associada com fibras de alto módulo de elasticidade.

-Tipo II: temperatura de tratamento térmico final acima de 1500°C, sendo associada com fibras de alta resistência.

-Tipo III: temperatura de tratamento térmico final acima de 1000°C, sendo associada com fibras de baixo módulo e baixa resistência.

O processo de pirólise consiste basicamente no tratamento térmico de precursor que remove o oxigênio, nitrogênio e hidrogênio dando origem às fibras de carbono. Todas as pesquisas direcionadas à obtenção de fibras de carbono estabelecem que as propriedades mecânicas sejam melhoradas pelo aumento da cristalinidade e orientação, e pela redução dos defeitos na fibra. O único meio de se alcançar esse objetivo é partir de precursor altamente orientado e manter essa alta orientação inicial durante o processo de estabilização de carbonização sob estiramento. Como em qualquer outro processo de obtenção de fibras, as propriedades finais serão influenciadas pelas matérias-primas, pelo processo de produção e pelas condições utilizadas para formação da fibra precursora (NETO; PARDINI, 2006).

2.4 Cabos Condutores

Atualmente, tem-se utilizado linhas aéreas de transmissão de energia para transmitir de forma prática a energia da planta de geração até as áreas populacionais, por ser a forma mais barata de instalação e possuir baixo tempo de restauração (PONGTHAVORNSAWAD; RUNGSEEVIJITPRAPA, 2010). Porém, como o custo e as questões ambientais tem se apresentado como barreiras, que levam a grandes investimentos para acondicionamento das linhas de transmissão de energia elétricas existentes e/ou construção de novas, as companhias distribuidoras de energia têm enfrentado desafios para aumentar a capacidade da transmissão de energia das linhas (KOPSIDAS; ROWLAND, 2009; MAKHKAMOVA et. al., 2003).

O desempenho das redes de transmissão de energia é limitado pelo vão entre as torres e pela flecha (KOPSIDAS; ROWLAND, 2009). Flecha é a diferença entre a posição inicial do cabo e a posição que ele ocupa quando alguma força atua sobre ele, ou seja, quando o cabo de transmissão é instalado pressupõe-se que ele fique numa posição pré-definida, porém, a força do peso do cabo e outros fatores fazem com que o mesmo sofra flexão e a flecha é então a distancia entre a posição pré-definida que ele deveria ocupar e a posição que ele ocupa devido à ação dos fatores citados, como mostra a Figura 18. Reaplicar força mecânica para reduzir a flecha da rede é considerado um método economicamente eficiente para aumentar a capacidade de transmissão da mesma, habilitando-a a operar em temperaturas mais altas (KOPSIDAS; ROWLAND, 2009). Outra técnica é melhorar o desempenho dos condutores metálicos modificando sua geometria e comportamento mecânico por meio da mudança dos materiais dos cabos de condução de energia, os quais habilitem a operação em temperaturas maiores com menor flecha (KOPSIDAS; ROWLAND, 2009; JOHNSON, ANDERSON, DEVE, 2001). A capacidade de passagem de corrente (amperagem) e a flecha nos condutores pode também representar um limite no seu desempenho (KOPSIDAS; ROWLAND, 2009).

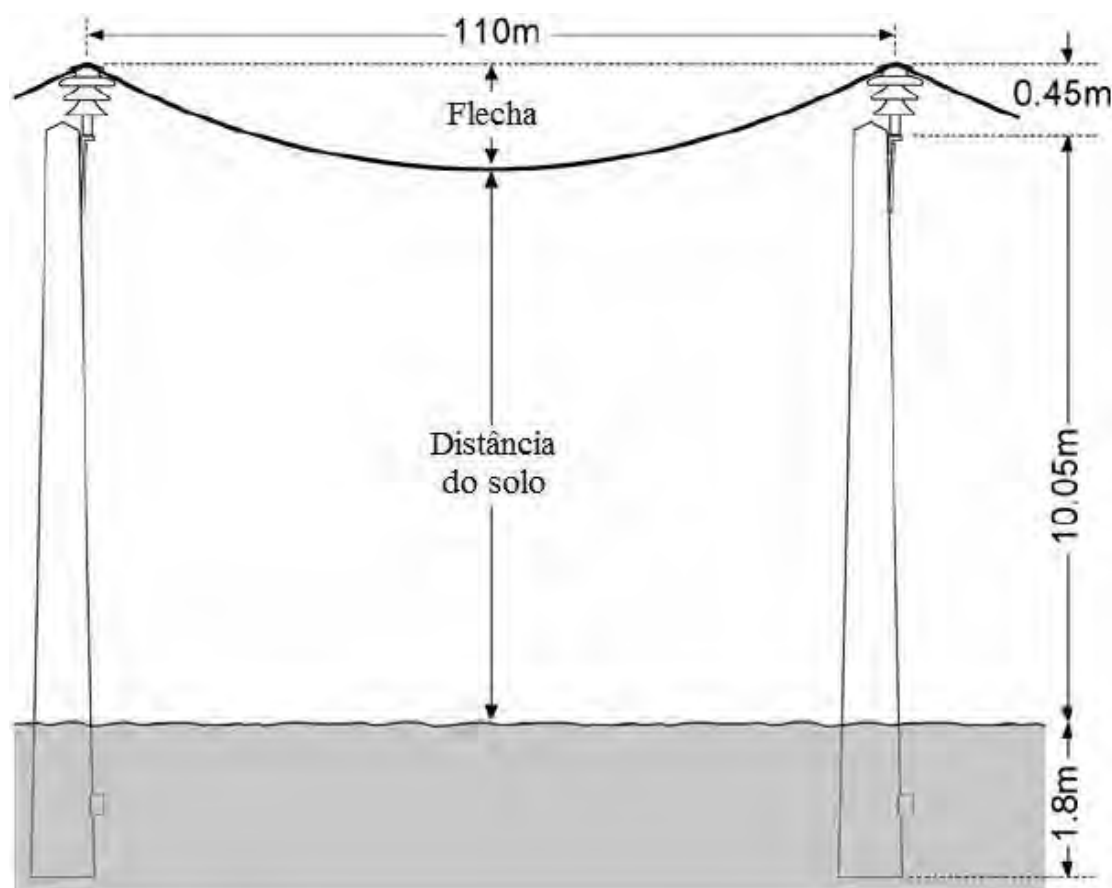


Figura 18: Figura representativa da linha aérea de transmissão de energia elétrica (retirado de Kopsidas; Rowland, 2009).

No começo dos anos 70 desenvolveram-se principalmente os processos de produção de condutores de alumínio para aumentar seu desempenho, particularmente para substituir os condutores de cobre os quais eram mais utilizados (BARBER; CALLAGHAN, 1995).

No caso de condutores isolados a tarefa não era desenvolver condutores mais resistentes, mas obter um condutor com melhor desempenho com relação à deformação, e então, os conectores padrões poderiam ser utilizados (BARBER; CALLAGHAN, 1995). Mas ao mesmo tempo era necessário garantir que não haveria perda de condutividade (BARBER; CALLAGHAN, 1995). Durante este período muitas novas ligas de alumínio foram desenvolvidas para aplicação em linhas de transmissão de energia (BARBER; CALLAGHAN, 1995). Algumas destas ligas têm além da vantagem de serem melhores condutores que as ligas tradicionalmente utilizadas em linhas de transmissão de energia, também apresentam os benefícios de menor custo de produção e melhor controle de qualidade do produto (BARBER; CALLAGHAN, 1995).

Em 1978 a associação de pesquisas elétricas patrocinou projetos de pesquisa para equiparar o desempenho de deformação das ligas padrões de alumínio, da série 6201 e outras ligas (BARBER; CALLAGHAN, 1995). Como resultado destes testes iniciais notou-se que uma liga utilizada em linhas de transmissão na Suíça desde 1975 apresentou um crescimento significativo comparado a outras ligas testadas (BARBER; CALLAGHAN, 1995), como mostrado na Figura 19.

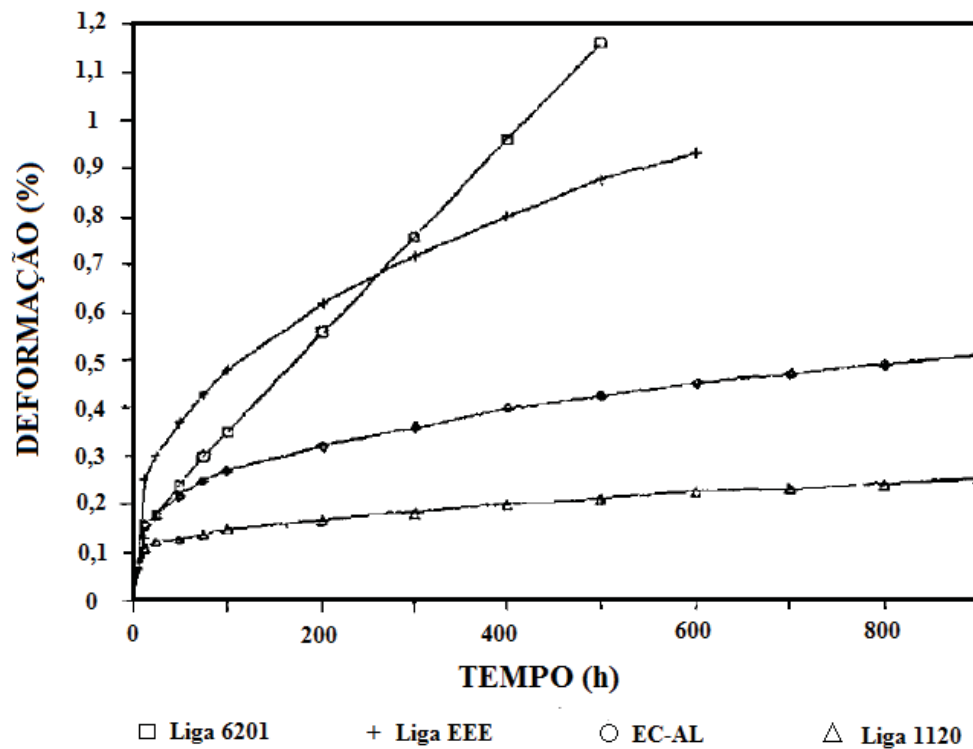


Figura 19: Comparação da deformação das ligas a 120°C (retirado de BARBER; CALLAGHAN, 1995).

Outro fato importante é que a liga também apresentou aumento da razão força/peso, da condutividade elétrica e o potencial de ser relativamente simples de ser fabricada (JOHNSON, ANDERSON, DEVE, 2001; BARBER, CALLAGHAN, 1995). Esta liga é conhecida internacionalmente como ligas de alumínio 1120 e extensivos testes foram conduzidos por longos períodos de uso para avaliar o desempenho do produto em linhas de condução de energia (BARBER; CALLAGHAN, 1995).

Os distribuidores de energia elétrica tem usado ACSR (*Aluminium Conductor Steel Reinforced*) por aproximadamente 100 anos e ACSS (*Aluminium Conductor Steel Suported*) por mais de 30 anos, o qual apresenta baixa flecha, é um condutor de alta temperatura similar

ao ACSR que apresenta no núcleo tentos de aço com pré-tensão (força residual) e tentos de alumínio recozido na coroa (ALAWAR, BOSZE, NUTT, 2005; FREIMARK et. al., 2009). Quando instalados levando-se em consideração as cargas devido ao tempo, como por exemplo, força de arraste do vento, vibrações, etc., linhas de distribuição de energia construídas usando-se estes condutores tem operado com sucesso por muitas décadas (FREIMARK et. al., 2009; WANG; JIANG, 2012; SALAMA, 2000). Recentemente novos cabos nus para linhas de transmissão de energia têm surgido no mercado, principalmente, designados para substituição das instalações das linhas de transmissão de energia existentes. Os produtos mais comuns no mercado são:

- *ACCC – Aluminium Conductor Composite Core*, fabricado pela *Composite Technology Corporation (CTC)*, é designado para operar em alta amperagem e resistência a flecha em alta temperatura (ALAWAR, BOSZE, NUTT, 2005; FREIMARK et. al., 2009; BARLAS, 2006; BERJOZKINA et. al., 2012; LOBRY, GUÉRY, 2012);
- *ACCR – Aluminium Conductor Composite Reinforced*, fabricado pela *Minnesota Mining Manufacturing (3M)*, é composto por um núcleo de compósito de matriz metálica, desenvolvido para operar com baixa flecha em altas temperaturas, apresenta aumento na amperagem e na resistência a flecha a altas temperaturas (JOHNSON, ANDERSON, DEVE, 2001; ALWAR, BOSZE, NUTT, 2005; FREIMARK et. al., 2009; BARLAS, 2006; BERJOZKINA et. al., 2012; LOBRY, GUÉRY, 2012).
- *Liga INVAR* – é uma liga composta basicamente por ferro e níquel (36% em massa), sendo que os outros elementos de liga somam menos que 2% em massa da liga. Ela possui baixo coeficiente de expansão térmica, boa estabilidade dimensional, limite de resistência a tração 518 MPa e módulo de elasticidade 141 GPa. Esta liga não foi desenvolvida para o setor de transmissão de energia elétrica especificamente, porém, devido as suas propriedades, atendem aos requisitos necessários para ser aplicada como núcleo de cabos de transmissão de energia (INVARLLOY; 2013).

Estes novos condutores tem o atrativo de aumentarem a capacidade de transmissão de energia das redes quando comparados com ACSR (JOHNSON, ANDERSON, DEVE, 2001;

ALAWAR, BOSZE, NUTT, 2005; FREIMARK et. al., 2009; BERJOZKINA et. al., 2012).

Por exemplo:

- Dobra a capacidade de corrente transmitida em relação ACSR – por meio do mesmo espaço sem mudança estrutural (FREIMARK et. al., 2009)
 - o Utilizam 28% mais alumínio (baseado principalmente no uso de tentos TW (*Trapezoidal Aluminium Wire* - cabo de alumínio trapezoidal) em vez de tentos redondos para eliminar os vazios (FREIMARK et. al., 2009);
 - o Podem ser operados em temperaturas maiores – superiores a 200°C versus 100°C para cabos convencionais (BURKS, ARMENTROUT, KUMOSA, 2010; FREIMARK et. al., 2009; LOBRY, GUÉRY, 2012).
- Mitigação das questões relacionadas à flecha em alta temperatura que contribuem para a queda de energia e *blackouts* (JOHNSON, ANDERSON, DEVE, 2001; ALAWAR, BOSZE, NUTT, 2005; BURKS, ARMENTROUT, KUMOSA, 2010; FREIMARK et. al., 2009; LOBRY, GUÉRY, 2012);
- Redução de custos por usar menos estruturas de sustentação, torres, nas novas linhas.
 - o Maior relação força/peso habilita o aumento do vão entre as torres reduzindo a quantidade requerida das mesmas nos projetos em 16% ou mais (FREIMARK et. al., 2009);
 - o Resistência à degradação ambiental – não vai enferrujar e nem degradar (FREIMARK et. al., 2009; LOBRY, GUÉRY, 2012).

Mais recentemente um terceiro tipo de condutor foi introduzido, chamado ACCC/TW, para condutores de alumínio com núcleo compósito/ com fio trapezoidal, o qual é baseado em um núcleo de compósito híbrido de fibra de carbono e de vidro com matriz polimérica (ALAWAR; BOSZE; NUTT, 2005). O ACCC/TW foi desenvolvido primeiramente para aumentar a resistência ao esforço do condutor (pela substituição de tentos de aço por materiais resistentes), aumentando a quantidade de amperagem, e aumentando a resistência a flecha em altas temperaturas (ALAWAR; BOSZE; NUTT, 2005). O compósito do núcleo deste tipo de

cabo é concebido na forma de tarugo e oferece várias vantagens com relação a núcleos com tentos de aço como menor densidade e coeficiente de expansão térmica (ALAWAR; BOSZE; NUTT, 2005).

A chave de se confeccionar ACCC reside em fabricar núcleo de compósito, o qual é conformado por pultrusão com uma resina polimérica adequada com fibra de carbono. A severa demanda para a matriz são as seguintes: longos períodos de serviço em altas temperaturas; resistência higrotérmica a ácido; altas forças e resistência (Li et. al., 2011).

As resinas epóxi, fenólica e poliéster têm apresentado boas propriedades mecânicas e térmicas, além de apresentarem custo acessível, e por isso elas têm sido usadas comumente como matrizes de compósitos em várias áreas da indústria eletroeletrônicas e de comunicação (MADUGU, ABDULWAHAB, AIGBODION, 2009; Li et. al., 2011; DA-PENG, HONG, 2008; CARDONA, KIN-TAK, FEDRIGO, 2012; LOBRY, GUÉRY, 2012). Devido a este fato e as demais proposições apresentadas neste tópico, decidiu-se neste trabalho realizar o estudo de sistemas de pultrudados de fibra de carbono com matrizes epóxi, fenólica e poliéster para ser utilizado como núcleo de condutores de alumínio com núcleo de compósito.

2.5 Pultrusão

O processo de pultrusão é uma técnica de processamento de compósitos introduzido no início da década de 1950, caracterizando-se pela alta cadência de produção, por ser um processo contínuo e apresentando alto grau de automatização. Essa técnica de processamento é principalmente utilizada na fabricação de barras, tubos e perfis retos nas mais diversas geometrias e formas, embora o processo não permita a obtenção de componentes que possam apresentar variação na seção transversal, ao longo do comprimento, ou seja, o componente tem que ser prismático. A pultrusão pode utilizar reforços na forma de filamentos contínuos, fitas, mantas ou véus de baixa gramatura (NETO; PARDINI, 2006).

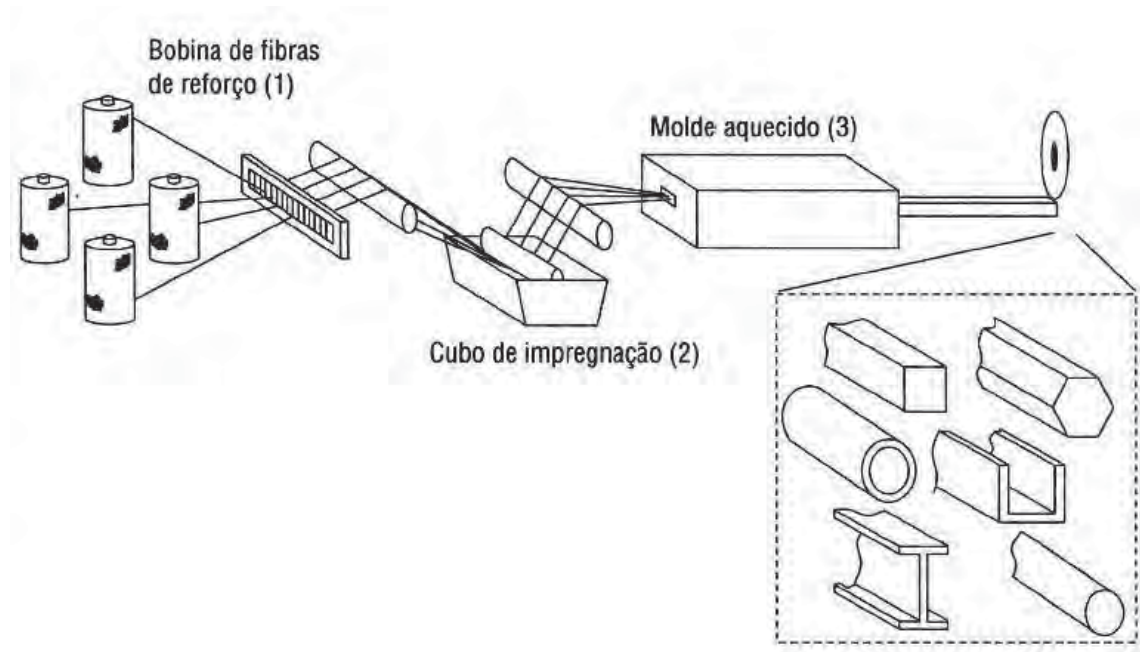


Figura 20: exemplo esquemático do processo de pultrusão para obtenção de perfis e vigas em geometrias diversas com utilização de fibras unidirecionais de reforço (retirado de NETO; PARDINI, 2006).

Na pultrusão, inicialmente, o reforço na forma de mechas de fibras contínuas é impregnado em uma cuba, onde a resina está previamente formulada e com viscosidade adequada para impregnação. O parâmetro de processo mais importante é a adequação do tempo de gel da resina formulada impregnante, que deve ser rigidamente controlado para evitar a cura prematura do material ao adentrar o molde. Após a impregnação, o conjunto de fibra/matriz polimérica adentra o molde que vai conferir uma geometria ao componente que se deseja obter. Em particular, o molde define a seção transversal do componente. O molde nada mais é que um bocal com uma geometria definida. O molde é submetido ao aquecimento de fonte externa, sendo, portanto, de fundamental importância estabelecer um perfil térmico adequado à cura da resina formulada, ao longo do comprimento deste. Após a saída do molde, a peça está pronta (NETO; PARDINI, 2006).

A pesquisa dedicada ao processo de pultrusão tem concentrado esforços na otimização de perfis de aquecimento do molde utilizando radiofrequência, por exemplo, na pultrusão de estruturas pré-formadas trançadas e na pultrusão circunferencial simultânea, onde mechas de reforço são bobinadas circunferencialmente a um reforço principal central. O aquecimento, nos moldes convencionais, utiliza resistências elétricas (NETO; PARDINI, 2006).

2.6 Ensaio de Tração e Poisson

A facilidade de execução e a reprodutibilidade dos resultados tornam o ensaio de tração o mais importante de todos os ensaios mecânicos (SOUZA, 1982).

A aplicação de uma força num corpo sólido promove uma deformação do material na direção do esforço e o ensaio de tração consiste em submeter um material a um esforço que tende a esticá-lo ou alongá-lo. Geralmente, o ensaio é realizado num corpo de prova de formas e dimensões padronizadas, para que os resultados obtidos possam ser comparados ou, se necessário, reproduzidos (SOUZA, 1982; GARCIA, SPIM, DOS SANTOS, 2000).

Este corpo de prova é fixado numa máquina de ensaio que aplica esforços crescentes na sua direção axial, sendo medida as deformações correspondentes por intermédio de um aparelho especial, o mais comum é o extensômetro. Os esforços ou cargas são medidos na própria máquina de ensaio e o corpo de prova é levado até a sua ruptura (SOUZA, 1982; GARCIA, SPIM, DOS SANTOS, 2000).

Com este tipo de ensaio, pode-se afirmar que praticamente todas as deformações promovidas no material são uniformemente distribuídas em todo seu corpo e, como é possível fazer com que a carga cresça numa velocidade razoavelmente lenta durante todo o teste, o ensaio de tração permite medir satisfatoriamente a resistência do material. A uniformidade da deformação permite ainda obter medições precisas da variação dessa deformação em função da tensão aplicada. Essa variação é determinada pelo traçado da curva de tensão-deformação, a qual pode ser obtida diretamente pela máquina ou por pontos (SOUZA, 1982).

A uniformidade de deformações acaba no momento em que é atingida a carga máxima suportada pelo material. A ruptura sempre se dá na região estrita do material, a menos que um defeito interno, fora desta região, promova a ruptura do mesmo, o que raramente acontece (SOUZA, 1982; GARCIA, SPIM, DOS SANTOS, 2000).

Analisando o gráfico obtido por meio deste ensaio verifica-se inicialmente que o diagrama é linear e é representado pela Equação (2):

$$\sigma = E.\varepsilon \quad (2)$$

Que corresponde a lei de Hooke (descoberta em 1678 por Sir Robert Hooke), em que σ corresponde a tensão média, a qual é a carga aplicada dividida pela área transversal do corpo de prova, e ε a deformação, a qual é a variação do comprimento dividida pelo comprimento total. A constante de proporcionalidade E , é conhecida como módulo de elasticidade ou módulo de Young (SOUZA, 1982; GARCIA, SPIM, DOS SANTOS, 2000).

A linearidade do diagrama acaba num ponto, denominado limite elástico, definido como a maior tensão a qual o material pode suportar, sem deixar qualquer deformação permanente quando o material é descarregado. Até este ponto o material está dentro de sua zona elástica, ou seja, além de obedecer à lei de Hooke, em qualquer ponto desta região se a carga for aliviada a deformação será reduzida proporcionalmente, e para um descarregamento total o corpo de prova retorna ao seu comprimento inicial, sem apresentar qualquer deformação residual ou permanente (SOUZA, 1982; GARCIA, SPIM, DOS SANTOS, 2000).

Terminada a zona elástica, atinge-se a zona plástica, onde a tensão e a deformação não são mais relacionadas por uma simples constante de proporcionalidade e em qualquer ponto do diagrama, havendo descarregamento do material até tensão igual a zero, o material fica com uma deformação permanente ou residual (SOUZA, 1982).

O início da plasticidade é verificado em vários metais e ligas dúcteis, principalmente no caso dos aços baixo carbono, pelo fenômeno do escoamento. O escoamento é um tipo de transição heterogênea e localizada, caracterizado por um aumento relativamente grande da deformação com variação pequena da tensão durante sua maior parte. Vários outros metais, ligas e materiais não exibem esse fenômeno ou o escoamento em certos casos não é nítido, isto é, nem sempre pode ser observado numa máquina comum para ensaio de tração, porque sua ocorrência pode se dar tão ligeiramente, que a sensibilidade da máquina não consegue acusá-lo com precisão suficiente. Isso acontece, por exemplo, quanto mais duro é o material. O escoamento é caracterizado praticamente por uma oscilação do ponteiro da máquina durante toda a duração do fenômeno, a qual frequentemente começa após serem atingidas uma tensão mais alta chamada de limite de escoamento superior e uma tensão menor chamada de limite de escoamento inferior (SOUZA, 1982; GARCIA, SPIM, DOS SANTOS, 2000).

Terminado o escoamento, o material entra na fase plástica e o ensaio prossegue até ser atingida uma tensão máxima suportada pelo material, a qual caracteriza o final da zona plástica. O limite de resistência, σ_r , do material é determinado pela Equação (3):

$$\sigma_r = Q_r / S_0 \quad (3)$$

onde Q_r é a carga máxima atingida durante o ensaio.

Após ser atingida a carga, Q_r , entra-se na fase de ruptura do material, caracterizada pelo fenômeno da estricção, a qual é uma diminuição muitas vezes sensível da secção transversal do corpo de prova, numa certa região do mesmo. Quanto mais mole é o material, mais estrita se torna a secção nessa fase, enquanto que quanto mais duro o material mal se consegue perceber a estricção da secção transversal. É nessa região que se dá a ruptura do corpo de prova, finalizando o ensaio (SOUZA, 1982; GARCIA, SPIM, DOS SANTOS, 2000).

O coeficiente de Poisson, ν , é definido pela Equação (4):

$$\nu = \varepsilon' / \varepsilon \quad (4)$$

onde ε' é a deformação de compressão lateral o qual acompanha um material tensionado que sofreu deformação ε , na direção da tensão. Esse coeficiente mede a rigidez do material na direção perpendicular à direção da carga de tração uniaxial aplicada. A maioria dos metais tem o valor de ν entre 0,25 (para metais perfeitamente isotrópicos) e 0,35, sendo 0,33 o valor adotado na maioria dos casos (SOUZA, 1982; GARCIA, SPIM, DOS SANTOS, 2000). Para materiais compósitos com fibra de carbono como reforço o valor de ν é próximo a 0,25, mas para os compósitos mais comercializados no mercado ele pode variar de 0,19 a 0,35 (ATCP; 2012).

2.7 Análise Termogravimétrica (TGA)

Segundo MOTHÉ E AZEVEDO (2002), a termogravimetria ou análise termogravimétrica baseia-se no estudo da variação de massa de uma amostra, resultante de uma transformação física (sublimação, evaporação, condensação) ou química (degradação, decomposição, oxidação) em função do tempo ou da temperatura.

Em outras palavras, pode ser definida como um processo contínuo que mede a variação de massa (perda ou ganho) de uma substância ou material como uma função da temperatura e/ou tempo (MOTHÉ, AZEVEDO, 2002; BROWN, 2001).

Ainda segundo MOTHÉ E AZEVEDO (2002), o tipo de análise termogravimétrica mais usada é a análise termogravimétrica dinâmica. Nessa técnica a amostra é aquecida em um ambiente no qual a variação de temperatura está programada ou pré-determinada, preferencialmente em velocidade linear (MOTHÉ, AZEVEDO, 2002; BROWN, 2001).

MOTHÉ E AZEVEDO (2002) afirmam que a análise termogravimétrica é uma técnica muito utilizada na caracterização do perfil de degradação de polímeros e de outros materiais. A exposição à temperatura elevada pode algumas vezes alterar a estrutura química e, por consequência, as propriedades físicas dos materiais. Portanto a curva de degradação térmica, em condições não isotérmicas, mostra o perfil da resistência ou estabilidade térmica que o material apresenta quando submetido a uma varredura da temperatura (MOTHÉ, AZEVEDO, 2002; BROWN, 2001).

A Figura 21 apresenta uma curva termogravimétrica de reação de único estágio, onde a perda de massa é caracterizada por duas temperaturas: T_i , que é chamada de temperatura inicial de decomposição e T_f , que é chamada de temperatura final. A temperatura inicial de decomposição é a temperatura na qual a variação de massa acumulada atinge a magnitude que a balança pode detectar. A temperatura final é a temperatura na qual a variação de massa acumulada atinge seu valor máximo de degradação, correspondendo ao término da reação. A diferença entre essas duas temperaturas ($T_f - T_i$) é chamada de intervalo da reação. Quanto menor for este intervalo, mais estável é o material à decomposição térmica (MOTHÉ; AZEVEDO, 2002).

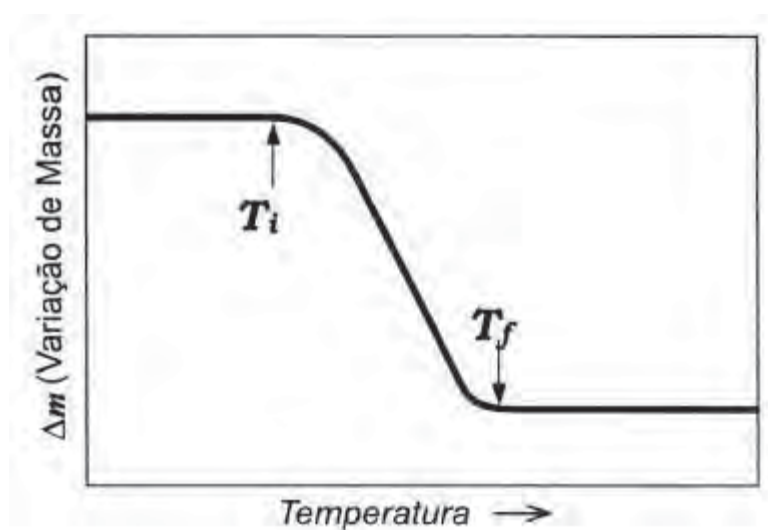


Figura 21: curva TG característica de uma reação em estágio único (retirado de MOTHÉ; AZEVEDO, 2002).

Para uma melhor visualização das curvas de TGA, foram desenvolvidos instrumentos capazes de registrarem, automaticamente, a derivada das curvas de TGA. As curvas de DTG auxiliam a visualizar e esclarecer os passos da curva TGA, conforme mostra a Equação (5) (MOTHÉ; AZEVEDO, 2002; BROWN, 2001).

$$(dm/dt) = f(T \text{ ou } t) \quad (5)$$

De acordo com a Equação (5), que corresponde à primeira derivada do TGA, uma série de picos é obtida no lugar da curva degrau, onde a área debaixo dos picos é proporcional ao total de massa perdida pela amostra (MOTHÉ; AZEVEDO, 2002; BROWN, 2001).

A Figura 22 apresenta os principais parâmetros fornecidos pela DTG e as correlações entre a curva TGA e DTG. O platô horizontal na curva de TGA corresponde ao platô horizontal na curva DTG devido $dm/dt=0$. O máximo na curva de DTG é obtido quando a curva de TGA tem ponto de inflexão, isto é, a velocidade de variação de massa é maior (MOTHÉ; AZEVEDO, 2002).

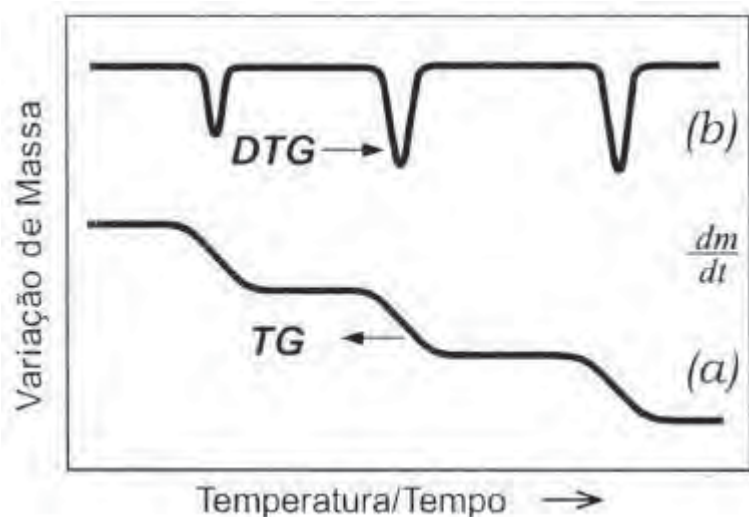


Figura 22: Comparação entre as curvas de TGA e DTG (retirado de MOTHÉ; AZEVEDO, 2002).

De acordo com a Figura 22 os principais parâmetros fornecidos pela curva de DTG são: a temperatura inicial de cada decomposição, temperatura em que a velocidade de cada

decomposição é máxima (máxima de pico da derivada originária do ponto de inflexão da curva TG) e a temperatura final de decomposição, além da massa perdida da amostra, que é proporcional à área abaixo de cada pico da derivada (MOTHÉ; AZEVEDO, 2002).

A estabilidade térmica de um material é definida como a capacidade da substância em manter suas propriedades, durante o processamento térmico, o mais próximo possível de suas características iniciais. A estabilidade térmica necessita de ser considerada em termos do ambiente imposto ao material e das funções que ele deve executar (MOTHÉ; AZEVEDO, 2002).

2.8 Calorimetria Diferencial Exploratória (DSC)

Segundo MOTHÉ E AZEVEDO (2002), a calorimetria diferencial exploratória é uma técnica derivada da análise térmica diferencial (DTA). Ela mede a diferença de energia necessária à substância e a um material de referência, inerte de modo térmico, enquanto ambos são submetidos a uma variação controlada de temperatura, de maneira que a amostra e referência sejam mantidas em condições isotérmicas, uma em relação à outra, independente do evento térmico que esteja ocorrendo na amostra (MOTHÉ; AZEVEDO, 2002; BROWN, 2001).

DSC pode ser definido como uma técnica que mede as temperaturas e o fluxo de calor associado com as transições térmicas dos materiais em função da temperatura e do tempo. Tais medidas fornecem informações qualitativas e quantitativas sobre mudanças físicas e químicas que envolvem processos endotérmicos (absorção de calor), exotérmicos (evolução de calor) ou mudanças na capacidade calorífica (MOTHÉ; AZEVEDO, 2002; BROWN, 2001).

O DSC pode fornecer informações sobre caracterização e medidas específicas tais como: transição vítrea, temperatura e tempo de cristalização, ponto de fusão, calor específico, oxidação, pureza, estabilidade térmica, ponto de ebulição, grau de velocidade de cura, cinética de reação e outros (MOTHÉ; AZEVEDO, 2002).

Uma curva típica de DSC é apresentada na Figura 23. De acordo com a Figura 23, o pico apresentado no sentido vertical crescente indica um aumento de entalpia, correspondendo a um evento endotérmico, enquanto a outra curva de sentido oposto, um pico exotérmico. A mudança da linha base significa uma mudança de fase, especialmente, a transição vítrea do material (T_g) (MOTHÉ; AZEVEDO, 2002).

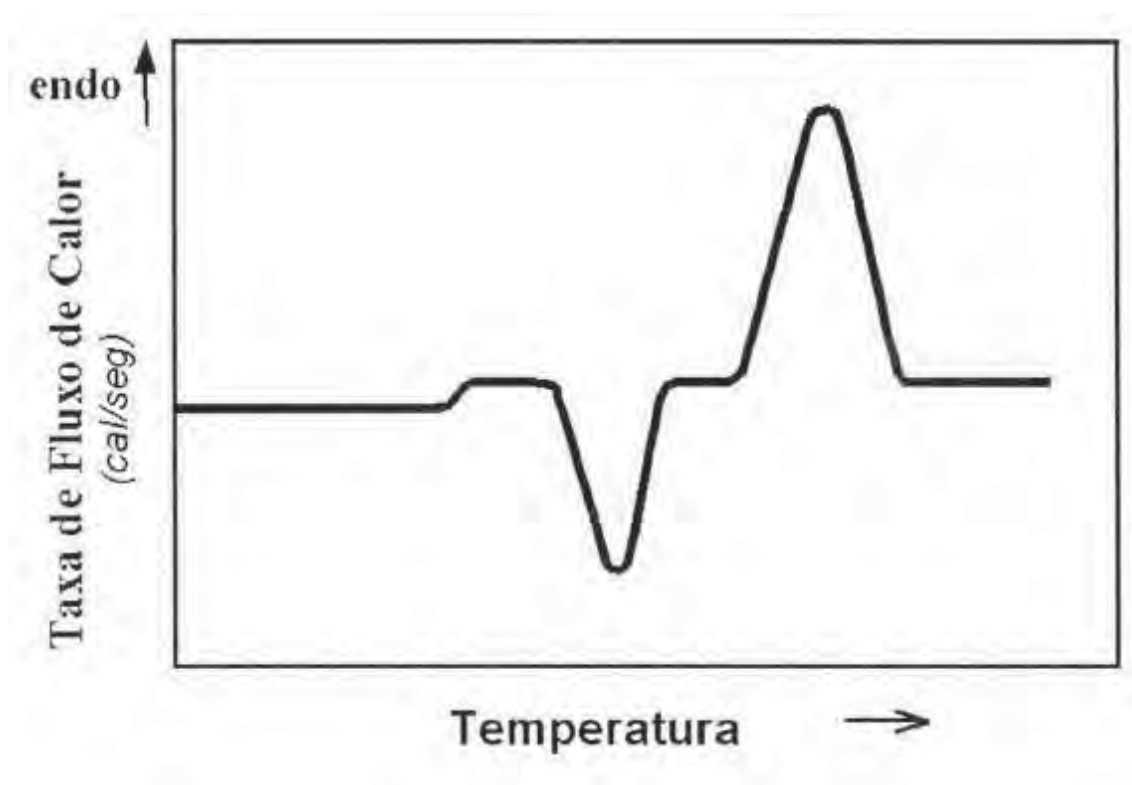


Figura 23: Curva típica obtida no DSC retirado de (MOTHÉ; AZEVEDO, 2002).

Na curva de DSC a área abaixo de pico é diretamente proporcional à variação de entalpia, descrita na Equação (6), onde K é independente da temperatura (MOTHÉ; AZEVEDO, 2002).

$$\text{Área} = \Delta H_m / K \quad (6)$$

Assim como na técnica de TGA, na de DSC também há duas possibilidades ou modos de análise: dinâmico e isotérmico. No modo dinâmico as razões de aquecimento ou resfriamento da amostra podem ser desde $0,1 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{min}$ até $750 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{min}$ (MOTHÉ; AZEVEDO, 2002).

Existem dois tipos de equipamento de DSC:

- DSC - fluxo de calor
- DSC – compensação de potência

No DSC tipo fluxo de calor, a amostra e referência são aquecidos por uma única fonte, e a temperatura de ambas é medida por termopares em contato com cada uma delas individualmente. A curva calorimétrica é apresentada na forma de diferença de temperatura entre a amostra e a referência em função do tempo ou da temperatura (MOTHÉ; AZEVEDO, 2002).

No DSC tipo compensação de potência, a amostra e a referência são aquecidas individualmente. O controle de temperatura é feito através de dois sistemas. O primeiro controla a temperatura média entre a amostra e a referência, de forma que o aquecimento ou resfriamento possa ser feito a velocidade controlada. O segundo garante que se há diferença de temperatura entre a amostra e a referência, devido à absorção ou perda de calor, a potência nos aquecedores individuais é ajustada de forma a restaurar o equilíbrio (MOTHÉ; AZEVEDO, 2002). Desta forma, é mantida a mesma temperatura para a amostra e para a referência por meio de ajustes contínuos e automáticos da potência. Monitora-se, então, a diferença de potência, proporcional à diferença de calor transmitida para a amostra e referência. Assim, o calor envolvido em processos endotérmicos e exotérmicos é medido diretamente (MOTHÉ; AZEVEDO, 2002).

O DSC é uma das técnicas mais empregadas para medir a temperatura de transição vítrea dos diversos materiais, além de fornecer informações sobre a compatibilidade da mistura entre dois ou mais polímeros. A temperatura de transição vítrea de um polímero é a temperatura na qual as cadeias moleculares começam a adquirir energia suficiente para vencer as forças atrativas e mover-se de forma translacional e vibracional (MOTHÉ; AZEVEDO, 2002; BROWN, 2001).

2.9 Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

Segundo SKOOG et.al. (2006), os métodos espectroscópicos de análise são baseados na medida da quantidade de radiação produzida ou absorvida pelas moléculas ou pelas espécies atômicas de interesse. Podemos classificar os métodos espectroscópicos de acordo com a região do espectro eletromagnético envolvida na medida. As regiões espectrais que têm sido empregadas incluem os raios γ , os raios X, ultravioleta (UV), visível, infravermelha (IV), microondas e radiofrequência (RF). De fato, o uso corrente estende mais ainda o significado da espectroscopia de forma a incluir técnicas que nem mesmo envolvem o uso de radiação eletromagnética, como a espectroscopia acústica, de massas e de elétrons (SKOOG et. al., 2006; CHANG, 2006).

Além disso, ainda segundo SKOOG et. al. (2006), os métodos espectroquímicos têm provido talvez as ferramentas mais amplamente empregadas para a elucidação de estruturas moleculares, bem como na determinação qualitativa e quantitativa de compostos orgânicos e inorgânicos.

A radiação eletromagnética é uma forma de energia que é transmitida através do espaço a velocidades enormes. Denominamos a radiação eletromagnética nas regiões do UV/visível e algumas vezes no infravermelho (IV), embora estritamente falando, o termo deveria se referir somente à radiação visível. A radiação eletromagnética pode ser descrita como uma onda com propriedades como comprimento de onda, frequência, velocidade e amplitude. Em contraste com as ondas sonoras, a luz não requer nenhum meio de suporte para a sua transmissão; assim, ela facilmente passa pelo vácuo. A luz também se propaga cerca de um milhão de vezes mais rapidamente que o som (SKOOG et. al., 2006; CHANG, 2006; CANEVAROLO JR., 2003).

Os espectroscopistas empregam as interações da radiação com a matéria para obter informações sobre uma amostra. Muitos elementos químicos foram descobertos por meio da espectroscopia. De alguma forma, a amostra é geralmente estimulada aplicando-se energia na forma de calor, energia elétrica, luz, partículas ou por uma reação química. Antes de se aplicar o estímulo, o analito se encontra predominantemente em seu estado de energia mais baixo ou estado fundamental. O estímulo então resulta que algumas das espécies do analito sofrem uma transição para um estado de maior energia ou estado excitado. Obtêm-se informações sobre o analito medindo-se a radiação eletromagnética emitida quando este retorna ao estado fundamental ou a quantidade de radiação eletromagnética absorvida decorrente da excitação (SKOOG et. al., 2006; CHANG, 2006).

A espectroscopia de emissão envolve geralmente métodos nos quais o estímulo é o calor ou a energia elétrica. Neste caso a medida da potência radiante emitida quando o analito retorna ao estado fundamental pode fornecer informações sobre a sua identidade e concentração. Os resultados dessas medidas são frequentemente expressos por meio do espectro, que se refere a um gráfico da radiação emitida em função da frequência ou do comprimento de onda (SKOOG et. al., 2006; CHANG, 2006).

Quando a amostra é estimulada pela aplicação de uma fonte de radiação eletromagnética externa, muitos processos são possíveis de ocorrer. O que é importante, no caso da espectroscopia por absorção, é que uma parte da radiação incidente pode ser absorvida e promover algumas das espécies do analito para um estado excitado. Nela mede-se a quantidade de luz absorvida em função do comprimento de onda. Isso pode fornecer tanto as informações qualitativas como quantitativas sobre a amostra (SKOOG et. al., 2006).

Cada espécie molecular é capaz de absorver suas próprias frequências características da radiação eletromagnética. Esse processo transfere energia para a molécula e resulta em um decréscimo da intensidade da radiação eletromagnética incidente. Dessa forma, a absorção da radiação atenua o feixe de acordo com a lei de absorção (SKOOG et. al., 2006; CHANG, 2006).

A lei de absorção, também conhecida como lei de Beer-Lambert ou somente como lei de Beer, diz quantitativamente como a grandeza da atenuação depende da concentração das moléculas absorventes e da extensão do caminho sobre o qual ocorre a absorção. À medida que a luz atravessa um meio contendo um analito que a absorve, um decréscimo de intensidade ocorre na proporção que o analito é excitado. Para uma solução do analito de determinada concentração, quanto mais longo for o comprimento do caminho do meio através do qual a luz passa (caminho óptico), mais centros absorventes estarão no caminho, e maior será a atenuação. Também, para um dado caminho óptico, quanto maior for a concentração de absorventes, mais forte será a atenuação (SKOOG et. al., 2006).

Em virtude das interações entre os fótons e as partículas absorventes a potência radiante do feixe decresce de P_0 a P . A transmitância T da solução é a fração da radiação incidente transmitida pela solução, como mostra a Equação (7). A transmitância é frequentemente expressa como uma porcentagem denominada porcentagem de transmitância (SKOOG et. al., 2006).

$$T = P/P_0 \quad (7)$$

A absorvência A de uma solução está relacionada com a transmitância de forma logarítmica, como mostra a Equação (8). Observe que quando a absorvência de uma solução aumenta, a transmitância diminui. As escalas nos instrumentos antigos eram lineares em transmitância; os instrumentos modernos apresentam escalas lineares de absorvência ou um computador que calcula a absorvência a partir das quantidades medidas (SKOOG et. al., 2006).

$$A = -\log T = \log(P_0/P) \quad (8)$$

Ordinariamente a transmitância e absorvência, como definidas nas Equações (7) e (8), não podem ser medidas como mostrado, uma vez que perdas por reflexão ou espalhamento podem ocorrer pelo caminho onde ocorrerá a absorção. Para compensar esses efeitos, a potência do feixe, transmitida através do caminho onde ocorrerá a absorção sem o material que será analisado, é comparada com a potência que atravessa o caminho onde ocorrerá a absorção com o material que será analisado. Uma absorvência experimental que se aproxima muito da absorvência verdadeira da solução é assim obtida; isto é (SKOOG et. al., 2006)

$$A = \log (P_0/P) \cong \log (P_{\text{caminho livre}}/P_{\text{amostra}}) \quad (9)$$

Os termos P_0 e P vão daqui para frente se referir à potência de um feixe que tenha passado através do caminho onde ocorrerá a absorção sem o material que será analisado (caminho livre) e do caminho onde ocorrerá a absorção com o material que será analisado, respectivamente (SKOOG et. al., 2006).

De acordo com a lei de Beer, a absorvência é diretamente proporcional à concentração de uma espécie absorvente c e ao caminho óptico b do meio absorvente, como expresso pela Equação (10) (SKOOG et. al., 2006).

$$A = \text{Log} (P_0/P) = abc \quad (10)$$

Onde, a é a constante de proporcionalidade denominada absortividade. Uma vez que a absorvência é uma grandeza adimensional (sem unidade), a absortividade deve ter unidades que cancelam as unidades de b e c (SKOOG et. al., 2006).

Quando se expressa a concentração na Equação (10) em mols por litro e b em centímetros, a constante de proporcionalidade é chamada absortividade molar, à qual é dado o símbolo especial, ϵ (SKOOG et. al., 2006). Assim,

$$A = \epsilon bc \quad (11)$$

em que ϵ possui as unidades de $\text{L mol}^{-1} \text{cm}^{-1}$.

Assim um gráfico de absorvância versus comprimento de onda pode ser obtido e denominado espectro de absorção. A Figura 24 ilustra um espectro de absorção. A absorvância pode também ser apresentada em forma de gráfico contra o número de onda ou a frequência. Muitos espectrofotômetros modernos de varredura produzem os espectros de absorvância diretamente. Os instrumentos antigos muitas vezes indicam a transmitância e produzem os gráficos de T ou %T versus o comprimento de onda (SKOOG et. al., 2006).

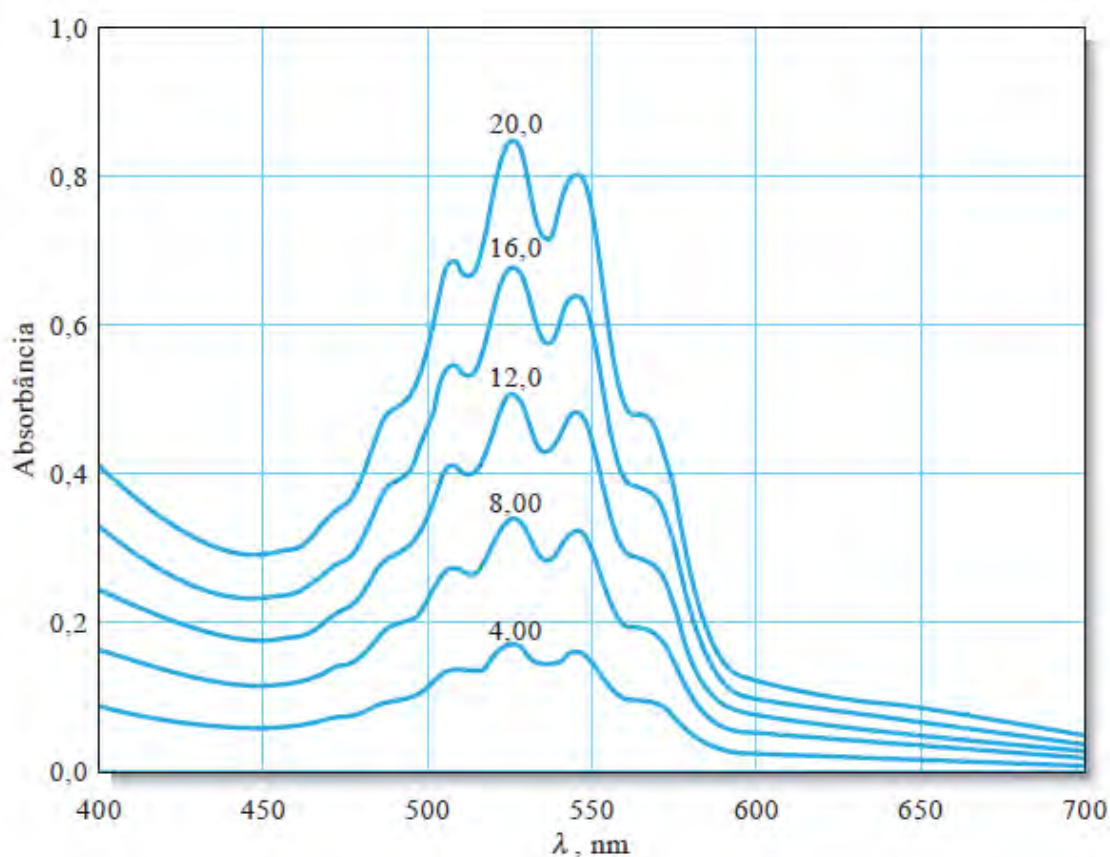


Figura 24: Espectros de absorção típicos do permanganato de potássio a diferentes concentrações (retirado de SKOOG et. al., 2006).

Além das transições eletrônicas, as moléculas exibem dois tipos adicionais de transições induzidas por radiação: transições vibracionais e transições rotacionais. As transições vibracionais ocorrem porque a molécula apresenta um número muito grande de níveis

energéticos quantizados (ou estados vibracionais) associados com as ligações que mantêm a molécula unida (SKOOG et. al., 2006; CANEVAROLO JR., 2003).

Para ter uma ideia da natureza dos estados vibracionais pode-se imaginar uma ligação em uma molécula como uma mola vibrando com os átomos ligados às suas duas extremidades. Na Figura 25 (a), dois tipos de vibração de estiramento são apresentados. Em cada vibração, os átomos primeiro se aproximam e depois se afastam um do outro. A energia potencial desse sistema a qualquer instante depende da extensão com a qual a mola foi estirada ou comprimida. Para uma mola comum, a energia do sistema varia continuamente e atinge um máximo quando a mola se encontra completamente estirada ou comprimida. Em contraste, a energia de um sistema de mola de dimensões atômicas pode assumir somente certas energias discretas denominadas níveis energéticos vibracionais (SKOOG et. al., 2006; CANEVAROLO JR., 2003).

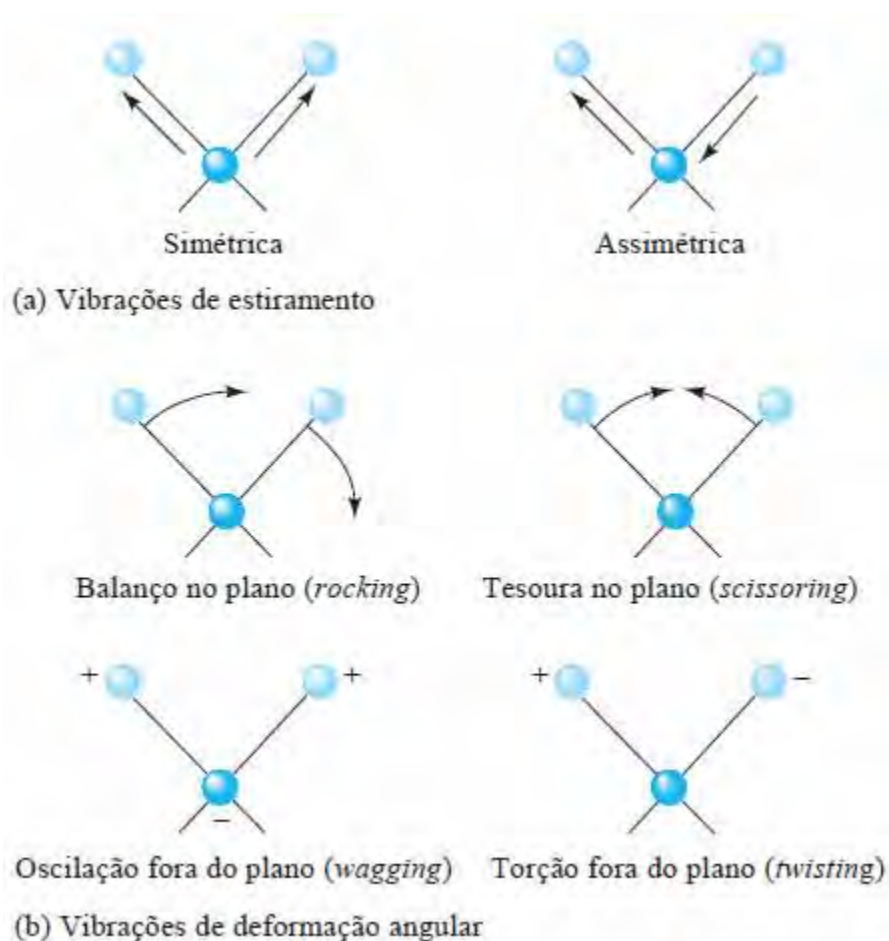


Figura 25: Tipos de vibrações moleculares. O sinal positivo significa a movimentação do plano da página em direção ao leitor; o sinal negativo significa a movimentação na direção oposta (retirado de SKOOG et. al., 2006).

A Figura 25 (b) mostra quatro outros tipos de vibrações moleculares. As energias associadas a cada um desses estados vibracionais geralmente diferem um do outro e das energias associadas com as vibrações de estiramento. Alguns desses níveis energéticos vibracionais associados com cada um dos estados eletrônicos da molécula são apontados pelas linhas indicadas pelos números 1, 2, 3 e 4 na Figura 26 (O nível vibracional mais baixo é indicado por um 0). Observe que as diferenças de energia entre os estados vibracionais são significativamente menores que entre os níveis energéticos dos estados eletrônicos (tipicamente, uma ordem de grandeza menor). Embora não estejam apresentados, a molécula possui uma quantidade enorme de estados rotacionais que são associados à movimentação rotacional da molécula ao redor do seu centro de gravidade. Esses estados rotacionais são superpostos a cada estado vibracional apresentados no diagrama de energia. As diferenças de energia entre esses estados são menores que aquelas existentes entre os estados vibracionais por uma ordem de grandeza (SKOOG et. al., 2006; CHANG, 2006; CANEVAROLO JR., 2003).

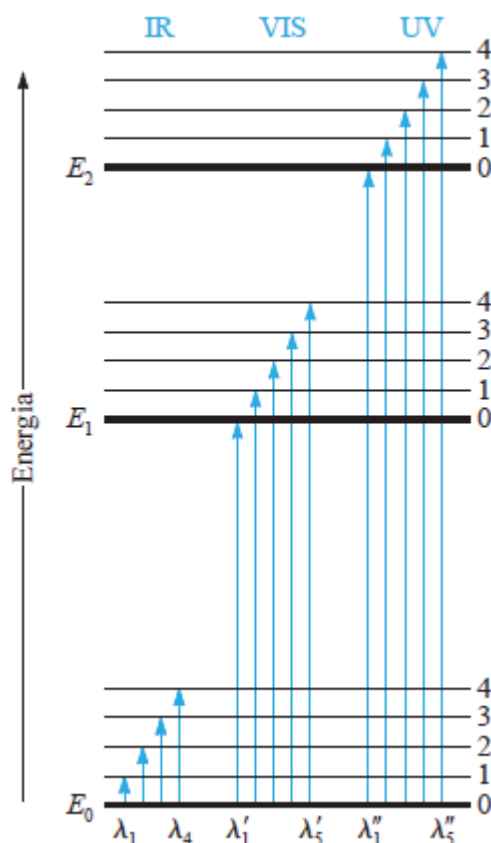


Figura 26: Diagramas de níveis energéticos mostrando algumas mudanças que ocorrem durante a absorção da radiação infravermelha (IR), visível (VIS) e ultravioleta (UV) (retirado de SKOOG et. al., 2006).

A radiação infravermelha geralmente não é suficientemente energética para causar transições eletrônicas, porém pode induzir transições nos estados vibracionais e rotacionais associados com o estado eletrônico fundamental da molécula (SKOOG et. al., 2006).

Dois tipos de espectrômetros são empregados na espectroscopia IV: os do tipo dispersivo e a variedade com transformada de Fourier (SKOOG et. al., 2006; CANEVAROLO JR., 2003).

Os instrumentos antigos eram invariavelmente de desenho de duplo feixe e dispersivos. Estes eram frequentemente da variedade de duplo feixe temporal mostrada na Figura 27, exceto pelo fato de que a localização do compartimento da célula com respeito ao monocromador era invertida. Na maioria dos instrumentos UV/visível, a célula está localizada entre o monocromador e o detector de forma a evitar a fotodecomposição da amostra, que pode ocorrer se as amostras são expostas à potência total da fonte. Os instrumentos de arranjo de fotodiodos evitam esse problema devido ao curto tempo de exposição da amostra ao feixe. A radiação infravermelha, em contraste, não é suficientemente energética para causar a fotodecomposição. Também, muitas amostras são bons emissores de radiação IV. Por causa disso, o compartimento da célula normalmente está localizado entre a fonte e o monocromador em um instrumento IV (SKOOG et. al., 2006; CANEVAROLO JR., 2003).

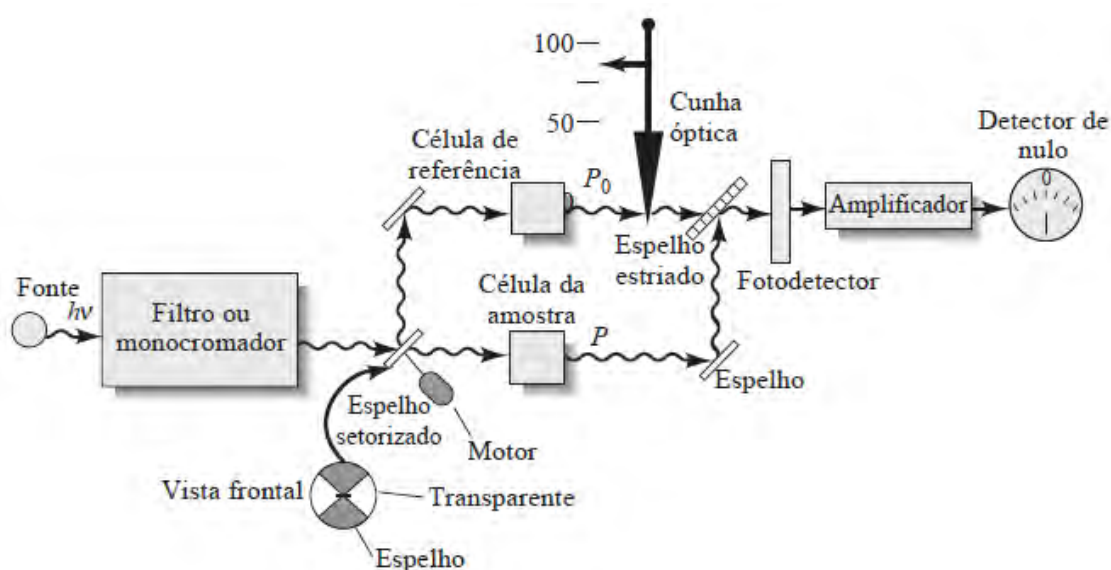


Figura 27: Esquema de espectrôscópio de feixe duplo temporal (retirado de SKOOG et. al., 2006).

As fontes de IV são constituídas por sólidos aquecidos e os detectores IV respondem ao calor em vez de fótons. Além disso, os componentes ópticos dos instrumentos IV são construídos de cristais polidos de sais, tais como o cloreto de sódio e o brometo de potássio (SKOOG et. al., 2006).

Os espectrômetros infravermelhos com transformada de Fourier – FTIR (do inglês, *Fourier transform infrared*) – apareceram pela primeira vez no mercado no início dos anos de 1970, eram enormes e muito caros (mais de US\$ 100 mil) e requeriam ajustes mecânicos frequentes. Por essas razões, seu uso estava limitado a aplicações especiais nas quais as suas características únicas (alta velocidade, alta resolução, alta sensibilidade e excelente precisão e exatidão em relação ao comprimento de onda) eram essenciais. Atualmente, contudo, os espectrômetros FTIR tiveram seu tamanho reduzido podendo ser alocados em bancadas e têm se tornado muito confiáveis e de fácil manutenção. Além disso, os modelos mais simples apresentam agora um preço similar aos espectrômetros dispersivos simples. Dessa forma, os espectrômetros FTIR estão substituindo largamente os instrumentos dispersivos nos laboratórios (SKOOG et. al., 2006).

Os instrumentos com transformada de Fourier não apresentam nenhum elemento dispersivo e todos os comprimentos de onda são detectados e medidos simultaneamente. Em vez de um monocromador, um interferômetro é usado para produzir padrões de interferência que contêm a informação espectral do infravermelho. Os mesmos tipos de fontes empregados nos instrumentos dispersivos são utilizados nos espectrômetros FTIR. Os transdutores tipicamente são o sulfato de triglicina — um transdutor piroelétrico — ou telureto de cádmio — um transdutor fotocondutivo. Para se obter a potência radiante em função do comprimento de onda, o interferômetro modula o sinal da fonte de maneira que este possa ser decodificado por uma técnica matemática denominada transformada de Fourier. Essa operação requer um computador de alta velocidade para realizar os cálculos necessários (SKOOG et. al., 2006; CANEVAROLO JR., 2003).

A maioria dos espectrômetros de bancada FTIR são do tipo de feixe único. Para se obter o espectro da amostra, primeiro obtém-se um espectro do fundo (*background*) (solvente, água presente no ambiente e dióxido de carbono). Depois, consegue-se o espectro da amostra. Finalmente, a razão entre o espectro de feixe único da amostra e o espectro do fundo é calculada e a absorbância ou transmitância versus o comprimento de onda é registrada. Frequentemente, os instrumentos de bancada purgam o espectrômetro com um gás inerte ou

ar seco, livre de CO₂, para reduzir a absorção de vapor de água e CO₂ de fundo (*background*) (SKOOG et. al., 2006; CANEVAROLO JR., 2003).

As maiores vantagens dos instrumentos FTIR sobre os espectrômetros dispersivos incluem uma maior velocidade e sensibilidade, melhor aproveitamento da potência luminosa, calibração do comprimento de onda mais exata, desenho mecânico simples e a eliminação virtual de problemas de radiação espúria e emissão IV. Em virtude dessas vantagens, quase todos os novos instrumentos são sistemas FTIR (SKOOG et. al., 2006).

2.10 Análise de variância (ANOVA)

A análise estatística de k amostras de tamanho n , retiradas de k grupos é tradicionalmente feita por uma análise de variância (ANOVA), acompanhada de um teste F, o qual supõe (MAGALHÃES, LIMA, 2001; BARBETTA, REIS, BORNIA, 2004; COSTA NETO, 2002):

1. As observações devem ser independentes;
2. As variâncias populacionais devem ser iguais nos k grupos;
3. A distribuição das observações em cada grupo deve ser normal.

Então se testam as duas hipóteses:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k \quad (12)$$

$$H_1: \mu_i \neq \mu_j, \text{ para } i \neq j. \quad (13)$$

Nota-se que, se considerarmos as médias μ_i sob a forma $\mu + \delta_i$, $i = 1, 2, \dots, k$, poderemos formular alternativamente (COSTA NETO; 2002),

$$H_0: \delta_1 = \delta_2 = \dots = \delta_k = 0 \quad (14)$$

No presente trabalho a seguinte notação será usada segunda a qual X_{ij} ($i = 1, 2, \dots, k$; $j = 1, 2, \dots, n$) é o j -ésimo valor da i -ésima amostra de n elementos, e

$T_i = \sum_{j=1}^n X_{ij}$ = soma dos valores da i-ésima amostra;

$Q_i = \sum_{j=1}^n X_{ij}^2$ = soma dos quadrados dos valores da i-ésima amostra;

$T = \sum_{i=1}^k T_i = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n X_{ij}$ = soma total dos valores;

$Q = \sum_{i=1}^k Q_i = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n X_{ij}^2$ = soma total dos quadrados;

$X_{mi} = T_i/n$ = média da i-ésima amostra;

$\bar{X}_{m_i} = T/nk$ = média de todos os valores.

A análise de variância baseia-se em que, sendo verdadeira a hipótese H_0 , existem três maneiras pelas quais a variância σ^2 comum, implicitamente, a todas as populações, pode ser estimada. A seguir estão apresentadas as três estimativas (MAGALHÃES, LIMA, 2001; BARBETTA, REIS, BORNIA, 2004; COSTA NETO, 2002).

A estimativa total é obtida considerando-se as k amostras reunidas em uma só, cuja variância S_T^2 é calculada. Isso fornecerá uma estimativa válida de σ^2 se e somente se a hipótese H_0 for verdadeira, pois então todas as populações serão identicamente distribuídas (normais de mesma média e mesma variância), tendo sentido fundir as k amostras em uma só (MAGALHÃES, LIMA, 2001; BARBETTA, REIS, BORNIA, 2004; COSTA NETO, 2002).

A estimativa total de σ^2 será dada por

$$S_T^2 = \frac{\sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^n (X_{ij} - \bar{X}_{m_i})^2}{(nK - 1)} = \frac{\sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^n X_{ij}^2 - \frac{(\sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^n X_{ij})^2}{nK}}{(nK - 1)}$$

$$S_T^2 = \frac{Q - \frac{T^2}{nK}}{(nK - 1)} \quad (15)$$

Ao numerador de S_T^2 denominaremos soma de quadrados total, ou SQT.

Como visto acima, sendo verdadeira a hipótese H_0 , podemos considerar todos os valores X_{ij} como provenientes de uma única população. Nas mesmas condições, podemos também considerar as médias X_{mi} das k amostras como uma amostra de k valores retirados da

população dos possíveis valores de X_m (X médio). Sabe-se que a população de valores de X_m é normalmente distribuída com variância σ^2/n , logo, a variância da amostra formada pelos k valores X_i estima σ^2/n (MAGALHÃES, LIMA, 2001; BARBETTA, REIS, BORNIA, 2004; COSTA NETO, 2002). Temos, pois a segunda estimativa de σ^2 , a estimativa entre amostras, que será n vezes a variância dessa amostra, ou seja,

$$S_E^2 = n \times \frac{\sum_{i=1}^K (X_{m_i} - \bar{X}_{m_i})^2}{K-1} = \frac{n}{K-1} \times \left[\sum_{i=1}^K (X_{m_i})^2 - \frac{(\sum_{i=1}^K X_{m_i})^2}{K} \right]$$

$$S_E^2 = \frac{nK}{k-1} \times \left[\sum_{i=1}^K \left(\frac{T_i}{n} \right)^2 - \frac{T^2}{n^2 K} \right] = \frac{\sum_{i=1}^K T_i^2 - \frac{T^2}{n}}{K-1} \quad (16)$$

ao numerador S_E^2 denominaremos soma de quadrados entre amostras, ou SQE.

A variância comum σ^2 pode ser também estimada individualmente a partir dos elementos de cada uma das k amostras disponíveis, ou seja, dentro de cada amostra. Ter-se-ia, portanto, k estimativas individuais de σ^2 , todas elas válidas, independentemente da veracidade ou não de H_0 (MAGALHÃES, LIMA, 2001; BARBETTA, REIS, BORNIA, 2004; COSTA NETO, 2002). Cada amostra individual fornecerá uma estimativa, dada por:

$$S_i^2 = \frac{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - X_{m_i})^2}{n-1} = \frac{\sum_{j=1}^n x_{ij}^2 - \frac{(\sum_{j=1}^n x_{ij})^2}{n}}{n-1} = \frac{Q_i - \frac{T_i^2}{n}}{n-1} \quad (17)$$

Sendo as amostras de mesmo tamanho, a estimativa resultante para o conjunto de amostras será a média aritmética das k estimativas individuais, ou seja,

$$S_R^2 = \frac{\sum_{i=1}^K S_i^2}{K} = \sum_{i=1}^K \frac{Q_i - \frac{T_i^2}{n}}{K(n-1)} = \frac{Q - \sum_{i=1}^K \frac{T_i^2}{n}}{K(n-1)} \quad (18)$$

Ao numerador de S_R^2 denominaremos soma dos quadrados residual ou SQR. Sendo H_0 verdadeira, as estimativas S_E^2 e S_R^2 serão independentes, podendo-se compará-las mediante um teste F (MAGALHÃES, LIMA, 2001; BARBETTA, REIS, BORNIA, 2004; COSTA NETO, 2002).

De fato das relações obtidas em (15), (16) e (18), vemos facilmente que:

$$SQT = SQE + SQR \quad (19)$$

Se dividirmos os três termos da Equação (19) pela variância σ^2 teremos, no primeiro membro, um X_{nk-1}^2 , que é desdobrado, no segundo membro, em duas parcelas, X_{k-1}^2 e $X_{k(n-1)}^2$. Como $nk - 1 = (k - 1) + k(n - 1)$, resulta que os X^2 do segundo membro são independentes. Logo, também o serão SQE e SQR e, conseqüentemente, S_E^2 e S_R^2 . Deve-se notar que essa independência só existirá se H_0 for verdadeira, pois caso contrário, S_E^2 e S_R^2 não estimarão σ^2 (MAGALHÃES, LIMA, 2001; BARBETTA, REIS, BORNIA, 2004; COSTA NETO, 2002).

Como consequência do que foi visto, podemos, portanto, substituir a hipótese H_0 original pela hipótese de que S_E^2 e S_R^2 estimem a mesma variância σ^2 , ou seja, $\sigma_E^2 = \sigma^2$, onde σ_E^2 é a variância estimada por S_E^2 (MAGALHÃES, LIMA, 2001; BARBETTA, REIS, BORNIA, 2004; COSTA NETO, 2002). Esta hipótese pode ser testada através da Equação a seguir:

$$F = (S_E^2/S_R^2) \quad (20)$$

Esse teste F será conduzido com $k - 1$ graus de liberdade no numerador e $k.(n - 1)$ no denominador, ou seja, H_0 será rejeitada se $F > F_{k-1, k.(n-1), \alpha}$, onde α é o nível de significância escolhido para o teste. O procedimento de teste será sempre unilateral, pois, sendo H_0 falsa, F tenderá sempre a crescer (MAGALHÃES, LIMA, 2001; BARBETTA, REIS, BORNIA, 2004; COSTA NETO, 2002). De fato, se considerarmos o modelo fixo da análise de variância, pode-se mostrar que, independentemente de H_0 , S_E^2 estima,

$$\sigma_E^2 = \sigma^2 + \frac{n}{k-1} \times \sum_{i=1}^K \delta_i^2 \quad (21)$$

onde os δ_i tem o significado expresso na Equação (14). A Equação (21) mostra que, se H_0 for verdadeira, S_E^2 , assim como S_R^2 , estimará σ^2 , ao passo que, se H_0 for falsa, S_E^2 estimará $\sigma_E^2 > \sigma^2$, vê-se imediatamente que, se for obtido $F < 1$, tal fato somente poderá ser atribuído ao acaso, e a hipótese H_0 deverá ser automaticamente aceita (MAGALHÃES, LIMA, 2001; BARBETTA, REIS, BORNIA, 2004; COSTA NETO, 2002).

Ao se fazer a análise de variância, é usual e recomendável dispor os cálculos segundo o chamado quadro da análise de variância, conforme mostra a Tabela 1. Essa pratica é, em

geral, adotada pelos *softwares* estatísticos (MAGALHÃES, LIMA, 2001; BARBETTA, REIS, BORNIA, 2004; COSTA NETO, 2002).

Tabela 1: Disposição prática para análise de variância

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado médio	F	F_{α}
Entre amostras	$SQE = \sum_{i=1}^K \left(\frac{T_i^2}{n} - \frac{T^2}{nK} \right)$	$k - 1$	$S_E^2 = \frac{SQE}{K - 1}$	$F = \frac{S_E^2}{S_R^2}$	$F_{k-1, k(n-1), \alpha}$
Residual	$SQR = Q - \sum_{i=1}^K \frac{T_i^2}{n}$	$k.(n - 1)$	$S_R^2 = \frac{SQR}{K(n - 1)}$		
Total	$SQT = Q - \frac{T^2}{nK}$	$nk - 1$			

Valores críticos para testes de hipóteses dependem de um teste estatístico, o qual é específico do tipo de teste utilizado e do nível de significância, α , o qual define a sensibilidade do teste. Um valor de $\alpha = 0,05$ implica que a hipótese nula é rejeitada 5% do tempo quando ela é de fato verdadeira. A escolha de α é arbitrária, embora na prática valores de 0,1, 0,05 e 0,01 são comumente utilizados. Valores críticos são essencialmente valores de corte que definem regiões onde o teste estatístico seja improvavelmente falso; por exemplo, a região onde o valor crítico é excedido ao nível de significância α se a hipótese nula for verdadeira. A hipótese nula é rejeitada se o teste estatístico for falso dentro da região em que frequentemente é referida como a região, ou regiões, de rejeição (FILLIBEN, JAMES J.; GUTHRIE, WILL; HECKERT, ALAN; 2012).

Outra medida quantitativa para apresentar os resultados de um teste de hipótese é o valor P. O valor P é a probabilidade de o teste estatístico estar no mínimo tão extremo como aquele observado quando a hipótese nula é verdadeira (as populações não tem diferença

estatística ao nível de confiabilidade estabelecida). Um valor P pequeno indica que a hipótese nula é falsa (FILLIBEN, JAMES J.; GUTHRIE, WILL; HECKERT, ALAN; 2012).

É uma boa prática decidir no decorrer do teste quão pequeno é o valor de P para rejeitar o teste. Isto é exatamente análogo a escolher o nível de significância α para o teste. Por exemplo, decide-se ou rejeitar a hipótese nula se o teste exceder o valor crítico (para $\alpha = 0,05$) ou analogamente rejeitar a hipótese nula se o valor de P é menor que 0,05. É importante entender a relação entre os dois conceitos porque alguns pacotes de *softwares* apresentam preferencialmente o valor de P que o valor crítico (o valor de F) (FILLIBEN, JAMES J.; GUTHRIE, WILL; HECKERT, ALAN; 2012).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Visando determinar a aplicabilidade de materiais compósitos em cabos de transmissão de energia, realizou-se uma caracterização mecânica e físico-química em amostras de pultrudado de fibra de carbono com matriz de resina epóxi, fenólica e poliéster, por meio dos ensaios de resistência a tração e Poisson, espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), análise termogravimétrica (TGA), calorimetria diferencial exploratória (DSC) e medição de densidade.

3.1 Materiais

Os materiais escolhidos para caracterização e determinação das propriedades foram fornecidos pela empresa Stratus, de São José dos Campos, na forma de pultrudados dos quais foram retirados os corpos de provas de acordo com as normas para cada ensaio.

Estes cabos foram obtidos pelo processo de pultrusão, no qual mechas de fibra de carbono em forma de fio foram mergulhadas em cubas com a matriz polimérica desejada, já devidamente formulada, onde as fibras eram impregnadas com a matriz, e então passavam por um molde aquecido para dar a forma final ao cabo e curar a resina. Após o processo desejava-

se obter um cabo compósito com 1,8 mm de diâmetro e com 80% em massa de fibra e 20% em massa de matriz.

A Stratus também forneceu as resinas utilizadas no processo de pultrusão para ser realizado o ensaio de DSC, uma vez que a porcentagem das mesmas no material compósito era pequena.

As resinas utilizadas foram epóxi do Bisfenol A; fenólica, do tipo “resol” diluída em etanol; e poliéster insaturado isoftálico, endurecida utilizando catalizador de MEKP e acelerador à base de cobalto. Estas resinas são adequadas para o processo de pultrusão.

3.2 Métodos

Os ensaios de tração e Poisson foram realizados segundo as normas ASTM D 638 e ISO 527, utilizando-se uma máquina universal de ensaio servohidráulica MTS 810, com uma célula de carga de 250 kgf e extensômetro uniaxial para medição do módulo de elasticidade e biaxial para a medição do coeficiente de Poisson. A velocidade de ensaio foi de 50 mm/min para o ensaio até a ruptura, enquanto que para a determinação do coeficiente de Poisson foi de 5 mm/min.

Para o ensaio de tração, cortaram-se dos pultrudados compósitos fornecidos pela Stratus, três corpos de prova com comprimento útil de 250 mm para cada sistema de resina.

Os corpos de prova a serem ensaiados foram fixados em suas extremidades com garras cônicas, como ilustrado na Figura 28 (representação da preparação de um dos corpos de prova utilizados). Os pultrudados foram delaminados em suas extremidades e incorporados com resina epóxi na temperatura de 25°C. Em seguida os corpos de prova foram deixados nessa temperatura para assegurar que o processo de cura fosse completado antes que os ensaios fossem realizados. Este procedimento foi realizado, pois se fossem utilizadas garras tradicionais para ensaio de tração, estas esmagariam o material compósito, causando a falha dos corpos de prova fora da região útil do ensaio, invalidando-o. O sistema mostrado na Figura 28 é utilizado para fixar o pultrudado de forma que o mesmo seja tracionado e que a fratura ocorra na região útil do corpo de prova.

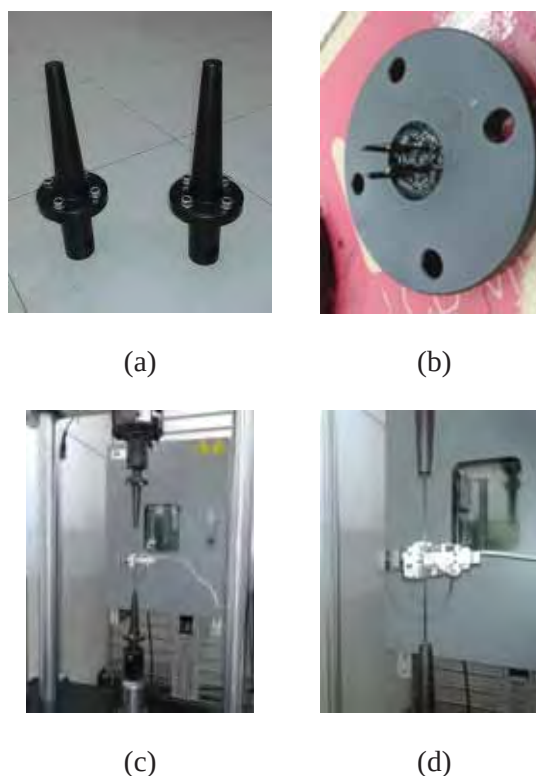


Figura 28: (a) Garras cônicas utilizadas para fixar os corpos de prova na máquina de ensaio de tração, (b) pultrudados de fibra de carbono curados com resina, (c) máquina de ensaio de tração e (d) *strain gage* biaxial para medição do coeficiente de Poisson.

O ensaio de espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) foi realizado segundo a norma ASTM E 204 – 98, utilizou-se um equipamento Nicolet modelo Magna IR 550, com janela de silício, 100 varreduras por ensaio, na faixa de 4000 cm^{-1} a 650 cm^{-1} e com resolução de 8 cm^{-1} . Os pultrudados com os três sistemas de resina recebidos foram analisados diretamente no equipamento, sem a necessidade de preparação da amostra.

Já o ensaio de análise termogravimétrica (TGA) foi realizado segundo a norma ASTM E-1877, com um equipamento DuPont Instruments modelo 951. A atmosfera utilizada foi de nitrogênio com 99,999% de pureza, com fluxo de 50 mL/min, usando taxa de aquecimento de $20\text{ (}^{\circ}\text{C/min)}$, a partir da temperatura ambiente até 600°C . Neste ensaio foi utilizada uma amostra para cada sistema de resina, sendo que as amostras foram cortadas a partir dos pultrudados obtidos, com massa aproximada de 30 mg. A amostra obtida do cabo compósito com resina epóxi como matriz possuía 33,4 mg, a com resina fenólica como matriz possuía 27,4 mg e a com resina poliéster como matriz possuía 27,3 mg.

O ensaio de calorimetria diferencial exploratória (DSC) foi realizado segundo a norma ASTM E 794 – 95, no qual se utilizou o equipamento TA Instruments modelo 2910. A atmosfera utilizada foi de nitrogênio com 99,999% de pureza, com fluxo de 50 mL/min. As amostras foram submetidas a ciclos dinâmicos de aquecimento e resfriamento na faixa de 50 °C até 220 °C, em uma taxa de varredura de 10°C/min. Este ensaio, como citado na seção 3.1, foi realizado nas resinas utilizadas no processo de pultrusão utilizando painéis de alumínio semi-herméticas. A amostra de resina epóxi possuía massa de 14,1 mg, a de resina poliéster possuía massa de 16,0 mg e a de resina fenólica possuía massa de 13,6 mg.

A densidade foi determinada utilizando-se picnômetro padrão com etanol a 25°C segundo a NBR NM IEC 60811-1-3. Para este ensaio foram cortados dos pultrudados de cabos compósitos pequenos pedaços, de no máximo 5 mm de comprimento, com massa total de 2 g, este procedimento foi realizado em duplicata para cada sistema de resina. Para a análise de densidade, primeiramente media-se a massa do picnômetro padrão com etanol a 25 °C. Após isso, media-se a massa do picnômetro com as 2g de amostra na mesma temperatura. Então se utilizando a densidade do etanol a 25 °C, o volume do picnômetro e a variação de massa obtia-se a densidade do pultrudado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Ensaio de tração e Poisson

A Figura 29 mostra uma curva típica de tensão versus deformação obtida por meio do ensaio de tração realizado nos pultrudados. A Figura 30 mostra a região de tensão versus deformação dentro da zona elástica e a Figura 31 mostra uma curva típica de deformação transversal versus longitudinal para determinação do coeficiente de Poisson.

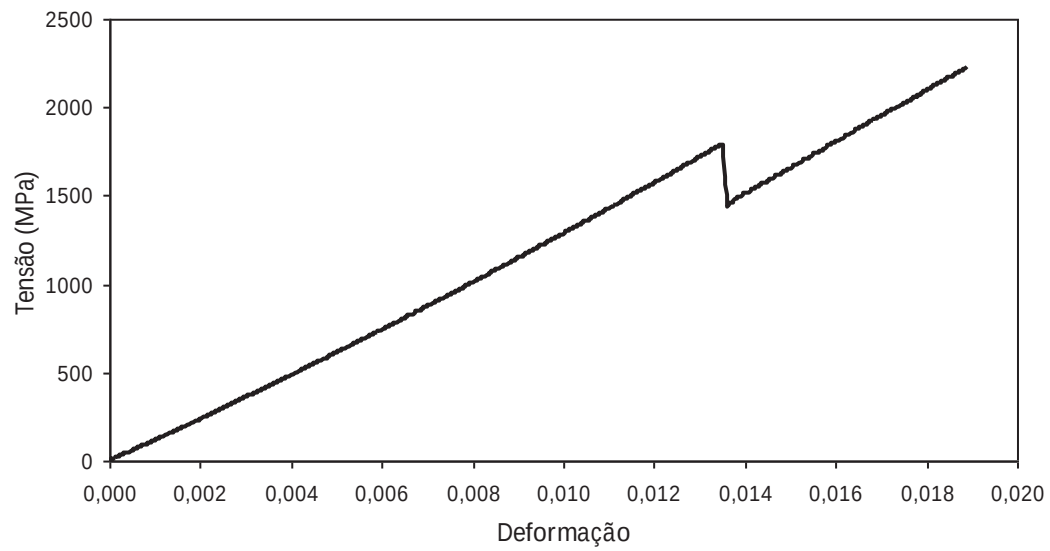


Figura 29: Gráfico de tensão versus deformação de uma das amostras de pultrudado de fibra de carbono com resina poliéster, típico dos pultrudados.

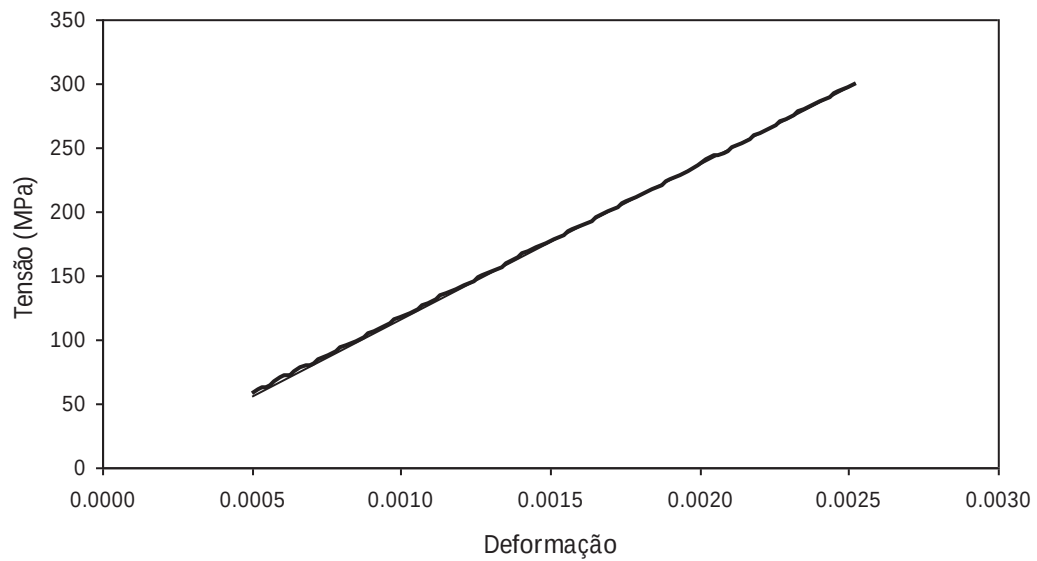


Figura 30: Gráfico de tensão versus deformação na zona elástica típico de uma das amostras de pultrudado de fibra de carbono com resina poliéster, típico dos pultrudados.

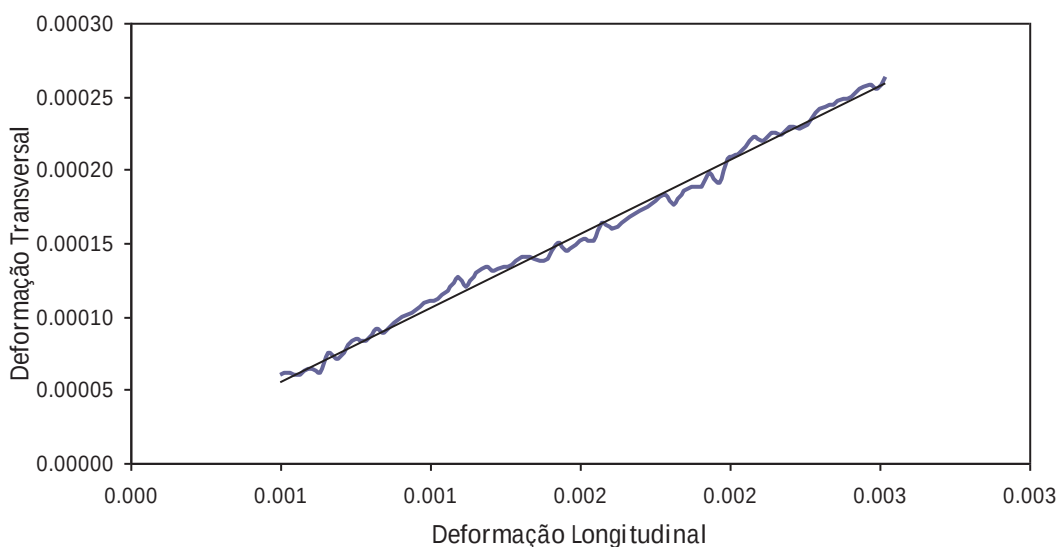


Figura 31: Gráfico de Poisson típico dos pultrudados de fibra de carbono com matriz de resina poliéster, típico dos pultrudados.

A partir dos gráficos obtidos dos ensaios de tração e Poisson das amostras de pultrudados, obtiveram-se os dados de tensão de ruptura (MPa), o qual corresponde ao ponto máximo da curva tensão x deformação, o módulo de elasticidade (GPa), obtido a partir do coeficiente angular da reta obtida por regressão linear a partir dos dados de tensão-deformação que se encontravam dentro da região elástica, e o coeficiente de Poisson, que foi obtido por meio do coeficiente angular da reta através da curva de deformação transversal x longitudinal.

Na Tabela 2 até a Tabela 4 encontram-se os resultados de tensão máxima, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson obtidos no ensaio de tração e Poisson das amostras de pultrudados de fibra de carbono com resinas epóxi, fenólica e poliéster, respectivamente.

Tabela 2: Tabela de resultados de tensão de ruptura, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson das amostras do pultrudado de fibra de carbono com matriz de resina epóxi.

Amostra	Módulo de Elasticidade (GPa)	Tensão de Ruptura (MPa)	Coeficiente de Poisson
01	148,3	2031,4	0,18
02	147,1	1943,7	0,18
03	149,2	2077,1	0,19
Média	148,2	2017,4	0,18
Desvio Padrão	1,1	67,8	0,00
Intervalo de 95% de confiança	2,7	168,3	0,02

Tabela 3: Tabela de resultados de tensão de ruptura, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson das amostras do pultrudado de fibra de carbono com matriz de resina fenólica.

Amostra	Módulo de Elasticidade (GPa)	Tensão de Ruptura (MPa)	Coeficiente de Poisson
01	156,8	1769,1	0,15
02	168,3	1476,5	0,12
03	158,1	1722,1	0,11
Média	161,1	1655,5	0,13
Desvio Padrão	6,3	157,1	0,02
Intervalo de 95% de confiança	15,7	389,5	0,03

Tabela 4: Tabela de resultados de tensão de ruptura, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson das amostras do pultrudado de fibra de carbono com matriz de resina poliéster.

Amostra	Módulo de Elasticidade (GPa)	Tensão de Ruptura (MPa)	Coeficiente de Poisson
01	119,1	2243,0	0,12
02	119,6	2308,6	0,04
03	119,1	2221,2	0,10
Média	119,3	2257,6	0,07
Desvio Padrão	0,3	45,5	0,04
Intervalo de 95% de confiança	1,1	183,0	0,06

As Tabelas 5 a 16 apresentam a comparação entre os parâmetros das amostras por análise de variância Anova, com intervalo de 95% de confiança. As Tabelas 5 a 13 apresentam os resultados da análise de variância Anova dos parâmetros com relação ao teste F, no qual se o valor de F calculado for maior que o F_{α} ou $F_{\text{crítico}}$, rejeita-se a hipótese H_0 de que as médias do parâmetro analisado não apresentam diferença estatística ao nível de confiança de 95%, caso F calculado seja menor que o $F_{\text{crítico}}$ se aceita H_0 . As Tabelas 14 a 16 apresentam os resultados da análise de variância Anova dos parâmetros com relação ao teste P, obtidos no mesmo *software* que os resultados do teste F, a saber, o *Microcal Origin versão 7.0*, no qual se o valor de P calculado for menor que o crítico rejeita-se a hipótese H_0 de que as médias do parâmetro analisado são estatisticamente iguais, caso o valor de P seja maior se aceita H_0 . Analisando-se as Tabelas dos dois testes de hipótese da análise de variância observa-se que os testes F e P convergem para um mesmo resultado.

Tabela 5: Tabela de análise de variância entre os módulos de elasticidade das amostras de matriz epóxi e fenólica.

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado médio	F	F_{α}
Entre amostras	248,33	1	248,33	12,18	7,71
Residual	81,55	4	20,39		
Total	329,87	5			

Tabela 6: Tabela de análise de variância entre os módulos de elasticidade das amostras de matriz fenólica e poliéster.

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado médio	F	F_{α}
Entre amostras	2620,86	1	2620,86	131,88	7,71
Residual	79,49	4	19,87		
Total	2700,35	5			

Tabela 7: Tabela de análise de variância entre os módulos de elasticidade das amostras de matriz epóxi e poliéster.

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado médio	F	F_{α}
Entre amostras	1255,71	1	1255,71	2104,54	7,71
Residual	2,39	4	0,59		
Total	1258,09	5			

Tabela 8: Tabela de análise de variância entre as tensões máximas de ruptura das amostras de matriz epóxi e fenólica.

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado médio	F	F_{α}
Entre amostras	196023,38	1	196023,38	13,39	7,71
Residual	58572,82	4	14643,21		
Total	254596,20	5			

Tabela 9: Tabela de análise de variância entre as tensões máximas de ruptura das amostras de matriz fenólica e poliéster.

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado médio	F	F_{α}
Entre amostras	543064.34	1	543064.34	40,6	7,71
Residual	53520.16	4	13380.04		
Total	596584.50	5			

Tabela 10: Tabela de análise de variância entre as tensões máximas de ruptura das amostras de matriz epóxi e poliéster.

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado médio	F	F_{α}
Entre amostras	86544.06	1	86544.06	25.97	7,7
Residual	13330.90	4	3332.73		
Total	99874.96	5			

Tabela 11: Tabela de análise de variância entre os coeficientes de Poisson das amostras de matriz epóxi e fenólica.

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado médio	F	F_{α}
Entre amostras	0.00	1	0.00	20.64	7,71
Residual	0.00	4	0.00		
Total	0.01	5			

Tabela 12: Tabela de análise de variância entre os coeficientes de Poisson das amostras de matriz fenólica e poliéster.

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado médio	F	F_{α}
Entre amostras	0.00	1	0.00	2.22	7,7087
Residual	0.00	4	0.00		
Total	0.01	5			

Tabela 13: Tabela de análise de variância entre os coeficientes de Poisson das amostras de matriz epóxi e poliéster.

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado médio	F	F_{α}
Entre amostras	0.01	1	0.01	15.87	7,708647
Residual	0.00	4	0.00		
Total	0.02	5			

Tabela 14: Anova do Módulo de Elasticidade.

Comparação	Valor de P	Valor de P crítico
Epóxi-Fenólica	0,03	0,05
Epóxi-Poliéster	0,00	0,05
Fenólica-Poliéster	0,00	0,05

Tabela 15: Anova da Tensão de Ruptura.

Comparação	Valor de P	Valor de P crítico
Epóxi-Fenólica	0,02	0,05
Epóxi-Poliéster	0,01	0,05
Fenólica-Poliéster	0,00	0,05

Tabela 16: Anova do Coeficiente de Poisson.

Comparação	Valor de P	Valor de P crítico
Epóxi-Fenólica	0,12	0,05
Epóxi-Poliéster	0,02	0,05
Fenólica-Poliéster	0,23	0,05

Segundo a NBR 7270, o aço galvanizado utilizado como núcleo de cabos em linhas aéreas deve apresentar tensão de ruptura de 1450 MPa. Das Tabelas 2 a 4 pode-se verificar que todos os pultrudados possuem tensão de ruptura média (2257,6 MPa, 2017,4 MPa e 1655,5 MPa, referentes as resinas poliéster, epóxi e fenólica, respectivamente) superior ao valor estipulado para os cabos tradicionais, sugerindo, portanto, ser possível a aplicação dos mesmos como núcleo de cabos de transmissão a partir desta propriedade.

Ainda das Tabelas 2 a 4 pode-se observar que há diferença estatística entre os módulos de elasticidade sendo que o maior módulo de elasticidade foi encontrado no compósito com matriz de resina fenólica (161,1 GPa), seguido dos compósitos com resina epóxi (148,2 GPa) e poliéster (119,3 GPa), respectivamente. Também há diferença estatística entre as tensões de ruptura das amostras sendo que a maior tensão de ruptura foi observada no compósito com matriz de resina de poliéster (2257,6 MPa), seguido dos compósitos com matriz de resina epóxi (2017,4 MPa) e fenólica (1655,5 MPa), respectivamente. O coeficiente de Poisson foi maior no pultrudado com matriz de resina epóxi (0,18), enquanto que não há diferença estatisticamente significativa entre os demais.

4.2 Espectroscopia de infravermelho (FTIR)

As Figuras 32 a 34 apresentam os resultados dos ensaios de FTIR das amostras de pultrudado de fibra de carbono com matrizes de resina epóxi, fenólica e poliéster, respectivamente. Os resultados são mostrados em unidades de transmitância por número de onda.

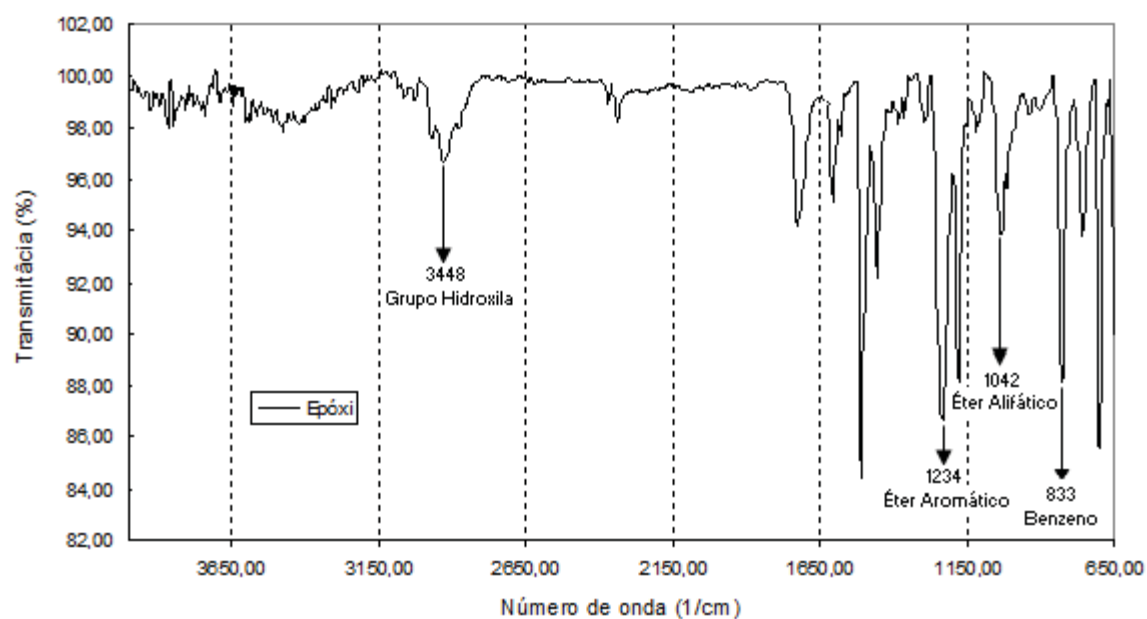


Figura 32: Gráfico do espectro de infravermelho de pultrudado de fibra de carbono com resina epóxi.

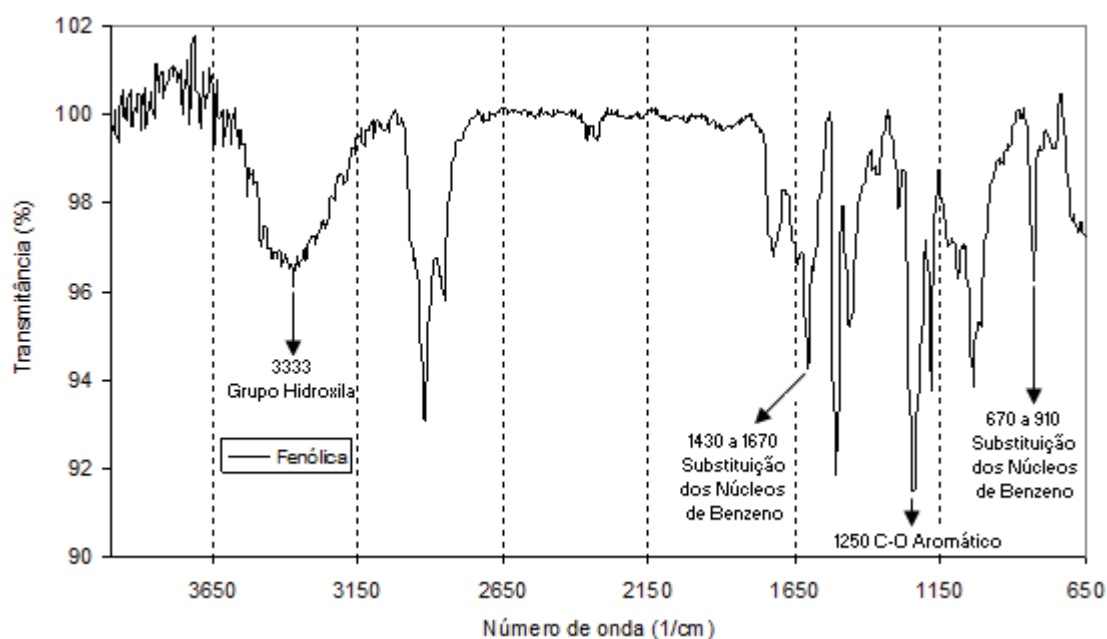


Figura 33: Gráfico do espectro de infravermelho de pultrudado de fibra de carbono com resina fenólica.

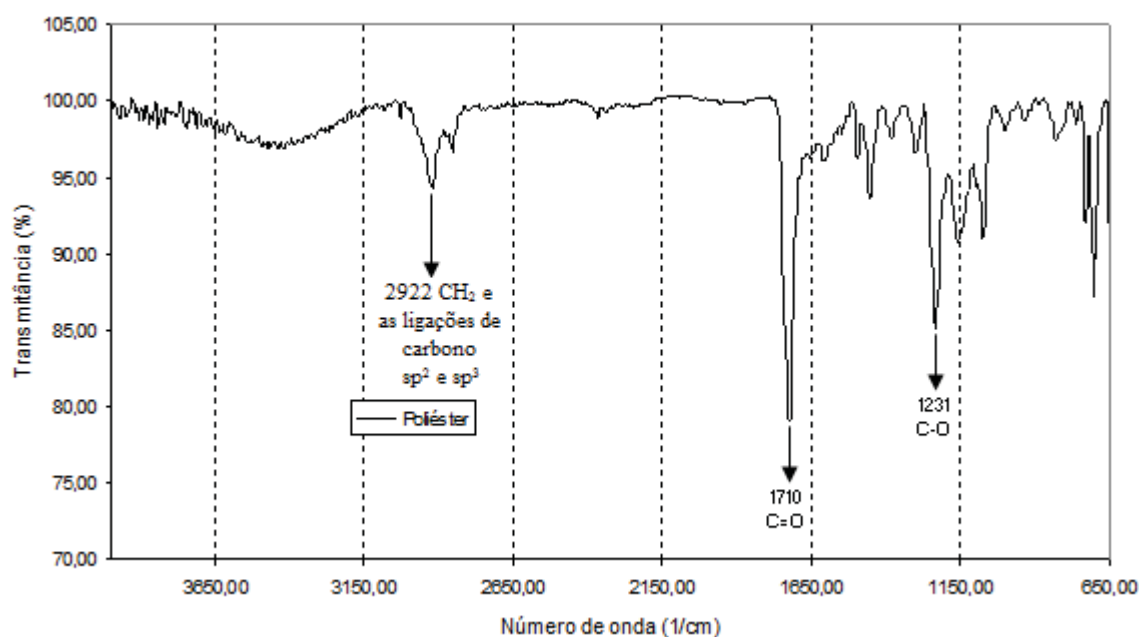


Figura 34: Gráfico do espectro de infravermelho de pultrudado de fibra de carbono com resina poliéster.

O ensaio de espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier foi realizado com o objetivo de verificar a composição química dos pultrudados com os três tipos de resina como matriz, especialmente para identificar a estrutura e os componentes orgânicos dentro das matrizes poliméricas.

Na Figura 32, referente ao espectro de FTIR do pultrudado de fibra de carbono com matriz de resina epóxi, pode ser observada uma banda de média intensidade em aproximadamente 3448 cm^{-1} , pertencente ao grupo hidroxila. Verifica-se também uma banda de alta intensidade em 1234 cm^{-1} associada ao éter aromático. Uma banda de éter alifático foi observada em 1042 cm^{-1} parcialmente sobreposta. Por fim observa-se uma banda referente ao benzeno em 833 cm^{-1} .

Na Figura 33, referente ao espectro de FTIR do pultrudado de fibra de carbono com matriz de resina fenólica, verifica-se uma banda de alta intensidade em aproximadamente 3333 cm^{-1} associada ao grupo hidroxila e uma do (C-O) aromático em 1250 cm^{-1} , simultaneamente com uma banda de média intensidade na região de 1430 cm^{-1} até 1670 cm^{-1} e uma banda sobreposta na região de 670 cm^{-1} até 910 cm^{-1} , referente à substituição dos núcleos de benzeno.

Na Figura 34 referente ao espectro de FTIR do pultrudado de fibra de carbono com matriz de resina de poliéster isoftálica, pode-se observar uma banda de alta intensidade em 1710 cm^{-1} , devido ao grupo C=O, a banda de média intensidade em 1231 cm^{-1} , devido ao grupo C-O. Além disso, as bandas devido ao CH_2 e as ligações de carbono sp^2 e sp^3 podem ser observadas em 2922 cm^{-1} .

4.3 Análise Termogravimétrica (TGA)

As Figuras 35 a 38 apresentam os resultados do ensaio de TGA das amostras de pultrudado de fibra de carbono com matrizes de resina epóxi, fenólica e poliéster, respectivamente, e uma comparação entre as mesmas.

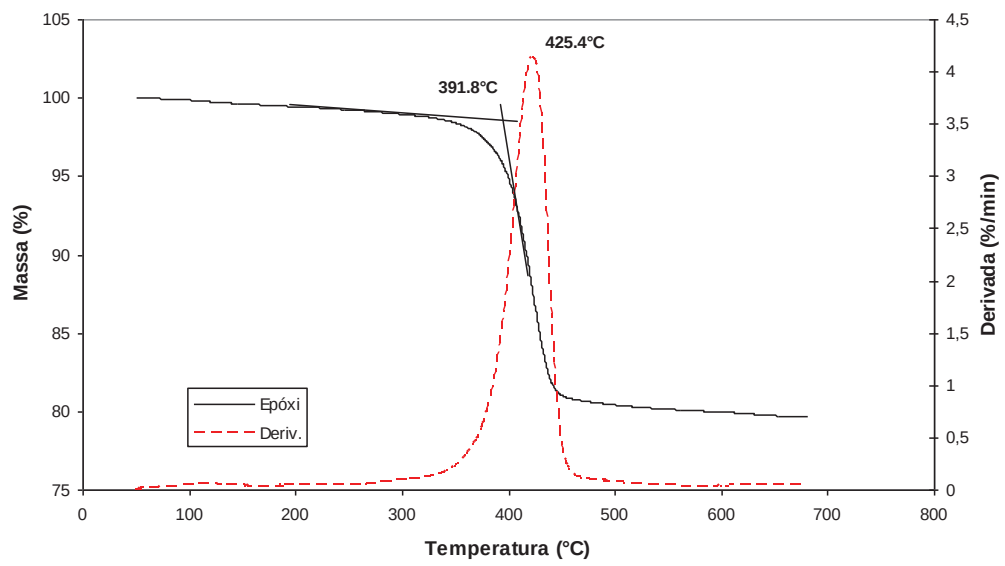


Figura 35: Gráfico referente ao ensaio de TGA da amostra de pultrudado de fibras de carbono com matriz de resina epóxi.

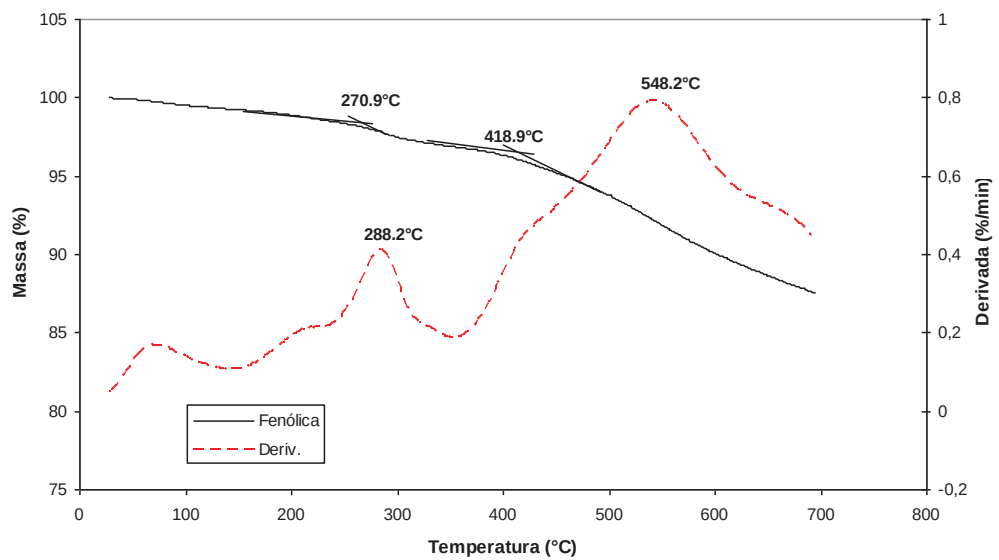


Figura 36: Gráfico referente ao ensaio de TGA da amostra de pultrudado de fibras de carbono com matriz de resina fenólica.

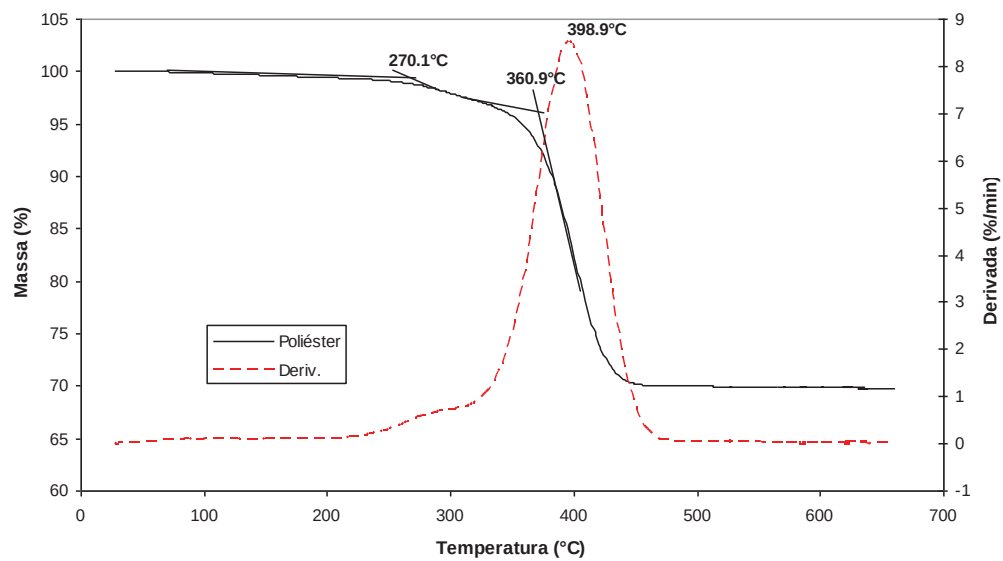


Figura 37: Gráfico referente ao ensaio de TGA da amostra de pultrudado de fibras de carbono com matriz de resina poliéster.

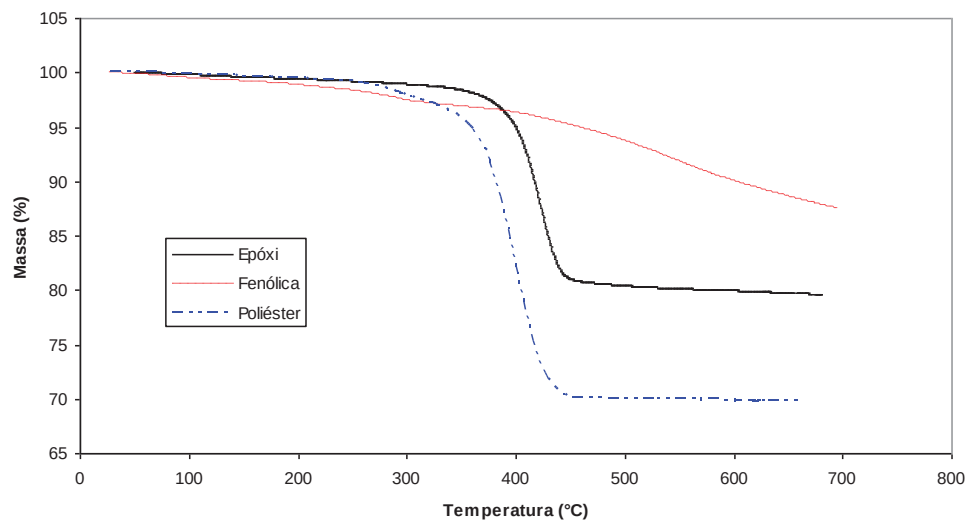


Figura 38: Gráfico de sobreposição das curvas de ensaio de TGA das amostras com matriz epóxi, fenólica e poliéster.

É possível verificar a partir dos gráficos que a degradação das matrizes epóxi, fenólica e poliéster começaram (a partir das temperaturas *onset*) em 391,8°C, 270,9°C e 270,1°C, respectivamente.

Nota-se que amostras com resina epóxi começam a se degradar a uma temperatura superior que as demais (391,8 °C), porém sua degradação ocorre de maneira rápida e em uma

única etapa. Na amostra de resina poliéster, a decomposição ocorre em duas etapas, porém, com perda de massa acelerada. Já a resina fenólica se decompõe lentamente, em pelo menos duas etapas, restando a 470°C, cerca de 94,6% de sua massa polimérica enquanto que as demais amostras já estavam quase completamente decompostas, sugerindo que esta apresenta uma estabilidade térmica maior em relação às demais amostras.

Esta propriedade é interessante, pois se a temperatura de trabalho destes materiais apresentar picos, como ocorre nas linhas de transmissão de energia, os pultrudados com matriz de resina fenólica sofrerão degradações térmicas lentas, permitindo assim, algum tipo de ação para prevenir problemas relacionados à falha do cabo na rede aérea de transmissão de energia.

A perda de massa inicial observada nas amostras de pultrudado com resinas fenólica e poliéster ocorre devido à perda de solvente residual do processo de polimerização dessas resinas.

A fração de fibras dos pultrudados com resina epóxi, poliéster e fenólica como matriz foram de 80%, 70% e 88% em massa, respectivamente. Uma vez que no final da análise a maior parte das resinas se degradou, a massa residual significativa era proveniente apenas das fibras de carbono. Como descrito na seção 3.1, após o processo de pultrusão desejava-se obter um cabo compósito com 1,8 mm de diâmetro e com 80% em massa de fibra e 20% em massa de matriz, porém como observado acima houve uma variação desta proporção. Isto deve ter ocorrido, pois no processo de pultrusão é difícil controlar a quantidade de resina que impregna as fibras.

Como comentado acima, observa-se também uma quantidade muito pequena de resina no pultrudado, fato que dificultou a realização do ensaio de DSC e pelo qual se decidiu realizar o mesmo apenas nas resinas utilizadas na obtenção do compósito, uma vez que elas são a fase do compósito mais vulnerável aos efeitos térmicos até a temperatura máxima de realização dos ensaios térmicos.

4.4 Calorimetria Diferencial Exploratória (DSC)

As Figuras 39 a 41 apresentam os gráficos obtidos no ensaio de calorimetria diferencial exploratória realizado nas amostras de resinas epóxi, fenólica e poliéster, utilizadas na fabricação dos pultrudados com estes tipos de resina como matriz, fornecidos pela Stratus.

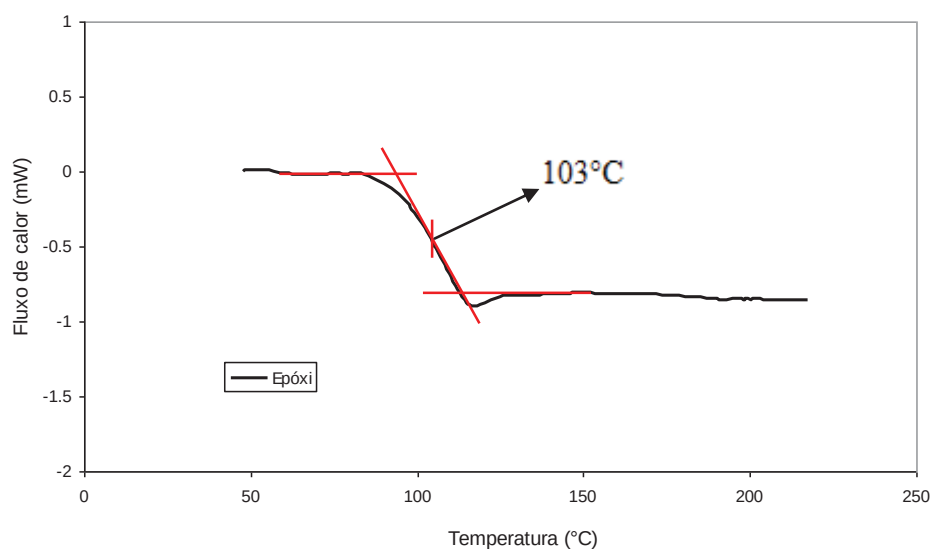


Figura 39: Varredura dinâmica de DSC do pultrudado com matriz de epóxi.

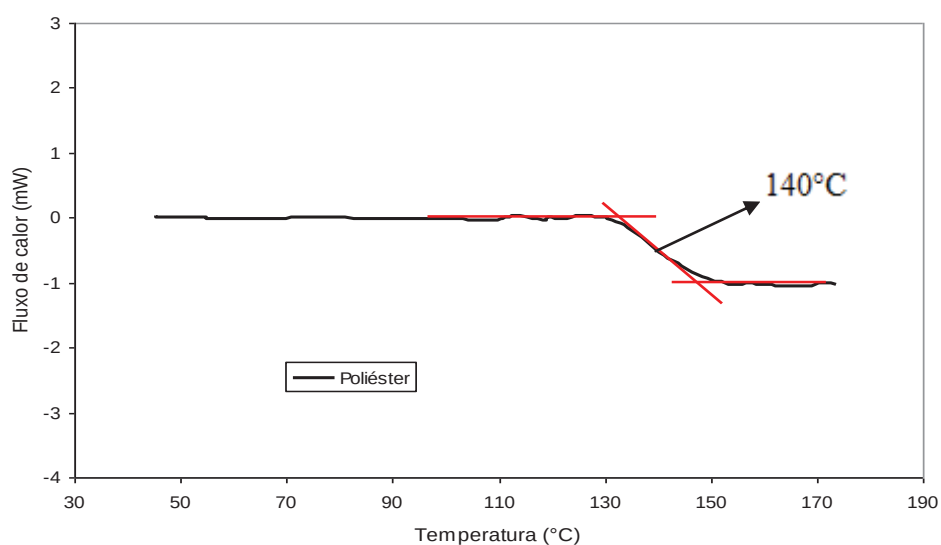


Figura 40: Varredura dinâmica de DSC do pultrudado com matriz de poliéster.

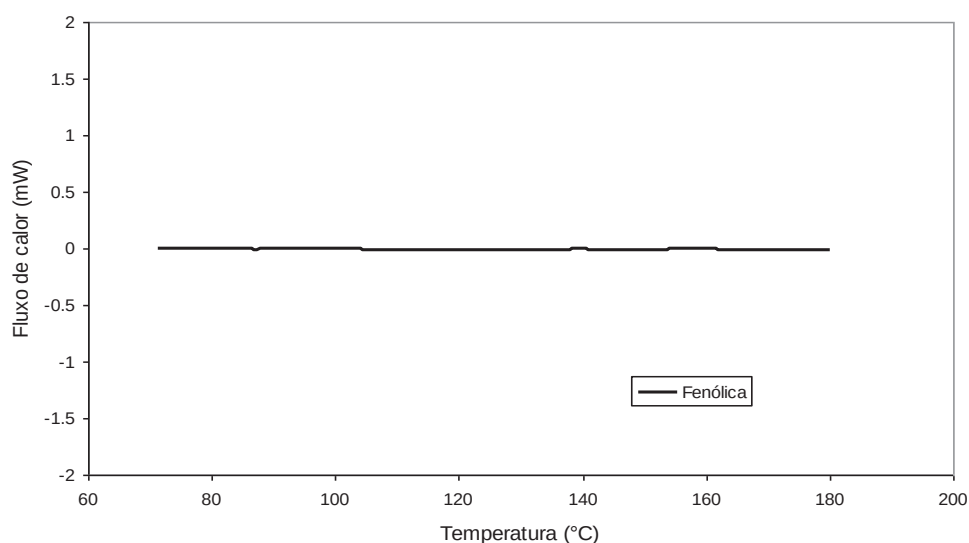


Figura 41: Varredura dinâmica de DSC do pultrudado com matriz de fenólica.

A análise das Figuras permite observar as temperaturas de transição vítrea (T_g) das resinas epóxi e do poliéster: 103°C, 140°C, respectivamente. A T_g da resina fenólica não pôde ser identificada nas condições de ensaio utilizadas. Desta forma, é necessário ensaiar as amostras pela técnica de Análise Dinâmica Mecânica (DMA), que apresenta nível de sensibilidade para identificação da transição vítrea muito superior ao DSC.

4.5 Densidade

A Tabela 17 apresenta o resultado do ensaio para obtenção da densidade dos pultrudados de fibra de carbono com matriz de resina epóxi, fenólica e poliéster.

Tabela 17: Tabela de densidade dos pultrudados de fibra de carbono com matriz epóxi, fenólica e poliéster respectivamente.

Resina	Densidade (g/cm^3)	Desvio padrão
Epóxi	1,61	0,02
Fenólica	1,56	0,05
Poliéster	1,53	0,02

A análise dos resultados de densidade dos três materiais mostra que elas são muito próximas entre si. Além disso, uma comparação da densidade destes materiais com a densidade do aço (cerca de $7,78 \text{ g/cm}^3$ segundo a NBR7270) mostra que a redução de peso do núcleo será significativa com a substituição por um dos materiais pultrudados.

Como descrito na seção 2.4, o desempenho das redes de transmissão de energia elétrica é limitado pelo vão entre as torres e pela flecha. Assim uma redução de peso dos cabos de condução de energia elétrica, reduziria a flecha, uma vez que o peso é um dos fatores os quais a altera, e também possibilitaria um aumento no vão entre as torres, levando a redução do número de torres para construção de uma nova linha, comparado ao número de torres necessário para construção de uma linha de transmissão com condutores de núcleo de aço. Além disso, ao longo prazo, a redução do número de torres reduziria também o custo com manutenção e o impacto ao meio ambiente que seria causado na construção das mesmas.

5 CONCLUSÕES

Os ensaios de resistência à tração mostraram que todos os pultrudados possuem tensão de ruptura superior ao valor estipulado para os cabos tradicionais (1450 MPa). O maior módulo de elasticidade foi encontrado no compósito com matriz de resina fenólica, seguido dos compósitos com matriz de resina epóxi e poliéster, respectivamente. A maior tensão de ruptura foi observada no compósito com matriz de resina de poliéster, seguido dos compósitos com matriz de resina epóxi e fenólica, respectivamente.

As análises de FTIR confirmaram as composições das resinas epóxi, poliéster e fenólica para os 3 pultrudados.

Os ensaios de TGA mostraram as temperaturas de degradação de 392°C , 271°C e 270°C , para as matrizes de epóxi, fenólica e poliéster, respectivamente. A resina fenólica se decompõe mais lentamente do que as demais, em pelo menos duas etapas, apresentando maior estabilidade térmica. A fração de fibras dos pultrudados com resina epóxi, poliéster e fenólica como matriz foram de 80%, 70% e 88% em massa, respectivamente.

As análises de DSC permitiram observar apenas as temperaturas de transição vítrea (T_g) da resina epóxi e poliéster: 103°C , 140°C , respectivamente.

Os resultados de densidade mostraram densidades entre 1,53 a 1,61g/cm³, que é bem inferior a do aço tradicional (cerca de 7,78 g/cm³).

Em suma, os resultados mecânicos e de temperatura de degradação mostraram resultados promissores para aplicabilidade dos 3 pultrudados como núcleo de cabos de transmissão. Porém, é necessário avaliar mais profundamente as temperaturas de transição vítrea dos materiais e avaliar o comportamento dos mesmos com relação à exposição contínua ao ambiente, a alta temperatura e radiações ultravioletas.

6 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir deste trabalho propõe-se para o futuro um estudo do comportamento dos cabos compósitos analisados quando expostos a ação do tempo e a longo período de trabalho em altas temperaturas.

Como visto no presente trabalho os pultrudados apresentam características mecânicas compatíveis com as do aço, e, portanto, um estudo sobre uma possível substituição do aço utilizado na forma de perfis prismáticos pelos materiais compósitos estudados para redução de peso e melhoria de desempenho em outras áreas também poderia ser realizado, como por exemplo, na automobilística para uso estrutural.

Também um estudo de materiais termoplásticos que possuam propriedades similares aos dos polímeros termorrígidos estudados no presente trabalho para substituí-los como matriz nos pultrudados poderia ser realizado para viabilizar a reciclagem dos cabos.

Um estudo, derivado do citado acima, poderia ser realizado para verificar a viabilidade de se produzir pultrudados de fibra de carbono com matrizes termoplásticas e uma forma de reduzir os custos deste processo, já que este é um processo chave na fabricação de cabos condutores com núcleos compósitos como citado na seção 2.4 do presente trabalho e de boa cadência de produção.

Devido ao crescimento da conscientização para preservação do meio ambiente, estudos já vem sendo realizados para caracterização de compósitos de matrizes termoplásticas, e como o processo de soldagem é um dos mais utilizados nos processos de fabricação de produtos, um estudo sobre uma forma de soldagem em materiais compósitos apresenta-se com um futuro promissor.

7 REFERÊNCIAS

ASENSIO RUTH CHÉRCOLES et. al. **Analytical characterization of polymers used in conservation and restoration by ATR-FTIR spectroscopy**. Springer-Verlag 2009.

ALAWAR AHMAD; BOSZE ERIC J.; NUTT STEVEN R. **A Composite Core Conductor for Low Sag at High Temperatures**. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, Nº. 3, JULY 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7270**: “Cabos de alumínio nus com alma de aço zincado para linhas aéreas — Especificação”. Associação brasileira de normas técnicas. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM-IEC 60811-1-1**. Métodos de ensaios comuns para os materiais de isolamento e de cobertura de cabos elétricos. Parte 1: Métodos para aplicação geral - Capítulo 1: Medição de espessuras e dimensões externas - Ensaios para a determinação das propriedades mecânicas. Rio de Janeiro, 2001.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D638**: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. West Conshohocken, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E204**: Standard Practices for Identification of Material by Infrared Absorption Spectroscopy, Using the ASTM Coded Band and Chemical Classification Index. West Conshohocken, 1998.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E-1877**: Standard Practice for Calculating Thermal Endurance of Materials from Thermogravimetric Decomposition Data. West Conshohocken, 1997.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E0794**. Test Method for Melting And Crystallization Temperatures By Thermal Analysis. West Conshohocken, 1995.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM B 498/B 498M**. Standard Specification for Zinc-Coated (Galvanized) Steel Core Wire for Aluminum Conductors, Steel Reinforced (ACSR). West Conshohocken, 1998.

ATCP Engenharia Física. **Cerâmicas e materiais semicondutores**: Tabela de propriedades. Disponível em: <<http://www.atcp.com.br/pt/produtos/caracterizacao-materiais/propriedades-materiais/Tabelas-propriedades/composito.html>>. Acesso em 13 dez. 2012.

BARBETTA, PEDRO ALBERTO; REIS, MARCELO MENEZES; BORNIA, ANTONIO CEZAR. **Estatística**: para cursos de engenharia e informática. São Paulo, Atlas, 2004.

BARBER K. W., CALLAGHAN K. J., **Improved Overhead Line Conductors Using Aluminium Alloy 1120**. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, Nº. 1, January 1995.

BARLAS STEPHEN. **More Heat, Less Sag**. IEEE Spectrum, June 2006.

BAUER R. S.; CORLEY S. Epoxy resins. In: LEE, S. M (Ed.) **Reference Book for Composites Technology**. Lancaster: Yecnomic, 1989. V.1, p.17-48.

BERJOZKINA S. et. al. **The Technical and Economic Efficiency of Using Conductors with Composite Core in the Transmission Grid**. 2012.

BROWN MICHAEL E. **Introduction to Thermal Analysis: Techniques and Applications**. 2. Ed., Grahamstown, Kluwer Academic Publishers, 2001.

BURKS B.; ARMENTROUT D. L.; KUMOSA M. **Failure Prediction Analysis of an ACCC Conductor Subjected to Thermal and Mechanical Stresses**. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 17, Nº. 2; April 2010.

CANEVAROLO JÚNIOR, SEBASTIÃO V. **Técnicas de Caracterização de Polímeros**. São Paulo, Artliber, 2003.

CARDONA FRANCISCO; KIN-TAK ALAN LAU; FEDRIGO JESSICA. **Novel Phenolic Resins with Improved Mechanical and Toughness Properties**. Journal of Applied Polymer Science, Vol. 123, 2131–2139, 2012.

CHANG RAYMOND. **Química Geral: Conceitos Essenciais**. 4.ed., São Paulo, McGraw-Hill, 2006.

CHAWLA K.K. **Foams, fibers, and composites**: Where do we stand?. Materials Science & Engineering A, 557, 2–9, 2012.

COSTA ANAHI P.; BOTELHO EDSON C.; PARDINI LUIZ C. **Efeito da Degradação Ambiental nas Propriedades de Cisalhamento de Compósitos PPS/Fibra de Carbono.** Polímeros, vol. 21, nº 3, p. 161-167, 2011.

COSTA NETO, PEDRO LUIZ DE OLIVEIRA. **Estatística.** 2. ed., São Paulo, Edgard Blücher, 2002.

DA-PENG ZHOU, HONG FAN. **Mechanical and High-Temperature Properties of Glass Fibers Reinforced Phenolic Composites.** Journal of REINFORCED PLASTICS AND COMPOSITES, Vol. 27, Nº. 13, 2008.

FILLIBEN, JAMES J.; GUTHRIE, WILL; HECKERT, ALAN. **Critical values and p values.** Nist/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods, fornecido pelo Information Technology Laboratory. Disponível em: <<http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/prc/section1/prc131.htm>>. Acesso em 27 nov.2012.

FREIMARK BRUCE et. al. **Sequential Mechanical Testing of Conductor Designs.** Electrical Transmission and Substation Structures Conference, 2009.

GARCIA AMAURI; SPIM JAIME ALVARES; DOS SANTOS CARLOS ALEXANDRE. **Ensaaios dos Materiais.** Rio de Janeiro, LTC, 2000.

GUO ZHANSHENG et. al. **Cure Kinetics of T700/BMI Prepreg Used for Advanced Thermoset Composite.** Journal of Applied Polymer Science, Vol. 97, 2238–2241 2005.

HALSLAM J.; WILLIS H. A.; SQUIRREL D.C.M. **Identification and Analysis of Plastics.** 2 ed., London, Heyden, 1981.

INVARLLOY. **Invar.** Empresa fornecedora de ligas ferro e níquel. Disponível em: <<http://www.invaralloy.com>>. Acesso em 07 jan. 2013.

IQBAL MAZHAR, DINGEMANS THEO J. **High-performance composites based on all-aromatic liquid crystal thermosets.** Composites Science and Technology, Vol. 71, 863–867, 2011.

ISO 527-1 Plastics – Determination of Tensile Properties – Part 1: General Principles. First Edition, 1993.

JOHNSON D.J.; ANDERSON T.L. AND DEVE H.E. **A New Generation of High performance conductors.** IEEE Transactions on Power Delivery, 2001.

KHAN ZAFFAR M. et. al. **Development of Resin Infusion Process for Ultralight Large Composite Structures.** Advanced Materials Research, Vol. 326, pp 53-64, 2011.

KOPSIDAS KONSTANTINOS; ROWLAND SIMON M. **A Performance Analysis of Reconductoring an Overhead Line Structure.** IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 24, nº. 4, October 2009.

KWON HANSANG et. al. **Dual-nanoparticulate-reinforced aluminum matrix composite materials.** Nanotechnology, 23, 2012.

LIU DEFU; TANG YONGJUN; CONG W.L. **A review of mechanical drilling for composite laminates.** Composite Structures, 94, 1265–1279, 2012.

LI XIANFU et. al. **Preparation and Properties of Epoxy Matrix for Composite Cable Core.** Advanced Materials Research, Vols. 239-242, pp 2606-2611, 2011.

LOBRY JACQUES; GUÉRY DANIEL. **Theoretical Study of Dielectric Breakdown in a New Composite Core HTLS Conductor.** IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 27, Nº. 4, OCTOBER 2012.

LÓPEZ F.A. et. al. **Thermolysis of fibreglass polyester composite and reutilisation of the glass fibre residue to obtain a glass–ceramic material.** Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 93, 104–112, 2012.

LU YUN-HUA; ZHAN MAO-SHENG; ZHENG WEN-HAI. **Preparation and Properties of T300 Carbon Fiber- Reinforced Thermoplastic Polyimide Composites.** Journal of Applied Polymer Science, Vol. 102, 646–654 , 2006.

MADUGU I.A., ABDULWAHAB M., AIGBODION V.S. **Effect of iron fillings on the properties and microstructure of cast fiber–polyester/iron filings particulate composite.** Journal of Alloys and Compounds, 476, 807–811, 2009.

MAGALHÃES, MARCOS NASCIMENTO; LIMA, ANTONIO CARLOS PEDROSO DE. **Noções de probabilidade e estatística.** São Paulo, IME-USP, 2001.

MARIETA C. et. al. **Evaluation of fiber surface treatment and toughening of thermoset matrix on the interfacial behaviour of carbon fiber-reinforced cyanate matrix composites.** Composites Science and Technology, Vol.65, 2189–2197, 2005.

MAKHKAMOVA I. et. al. **CFD Analysis of the Thermal State of an Overhead line Conductor**. School of Engineering, Durham University, UK, 2003.

MOTHÉ CHEILA GONÇALVES; AZEVEDO ALINE DAMICO. **Análise Térmica de Materiais**. São Paulo, iEditora, 2002.

MUKHERJEE GAURI SANKAR. **Evaluation of processing temperature in the production of fibre reinforced epoxy composites**. J Therm Anal Calorim, 108,947–950, 2012.

NETO FLAMÍNIO LEVY; PARDINI LUIZ CLAUDIO. **“Compósitos Estruturais: ciência e tecnologia”**, 1.ed., São Paulo, Edgard Blücher, 2006.

NOHARA LILIANA B. et. Al. **Otimização da Interface/Interfase de Compósitos Termoplásticos de Fibra de Carbono/PPS pelo uso do Poli (ácido âmico) do tipo BTDA/DDS**. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 17, nº 3, p. 180-187, 2007.

PATNAIK AMAR et. al. **Tribo-performance of polyester hybrid composites: Damage assessment and parameter optimization using Taguchi design**. Materials and Design, 30, 57–67, 2009.

PONGTHAVORNSAWAD ANANTACHAI; RUNGSEEVIJITPRAPA WEERAPUN. **Broken Conductor Detection for Overhead Line Distribution System**. 2010.

POTHAN L. A. et. al. **Tensile and Flexural Behavior of Sisal Fabric/Polyester Textile Composites Prepared by Resin Transfer Molding Technique**. Journal of REINFORCED PLASTICS AND COMPOSITES, Vol. 27, Nº. 16–17, 2008.

REZENDE MIRABEL CERQUEIRA; COSTA MICHELLE LEALI; BOTELHO EDSON COCCHIERI. **Compósitos Estruturais: tecnologia e prática**. 1 ed., São Paulo, Artliber Editora, 2011.

SALAMA M.M. **Thermal performance of an overhead transmission line under the influence of dust accumulation**. Energy Conversion & Management, 41,1323-1334, 2000.

SHARMA M., RAO I.M., BIJWE J. **Influence of orientation of long fibers in carbon fiber–polyetherimide composites on mechanical and tribological properties**. Wear, Vol. 267, 839–845, 2009.

SKOOG et. al. **FUNDAMENTOS DE QUÍMICA ANALÍTICA**. 8 ed., São Paulo, THOMSON, 2006.

SOUZA SÉRGIO AUGUSTO DE. **“Ensaio mecânicos de materiais metálicos: fundamentos teóricos e práticos”**, 2.ed., São Paulo, Edgard Blücher, 1982.

TSAO C.C.; CHIU Y.C. **Evaluation of drilling parameters on thrust force in drilling carbon fiber reinforced plastic (CFRP) composite laminates using compound core-special drills**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 51, 740–744, 2011.

VARGA C. S. Et. al. **Improving the mechanical properties of glass-fibre-reinforced polyester composites by modification of fibre surface**. Materials and Design, 31, 185–193, 2010.

XIE XUAN et. al. **Synthesis and characterization of multilayer core-shell structure hollow spheres with low density, favorable magnetic and conductive properties**. Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects, 408, 104– 113, 2012.

WANG SHAOHUA; JIANG XINGLIANG. **Progress in research on ice accretions on overhead transmission lines and its influence on mechanical and insulating performance**. Front. Electr. Electron. Eng., 7(3): 326–336, 2012.