



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
FACULDADE DE ENGENHARIA - CAMPUS DE
BAURU PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

**REVESTIMENTO A FRIO E A QUENTE DE LAMINADOS
COMPÓSITOS POLIMÉRICOS DE FIBRA DE CARBONO
PARA RESISTÊNCIA A ABRASÃO SEVERA**

Marcelo Capella de Campos

Bauru, 2018

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
FACULDADE DE ENGENHARIA - CAMPUS DE BAURU
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA

**REVESTIMENTO A FRIO E A QUENTE DE LAMINADOS
COMPÓSITOS POLIMÉRICOS DE FIBRA DE CARBONO
PARA RESISTÊNCIA A ABRASÃO SEVERA**

Autor: **Marcelo Capella de Campos**

Orientador: **Prof. Dr. Edson Antonio Capello Sousa**

Curso: Doutorado **em Engenharia Mecânica**

Área de concentração: **Processos de Fabricação**

Tese de doutorado apresentada ao Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da
Faculdade de Engenharia– UNESP campus Bauru,
como parte dos requisitos para obtenção do título
de Doutor em Engenharia Mecânica.

Bauru, 2018

Campos, Marcelo Capella de.

Revestimneto a frio e a quente de laminados
compósitos poliméricos de fibra de carbono para
resistência a abrasão severa/ Marcelo Capella de
Campos, 2018
99 f.

Orientador: Edson Antonio Capello Sousa

Tese (Doutorado)-Universidade Estadual
Paulista. Faculdade de Ciências, Bauru, 2018

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE MARCELO CAPELLA DE CAMPOS, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 26 dias do mês de janeiro do ano de 2018, às 14:30 horas, no(a) Anfiteatro da Seção Técnica de Pós-graduação da FEB, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. EDSON ANTONIO CAPELLO SOUSA - Orientador(a) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. CARLOS ALBERTO SOUFEN do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Profa. Dra. SANDRA REGINA RISSATO do(a) Departamento de Química / Faculdade de Ciências - UNESP - Bauru, Prof. Dr. KLEPER DE OLIVEIRA ROCHA do(a) Departamento de Química / Faculdade de Ciências - UNESP/Bauru, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da TESE DE DOUTORADO de MARCELO CAPELLA DE CAMPOS, intitulada **REVESTIMENTO A FRIO E A QUENTE DE LAMINADOS COMPÓSITOS POLIMÉRICOS DE FIBRA DE CARBONO PARA RESISTÊNCIA A ABRASÃO SEVERA**. Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. EDSON ANTONIO CAPELLO SOUSA

Prof. Dr. CARLOS ALBERTO SOUFEN

Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI

Profa. Dra. SANDRA REGINA RISSATO

Prof. Dr. KLEPER DE OLIVEIRA ROCHA

Agradecimentos

A Deus, que sempre me protege e me dá forças.

A minha esposa, Graciete Solange Anseli de Capella, que sem seu apoio e carinho eu não teria conseguido realizar este trabalho.

A minha família, pelo amor, carinho, e pelo apoio que sempre me dedicaram.

Ao Prof. Dr. Edson Antonio Capello Sousa, que por sua colaboração oportuna e precisa junto aos meios acadêmicos, possibilitou a concretização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Carlos Alberto Soufen, que pela dedicação, sabedoria na transmissão do conhecimento e orientação neste trabalho, honrando a toga de que lhe é de direito como Professor Doutor desta nobre instituição.

Ao professor Dr. Marcelo Orlandi pela colaboração nas microscopias eletrônicas. Ao Professor Dr. Fenelon Martinho Lima Pontes, pela colaboração na caracterização por DRX, responsável pelo Laboratório de Nanotecnologia.

Ao professor Dr. Mario Sérgio Galhiane, pela ajuda inestimável. A professora Dra. Dayse Iara dos Santos, responsável pelo laboratório de análise térmicas e pela colaboração pela caracterização das matrizes poliméricas

Ao Sr. André Jacob da empresa SANDEZA Indústria Metalúrgica, pela oportunidade e inestimável contribuição na realização dos cortes dos corpos de prova.

A empresa EUTETIC CASTOLIN, na pessoa do sr. Sebastião Ricardo pela ajuda e doação do produto MECATEC, para o desenvolvimento deste trabalho.

A FATEC Jahu, nas pessoas do Prof. Ms. Alex de Almeida Prado e da Prof. Esp. Maria Hermínia Marquez Leite, coordenadores dos respectivos curso de Construção Naval e Sistemas Navais, pela disponibilização e colaboração na utilização dos laboratórios de materiais e metalografia da FATEC Jahu.

Em especial ao técnico Dr. Hamilton José de Mello, pela dedicação e inestimável ajuda. A todos que por ventura não foram mencionados e de forma direta ou indireta colaboraram com este trabalho.

“ Aos outros, dou o direito de ser como são.

A mim dou o dever de ser cada dia melhor”

Francisco Condido Xavier, “ *Chico Xavier*”

INDICE

Resumo.....	VII
Abstract.....	VIII
Nomenclaturas.....	IX
Lista de figuras.....	X
Lista de tabelas.....	XIII
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	4
3. REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....	5
3.1 Materiais compósitos.....	5
3.2 Tecido de fibra de carbono.....	10
3.3 Matriz polimérica.....	12
3.4 Processo de infusão a vácuo.....	17
3.5 Revestimento a frio.....	19
3.6 Aspersão térmica.....	21
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	28
4.1 Materiais utilizados.....	28
4.1.1 Matrizes poliméricas.....	28
4.1.2 Caracterização por TG e DSC.....	30
4.1.3 Caracterização da matriz LY 5052 por RDX.....	31
4.1.4 Tecido de fibra de Carbono tela (plain weave).....	32
4.2 Laminação.....	33

4.3 Revestimento a frio.....	35
4.4 Aspersão térmica	37
4.5 Corte com Jato d'água.....	38
4.6 ensaios mecânicos.....	39
4.6.1 Ensaio de erosão	39
4.7 Microscopia.....	42
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	43
5.1 Resultados da TG e DSC.....	43
5.1.2 Resultados da caracterização das matrizes epóxicas por difração de raios X (DRX).....	47
5.2 Ensaaios mecânicos.....	50
5.2.2 Ensaaios de Tração.....	50
5.2.2 Ensaaios de Flexão.....	56
5.2.3 Ensaio de micro dureza Hard Vickers (HV).....	63
5.2.4 Resultados do ensaios de erosão.....	65
5.2.5 Cálculo da dependência da erosão em relação a velocidade das partículas erosivas.....	66
5.2.6 Influência da concentração das partículas no processo de ensaio erosivo.....	68
5.3 Microscopia Óptica.....	69
5.4 Microscopia eletrônica de varredura.....	70
5.4.1 – Resultados do EDX na fibra de carbono.....	70
5.4.2 Fibra de carbono.....	71
5.4.3 Fibra de carbono revestido com MECATEC 5HT.....	73
5.4.4 Fibra de carbono revestido com MECATEC 5HT e aspergido.....	74
5.4.5 – Fibra de carbono aspergida.....	75
6. CONCLUSÕES	77
7. BIBLIOGRAFIA.....	78

RESUMO

Os laminados de compósitos poliméricos possuem um valor já consagrado dentro das aplicações mecânicas e industriais. Sua versatilidade aliada a suas propriedades mecânicas, incentivam o aumento das aplicações, devido em partes pela facilidade de construção, tornando-os competitivos com relação a outros materiais. O conhecimento sobre a matriz polimérica, que possui inúmeras variações e aplicações, neste trabalho contou com o estudo de três tipos, sendo duas do grupo bisfenol “a” e uma do grupo bisfenol “f”. A caracterização destas matrizes através das técnicas de TG e DSC, influenciaram na escolha em virtude da aplicação a qual seriam submetidas. E sobre o reforço, que neste estudo, utilizou tecidos de fibra de carbono em trama de tela. O processo de fabricação dos laminados através de infusão a vácuo contribuiu para um resultado satisfatório, demonstrando vantagens com relação à melhor impregnação e minimizando os possíveis vazios na matriz. Os dois tipos de revestimento aplicados nestes laminados, sendo um chamado de revestimento a frio, que é um produto composto por três tipos de materiais distintos, metal, cerâmica e polímeros e o segundo a aspersão térmica, através da técnica de aspersão por chama de arames, contendo carbeto de tungstênio, recobriram o material de forma eficiente, mantendo boa adesão superficial. Estes laminados recobertos tem a finalidade de terem a vida útil aumentada e proporcionar uma maior resistência a abrasão severa. Os ensaios mecânicos aplicados demonstram as boas características destes materiais, juntamente com a caracterização por microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura, revelaram a boa adesão entre laminados e revestimentos, concluindo que existe uma boa identidade para estes materiais, sendo uma das principais conclusões.

Palavra-chave: Compósitos poliméricos, revestimento a frio, revestimento a quente.

ABSTRACT

The laminates of polymeric composites have an already established value within the mechanical and industrial applications. Its versatility combined with its mechanical properties, encourage the increase the applications, due in part for the ease of construction, making them competitive with respect to other materials. The knowledge about the polymer matrix, which has numerous variations and applications, in this work had the study of three types, two of the bisphenol group "a" and one of the bisphenol "f" group. The characterization of these matrices through TG and DSC techniques influenced the choice by virtue of the application to which they would be submitted. And on the reinforcement, which in this study, used carbon fiber fabrics in screen fabric. The process of manufacturing the laminates through vacuum infusion contributed to a satisfactory result, demonstrating advantages in relation to the better impregnation and minimizing voids in the matrix. The two types of coating applied on these laminates, one called cold coating, which is a product composed of three different types of materials, metal, ceramic and polymers and the second the thermal spray, by the flame spray technique of wires , Containing tungsten carbide, coated the material efficiently, maintaining good surface adhesion. These coated laminates have the purpose of having increased shelf life and providing greater resistance to severe abrasions. The applied mechanical tests demonstrate the good characteristics of these materials, together with the characterization by optical microscopy and scanning electron microscopy, revealed the good adhesion between laminates and coatings, concluding that there is a good identity for these materials.

Keyword: Polymer composites, cold coating, hot coating.

NOMENCLATURA

A = área

a = constante do substrato erodido

Bag = bolsa

%C = porcentagem de cristalinidade

d = distância interplanar

DRX = difração de raios X

DSC = Calorimetria exploratória diferencial

FC = Fibra de Carbono

FC ASP = Fibra de Carbono Aspergido

FC 5HT = Fibra de Carbono 5HT

FC 5HT ASP = Fibra de Carbono 5HT Aspergido

HW = meio comprimento

la = região amorfa

Ic = picos de cristalinidades

K = constante de proporcionalidade

M = massa

mm = milímetros

n = ordem de reflexão

n = tipo de substrato a ser ensaiado

Pol = Polegadas

R = separação média inter-cadeia

T = tempo

Tf = Temperatura de fusão

TG = Termogravimetria

Tg = Transição vítrea

Tp = temperatura de pico de cristalização

Tx = Temperatura de início da cristalização

V = volume

v₀ = velocidade das partículas em metros por segundo

θ = ângulo de difração de Bragg

λ = comprimento de onda da radiação

σ_t = tensão de tração

σ_f = tensão de flexão

ε = Cálculo da dependência da erosão em relação a velocidade das partículas erosivas

φ = Influência da concentração das partículas no processo de ensaio erosivo

Lista de Figuras

Figura 3.1: Linha cronológica da evolução dos materiais na indústria	5
Figura 3. 2: Distribuição de materiais do Boeing 787	6
Figura 3.3 Diagrama de tensão x deformação comparando a resistência da fibra, e resinas sozinhas e a combinação da junção como compósito de fibra e resina	8
Figura 3.4 Classificação dos materiais compósitos.	9
Figura 3.5 Tecido tela 1 x 1, também conhecido como tecido fundamental	11
Figura 3.6 Molécula de resina epoxídica (diglicidil éter de bisfenol A-DGEBA)	13
Figura 3.7 Molécula de epicloridrina ,composição: oxigênio (U); carbono (U); hidrogênio (U); Cloro (U) ^l	13
Figura 3. 8 Estrutura em 3D do bisfeno A	14
Figura 3.9. Reação da Epicloridrina + Bisfenol A	14
Figura 3.10 – Estrutura do bisfenol A e Estrutura do bisfenol F	15
Figura 3.11 Setup montado para infusão a vácuo	18
Figura 3.12 – Desenho esquemático de um processo de aspersão térmica	22
Figura 3.13 Formação das “lentes” na superfície dos substrato	22
Figura 3.14 – Fluxograma ilustrativo dos diversos tipos de aspersões térmicas existentes	23
Figura 3.15 Tocha de aspersão de pó por chama.	24
Figura 3.16 Tocha de aspersão de arame por chama	24
Figura 3.17 (a) Temperatura do gás e (b) campos de velocidade, por chama de oxi-acetileno: central Diâmetro do orifício 3,2 mm, gás diâmetro da entrada da mistura 0,8 mm, fluxo de mistura taxa 56 L/mim, O ₂ / C ₂ H ₂ relação de mistura 34/22.	25
Figura 3.18 Coberto de níquel bentonite (5-120 um). Partículas injetadas em processo de aspersão térmica por chama ,(a) Linhas sólidas, medidas distribuição de velocidade, (b) Linhas pontilhadas, calculadas distribuição de velocidade	25
Figura 3.19 – Estimativa de crescimento das aplicações de aspersão térmica no mercado da América do Norte.	26
Figura 4.1 Molde para obtenção dos corpos de prova de resinas, tanto para tração quanto flexão e corpos de prova já curados	28
Figura 4.2 Estufa para cura das matrizes e laminados poliméricos. (A) Dimensões da estufa, (B) Lateral da estufa com interruptor e termostato, (C) Lateral da estufa com entrada as mangueiras para infusão a vácuo e (D) Vista interna da estufa, com a resistência elétrica ao fundo e o cooler para melhor distribuir o calor.	29
Figura 4.3 Corpos de provas de resina para ensaios de tração	29
Figura 4.4 Máquina de ensaios universais, com parte inferior montada para ensaio de flexão, figura A e montagem para ensaio de tração, figura B.	30
Figura 4.5 Equipamento de análises térmica modelo STA 409 marca NETZSCH	31
Figura 4.6 Equipamento de raios x	32
Figura 4.7 Tecido de fibra de carbono cortado para infusão a vácuo	32
Figura 4.8 Montagem do “bag” para infusão a vácuo.	33
Figura 4.9 Bomba de vácuo Edwards n°8	33
Figura 4.10 Vacuômetro em reservatório de excesso de resina.	34
Figura 4.11 Etapas do processo de infusão a vácuo. “A”, bag pronto para infusão, “B”, matriz pronta para o processo, “C”, início da infusão e “D”, desenvolvimento da infusão	34
Figura 4.12 Utensílios para aplicação do revestimento a frio em laminado de fibra de carbono.	36
Figura 4.13 Mistura das partes do composto MECATEC 5HT.	36
Figura 4.14 Revestimento aplicado sobre laminado de fibra de carbono	34
Figura 4.15 Equipamento para aspersão térmica. Figura A, o equipamento completo, figura B a tocha em funcionamento e a figura C, esquema de funcionamento para funcionamento da aspersão	37
Figura 4.16 Equipamento da Flow	32
Figura 4.17 Processo de corte por jato d’água	38
Figura 4.18 Corte por jato d’água de laminado de fibra de carbono	39
Figura 4.19 (A), compressor, (B) cilo para abrasivo, (C) operador aplicando o processo de jateamento e (D) abrasivo utilizado nos	40
Figura 4.20 Abrasivo com malha 10/12 utilizado no ensaio de erosão	40

Figura 4.21 Microscópio eletrônico de varredura do Instituto de Química de Araraquara UNESP	42
Figura 5.1 Curva de Tg e DSC da matriz SQ 2001 em cura aberta com identificação do início da degradação em 99°C, transição vítrea Tg aproximadamente em 75°C e da temperatura do início da cristalização Tx em torno de 351°C	43
Figura 5.2 Curva de Tg e DSC da matriz SQ 2001 em cura aberta com identificação do início da degradação em 105°C, transição vítrea Tg aproximadamente em 55°C e da temperatura do início da cristalização Tx em torno de 323°C	44
Figura 5.3 Curva de DSC da matriz LY 5052 em cura aberta com identificação da temperatura de transição vítrea Tg, da temperatura do início da cristalização Tx, da temperatura do pico de cristalização Tp e a temperatura de fusão Tf.	45
Figura 5.4 Curva de DSC da matriz LY 5052 curada em vácuo com identificação da temperatura de transição vítrea Tg, da temperatura do início da cristalização Tx, da temperatura do pico de cristalização Tp e a temperatura de fusão Tf	46
Figura 5.5 Curvas de Tgs da matriz LY 5052, curva vermelha (cura aberta) e curva preta (cura em vácuo)	47
Figura 5.6 Curvas resultantes da caracterização de raios X. Curva vermelha (cura em vácuo) e curva preta (cura aberta).	48
Figura 5.7 Reações de ligações secundárias provenientes do processo de difusão gasosa.	49
Figura 5.8 Resultados dos ensaios de tração para matrizes poliméricas do grupo epóxi.	50
Figura 5.9 Curvas resultantes do ensaio de tração para laminados de fibra de carbono	51
Figura 5.10 Curvas resultantes do ensaio de tração para laminados de fibra de carbono aspergido	52
Figura 5.11 Curvas resultantes do ensaio de tração para laminados de fibra de carbono revestido com MECATEC 5 HT	53
Figura 5.12 Curvas resultantes do ensaio de tração para laminados de fibra de carbono revestido com MECATEC 5 HT e aspergido.	54
Figura 5.13 Curvas médias resultantes dos ensaios de tração para os laminados de fibra de carbono	55
Figura 5.14 Resultados dos ensaios de flexão para matrizes poliméricas do grupo epóxi	56
Figura 5.15 Curvas resultantes do ensaio de flexão para laminados de fibra de carbono	57
Figura 5.16 Curvas resultantes do ensaio de flexão para laminados de fibra de carbono aspergidos	58
Figura 5.17 Curvas resultantes do ensaio de flexão para laminados de fibra de carbono revestido a frio	59
Figura 5.18 Curvas resultantes do ensaio de flexão para laminados de fibra de carbono revestido a frio e aspergido	60
Figura 5.19 Curvas médias resultantes dos ensaios de flexão para os laminados de fibra de carbono	61
Figura 5.20 Médias resultantes dos ensaios de tração para os laminados de fibra de carbono	62
Figura 5.21 Médias resultantes dos ensaios de flexão para os laminados de fibra de carbono	63
Figura 5.22 Resultado médios do ensaio de micro dureza nas interfaces dos laminados de fibra de carbono	64
Figura 5.23 Desgaste por erosão dos laminados de fibra de carbono	66
Figura 5.24 Taxa de erosão dos laminados de fibra de carbono ensaiados por erosão.	67
Figura 5.25 Comparação entre dureza e a taxa de erosão dos laminados ensaiados	67
Figura 5.26 Laminado em corte no sentido longitudinal. (A) sentido da trama e (B) sentido do urdume	69
Figura 5.27 Laminado em corte transversal. (A) imagem do urdume e da trama e (B) boa impregnação da matriz com o reforço	69
Figura 5.28 Reforço e matriz, relação de boa identidade entre eles.	71
Figura 5.29 Pontos de estiramento da matriz devido as solicitações mecânicas. As setas mostram essas distorções	72
Figura 5.30 Pontos de estiramento da matriz devido as solicitações mecânicas. As setas mostram essas distorções.	72
Figura 5.31 Interface de ligação entre o reforço e o revestimento a frio MECATEC 5HT.	73

Figura 5.32 (A) Região de interface entre revestimento e reforço de fibra de carbono e (B) região ampliada mostrando a inexistência de possíveis vazios na interface	74
Figura 5.33 Revestimento e aspersão no laminado de fibra de carbono	74
Figura 5.34 Revestimento de carbetto de tungstênio depositado por aspersão térmica. (A) Carbetto com geometria irregular e (B) ampliação	75
Figura 5.35 Laminado de Fibra de carbono aspergido. A seta vermelha mostra o possível local do filamento do reforço e a seta azul, apresenta o revestimento aspergido.	76
Figura 5.36 Carbetto de tungstênio revestindo o laminado de fibra de carbono (A) e (B) ampliação da região revestida.	76

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 Aminas utilizadas como agentes de cura comercial	16
Tabela 3.2. Vantagens, desvantagens e algumas aplicações para resinas	16
Tabela 3.2 Aplicações dos variados tipos de MECATEC	19
Tabela 3.3 Características gerais dos produtos MECATEC	20
Tabela 4.1 Características dos corpos de prova para ensaio de erosão	39
Tabela 4.2 Principais dimensões internas do bico para equipamento de jateamento.	41
Tabela 5.0 Resultados da caracterização de rios X para LY 5052 – cura aberta (A) e LY 5052 - cura em vácuo (B)	48
Tabela 5.1 Resultados dos ensaios de tração para matrizes poliméricas.	50
Tabela 5.2 Resultados dos ensaios de tração para laminados de fibra de carbono.	51
Tabela 5.3 Resultados dos ensaios de tração para laminados de fibra de carbono aspergido	51
Tabela 5.4 Resultados dos laminado de fibra de carbono revestido com MECATAEC 5HT.	53
Tabela 5.5 Resultados do laminado MECATEC 5HT e aspergido	54
Tabela 5.6 Médias das tensões de tração e deformação dos laminados	55
Tabela 5.7 – Resultados dos ensaios de flexão para matrizes poliméricas.	56
Tabela 5.8 Dados retirados do ensaio de flexão em 3 pontos para laminado de fibra de carbono	57
Tabela 5.9 Dados retirados do ensaio de flexão em 3 pontos para laminado de fibra de carbono aspergido	58
Tabela 5.10 Dados retirados do ensaio de flexão em 3 pontos para laminado de fibra de carbono revestido a frio com MECATEC 5HT.	59
Tabela 5.11 Dados retirados do ensaio de flexão em 3 pontos para laminado de fibra de carbono revestido a frio com MECATEC 5HT e aspergido	60
Tabela 5.12 Médias das tensões de flexão e média das deformações dos laminados	61
Tabela 5.13 Tensões médias de tração dos laminados.	62
Tabela 5.14 Tensões médias de flexão dos laminados	63
Tabela 5.15 Dados provenientes os ensaios de micro dureza HV nos laminados	64
Tabela 5.16 Dados dos laminados de fibra de carbono.	65
Tabela 5.17 Resultados dos ensaios de erosão nos laminados de fibra de carbono	65
Tabela 5.18 Relação do volume por peso das partículas erosivas	66
Tabela 5.19 Valores de influência de concentração das partículas nos laminados	68
Tabela 5.20 Valores obtidos da caracterização por EDX	70

1.INTRODUÇÃO

No desenvolvimento de novas tecnologias e as grandes descobertas da ciência, na maioria das vezes, podem ser entendidos como uma releitura do que sempre existiu, de forma mais simples ou mesmo de forma essencial, estando encoberto por um véu, esperando apenas o momento certo para ser revelado. Os materiais compósitos estão presentes na natureza a milênios, como por exemplo a madeira, composta por celulose e lignina ou mesmo os ossos de animais que possuem em sua constituição o colágeno e a apatita.

Os materiais compósitos demonstram uma parte da evolução da ciência e tecnologia dos materiais, pois, combinam diversos materiais, visando explorar as melhores propriedades mecânicas, físicas, químicas e características morfológicas de cada um. A erudição sobre os materiais compósitos pode se comparado como idealizações filosóficas com o intuito de ampliar os horizontes dos materiais.

Esse entendimento sobre a natureza conduz a um processo convergente e participativo, podendo ser entendido tanto como uma ciência quanto uma tecnologia, preceituando uma ação interatuar restrita entre ambos. Dentro de uma visão histórica, o entendimento e a concepção sobre a forma de fortalecimento de fibras é bastante antigo.

As Escrituras Sagradas, fazem referências sobre a técnica de fortalecimento da alvenaria com palha no Antigo Egito e na Babilônia. Pode citar a diferença de resistência mecânica devido a forma de curar os tijolos, ao Sol e em fornos, cuja resistência é superior ao outro. A aplicação de vergalhões de ferro em alvenaria ocorridos a partir do século 19, instigou o surgimento do concreto armado.

Historicamente a fibra de carbono surge em 1879, com Thomas Alva Edson, sendo requerida patente para o processo de fabricação de filamentos de carbono para aplicações em lâmpadas elétricas. A primeira embarcação construída com material compósito polimérico, tendo como reforço a fibra de vidro e uma matriz polimérica data do século XX, no início da década de 40, e junto a isso, os plásticos começaram a ser aplicados na indústria aeronáutica e em encapsulamento de dispositivos eletrônicos.

As primeiras fibras de boro e carbono de alta resistência surgem em 1960, sendo aplicados como materiais avançados para o setor aeronáutico. Materiais

compósitos híbridos com reforços de boro ou alumínio, surgiram em 1970 e ainda, na mesma década a DuPont, concebem as fibras de aramida, favorecendo a ampliação nos diversos setores aeronáuticos, automotivos esportivos e biomédicos, tendo como fiel da balança o alto desempenho mecânico e estabilidade dimensional aliados a baixa densidade, quando comparados com outros materiais, como aço, alumínio entre outros.

A tecnologia de compósitos com reforços fibrosos, respalda-se na exploração da alta resistência das fibras que são combinadas com diversas matrizes, concebendo diversas interfaces. Em materiais compósitos poliméricos, tanto as fibras (reforços) como as resinas (matrizes) preservam suas individualidades físicas e químicas iniciais. Quando juntas oferecem uma combinação de propriedades mecânicas que não podem ser alcançadas de forma individual. As fibras de carbono atuais são uma nova geração de fibras com alta resistência, contendo no mínimo de 90% de carbono, conseguidos através do processo de pirólise controlada.

Em virtude das proeminentes propriedades mecânicas, os materiais compósitos enfrentam novas demandas, onde os processos produtivos buscam diminuir os custos, tornando-os mais acessíveis. O emprego dos materiais compósitos poliméricos aumenta ano após ano.

Atualmente inúmeras pesquisas relacionadas aos laminados de tecido de fibras de carbono, visam estudar e propor melhorias nas qualidades mecânicas e tudo isto esta relacionado com a matriz polimérica, que se desenvolve de forma exponencial, onde novas características surgem e são adicionadas para gerar um produto que atenda as necessidades de projeto.

A exigência dos requisitos de desempenho em estruturas aeroespaciais vem propiciando o desenvolvimento de novos materiais, bem como de novas técnicas de fabricação. Normalmente elevados valores de resistência e rigidez específicas são procurados, obtendo-se frequentemente soluções por meio da utilização de materiais compósitos, particularmente polímeros termofixos dotados de reforços fibrosos. A evolução dos compósitos tem permitido a fabricação de peças e estruturas antes reservadas aos metais. O emprego do material em componentes estruturais eleva sua confiabilidade e lhe garante cada vez mais aplicações. Projetos recentes, como os inovadores Boeing 787 e

Airbus A-350, reafirmam o potencial dos compósitos e a sua capacidade de reduzirem componentes e massa sem que ocorra comprometimento do comportamento mecânico^[1].

O entendimento do que é um material composto é necessário, pois trata-se da combinação de no mínimo dois materiais com fase heterogênea, que separados possuem propriedades e características distintas e a sua combinação é desejada para a confecção de um material único, com a conformidade das propriedades de ambos os materiais, tornando atrativo sua aplicação.

O significado do substantivo compósito em material compósito, indica que este apresenta ou é formado por dois ou mais componentes, o que poderia levar à conclusão que todo material tendo dois ou mais materiais distintos ou fases poderia ser considerado como material compósito^[1].

Estas condições são alcançadas pela combinação da matriz polimérica e pelo reforço, conferindo à estrutura, significantes propriedades mecânicas. Fibras poliméricas são elementos de reforços amplamente utilizados para a fabricação de materiais compósitos. Neste estudo, optou-se por confeccionar os laminados de tecido de fibra de carbono plain weave, com seis camadas, intercalando-os entre o reforço e a matriz polimérica. Com relação a matriz polimérica optou-se por estudar três resinas do grupo epóxi, sendo duas do grupo Bisfenol A e uma do grupo Bisfenol F, onde posteriormente seria escolhida a que melhor propriedades apresentasse.

A variação da matriz e a aplicação dos ensaios de tração e flexão foi útil para comparação qualitativa das propriedades mecânicas, além das caracterizações por TG/DSC e RDX. Os ensaios de tração e flexão, estão amparados dentro das normas ASTM D 638, ASTM D 790, ASTM D 3039 e ASTM D 7264. e posteriormente a caracterização por microscopia óptica, microscopia eletrônica.

2.OBJETIVOS

No presente trabalho, estudou-se qual as diferenças dos processos de execução de compósitos em fibra de carbono. As principais diferenças de temperatura de degradação das matrizes poliméricas para uma possível aplicação de revestimentos a frio e a quente em laminados de tecido de fibra de carbono com matriz polimérica do grupo bisfenol F, servindo para aumentar a vida útil dos mesmo em condições de erosão severa, como objetivo principal. A caracterização por microcópia óptica e microscopia eletrônica e varredura aplicados na superfície da fratura dos corpos de prova auxiliam a analisar a interface de adesão entre laminado e revestimento, sendo o procedimento complementar.

3.REVISÃO BIBLIOGRAFICA

3.1 Materiais compósitos poliméricos

Os materiais compósitos são utilizados desde os primórdios da humanidade, como exemplo, os materiais compósitos poliméricos naturais, como materiais córneos, madeira, entre outros. Na atualidade, diversos segmentos industriais tecnológicos utilizam esse tipo de materiais, como o setor naval, automobilístico, aeronáutico e aeroespacial. O que os torna interessantes e atrativos para a sociedade é a alta resistência aliado com sua baixa densidade.^[2]

O estudo dos materiais acompanha o desenvolvimento da sociedade de forma geral. De acordo com o crescimento e aperfeiçoamento da tecnologia, nota-se a evolução destes materiais, que são considerados como os novos materiais dentro das ciências dos materiais, tendo um uso cada vez mais sofisticado e com resultados superiores a diversos materiais tradicionais.^[3] A figura 3.1, mostra um breve quadro evolutivo dos materiais perante o tempo evolutivo da humanidade.

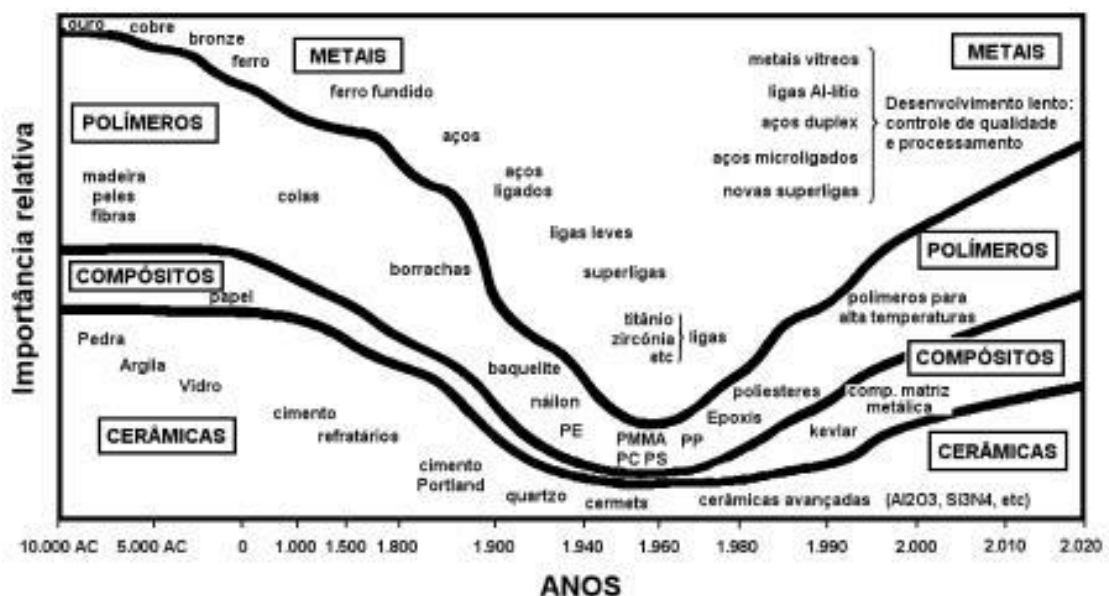


Figura 3.1: Linha cronológica da evolução dos materiais na indústria(adaptado de Engenharia de materiais, Ashby, 2000).^[4]

A utilização destes materiais em componentes que requerem alto comprometimento com a responsabilidade, cresce rapidamente nos mais variados setores da engenharia moderna, principalmente no setor aeronáutico.^[5]

Essa ânsia pela aplicação destes novos materiais pode ser entendido graças a excelência destes, como a diminuição de peso nas estruturas, mantendo as propriedades mecânicas e consequentemente a possibilidade de transportar mais cargas ou passageiros sem aumentar os custos com combustível. Um exemplo é o Boeing 787 *dreamliner*, onde cerca de 50% dos materiais utilizados são materiais compósitos poliméricos, ou seja de fibra de carbono. A figura 3.2 mostra os principais pontos de aplicação dos materiais compósito na aeronave.^[6]

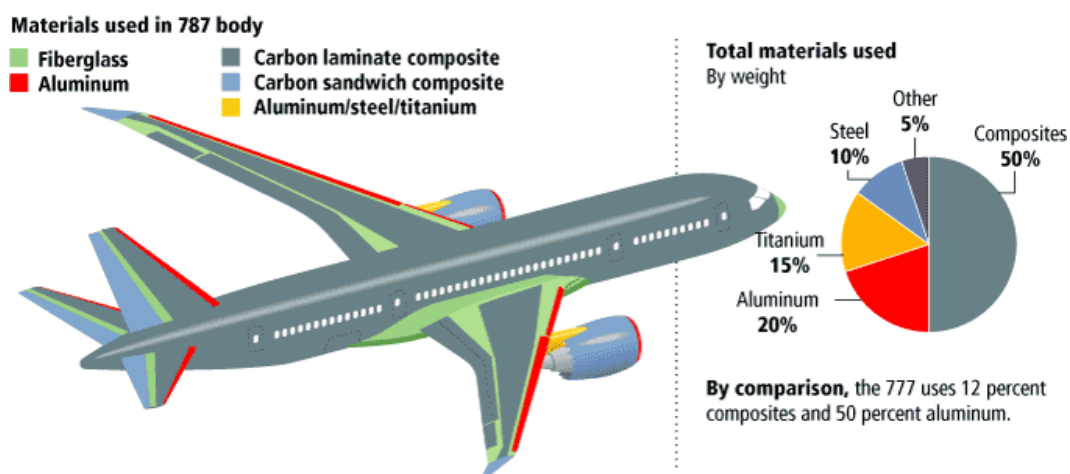


Figura 3. 2: Distribuição de materiais do Boeing 787, <http://www.modernairliners.com/wp-content/uploads/2015/07/Boeing-787-Dreamliner-construction-materials.png> ^[7]

O significado do substantivo compósito em materiais indica a formação por no mínimo de dois ou mais tipos de materiais componentes com possíveis fases distintas. Porém para que consideremos como compósitos de aplicações variadas (aeroespacial, naval, automobilística, construção civil (estrutural), biomédica e etc.) admite-se que as fases constituintes possuem nítidas diferenças nas propriedades físicas e químicas, demonstrando uma fase descontínua e outra contínua.^[8]

Quando referimos à fase descontínua, estamos comumente falando sobre os reforços, enquanto que a fase contínua é denominada de matriz. Portanto uma das possíveis definições do que é um material compósito seria a do material que apresenta dois ou mais materiais quimicamente diferentes, sendo na escala macroscópica bem nítida essa divisão. Esta composição de materiais possibilita quase sempre em propriedades com características intermediárias ou melhores do que se analisados em separados.^[9]

Deve-se ter em conta que tais propriedades estão diretamente vinculadas às propriedades dos elementos constituintes destes materiais, como as propriedades e as qualidades das fibras, da matriz, da concentração volumétrica, a interface de adesão fibra e matriz, posicionamento das camadas e consequentemente sua orientação.^[10]

Uma observação importante é que os possíveis tipos de orientações afetam a anisotropia do sistema. Porém existem situações nas quais a orientação das fibras faz o material assumir um comportamento anisotrópico, é relacionado principalmente em casos onde se utiliza fibras contínuas, que em determinadas situações são mais eficazes do que fibras fragmentadas. Estes sistemas de materiais compósitos possuem determinadas características desejáveis quando relacionados com a grande facilidade na confecção de formas complexas.^[11]

Materiais como fibra de aramida, fibra de carbono, fibra de vidro possuem valores de tração e compressão elevados. A matriz de forma geral distribui a carga aplicada ao compósito entre cada uma das fibras individuais, protegendo as fibras de danos provocados por abrasão e ao impacto. Alguns dos pontos fortes deste material como alta rigidez, facilidade de moldagem de formas complexas, alta resistência ambiental, juntamente com baixa densidade, fazem do material compósito polimérico superior a determinados metais em grande gama de aplicações.^[12]

Os materiais compósitos poliméricos combinam uma matriz polimérica e reforços fibrosos, que resultará na confecção de laminados. A geometria das fibras em uma composição de tecido também é importante, uma vez que suas propriedades mecânicas são melhores ao longo do comprimento (longitudinalmente), e menores transversalmente, ou seja, na largura do tecido, onde as propriedades anisotrópicas dos compósitos são diferentes.^[13]

É importante considerar a magnitude e a direção do carregamento a serem aplicados nos materiais compósitos poliméricos. Quando corretamente contabilizadas, essas propriedades anisotrópicas são vantajosas.^[14]

A Figura 3.3, aponta a diferença entre fibra, resina e o material compósito com relação à tensão pela deformação. Podemos constatar, que a fibra possui alta resistência e baixa deformação sendo que a matriz polimérica possui uma tensão

baixa e uma deformação maior em comparação com a fibra, o material compósito é a tentativa de formar um ponto intermediário entre as propriedades de tensão e deformação^[15].

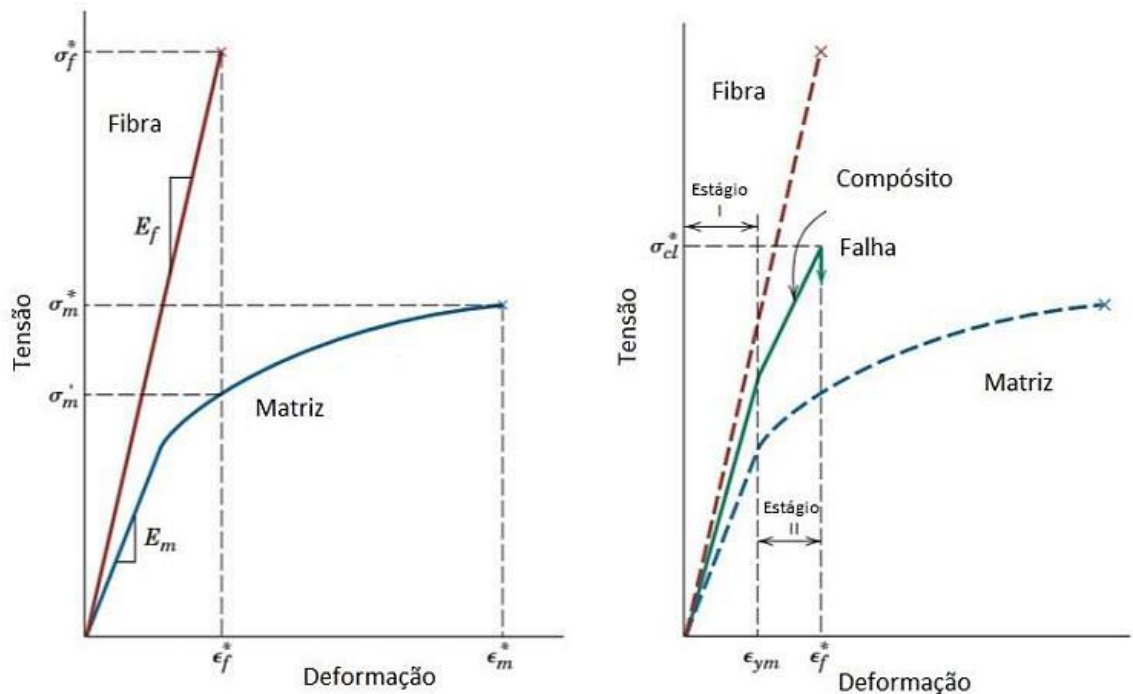


Figura 3.3 Diagrama de tensão x deformação comparando a resistência da fibra, e resinas sozinhas e a combinação da junção como compósito de fibra e resina^[6].

No caso dos materiais compósitos, uma das características que chama a atenção está relacionada com a resistência, esta exerce influência significativa na geometria e orientação do reforço de modo, que o conhecimento é de grande importância. Existem diversas formas de compor os materiais compósitos, como, elementos particulados, fibrados ou fibra metal, neste trabalho focamos os reforços fibrados. A fibra é o elemento de reforço, tem como uma das características um comprimento maior do que as dimensões da seção transversal^[16-18]. A Figura 3.4, observa-se como está estruturada a classificação.

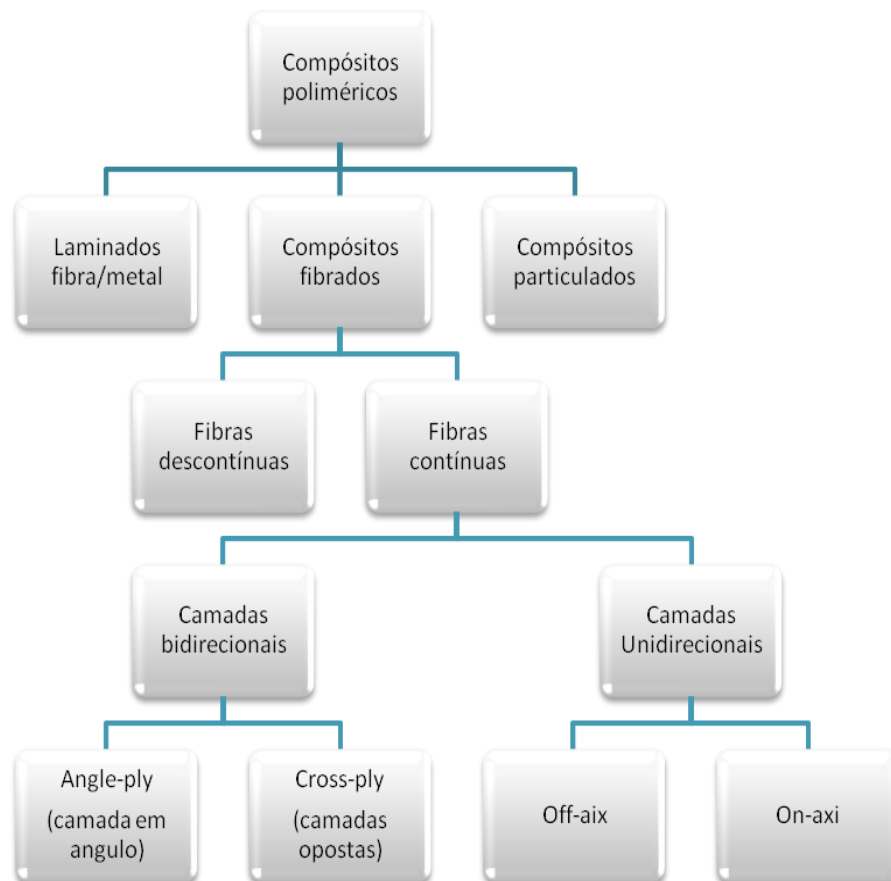


Figura 3.4 Classificação dos materiais compósitos^[18].

Os estudos com fibras contínuas em forma de tecido em laminados de 0/90° cross ply (camadas opostas) de camadas bidirecionais e matriz polimérica constitui o material compósito, onde ângulo do reforço de cada lamina varia entre 0° e 90°, existem diversas gramaturas para a fibra de carbono em forma de tecidos. A possibilidade de utilização de tecidos com reforços variáveis na trama e no urdume, conhecidos como tecidos híbridos. Conhecer um pouco sobre os tecidos é fundamental para o conhecimento da aplicação com resistência.

3.2 Tecido de fibra de carbono

O processo de fabricação têxtil, evoluiu juntamente com a evolução da sociedade. O vocábulo “têxtil” hoje adquiriu um amplo significado. Até algum tempo atrás esse termo era aplicado somente a tecidos. Atualmente com o rápido desenvolvimento tecnológico esse termo é aplicado a fibras, filamentos e fios, podendo ser naturais ou sintéticos. Os produtos decorrentes dos processos de fabricação podem incluir fios, cordas, tecidos de modo geral, tapetes, têxteis industriais, têxteis médicos. [19-21]

O entendimento do significado têxtil leva a três prolegômenos medulares. O primeiro é o entendimento que são materiais fibrosos, sendo que uma fibra de forma geral é deliberada como matéria prima. Podendo ser caracterizada pela relação de pequeno diâmetro e grande comprimento, alta flexibilidade não mantendo-se tencionada naturalmente. [22-23]

Em média os diâmetros das fibras têxteis para materiais compósitos poliméricos variam de 5mm a 50mm. Dentro deste prisma existe a diferença entre filamentos e fibras curtas. Filamentos são fibras contínuas, fibras de comprimento determinado são chamados de fibras curtas, podendo ser descontínuas como nos casos de mantas de fibra de vidro, variando de alguns milímetros a alguns centímetros. [24-25]

A próxima característica é a natureza de sua categoria, podendo ser ramificado em três possíveis níveis: primeira, fibras em escalas microscópicas, segunda, fios, repetição células unitárias, como exemplo plain weave, em escala mesoscópica e a terceira à escala macroscópica. E a terceira é a escala macroscópica, pois cada filamento possui um certo comprimento, que são unidimensionais, enquanto que os tecidos podem ser estruturados de forma bi ou tridimensional. [26-27]

Atualmente existe uma pluralidade de têxteis com estruturas diversificadas, devido ao desenvolvimento tecnológico. As propriedades mecânicas de um tecido são derivadas das estruturas que as fibras são dispostas formando o tecido. Essas características são apontadas durante o processo de fabricação do tecido, sendo que

é possível otimizar a posição das fibras formando um tecido específico de acordo com a aplicação que estará sujeito.^[28-30]

Os tecidos fundamentais, formam uma família de tecidos específicos, pois é a partir destes que outras formas de configuração podem surgir de acordo com a necessidade. Os tecidos que possuem formas mais regulares são utilizados como base formando um quadrado com $Urdume_N = Trama_N = X$, ou seja para cada trama existe um urdume, por isso sendo também conhecido como tecido tela ou plain weave 1 x 1, sendo que cada fio do urdume está entrelaçado com o da trama. A figura 3.5 a seguir mostra o esquema de um tecido tela 1 x 1.^[31-33]

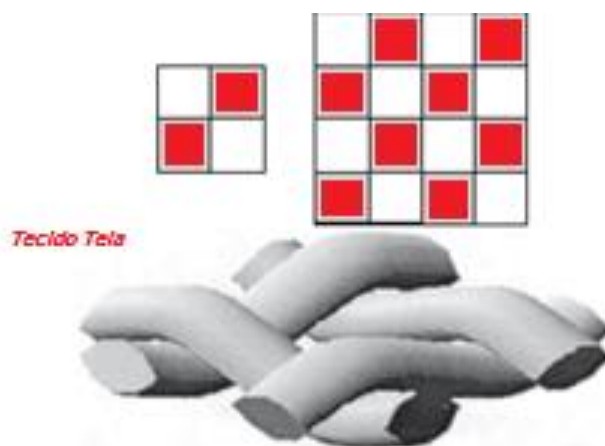


Figura 3.5 Tecido tela 1 x 1, também conhecido como tecido fundamental^[32].

A confecção das fibras na direção do comprimento do fio, foi denominada de urdume e na direção transversal, chama-se de trama, que desta forma permite a construção destes tecidos, possibilitando resistências diferentes nestas duas direções.^[34-35] O tecido em virtude da gama tecnológica agregada possui um valor diferenciado comparado com as mantas, porém oferecem características mecânicas melhores com relação à resistência e a rigidez juntamente com maior estabilidade dimensional. A relação entre a massa do tecido por unidade de área, define a gramatura, que é expressa em g/m^2 .^[36-37]

Devemos ressaltar que todos os tecidos possuem uma distribuição igual de massa na direção da trama ou do urdume. Neste caso, os referidos tecidos serão

desbalanceados, em contraposição aos que possuem uma distribuição homogênea em ambas as direções^[38-40].

3.3 Matriz polimérica

A morfologia da palavra epóxi tem origem grega, significa: [epi] – fora de; e [oxi] – oxigênio. Esta denominação coincide exatamente com a forma do grupo químico epóxi ou oxirano. Quimicamente são definidas como possuidoras de ao menos dois anéis epoxídicos. Os agentes de epoxidação mais comuns são os ácidos peracético e perfórmico e os óleos vegetais epoxidados. A epicloridrina (1-cloro-2, 3 - epóxi - propano) é o agente universal portador do grupo epóxi que reagirá com espécies químicas que tem hidrogênios ativos. O bisfenol A [2,2 - bis (4'- hidroxifenil) propano] é a espécie química mais comum que contém esses hidrogênios ativos.^[41]

A expressão matriz epóxi é utilizado para os pré-polímeros e para as matrizes de modo geral, sendo que os pré polímeros contém grupos reativos epoxidicos. Nos sistemas já curados, os grupos reativos epoxidicos, em sua quase totalidade reagiram formando um sistema curado que é chamado popularmente de resina epóxi.^[42]

A resina epóxi possui boa aceitação no mercado mesmo tendo um preço mais elevado quando comparado com outras resinas, neste caso, os epoxídicos são aplicados em produtos que contém um valor agregado alto. Os primeiros produtos sintetizados surgiram em 1891, porém comercialmente surgiu somente na década de 1940. Os primeiros sistemas epoxidicos comerciais derivavam do grupo bisfenol A e epicloridrina, como agente de polimerização, sendo ainda a base de grande parte da produção deste polímero, mesmo existindo uma grande variedade de novos polímeros disponíveis no mercado.^[43]

O bom desempenho da matriz epóxi esta relacionada com o as ligações cruzadas formando um sistema tridimensional, durante o processo de polimerização, sendo que para isso existe certa variedade de agentes de cura.^[44]

Estas resinas são facilmente convertidas em materiais termorrígidos proveniente da reação de cura. De modo geral, a maioria das resinas pode ser obtida através da reação de bisfenol A [2,2-bis (4'-hidroxifenil) propano] e epicloridrina (1-cloro-2,3-epóxi propano), formando a resina diglicidil éter de bisfenol A. A Figura 3.6 mostra a fórmula estrutural do diglicidil éter de bisfenol A-DGEBA Estes compostos

possuem um ponto de amolecimento entre 154 – 157°C. a figura 6 mostra os pontos chaves da reação.^[45]

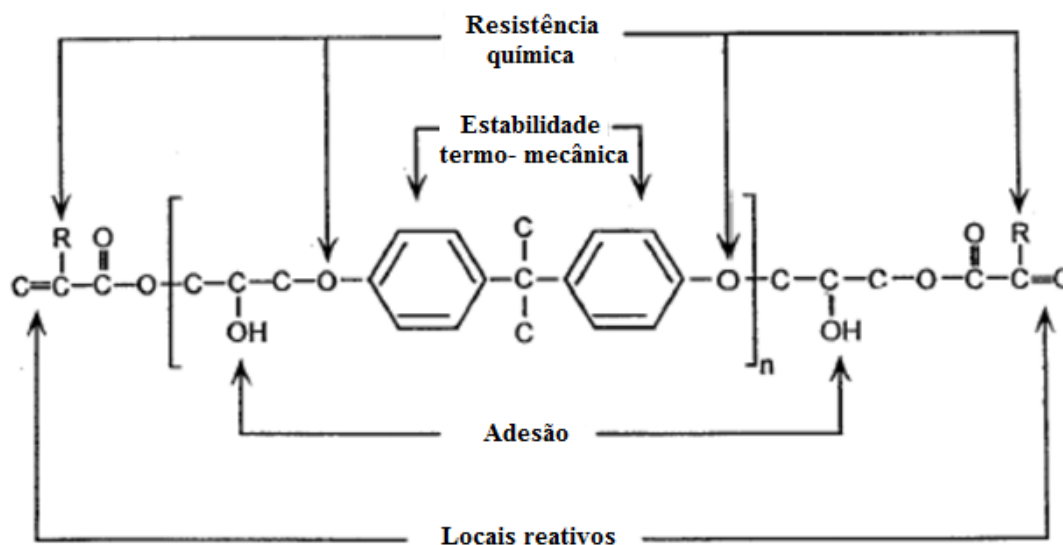


Figura 3.6 Molécula de resina epoxídica (diglicidil éter de bisfenol A-DGEBA) ^[45]

A variação do valor de n interfere no estado físico da resina, de líquida à sólida, onde a viscosidade aumenta conforme o aumento de n . Se $n = 1$, a resina será líquida, porém no caso de $n > 1$ será semi-sólida ou sólida. Outro dado importante é classificar a resina através da taxa molar dos reagentes (peso molecular da resina dividido pelo nº de anéis epoxídicos), para efeito de cálculo estequiométrico de proporção entre a resina e o agente de cura. A taxa de referencia molar dos reagentes para resinas no estado líquido pode chegar até 229, para resinas semi - sólidas varia entre 230 a 459 e finalmente para resinas em estado sólido a taxa esta acima de 460, podendo chegar a 5000. Na Figura 3.7, a molécula de epicloridrina e a sua composição, oxigênio, carbono, cloro e hidrogênio.^[45]

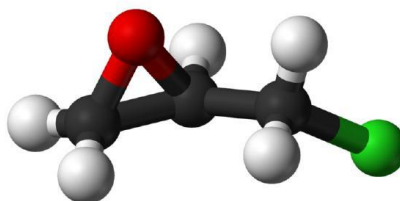


Figura 3.7 Molécula de epicloridrina ,composição: oxigênio (U); carbono (U); hidrogênio (U); Cloro (U)^[45]

A Figura 3.8 mostra a estrutura em 3D do bisfenol A, em sua composição consta, oxigênio, carbono e hidrogênio, além disso, existem dois anéis fenóis.

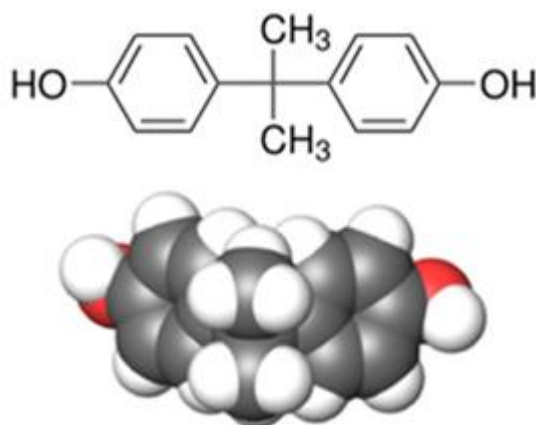


Figura3. 8 Estrutura em 3D do bisfeno A Fonte:

<https://qualidadeonline.wordpress.com/2010/04/29/o-bisfenol-bpa-e-a-saude-humana/> acesso 13/03/2018

A reação entre a epiclorigdrina como agente promovedor da cura e o bisfenol A, compõem a matriz polimérica. A Figura 3.9, demonstra esquematicamente a reação entre a epiclorigdrina e o bisfenol A, realização a reação de cura da matriz polimérica^[13].

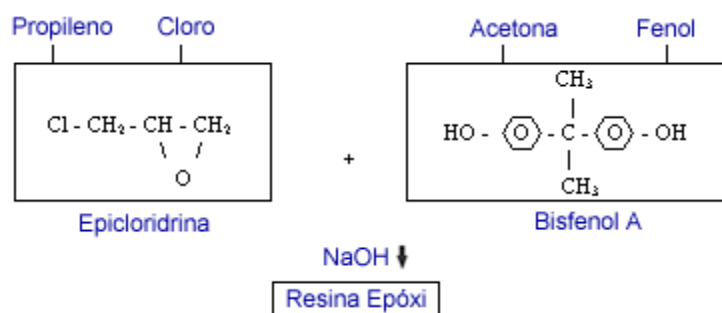


Figura 3.9. Reação da Epiclorigdrina + Bisfenol A^[46]

Para este trabalho foi estudado dois tipos de matrizes epóxi, sendo uma do Bisfenol A e a outra do Bisfenol F. A diferença deles esta justamente no ponto da estabilidade termo mecânica da matriz antes do processo de polimerização. A figura 3.10, abaixo mostra as duas estruturas e a diferença entre elas, sendo a figura A o do grupo bisfenol A e a figura B do grupo bisfenol F.^[47]

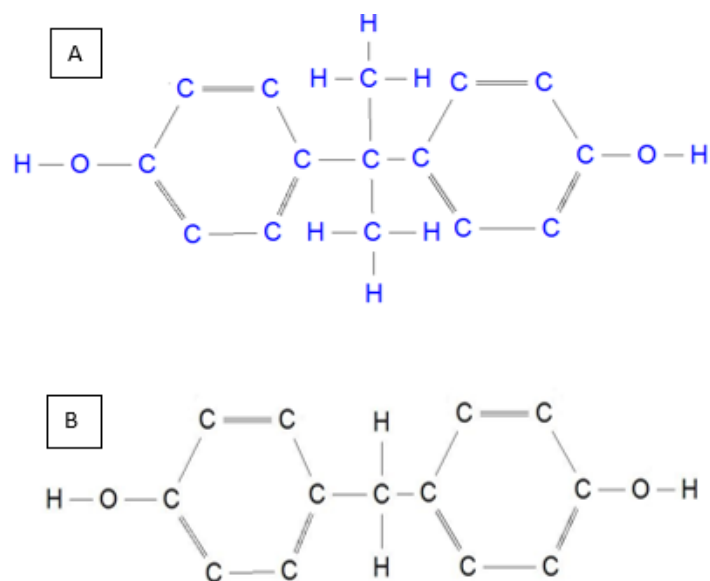


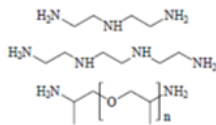
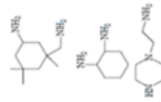
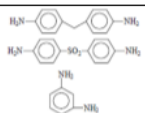
Figura 3.10 – Representação esquemática das cadeias e ligações das estrutura do bisfenol A (A) e estrutura do bisfenol F(B). Fonte: Autor

A grande capacidade de adesão da resina epóxi, marca de forma indelével suas características, pois, pode aderir a um grande número de materiais, juntamente com sua baixa contração. Quando curados estes sistemas epóxídicos possuem uma baixa resistência à fratura, geralmente com resultados em torno de 1,0 MPa. Consequentemente, existem estudos voltados para melhorar as propriedades térmicas e mecânicas. A viscosidade da resina epoxídica é um dos parâmetros fundamentais, sendo que a temperatura define as condições de processamento. ^[48]

Estas resinas são usadas como impregnação, revestimento de superfícies, matrizes para compósitos, adesivos e etc. Neste estudo a aplicação está relacionada à impregnação dos tecidos de fibra de carbono. ^[49]

As resinas do grupo epóxi podem ser curadas com diversos agentes de cura ou como também são conhecidos como endurecedores. Os principais endurecedores que podemos destacar são as aminas alifáticas, as aminas ciclo alifáticas e aminas aromáticas, existem outros, porém, estes são os mais comuns. Dentro deste grupo de reagentes o grupo das aminas alifáticas elas reagem mais rapidamente se comparadas com as aminas aromáticas. Com relação a matriz estudada, o agente polimerizador utilizado pertence ao grupo alifático, tendo como base a epicloridrina. Na tabela 3.1 alguns tipos de reagentes comumente encontradas comercialmente ^[50-51].

Tabela 3.1 Aminas utilizadas como agentes de cura comercial. [46]

Estrutura		Nome
	Alifáticas	
		Dietilenotriamina (DETA)
		Trietilenotetramina (TETA)
		Poli(oxipropilenodiamina)
	Ciclo Alifáticas	
		Isoforonadiamina (IPDA)
		1,2' diaminociclohexano (DAC)
		N, aminoetilpiperazina (AEP)
	Aromáticas	
		4,4' diamino-difenilmetano (DDM)
		4,4' diamino-difenilsulfono (DDS)
		m- fenilenodiamina

Seguidamente a esta tabela, temos à tabela 3.2 comparativa onde se aponta vantagens ou desvantagens e algumas possíveis aplicações para a resina.

Tabela 3.2. Vantagens, desvantagens e algumas aplicações para resinas[46]

Tipo de amina	Vantagens	Desvantagens	Aplicações
Aminas alifáticas	Baixa viscosidade, cura à temperatura ambiente, incolor	Vida útil pequena, moderadamente tóxica, alta absorção de umidade.	Adesivos, pequenos vazamento, encapsulante elétrico, uso na engenharia civil
Aminas aromáticas	Bom desempenho à temperaturas elevadas, boa resistência térmica, longa vida útil, baixa absorção de umidade	Incompatibilidade com resinas epóxi, longos ciclos de curas a altas temperaturas	Compósito de alto desempenho e revestimentos, adesivos, filamentos espiralados, encapsulante elétrico
Catalítico	Resistência a altas temperaturas, vida útil muito longa	Longos ciclos de cura a altas temperaturas, quebradiços	Revestimentos em pó, adesivos, encapsulante elétrico

No caso das aminas alifáticas, possuem baixa viscosidade, que em geral as moléculas são pequenas e muito voláteis, onde reagem através dos seus radicais livres de hidrogênios produzindo a cura em temperatura ambiente com um baixo custo e de fácil mistura com a resina. [52-53]

3.4 Processo de infusão a vácuo.

O processo de confecção dos materiais compósitos poliméricos são variados, desde o mais simples como o hand lay up (laminação manual), até resin transferring mold – RTM (transferência da resina para o molde) que precisa de certos equipamentos e cuidados.

Entre esses processos, a infusão a vácuo ou mais conhecido popularmente como “ vacuum baging”, é um processo melhor do que a laminação manual (hand lay up), mas com semelhança a este. Em virtude de existir a aplicação do vácuo parcial, formando uma pressão que contribui para uma melhor impregnação e consequentemente a diminuição dos vazios, que comparado com a laminação manual, esses vazios se tornam pequenos.^[54]

O processo por infusão a vácuo, necessita de uma preparação previa, ou seja, é necessário a confecção de uma bolsa (bag) com um molde para acomodar o reforço e projetar o fechamento deste, que geralmente utiliza uma fita dupla face. O ar interno desta bolsa é retirado com o auxílio de uma bomba para vácuo, ajudando a estabilizar o reforço no molde^[55]

Dentro da expansão acelerada dos novos materiais e a necessidade de buscar alternativas para melhorar a performance, com uma proposta de produção alternativa e de certa forma rápida, o processo de infusão esta surge como uma técnica que se utiliza da pressão gerada por um vácuo parcial, mantendo o reforço mais coeso e melhorando a permeabilidade da matriz.^[56]

Dentro das possibilidades de se confeccionar materiais compósitos poliméricos existe certo processos que se tornam onerosos devido a necessidade de maquinário mais robustos como o caso de autoclave. Os processos como RTM e a infusão a vácuo são opção mesmo que em determinadas situações os moldes também tenham um certo custo. Comparativamente, o processo por infusão se torna mais atrativo e obedece a determinado planejamento sobre seus desenvolvimento durante o processo, para garantir a qualidade do mesmo. Um exemplo de montagem do bag é apresentado na figura 3.11 a seguir^[57].

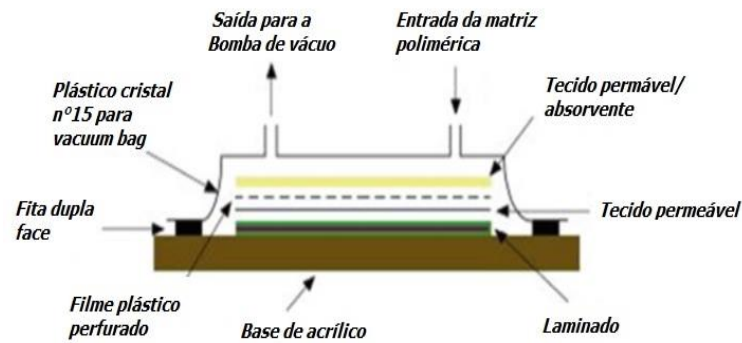


Figura 3.11 Setup montado para infusão a vácuo (adaptado)^[57]

Essa técnica quando comparado a outras, pode-se considerar mais simples e com fácil operação para execução. Para construir o bag, segue-se a determinado estágios ou etapas do processo: (a) colocação e arrumação do reforço no interior do molde, (b) colocação de tecido absorvente que permite a passagem da resina para o reforço, (c) conexões em espirais tipo “organizador de fio”, que facilitaram a distribuição da matriz pela área do molde, (d) colocação de válvulas para entrada e de resina e válvulas para saída de ar com conexões a um reservatório para o excesso de matriz, (e) plástico cristal com gramatura apropriada e (f) fechamento do bag com fita dupla face, tornando-o estável e pronto para o processo de infusão.^[58-62]

A construção do molde, merece uma atenção especial, pois é um fator crítico quando observamos que a matriz deve permear e impregnar todo o reforço, fazendo com que a estrutura alcance os padrões desejados. Neste situação pode-se fazer uso a Lei de Darcy, como uma forma de simular os principais pontos de entrada da matriz e saída de ar. Esta lei versa sobre a permeabilidade de um fluído por um meio poroso e pode ser aplicado a escoamentos laminares também^[63-65].

Certamente, este processo é uma das tecnologias indicadas onde é necessário a aplicação de vácuo para ajudar na impregnação da matriz de forma eficaz evitando possíveis problemas com vazios. Esta técnica pode ter uma elevada porcentagem de reforço (60% à 70%) em peso quando comaprado com outras formas de processamento que chegam a ter entre 45% a 50% em peso de reforço^[66].

Um dos possíveis inconvenientes é o acabamento superficial das peças, que fica poroso. Uma possível metodologia para evitar esse mal acabamento, é a aplicação de desmoldante a base de silicone ou cera automotiva. Antes de montar o

“bag” encera-se o molde com estes produtos, que além de melhorar o acabamento superficial, ajuda no desmolde do produto^[67-68].

3.5 Revestimento a frio

O revestimento a frio é um processo que busca proteger e recuperar o dimensional de peças contra abrasões, corrosões e erosões. O produto MECATEC é um compósito pois ele combina materiais cerâmicos, metálicos e poliméricos. Essa condição gera em sua estrutura tridimensional reticulada boas ligações com o material de base devido a reações físico - químicas de superfície.

Cada tipo de MECATEC, possui aplicações específicas, de acordo com o material e sua aplicação. As tabelas abaixo mostram o uso dos tipos de MECATEC, de acordo com os tipos de desgaste e reparo. A tabela 3.2 mostra os tipos de aplicações.

Tabela 3.2 – Aplicações dos variados tipos de MECATEC fonte:
<http://www.eutectic.com.br/solucoes-antidesgaste-mecatec-polimeros-de-engenharia-solda-a-frio.html> - acesso 13/03/2018

MeCaTeC	1	2	3 Xuper Hard	A5	A5 HT	Express
Abrasão						
Corrosão						
Erosão						
Fricção						
Reparo Urgente						
Uso Geral						
Usinabilidade						
Compressão						

A tabela 3.3 a seguir mostra as principais características deste revestimento a frio.

Tabela 3.3 Características gerais dos produtos MECATEC fonte:
<http://www.eutectic.com.br/solucoes-antidesgaste-mecatec-polimeros-de-engenharia-solda-a-frio.html> acesso: 13/03/2018

Características Técnicas								
MeCaTeC	1	2 Pasta	2 Líquido	3 Xuper Hard Pasta	3 Xuper Hard Líquido	A 5	A 5 HT	EXPRESS
Proporção de mistura compon. X / XX peso	11:1	12.5:1	10:7,5	12.5:1	11:1	4:1	4:1	10:2,5
Proporção de mistura compon. X / XX volume	6:1	7:1	1,5:1	6:1	6,5:1	4:1	4:1	4:1
Faixa de temperatura de aplicação (°C)	5-40	10-40	10-40	10-40	10-40	5-40	5-40	10-35
Tempo máximo para aplicação após a mistura 20°C (min.)	20-30	25-35	30-40	25-35	25-35	25	25	5-15
Tempo para entrar em serviço a 20°C	2-4h	2-4h	2-4h	2-4h	2-4h	3-5h	3-5h	30-70min
Tempo de cura total a 20°C	~24h	~24h	~24h	~24h	~24h	~24h	~24h	~3h
Densidade (g/cm³)	1,6	1,5	1,5	1,8	1,7	2,05	2,05	1,4
Temperatura máxima de serviço (°C)	100	100	100	100	100	120	230	100
Dureza (Shore D)	85	92	80	95	86	90	90	86
Acabamento	Com ferramenta	Com ferramenta	Com ferramenta	Com retífica	Com retífica	Manual	Manual	Com ferramenta
Quant. necessária aprox. para revestir 1m² com 3mm de espessura (pasta)	4,8 kg	4,5 kg	-	5,4 kg	5,1 kg	6,8 kg	6,8 kg	4,6 kg
Quant. necessária aprox. para revestir 1m² com 0,5mm de espessura (líquido)	0,9 kg	-	0,83 kg	-	0,94 kg	-	-	-

No estudo, foi utilizado o MECATEC 5HT, que é composto por uma matriz de carbetto de cilício e óxido de alumínio reforçado com fibra de aramida, gerando uma resistência a abrasão e erosão e com boa aderência ao material de base. O MECATEC 5HT pode trabalhar em temperaturas de até 250°C, sendo resistente à corrosão por ácido clorídrico, ácido nítrico, ácido fosfórico, ácido sulfúrico, solventes clorados, querosene, solventes minerais, tolueno, gasolina, propietilenoglicol, solução saturada de sal, água e sais. Tem como aplicações para revestimento em pás de ventiladores, transportes de fluidos, carcaças de bombas, silos, chutes (alimentadores), tubos de alimentação de clínquer [69].

3.6 Aspersão Térmica

A terminologia de aspersão térmica pode ser entendida como uma pulverização térmica que compreende um grupo de processos de revestimentos, metálicos ou não metálicos, que são depositados de forma semi-fundida em cima de um substrato a fim de formar um revestimento com características únicas. O material que servirá para ser aspergido pode ser encontrado em três formas: pós, hastes, arames e/ou materiais fundidos.

O sistema tem como parte principal uma tocha, que deve converter a energia fornecida (química ou elétrica). O material que servirá como revestimento é aquecido e posteriormente derretido a determinadas temperatura (a temperatura depende do tipo de material a ser aspergido no substrato) e lançado junto ao fluxo de gás com alta velocidade em direção ao um substrato, que ao contato, deforma-se, formando através da micro fusão do material o revestimento. O material pode ser proveniente de pós ou por derretimento hastes ou varetas.

O sistema de aspersão térmica pode ser dividido em cinco subsistemas: (1) a geração de jato de alta energia e alta velocidade, incluindo a tocha, a fonte de alimentação, o fornecimento de gás e, controles; (2) a preparação do material de revestimento, isto é, a distribuição do tamanho do pó e sua morfologia, sua injeção no fluxo de gás de alta energia e sua transformação em um fluxo de particulados fundidos; (3) a atmosfera circundante e controlada (incluindo controle de umidade), baixa pressão, etc; (4) o material de substrato e a preparação da superfície do substrato; e (5) equipamentos mecânicos para controlar o movimento da tocha e do substrato em relação um ao outro. É estudo e entendimento destas interações que favorecem a qualidade e confiabilidade dos revestimentos. [70-72]

Uma das características deste processo é que ele é sinérgico, ou seja há diversas variáveis e componentes abrangidos que quando combinados e operando simultaneamente produzem efeitos maiores do que em separados. O material que servirá para o recobrimento pode estar na forma de pó, vareta ou arame. Na figura 3.12 a seguir apresenta-se um esquema resumido sobre aspersão térmica.[73-75]

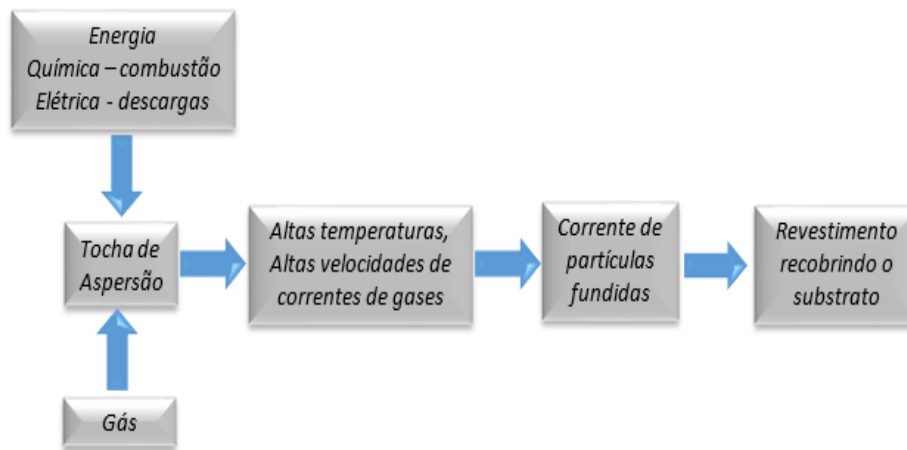


Figura 3.12 – Desenho esquemático de um processo de aspersão térmica^[74]

O calor no processo de aspersão é de grande importância e ele deve ser gerado na tocha. Pode ser utilizado gases inflamáveis, arco elétrico ou plasma. As partículas antes de serem lançadas para o material de base sofre o aquecimento recebendo essa energia podendo sofrer ou não uma mudança de estado físico passando de sólido para o estado plástico ou mesmo o estado fundido dependendo do substrato.^[76-79]

No decurso do processo o material aspergido deve ser fundido, mas não ao ponto de vaporizar, permanecendo “pastoso (sic)”, até o momento que atinge o substrato. No decorrer destes depósitos, forma-se as camadas, que se solidificam, resultando em uma estrutura laminar. No momento que o material aspergido incide sobre o material de base, resfria-se rapidamente aderindo a superfície que foi devidamente preparado antes de iniciar o processo. No impacto essas partículas sofrem certa deformação, conferindo a estas um aspecto em forma de “lente”. A figura 3.13 mostra o formato destas lentes quando atingem o substrato^[80-83]

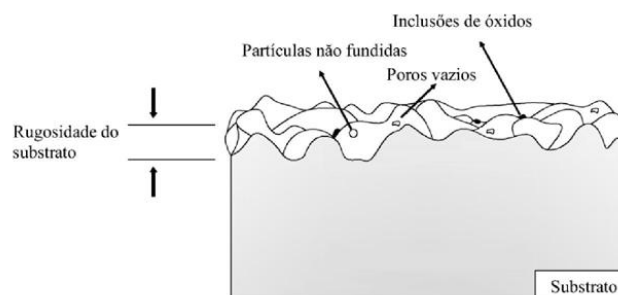


Figura 3.13 Formação das “lentes” na superfície dos substrato^[82].

O processo de aspersão térmica depende além da energia calorífica de outros fatores relacionados tanto ao material aspergido quanto ao substrato. É importante

existir certa identidade, para que o processo seja eficiente. Essa eficiência varia e pode ter desde condições de rugosidade, limpeza da base onde será recoberta, possíveis interações químicas e físicas que afetam diretamente o resultado final da aplicação.^[84-88]

Quando o material resfria e solidifica na superfície do substrato ele contrai e gera uma certa tensão mecânica. Com relação ao processo metalúrgico, ele realiza uma micro soldagem localizada. O mecanismo de aderência física pode ser considerada como secundária e esta sujeita a ação das forças de Van Der Waals, sendo muito específico, necessitando de uma superfície sem impurezas e uma aproximação contínua na escala aproximada de 0,5nm. A técnica de aspersão térmica é dividida em dois grupos um a combustão e outro a arco elétrico e ambos possuem subdivisões. A figura 3.14 a seguir mostra essa organização.^[89]

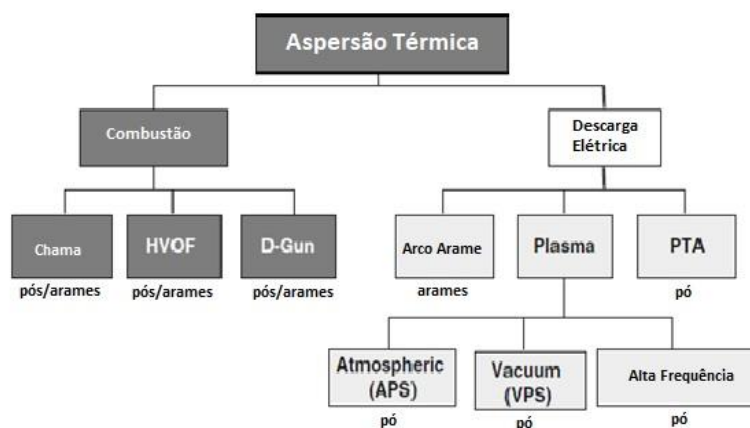


Figura 3.14 – Fluxograma ilustrativo dos diversos tipos de aspersões térmicas existentes (adaptado) ^[89].

Neste estudo, abordamos a técnica a combustão por chama com arame. O material de revestimento pode ser usado na forma de arame. Nesse caso, é denominado de aspersão por chama de arame (wire flame spraying), ou pó, chamado de aspersão por chama de pó (flame powder spray).^[90]

No método de aspersão por chama de pó o material de revestimento é alimentado de forma axial na tocha de aspersão, o calor da chama é utilizado tanto para fundir quanto para direcioná-lo ao substrato. A relação da mistura oxigênio – combustível pode variar na faixa de 1:1 a 1,1:1, resultando em uma atmosfera

carburante ou oxidante, respectivamente. Na aspersão por chama de arame a combustão dos gases é utilizada apenas para fundir o material. A atomização do metal fundido e sua aceleração até o substrato são realizadas por um jato de ar comprimido. Desta forma, são obtidas maiores velocidades de transferência além de uma melhor qualidade final do revestimento. As figuras 3.15 e 3.16 ilustram tochas de aspersão por chama de pó e arame, respectivamente.^[91]

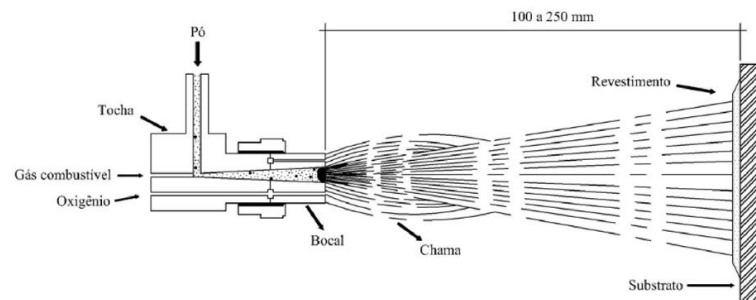


Figura 3.15 Tocha de aspersão de pó por chama.

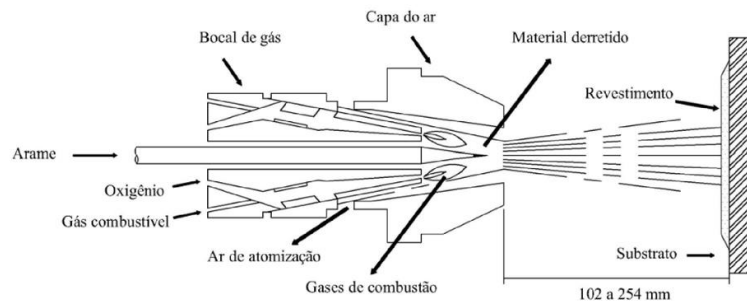


Figura 3.16 Tocha de aspersão de arame por chama.

Um aspecto importante está relacionado com a temperatura e velocidade que as partículas são aspergidas no processo por combustão a chama. Bandgopadhyag e Nylen calcularam e mediram as temperaturas e velocidades de partículas de bentonite cobertas com níquel (5-120 μm) injetadas axialmente. A Figura 3.17 Figura “a” e “b” indica que a simulação de distribuição da velocidade da partícula se assemelha à medida com um DPV2000.

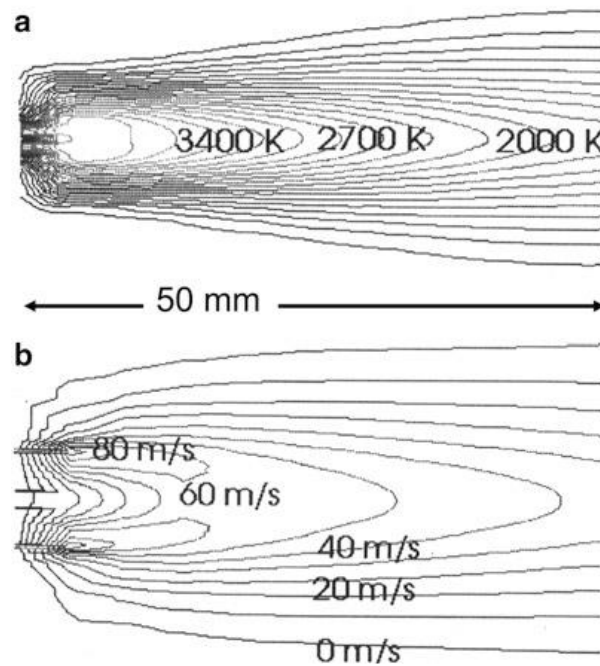


Figura 3.17 (a) Temperatura do gás e (b) campos de velocidade, por chama de oxi-acetileno: central Diâmetro do orifício 3,2 mm, gás diâmetro da entrada da mistura 0,8 mm, fluxo de mistura taxa 56 L/min, O_2 / C_2H_2 relação de mistura 34/22. [92-93]

A figura 3.18 mostra que distribuição experimental onde existe um pico pronunciado em torno de 22 m/s.

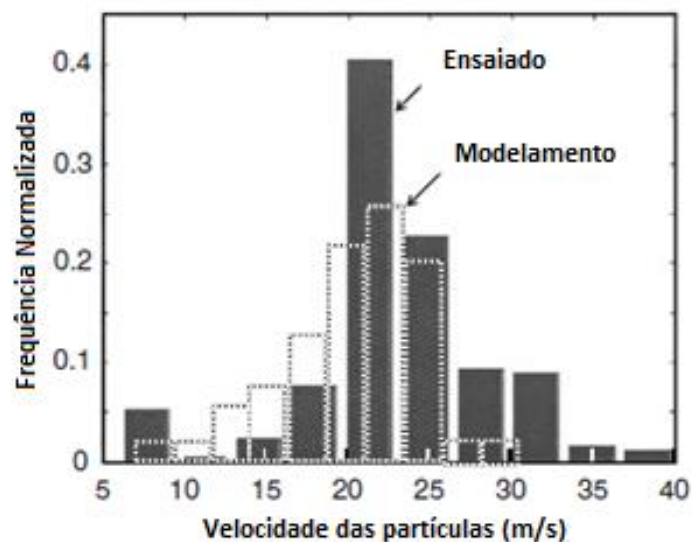


Figura 3.18 Coberto de níquel bentonite (5-120 μm). Partículas injetadas em processo de aspersão térmica por chama. (a) Linhas sólidas, medidas distribuição de velocidade, (b) Linhas pontilhadas, calculadas a distribuição de velocidade. [92-93]

A distribuição simulada tem um pico um tanto menor em relação ao obtidos pelo experimento, ocorrendo também em 22 m/s. A simulação possui um alcance maior do que os resultados experimentais medidos. Existe também, um pequeno número de partículas cuja velocidade é superiores a 30 m/s.

A perspectiva global do mercado de revestimento térmico foi estimado em US \$ 8,38 bilhões em 2016. Esse resultado esta vinculado principalmente a indústria aeroespacial e automotiva, devido a grande vantagem que o processo oferece, como variação das espessuras, desgastes, proteção contra corrosão, menores emissões de poluente entre outros fatores.

O desenvolvimento de infra-estruturas estratégicas adotadas pelos governos nas economias emergentes, particularmente no campo de Aeroespacial e marinha deverá impulsionar a demanda pelo produto. Juntamente, a aplicação destes produtos para instrumentos médicos e biomédicos contribuindo para melhorar a resistência ao desgaste e aumentar a bio compatibilidade das próteses e implantes dentários serão fatores que irá favorecer o aumento do crescimento deste segmento. A figura 3.19 mostra a demanda de crescimento em determinados setores durante o período de 2014 a 2025.

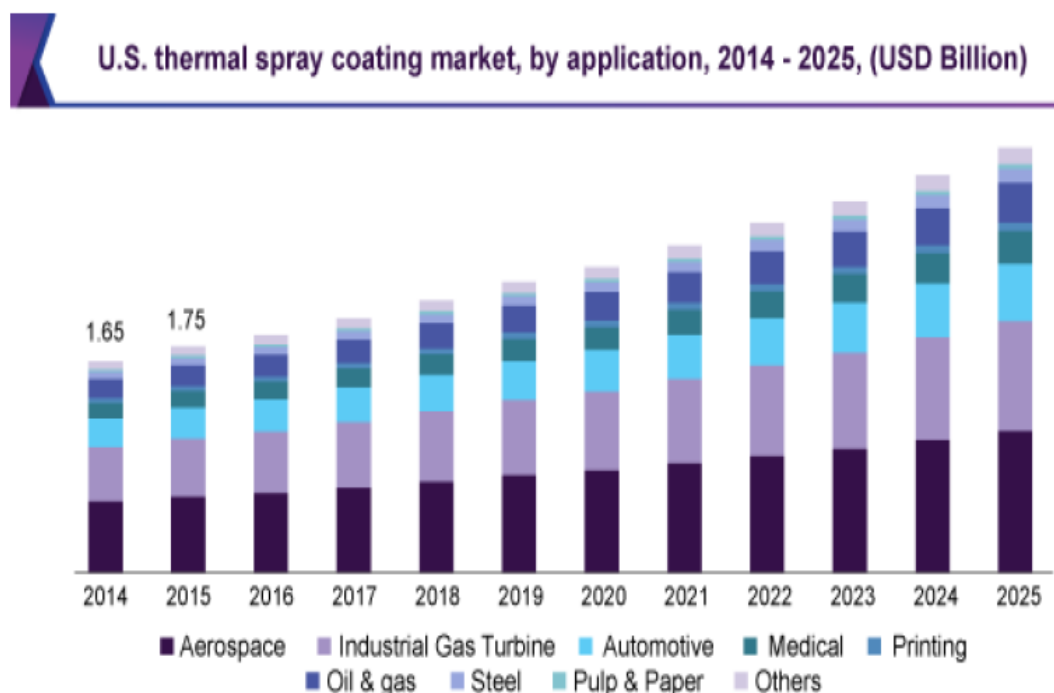


Figura 3.19 – Estimativa de crescimento das aplicações de aspersão térmica no mercado da América do Norte.^[94]

A indústria da aspersão térmica, incluindo América do Norte e Europa é caracterizada por leis e regulamentos rigoroso. A norma MIL-STD-1687A (SH (download possível através do link: http://everyspec.com/MIL-STD/MIL-STD-1600-1699/MIL_STD_1687A_1671/ acesso: 13/03/2018) determina processos de aspersão térmico para reparação de elementos mecânicos de substratos ferrosos e não ferrosos. Além disso, este padrão também inclui os vários requisitos de qualificação de procedimentos e operadores ^[94]

4. MATERIAIS E MÉTODO

4.1. Materiais utilizados

4.1.1 Matrizes Poliméricas

Para os estudos relacionados com a matriz polimérica, utilizou-se duas resinas comerciais do grupo Bisfenol A, denominadas SQ 2001 e SQ 2004, fornecidas pela empresa RELEASE e a terceira, também comercial, porém do grupo Bisfenol F, conhecida do LY 5052, fornecida pela MAXEPOXI. Para as duas matrizes do grupo Bisfenol A, a proporção de resina e agente de polimerização é de 100:50 em peso e no caso da terceira matriz a relação é de 100:38 também em peso. A temperatura de cura do grupo Bisfenol A esteve em torno de 60°C por 8 horas ininterruptas, porém com relação a do grupo Bisfenol F, existe uma rampa de cura, sendo 60°C por duas horas e 80°C por 10 horas. Confeccionou-se corpos de provas para ensaios mecânicos de tração e flexão. Para tal, foi utilizado moldes de teflon usinados com as dimensões requeridas. Para cada conjunto de quatro corpos de provas de tração e quatro de flexão, foi requerido 150 gramas de matriz polimérica (grupo Bisfenol A, 100,00 gramas de resina e 50,00 gramas de agente de cura e Bisfenol F 108,70 gramas de resina e 41,30 gramas de agente de cura), na qual foi utilizada uma balança de precisão marca: Marte, Modelo: AS5000C, recipiente para realizar a mistura entre resina e catalisador, e seringas graduadas, para manter a precisão entre resina e agente de cura. A figura 4.1 mostra os moldes de teflon utilizados e os corpos de prova curados. ASTM D 3039 e ASTM D 790



Figura 4.1 – Molde para obtenção dos corpos de prova de resinas, tanto para tração quanto flexão e corpos de prova já curados. Fonte: autor

O processo de cura das matrizes foi realizado usando uma estufa construída em madeira especialmente para esse fim com dimensões de 50cmx50cmx40cm. A estufa possui termostato regulável, resistência elétrica específica para alcançar as temperaturas necessárias e um cooler de fonte de computador, para facilitar a distribuição do calor interno durante o processo de polimerização das matrizes. A figura 4.2, mostra a estufa e suas características.

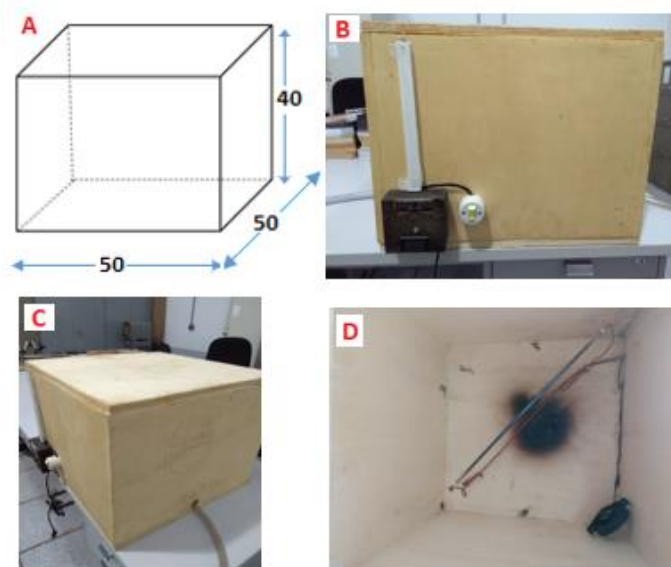


Figura 4.2 Estufa para cura das matrizes e laminados poliméricos. (A) Dimensões da estufa, (B) Lateral da estufa com interruptor e termostato, (C) Lateral da estufa com entrada as mangueiras para infusão a vácuo e (D) Vista interna da estufa, com a resistência elétrica ao fundo e o cooler para melhor distribuir o calor.

A figura 4.3 mostra dois copos de provas de resina ensaiados a tração, extraídos dos moldes de teflon.

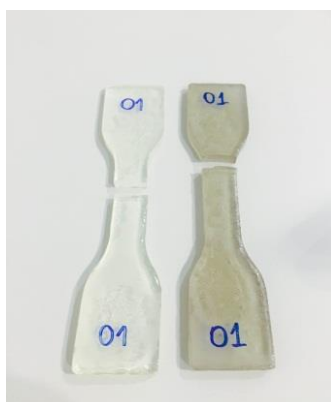


Figura 4.3 Corpos de provas de resina para ensaios de tração

Após a obtenção dos corpos de provas, realizou-se os ensaios mecânicos de tração e flexão, que foi realizada em uma máquina de ensaios universais da marca EMIC, no laboratório de materiais da FEB UNESP de Bauru, com uma célula de carga para 2 toneladas, tendo como velocidade de carregamento 1mm por minuto, segundo a norma para estes tipos de ensaios, como mostrado na figura 4.4 abaixo.

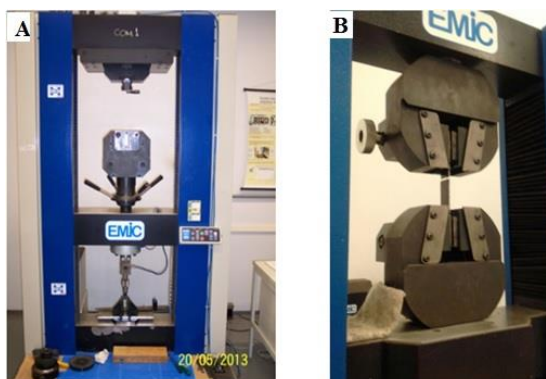


Figura 4.4 Máquina de ensaios universais, com parte inferior montada para ensaio de flexão, figura A e montagem para ensaio de tração, figura B.

4.1.2 – Caracterização por TG e DSC

Amostras de resina ensaiadas a tração foram retiradas dos corpos de provas para caracterização por análise térmica de termogravimetria (TG) e calorimetria exploratória diferencial (DSC), onde através da TG, pode-se observar a perda de massa em relação à variação de temperatura e no caso da técnica de calorimetria exploratória diferencial (DSC), tendo como característica a transferência de calor para amostra e como resultado a demonstração de pontos de inflexão tanto para eventos endotérmicos, quanto exotérmicos. As análises foram realizadas no laboratório multiusuários da Faculdade de Ciências da Unesp de Bauru. O equipamento utilizado é o modelo STA 409 marca NETZSCH. A massa inicial para todas as amostras foi de 8,90 mg, o cadinho utilizado para as três amostras foi de platina. O gás de purga aplicado na caracterização, utilizou-se de N_2 com uma vazão de 40 ml por minuto e uma taxa de aquecimento de $10^{\circ}C$ por minuto. O setup foi determinado para $800^{\circ}C$. A figura 4.5 a seguir mostra o equipamento utilizado.



Figura 4.5 Equipamento de análises térmica modelo STA 409 marca NETZSCH

4.1.3 Caracterização da matriz LY 5052 por DRX

Em 1895, o físico alemão Wilhelm Konrad Roentgen, descobre uma radiação de natureza desconhecida, motivo pelo qual passou a chamá-los de raios-X. Historicamente, desde a sua descoberta, os raios-X, vêm sendo largamente utilizados em inúmeras áreas com diversas aplicações.

A técnica de caracterização por DRX é indicada para aquisição de dados de materiais cristalinos, porém podem ser útil em estudos de materiais amorfos. A técnica de DRX consiste na incidência de um feixe de raios-X sobre uma amostra e na detecção de parte desse feixe que foi espalhado para diversas direções pelos átomos que se encontram em sua trajetória. Em um material onde os átomos obedecem a certa periodicidade no espaço, característica das estruturas cristalinas, a difração de raios-X ocorre nas direções de espalhamento que satisfazem a Lei de Bragg. A difração de raios X (DRX) foi realizada pelo equipamento RIGAKU MiniFlex600, operado em condições de 40 kV e 15 mA, com uma fonte de radiação Cu K α ($\lambda = 1,54056 \text{ \AA}$) com uma velocidade de $0,04^\circ / \text{min}$ entre os ângulos de 10° a 80° , no Laboratório de Cromatografia da Faculdade de Ciências da UNESP de Bauru. A figura 4.6 mostra o equipamento de raios X.



Figura 4.6 Equipamento de raios x.

Fonte: http://chemphys.armstrong.edu/feske/instrument%20pictures/major_equipment%20v4.htm - acesso 10/01/2018

4.1.4 Tecido de fibra de Carbono tela (*plain weave*).

O tecido de fibra de carbono tela (*plain weave*) (1x1) utilizado dispõe de um tex (filamentos) de 200 g/m². A metragem total do tecido adquirido continha a dimensão de 1,30 m x 10,0 m, totalizando 13,0 m². O tecido foi desmembrado em áreas menores com dimensões de 36cm x 36cm, tendo cada parte 1,30m² aproximadamente. Para facilitar o corte do tecido, eles foram medidos e esquadrejados. Seguido de colocação de fita “esparadrapo”, que é uma fita flexível, que é coberta em um dos lados com uma substância adesiva, que facilitou o corte, evitando assim “o desarrumar da trama”, mantendo-os íntegros em suas posições. A figura 4.7 a seguir mostra o tecido de fibra de carbono cortado e com o esparadrapo em suas bordas.



Figura 4.7 Tecido de fibra de carbono cortado para infusão a vácuo

Alguns fios de fibra de carbono foram analisados em um microscópio eletrônico de varredura para serem estudados por meio de espectroscopia de dispersão de energia

de raios-X (EDX), no qual é acoplada ao microscópio MEV EVO Carl Zeiss LS15 do laboratório de análises químicas do Instituto de Química de Araraquara - UNESP. A aceleração esteve próxima a 15keV. Essa técnica de caracterização ajudou qualificar e quantificar a porcentagem de elementos constituintes da fibra de carbono utilizada nesse trabalho.

4.2 Laminação

O processo de laminação escolhido para o estudo foi Vacuum bag, este processo é basicamente uma extensão do processo de laminação, onde é montado um setup para moldagem. A vedação é de grande importância, pois é feito um certo vácuo para posteriormente permitir a entrada da matriz polimérica. A figura 4.8 a seguir mostra a configuração do setup.

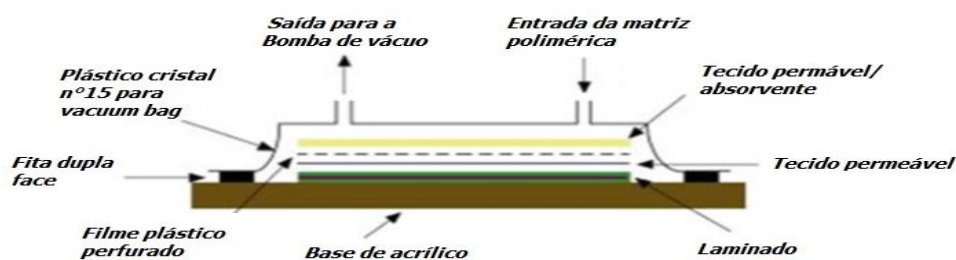


Figura 4.8 Montagem do “bag” para infusão a vácuo (adaptado)^[57].

A bomba utilizada para gerar o vácuo parcial, foi a da marca Edwards 8, juntamente com um reservatório para o excesso de matriz proveniente da infusão. A figura 4.9 mostra a bomba utilizada.



Figura 4.9 – Bomba de vácuo Edwards nº8.

O reservatório para o excesso de resina, conta com um vacuômetro, entrada para resina, saída para a bomba e uma válvula de segurança. A figura 4.10 mostra o reservatório e o vacuômetro em funcionamento durante uma infusão.



Figura 4.10 Vacuômetro em reservatório de excesso de resina.

Depois de cortado as seis camadas de tecido de fibra de carbono o setup do vacuum bag é montado tendo como base uma placa de acrílico com dimensões de 40cmx40cm, foi aplicado uma cera automotiva que serve como desmoldante. Posteriormente, colocou-se as conexões que facilitam a entrada da matriz e os tecidos permeáveis e absorventes. Fecha-se o “bag” e prepara-se a matriz com a quantidade necessária para realizar a infusão. Cada processo de infusão contou com 345 g de matriz LY 5052 (resina e agente de polimerização). A figura 4.11 a,b,c e d, abaixo mostram a seqüenciado processo de infusão. A figura 4.11 “a”, mostra o bag fechado e pronto para infusão e a figura “b”, mostra a matriz preparada para o início do processo de infusão. A figura C início do processo de infusão e a figura D, mostra o desenvolvimento da infusão dentro do “bag”.

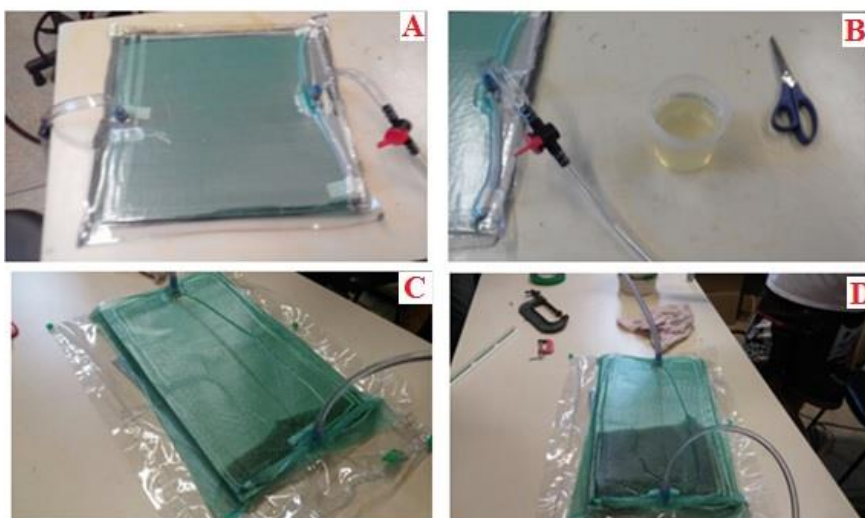


Figura 4.11 – Etapas do processo de infusão a vácuo. “A”, bag pronto para infusão, “B”, matriz pronta para o processo, “C”, início da infusão e “D”, desenvolvimento da infusão.

Após a infusão o laminado é colocado em uma estufa para realização da cura. Essa estufa possui um termostato regulável. A resistência é uma resistência de sapateiro. As duas horas iniciais, a temperatura ficou em 60°C e as últimas dez horas manteve-se o patamar de 80°C. Além da resistência, foi colocado um cooler de fonte de 12 volts, para facilitar a circulação de ar internamente e assim chegar mais rapidamente nas temperaturas necessárias.

4.3 – Revestimento a frio.

O processo de revestimento a frio, foi feito com os laminados de fibra de carbono. Cada laminado, possui seis camadas de tecido de fibra de carbono. O produto utilizado foi o MECATEC 5HT, que é um compósito, formado por uma parte cerâmica, uma parte polimérica e uma parte metálica.

A amostra foi fornecido pela empresa EUTETIC CASTOLIN, através do seu gerente comercial Marcelo Domingues e pelo representante comercial Ricardo Sebastião, para o desenvolvimento deste trabalho. Esse produto é desenvolvido para atuar contra a abrasão, erosão e corrosão. Sua aplicação é manual.

A densidade deste produto é de 0,98 g/cm³ e a relação de mistura é 4:1, ou seja, três partes do MECATEC 5HT e uma parte do catalisador. A forma de cura é com temperatura ambiente e a cura se dá em 24 horas.

O gel time para a aplicação é de 25 minutos após a adição do agente de cura. A forma de aplicação é manual e com espátula. Utilizou-se, uma balança para pesar as partes, recipiente para misturar os componentes, uma base de madeira com 50 cm x 50 cm, uma colher de madeira para facilitar o manuseio dos elementos. Nesta aplicação não houve uma necessidade prévia de preparo da superfície para aplicação. A figura 4.12 mostra os materiais necessários para aplicação do MECATEC sobre a placa de fibra de carbono.



Figura 4.12 Utensílios para aplicação do revestimento a frio em laminado de fibra de carbono. Após a pesagem dos elementos, totalizando 1000 g, sendo 800 g de MECATEC 5HT e 200 g de catalisador a serem misturados eles foram acondicionados no recipiente para serem misturados até formar uma mistura homogênea. A figura 4.13 a seguir mostra a mistura já homogênea.



Figura 4.13 Mistura das partes do composto MECATEC 5HT.

Depois de homogeneizado a mistura foi realizado a aplicação manual sobre a placa de fibra de carbono. A mistura foi dividida em várias porções e distribuídas pela placa com a espátula. Foi adicionado certa quantidade de água para facilitar a distribuição pela placa, tornado a massa menos densa. A água, não influencia no processo de cura, mas facilita a aplicação. Posterior a aplicação, utilizou-se um rolo de madeira, para homogeneizar a espessura do revestimento, dando um melhor acabamento e distribuindo melhor a massa pela placa. A figura 4.14 A a seguir mostra a aplicação e a utilização do rolo de madeira e a figura B mostra a aplaca finalizada com o produto já aplicado e seguindo para o período de cura de vinte e quatro horas, com temperatura ambiente.

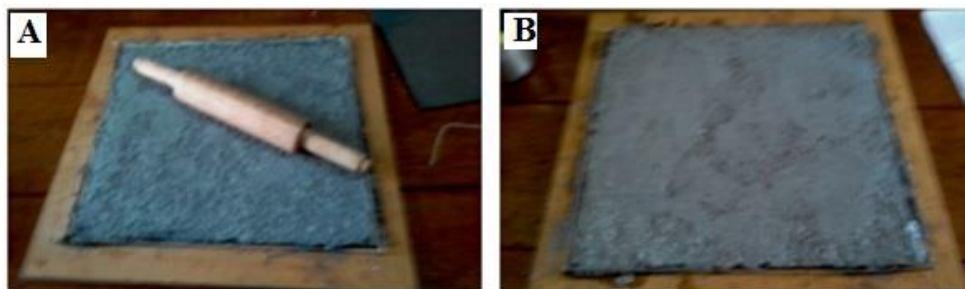


Figura 4.14 Revestimento aplicado sobre laminado de fibra de carbono.

4.4 Aspersão térmica.

O processo de aspersão térmica revestiu as placas de fibra de carbono, sendo uma placa de tecido de fibra de carbono, uma placa de tecido de fibra de carbono revestida com MECATEC 5HT. Dentro dos possíveis processos de aspersão, o processo aplicado foi “*arc flame*”. O sistema EUTRONIC ARC SPRAY 4, da empresa EUTETIC CASTOLIN, é um equipamento de aspersão térmica para alta produtividade. Esse equipamento conta com alimentação por dois arames, que podem ser sólidos ou tubulares, sendo energizados, formando na extremidade da tocha um arco elétrico, realizando a fusão dos arames, que dependendo do tipo de material que compõem o arame pode chegar até 5000°C. O material fundido é aspergido através de ar comprimido com velocidade de até 100 m/s, mantendo uma temperatura de trabalho menor que 200°C. As placas foram aspergidas com carbetto de tungstênio, em uma empresa cliente da EUTETIC CASTOLIN, em Sumaré, SP. Porém não foi permitido a aquisição de imagens durante o processo. As figura 4.15, mostra os equipamentos utilizados no processo de aspersão térmica nos laminados de fibra de carbono. Figura A, mostra o equipamento para aspersão térmica e Figura B tocha de aspersão térmica, aspergindo material em partículas incandescentes e a figura C, mostra o esquema de funcionamento deste equipamento.

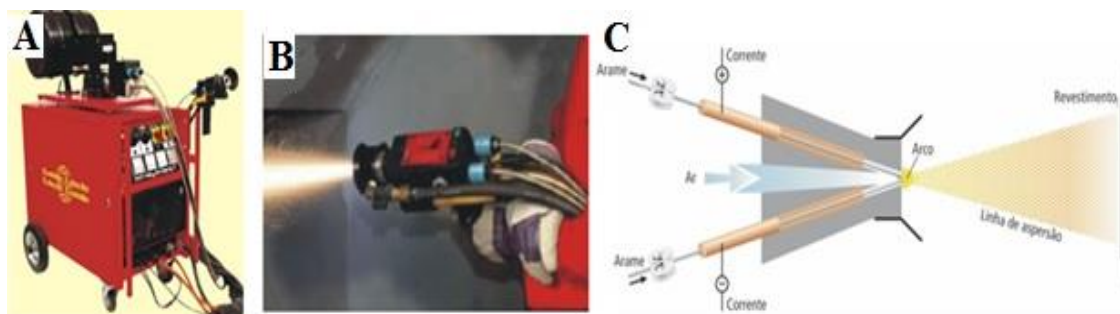


Figura 4.15 Equipamento para aspersão térmica. Figura A, o equipamento completo, figura B a tocha em funcionamento e a figura C, esquema de funcionamento para funcionamento da aspersão. Fonte:

<http://www.eutectic.com.br/metalizacao-aspersao-termica-eutronic-arc-spray.html> acesso

26/06/2017.

4.5 Corte com Jato d'água

O processo de extração por jato d'água CNC seguiu os parâmetros para a confecção dos corpos de provas ASTM D638. A máquina que foi utilizada é da marca FLOW, modelo mach 2 utilizou-se bico com tubo de mistura STANDART para PASER ECL 04/04 (TMS – 40-40-C) com 0,15 mm de diâmetro para o laminado sem revestimento MECATEC 5HT e um com 0,96mm de diâmetro, aumentando assim a vazão particulado abrasivo que por sua vez possui granulação 80. A velocidade de corte na fibra de carbono foi de 2723 mm/mim. A altura do bico do jato acima da placa foi dimensionada em 9 mm e a pressão do jato condicionou-se em 40 Ksi (276 MPa), as Figuras a seguir mostram o equipamento e o processo de corte dos laminados. A figura 4.16 mostra o equipamento da FLOW.



Figura 4.16 Equipamento da Flow

A figura 4.17 a seguir demonstra o processo de corte dos corpos de prova por jato d'água da placa de fibra de carbono sem revestimento.



Figura 4.17 Processo de corte por jato d'água.

A figura a seguir mostra o processo de corte dos corpos de provas em uma placa revestida com MECATEC 5HT. Neste tipo de processo, houve a mudança do anel que permite a vazão do abrasivo de corte de 0,15mm para 0,96mm de diâmetro.

Nesta placa o equipamento chegou a utilizar 50% de sua capacidade com relação à pressão de corte. A figura 4.18 mostra a placa sendo cortada



Figura 4.18 Corte por jato d'água de laminado de fibra de carbono

4.6 Ensaios mecânicos

Os ensaios de tração e flexão foram realizados no Laboratório de ensaios mecânicos da FEB – Bauru. O equipamento utilizado foi uma máquina de ensaios universais da marca EMIC. Para ensaios de tração a célula de carga aplicada foi a de 20 toneladas, com velocidade de avanço de 1mm/min, segundo a norma ASTM 3039. Para os ensaios de flexão, a norma ASTM 790 também foi utilizada. A célula de carga 20 toneladas foi aplicada, seguindo um carregamento de 0,1mm/min.

4.6.1 Ensaio de erosão

O ensaio de erosão foi aplicado nos corpos de prova extraídos dos laminados, possuindo as seguintes dimensões apresentadas na tabela.4.1 abaixo.

. Tabela 4.1 – Características dos corpos de prova para ensaio de erosão

Laminado	Peso (g)	Área (cm ²)	Volume (cm ³)	Densidade (g/cm ³)
FC	7,2	23,2	4,64	1,55
FC ASP	7,8	23,2	5,33	1,46
FC 5HT	25,1	23,2	16,24	1,55
FC 5HT ASP	26,3	23,2	17,4	1,51

O equipamento utilizado para a realização do processo é composto por dois compressores em serie, totalizando uma pressão de 100 libras por polegada ao quadrado. (100 lb/pol²). A figura 4.19 A, B, C e D, mostra os equipamento utilizado para o processo, juntamente com o abrasivo da empresa SAID, com mesha 10/12



Figura 4.19 (A), compressor, (B) cilo para abrasivo, (C) operador aplicando o processo de jateamento e (D) abrasivo utilizado nos ensaios. Fonte: <http://www.jatosulsp.com.br/> acesso 07/2017.

O abrasivo utilizado, é fornecido pela empresa SAID Abrasivos, com malha 10/12, sendo de origem basáltica e com composição química, hidróxido de sódio, óxido de magnésio, trióxido de alumínio, dióxido de silício, pentóxido de fósforo, óxido de potássio, óxido de cálcio, dióxido de titânio, óxido de manganês, trióxido de ferro. A figura 4.20 mostra o abrasivo utilizado da empresa SAID.



Figura 4.20 – Abrasivo com malha 10/12 utilizado no ensaio de erosão. Fonte: http://saidabrasivos.com.br/abrasivo_said_malha_10_12.asp acesso 07/2017

O bico utilizado foi de 1/2 polegada de diâmetro. A tabela 4.2, fornecido pela empresa JATO SUL, apresenta os principais bicos com suas características par o equipamento de jateamento.

Tabela 4.2 – Principais dimensões internas do bico para equipamento de jateamento. Fonte : : <http://www.jatosulsp.com.br/> acesso 07/2017.

Diâmetro interno do bico		Rendimento	Consumo do ar	Consumo de abrasivo	Potência do motor
Pol.	mm	M2/h	PCM	Kg/h	HP
¼"	6,4	10	81	224	17
5/16"	8,0	15	137	368	29
3/8"	9,6	20	196	524	41
7/16"	11,2	30	254	720	53
½"	12,7	40	338	920	70

4.7 Microscopia

A caracterização por microscopia foi realizada com duas técnicas distintas. A primeira através de microscopia óptica, com o intuito de caracterizar o grau de impregnação da matriz no reforço. O microscópio utilizado é da marca Carl Zeiss, modelo Axio Vert.A1 MAT, de platina invertida e equipamento de aquisição de imagens, do laboratório de materiais da FATEC Jahu.

A preparação da amostra, seguiu de corte da amostra em um microtom, lixamentos, com lixas de grana 320, 420, 600 e 1200. Posteriormente polimento com alumina em suspensão de 0,3 μm . Limpeza com água corrente e secagem com ar seco. A segunda técnica é a caracterização por microscopia eletrônica de varredura (MEV), que foi feita no Instituto de Química da UNESP de Araraquara, SP. As amostras foram cortadas em microtom e limpas com água corrente, sendo secas com ar posteriormente e preparadas para serem colocadas em suportes (*stubs*). A figura 4.21 a seguir mostra o MEV utilizado no Instituto de Química da Unesp de Araraquara.



Figura 4.21 Microscópio eletrônico de varredura do Instituto de Química de Araraquara UNESP.

Para obtenção das imagens necessitou-se de uma aceleração que variou entre 10keV e 15keV, com ampliação variando 1000X à 5.000 X. Além desses parâmetros houve recobrimento com ouro para facilitar a condução de elétrons. A operação esteve a cargo do técnico responsável, porém sob coordenação do discente responsável pelo trabalho.

5. Resultados e discussão

5.1 – Resultados da caracterização das matrizes epóxicas por termogravimetria (TG) e calorimetria exploratória diferencial (DSC).

Os estudos da termogravimetria (TG) e a calorimetria exploratória diferencial (DSC), contribuíram para identificar qual das matrizes possui a maior temperatura de degradação, servindo como orientação para aplicação do processo de aspersão térmica nos laminados, sendo caracterizada três amostras, duas do grupo Bisfenol A e uma do grupo Bisfenol F. Esse conhecimento prévio relaciona-se com a perda de massa que cada matriz apresente de acordo com a variação da temperatura TG, e no caso do DSC, mostra os picos de variação de energia, tanto endotérmicos quanto exotérmicos.

A matriz polimérica SQ2001, do grupo Bisfenol A, apresenta o início de perda de massa em torno de 96°C. A transição vítrea (T_g) acontece aproximadamente a 75°C. Esse é o primeiro ponto exotérmico da amostra. O primeiro ponto endotérmico está próximo a temperatura de 275°C. O ponto de fusão cristalina (T_x) ocorre acima de 351°C, coincide com o início de maior perda de massa da amostra. A figura 5.1 a seguir mostra os pontos de inflexão das curvas de TG e DSC.

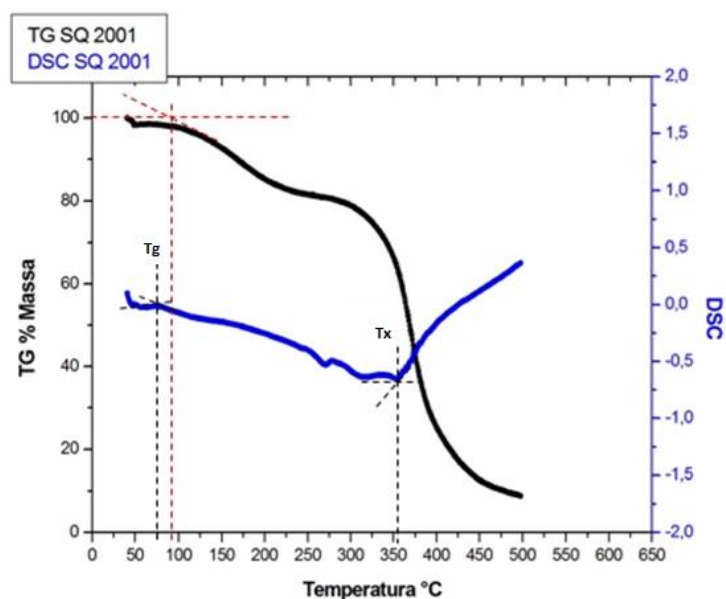


Figura 5.1 Curva de TG e DSC da matriz SQ 2001 em cura aberta com identificação do início da degradação em 99°C, transição vítrea T_g aproximadamente em 75°C e da temperatura do início da cristalização T_x em torno de 351°C

O comportamento térmico é interessante para as possíveis aplicações em materiais compósitos que não necessitem de temperaturas de trabalho acima de 99°C, pois, acima desse patamar a perda de massa pode trazer problemas para o compósito.

A matriz SQ 2004, é semelhante a matriz SQ 2001, porém com menor viscosidade, devido a adição de monômero de estireno. Essa adição, além de mudar a viscosidade, altera o ponto de Tg da amostra, estando próximo a 55°C, o ponto de fusão cristalina está próximo dos 323°C. A perda de massa começa próximo dos 105°C. Essa matriz polimérica, possui seu primeiro ponto exotérmico acima dos 50°C. A figura a seguir mostra a posição de Tg e o Tx da matriz. É interessante observar que ambas as matrizes do grupo Bisfenol A, apresenta semelhanças tanto na curva de TG, quanto na curva de DSC. A figura 5.2 mostra esta semelhança.

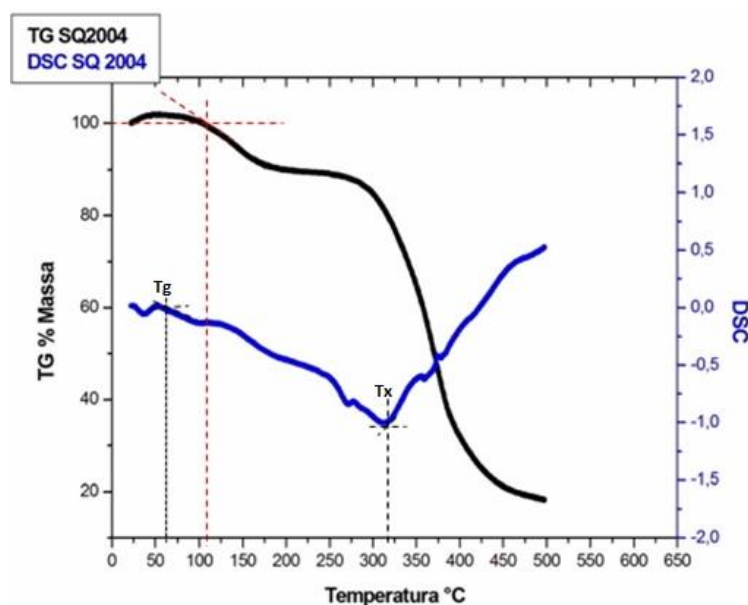


Figura 5.2 Curva de Tg e DSC da matriz SQ 2001 em cura aberta com identificação do início da degradação em 105°C, transição vítrea Tg aproximadamente em 55°C e da temperatura do início da cristalização Tx em torno de 323°C

Tanto a SQ 2001 quanto a SQ 2004, são matrizes poliméricas disponíveis no mercado e com custo acessível. Porém ambas devem ser aplicadas em materiais que não necessitem de um gradiente térmico acima de 100°C. Com relação a viscosidade, a SQ 2001, é mais viscosa, tornando a infusão mais complicada ou mesmo a aplicação por Hand lay up.

A SQ 2004, por ter certa diluição possui uma melhor impregnação tanto por infusão quanto pelo método Hand lay up. Essas duas matrizes não atingem o gradiente térmico necessário para evitar a degradação de perda de massa, não sendo recomendada para o presente trabalho proposto, que precisa manter a integridade para não afetar a estrutura do material compósito.

A matriz LY 5052, pertence ao grupo do Bisfenol F, considerada uma novolac, possui características térmicas diferentes das do grupo Bisfenol A. A viscosidade, se comparado as anteriores, pode-se classificar como intermediária, boa impregnação e facilidade para a infusão a vácuo.

Foi realizado duas caracterizações de Tg e DSC da matriz LY 5052, sendo uma com cura aberta e outra com cura em vácuo. Os resultados mostram diferença entre os processos. A diferença ocorre por causa do processo de difusão gasosa, afetando diretamente a Tg da matriz polimérica, que é de aproximadamente 116°C. A figura 5.3 a seguir mostra o resultado da caracterização por Tg e DSC da matriz LY 5052 em cura aberta.

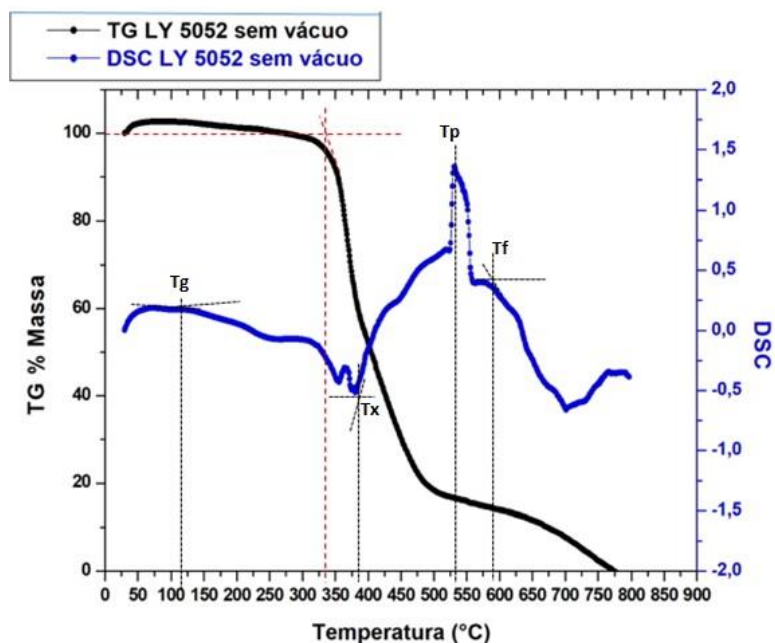


Figura 5.3 Curva de Tg e DSC da matriz LY 5052 em cura aberta com identificação da temperatura de degradação a 327°C, transição vítrea Tg, da temperatura do início da cristalização Tx, da temperatura do pico de cristalização Tp e a temperatura de fusão Tf.

O processo de cura em vácuo evita a difusão gasosa do hidrogênio e do oxigênio, que comprometem a qualidade e a quantidade de ligações cruzadas entre os meros da matriz. Além deste fator, observa uma variação do ponto da Tg, cujo valor é de aproximadamente 125°C, quando curada em vácuo. A figura 5.4 a seguir mostra o resultado da caracterização por Tg e DSC da matriz LY 5052 curada em vácuo.

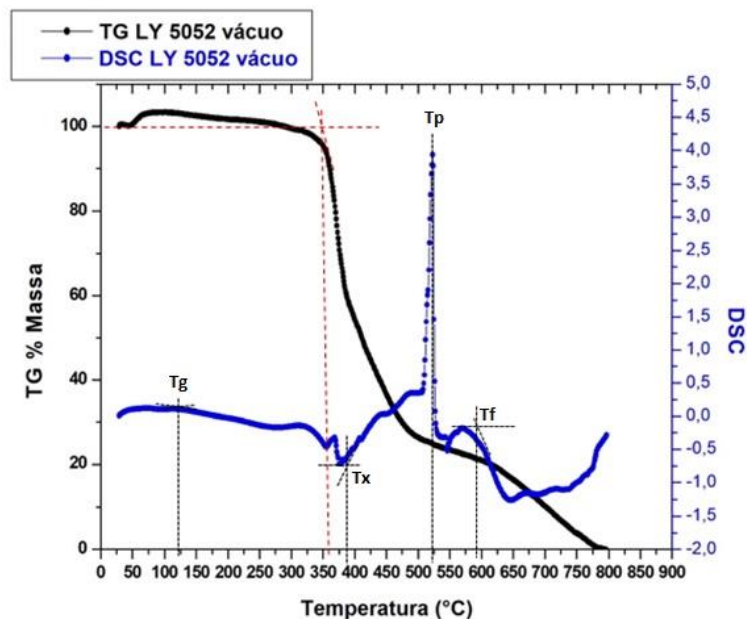


Figura 5.4 - Curva de Tg e DSC da matriz LY 5052 curada em vácuo com identificação da temperatura de transição vítrea Tg, da temperatura do início da cristalização Tx, da temperatura do pico de cristalização Tp e a temperatura de fusão Tf.

A caracterização por termogravimetria (TG), também mostra diferença com relação ao processo de cura da matriz. Essa perda de massa está relacionada com a difusão gasosa, que permite a entrada de hidrogênio e oxigênio, formando ligações químicas fracas, favorecendo essa perda de massa. A matriz que foi curada sem vácuo começa a perder massa em torno de 351 °C.

A cura em vácuo evita o fenômeno da difusão gasosa, favorecendo uma melhora na qualidade e quantidade de ligações cruzadas que a matriz faz durante o processo de polimerização, contribuindo assim para uma melhora em diversas características térmicas deste material. A figura 5.5 mostra as duas curvas em um mesmo gráfico, mostrando a variação da perda de massa com relação a temperatura.

Esse resultado pode ser interpretado observando as curvas de DSC e a variação do fluxo de calor para cada uma das matrizes.

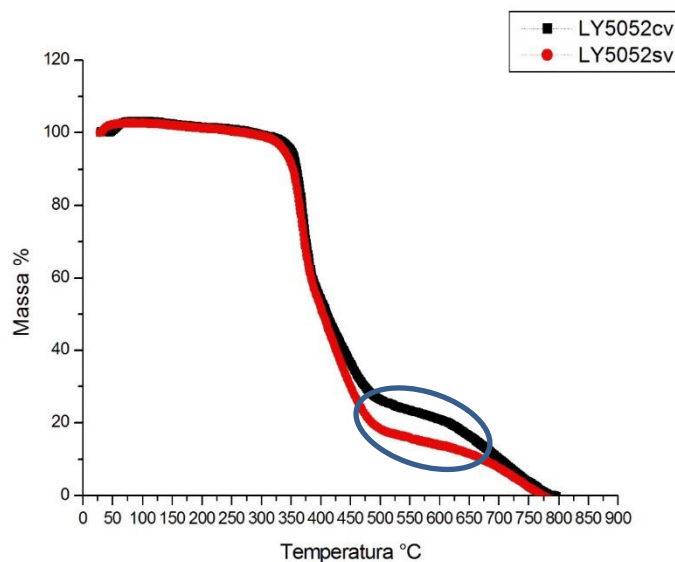


Figura 5.5 Curvas de Tgs da matriz LY 5052, curva vermelha (cura aberta) e curva preta (cura em vácuo)

A análise por DSC nesta região circulada, mostra que a matriz que não foi curada em vácuo (Figura 5.3) possui uma área maior, consequentemente um maior fluxo de calor, ao contrário, a matriz que foi curada em vácuo (Figura 5.4) possui uma menor área, mesmo apresentando um pico exotérmico de maior amplitude, favorecendo essa diferença de degradação neste ponto do gráfico.

A matriz LY 5052, possui um gradiente térmico que atende as necessidades deste trabalho, ou seja, ela irá começar a perder massa, acima dos 100°C, mantendo a integridade do compósito. Essa integridade se torna importante, devido a sequência que o laminado de fibra de carbono irá ser submetido, que no caso é o recobrimento por aspersão térmica.

5.2 – Resultados da caracterização das matrizes epóxicas por difração de raios X (DRX).

Um estudo com a finalidade de determinar as possíveis fases cristalinas da matriz polimérica LY 5052 foi realizado pela técnica de difratometria de raios-X. O objetivo foi a verificação das possíveis fases cristalinas presentes nas amostras curadas em vácuo e aberta.

Os resultados, estão relacionados com a separação intermediária média (R) das cadeias de meros da matriz, HW, são as distâncias d1 e d2, derivadas da Lei de Bragg, expressão de distribuição qualitativa e a porcentagem de cristalinidade da matriz. Na figura 5.6 a seguir os resultado do difratograma para matriz em cura aberta (curva preta) e a matriz em cura em vácuo (curva vermelha).

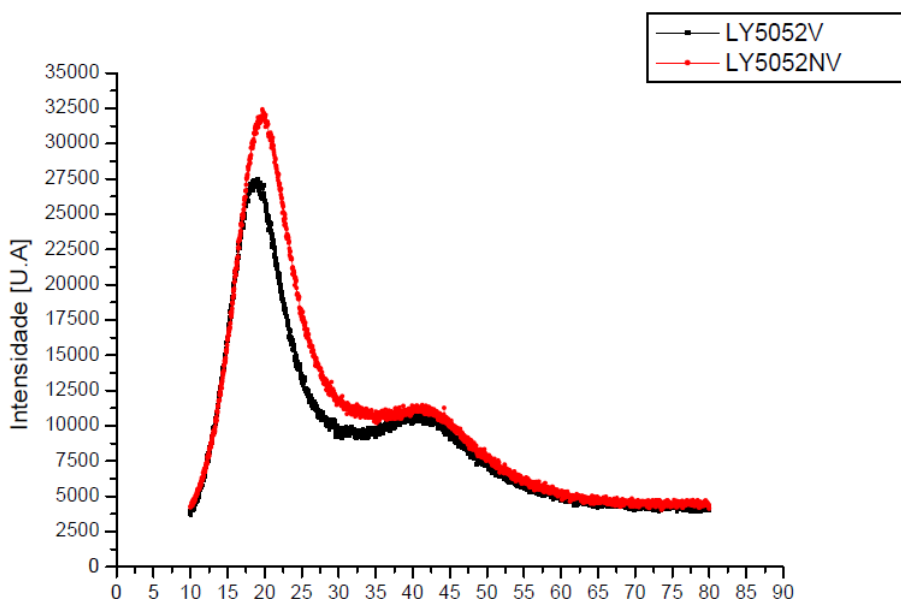


Figura 5.6 – Curvas resultantes da caracterização de raios X. Curva vermelha (cura em vácuo) e curva preta (cura aberta).

A tabela abaixo mostra os resultados das análises de R, HW e da porcentagem de cristalinidade da matriz, juntamente com a variação entre elas.

Tabela 5.0 Resultados da caracterização de raios X para LY 5052 – cura aberta (A) e LY 5052 - cura em vácuo (B)

Matriz polimérica	$R = (5/8 * \lambda) / \sin \theta$	$n\lambda = 2 * d * \sin \theta$ HW = d ₁ - d ₂	$\% C = \frac{I_c}{I_c + (K * I_a)} \times 100$
A	4,93 Å	1,86 Å	26,92
B	4,10 Å	2,11 Å	28,99
Variação (A-B)	0,83 Å	0,25 Å	2,07

Os resultados da caracterização por TG/DSC e DRX, mostram que a matriz que foi curada em vácuo possui melhores características físicas / químicas em

comparação em a matriz que foi curada de forma aberta. A cura em vácuo evita a entrada de oxigênio e hidrogênio. Pois a água hidrolisa algumas interações de van der Waals e diminui a reticulação da resina, conferindo maior mobilidade à cadeia polimérica. A penetração destas substâncias pode levar a uma degradação das propriedades físicas e mecânicas da matriz. A figura 5.7, mostra as possíveis formações de ligações secundárias, favorecidas pela entrada do oxigênio e o hidrogênio.

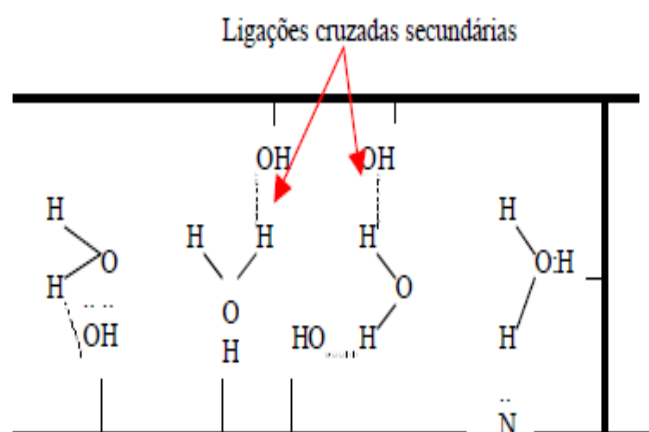


Figura 5.7 Reações de ligações secundárias provenientes do processo de difusão gasosa.

5.2 Ensaio Mecânicos

5.2.1 Ensaio de Tração

Os ensaios mecânicos de tração e flexão, foram realizados respeitando as normas ASTM D 3039, para ensaios de tração, que define tanto a forma dos corpos de prova, como a velocidade de carregamento. Os resultados apontaram que a matriz polimérica do grupo Bisfenol F possui os melhores resultados. Com relação a matriz do grupo Bisfenol A, a matriz SQ 2001, é a que tem melhores resultados com relação a tensão. A tabela 5.1 mostra os resultados médios dos ensaios de tração para os corpos de provas de matrizes poliméricas.

Tabela 5.1 – Resultados dos ensaios de tração para matrizes poliméricas.

Matrizes Poliméricas	σ_T (MPa)	Desvio padrão	Deformação (%)	Desvio padrão
SQ 2004 (sem vácuo)	25	1,20 ±	7,50	1,00 ±
SQ 2001 (sem vácuo)	31	1,00 ±	6,00	0,80 ±
LY 5052 sem vácuo	72	0,90 ±	8,20	0,70 ±
LY 5052 com vácuo	83	0,70 ±	10,05	0,50 ±

A diferença com relação a tensão de tração entre a resina LY 5052 com vácuo e a SQ 2004 é de 69,87 %. A diferença também é expressiva quando comparada com a resina SQ 2001, tendo como resultado a diferença de 62,62 %. A diferença entre o processo de infusão a vácuo entre as resinas do grupos Bisfenol F, a diferença é de 13,25 %A figura 5.8 a seguir mostra graficamente os resultados das matrizes estudadas.

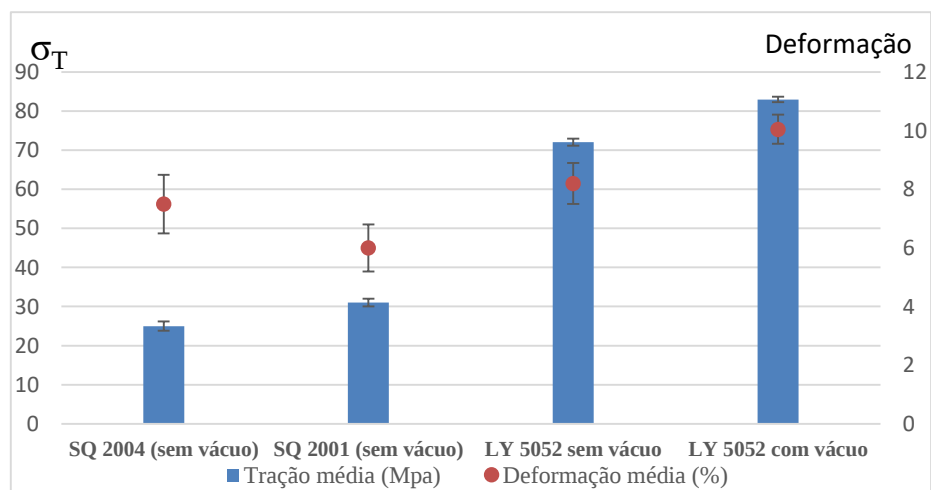


Figura 5.8 Resultados dos ensaios de tração para matrizes poliméricas do grupo epóxi.

Os ensaios de tração para laminados de fibra de carbono com a matriz LY 5052 em vácuo, obtive uma média de 227 Mpa e uma deformação média de 0,27 %. A tabela 5.2 mostra os valores obtidos nos ensaios de tração.

Tabela 5.2 – Resultados dos ensaios de tração para laminados de fibra de carbono.

Corpos de prova	σ_t	Deformação (%)
cp1	198	0,26
cp2	188	0,13
cp3	294	0,43
CP Médio	227 ($\pm 58,52$)	0,27 ($\pm 0,15$)

A figura 5.9 a seguir apresenta as curvas provenientes do ensaio de tração para o laminado de fibra de carbono junto a uma curva média resultante.

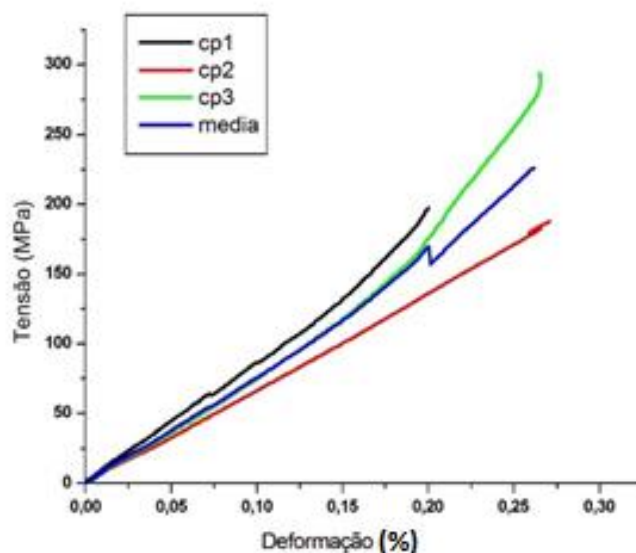


Figura 5.9 Curvas resultantes do ensaio de tração para laminados de fibra de carbono.

O laminado de fibra de carbono aspergido apresenta resultados melhores do que os laminados de fibra de carbono apenas. A tabela 5.3 aponta os valores obtidos através dos ensaios de tração.

Tabela 5.3 – Resultados dos ensaios de tração para laminados de fibra de carbono aspergido.

Corpos de prova	σ_t	Deformação (%)
cp1	244	6,90
cp2	274	7,89
cp3	255	7,30
cp4	223	7,80
CP Médio	258 ($\pm 21,30$)	7,36 ($\pm 0,46$)

Comparando os resultados do laminado de fibra de carbono aspergido com o laminado de fibra de carbono, a diferença da tensão de tração é de 31 MPa, ou seja, uma diferença de 12,01 %. A figura a seguir mostra as curvas provenientes dos ensaios de tração.

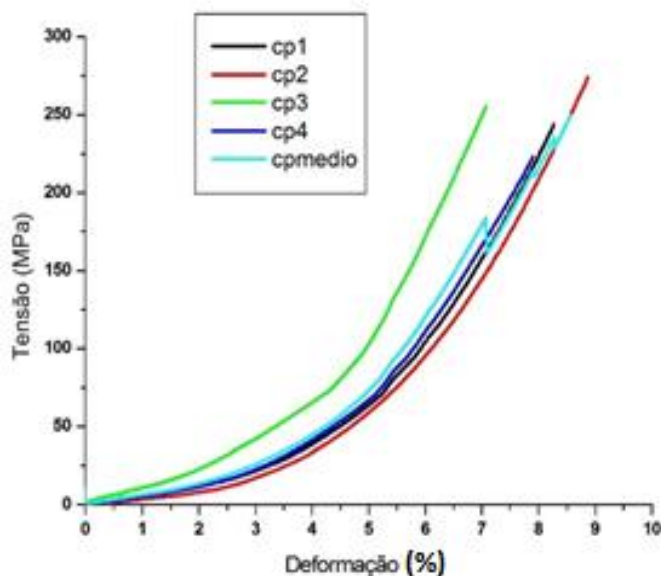


Figura 5.10 - Curvas resultantes do ensaio de tração para laminados de fibra de carbono aspergido.

Na figura 5.10, podemos observar uma certa tendência das curvas, uma melhor característica de deformação ou seja uma melhor ductilidade do laminado, quando comparados com o laminado de fibra de carbono apenas. O laminado sem tratamento, mostra uma certa fragilidade, tendo uma deformação menor do que os outros. Sendo, menor ductilidade, consequentemente, uma menor tenacidade.

O Laminado de fibra de carbono revestido a frio com MECATEC 5 HT, apresenta características distintas dos laminados anteriores. Com relação a resistência a tração, não obteve resultados satisfatórios quando confrontados com os laminados de fibra de carbono e fibra de carbono aspergido. A tabela 5.4 indica os resultados dos ensaios de tração para o laminado de fibra de carbono revestido a frio com o produto MECATEC 5HT, aplicado de forma manual.

Tabela 5.4 Resultados dos laminado de fibra de carbono revestido com MECATAEC 5HT.

Corpos de prova	σ	Deformação (%)
cp1	113	7,58
cp2	104	8,12
cp3	135	7,86
cp4	101	6,90
CP Médio	113 ($\pm 15,26$)	7,62 ($\pm 0,52$)

Comparando os laminados, de fibra de carbono, revestido a frio com o produto MECATEC 5HT com o laminado de fibra de carbono, constata-se uma diferença de 50,22% ou seja, o laminado de fibra de carbono possui melhor resistência a tração. O laminado de fibra de carbono aspergido, também possui uma diferença de 56,20 %, com melhor resultado para o laminado aspergido. A deformação do laminado de fibra de carbono revestido é maior quando aferido em relação ao laminado de fibra de carbono e fibra de carbono aspergido. A diferença chega a ser de 96,40 % e 3,41 % para o laminado aspergido. A figura 5.11, a seguir mostra as curvas do ensaio de tração e a curva média.

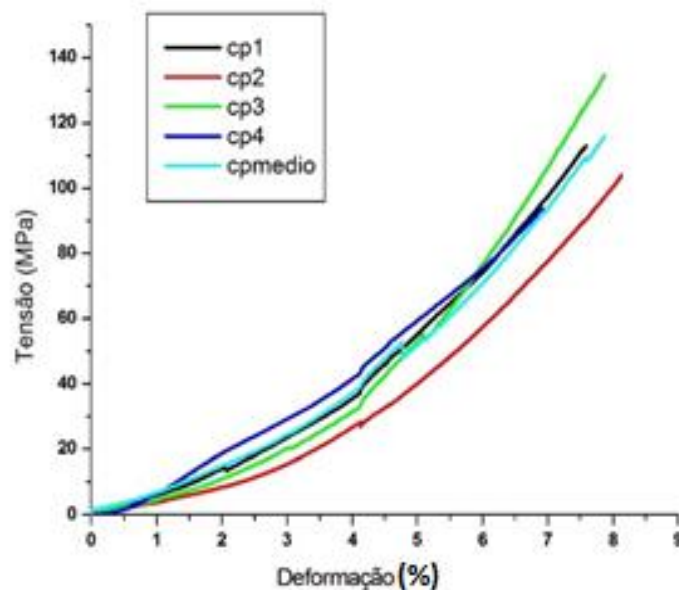


Figura 5.11. - Curvas resultantes do ensaio de tração para laminados de fibra de carbono revestido com MECATEC 5 HT.

A tabela 5.5 mostra os resultados dos ensaios para o laminado de fibra de carbono revestido a frio com o produto MECATEC 5HT e aspergido, através do equipamento EUTRONIC ARC SPRAY 4, juntamente com um valor médio deste ensaio tanto para a tensão o quanto para a deformação.

Tabela 5.5 Resultados do laminado MECATEC 5HT e aspergido.

<i>Corpos de prova</i>	σ	<i>Deformação (%)</i>
cp1	119	8,05
cp2	104	7,92
cp3	98	8,10
cp4	118	8,05
cp5	158	9,50
CP Médio	119 ($\pm 23,42$)	8,32 ($\pm 0,71$)

Este laminado obteve um resultado um pouco melhor do que o laminado de fibra de carbono revestido a frio, todavia ressalta-se um resultado inferior aos laminados de fibra de carbono e fibra de carbono aspergido. Contrapondo-se aos laminados anteriores, a deformação é a maior entre eles. A figura 5.12 a seguir indica as curvas provenientes do ensaio de tração para o laminado de fibra de carbono revestido a frio com o produto MECATEC 5HT e aspergido, junto a uma curva média resultante.

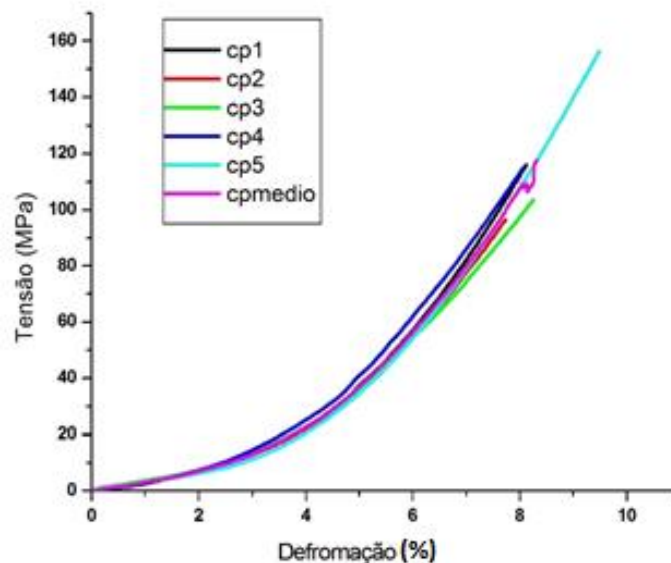


Figura 5.12 - Curvas resultantes do ensaio de tração para laminados de fibra de carbono revestido com MECATEC 5 HT e aspergido.

A tabela 5.6, exibe os valores médios dos laminados estudados, juntamente com as deformações médias, evidenciando as diferenças de ductilidade e tenacidade apresentados.

Tabela 5.6 – Médias das tensões de tração e deformação dos laminados.

Corpos de prova médios	σ_t	Deformação (%)
FC	227	0,27
FC ASP	258	7,36
FC5HT	113	7,62
FC5HTASP	119	8,32

A figura 5.13, apresenta o resultado das curvas médias dos laminados ensaiados, evidenciando as tendências de deformação mais suaves e com melhor tenacidade e a curva produzida pelo laminado de fibra de carbono, mais frágil, com menor deformação e tenacidade.

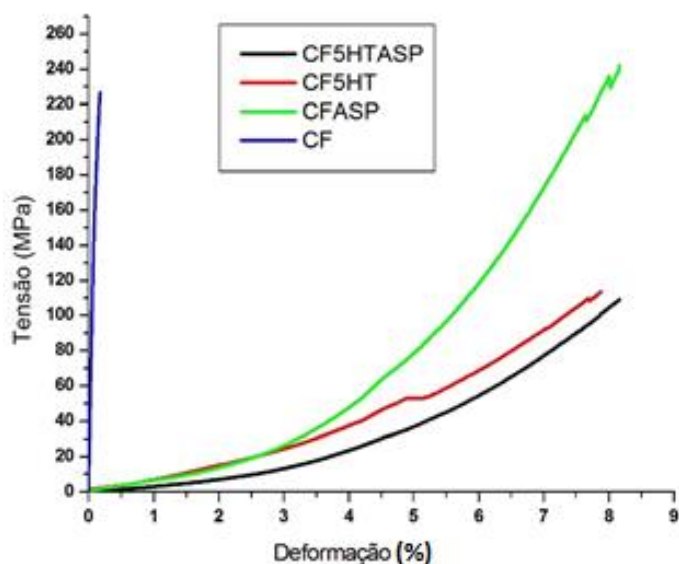


Figura 5.13 – Curvas médias resultantes dos ensaios de tração para os laminados de fibra de carbono

Observando a figura, os laminados de fibra de carbono, possuem a menor ductilidade, tornando -se frágeis. Os tratamentos aplicados nos outros laminados melhoraram a ductilidade dos mesmo.

5.2.2 Ensaios mecânicos de flexão.

Com relação aos ensaios mecânicos de flexão, eles foram realizados respeitando as normas ASTM D 790 para ensaios de flexão em materiais compósitos poliméricos, que define tanto a forma dos corpos de prova, como a velocidade de carregamento, que é de 0,01mm/min. Os resultados apontaram que a matriz polimérica do grupo Bisfenol F possui os melhores resultados. Com relação a matriz do grupo Bisfenol A, a matriz SQ 2001 novamente, é a que tem melhores resultados com relação a tensão de flexão. A tabela 5.7 mostra os resultados médios dos ensaios de tração para os corpos de provas de matrizes poliméricas.

Tabela 5.7 – Resultados dos ensaios de flexão para matrizes poliméricas.

Matrizes Poliméricas	σ_F (MPa)	Desvio padrão	Deformação (%)	Desvio padrão
SQ 2004 (sem vácuo)	27	1,00 ±	5,00	1,10 ±
SQ 2001 (sem vácuo)	62	1,20 ±	4,25	0,90 ±
LY 5052 sem vácuo	101	0,90 ±	4,50	0,60 ±
LY 5052 com vácuo	110	0,85 ±	5,50	0,55 ±

A diferença com relação a tensão de flexão entre a resina LY 5052 com vácuo e a SQ 2004 é de 75,45 %. A diferença também é expressiva quando comparada com a resina SQ 2001, tendo como resultado a diferença de 43,63 %. A diferença entre o processo de infusão a vácuo entre as resinas do grupos Bisfenol F, a diferença é de 8,18 %A figura 5.14 a seguir mostra graficamente os resultados das matrizes estudadas.

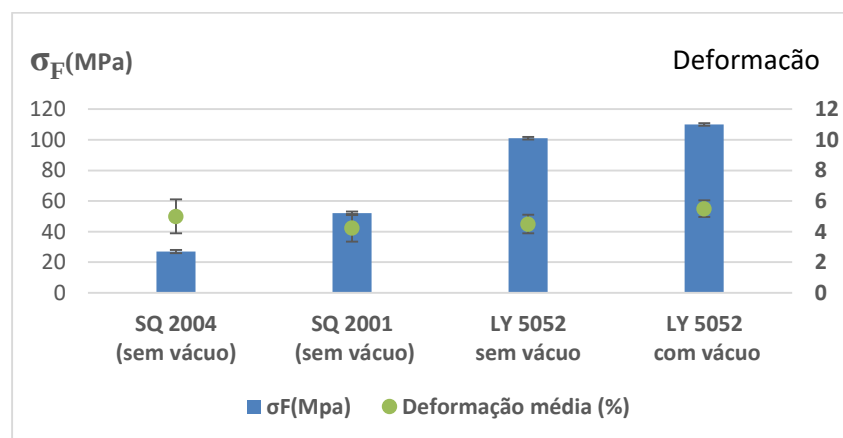


Figura 5.14 Resultados dos ensaios de flexão para matrizes poliméricas do grupo epóxi.

Os laminados de fibra de carbono sem revestimento apresentam melhores resultados com relação a tensão de flexão, seguindo a mesma tendência dos ensaios

de tração, porém com uma deformação menor, evidenciando uma certa falta de ductilidade do material, diferentemente dos outros, que receberam o revestimento. A tabela 5.8 apresenta os valores obtidos do ensaio de flexão para o laminado de fibra de carbono apenas. Os valores obtidos estão convertidos para tensão de flexão.

Tabela 5.8 – Dados retirados do ensaio de flexão em 3 pontos para laminado de fibra de carbono.

<i>FC</i>	<i>σ_f</i>	<i>Deformação (%)</i>
CP01	197	2,29
CP02	194	1,27
CP03	185	1,15
CP04	159	1,12
CP médio	184 ($\pm 17,26$)	1,46 ($\pm 0,55$)

Tanto no ensaio de tração como no de flexão, as deformações são baixas, quando comparados com outros laminados, para a tensão de tração a deformação média foi 0,27 mm e na tensão de flexão a deformação média é de 1,46 mm, uma diferença grande entre eles, porém menor quando comparados com os laminados revestidos e aspergidos. A figura 5.15 a seguir mostra as curvas provenientes dos ensaio de flexão, já convertido para tensão de flexão.

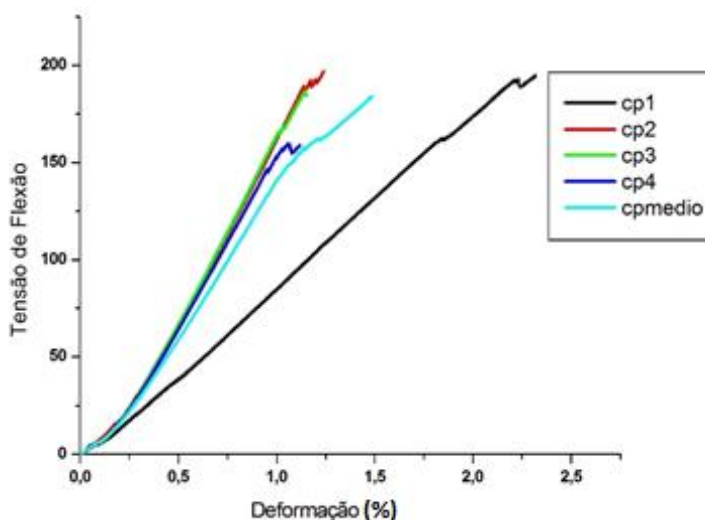


Figura 5.15 - Curvas resultantes do ensaio de flexão para laminados de fibra de carbono.

O laminado de fibra de carbono aspergido, apresentou uma tensão de flexão menor, se comparado com o laminado de fibra de carbono apenas, uma diferença de 32,60 % contudo quanto a deformação percebe-se uma melhor ductilidade, gerando

uma diferença de 48,04 % e consequentemente a tenacidade também é maior. A tabela 5.9, apresenta os valores retirados do ensaio.

Tabela 5.9 – Dados retirados do ensaio de flexão em 3 pontos para laminado de fibra de carbono aspergido

<i>FCASP</i>	σ_f	<i>Deformação (%)</i>
CP01	116	2,90
CP02	125	2,80
CP03	132	2,79
CP04	123	2,75
CP médio	124 ($\pm 6,58$)	2,81 ($\pm 0,06$)

A figura 5.16, expõem as curvas de tensão de flexão, juntamente com as deformações. Estes dois laminados, possuem baixa ductilidade quando comparados com outros laminados revestidos com o produto MECATEC 5HT, todavia os valores de tensão de flexão são maiores. A figura 5.16 indica as curvas de tensão de flexão para o laminado de fibra de carbono aspergido. Neles observa-se certa semelhança com os laminados de fibra de carbono, pois possuem baixa ductilidade e uma melhor resistência quando comparados com outros laminados deste estudo.

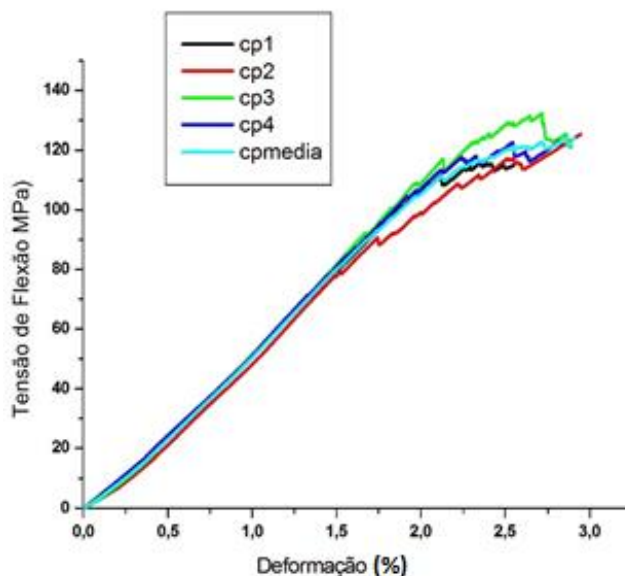


Figura 5.16 - Curvas resultantes do ensaio de flexão para laminados de fibra de carbono aspergidos.

Os laminados de fibra de carbono revestido com o produto MECATEC 5HT, apresentam uma menor resistência a flexão contudo a deformação é maior. Ressalta-se que a espessura destes laminados é diferentes dos laminados de fibra de carbono e fibra de carbono aspergido, mudando assim o momento de inércia, que consequentemente afeta a resistência dos laminados revestidos a frio. A tabela 5.10

a seguir, mostra os resultados para o laminado de fibra de carbono revestido com o produto MECATEC 5HT.

Tabela 5.10 – Dados retirados do ensaio de flexão em 3 pontos para laminado de fibra de carbono revestido a frio com MECATEC 5HT.

FC5HT	σ_f	Deformação (%)
CP1	84	2,48
CP2	108	2,20
CP3	86	2,10
CP4	108	2,05
CP Médio	97 ($\pm 13,3$)	2,21 ($\pm 0,19$)

Constata-se certa diferença de tensão de flexão entre o laminado FC 5HT e o laminado fibra de carbono e fibra de carbono aspergido. No caso da fibra de carbono, a diferença de resistência é de 47,28 % e com relação ao laminado de fibra de carbono aspergido a diferença é de 21,77 %. Quando analisado a deformação, existe uma inversão, revelando uma melhor ductilidade para os laminados revestidos a frio. Na comparação do laminado revestido a frio com o laminado de fibra de carbono a diferença é de 33,93 % e quando comparado com o laminado de fibra de carbono aspergido a diferença chega a 21,35 %. Neste caso específico o laminado aspergido oferece uma melhor deformação devido ao aquecimento proporcionado pelo processo, forçando uma recristalização da matriz, que influenciou os resultados obtidos. A figura 5.17, apresenta as curvas retiradas dos ensaio de flexão.

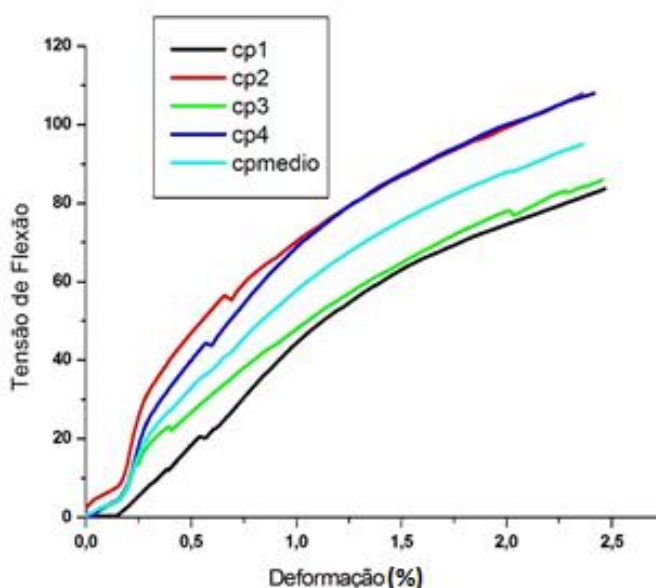


Figura 5.17 - Curvas resultantes do ensaio de flexão para laminados de fibra de carbono revestido a frio.

A tabela 5.11 exibe os valores obtidos do ensaio de flexão para o laminado revestido a frio com o produto MECATEC 5HT e aspergido com carbetto de tungstênio, sendo convertidos para tensão de flexão.

Tabela 5.11 – Dados retirados do ensaio de flexão em 3 pontos para laminado de fibra de carbono revestido a frio com MECATEC 5HT e aspergido.

FC5HTASP	σ_f	Deformação (%)
CP1	150	2,55
CP2	115	2,40
CP3	107	2,39
CP4	101	2,13
CP Médio	118 ($\pm 21,92$)	2,37 ($\pm 0,17$)

Comparando com a tensão de tração, compreende-se que a média esta bem próxima, tendo uma variação de apenas 01 MPa, ou seja, com uma diferença de apenas 0,84%. Com relação a deformação, no carregamento de tração, a deformação para o laminado FC5HTASP é maior do que na flexão. A figura a seguir mostra as curvas provenientes do ensaio de flexão, já convertidos para tensão de flexão. Com relação a deformação no ensaio de flexão, este laminado tem o maior resultado. No caso da tensão é o laminado que possui a terceira melhor resistência quando comparados. A figura 5.18, exibe as curvas provenientes do ensaio de flexão.

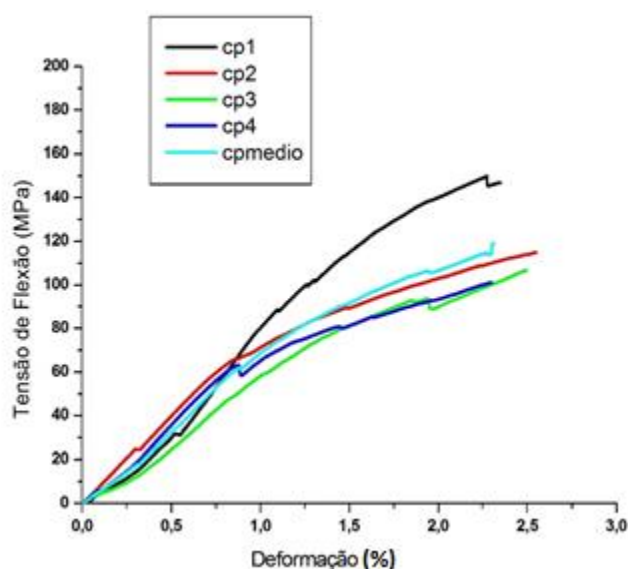


Figura 5.18 - Curvas resultantes do ensaio de flexão para laminados de fibra de carbono revestido a frio e aspergido.

Na figura 5.18, observa-se uma tendência de curva semelhante ao ensaio de tração deste mesmo laminado, ou seja, possui certa ductilidade, porém a orientação das curvas são contrárias, devido ao tipo de carregamento. A tabela 5.12, exibe os valores médios dos laminados estudados, juntamente com as deformações médias, evidenciando as diferenças de ductilidade e tenacidade apresentados.

Tabela 5.12 – Médias das tensões de flexão e média das deformações dos laminados.

Corpos de prova médios	σ_t	Deformação (mm)
FC	184	1,46
FC ASP	124	2,81
FC5HT	97	2,21
FC5HTASP	118	2,37

A figura 5.19, apresenta o resultado das curvas médias dos laminados ensaiados, evidenciando as tendências de deformação mais suaves e com melhor tenacidade e a curva produzida pelo laminado de fibra de carbono, mais frágil, com menor deformação e tenacidade.

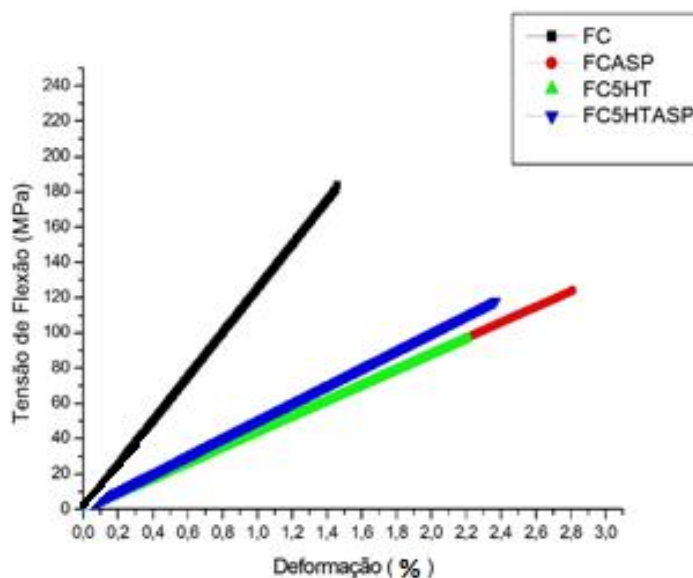


Figura 5.19 – Curvas médias resultantes dos ensaios de flexão para os laminados de fibra de carbono

Observando a figura, os laminados de fibra de carbono, possuem a menor ductilidade, tornando -se frágeis. Os tratamentos aplicados nos outros laminados melhoraram a ductilidade dos mesmo e como consequência aumentaram a tenacidade. A tabela 5.13 a seguir mostra os dados das médias de tensão de tração com seus respectivos desvios padrões. O laminado que obteve melhor resistência foi

o laminado de fibra de carbono aspergido com carбето de tungstênio e o que obteve a menor resistência foi o laminado de fibra de carbono revestido a frio com o produto MECATEC 5HT.

Tabela 5.13 – Tensões médias de tração dos laminados.

	σ_t média MPa	Desvio padrão
CF média	227	58,52
CF5HT média	113	15,26
CF5HTASP média	119	23,42
CFASP média	258	21,3

A figura 5.20, mostra graficamente esses desempenhos de acordo com o ensaio de tração aplicados a estes laminados.



Figura 5.20 – Médias resultantes dos ensaios de tração para os laminados de fibra de carbono.

A tabela 5.14, indica os resultados médios dos laminados ensaiados em flexão. O laminado de fibra de carbono, obteve o melhor resultado. O laminado revestido a frio com o produto MECATEC 5HT, não obteve o melhor desempenho com relação a tensão mas, possui mais ductilidade do que o laminado de fibra de carbono.

Tabela 5.14 – Tensões médias de flexão dos laminados.

	σ_f média MPa	Desvio padrão
CF média	184	17,26
CF5HT média	97	13,30
CF5HTASP média	118	21,92
CFASP média	124	2,81

A figura 5.21, mostra os valores médios e seus respectivos desvios padrões para uma melhor comparação de resultados.

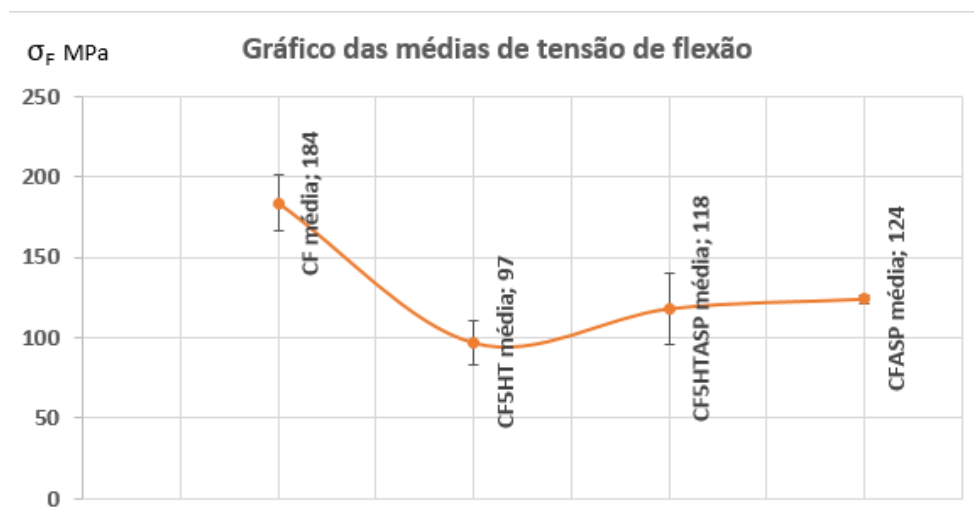


Figura 5.21 Médias resultantes dos ensaios de flexão para os laminados de fibra de carbono.

5.2.3 Ensaio de micro dureza Hard Vickers (HV).

O ensaio de micro dureza Hard Vickers (HV), foi aplicado na interface dos laminados de fibra de carbono, com duas intenções distintas. A primeira, verificar a micro dureza entre os componentes dos compostos. A segunda intenção é analisar a qualidade de aderência entre os constituintes dos, como matriz polimérica, revestimento a frio e aspersão térmica.

Para a realização deste ensaio, foi aplicado uma carga de 500 g, com uma pré carga de 4 segundos, mantendo a carga por 60 segundos, para gerar a indentação necessária para análise dos resultados. A tabela 5.15, indica os resultados médios com seus respectivos desvios padrões.

Tabela 5.15 – Dados provenientes os ensaios de micro dureza Hard Vickers nos laminados.

	Matriz LY 5052	Fibra de carbono	Aspersão térmica	MECATEC 5 HT	MECATEC 5HT + Aspersão	Aspergido (revestimento)
Média	56	234	28	39	45	708
Desvio padrão	4,67	38,71	4,41	3,32	2,09	31,88

Pode-se observa na tabela 5.15 certa identidade entre a matriz polimérica LY 5052 e matriz polimérica constituinte do revestimento a frio, MECATEC 5 HT, a diferença entre eles é de 30,35 %. Com relação a interface do laminado de fibra de carbono com aspersão térmica, nota-se um valor baixo, devido a degradação ocorrida pelo processo de aspersão térmica, que afetou diretamente a matriz polimérica Ly 5052. Os valores alcançados entre a interface do MECATEC 5 HT + aspersão térmica são melhores do que a relação de interface MECATEC 5 HT com a fibra de carbono, mas inferior em relação a matriz polimérica. Esses resultados apontam uma boa adesão tanto da matriz polimérica LY 5052 quanto do MECATEC 5HT e mesmo entre a aspersão e o revestimento a frio. A figura 5.22 mostra os valores alcançados no ensaio de dureza pelas interfaces dos laminados, juntamente com seus desvios padrões.

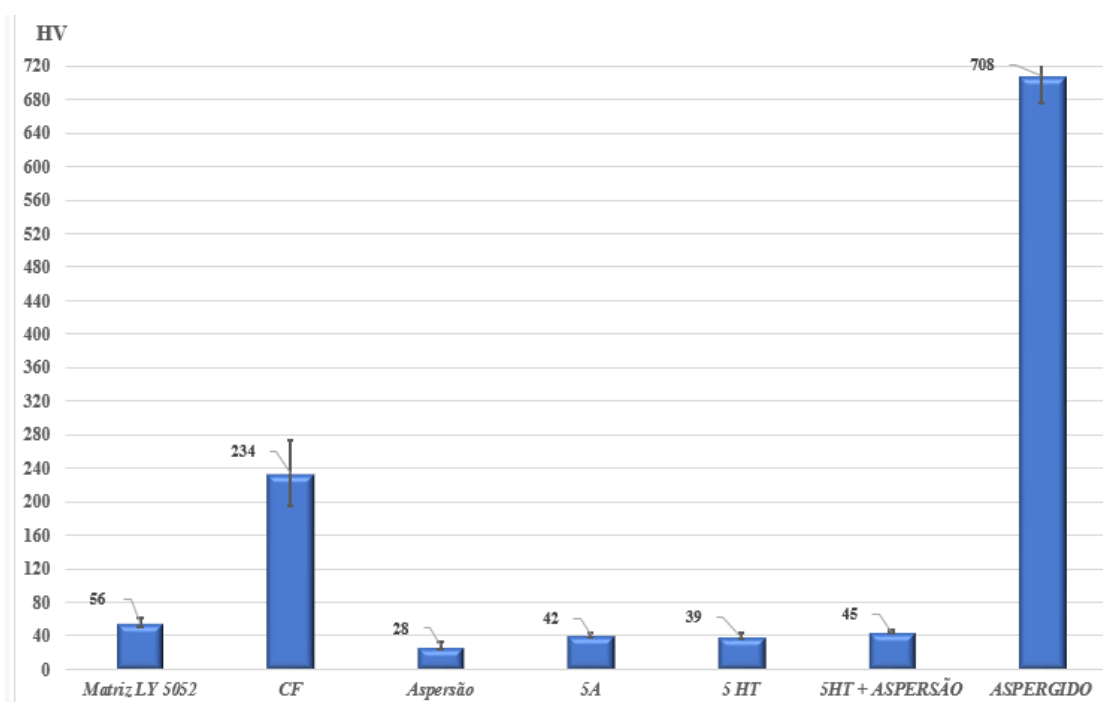


Figura 5.22 – Resultado médios do ensaio de micro dureza nas interfaces dos laminados de fibra de carbono.

5.2.4 – Resultados do ensaios de erosão.

Os resultados para o ensaio de erosão perda de massa por tempo, revelou que os laminados que foram aspergidos perderam rapidamente sua integridade. Essa perda esta relacionado ao aquecimento que as placas sofreram durante o processo de aspersão térmica. A tabela 5.16 apresenta os principais dados concernentes aos laminados.

Tabela 5.16 – Dados dos laminados de fibra de carbono.

Laminado	Peso (g)	Área (cm ²)	Volume (cm ³)	Densidade (g/cm ³)
FC	7,2	23,2	4,64	1,55
FC ASP	7,8	23,2	5,33	1,46
FC 5HT	25,1	23,2	13,92	1,80
FC 5HT ASP	26,3	23,2	15,08	1,74

A tabela 5.17 mostra as médias dos ensaios de erosão aplicados nos laminados de fibra de carbono, o tempo de cada ciclo de ensaio foi de sessenta segundo (60').Nota-se uma melhor resistência a erosão do laminado de fibra de carbono revestido a frio com o produto MECATEC 5HT. E o pior resultado alcançado relacionou-se com o laminado de fibra de carbono aspergido.

Tabela 5.17 – Resultados dos ensaios de erosão nos laminados de fibra de carbono.

Laminado	Peso Inicial	Peso1 g / (60')	Peso2 g / (60')	Peso3g / (60')	Peso4 g/ (60')
FC	7,10	5,30	1,65	0,00	0,00
FC ASP	7,70	2,85	0,00	0,00	0,00
FC 5HT	22,10	17,35	12,45	7,25	0,00
FC 5HT ASP	25,30	16,85	0,00	0,00	0,00

Na figura 5.23, apresenta a perda de massa a cada ciclo de ensaios. Os laminados de fibra de carbono que receberam a tratamento por aspersão térmica,

degradou-se rapidamente, quando comparados com o laminado de fibra de carbono e o laminado de fibra de carbono revestido a frio com o produto MECATEC 5HT.

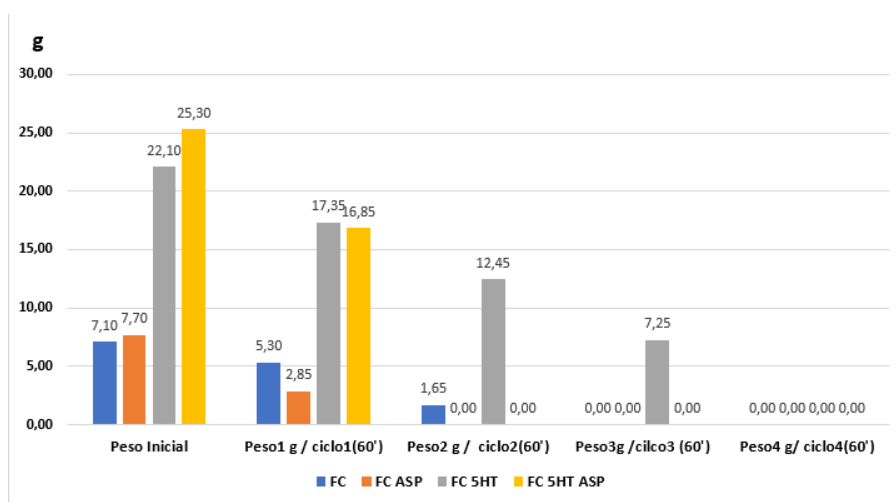


Figura 5.23 -Desgaste por erosão dos laminados de fibra de carbono.

5.2.5 –Cálculo da dependência da erosão em relação a velocidade das partículas erosivas.

A forma de realizar este cálculo, leva em consideração a área de incidência das partículas abrasiva no corpo de prova a ser ensaiado. Segundo a fórmula, $\varepsilon = a \cdot v_0^n$ pode-se calcular essa dependência. Onde “a” é uma constante, relacionada ao substrato erodido, “ v_0 ”, a velocidade das partículas em metros por segundos e “n”, também é uma constante que esta relacionado com o tipo de substrato a ser ensaiado e o ângulo de incidência das partículas, que neste caso foi de 45°. A tabela 5.18, apresenta os valores obtidos através desta equação.

Tabela 5.18 – Relação do volume por peso das partículas erosivas.

Laminados	a	v_0	n	ε (m ³ /kg)	$\varepsilon/1000$ (mm ³ /g)
FC	$2,8 \times 10^{-2}$	67,67	2,60	1607,64	1,61
FC ASP	$1,3 \times 10^{-5}$	67,67	3,10	13224,71	13,22
FC 5 HT	$0,38 \times 10^{-4}$	67,67	2,30	454,01	0,45
FC 5 HT ASP	$1,3 \times 10^{-5}$	67,67	3,10	13224,71	13,22

Na tabela 5.18, os laminados aspergidos receberam o maior volume de partículas por peso durante o processo de erosão, também chamado de taxa de erosão. O laminado revestido a frio com o MECATEC 5HT, obteve o melhor resultado

entre todos os laminados. A figura 5.24, mostra a taxa de erosão dos laminados de fibra de carbono.

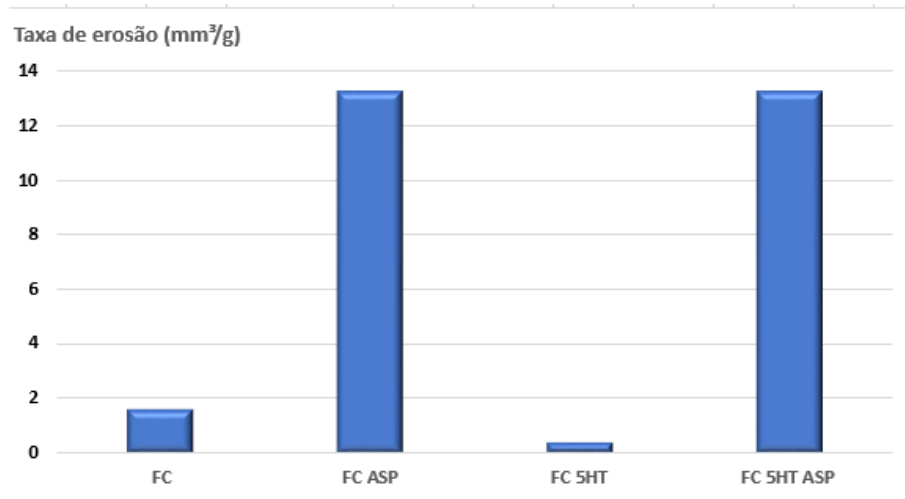


Figura 5.24 – Taxa de erosão dos laminados de fibra de carbono ensaiados por erosão.

É possível apresentar a relação entre a taxa de desgaste em erosão e a dureza dos materiais ensaiados. Estes resultados confirmam que a dureza só pode ser correlacionada a resistência ao desgaste em relações particulares. Os laminados de fibra de carbono que receberam a aspersão térmica possuem graus de dureza semelhante, porém foram os que mais rapidamente se degradaram. A figura 5.25 apresenta graficamente estes resultados.

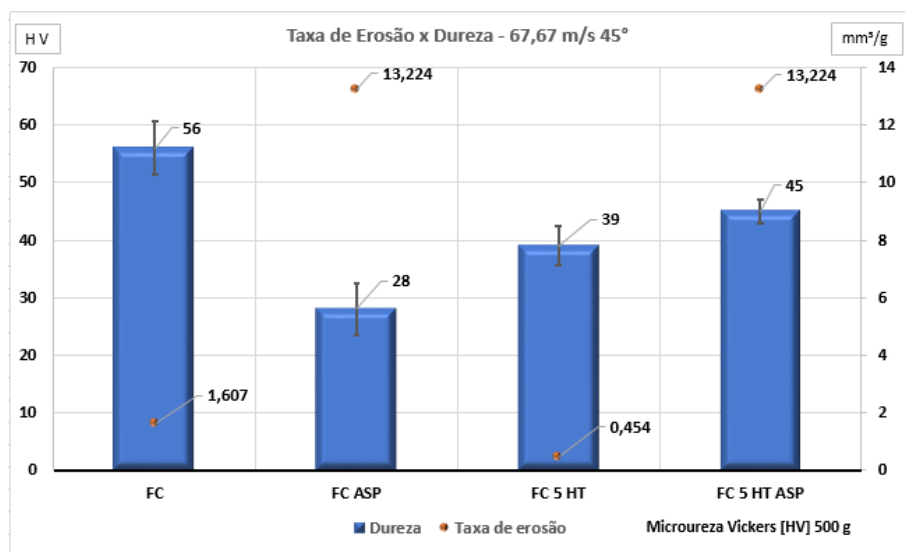


Figura 5.25 – Comparação entre dureza e a taxa de erosão dos laminados ensaiados.

5.2.6 – Influência da concentração das partículas no processo de ensaio erosivo.

A influência da concentração das partículas pode ser calculado através da fórmula $\varphi = \frac{m}{A.T}$, onde “ m ” é a quantidade em gramas de material particulado, “ A ”, a área a sofre a erosão e “ T ” o tempo aplicado ao processo de erosão. Essa equação é aplicada a corpos de prova com mesma dimensão, porém neste trabalho é necessário fazer um ajuste a esta equação, substituindo a área por volume do material a ser ensaiado, pois existe diferenças de espessura entre os laminados. Se for aplicar a equação admitindo que todos os laminados possuem as mesmas dimensões teremos um valor igual para todos, que será de 8,95 g/cm².s. Quando se opta por realizar esse ajuste observa-se uma variação destes resultados de acordo com cada laminado, tornando mais próximo da realidade essa influência. A tabela 5.19, apresenta os dois resultados, um com relação somente a área e o outro levando em consideração o volume dos laminados.

Tabela 5.19 – Valores de influência de concentração das partículas nos laminados.

Laminados	$\varphi = \frac{m}{A.T}$	$\varphi = \frac{m}{V.T}$
FC	8,95	44,77
FC ASP	8,95	38,98
FC 5HT	8,95	12,79
FC 5HT ASP	8,95	11,94

5.3 Microscopia Óptica

A microscopia óptica como técnica de caracterização contribuiu para avaliar a existência ou não de possíveis vazios provenientes do processo de infusão. As figuras a seguir A e B, mostram os filamentos do tecido de fibra de carbono com a matriz epóxi LY 5052. Na figura 5.26 A e B, pode-se ver claramente trama e urdume, estes sendo indicado pelas setas.

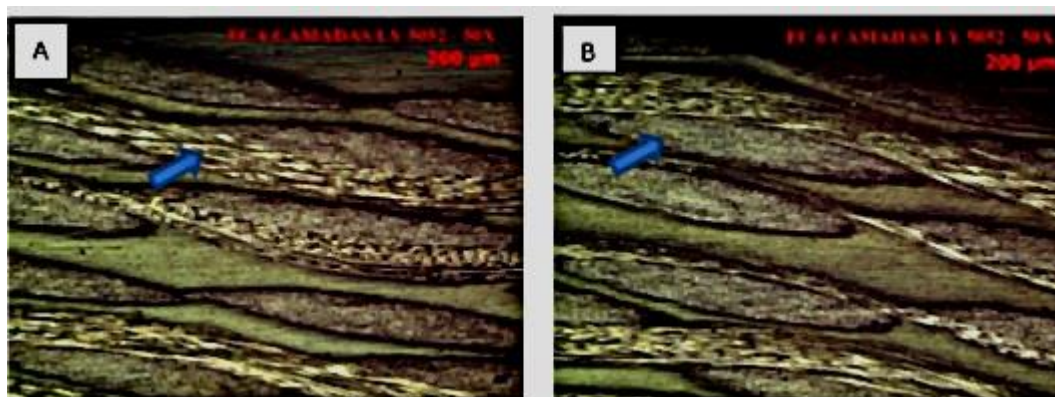


Figura 5.26 Laminado em corte no sentido longitudinal. (A) sentido da trama e (B) sentido do urdume.

A figura 5.27 A e B a seguir mostram as fibras de carbono e a boa impregnação da matriz polimérica no reforço.

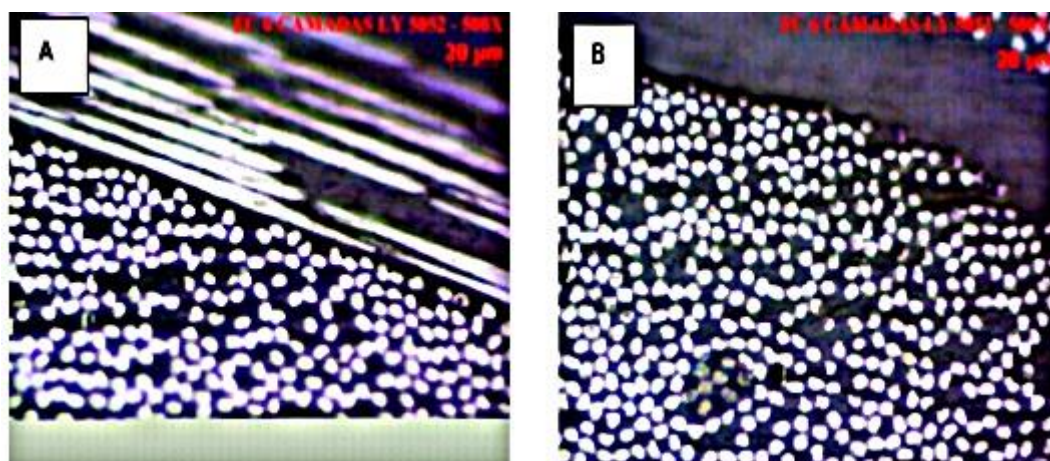


Figura 5.27 Laminado em corte transversal. (A) imagem do urdume e da trama e (B) boa impregnação da matriz com o reforço.

Essa característica mostra certa identidade que o reforço tem com a matriz. Essa afinidade é considerável, pois durante a solicitação de carregamento mecânico, a matriz recebe primeiramente estas cargas e as transfere quase que de imediato

para o reforço. No caso de existir baixa semelhança entre os dois elementos constituintes do laminado (matriz e reforço), essa circunstância possibilitará o arrancamento dos filamentos do tecido, provocando o início prematuro de fraturas.

A boa impregnação é relacionada ao processo de infusão e da boa permeabilidade, molhamento que a matriz tem com o reforço. Estes fatores são determinantes para alcançar boas propriedades mecânicas e manter a estrutura do laminado. Na figura, observa-se que todos os filamentos de fibra de carbono estão envoltos pela matriz. Além desses fatores apontados observa-se a inexistência de vazios. Os vazios são provenientes de uma falha no processo de laminação (impregnação) e estes podem comprometer a qualidade do laminado, diminuindo assim suas propriedades mecânicas.

5.4 Microscopia eletrônica de varredura.

5.4.1 – Resultados do EDX na fibra de carbono.

A análise pela caracterização EDX, mostrou a composição das fibras de utilizadas neste trabalho. A tabela 5.20 mostra que o elemento predominante é o carbono, sendo portanto uma fibra com alto teor de carbono. A tabela a seguir mostra os valores em porcentagem de massa dos elementos constituintes da fibra de carbono. O Al e o Si, devem ser ignorados, pois são elementos constituintes do stub, onde a fibra de carbono estava apoiada.

Tabela 5.20 – Valores obtidos da caracterização por EDX

Elementos	App. Corm	Intesi.	Weight %	Atomic %
C	316,92	1,9969	82,36	85,19
N	3,5	0,1555	11,67	10,35
O	7,64	0,7339	5,4	4,19
Al	1,01	1,0616	0,49	0,23
Si	0,15	1,0271	0,08	0,03
Total			100	

5.4.2 Fibra de carbono.

A técnica de caracterização por microscopia eletrônica de varredura, ajudou a caracterizar a interface entre o laminado compósito de fibra de carbono e o revestimento a frio e a quente, buscando investigar possíveis falhas de adesão.

Os laminados de fibra de carbono, sem nenhum tipo de revestimento, foi caracterizado, revelando a qualidade da matriz polimérica. O grau de impregnação, é alto, envolve todos os filamentos de fibra de carbono. A figura 5.28 a seguir, mostra a relação entre a matriz e o reforço.

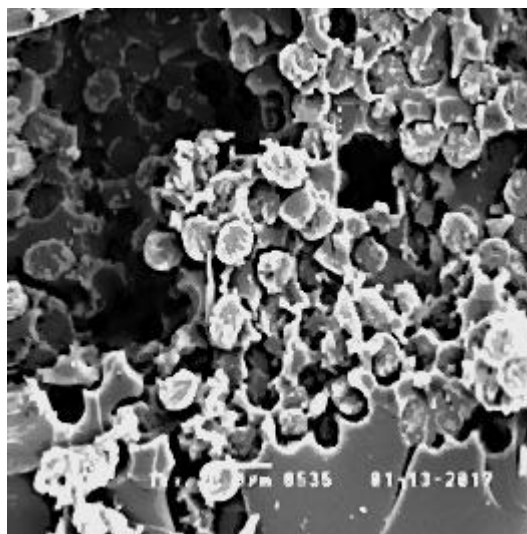


Figura 5.28 Reforço e matriz, relação de boa identidade entre eles.

As setas na figura 5.29, mostram os pontos de estiramento das ligações das cadeias poliméricas da matriz, gerando certa deformação, proveniente do carregamento mecânico, que foi transferido ao reforço. Nota-se que a matriz manteve a integridade estrutural mesmo existindo o deslocamento do filamento do reforço devido a tensão aplicada durante o carregamento.

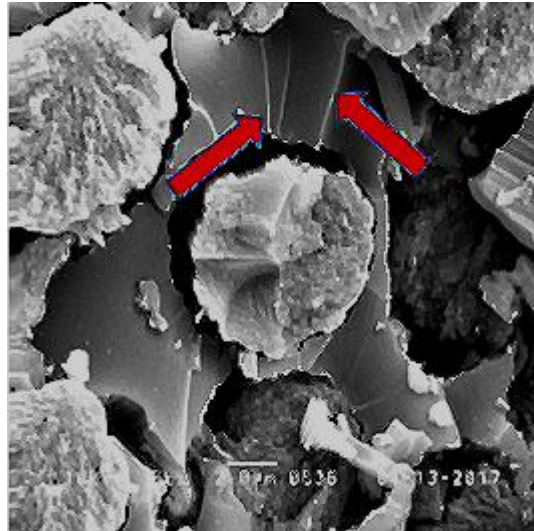


Figura 5.29 Pontos de estiramento da matriz devido as solicitações mecânicas. As setas mostram essas distorções.

A figura 5.30, apresenta a matriz envolvendo o filamento de fibra de carbono, mostrando o estiramento das cadeias poliméricas, gerando uma deformação plastica. Essa deformação é apontada pelas setas em vermelho. As linhas de carregamento convergem para o filamento, ou seja, é possível concluir que a energia do carregamento penetra os filamentos transferindo assim essa solicitação. O rompimento é da extremidade do reforço para o seu interior.

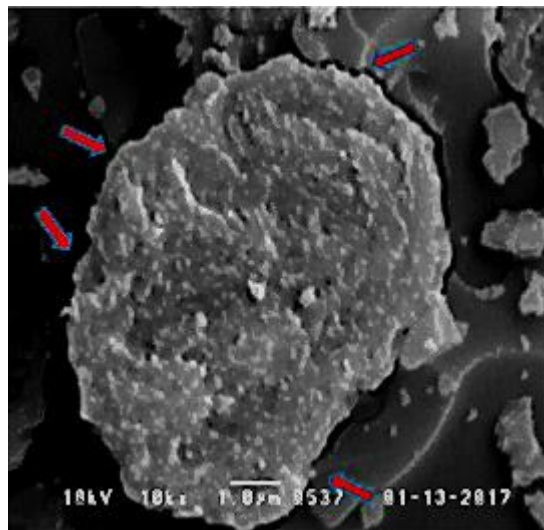


Figura 5.30 Pontos de estiramento da matriz devido as solicitações mecânicas. As setas mostram essas distorções.

O entendimento desse comportamento contribui para entender parte da mecânica de fratura e a relação entre reforço e matriz. Neste laminado observa-se

que cada elemento constituinte trabalhou de acordo com as funções esperadas, ou seja, a matriz cuja função é manter a geometria e a coesão dos filamentos e transferiu a tensão para o reforço. O reforço por ter maior resistência do que a matriz contribuiu para a resistência do laminado.

5.4.3 – Fibra de carbono revestido com MECATEC 5HT

A caracterização do laminado revestido a frio com o produto MECATEC 5HT, buscou explorar a interface entre o laminado e o revestimento. Isso de certa forma contribuiu para uma boa performance dos laminados com relação a resistência, tanto na tração quanto na flexão, absorvendo as tensões e favorecendo certa ductilidade, sendo maior do que o laminado sem nenhum tipo de revestimento. A figura 5.31 a seta mostra a interface de ligação do laminado com o revestimento, a seta mostra a interface.

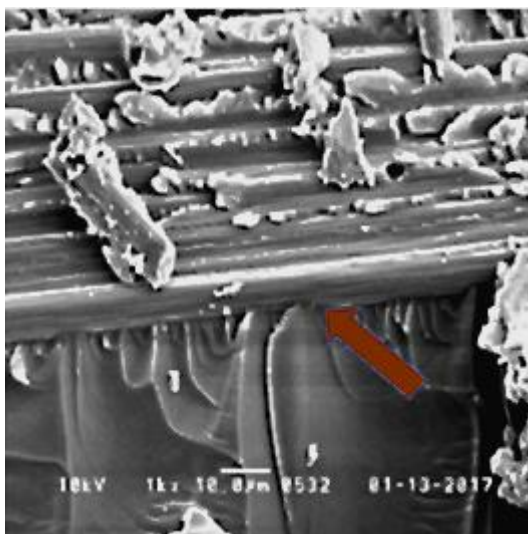


Figura 5.31 – Interface de ligação entre o reforço e o revestimento a frio MECATEC 5HT.

A micrografia da figura 5.32 A e B a seguir, mostra a boa interação entre o revestimento e o filamento do reforço, evitando a existência de possíveis vazios que favorecem uma baixa integridade e também uma baixa adesão. A seta mostra que o revestimento conseguiu permear a rugosidade do filamento da fibra de carbono favorecendo uma boa ancoragem entre reforço e revestimento.

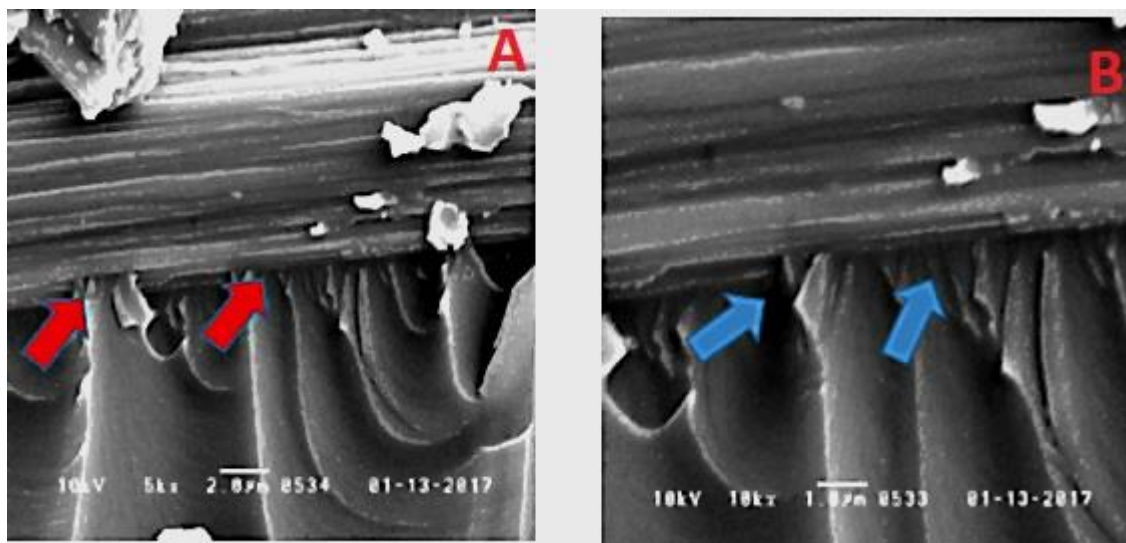


Figura 5.32 – (A) Região de interface entre revestimento e reforço de fibra de carbono e (B) região ampliada mostrando a inexistência de possíveis vazios na interface.

5.4.4 – Fibra de carbono revestido com MECATEC 5HT e aspergido.

O laminado revestido com MECATEC 5HT e aspergido com carbetto de tungstênio, também mostrou uma excelente adesão. Na figura 5.33 mostra o revestimento e o particulado de carbetto de tungstênio aspergido. A seta em vermelho mostra o revestimento, a seta em azul mostra parte do revestimento aspergido e a seta em preto mostra a interface entre revestimento a frio e o reforço do material compósito.

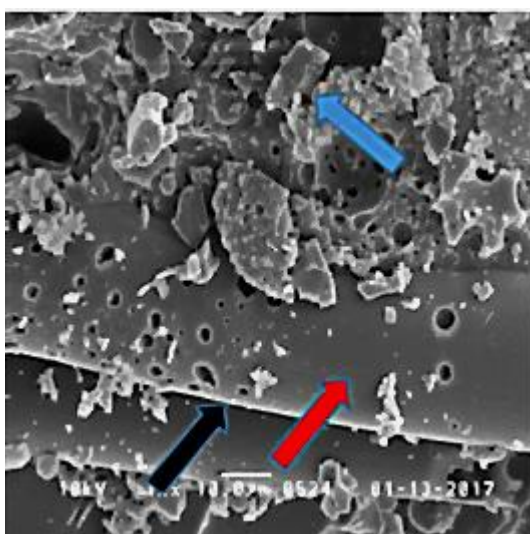


Figura 5.33 – Revestimento e aspersão no laminado de fibra de carbono.

Os pontos que aparecem sobre o revestimento em forma ovoíde, são causados pela aspersão. São partículas pequenas de carbetos de tungstênio que se alojaram no revestimento a frio. A figura 5.34 A e B abaixo mostram o revestimento de carbetos de tungstênio depositado sobre o revestimento a frio. Observa-se os carbetos de geometria variada, formando a camada do revestimento.



Figura 5.34 – Revestimento de carbetos de tungstênio depositado por aspersão térmica. (A) Carbetos com geometria irregular e (B) ampliação

Estes, possuem maior ductilidade, devido a recristalização da matriz, a qual promove a queda da resistência, característica esta que não é observado no laminado de fibra de carbono somente.

5.4.5 – Fibra de carbono aspergida

O laminado de fibra de carbono somente aspergido com carbetos de tungstênio, também mostrou uma boa interface de adesão entre o reforço e o particulado. A figura 5.35 apresenta a interface entre o filamento de carbono e o revestimento. A seta em vermelho mostra o filamento e a seta em azul o revestimento.

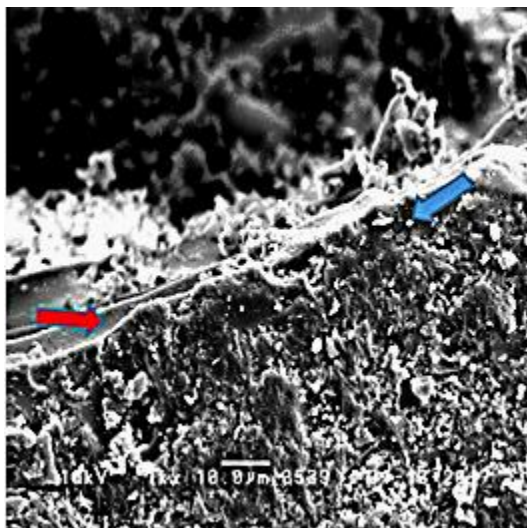


Figura 5.35 – Laminado de Fibra de carbono aspergido. A seta vermelha mostra o possível local do filamento do reforço e a seta azul, apresenta o revestimento aspergido.

A figura 5.36 A e B, mostra-se os carbeto de tungstênio que revestiram o laminado de fibra de carbono. Nestas micrografias pode ver a morfologia do revestimento a quente que possui geometria irregular. Essa geometria irregular dos carbeto favorecem uma maior rugosidade.

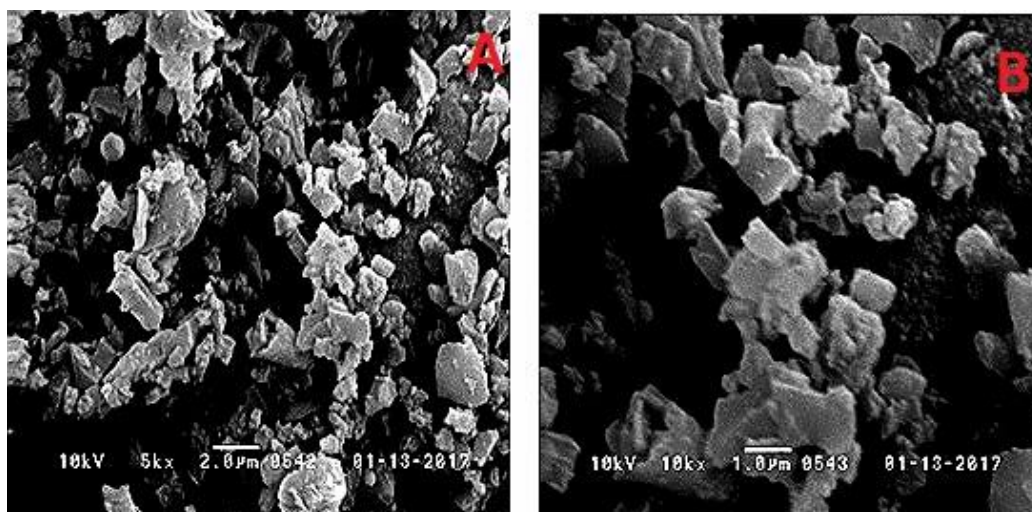


Figura 5.36 – Carbeto de tungstênio revestindo o laminado de fibra de carbono (A) e (B) ampliação da região revestida.

A aplicações dos revestimentos contribui para aumentar a vida útil dos laminados que podem estar sujeitos a esforços e abrasão severa. No caso da abrasão severa, o reforço é frágil, não conseguindo manter a integridade do compósito. Além do problema da fragilidade do reforço, existe o problema do gradiente térmico que tem como ponto de início de degradação térmica, perto de 200°C.

6. Conclusões

- O processo de laminação a vácuo é eficiente por dois motivos, sendo o primeiro, que contribui para a diminuição de vazios provenientes da laminação e o segundo motivo é que o processo de laminação por vácuo “bag”, evita o processo de difusão gasosa, que favorece a formação de ligações secundárias nas moléculas da matriz, diminuindo as propriedades mecânicas da mesma. Esses resultados foram demonstrados pelos resultados de raios x.

- A matriz polimérica LY 50 52, atendeu de forma segura os requisitos do trabalho, sua estabilidade térmica (372°C) tornou possível a aplicação da aspersão térmica sem degradar o laminado de fibra de carbono.

Das análises estatísticas de propriedades mecânicas chegamos a seguintes conclusões:

- Os materiais revestidos possuem uma melhor ductilidade do que o laminado sem nenhum tipo de revestimento.

- Entre os laminados, os revestidos com MECATEC 5HT, possuem melhor ductilidade, tanto na tração quanto na flexão..

- A adesão em todos os laminados revestidos, mostrou-se eficiente, não tendo pontos de vazios. Essa boa adesão é caracterizada por certa identidade entre revestimento e laminados.

O ensaio de erosão mostrou que entre os laminados que receberam um revestimento, os aspergidos foram os que obtiveram os piores resultados. O que melhor atendeu a expectativa para a resistência a erosão foi o laminado revestido a frio com MECATEC 5HT.

O desenvolvimento destes trabalho mostra que este material pode ser aplicado em pás de hélices de exaustores, tubulações em caldeiras por onde passa o vapor primário, alimentadores que trabalham em meios de alta abrasão.

7. REFERENCIAS

- ¹ Campos, Marcelo Capella de - **INFLUÊNCIA DA MATRIZ POLIMÉRICA E DOS MÉTODOS DE EXTRAÇÃO DE CORPOS DE PROVA EM COMPÓSITOS DE FIBRA DE CARBONO**, dissertação de mestrado, página 01 e 02, FEB UNESP, 2013
- ²J. Chen et al., **Impact of layup rate on the quality of fiber steering/cut-restart in automated fiber placement processes**. Sci. Eng. Compos. Mater. **22**(2), 165–173 (2015) 21. R. Lichtinger et al., Simulation and experimental validation of gaps
- ³R. Lichtinger et al., **Simulation and experimental validation of gaps and bridging in the automated fiber placement process**. Sci. Eng. Compos. Mater. **22**(2), 131–148 (2015)
- ⁴Ashby, M.F. **Engineering Materials 1, An Introduction to their Properties and Applications**, Elsevier Science, 2000
- ⁵S. Kularatna, C. Ward, **Improving training in advanced composites hand layup by the application of virtual reality and gamification techniques**, in **SAE 2016 Augmented and Virtual Reality (AR/VR) Technologies Symposium**, Philadelphia, Pennsylvania, USA, 14–16 November 2016
- ⁶M. Elkington, C. Ward, K. Potter, **Automated layup of sheet prepreps on complex moulds**. In **SAMPE Long Beach Conference**, May 2016
- ⁷Brown, G., 2014. **The use of composites in aircraft construction**. <http://vandaair.com/2014/04/14/the-use-of-composites-in-aircraft-construction>.
- ⁸J. Bai, P. Qi, X. Ding, H. Zhang, **Graphene composite coated carbon fiber: electrochemical synthesis and application in electrochemical sensing**. RSC Adv. **6**, 11250–11255 (2016). doi:10.1039/c5ra26620c
- ¹⁰A. Haesch, T. Clarkson, J. Ivens, S.V. Lomov, I. Verpoest, L. Gorbatikh. **Localization of carbon nanotubes in resin rich zones of a woven composite linked to the dispersion state**. **Nanocomposites 1**, 206–213 (2016)
- ¹¹A. Arteiro, **Structural mechanics of thin-ply laminated composites**. Ph.D. thesis, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto (2016)
- ¹²R.P. Tavares, A.R. Melro, M.A. Bessa, A. Turon, W.K. Liu, P.P. Camanho, **Mechanics of hybrid polymer composites: analytical and computational study**. Comput.Mech. **57**, 405–421 (2016)
- ¹³D. Leutz, M. Vermilyea, S. Bel, R. Hinterhölzl, **Forming simulation of thick AFP laminates and comparison with live CT imaging**. Appl. Compos. Mater. **23**(4), 583–600 (2016)
- ¹⁴J. Sjölander, P. Hallander, M. Åkermo, **Forming induced wrinkling of composite laminates: A numerical study on wrinkling mechanisms**. Compos. A: Appl. Sci. Manuf. **81**, 41–51 (2016)

- ¹⁵Ec.europa.eu, Jos Delbeke's speech during the conference "**A New Flightplan**". (**European Commission, 2016**), Available at http://ec.europa.eu/clima/news/articles/news_2012020701_en.htm. Accessed 20 Sep 2017
- ¹⁶Anon, (2016), Available at <https://www.iata.org/policy/environment/Documents/atag-paperon-cng2020-july2013.pdf>. Accessed 20 Sep 2016
- ¹⁷Airbus, **Eco-efficiency/Airbus, a leading aircraft manufacturer** (2016). Available at <http://www.airbus.com/company/eco-efficiency/>. Accessed 20 Sep 2016
- ¹⁸Campos, Marcelo Capella de - **INFLUÊNCIA DA MATRIZ POLIMÉRICA E DOS MÉTODOS DE EXTRAÇÃO DE CORPOS DE PROVA EM COMPOSTOS DE FIBRA DE CARBONO**, dissertação de mestrado, página 08, FEB UNESP, 2013
- ¹⁹J. Xu, S.V. Lomov, I. Verpoest, S. Daggumati, W. Van Paepegem, J. Degrieck, **A comparative study of twill weave reinforced composites under tension–tension fatigue loading: Experiments and meso-modelling**. Compos. Struct. **135**, 306–315 (2016)
- ²⁰C. Tephany, J. Gillibert, P. Ouagne, G. Hivet, S. Allaoui, D. Soulat, **Development of na experimental bench to reproduce the tow buckling defect appearing during the complex shape forming of structural flax based woven composite reinforcements**. Compos. A: Appl. Sci.Manuf. **81**, 22–33 (2016)
- ²¹A. Madeo, G. Barbagallo, M.V. D'Agostino, P. Boisse, **Continuum and discrete models for unbalanced woven fabrics**. Int. J. Solids Struct. (2016). doi:10.1016/j.ijsolstr.2016.02.005
- ²²W. Ding, J. Chen, J. Liu, Z. Pang, R. Guan, Asian J. Chem. **25**, 7955 (2013)
- ²³J. Lee, S. Nouranian, G.W. Torres, T.E. Lacy, H. Toghiani Jr, C.U. Pittman, J.L. Dubien, J.Appl. Polym. Sci. **130**, 2087 (2013)
- ²⁴X.J. Yang, S.H. Li, X.D. Tang, J.L. Xia, Adv. Mater. Res. **807–809**, 2826 (2013)
- ²⁵H.Y. Zhang, H. Xu, C.S. Guan, Adv. Mater. Res. **833**, 322 (2014)
- ²⁶X. Zhang, V. Bitaraf, S. Wei, Z. Guo, H.A. Colorado, ALChE J. **60**, 266 (2014)
- ²⁷W. Dong, H.C. Liu, S.J. Park, F.J. Jin, J. Ind. Eng. Chem. (2013, Article in press)
- ²⁸A.A. Azeez, K.Y. Rhee, S.J. Park, D. Hui, Comp. Part B Eng. **45**, 308 (2013)
- ²⁹J.R. Choi, Y.S. Lee, S.J. Park, J. Ind. Eng. Chem. (2013, Article in press)
- ³⁰Y. Chen, X. Zhou, X. Yin, Q. Lin, M. Zhu, Int. J. Polym. Mater. Polym. Biomater. **63**, 221 (2014)
- ³¹K. Zhang, Y. Gu, M. Li, Z. Zhang, Mater. Design **54**, 624 (2014)
- ³²Y. Bai, Z.H. Huang, F. Kang, Carbon **66**, 705 (2014)
- ³³M.D. Li, Y. Lu, X. Guo, Appl. Mech. Mater. **470**, 31 (2014)
- ³⁴L. Bian, J. Xiao, J. Zheng, S. Xing, C. Yin, A. Jia, Mater. Design **54**, 230 (2014)
- ³⁵J.P. Gogoi, N.S. Bhattacharyya, S. Bhattacharyya, Comp. Part B Eng. **58**, 518 (2014)
- ³⁶S.Y. Lee, H.K. Shin, M. Park, K.Y. Rhee, S.J. Park, Carbon **68**, 67 (2014)

- ³⁷ Campos, Marcelo Capella de - **INFLUÊNCIA DA MATRIZ POLIMÉRICA E DOS MÉTODOS DE EXTRAÇÃO DE CORPOS DE PROVA EM COMPÓSITOS DE FIBRA DE CARBONO**, dissertação de mestrado, página 13, FEB UNESP, 2013
- ³⁹M.M. Shokrieh, A. Saeedi, M. Chitsazzadeh, *Mater. Design* 56, 274 (2014)
- ⁴⁰Z. Wu, L. Meng, L. Liu, Z. Jiang, L. Xing, D. Jiang, Y. Huang, *J. Adhes. Sci. Technol.* 28,444 (2014)
- ⁴¹ Campos, Marcelo Capella de - **INFLUÊNCIA DA MATRIZ POLIMÉRICA E DOS MÉTODOS DE EXTRAÇÃO DE CORPOS DE PROVA EM COMPÓSITOS DE FIBRA DE CARBONO**, dissertação de mestrado, página 09, FEB UNESP, 2013
- ⁴²J. Karger-Kocsis, H. Mahmood, A. Pegoretti, **Recent advances in fibre/matrix interphase engineering for polymer composites**. *Prog. Mater. Sci.* 73, 1–43 (2015)
- ⁴³Grishchuk S, Sorochynska L, Vorster OC et al **Structure, thermal, and mechanical properties of DDM-hardened epoxy/benzoxazine hybrids: effects of epoxy resin functionality and ETBN toughening**. *J Appl Polym Sci* 127(6):5082–5093, (2013)
- ⁴⁴Liu Y, Wang J, Xu S **Synthesis and curing kinetics of cardanol-based curing agents for epoxy resin by in situ depolymerization of paraformaldehyde**. *J Polym Sci A Polym Chem* 52 (4):472–480 (2014)
- ⁴⁵ Campos, Marcelo Capella de - **INFLUÊNCIA DA MATRIZ POLIMÉRICA E DOS MÉTODOS DE EXTRAÇÃO DE CORPOS DE PROVA EM COMPÓSITOS DE FIBRA DE CARBONO**, dissertação de mestrado, página 09,10 FEB UNESP, 2013
- ⁴⁶PIRES, G.; **Materiais nanoestruturados do sistema epoxídico DGEBA/dietilenotriamina modificado com um éster de silsesquioxano: propriedades mecânicas e térmicas**. página 28. Dissertação apresentada ao Curso de Pós- Graduação, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciência dos Materiais. Ilha Solteira – SP Fevereiro de 2006
- ⁴⁷ Campos, Marcelo Capella de - **INFLUÊNCIA DA MATRIZ POLIMÉRICA E DOS MÉTODOS DE EXTRAÇÃO DE CORPOS DE PROVA EM COMPÓSITOS DE FIBRA DE CARBONO**, dissertação de mestrado, página 11 e 12, FEB UNESP, 2013
- ⁴⁸Sahoo SK, Mohanty S, Nayak SK **Synthesis and characterization of bio-based epoxy blends from renewable resource based epoxidized soybean oil as reactive diluent**. *Chin J Polym Sci* 33 (1):137–152 (2014)
- ⁴⁹Sprenger S **Epoxy resins modified with elastomers and surface-modified sílica nanoparticles**. *Polymer* 54(18):4790–4797(2013)
- ⁵⁰Zhou H-S, Song X-X, Xu S-A **Mechanical and thermal properties of novel rubber toughened epoxy blend prepared by in situ pre-crosslinking**. *J Appl Polym Sci* 131(22):41110 (2014)
- ⁵¹Chen Yet al **The effect of epoxy–silicone copolymer content on the thermal and mechanical properties of cured epoxy resin modified with siloxane**. *RSC Adv* 4(105):60685–60693 (2014)
- ⁵²Heng Z et al **Simultaneously enhanced tensile strength and fracture toughness of epoxy resins by a poly (ethylene oxide)-block-carboxyl terminated butadiene-acrylonitrile rubber block copolymer**. *RSC Adv* 5(53):42362–42368 (2015)

- ⁵³Zhao K et al **Morphology and properties of nanostructured epoxy blends toughened with epoxidized carboxyl-terminated liquid rubber**. Iran Polym J 24(5):425–435 (2015)
- ⁵⁴X. Zhang, V. Bitaraf, S. Wei, Z. Guo, H.A. Colorado, ALChE J. 60, 266 (2014)
- ⁵⁵Y. Chen, X. Zhou, X. Yin, Q. Lin, M. Zhu, Int. J. Polym. Mater. Polym. Biomater. 63, 221 (2014)
- ⁵⁶K. Zhang, Y. Gu, M. Li, Z. Zhang, Mater. Design 54, 624 (2014)
- ⁵⁷Y. He, G. Tin, M. Pan, D. Chen, Comp. Struct. 109, 1 (2014)
- ⁵⁸M.D. Li, Y. Lu, X. Guo, Appl. Mech. Mater. 470, 31 (2014)
- ⁵⁹L. Bian, J. Xiao, J. Zheng, S. Xing, C. Yin, A. Jia, Mater. Design 54, 230 (2014)
- ⁶⁰J.P. Gogoi, N.S. Bhattacharyya, S. Bhattacharyya, Comp. Part B Eng. 58, 518 (2014)
- ⁶¹S.Y. Lee, H.K. Shin, M. Park, K.Y. Rhee, S.J. Park, Carbon 68, 67 (2014)
- ⁶²J. Huang, D. Rodrigue, Mater. Design 55, 653 (2014)
- ⁶³B. Yuan, C. Bao, L. Song, N. Hong, K.M. Liew, Y. Hu, Chem. Eng. J. 237, 411 (2014)
- ⁶⁴M.M. Shokrieh, A. Saeedi, M. Chitsazzadeh, Mater. Design 56, 274 (2014)
- ⁶⁵Z. Wu, L. Meng, L. Liu, Z. Jiang, L. Xing, D. Jiang, Y. Huang, J. Adhes. Sci. Technol. 28,444 (2014)
- ⁶⁶Y. Gu, X. Tan, Z. Yang, M. Li, Z. Zhang, Mater. Design 56, 852 (2014)
- ⁶⁷K. Senthil Kumar, I. Siva, P. Jeyaraj, J.T. Winowlin Jappes, S.C. Amico, N. Rajini, Mater. Design 56, 379 (2014)
- ⁶⁸Y.Q. Wang, J.G. Kim, J.I. Song, Mater. Design 56, 313 (2014)
- ⁶⁹Eutetic Castolin. http://www.eutectic.com.br/catalogos/catalogo_mecatec.pdf - **ACESSO 23/01/2017**.
- ⁷⁰AMERICAN WELDING SOCIETY. Thermal spraying technology. Miami, 184p. 1985.
- ⁷¹ARAÚJO J.C. et al. **Síntese da hidroxiapatita e refinamento estrutural por difração de raios –X**. Química. Nova, Vol. 30, No. 8, 1853-1859, 2007
- ⁷²DORFMAN M. R. **Thermal spray basics**. Advanced Materials & Processes, v. 170, n. 7, p.47-50, jul 2002.
- ⁷³FOLTRAN, B. **Comparação dos revestimentos de superligas à base de cobalto (Co-Cr-W - C) depositados por eletrodo revestido, plasma por arco transferido e Laser**.Dissertação (Mestrado) — UFPR, 2000
- ⁷⁴HAMATANI, H., ICHIYAMA, Y., KOBAYASHI, J. **Mechanical and thermal properties of HVOF sprayed Ni based alloys with carbide**. Science and Technology of Advanced Materials. V. 3, p. 319 – 326. 2002.
- ⁷⁵HEARLEY, J.A., LITTLE, J.A., SURGEON, A.J. **The effect of spray parameters on the properties of high velocity oxi-fuel NiAl intermetallic coating**. Surface and Coating Technology. v. 123, p. 210-218, 2000.
- ⁷⁶KAEFER, L.F. **Análise do comportamento eletroquímico de revestimentos De carbeto de tungstênio cimentados obtidos por aspersão térmica**. Dissertação. PIPE – UFPR, 2004.

- ⁷⁷KHALIL, A.M.V., **ESTUDO DO PROCESSO DE ASPERSÃO TÉRMICA A PLASMA PARA DEPOSIÇÃO DE TITÂNIO**. Dissertação. PIPE, UFPR, 2009.
- ⁷⁸KONG L.B. et al. **Mullite phase formation and reaction sequences with the presence of pentoxides**, Journal of Alloys and Compounds, v351 264–272, 2003.
- ⁷⁹LIMA, C.C.; Trevisan, R. **Aspersão Térmica – Fundamentos e Aplicações**. São Paulo:Artliber Editora, 2007.
- ⁸⁰MAIA A. O. G., **Sinterização de nanopartículas de NiO por gelatina comestível**. Dissertação de mestrado. Pós-graduação em Física, UFC, Fortaleza, 2005.
- ⁸¹NOVICKI N. **Aplicação da aspersão térmica na soldagem em operação de tubulações com pequena espessura remanescente**. Tese. Programa de pós-graduação em engenharia mecânica. Florianópolis, UFSC, 2008.
- ⁸²OHNO N. RAZZAK M.A., UKAI H., TAKAMURA S. UESUGI Y., **Validity of Electron Temperature Measurement by Using Boltzmann Plot Method in Radio Frequency Inductive Discharge in the Atmospheric Pressure Range**. Plasma and Fusion Research: Regular Articles, The Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research, Vol 1, 028,2006.
- ⁸³PADILHA, H. **Estudo sobre revestimentos depositados por aspersão térmica para melhorar o desempenho de conexões elétricas**. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais e Processos (PIPE) – UFPR, 2005.
- ⁸⁴SANTOS, A.O.; **Estudo da resistência à corrosão em aço e revestimentos visando aplicação em hastes de bombeio de petróleo**. Dissertação – Programa de pós graduação em engenharia de processos – PEP. Aracajú – SE, 2008.
- ⁸⁵SANTOS, J.C.S. **Caracterização e revestimentos de TiO₂ depositados por aspersão térmica a plasma sobre a liga Ti-13Nb-13Zr**. Dissertação – FEM. Unicamp, Campinas, SP. 2008.
- ⁸⁶PAREDES R. S. C., VAZ A. P., SILVA J.C. **Avaliação da influência da preparação da superfície de titânio utilizado para implantes odontológico revestidos com titânio depositado por aspersão térmica PS**. 17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 15 a 19 de Novembro de 2006, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.
- ⁸⁷SUNDARARAJAN, G., SEN, D., SIVAKUMAR, G. **The tribological behaviour of detonation sprayed coatings: the importance of coatings process parameters**. Wear. v. 258, p.377 – 391. 2005.
- ⁸⁸TENDERO C. et al. **Atmospheric pressure plasmas: A review**. Spectrochimica Acta Part B 61, 2 – 30, 2006.
- ⁸⁹VENKATRAMANI, N. **Industrial plasma torches and applications. Special section: Plasma applications**. Current science, v. 83, N 3, 2002.
- ⁹⁰YUGESWARAN S., SELVARAJAN V. **Electron number density measurement on a DC argon plasma jet by stark broadening of Ar I spectral line**. Vacuum 81 347–352, 2004.
- ⁹¹ZHAO, L. et al. **Influence of spray parameters on the particle in-flight properties and the properties of hvof coatings of Wc-CoCr**. Wear, v. 257, p. 41-46, 2004
- ⁹²BANDYOPADHYAY R, Nyle´n P (2003) **A computational fluid dynamic analysis of gas and particle flow in flame spraying**. J Therm Spray Technol 12(4):492–503

⁹³NYLE'N P, Bandyopadhyay R (2000) **A computational fluid dynamic analysis of gas and particle flow in flame spraying.** In: Berndt CC (ed) Thermal spray: surface engineering via applied research. ASM International, Materials Park, OH, pp 237–244

⁹⁴ Thermal Spray Coatings Market Size, Trend | Industry Report 2018-2025 (link: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/thermal-spray-coatings-market> - acesso 12/03/2018)