



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

**INFLUÊNCIA DA MATRIZ POLIMÉRICA E DOS MÉTODOS
DE EXTRAÇÃO DE CORPOS DE PROVA EM COMPÓSITOS
DE FIBRA DE CARBONO**

Marcelo Capella de Campos

Bauru, 2013

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

**INFLUÊNCIA DA MATRIZ POLIMÉRICA E DOS MÉTODOS
DE EXTRAÇÃO DE CORPOS DE PROVA EM COMPÓSITOS
DE FIBRA DE CARBONO**

Autor: **Marcelo Capella de Campos**

Orientador: **Prof. Dr. Carlos Alberto Soufen**

Curso: **Mestrado em Engenharia Mecânica**

Área de concentração: **Processos de Fabricação**

Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia– UNESP campus Bauru, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Bauru, 2013

Campos, Marcelo Capella.

Influência da matriz polimérica e dos métodos de extração de corpos de prova em compósitos de fibra de carbono/ Marcelo Capella de Campos, 2013
134 f.

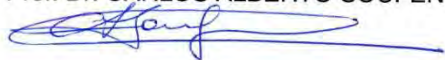
Orientador: Carlos Alberto Soufen

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2013

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE Mestrado DE MARCELO CAPELLA DE CAMPOS, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DO(A) FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU.

Aos 09 dias do mês de setembro do ano de 2013, às 15:00 horas, no(a) ANFITEATRO DA SEÇÃO TÉCNICA DE PÓS-GRADUAÇÃO DA FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. CARLOS ALBERTO SOUFEN do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. LUÍS AUGUSTO SOUSA MARQUES DA ROCHA do(a) Departamento de Física / Faculdade de Ciências de Bauru - UNESP, Prof. Dr. IVALDO DE DOMENICO VALARELLI do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE Mestrado de MARCELO CAPELLA DE CAMPOS, intitulado "INFLUÊNCIA DA MATRIZ POLIMÉRICA E OS MÉTODOS DE EXTRAÇÃO DE CORPOS DE PROVA EM COMPOSITOS DE FIBRA DE CARBONO". 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.

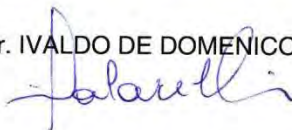
Prof. Dr. CARLOS ALBERTO SOUFEN



Prof. Dr. LUÍS AUGUSTO SOUSA MARQUES DA ROCHA



Prof. Dr. IVALDO DE DOMENICO VALARELLI



Agradecimentos

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

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

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 Prof. Dr. Momotaro Imaizumi, pela dedicação, sabedoria e amizade, que oportunizou e oportuniza em muito o aprendizado.

A Graciete Solange Anseli de Capella, pela colaboração na revisão deste trabalho.

Aos meus colegas de mestrado (Valter, Marcus “Torrinha”). pelos momentos alegres que compartilhamos. Aos alunos de iniciação científica que colaboraram neste trabalho.

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

Outro agradecimento em especial ao técnico Israel Pereira dos Santos do laboratório de construção civil, do departamento de Engenharia Civil da FEB UNESP– Bauru pela ajuda nos ensaios de tração e flexão obtidos nesse trabalho. E também ao Professor Doutor Obede Borges Faria da Faculdade de engenharia civil da UNESP – Bauru por ter permitido o uso da máquina universal de ensaios.

Em especial ao técnico Hamilton 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.

“ A sabedoria consiste em
ordenar bem nossa própria alma”

PLATÃO

INDICE

Resumo.....	IX
Abstract.....	X
Nomenclaturas.....	XI
Lista de figuras.....	XII
Lista de tabelas.....	XIV
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....	4
3.1 Materiais compósitos.....	6
3.1.1 Matriz polimérica.....	9
3.1.2 Material de reforço.....	13
3.1.3 Laminação.....	14
3.2 Características mecânicas e modos de falha.....	15
3.3 Microscopia.....	21
3.4 – Processo de corte por Jato d’água e fresagem em CNC.....	26
3.4.1 – Processo de corte por jato d’água.....	26
3.4.2 – Processo de corte por fresagem CNC.....	27
3.5 – Rugosidade.....	28
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	29
4.1 Materiais utilizados.....	29
4.2 Laminação.....	30
4.3 Ensaios mecânicos.....	35
4.4 Microscopia.....	36

4.5 Rugosidade.....	38
4.6 - Análise estatística utilizando o software Minitab16	38
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	39
5.1 Influência da matriz polimérica	39
5.2 Influência dos processos de corte nas propriedades mecânicas.....	39
5.3 Análise Estatísticas utilizando SOFTWARE MINITAB16.....	47
5.3.1 ANOVA Unidirecional para $\frac{t}{\rho}$: SQ2004urdume; SQ2001urdume; Derakane470 urdume; SQ2004trama; SQ2001trama; Derakane 470trama	47
5.3.2 ANOVA Unidirecional para deformação no sentido do urdume e no sentido da trama nos ensaios de tração.	50
5.3.3 ANOVA Unidirecional para $\frac{\sigma_f}{\rho}$: SQ2004urdume; SQ2001urdume; Derakane470urdume ; SQ2004trama; SQ2001trama;Derakane470 trama.....	51
5.3.4 ANOVA Unidirecional para deformação no sentido do urdume e no sentido da trama nos ensaios de flexão.....	55
5.4 Influência dos processos de corte na rugosidade.....	57
5.5 Resultados de microscopia estéreo	59
5.6 Resultados de microscopia óptica.....	61
5.7 Resultados de microscopia confocal 3D.....	65
5.8 – Resultados da microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	68
6. CONCLUSÕES.....	70
7. TRABALHOS FUTUROS.....	72
8. BIBLIOGRAFIA.....	75

RESUMO

Os laminados de compósitos poliméricos possuem um valor já consagrado dentro das aplicações mecânicas e industriais. Sua versatilidade aliado a suas propriedades mecânicas, estimula o aumento da aplicação, 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 e sobre o reforço, que neste estudo utilizou tecidos de fibra de carbono em sarja, formaram o prelúdio do trabalho. A análise de compósitos laminados com tecidos bidirecionais em ângulo de 90°, e a variação de três tipos de matriz polimérica, sendo duas do grupo epóxi e uma do grupo epóxi éster vinil, constituíram os laminados. O processo de corte por jato d'água e por fresagem CNC, influenciaram diretamente a rugosidade da superfície de corte dos laminados. Os ensaios mecânicos de tração e flexão, colaborou para identificar qual das três matrizes possui o melhor desempenho. As técnicas de caracterização por microscopia óptica, possibilitou identificar as camadas dos tecidos, a matriz, modos de falhas e a impregnação entre matriz e reforço. A microscopia confocal 3D além de formar imagens em 3D, demonstrou a diferença de rugosidade entre os processos de corte aplicados, sendo confirmados posteriormente pelo ensaio de rugosidade ficando claro que o processo de corte por fresagem CNC é a melhor opção, pois, o processo de corte por jato d'água demonstrou não ser tão eficiente devido a formação de uma superfície com maior rugosidade em virtude da existência de substâncias abrasivas no fluido de corte, provocando micro trincas nos laminados. Os resultados apontaram que a resina epóxi SQ 2004 é a que possui melhores propriedades mecânicas, seguida da resina SQ 2001 e da resina epóxi éster vinil Derakane 470.

Palavra chave: Fibra de carbono, compósitos, laminados, processo de corte.

ABSTRACT

The laminated polymer composites have a value already established within the mechanical applications and industries. Its versatility coupled with their mechanical properties, stimulates increased use due in part by the ease of construction, making them competitive with respect to other materials. Knowledge of the polymeric matrix that has numerous variations and applications on the reinforcement in this study utilized fabrics of carbon fiber twill formed a prelude to the work. The analysis of laminated composites with woven bi-directional angle of 90° , and the variation of three types of polymer matrix, two of the epoxy groups and the epoxy group, vinyl ester, were the laminates. The process of cutting water jet and CNC milling, directly influenced the roughness of the cut surface of the laminate. The tensile test and bending, collaborated to identify which of the three matrices has the best performance. The techniques of characterization by optical microscopy, enabled us to identify the layers of tissue, the matrix failure modes and impregnation between matrix and reinforcement. Confocal microscopy 3D besides forming 3D images showed the difference in roughness between the cutting processes applied, and later confirmed by testing roughness became clear that the process of cutting CNC milling is the best option because the process cutting water jet proved not to be as effective due to the formation of a surface with increased roughness due to the presence of abrasives in the cutting fluid, causing micro-cracks in the laminate. The results showed that the epoxy resin SQ 2004 is the one that has better mechanical properties, then the resin SQ 2001 and the epoxy vinyl ester Derakane 470.

Keyword: Carbon fiber, composites, laminates, cutting process.

NOMENCLATURA

R_a = Rugosidade média

R_q = Rugosidade quadrática média

$R_{z\text{din}}$ = Rugosidade de profundidade

R_t = Rugosidade total

R_y = Rugosidade máxima

S_m = Largura média do perfil.

Δ_{dX} = elemento de deformação

y_{LN} = distância entre a linha neutra e a superfície inferior do corpo de prova.

α = ângulo de giro de flexão.

S_{uf} = módulo de ruptura na flexão

E = módulo de elasticidade

U_{rf} = módulo de resiliência

U_{tf} = módulo de tenacidade

Δl = variação do comprimento

L = comprimento total

Lista de Figuras

Figura 3.1 Diagrama de tensão x deformação comparando a resistência da fibra, e resinas sozinhas e a combinação da junção como compósito de fibra e resina.....	07
Figura 3.2 Classificação dos materiais compósitos.....	08
Figura 3.3 Anel epoxídico.....	09
Figura 3.4 Molécula de resina epoxídica (diglicidil éter de bisfenol A-DGEBA).....	09
Figura 3.5 Molécula de epicloridrina	10
Figura 3.6 Formula estrutural do bisfenol A.....	10
Figura 3.7 Reação da Epicloridrina + Bisfenol A.....	11
Figura 3.8 Arranjo das fibras nas principais formas.....	13
Figura 3.9 Curva típica de tensão versus deformação	17
Figura 3.10 Tensão versus deformação de alguns materiais compósitos.....	18
Figura 3.11 Configuração do ensaio de flexão de três pontos.....	19
Figura 3.12 Esquema dos esforços no ensaio de flexão.....	19
Figura 3.13 Elementos de esforços para o cálculo das tensões de flexão.....	20
Figura 3.14 Tipos de falha nos compósitos poliméricos.....	22
Figura 3.15 Modos de falha nos compósitos poliméricos.....	23
Figura 3.16 Cabeçote de jato d'água com abrasivo.....	26
Figura 3.17 Características gerais da fresa.....	27
Figura 4.1 Materiais utilizados na confecção de laminados de fibra de carbono.....	29
Figura 4.2 Processo de laminação.....	31
Figura 4.3 Início do processo de prensagem.....	32
Figura 4.4 Processo de extração dos corpos de prova por jato d'água CNC.....	33
Figura 4.5 Centro de usinagem Fresadora vertical ROMI modelo D 800.....	33
Figura 4.6 Laminados de tecido de fibra de carbono com os corpos de prova	34
Figura 4.7 (A) ensaio de flexão e (B) ensaio de tração.....	35
Figura 4.8 Exemplos acondicionados em pequenos envelopes de plásticos.....	36
Figura 4.9 Microscópio utilizados e amostras analisadas.	37
Figura 4.10 Aparelho para ensaios de rugosidade.....	38
Figura 5.1. Resultados gerais do ensaio de tração, representativos da tabela 5.1.....	40
Figura 5.2 Resultados gerais do ensaio de flexão.....	41
Figura 5.3 Curvas dos ensaios de tração do sentido do urdume.....	42
Figura 5.4 Curvas médias do ensaio de tração no sentido da trama.....	43
Figura 5.5 Curvas dos ensaios de flexão no sentido do urdume.....	44
Figura 5.6 – Diagrama médio de carregamento em função da deformação obtidos do ensaio de flexão no sentido da trama para as três resinas utilizadas.	45
Figura 5.7 – Resultados estatísticos comparando os valores do limite de resistência à tração em ambos os sentidos trama (t) e urdume (u).....	49
Figura 5.8 – Resultados da comparação estatística de deformação no ensaio de tração em ambos os sentidos.	51
Figura 5.9 – Resultados estatísticos comparando os valores médios das tensões de flexão em ambos os sentidos trama (t) e urdume (u).....	54
Figura 5.10 – Resultados de comparação estatísticas dos pontos médios da deformação no ensaio de flexão em ambos os sentidos.....	56
Figura 5.11 – Dados comparativos entre os processos de corte jato d'água x fresagem CNC.....	58
Figura 5.12 – Micrografias obtidas por estereomicroscópio de laminados de tecido de fibra de carbono com resina epóxi. (A e B – resina Derakane 470), (C e D, resina SQ 2004) e (E e F – resina SQ 2001).....	60

Lista de Figuras

Figura 5.13 – Micrografias obtidas por microscopia óptica de laminados de tecido de fibra de carbono com resina epóxi SQ 2001 das regiões de fratura.....	61
Figura 5.14 – Micrografias obtidas por microscopia óptica de laminados de tecido de fibra de carbono com resina epóxi SQ 2004 das regiões de fratura.....	62
Figura 5.15 - Micrografias obtidas por microscopia óptica de laminados de tecido de fibra de carbono com resina epóxi Derakane 470 as regiões de fratura.....	63
Figura 5.16 Micrografias confocal 3D (A -processo de corte por fresagem CNC) e (B processo de corte por jato d'água).....	65
Figura 5.17 – Micrografias confocal 3D (A e B – resina SQ 2001) e (C e D – resina SQ 2004).....	65
Figura 5.18 – Imagens de microscopia eletrônica de varredura da resina SQ 2004. (A) ampliação de 2.500 x, (B) ampliação de 5.000 vezes e (C) ampliação de 10.000 vezes.....	68
Figura 5.19 -Imagens de microscopia eletrônica de varredura da resina SQ 2001. (A) ampliação de 2.500 x, (B) ampliação de 5.000 vezes e (C) ampliação de 10.000 vezes.....	69
Figura 5.20- Imagens de microscopia eletrônica de varredura da resina Derakane 470. (A) ampliação de 2.500 x, (B) ampliação de 5.000 vezes e (C) ampliação de 10.000 vezes.	70

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 Aminas utilizadas como agentes de cura comercial.....	12
Tabela 3.2.Vantagens, desvantagens e algumas aplicações para resinas.....	12
Tabela 3.3 Comparação das propriedades mecânicas das fibras materiais metálicos.....	16
Tabela 5.1 Resultados de limite de resistência a tração σ_t (MPa).....	39
Tabela 5.2 Resultados de limite de tensão de flexão σ_f (MPa),.....	41
Tabela 5.3 Valores da diferença de tensão de tração entre trama e urdume em MPa e porcentagens relativas destas diferenças.....	44
Tabela 5.4 – valores de carregamento á flexão entre as resinas nos sentidos trama e urdume com valores convertidos em porcentagem.....	46
Tabela 5.5 – Apresenta a diferença em porcentagem da comparação das diferentes tensões de flexão entre trama e de urdume e das diferenças de tensões de tração entre trama e urdume.....	46
Tabela 5.6 – Resíduos e ajustes pelo método de Tukey para deformação no ensaio de tração.....	50
Tabela 5.7 – Resíduos e ajustes pelo método de Tukey para ensaio de flexão.....	54
Tabela 5.8 – Resíduos e ajustes pelo método de Tukey para deformação no ensaio de flexão.....	56

1.INTRODUÇÃO

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 está 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 sarja, com quatro camadas, intercalando-os entre o reforço e a matriz polimérica. Com relação a matriz polimérica optou-se por duas resinas do grupo epóxi e uma do grupo epóxi-éster-vinil.

A variação da matriz e a aplicação dos ensaios de tração e flexão foi útil para comparação qualitativa das propriedades mecânicas. 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 de varredura e microscopia confocal 3D, agregam uma composição panorâmica destes laminados em relação ao grau de impregnação e homogeneidade, detectando existências de modos de falhas, propagação de trincas, possíveis vazios estruturais e diferenças de rugosidade em virtude dos processos de corte (jato d água e fresagem CNC), aplicados para retirada dos corpos de prova.

2.OBJETIVOS

No presente trabalho, estuda-se a influência em compósitos laminados de matrizes poliméricas com relação as propriedades mecânicas, usando-se três tipos de resinas, sendo duas do grupo epóxi (SQ 2001 e SQ 2004) e uma do grupo epóxi éster vinil (Derakane 470) com reforço de tecido de fibra de carbono em trama sarja, como principal objetivo. A caracterização por microscopia óptica, microscopia estereoscópica, microscopia eletrônica de varredura, microscopia confocal 3D e a rugosidade, aplicados na superfície de corte e da fratura dos corpos de prova, para comparações dos processos de extração por jato d'água e fresagem CNC é objetivo complementar.

3.REVISÃO BIBLIOGRAFICA

Os materiais compósitos são desenvolvidos para atenderem determinadas solicitações de projetos. Depois de décadas de uso restritos em determinados setores, como na área militar, materiais compósitos estruturais, também chamados de avançados tem ampliado a sua aplicação em diferentes setores da indústria moderna, gerando um crescimento de 5% ao ano.^[2-5]

Hoje, estruturas com alto desempenho e baixo peso são utilizadas em indústrias navais, automobilísticas, construção civil, entre outras. Os materiais compósitos em tecidos são caracterizados pela tenacidade à fratura. Entender o comportamento de propagação de falhas em tecidos compósitos é buscar investigar determinado padrão de periodicidade que poderia ser produzido pela configuração do tecido.

Um ponto a ser observado é o grau de impregnação entre tecidos de fibra de carbono e a matriz polimérica. O método da gota de resina mostrou-se bastante eficaz na avaliação do modo capilar de penetração da resina no tecido.^[6] A percepção sobre os efeitos de adesão da superfície da fibra de carbono reforçada com resina epóxi esta relacionada com os tipos de fraturas. Resultados obtidos mostram que a região de interfase influencia significativamente o comportamento geral do material compósitos e o metacryl silano dá uma melhor adesão entre a interfase fibra-matriz. Uma consideração com relação as mantas que ao contrário do tecido, que pode ser uni ou bi direcionais, as mantas são formadas por fibras curtas ou fragmentadas e por esta configuração, possuem propriedades mecânicas diferentes das fibras contínuas em composição de tecido, onde em determinadas situações os resultados dos valores podem ser mais expressivos.^[7]

Os laminados de fibra de carbono demonstra-se superior mecanicamente com relação aos laminados de fibra de vidro, sob condições de carga onde a força é suportada principalmente pela fibra, ou seja, sob a carga de tração e recuo. Com relação a ruptura das fibras tanto de vidro quanto carbono em laminados de mesma espessura, constatou-se uma certa semelhança, porém a falha foi em geral mais localizada em comparação com a falha na fibra de vidro onde existe certa dispersão.^[8 -14] A fabricação e testes mecânicos de estruturas sanduíche, incluindo

um novo núcleo de materiais conhecido como rede de materiais de fibra sanduíche demonstraram possuir baixa resistência estrutural como provado pelos testes estáticos (compressão, flexão), porém com relação a resultados de amortecimentos se tornam bem atraentes pois podem ser utilizados onde a resistência estrutural não é solicitada ou seja é de importância secundária como por exemplo, em painéis internos de um helicóptero, onde servirá de isolamento acústico.^[15 - 17]

A resistência à tração de fibra de carbono encontra-se com valor em 1,13 GPa, e o valor da energia de fratura foi determinada em 9,9 MJ/m³, que é quase um quarto ou até menos do que os valores correspondentes do mono e multi-filamentos. Os dados obtidos no ensaio de tração em carbono virgem foram analisados e avaliados utilizando-se os parâmetros estatísticos de Weibull.^[18-20] Possíveis concentrações de tensões na viga sanduiche no plano sob flexão deve ser observado. A transferência de carga de cisalhamento é realizada por bandas de cisalhamento que ligam a superfície e a parte inferior por meio de interfaces adesivamente ligados.^[21-,27]

O entendimento dos modos de falhas estão ancorados principalmente aos esforços mecânicos que são submetidos os laminados, tanto da fibra de vidro quanto da fibra de carbono. Esta compreensão possibilita melhora na confecção destes laminados, a relação de cura desta matriz, construirá uma compreensão das características mecânicas.^[28-35] É notória a importância dos materiais compósitos hoje, principalmente matérias poliméricos, cuja aplicação e estudo vem ganhando espaço e popularidade tanto em segmentos industrias quanto em instituições acadêmicas.^[36-40]

3.1. MATERIAIS COMPÓSITOS

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.

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. ^[41]

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

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.

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. 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. 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. A Figura 3.1, 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 deformação⁴².

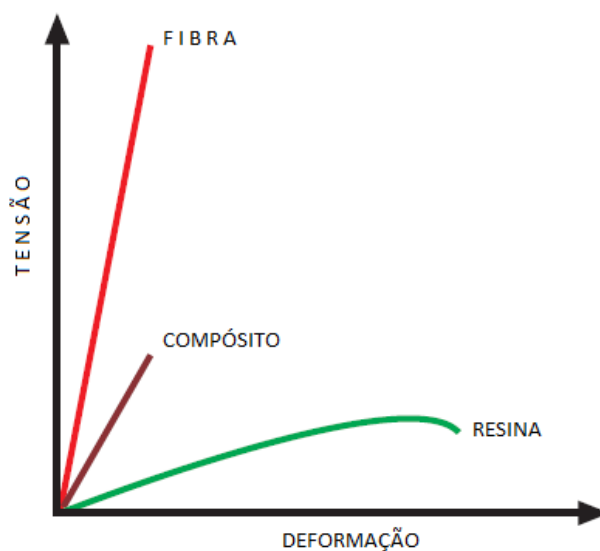


Figura 3.1 Diagrama de tensão x deformação comparando a resistência da fibra, e resinas sozinhas e a combinação da junção como compósito de fibra e resina. (<http://www.gurit.com/guide-to-composites.aspx>)^[46]

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. A Figura 3.2, observa-se como está estruturada a classificação.

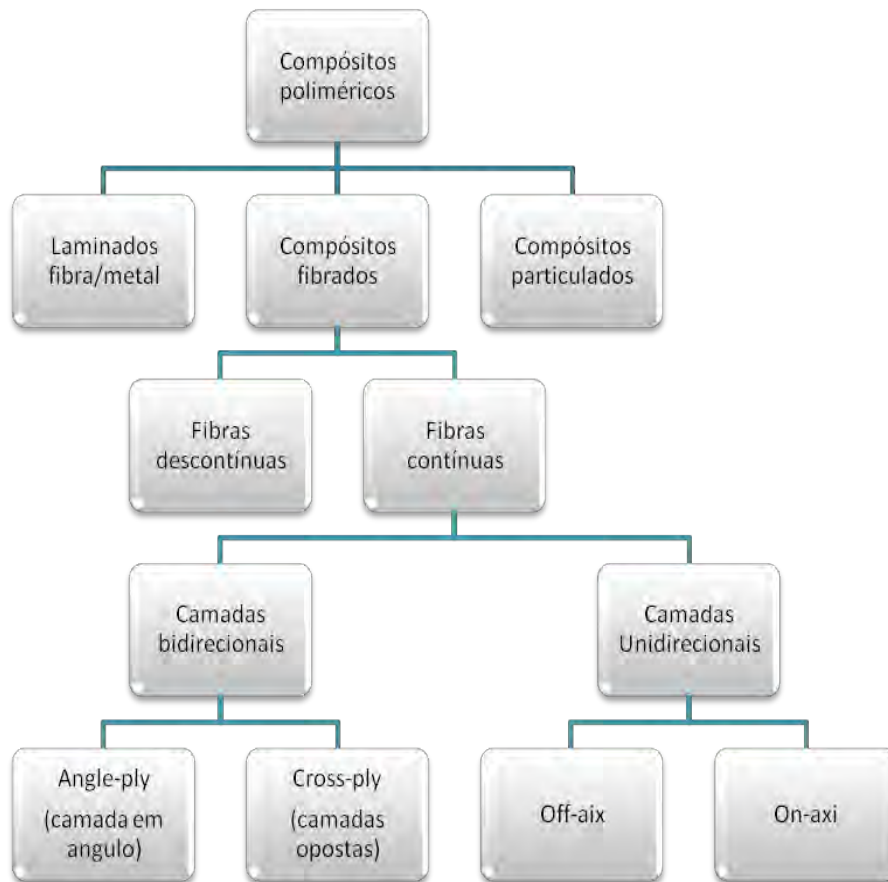


Figura 3.2 Classificação dos materiais compósitos.

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.

3.1.1 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 epícloridrina (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. A primeira resina epóxi com características similares às das atuais, foi sintetizada na Alemanha em 1933 por Schlack a partir da reação de epícloridrina com bisfenol A ^[43].

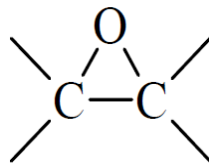


Figura 3.3 Anel epoxídico^[43]

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 epícloridrina (1-cloro-2,3-epóxi propano), formando a resina diglicidil éter de bisfenol A. A Figura 3.4 mostra a fórmula estrutural do diglicidil éter de bisfenol A-DGEBA. Estes compostos possuem um ponto de amolecimento entre 154 – 157°C.

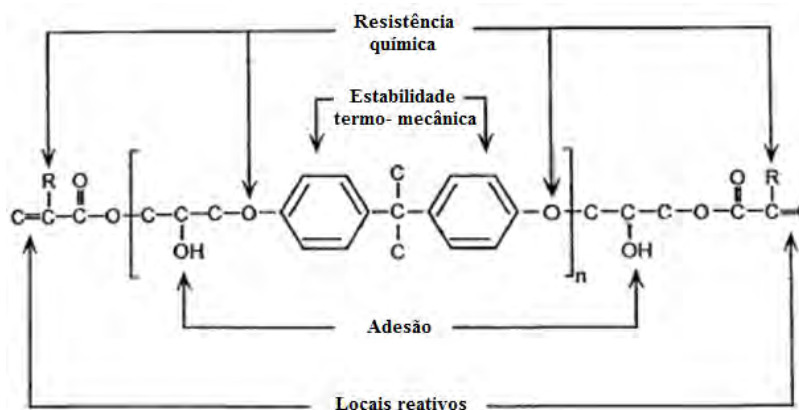


Figura 3.4 Molécula de resina epoxídica (diglicidil éter de bisfenol A-DGEBA) ^[43]

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 $n \leq 1$, 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 3.5, a molécula de epícloridrina e a sua composição, oxigênio, carbono, cloro e hidrogênio.

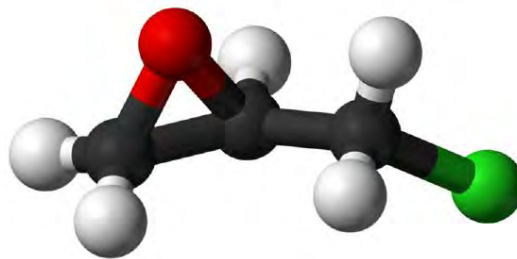


Figura 3.5. Molécula de epícloridrina ,composição: oxigênio (●); carbono (●); hidrogênio (●); Cloro (●)^[43]

A Figura 3.6 mostra a estrutura em 3D do bisfenol A, em sua composição consta, oxigênio, carbono e hidrogênio, além disso, existem dois anéis fenóis.

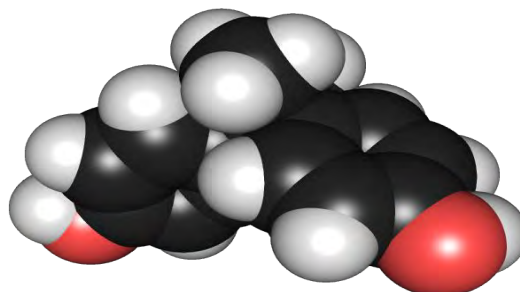


Figura 3.6 Formula estrutural do bisfenol A, composição; carbono (●); hidrogênio (●); oxigênio (●)^[43]

A reação entre a epícloridrina como agente promovedor da cura e o bisfenol A, compõem a matriz polimérica. A Figura 3.7, demonstra esquematicamente a reação entre a epícloridrina e o bisfenol A, realização a reação de cura da matriz polimérica.

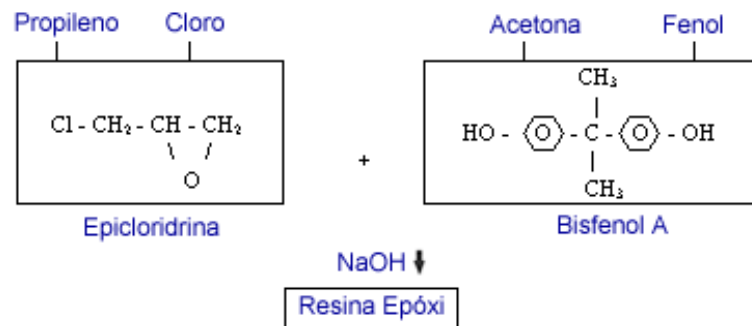


Figura 3.7. Reação da Epícloridrina + Bisfenol A^[44]

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 epóxicos possuem uma baixa resistência à fratura, geralmente com resultados em torno de 1,0 MPa. Conseqüentemente, 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.

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.

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. Na tabela 3.1 alguns tipos de reagentes comumente encontradas comercialmente^[44].

Tabela 3.1 Aminas utilizadas como agentes de cura comercial. [44]

Estrutura	Nome
Alifáticas	
	diétilenotriamina (DETA)
	triétilenotetramina (TETA)
	poli(oxipropilendiamina)
Ciclo alifáticas	
	isoforonadiazina (IPDA)
	1,2-diaminociclohexano (DAC)
	N, aminoetilpiperazina (AEP)
Aromáticas	
	4,4'-diaminodifenilmetano (DDM)
	4,4' diaminodifenilsulfono (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 [44]

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 vazamentos, encapsulante elétrico, uso na engenharia civil.
Aminas aromáticas	Bom desempenho às temperaturas elevadas, boa resistência térmica, longa vida útil, baixa absorção de umidade	Incompatibilidade com resinas epóxi, longos ciclos de curas a altas temperaturas, tóxicas.	Compositos 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. Produzem a cura em temperatura ambiente e possuem um baixo custo e de fácil mistura com a resina. [44]

3.1.2 Material de reforço

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. 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 . 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. Esse entendimento ajuda no cálculo de algumas propriedades físicas e mecânicas destes compósitos. Podemos separar em dois grupos os tecidos: tecidos planos, padrão tela, e os de configuração em sarja. A confecção do tecido em padrão tela segue a alternância do fio de urdume sobre e sob o fio de trama, seguindo essa alternância o tecido adquire maior estabilidade dificultando o escorregamento das fibras e conseqüentemente menor porosidade no compósito, além de possibilitar um padrão de resistência em ambas as direções, onde um melhor aproveitamento das propriedades é obtido quando estas fibras são orientadas nas direções das tensões. Quando temos a configuração em sarja por exemplo 2 x 1, onde um fio de trama é entrelaçado sob e sobre dois fios do urdume em movimentos sucessivos.

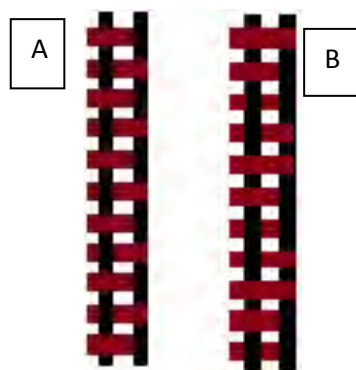


Figura 3.8 Arranjo das fibras nas principais formas; (a) tecido tipo tela (plain weave) 1x1, (b) tecido tipo sarja (twill weave 2 x 2) .

Pode-se realizar uma comparação entre a maleabilidade, onde teríamos a seguinte ordem, tela - sarja quanto à facilidade ou dificuldades na laminação e impregnação das fibras. Neste trabalho optou-se pelo tecido de fibra de carbono tipo sarja (twill weave) 2X2.

3.1.3 LAMINAÇÃO

A laminação é o processo pelo qual, sucessivas camadas de reforço devidamente impregnadas com a matriz polimérica são dispostas sobre uma superfície de um molde que tem a forma negativa da peça a ser fabricada. Os materiais compósitos são conformados de acordo com as especificações de projeto, seguindo normas e padrões pré-estabelecidos. De modo geral, os processos de confecção de laminados, componentes e estruturas de materiais compósitos podem ser classificados em processos de moldes abertos e processos de moldes fechados. O que determinará a diferença será a qualidade no acabamento na superfície do material e na quantidade de moldes necessários nas confecções das peças.

Os processos que se utilizam de moldes abertos geram um acabamento liso e uniforme em apenas uma das superfícies, utilizando apenas um molde, porém nos processos em que empregam moldes fechados, o acabamento liso será em ambas as faces, sendo necessário um par de moldes denominados de macho e fêmea. Podemos citar como exemplos que se beneficiam de moldes abertos à laminação por contato (hand lay-up), a laminação por projeção (spray up), o enrolamento filamentar (filament winding) e a infusão. Dentre os processos mais utilizados em moldes fechados, pode-se destacar a moldagem por transferência de matriz (RTM/RTM light = molde de transferência da resina) e a moldagem por prensagem que permite também o processo por injeção.^[45] Neste trabalho utiliza-se a técnica de laminação por contato (hand-lay up).

Este método contempla o baixo custo de investimento e a facilidade de laminação sendo comumente conhecido como laminação manual, sendo muito difundido em todo o mundo. Este processo permite fácil assimilação da forma de processamento, mesmo com essa vantagem a necessidade do conhecimento técnico é importante para garantir a qualidade solicitada pelo projeto. Antes de iniciar o processo de laminação, é aconselhável a aplicação de uma camada de matriz

sobre o gel coat ou sobre o véu, pois assim teremos uma boa humidificação, pois isso ajudará na melhor acomodação do reforço no molde, principalmente em regiões com curvatura, facilitando a operação de roletagem para a retirada do ar aprisionado entre as camadas. A sobreposição de camadas e resina é feito de forma alternada, matriz-tecido-matriz e segue um padrão de orientação de acordo com o tipo de trama do tecido, quando é composto por mantas não existe essa preocupação, pois as mantas em questão não possuem graus de orientações das fibras, pois elas são dispostas de formas aleatórias. A quantidade de camadas, os tipos de reforços, a orientação e as sequências de formação das camadas devem seguir um roteiro de laminação, também conhecido como, livro de camadas (ply book)^[45].

3.2 CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS

A determinação das propriedades mecânicas dos materiais envolvidos no processamento de materiais compósitos recebe uma atenção especial, pois as solicitações mecânicas em determinados projetos estruturais são o foco principal. Esta determinação permite uma visão do potencial que o material oferece frente a outros já consagrados no mercado. As propriedades dos compósitos estão fortemente vinculadas às propriedades da matriz e das fibras, desse modo o estudo das características não só do compósito, mas das fibras e da matriz são fundamentais para ajudar a compor um produto de qualidade e que seja interessante para o mercado.

Dentro da gama de ensaios mecânicos, o ensaio de tração é um dos mais comuns, sendo utilizado para caracterização mecânica de materiais e possibilita a determinação de propriedades tais como resistência, módulo de elasticidade, deformação longitudinal e transversal, e coeficiente de Poisson. Em virtude das características anisotrópicas dos compósitos, é interessante que o ensaio de tração seja realizado na direção longitudinal e transversal à fibra.

O ensaio de tração nas fibras obedece a normas técnicas específicas. O conhecimento sobre as características mecânicas das fibras ajuda na compreensão e na formatação de materiais compósitos. No ensaio realizado, a fração volumétrica será distribuída em toda extensão da fibra evitando assim falta ou excessos

localizados. Estas frações ficam em torno de 40% a 60%, que são recomendadas pela norma ASTM D 2243. Um importante detalhe durante a execução é evitar o escorregamento do corpo de provas em relação às garras da máquina de tração, pois caso contrário os dados obtidos não serão realísticos. Para evitar essa possibilidade é possível colar um elemento de proteção nas extremidades do corpo de prova da fibra, que é conhecido como tabs ou end tabs. A tabela 3.3, compara as propriedades mecânicas de alguns tipos de fibra poliméricas com alguns materiais metálicos.

Tabela 3.3 – Comparação das propriedades mecânicas das fibras e alguns materiais metálicos^[45]

Material	Densidade ρ (g/cm ³)	Resistência à tração σ_t (MPa)	Módulo de Elasticidade E (GPa)	$\frac{\sigma_t}{\rho}$
Aço carbono 1020 recozido	7,86	390	210	50
Aço maraging 300	7,86	2000	210	254
Titânio	4,61	1900	115	412
Fibra de vidro E	2,54	3448	72	1357
Fibra de carbono HT	1,77	3400	238	1921

Composta por um sistema bicomponente ou tricomponente, essas laminados compósitos podem ser obtidas pela mistura correta entre a resina termofixa e o endurecedor específico e o acelerador de cura, constituindo neste caso um sistema tricomponente. É de grande importância que sejam homogêneos, pois isso proporcionará além de um processo de cura bom, características mais uniformes. A temperatura de cura é outro fator que influencia nas qualidades mecânicas da matriz. No mercado existe diversos tipos de matrizes poliméricas com seus respectivos agentes de cura. No presente trabalho a matriz polimérica epóxi, foi utilizado para a confecção dos materiais compósitos, tendo sido observado suas propriedades e características.

Dentro do processamento dos materiais compósitos um procedimento que contribuirá para melhorar determinadas propriedades mecânicas será a utilização do processamento com uma autoclave, pois este recurso influencia no grau de impregnação entre a fibra do tecido ou da manta com a resina. A Figura 3.9 demonstra isso de forma clara. Os materiais compósitos de forma simplificada são a

união de dois ou mais tipos de materiais, onde a busca de melhores propriedades e características são de suma importância para as solicitações de projeto. Para determinar as propriedades mecânicas são feitos corpos de provas obedecendo à norma técnica, que neste caso a norma ASTM D 3039. Dentro da gama de ensaios existentes, os ensaios de tração e flexão chamam a atenção, pois revelam determinadas características implícitas dos compósitos. Quando os corpos de prova estão sendo submetido ao ensaio, as fibras que recebem o carregamento no sentido longitudinal alcançam melhores resultados se comparados com as fibras em sentido transversal.

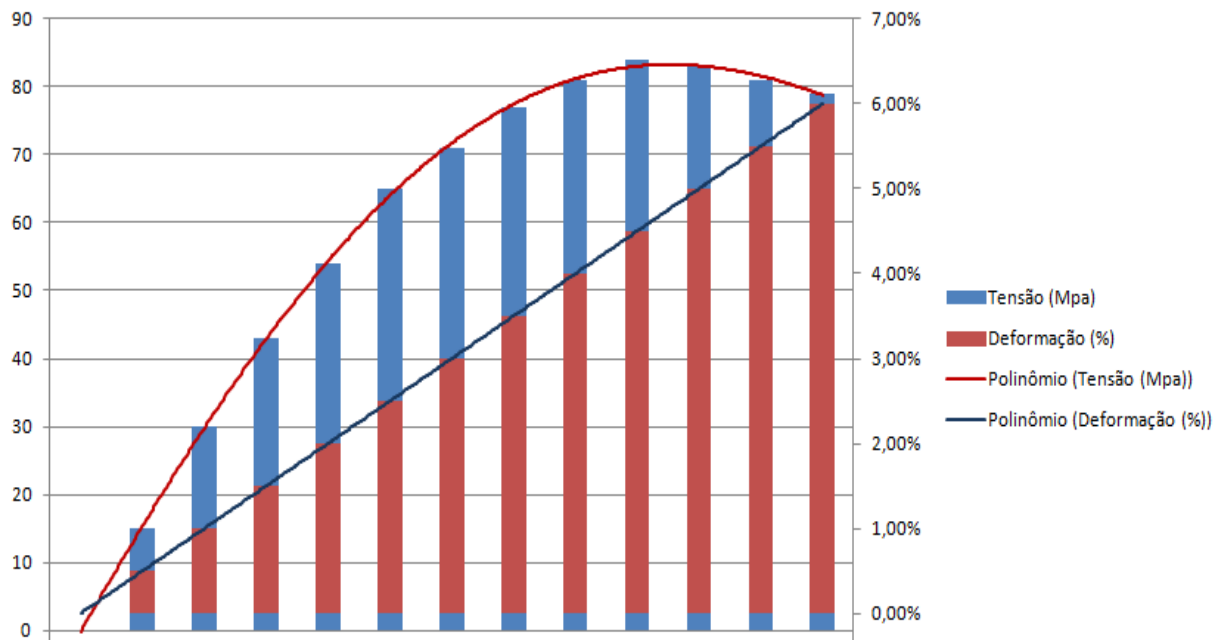


Figura 3.9– Curva típica de tensão versus deformação de um ensaio de tração de matriz com resina epóxi^[45].

As propriedades de um compósito estão intimamente ligadas ao tipo de orientação da fibra, desse modo, a relação de valores como resistência e módulo de elasticidade sofrem grandes variações à medida que a principal direção da fibra desloca-se da direção do carregamento. A Figura 3.10 demonstra a relação entre tensão por deformação de alguns materiais compósitos poliméricos.

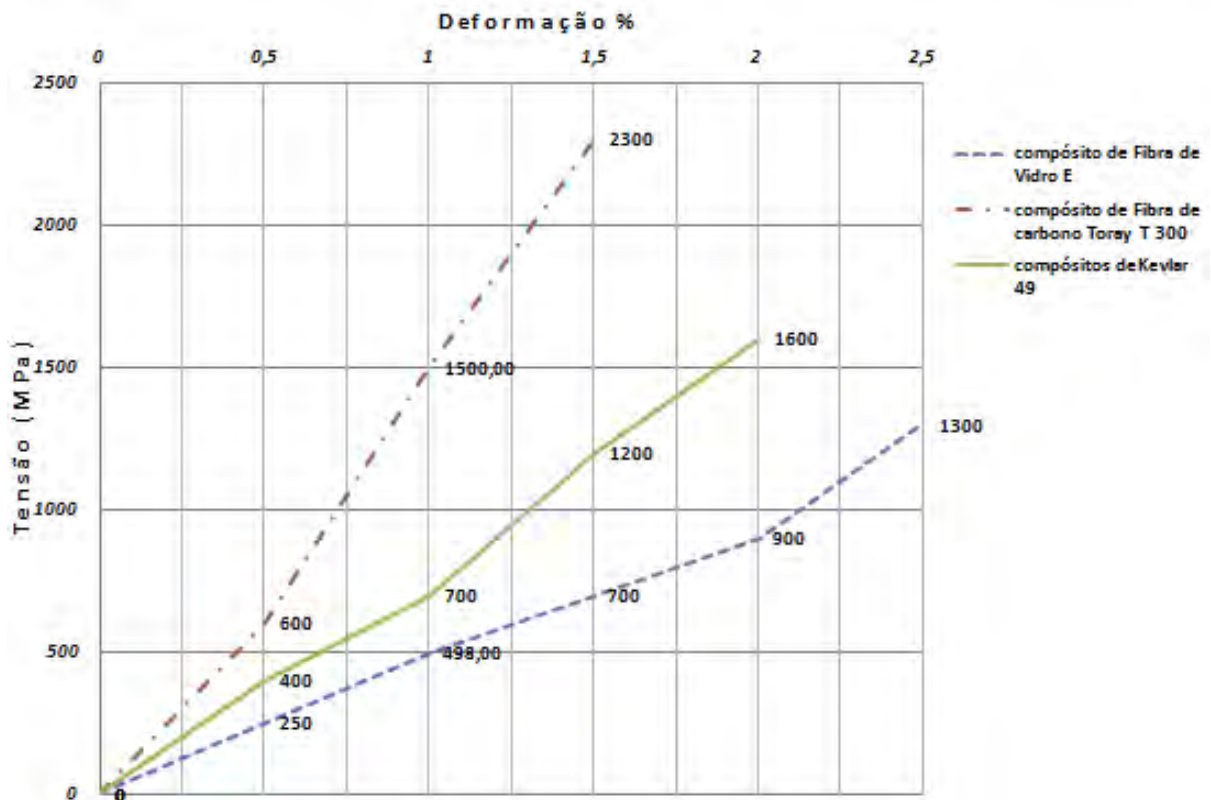


Figura 3.10 – Tensão versus deformação de alguns materiais compósitos (fibra com resina epóxi) ^[45].

No caso de determinação dos coeficientes Poisson para laminados com configurações de cross ply (0/90°) sugere-se a utilização de um extensômetro bidirecional ou um strain gages, onde este dispositivo interpreta as deformações ϵ_1 e ϵ_2 do compósito durante o ensaio, permitindo obter, por relação entre elas, o coeficiente de Poisson.

Dentro do ensaio de flexão, podemos realiza-lo de duas maneiras. Uma seria o ensaio de três pontos e o segundo consiste no ensaio em quatro pontos. Realizamos neste trabalho, o ensaio em três pontos, pois atende a necessidade do estudo de flexão para o material compósito em questão. Os principais resultados que podemos obter deste tipo de ensaio são: módulo de ruptura na flexão (S_{uf}), módulo de elasticidade (ϵ), módulo de resiliência (U_{rf}), módulo de tenacidade (U_{tf}). O ensaio de flexão pode sofrer variações em virtude da variação da temperatura, velocidade de aplicação da carga, os defeitos superficiais e as características microscópicas e principalmente, com a geometria da seção transversal da amostra. A Figura 3.11 mostra a configuração do ensaio de flexão de três pontos.

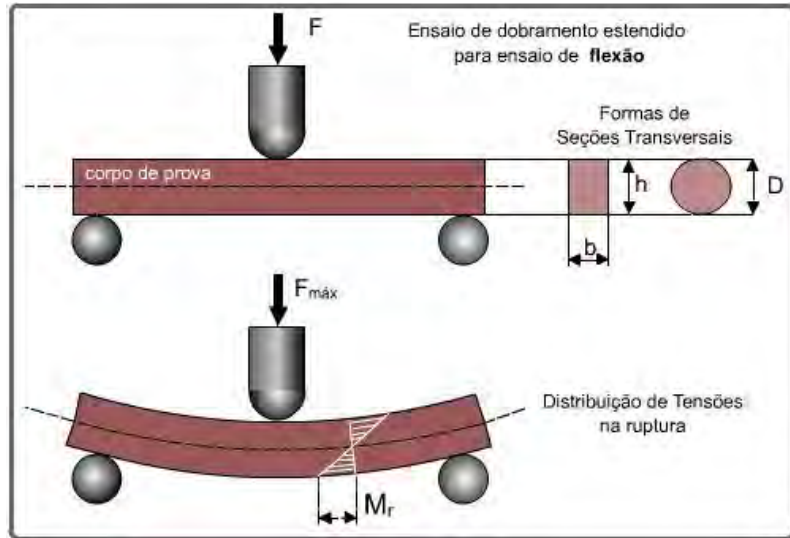


Figura 3.11 Configuração do ensaio de flexão de três pontos^[46].

Analisando a região do corpo de prova, entre o ponto A e o ponto central, conforme a Figura 3.12, observa-se que as fibras superiores à linha neutra são comprimidas e as fibras inferiores são tracionadas. Neste caso a tensão em qualquer fibra é proporcional à sua distancia da linha neutra, onde a força distribuída ao longo da seção transversal é representada por um conjugado interno resistente que equilibra o conjugado externo (momento fletor). Se considerarmos a deformação diferencial que ocorre nas fibras tracionadas, temos as seguintes relações;

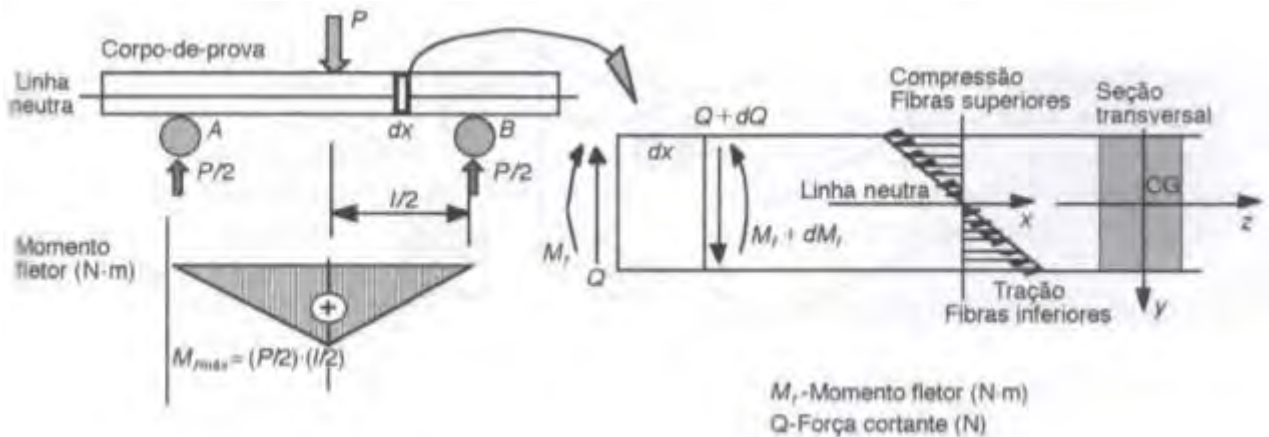


Figura 3.12 - Esquema dos esforços no ensaio de flexão^[46].

Sendo;

$$\Delta dx = y_{LN} * tg(\alpha) \quad (1)$$

Onde Δdx é o elemento de deformação, y_{LN} , é a distância entre a linha neutra e a superfície inferior do corpo de prova e α é o ângulo de giro de flexão, como demonstrado na Figura 3.12

Sabe-se que:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad \text{OU} \quad \varepsilon = \frac{\Delta dx}{dx} = \frac{\sigma}{E} \quad (2)$$

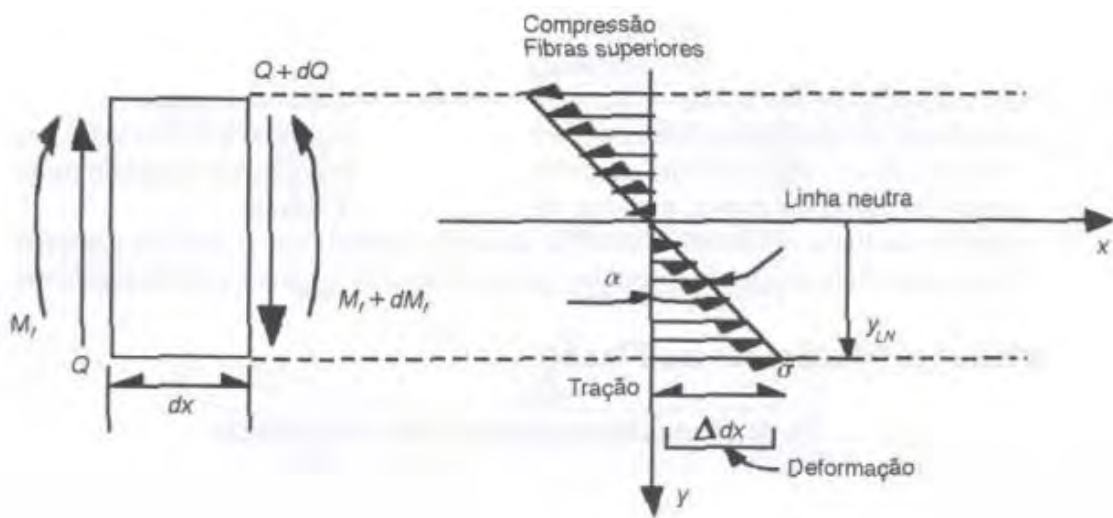


Figura.3.13 Elementos de esforços para o cálculo das tensões normais de flexão^[46].

Assim:

$$\sigma = \frac{E * tg(\alpha)}{dx} * y_{LN} \quad (3)$$

Substituindo teremos; $k = \frac{E * tg(\alpha)}{dx}$, temos portanto: $\sigma = K * y_{LN}$

3.3 Microscopia

Dentro deste estudo destacamos as técnicas de microscopia óptica (MO), microscopia confocal (MC), sendo as duas primeiras utilizadas amplamente na análise microestrutural de compósitos, possibilitando identificar vários tipos de falhas que ocorrem com o material como trincas e analisar as condições de processamento, que desempenham de forma direta as propriedades mecânicas na sua aplicação e a última, surge como recurso dentro da caracterização, em virtude do fácil manuseio, sem a necessidade de preparação complexa da amostra.

Um exemplo da caracterização é o estudo da superfície das amostras que podem apresentar, como microtrincas, determinação de origem de uma falha ou dos modos de fratura de um compósitos. Os materiais compósitos poliméricos são construídos pela combinação de um material polimérico, a matriz, e elemento de reforço. Quando se trata de matrizes termofixas, ambas são amorfas, isto é, não apresentam a formação de uma estrutura cristalina, como ocorre em alguns polímeros semicristalinos. Esses fatores aliados à anisotropia e os métodos de processamento enseja a análise microestrutural. Dentro dessa perspectiva, as falhas se apresentam sob uma grande diversidade, nas quais estão vinculadas as direções da aplicação da carga no material e a orientação das fibras nas camadas. Existem três modos de falhas que podem ocorrer nos compósitos poliméricos, são eles; interlaminar, intralaminar e translaminar. ^[47]

Com a evolução da tecnologia, os compósitos poliméricos têm sido escolhidos para aplicações antes reservadas aos metais. No entanto, vantagens como resistência mecânica, rigidez e baixo peso específico ficarão comprometidas quando se emprega na formação do material fibras e resinas que apresentam pouca ductilidade, levando o mesmo a apresentar baixa tenacidade à fratura, que poderia ser definida simplesmente como a resistência que o material deve exibir à propagação de trincas. Este comportamento torna-o sensível à presença de trincas e entalhes, podendo conduzir à fratura frágil, implicando, deste modo, que durante a utilização do material pouca ou quase nenhuma deformação plástica poderia ocorrer. Portanto, uma combinação de propriedades deve existir para que haja um aumento da tenacidade, quando necessário, garantindo ao mesmo tempo que a resistência seja mantida em níveis exigidos pela aplicação que dará ao compósito.

Também se destaca que as vantagens apresentadas, como elevada relação resistência mecânica-peso específico e módulo de elasticidade-peso específico, além da própria facilidade de o material poder ser desenvolvido de acordo com a aplicação final, resultam em estruturas e propriedades muito dependentes da correta seleção das matérias-primas; da análise estrutural, que deve levar em consideração aspectos tais como carga, condições de uso e exposição às condições do meio ambiente; do processo, especificamente com relação à orientação, sequência de posicionamento das camadas **{stacking sequence}** e polimerização da matriz. Devido ao material compósito apresentar tais particularidades, além da própria anisotropia que o caracteriza, o estudo de falha e fratura torna-se mais complexo comparado aos metais, sendo esta atividade conduzida há pouco mais de duas décadas, tornando esta área de intenso progresso e inovações onde os procedimentos empregados sofrem mudanças à medida que as experiências e o aprendizado aumentam em decorrência da maior utilização do material. Este capítulo apresentará os mecanismos e os modos básicos de falha exibidos pelos compósitos poliméricos com reforço contínuo quando submetidos a esforços de tração, compressão e cisalhamento, nas direções longitudinal e transversal à fibra, devido a estes terem importância predominante no comportamento estrutural do material.^[47]

Nos compósitos poliméricos apresentam reforço na forma de filamentos contínuos, exemplo característico do material adotado neste trabalho, a falha pode ser dividida em três tipos básicos: interlaminar, intralaminar e translaminar, as quais são ilustradas esquematicamente na Figura 3.14 Esta classificação, como na terminologia adotada para os metais para descrever fratura intergranular e transgranular, mostra o plano de fratura em relação aos constituintes microestruturais do material.

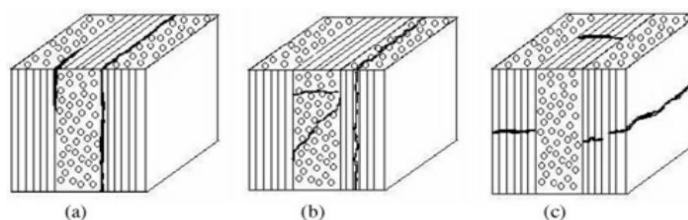


Figura 3.14 - Tipos de falha nos compósitos poliméricos: a) intralaminar, b) interlaminar e c) translaminar^[47].

Falhas intralaminares são aquelas localizadas internamente às camadas, enquanto que falhas interlaminares ocorrem em planos paralelos aos das camadas e seus mecanismos de falhas e aparências tendem a serem denominados por fratura da matriz e separação da fibra da matriz, causando uma das falhas mais presentes nos compósitos, a delaminação. Falhas translaminares são orientadas transversalmente ao plano do laminado e quando ocorridas por tração exibem uma topografia desigual, tornando a análise fractográfica bastante complicada. Neste caso, o aspecto dominante é a presença de fibras quebradas. A falha para os tipos interlaminar e translaminar ocorrerem segundo três modos: modo I, modo II e modo III. Entretanto, atenção deve ser dada à orientação do reforço na camada, pois, para uma mesma condição de tensão, ocorrem trincas interlaminares ou translaminares no material. A Figura 3.15, ilustra estas duas situações, ao mesmo tempo em que mostra os três modos de fratura para trincas interlaminares e trincas translaminares.

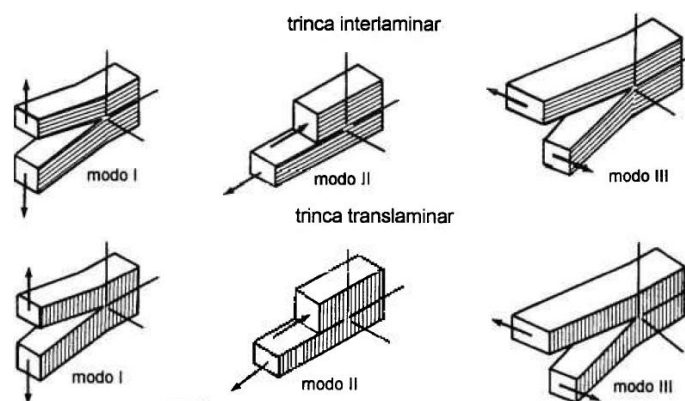


Figura 3.15 Modos de falha nos compósitos poliméricos^[47].

A classificação do tipo de falha é útil no sentido de conduzir à escolha do melhor método analítico para cada fratura ocorrida, pois falhas interlaminares, que têm como exemplo mais característico a delaminação, são melhores analisadas por microscopia óptica, tendo como um dos objetivos a observação da direção do crescimento da trinca, enquanto que nas falhas translaminares, que produzem a ruptura da fibra.

A identificação e análise de partículas requerem certa prática e habilidade por parte do microscopista. A técnica é mais usada para partículas maiores de 1 micrão e as análises dependem da combinação entre o desconhecimentos dos dados e o que se sabe sobre as partículas. O microscópio apresenta dois sistemas de lentes convergentes; a objetiva e a ocular. A objetiva é um conjunto de lentes que apresenta pequena distância focal e que fornece uma imagem real e aumentada do objeto que é observado. A ocular, também formada por lentes convergentes, funciona como uma lupa, que nos dá uma imagem virtual e aumentada da imagem real que se formou pela objetiva.

A objetiva e a ocular são dispostas nas extremidades de um cilindro oco, constituindo a coluna do microscópio e que possui a capacidade de se aproximar ou afastar da amostra para que se tenha a focalização perfeita. Isto é realizado por intermédio de uma cremalheira que se acha associado a uma roda dentada. A potência do microscópio é resultado do produto da ampliação linear da objetiva pela potência da ocular; seu valor será elevado quando as distâncias focais da objetiva e da ocular forem pequenas.

O poder separador, ou distância mínima distinguível entre dois pontos é limitado pela difração da luz. Assim, se o feixe de luz incidente teve uma abertura angular grande e utilizarmos lentes de inversão, o poder separador será melhorado, pois se elimina difração das bordas da lente.

Uma das preocupações quanto à preparação de amostras está relacionado com o cuidado para que a preparação não modifique a estrutura original e nem deixe artefatos, marcas da microtomia, lixamento ou mesmo o polimento, que confundirão na observação. A escolha do método a ser empregue está diretamente relacionado a vários fatores, como a forma da amostra (filme, fibra, pó, peça moldada ou extrusada, peça fraturada e etc.), a sua rigidez e o método de observação.

As observações por reflexão de superfícies naturais (por exemplo, filmes ou moldadas) ou fraturadas não necessitam praticamente de preparação, mas são beneficiadas se as superfícies forem revestidas com uma fina camada nanométrica de metal (alumínio ou ouro) para aumentar a refletividade, que é naturalmente baixa nos polímeros. Devemos lembrar que o cuidado no recobrimento deve ser redobrado, de acordo com a intenção da observação, podendo mascarar a imagem, ex.. Tipo de fratura. Em muitos casos é melhor tentar observar o material sem

nenhum recobrimento, posteriormente se a observação não alcançou o resultado desejado à técnica do recobrimento poderá ser utilizada. ^[47]

O equipamento utilizado para polir os polímeros é igual ao utilizado para polir metais, a velocidade de rotação será menor para não aquecer o material e evitar assim o deterioramento do mesmo. O polimento é realizado por etapas, com lixas de água ou pasta de polimento, com granulometria decrescentes. No caso dos termoplásticos reforçados com fibras, o polimento completo será alcançado com uma sequência de lixas deste tipo 320 (46 μm), 500 (30 μm), 1000 (18 μm), 2400 (10 μm) e 4000 (5 μm). No caso de um acabamento final, utiliza-se pasta de diamante, óxido de cério ou de alumina com granulometria de 3 μm , 2 μm e 0,25 μm .

3.4 – Processo de corte por Jato d'água e fresagem em CNC.

3.4.1 – Processo de corte por jato d'água.

O processo de corte por jato d'água é um processo mecânico sugerido para realizar cortes em materiais diversos. O fluido, neste caso é a água, que está pressurizada e é aplicado com extrema pressão, combinando esta pressão com a incorporação de algum material abrasivo, tais como o *carborundum* (carbeto de silício), o corindon ou a sílica^[48]. Esta técnica consiste na projeção sobre a superfície do material a ser cortado pelo jato de água com pressões entre 2.500 e 3.000 bares, com um fluxo de água entre 20 e 40 l.p.m., incorporando por efeito Venturi um abrasivo ao jato de água.

O funcionamento do processo de corte por jato d'água, começa com a água sendo filtrada, pois caso o fluido possua qualquer contaminante, poderá obstruir o bico de corte, posterior a esse tratamento a pressão do fluido é elevada, onde será armazenado em um acumulador para regularizar o fluxo de saída. A partir deste ponto o fluido é levado por tubulações até um bico de safira, que possui elevada resistência ao desgates. Acoplado ao bocal, existe um reservatório contendo material abrasivo em pó, com granulometria fina e homogênea, quando o fluido passar pelo bocal, arrasta o material abrasivo, gerando uma mistura com um alto poder de corte. O jato com alta pressão é direcionado para o material, o corte ocorre quando a força do fluido supera a resistência à compressão do material. A utilização de materiais abrasivos produz uma ação de cisalhamento, aumentando a eficiência de corte, podendo cortar materiais com espessuras e durezas consideráveis.^[49] Na FIGURA 3.17, temos o exemplo do cabeçote de corte com abrasivo.

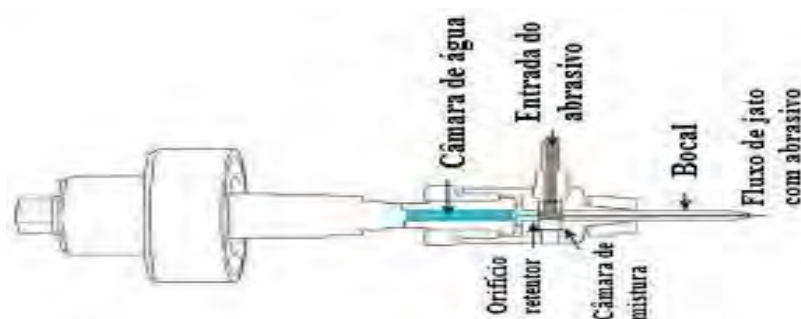


Figura 3.16 Cabeçote de jato d'água com abrasivo^[48].

<http://portuguese.alibaba.com/product-free-img/permalign-ii-b-abrasive-waterjet-cutting-head-246140716.html>

O processo de corte por jato d'água é interessante por não gerar distorções térmicas, grande versatilidade para usinagem além de não agredir o meio ambiente. Este tipo de processamento atende a diversos segmentos industriais, devido a sua precisão e qualidade na superfície de corte.^[48]

3.4.2 – Processo de corte por fresagem CNC

Fresagem é um dos processos de usinagem mecânica existente. Esse processo de usinagem consiste na operação de usinagem em que o metal é removido por uma ferramenta giratória – denominada fresa – de múltiplos gumes cortantes. Cada gume remove uma pequena quantidade de metal em cada revolução do eixo onde a ferramenta é fixada. A máquina ferramenta que realiza a operação é denominada fresadora. A operação propicia a usinagem de superfícies apresentando qualquer orientação, tanto a peça quanto a ferramenta devem se movimentar em mais de uma direção ao mesmo tempo^[49-51]. O processo de usinagem por fresamento é altamente produtivo e eficiente com relação a superfície de corte do material usinado. Na FIGURA 3.18, apresenta-se as características gerais da fresa.

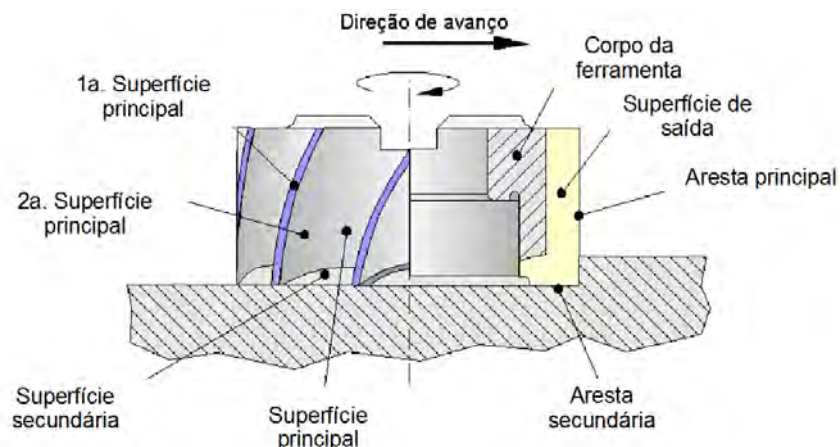


Figura 3.17 Características gerais da fresa^[49]

<http://sites.poli.usp.br/d/pmr2202/arquivos/PMR2202-AULA%20RS2.pdf>

Esse tipo de usinagem pode ser aplicado em materiais compósitos poliméricos, possibilitando obter um processo rápido com qualidade, alta performance^[52].

3.5 – Rugosidade

Marinescu *et al.* (1998) define rugosidade como o desvio da forma geométrica ideal da superfície. O parâmetro de rugosidade mais utilizado é a média aritmética (Ra) e é definido como a média aritmética do desvio do perfil de rugosidade em relação à linha média^[52].

Bigerelle *et al.* (2008) relata que a redução da rugosidade superficial está diretamente relacionada com o tamanho e a forma do grão abrasivo do rebolo, onde quanto mais arestas de corte em contato com a superfície melhor a rugosidade. A natureza do ligante também influencia nessa variável, segundo Demirci *et al.* (2008)^[53].

Para Hecker e Liang *et al.* (2003), a rugosidade é uma função das condições cinemáticas do processo (profundidade de corte, velocidade de corte e da peça) e também do material usinado. Assim, uma maior velocidade melhora a qualidade superficial, pois haverá uma maior quantidade de grãos em contato com a peça^[54].

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 – Materiais utilizados

Utilizou-se neste trabalho os seguintes materiais. Tecido de fibra de carbono em trama de sarja 200 g/m², três resinas, sendo a SQ 2001, SQ 2004 do grupo epóxi e a Derakane 470 do grupo epóxi éster vinil, balança de precisão Marca: Marte, Modelo: AS5000C, recipiente para realizar a mistura entre resina e catalisador. Prensa hidráulica PHH 80 t, para homogeneizar a dimensões superficiais dos laminados, mantendo pressão e temperatura constante, centro de usinagem marca Romi modelo D 800, máquina de corte FLOW por jato d'água, modelo MACH 4, para extração dos corpos de provas, máquina universal de ensaios EMIC 300 KN , para a realização dos ensaios de tração e flexão, microscópio óptico, marca OLYMPUS, microscópio estéril citoval 2 Carl Zeiss, microscópio confocal 3D Leica, para realização das análises. O ensaio de rugosidade foi realizado por um rugosímetro modelo Surtronic 3⁺ ,marca Taylor Hobson , com um Lc = 0,8 (cutoff) Ln = 4mm e filtro gaussiano, a Figura 4.1, apresenta os materiais utilizados para a preparação dos laminados.

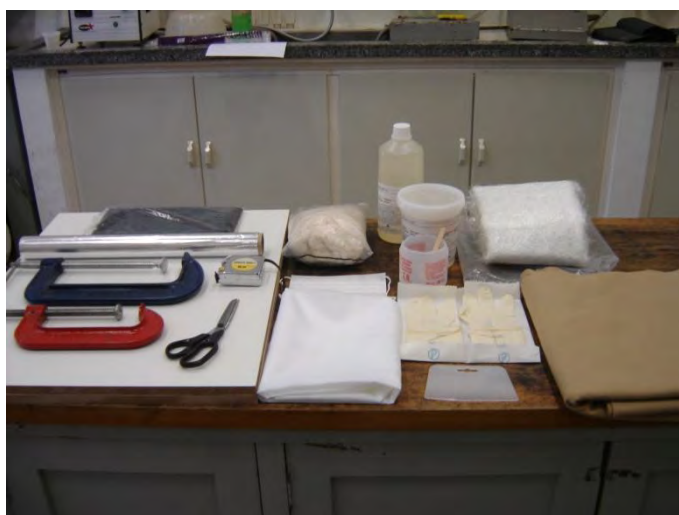
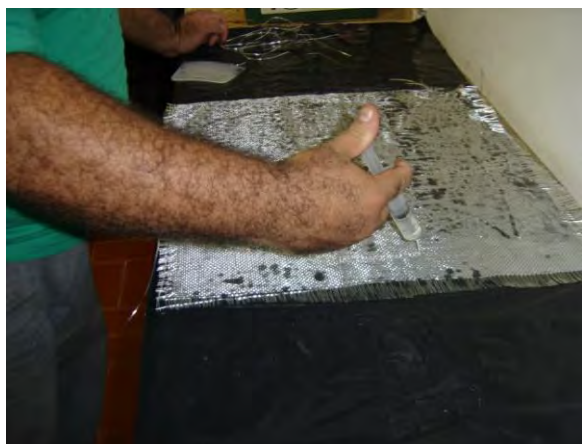


Figura 4.1– Materiais utilizados para confecção de laminados de tecido de fibra de carbono.

4.2 - Laminação

O processo de laminação manual (hand lay up) seguiu determinados métodos para buscar uma padronização dos laminados, pois caso contrário, seria inviável realizar comparações. No primeiro momento, confeccionou-se 4 camadas de tecido de fibra de carbono em trama sarja, como uma de dimensão 50 cm x 50 cm x 0,03cm e um peso de 50g por camada, alcançando uma densidade de 0,66 g/cm³. Determinando-se 33,2% de vazios, este tecido chega a 1,80 g/cm³, como apontado pela literatura. Feito a confecção das camadas de tecido de fibra de carbono, preparou-se as placas de alumínio com papel filme de poliéster que mantém a sua integridade até a temperatura de 250°C, junto com tecido feltro e tecido de cetin, em ambas as placas.

Ao término desta fase de preparação, a ação se voltou para as resinas, onde a correta ordem de combinação entre resina e catalisador são necessários. No caso das resinas SQ 2001 e SQ 2004, uma proporção de 100:50, ou seja utilizamos 140g de resina e 70 g de catalisador de acordo com especificações indicativas do produto, totalizando uma mistura de 210g, onde com uma seringa de injeção de 20 ml, aplicamos 50 ml por camada, alcançando assim 200ml no total do laminado. Em relação a resina Derakane 470, esta exigiu algumas etapas a mais que as duas anteriores, que é a adição de cobalto em suspensão líquida e butanol líquido, então utilizamos 216g de resina Derakane, 0,64g de cobalto e 2,16g de butanol, totalizando 218,8 g, e aplicando com uma seringa, 50 ml por camada totalizando 200ml no laminado. Essa preocupação esta justificada pela busca de padronização para possíveis comparações. A Figura 4.2, apresenta a sequência do processo de laminação manual (hand lay up). Utilizou-se espátulas de silicone para uniformizar a distribuição da matriz polimérica sobre o reforço.



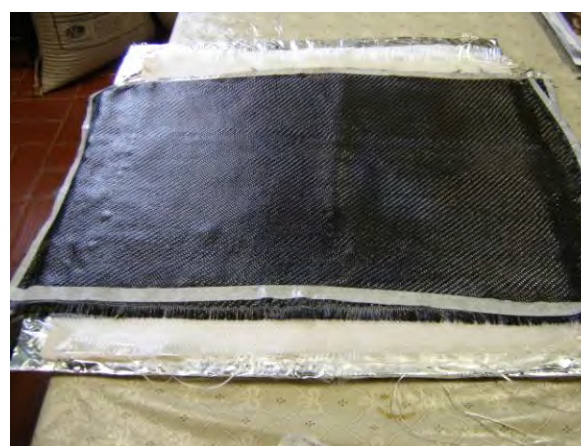
(A)



(B)



(C)



(D)

Figura 4.2 – Processo de laminação, (A) aplicação da resina na camada com uma seringa graduada, (B) Laminação utilizando-se espátula de silicone para espalhar a resina sobre o tecido, (C) Sobreposição do tecido resina em um tecido de fibra de carbono também já resinado e (D) camadas ajustadas e resinadas.

Posterior a laminação, estes foram colocados em uma prensa hidráulica onde buscou-se manter uma temperatura de 60°C constante e uma pressão de 30 bar durante 6 horas. Esta temperatura ajuda a “desarmar” o inibidor de cura, facilitando assim o processo e diminuindo o tempo final de cura. A Figura 4.3, mostra o laminado dentro da prensa. Esse processo se tornou padrão para as três resinas, tornando assim o processo padrão e com melhores propriedades mecânicas.



(A)



(B)



(C)



(D)

Figura 4.3 – Início do processo de prensagem; (A) O laminado dentro da prensa (B) Ajuste da prensa (C) laminado no processo de prensagem a quente (D) Manômetro de pressão em 30 bar e display de controle de temperatura da prensa marcando 60°C.

Após o tempo de 6 horas de prensagem o material teve cura total, seguiu-se então para o processo de extração dos corpos de prova por jato d'água e por fresagem CNC.

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 4, utilizou-se bico com tubo de mistura STANDART para PASER ECL 04/04 (TMS – 40-40-C) 1 mm de diâmetro, compondo o fluido aplicou-se um abrasivo de granulação 80. A velocidade de corte na fibra de carbono foi de 2723 mm/mim. A altura do jato acima da placa foi dimensionada em 9 mm e a pressão do jato condicionou-se em 87.000 psi (599,884 MPa), a Figura 4.4 a apresenta o processo de corte dos laminados.



(A)



(B)

Figura 4.4- Processo de extração dos corpos de prova por jato d'água CNC. (A) Máquina de corte por jato d'água e (B) processo de corte do laminado.

Com relação ao processo de extração por fresagem em centro de usinagem CNC utilizou-se um equipamento ROMI, modelo D800 uma velocidade de 7000 rpm, avanço de 100mm/min e uma ferramenta para metal duro de 2,5 mm de diâmetro. Todos os corpos de prova foram confeccionados obedecendo aos padrões descritos. A Figura 4.5 mostra o centro de usinagem utilizado.



Figura 4.5 – Centro de usinagem vertical ROMI modelo D 800

Com os corpos de provas devidamente confeccionados a etapa seguinte foi a realização de ensaios de tração e flexão. A Figura 4.6, mostra os laminados com os corpos de prova já extraídos.



(A)



(B)



(C)

Figura 4.6 Laminados de tecido de fibra de carbono com os corpos de prova já extraídos. (A) Laminado de tecido de fibra de carbono resina SQ 2001, (B) laminado de tecido de fibra de carbono com resina Derakane 470 e (C) Laminado de tecido de fibra de carbono com resina SQ 2004.

4.3 - Ensaio mecânicos

Estes ensaios foram realizados no laboratório da Faculdade de Engenharia da UNESP – Bauru e para tanto utilizou-se uma máquina universal EMIC 300 KN, tanto para tração quanto para flexão. A carga aplicada foi para 2000 kg tanto na tração quanto na flexão. A Figura a seguir, mostra os laminados de tecido de fibra de carbono já com os corpos de provas extraídos. O ensaio de tração e flexão foi realizado nos corpos de provas retirados nos dois sentidos (urdume e trama) devidamente confeccionados, a fim de se obter suas propriedades mecânicas. Neste caso foi realizado ensaios tanto no sentido da trama quanto no sentido do urdume. A Figura 4.7, mostra a máquina de ensaios universal executando o ensaio nos corpos de provas laminados.



(A)



(B)

Figura 4.7 – (A) ensaio de flexão e (B) ensaio de tração.

4.4 – Microscopia

Após o término dos ensaios mecânicos dos corpos de prova, seguiu-se a extração de parte do material rompido para a realização de caracterização por microscopia óptica, eletrônica de varredura e confocal 3D. Estes exemplares foram acondicionados em embalagens plásticas separadamente a fim de preservar a integridade dos resultados. A Figura 4.8, expõem os exemplares a serem caracterizados.



Figura 4.8 – Exemplares acondicionados em pequenos envelopes de plásticos.

Algumas amostras foram embutidas e outras não, com a finalidade de que algumas fossem lixadas para poder visualizar as camadas de fibra de carbono e outras não embutidas para se avaliar a forma da fratura. Quando se realiza o processo de embutimento, lixamento e polimento das amostras, o ponto de falha é perdido, portanto é interessante a observação “in natura” das amostras. Na Figura 4.9, apresenta o microscópio CONFOCAL 3D LEICA e o estereomicroscópio citoval 2 Carl Zeiss , utilizado neste trabalho além do microscópio óptico Olympus modelo BX-51 . A aplicação da técnica de microscopia confocal, mostrou-se muito fácil e de grande utilidade, pois se alcançou os objetivos com a topografia em 3D das amostras e a percepção da rugosidade dos processos de corte. A microscopia óptica ajudou na caracterização das falhas, além de observar alguns aspectos sobre grau de impregnação das fibras com a resina entre camadas.



(A)



(B)



(C)

Figura 4.9 Microscópio utilizados e amostras analisadas. (A) Confocal LEICA DCM 3D (B) Estereomicroscópio citoval 2 Carl Zeiss e (C) Microscópio óptico Olympus.

A microscopia eletrônica de varredura é umas das técnicas de caracterização já consagradas para análises que necessitam ampliações onde o microscópio óptico não alcança. O desenvolvimento da microscopia eletrônica objetivou conseguir ultrapassar a barreira imposta pela luz visível. Distintamente do microscópio óptico, que necessita da luz para formar a imagem, o microscópio eletrônico realiza a construção das imagens com elétrons. A grande vantagem de se utilizar do microscópio eletrônico, sem dúvida é com relação a sua resolução, que é superior ao microscópio óptico. O microscópio eletrônico de varredura é preferido em situações de estudo de superfícies ou subsuperfícies, onde as imagens têm altas profundidades de foco, favorecendo assim a obtenção de relevos da superfície das amostras.

É possível, obter imagens em altas resoluções, podendo assim ter maiores ampliações com detalhes específicos sem perder a nitidez. Esta técnica foi aplicada neste trabalho, resultando uma baixa aceleração, obtendo imagens com qualidade das superfícies das fibras de carbono e da matriz polimérica.

4.5 – Rugosidade

O ensaio de rugosidade foi realizado por um rugosímetro modelo Surtronic 3⁺⁺⁺, marca Taylor Hobson, com um $L_c = 0,8$ (cutoff) $L_n = 4\text{mm}$ e filtro gaussiano, com o intuito de verificar qual dos procedimentos de corte apresentou menor coeficiente de rugosidade R_a , pois a diferença de processos poderia ajudar na propagação de micro trincas no material laminado, favorecendo possíveis falhas mecânicas e conseqüentemente menores valores de resistência. Na Figura 4.10, tem-se o aparelho utilizado para a realização da medição de rugosidade e a amostra preparada para a verificação.

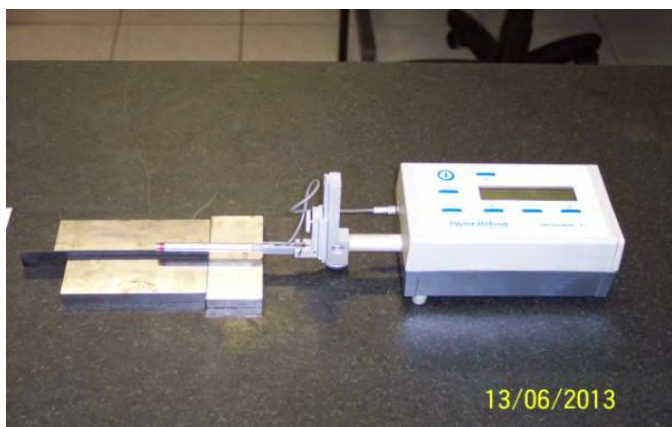


Figura 4.10 Rugosímetro para ensaios de rugosidade.

4.6 - Análises estatística utilizando o software Minitab16

O software estatístico Minitab® (versão 16) foi utilizado para efetuar a análise estatística dos resultados obtidos para os compósitos em estudo. A ANOVA (Análise de variância) foi a técnica utilizada para a análise dos resultados alcançados. Os gráficos gerados explicitaram as análises do software estatisticamente significativos.

5. Resultados e discussão

5.1 – Influências da matriz polimérica

O processo de laminação manual (hand lay up) foi realizado pelo mesmo operador para manutenção da padronização dos corpos de prova (cps), o acréscimo da pressão, o calor e o tempo de cura contribuíram, de forma inequívoca para uma padronização do processo e dos laminados, o que gerou espessuras dos laminados variando de 0,95mm a 1,0 mm. Os resultados obtidos pelos laminados são melhores que o reforço e a matriz quando analisados individualmente, devido à combinação de ambas as propriedades. No caso específico a quantidade de matriz e de reforço foi de 1:1, ou seja, a matriz polimérica contribuiu muito para que os resultados fossem atrativos, além disso, o alinhamento do reforço buscou manter um padrão ajudaram a alcançar estes valores de tensão. O entendimento sobre materiais compósitos direciona a busca pela combinação de propriedades específicas de cada material envolvido, com o objetivo de se obter, um material compósito com características exclusivas.

5.2 Influências dos processos de corte nas propriedades mecânicas

A tabela 5.1 a seguir demonstra os resultados de limite de resistência a tração σ_t (MPa), densidade ρ (g/cm^3) e relação limite de resistência a tração/densidade σ_t/ρ (MPa/ g/cm^3), para os corpos de prova, retirados no sentido do urdume e da trama, para os três tipos de resinas utilizados.

Tabela 5.1 – Resultados de limite de resistência a tração σ_t (MPa), densidade ρ (g/cm^3) e relação limite de resistência a tração/densidade σ_t/ρ (Mpa/ g/cm^3), para os corpos retirados no sentido urdume, Trama, para as três resinas utilizadas.

ENSAIO TRAÇÃO	Tensão σ_t (MPa)	Densidade ρ (g/cm^3)	σ_t/ρ	Desvio Padrão (MPa)
TRAMA SQ 2004	342	1,30	263,95	5
URDUME SQ 2004	382	1,30	295,07	30
TRAMA SQ 2001	316	1,31	241,12	16
URDUME SQ 2001	391	1,31	298,17	35
TRAMA DERAKANE 470	322	1,39	231,97	11
URDUME DERAKANE 470	347	1,39	249,86	17

Nesta tabela verificou-se que o maior valor de σ_t o urdume foi obtido com a

resina SQ 2001, seguida pela resina SQ 2004 e posteriormente pela resina Derakane 470. Em relação aos corpos de provas retirados no sentido da trama, o maior valor foi da resina SQ 2004 seguida pela resina Derakane 470 e posteriormente pela resina SQ 2001. Na comparação da relação σ_t/ρ o maior valor com a SQ 2001 no sentido do urdume, seguida pela SQ 2004 e bem abaixo a Derakane 470. Em relação ao sentido da trama a que manteve maior relação σ_t/ρ , foi a SQ 2004 seguida da SQ 2001 e com menor valor a Derakane 470. A figura 5.1, apresenta os dados da tensão de tração e densidade em função das resinas utilizadas e o sentido de retirada dos corpos de prova.

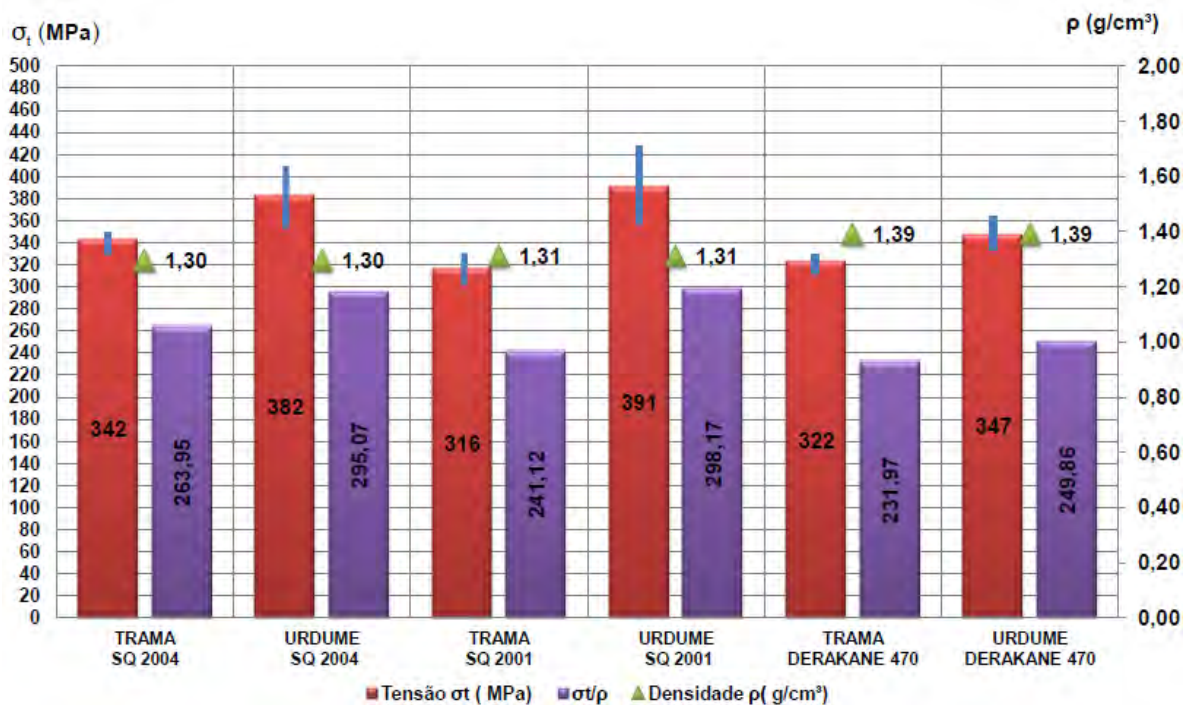


Figura 5.1 – Resultados gerais do ensaio de tração, nos dois sentidos para as três resinas.

A tabela 5.2 demonstra os resultados de flexão em relação aos sentidos de retirada dos corpos de prova (urdume e trama), também apresenta a densidade e a relação tensão por densidade para que com estes dados possamos entender estas relações e comprovarmos estatisticamente qual das resinas é a melhor.

Tabela 5.2 – Resultados de limite de tensão de flexão σ_f (MPa), densidade ρ (g/cm³) e relação limite de resistência a tração/densidade σ_f/ρ (Mpa/g/cm³), para os cps retirados no sentido Urdume, Trama, para os três tipos de resinas utilizados.

ENSAIO FLEXÃO	Tensão σ_f (MPa)	Densidade (ρ) (g/cm ³)	σ_f/ρ	Desvio Padrão (MPa)
TRAMA SQ 2004	491	1,30	378,83	32
URDUME SQ 2004	599	1,30	462,45	27
TRAMA SQ 2001	350	1,31	266,69	40
URDUME SQ 2001	425	1,31	324,06	47
TRAMA Derakane 470	354	1,39	255,06	44
URDUME Derakane 470	467	1,39	336,52	90

Observa-se que o melhor resultado tanto no sentido da trama quanto no sentido do urdume é com a resina SQ 2004, seguido pela resina Derakane 470 e posteriormente a resina SQ 2001. A Figura 5.2, apresenta em gráficos de barras com seus desvios padrões os valores de tensão de flexão e densidade em relação às resinas utilizadas e o sentido de retirada dos corpos de prova.

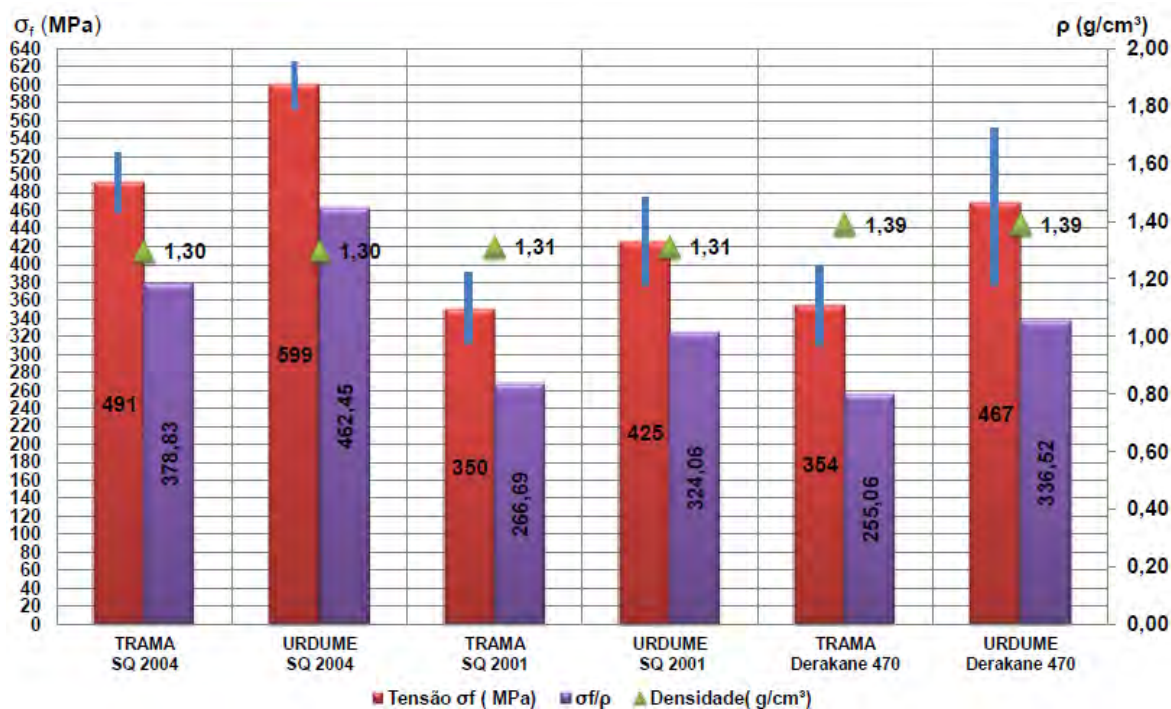


Figura 5.2 – Resultados gerais do ensaio de flexão nos dois sentidos para as três resinas.

O resultado dos ensaios de tração da resina SQ 2004, no sentido da trama é o melhor sendo que a resina Derakane 470 que é a segunda melhor e em terceiro lugar ficou a resina SQ 2001. Valores de σ_t e σ_f dos corpos de prova preparados e laminados com 4 camadas em tecido sarja de fibra de carbono retirados no sentido do urdume para ensaio com densidade de 1,311 g/cm³.

Com relação ao ensaio de flexão, estes laminados obtiveram os resultados que variam de 359 MPa a 491 MPa, lembrando oportunamente que estes valores estão relacionados com o sentido de orientação das fibras do tecido. Apresentam-se na sequência os gráficos médios retirados das curvas de tensão x deformação, elaboradas na máquina universal tanto para o ensaio de tração como flexão em relação ao sentido de retirada dos corpos de prova.

Apresenta-se na Figura 5.3, o gráfico retirado do ensaio de tração dos valores de tensão x deformação no sentido do urdume para os três tipos de resinas. Esses dados ajudam a formar um horizonte sobre qual resina é mais interessante ou qual a melhor orientação a ser trabalhada em uma laminação, pois estes fatores influenciam de forma direta as propriedades mecânicas e consequentemente podemos ter melhores condições para definir dimensionamentos estruturais.

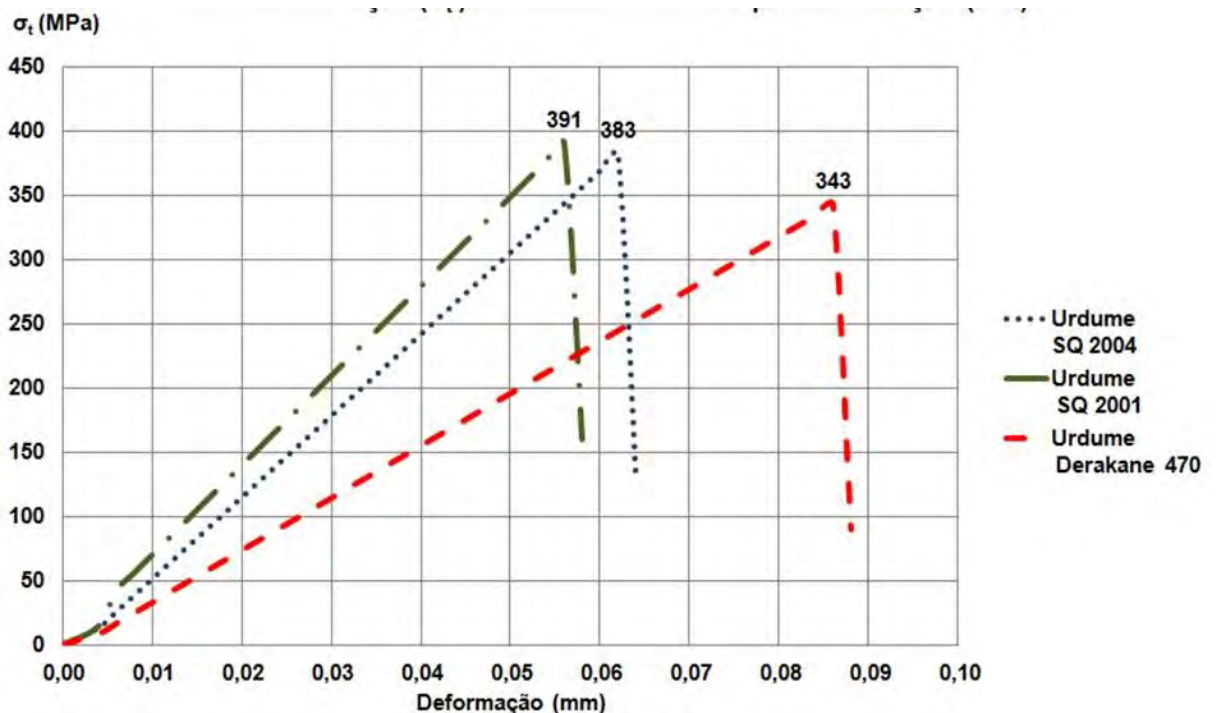


Figura 5.3 – gráfico retirada do ensaio de tração dos valores de tensão x deformação no sentido do urdume para os três tipos de resinas.

Observamos que, a resina SQ 2001 no sentido do urdume tem o melhor desempenho, seguido da resina SQ 2004 e posteriormente pela resina Derakane 470.

Com relação à deformação do material, acontece o inverso, ou seja, a resina Derakane 470 possui maior deformação, seguida pela resina SQ 2004 e posteriormente pela resina SQ 2001. A Figura 5.4 apresenta o diagrama médio de tensão x deformação do ensaio de tração obtido na máquina universal, nos corpos de prova retirados no sentido da trama em função das resinas utilizadas.

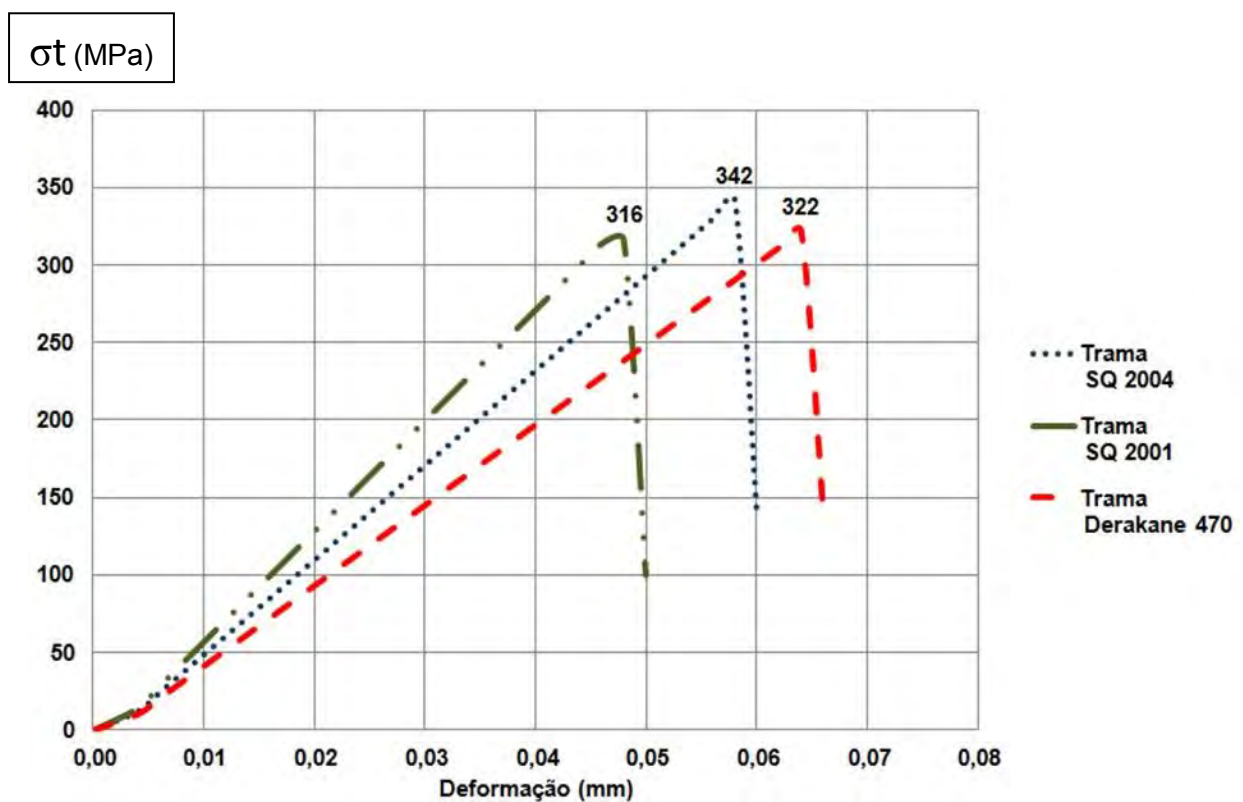


Figura 5.4 – Curvas médias do ensaio de tração no sentido da trama para as três resinas.

A resina SQ 2004 foi a que melhor resultado obteve, seguido da Derakane 470 e posteriormente a SQ 2001. A diferença entre a resina SQ 2004 e SQ 2001 é de 7,50% apenas, muito pequena, já com relação à resina Derakane 470, a diferença entre a SQ 2001 é de 1,77%, menor ainda e com a resina SQ 2004 a diferença é de 5,83%. Neste ponto a resina Derakane 470 é a segunda melhor e em terceiro a resina SQ 2001. Pode-se observar também que a deformação é igual tanto no sentido do urdume quanto no sentido da trama, ou seja, a resina derakane 470 é que mais se deforma, seguida pela resina SQ 2004 e por ultimo a resina SQ

2001. A tabela 5.3 demonstra a diferença de tensão de tração entre trama e urdume em MPa e as porcentagens relativas destas diferenças.

Tabela 5.3 – Valores da diferença de tensão de tração entre trama e urdume em MPa e porcentagens relativas destas diferenças.

RESINAS	DIFERENÇA ENTRE TRAMA X URDUME	VALORES EM %
SQ 2001	74 MPa	19,00%
SQ 2004	40 MPa	10,47%
DERAKANE 470	25 MPa	7,20%

Os valores médios dos diagramas obtidos no ensaio de flexão são apresentados na Figura 5.5, que no sentido do urdume, mostra a curva de força x deformação retirado do ensaio na máquina universal.

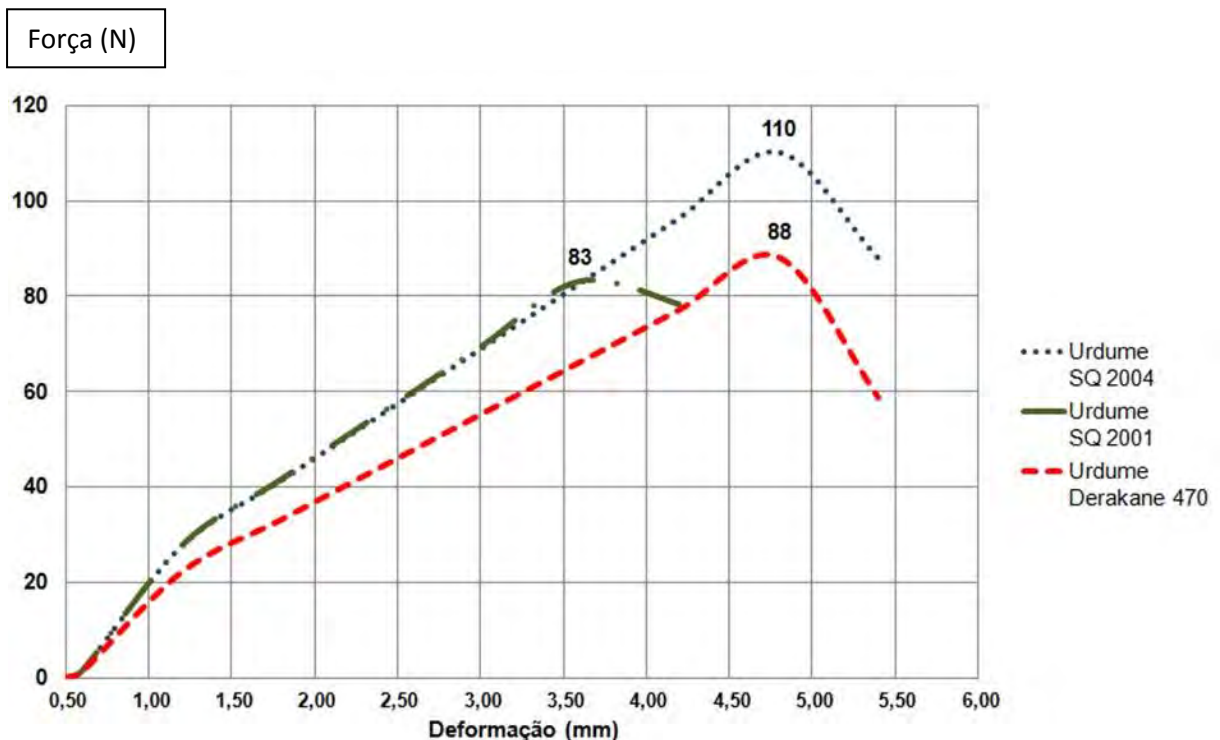


Figura 5.5 – Diagrama médio de carregamento a flexão em relação à deformação no sentido do urdume para as três resinas utilizadas.

Nota-se que a resina SQ 2004 no sentido do urdume foi a que melhor resultado teve, e o pior resultado ficou com a resina SQ 2001. Porém vemos que tanto a resina SQ 2004 e a resina Derakane 470, possuem os mesmos valores para a deformação, enquanto que a resina SQ 2001 é a que possui menor valor para a deformação. A Figura 5.7, mostra os valores no sentido da trama. Neste ensaio vemos claramente que a resina SQ 2004 foi a que obteve melhores resultados, seguida da resina SQ 2001 e por ultimo a resina Derakane 470. A diferença também está relacionada com a deformação, que neste caso é maior que a resina SQ 2001 e possui menor deformação, determinando assim, que estes valores sejam maiores na trama do que no sentido do urdume.

Nos ensaios de flexão onde o sentido de flexão foi o urdume, os valores obtidos foram maiores do que no sentido da trama, conforme a Figura 5.6 apresenta e novamente temos a resina SQ 2004 como a melhor, seguida pela resina Derakane 470 e finalmente a resina SQ 2001.

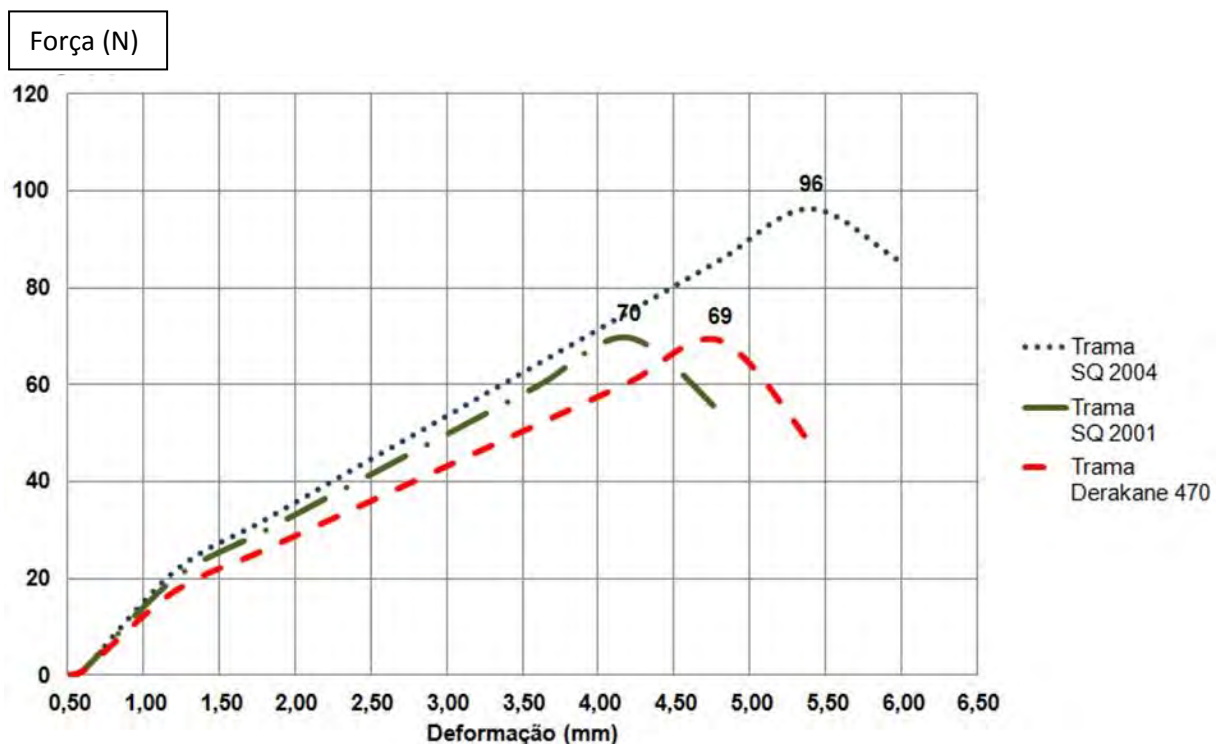


Figura 5.6 – Diagrama médio de carregamento em função da deformação obtidos do ensaio de flexão no sentido da trama para as três resinas utilizadas.

A tabela 5.4 ilustra a diferença de valores de carregamento á flexão entre as resinas nos sentidos trama e urdume com valores convertidos em porcentagem.

Tabela 5.4 – valores de carregamento á flexão entre as resinas nos sentidos trama e urdume com valores convertidos em porcentagem.

Resina	Urdume X trama – diferença em N	Diferença em %
SQ 2004	14 N	12,72%
SQ 2001	13 N	15,66%
Derakane 470	19 N	21,59%

Outro fator que colabora para o entendimento entre a diferença entre trama e urdume é a comparação dos valores de tração x flexão. A tabela 5.5, demonstra esses dados deixando claro que tanto no ensaio de tração quanto no ensaio de flexão, o sentido do urdume é mais interessante, possui maior resistência à ruptura do que a trama em virtude da leve torção que os fios sofrem além do alinhamento. Essa torção é um dos fatores responsáveis pelo melhor desempenho.

Tabela 5.5 – Apresenta a diferença em porcentagem da comparação das diferentes tensões de flexão entre trama e de urdume e das diferenças de tensões de tração entre trama e urdume.

Diferenças entre trama e urdume	Tensão de Flexão σ_f (MPa)	Tensão de tração σ_t (MPa)	Diferença ($\sigma_f - \sigma_t$) (%)
SQ 2004	108	41	62,96
SQ 2001	75	75	0,00
DERAKANE 470	113	21	77,87

5.3. Análise Estatísticas utilizando SOFTWARE MINITAB 16.

A utilização do software MINITAB 16, possibilitou formar uma discussão mais interessante do trabalho. Este software foi aplicado para os dados relativos aos ensaios de tração e flexão e a também com relação à deformação de ambos os ensaios aplicados. A seguir temos os resultados concernentes aos ensaios de tração tanto no sentido do urdume quanto no sentido da trama.

5.3.1 ANOVA Unidirecional para $\frac{t}{\rho}$: SQ2004urdume; SQ2001urdume; Derakane470 urdume; SQ2004trama; SQ2001trama; Derakane 470trama .

Fonte	GL	SC	MC	F	P
Fator	5	15382	3076	10,70	0,000
Erro	24	6901	288		
Total	29	22283			

S = 16,96 R². = 69,03% R². (ajustado) = 62,58%

ICs de 95% individuais para à média				
baseados nos Desv.Est. agrupada				
Nível	N	Media	Desv.Est.	
SQ2004u	5	294,46	25,21	(-----*-----)
SQ2001u	5	298,32	26,83	(-----*-----)
Der470u*	5	249,78	12,39	(-----*-----)
SQ2004t	5	263,22	3,46	(-----*-----)
SQ2001t	5	241,66	12,13	(-----*-----)
Der470t*	5	247,05	7,57	(-----*-----)
				+-----+-----+-----+-----
				225 250 275 300

*u - urdume

Desvio estimado(Desv. Est.) agrupada = 16,96
Agrupar informação utilizando o método de Tukey

	N	Media	Agrupação
SQ2001u	5	298,32	A
SQ2004u	5	294,46	A B
SQ2004t	5	263,22	B C
Der470u*	5	249,78	C
Der470t*	5	247,05	C
SQ2001t	5	241,66	C

As médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

Intervalos de confiança simultâneos de Tukey de 95%

Todas as comparações em paralelos

Nível de confiança individual = 99,50%

Foi subtraído a SQ2004:

Foi subtraído t/d4u a:				
	Inferior	Centro	Superior	-----+-----+-----+-----+-----
SQ2001u	-29,28	3,86	37,00	(-----+-----)
Der470u ⁺	-77,82	-44,68	-11,54	(-----+-----)
SQ2004t	-64,37	-31,23	1,91	(-----+-----)
SQ2001t	-85,94	-52,80	-19,66	(-----+-----)
Der470t ⁺	-80,55	-47,41	-14,27	(-----+-----)
				-----+-----+-----+-----+-----
				-50 0 50 100
Foi subtraído SQ2001u a:				
	Inferior	Centro	Superior	-----+-----+-----+-----+-----
Der470u ⁺	-81,68	-48,54	-15,40	(-----+-----)
SQ2004t	-68,23	-35,09	-1,95	(-----+-----)
SQ2001t	-89,80	-56,66	-23,52	(-----+-----)
Der470t ⁺	-84,41	-51,27	-18,13	(-----+-----)
				-----+-----+-----+-----+-----
				-50 0 50 100
Foi subtraído Der470u ⁺ a:				
	Inferior	Centro	Superior	-----+-----+-----+-----+-----
SQ2004t	-19,69	13,45	46,59	(-----+-----)
SQ2001t	-41,26	-8,12	25,02	(-----+-----)
Der470t ⁺	-35,87	-2,73	30,41	(-----+-----)
				-----+-----+-----+-----+-----
				-50 0 50 100
Foi subtraído SQ2004t a:				
	Inferior	Centro	Superior	-----+-----+-----+-----+-----
SQ2001t	-54,70	-21,56	11,58	(-----+-----)
Der470t ⁺	-49,32	-16,18	16,96	(-----+-----)
				-----+-----+-----+-----+-----
				-50 0 50 100
Foi subtraído SQ2001t a:				
	Inferior	Centro	Superior	-----+-----+-----+-----+-----
Der470t ⁺	-27,75	5,39	38,53	(-----+-----)
				-----+-----+-----+-----+-----
				-50 0 50 100

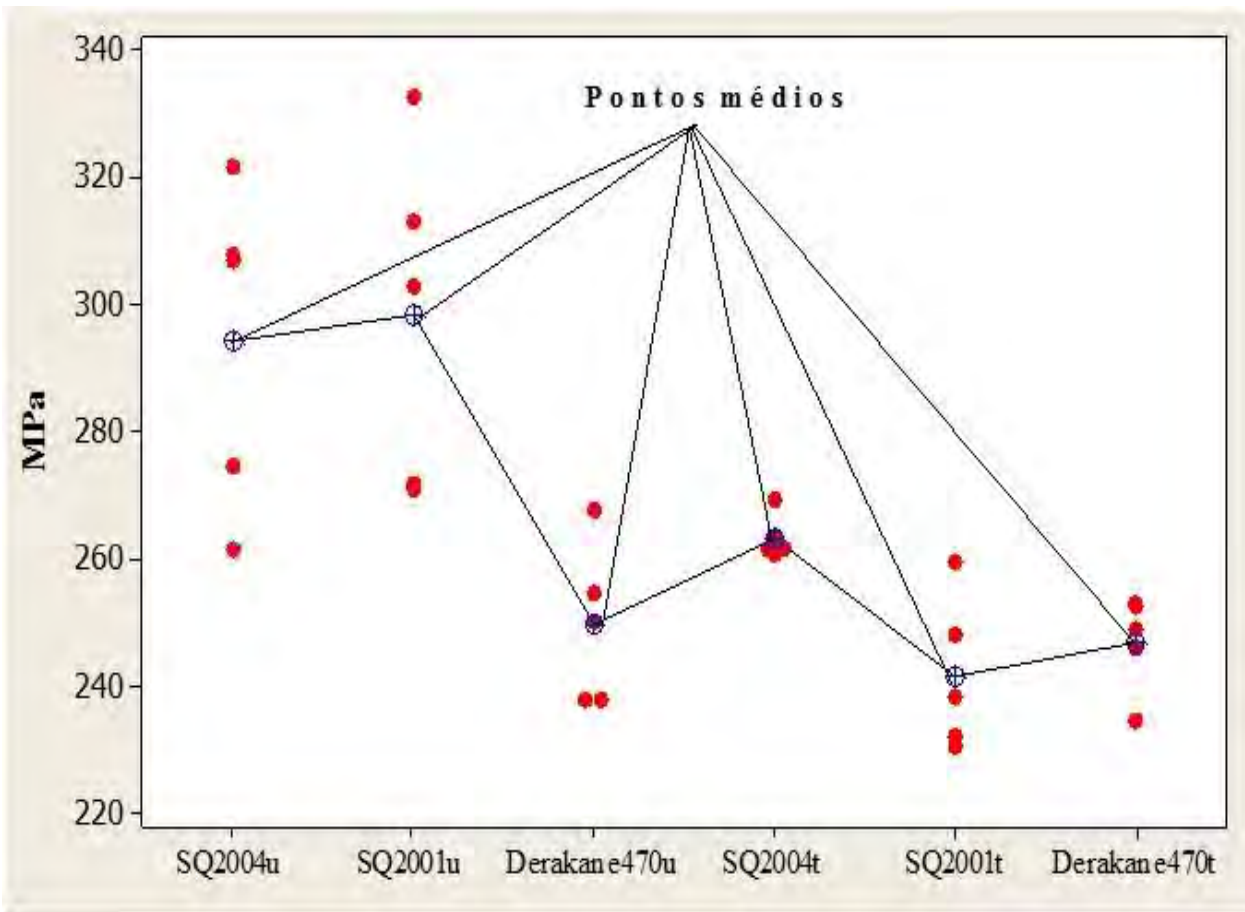


Figura 5.7 – Resultados estatísticos comparando os valores do limite de resistência à tração em ambos os sentidos trama (t) e urdume (u)

Podemos interpretar os dados fornecidos pelo software e pela Figura 5.7 acima, da seguinte maneira:

Com relação aos ensaios de tração no sentido do urdume, nota-se que a resina SQ 2001 é levemente superior, ficando em segundo lugar a resina SQ 2004 e posteriormente a resina Derakane 470. Quando se observa os resultados no sentido da trama, a resina SQ 2004 tem melhores resultados, seguido pela resina SQ 2001 e posteriormente pela resina Derakane 470, ou seja, no sentido do urdume a resina SQ 2001 se sobressaiu com relação às outras, porém com relação ao sentido da trama a SQ 2004 foi a que melhor resultado obteve.

A análise com relação à deformação pode apontar qual das duas resinas, SQ 2004 ou SQ 2001, possuem melhores deformações. Isso influencia em muito as propriedades mecânicas da matriz e conseqüentemente aponta qual das opções das matrizes é considerada a melhor.

5.3.2 ANOVA Unidirecional para deformação no sentido do urdume e no sentido da trama nos ensaios de tração.

Fonte	GL	SC	MC	F	P
Fator	1	0,000182	0,000182	1,17	0,341
Erro	4	0,000621	0,000155		
Total	5	0,000803			

S = 0,01246 R². = 22,61% R². (ajustado) = 3,26%

ICs de 95% individuais para a média baseados em Desv.Est. agrupada					
Nível	N	Media	Desv.Est.	-----+-----+-----+-----+-----	
Urdume	3	0,06733	0,01570	(-----*-----)	
Trama	3	0,05633	0,00802	(-----*-----)	
-----+-----+-----+-----+-----					
0,045 0,060 0,075 0,090					

Desv.Est. agrupada = 0,01246

Agrupar informação utilizando o método de Tukey

	N	Media	Agrupação
Urdume	3	0,06733	A
Trama	3	0,05633	A

As médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

Intervalos de confiança simultâneos de Tukey de 95%

Todas as comparações em pares

Nível de confiança individual = 95,00%

Restou Urdume a:			
	Inferior	Centro	Superior
Trama	-0,03925	-0,01100	0,01725
+-----+-----+-----+-----			
Trama	(-----*-----)		
+-----+-----+-----+-----			
	-0,040	-0,020	0,000 0,020

Tabela 5.6 – Resíduos e ajustes pelo método de Tukey para deformação no ensaio de tração.

Resinas	Urdume	Trama	RESID1	RESID2	AJUSTES1	AJUSTES2
SQ2004	0,062	0,057	-0,00533	0,000667	0,06733333	0,05633333
SQ2001	0,055	0,048	-0,01233	-0,00833	0,06733333	0,05633333
Derakane 470	0,085	0,064	0,017667	0,007667	0,06733333	0,05633333

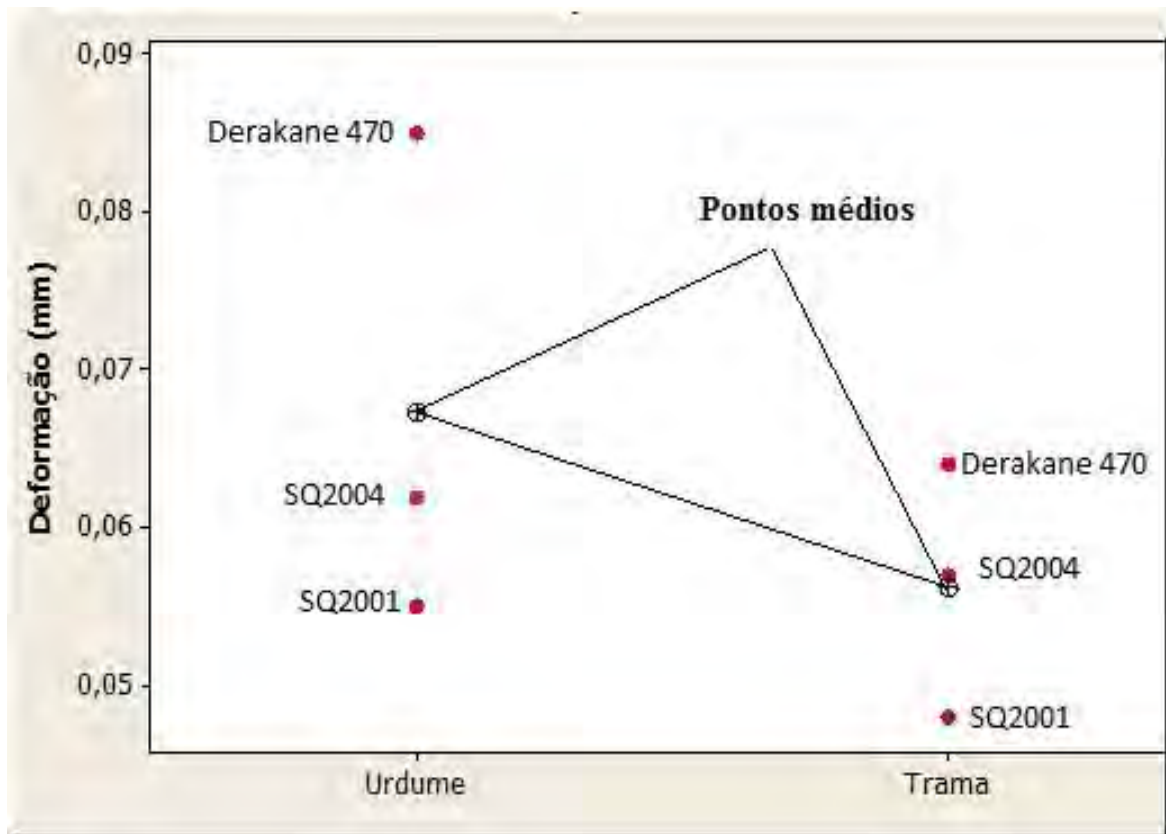


Figura 5.8 – Resultados da comparação estatística de deformação no ensaio de tração em ambos os sentidos.

Com os resultados obtidos com relação a deformação no ensaio de tração, observa-se que a resina Derakane 470 tem maior deformação em ambas as direções, demonstrado pela Figura 5.8. Porém, o fator a ser analisado esta relacionado com as resinas epóxi, SQ 2004 e SQ 2001, onde tanto no sentido do urdume quanto o da trama, temos com melhor resultado para deformação a resina SQ 2004.

5.3.3 ANOVA Unidirecional para $\frac{\sigma_f}{\rho}$: SQ2004urdume; SQ2001urdume; Derakane470urdume ; SQ2004trama; SQ2001trama;Derakane470 trama.

Fonte	GL	SC	MC	F	P
Fator	5	144424	28885	20,58	0,000
Erro	24	33692	1404		
Total	29	178116			
S = 37,47		R ² . = 81,08%		R ² . (ajustado) = 77,14%	

Nível	N	Media	Desv.Est.
SQ2004 Urdume	5	461,00	20,54
SQ2001 Urdume	5	324,20	35,67
Derakane 470Urdume	5	336,40	64,69
SQ2004Trama	5	377,80	24,25
SQ2001Trama	5	266,60	30,81
Derakane 470 Trama	5	255,00	31,72
ICs de 95% individuais para a média baseados em Desv.Est. agrupada			
Nível	-----+-----+-----+-----+		
SQ2004 Urdume			(-----*-----)
SQ2001 Urdume	(-----*-----)		
Derakane 470Urdume	(-----*-----)		
SQ2004Trama		(-----*-----)	
SQ2001Trama	(-----*-----)		
Derakane 470 Trama	(-----*-----)		
	-----+-----+-----+-----+		
	280	350	420 490

Desv.Est. agrupada = 37,47

Agrupar informação utilizando o método de Tukey

	N	Media	Agrupação
SQ2004 Urdume	5	461,00	A
SQ2004Trama	5	377,80	B
Derakane 470Urdume	5	336,40	B C
SQ2001 Urdume	5	324,20	B C D
SQ2001Trama	5	266,60	C D
Derakane 470 Trama	5	255,00	D

As médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

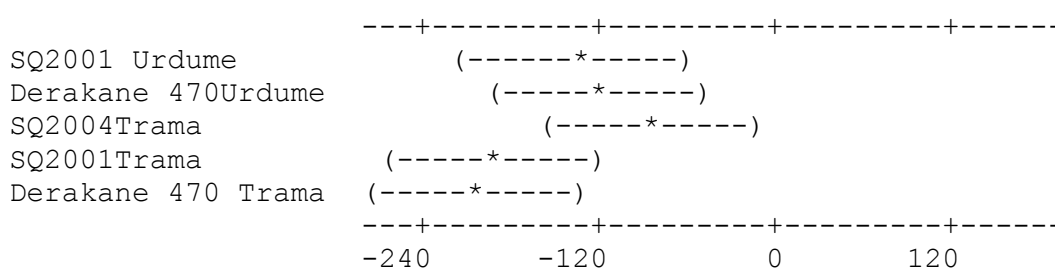
Intervalos de confiança simultâneos de Tukey de 95%

Todas as comparações em pares

Nível de confiança individual = 99,50%

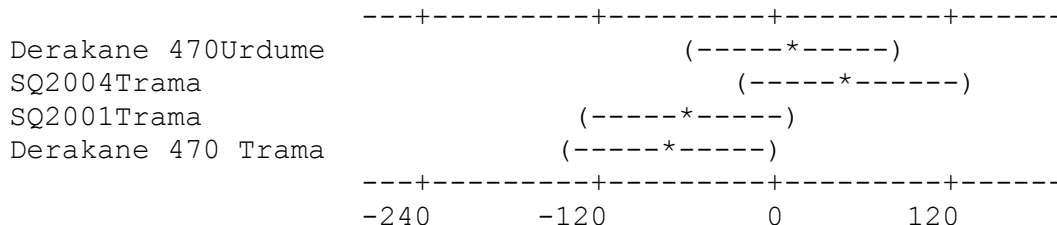
Restou SQ2004 Urdume:

	Inferior	Centro	Superior
SQ2001 Urdume	-210,02	-136,80	-63,58
Derakane 470Urdume	-197,82	-124,60	-51,38
SQ2004Trama	-156,42	-83,20	-9,98
SQ2001Trama	-267,62	-194,40	-121,18
Derakane 470 Trama	-279,22	-206,00	-132,78



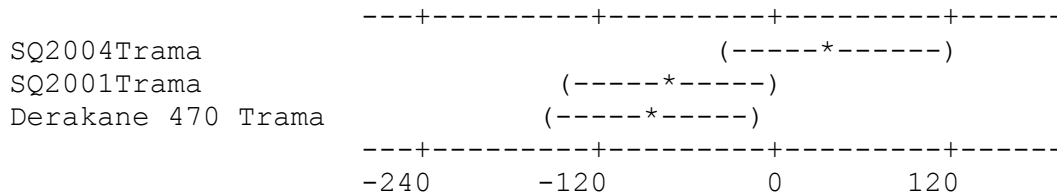
Restou SQ2001 Urdume:

	Inferior	Centro	Superior
Derakane 470Urdume	-61,02	12,20	85,42
SQ2004Trama	-19,62	53,60	126,82
SQ2001Trama	-130,82	-57,60	15,62
Derakane 470 Trama	-142,42	-69,20	4,02



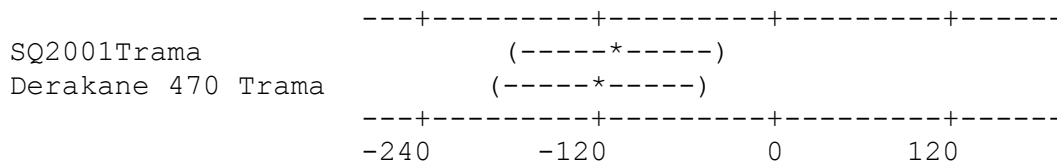
Restou Derakane 470Urdume:

	Inferior	Centro	Superior
SQ2004Trama	-31,82	41,40	114,62
SQ2001Trama	-143,02	-69,80	3,42
Derakane 470 Trama	-154,62	-81,40	-8,18



Restou SQ2004Trama a:

	Inferior	Centro	Superior
SQ2001Trama	-184,42	-111,20	-37,98
Derakane 470 Trama	-196,02	-122,80	-49,58



Restou SQ2001Trama a:

	Inferior	Centro	Superior
Derakane 470 Trama	-84,82	-11,60	61,62

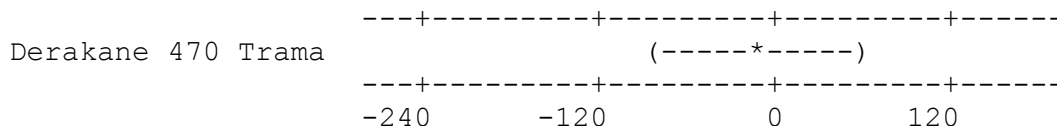


Tabela 5.7 – Resíduos e ajustes pelo método de Tukey para ensaio de flexão

SQ2004 Urdume	SQ2001 Urdume	Derakane 470Urdume	SQ2004Trama	SQ2001Trama	Derakane 470 Trama
456	339	251	352	302	263
427	292	427	352	235	307
474	321	317	388	240	237
474	377	363	393	295	239
474	292	324	404	261	229
RESID1	RESID2	RESID3	RESID4	RESID5	RESID6
-5	14,8	-85,4	-25,8	35,4	8
-34	-32,2	90,6	-25,8	-31,6	52
13	-3,2	-19,4	10,2	-26,6	-18
13	52,8	26,6	15,2	28,4	-16
13	-32,2	-12,4	26,2	-5,6	-26
AJUSTES1	AJUSTES2	AJUSTES3	AJUSTES4	AJUSTES5	AJUSTES6
461	324,2	336,4	377,8	266,6	255
461	324,2	336,4	377,8	266,6	255
461	324,2	336,4	377,8	266,6	255
461	324,2	336,4	377,8	266,6	255
461	324,2	336,4	377,8	266,6	255

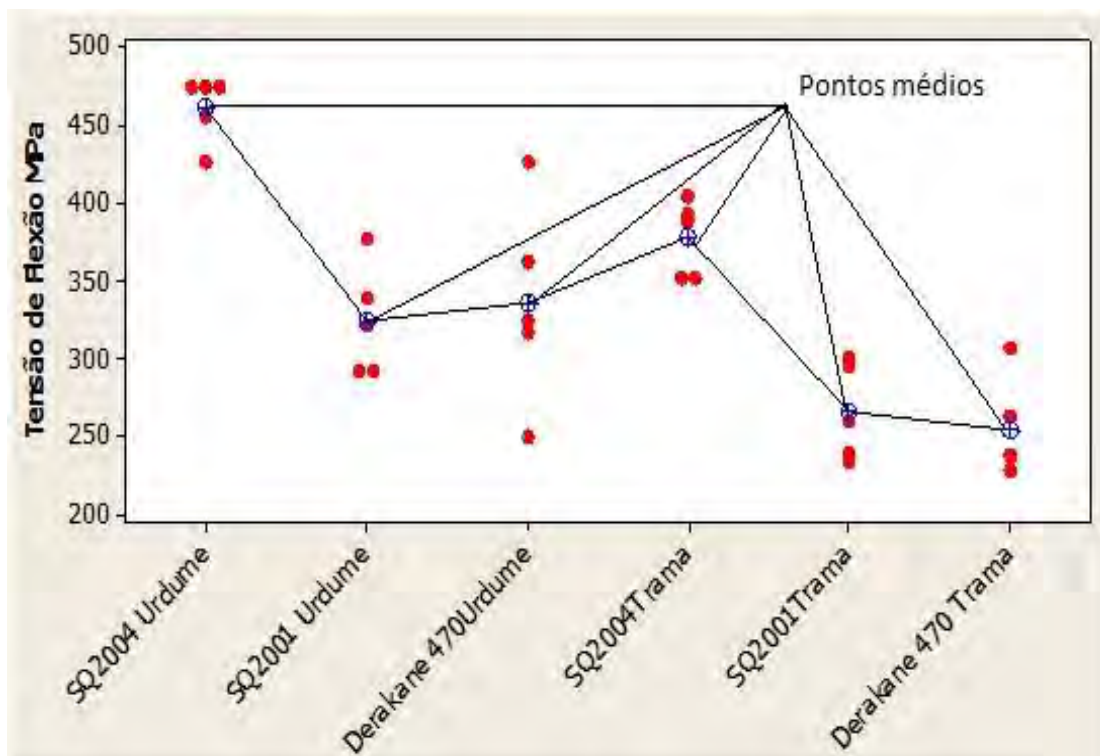


Figura 5.9 – Resultados estatísticos comparando os valores médios das tensões de flexão em ambos os sentidos trama (t) e urdume (u).

Pelos dados obtidos na análise estatística do ensaio de flexão, tanto no sentido do urdume quanto no sentido da trama para as três resinas, concluiu-se que a resina SQ 2004, é a que apresentou melhores resultados em ambas as direções. A resina SQ 2001 ficou em terceiro lugar no sentido do urdume, em segundo lugar temos a resina Derakane 470.

Com relação ao sentido da trama, a resina SQ 2001 alcançou a segunda colocação seguida pela resina Derakane 470.

5.3.4 ANOVA Unidirecional para deformação no sentido do urdume e no sentido da trama nos ensaios de flexão.

Fonte	GL	SC	MC	F	P
Fator	1	0,341	0,341	0,79	0,424
Erro	4	1,725	0,431		
Total	5	2,066			

S = 0,6567 R². = 16,50% R².(ajustado) = 0,00%

Nível	N	Media	Desv.Est.	ICs de 95% individuais para a média baseados em Desv.Est. agrupada
Urdu	3	4,3500	0,6928	(-----*-----)
Trama	3	4,8267	0,6186	(-----*-----)

-----+-----+-----+-----+-----
3,50 4,20 4,90 5,60

Desv.Est. agrupada = 0,6567

Agrupar informação utilizando o método de Tukey

	N	Media	Agrupação
Trama	3	4,8267	A
Urdu	3	4,3500	A

As médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

Restou Urdu:

	Inferior	Centro	Superior	ICs de 95% individuais para a média baseados em Desv.Est. agrupada
Trama	-1,0122	0,4767	1,9655	(-----*-----)

-----+-----+-----+-----+-----
-1,0 0,0 1,0 2,0

Tabela 5.8 – Resíduos e ajustes pelo método de Tukey para deformação no ensaio de flexão

Resinas	Urdume	Trama	RESID1	RESID2	AJUSTES1	AJUSTES2
SQ2004	4,75	5,48	0,4	0,653333	4,35	4,8266667
SQ2001	3,55	4,25	-0,8	-0,57667	4,35	4,8266667
Derakane 470	4,75	4,75	0,4	-0,07667	4,35	4,8266667

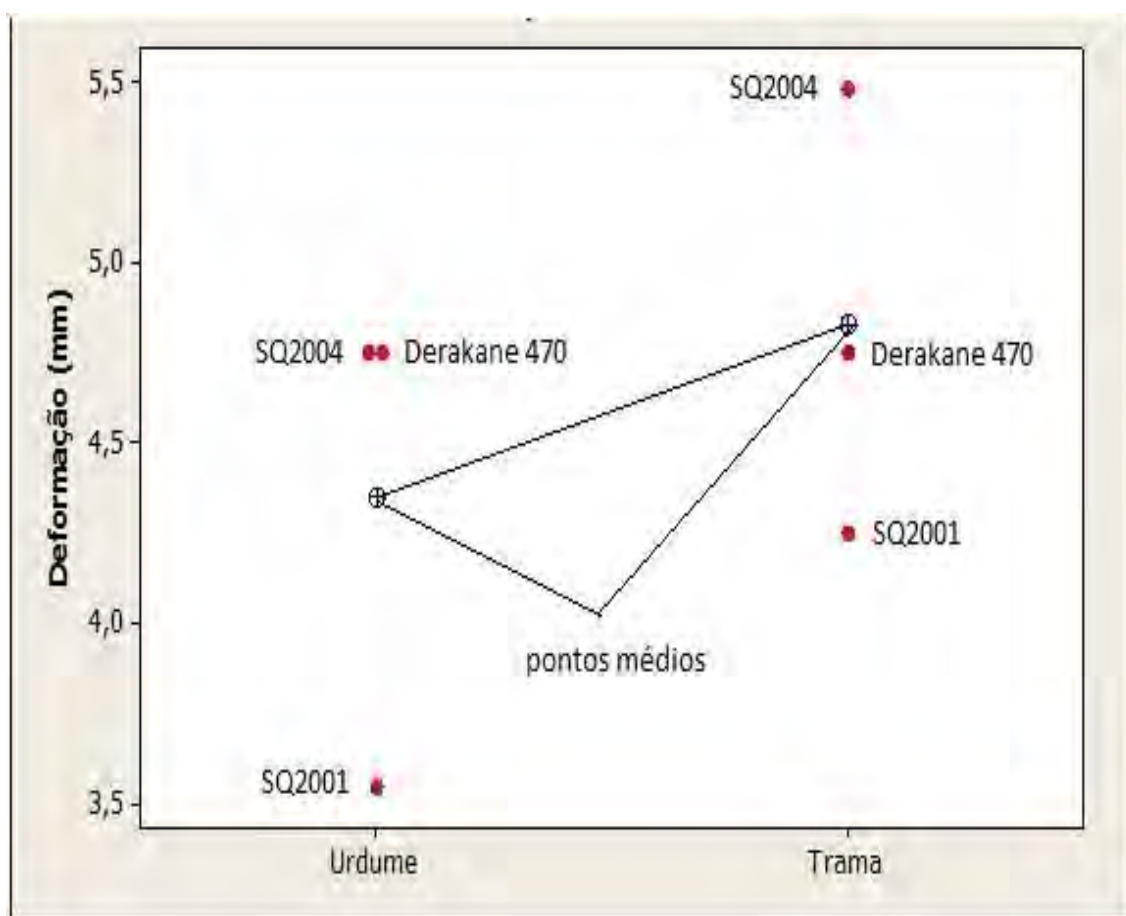


Figura 5.10 – Resultados de comparação estatística dos pontos médios da deformação no ensaio de flexão em ambos os sentidos.

A interpretação dos resultados da deformação no ensaio de flexão, fornecido pelo software e pela Figura 5.10 evidencia que a resina SQ 2004 e a resina Derakane 470 são as que possuem maiores deformações no sentido do urdume. A resina SQ 2001 possui os menores valores. Quando analisado a deformação no sentido da trama, a resina SQ 2004, é que se deforma mais, seguido pela resina Derakane 470 e finalmente pela resina SQ 2001. Portanto, é claro a observação que entre as duas resinas epóxi, a que possui o maior grau de deformação plástica é a resina SQ 2004.

5.4 Influências dos processos de corte na rugosidade

O ensaio de rugosidade foi realizado a fim de determinar qual dos dois processos é o mais interessante, o que menos possibilita o surgimento de microtrincas. Dentro dessa análise, conseguimos entender que o processo por fresamento CNC, foi o que demonstrou melhor resultado, deixando uma superfície de corte menos rugosa, enquanto que o jato d'água ao contrário, em virtude do material abrasivo disperso provoca uma superfície altamente rugosa, possibilitando assim o surgimento de micro trincas, onde estas irão afetar de forma direta as propriedades mecânicas dos laminados. Para termos uma visão mais ampla, a variação entre o Ra médio do jato d'água e a fresagem CNC chega a 87% de diferença. Mesmo o processo de corte por jato d'água ser mais rentável, ele certamente não é o mais apropriados quando relacionados a materiais compósitos poliméricos. A tabela 5. 6 ilustra esses parâmetros com clareza.

Tabela 5.9- Valores de rugosidade dos processos de corte por jato d'água e fresagem em CNC e a porcentagem da diferença entre eles.

Parâmetros	Processo de corte por Jato d'água média	Processo de corte por fresagem CNC média	Diferença em % entre os processos
R_a (μm)	13,07	1,67	87,22%
R_q (μm)	14,07	2,27	83,86%
R_zdin (μm)	54,33	10,33	80,98%
R_t (μm)	88,33	17,67	79,99%
R_y (μm)	81,00	17,00	79,01%
S_m (μm)	195,67	95,67	51,10%

Essas observações tem relevância, pois ajudam a formar o entendimento das possíveis falhas mecânicas nos laminados de tecido de fibra de carbono. Na Figura 5.11, fica explicito de forma didática o que a tabela demonstrou.

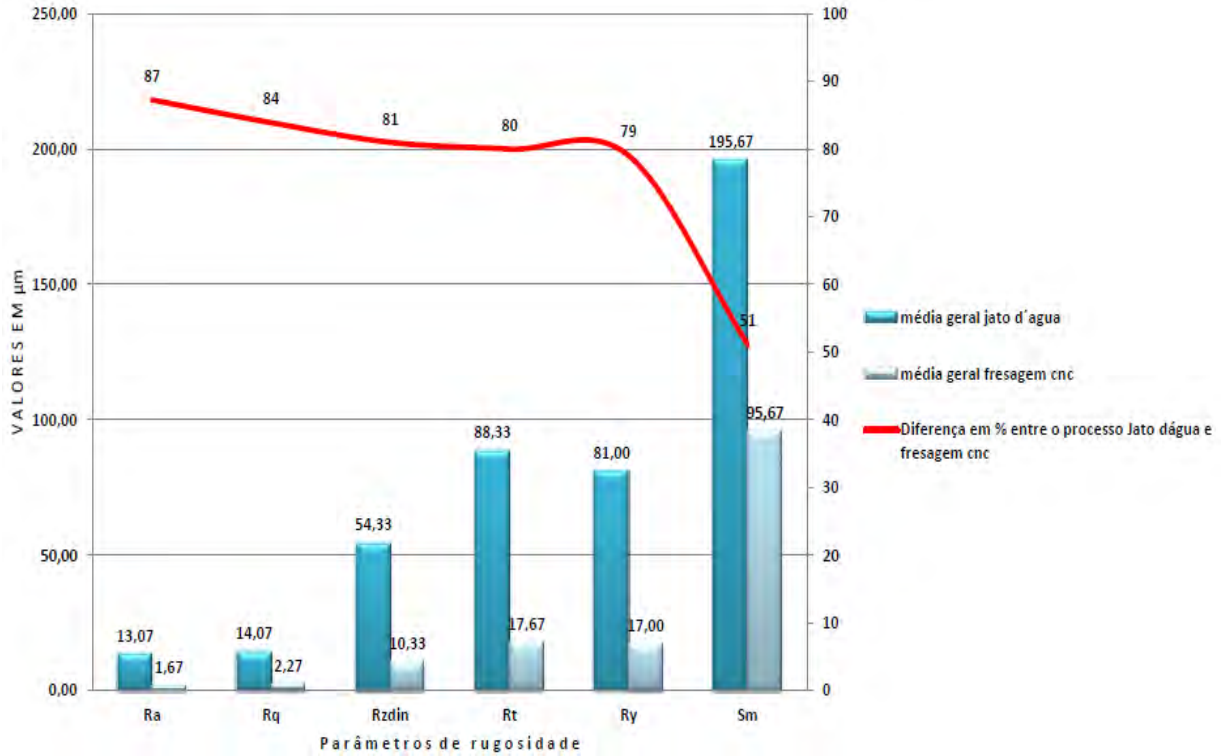


Figura 5.11 – dados comparativos entre os processos de corte jato d'água x fresagem CNC.

5.5 Resultados de microscopia estéreo.

Pela microscopia óptica observou as falhas mecânicas, as camadas entre os laminados, a impregnação entre a fibra e a matriz polimérica. O emprego da microscopia óptica demonstrou ser conveniente, pois, a observação que conclui ser de interesse esta em uma região óptica que o aparelho alcança tornado viável e rápido, pois as amostras parte delas foram embutidas e partes esta “in nature”, para preservar o local de falha. A utilização do microscópio estéreo ajudou no entendimento da fratura, onde somado ao microscópio óptico formou o entendimento sobre estes laminados e suas falhas. As micrografias seguem a seguinte ordem, análises das camadas, urdume, trama e pelas resinas SQ 2001, SQ 2004 e Derakane. As micrografias a seguir, mostram o tipo de ruptura dos corpos de prova.

A Figura 5.12 mostra as micrografias obtidas por estereomicroscopia de laminados de tecido de fibra de carbono com a resina epóxi. A imagem A e B mostra a fratura que ocorreu nos corpos de prova obtidos com o ensaio à tração da resina Derakane 470, ensaiadas à tração, as setas indicam que o modo de fratura foi dúctil, verificou-se um esgarçamento nos corpos de prova, tanto no sentido urdume como trama. Na micrografia B, que pode ser analisada com a figura 3.11 do diagrama de $\sigma_t \times \epsilon$, da página 28, a deformação chega no caso da trama a quase 5,5 mm.

As micrografias C e D mostra a fratura dos corpos de prova com a resina SQ 2004, também no sentido do urdume e trama, obtidos das amostras ensaiadas por tração e o que se verifica é o serrilhado da mesma, indicando uma fratura frágil, mostrado pelas setas indicativas, também tanto no urdume como trama, neste caso mostrando uma maior efetividade desta resina, no quesito aderência e impregnação. Onde tanto a resina como a fibra, trabalharam como se fosse um único bloco.

As micrografias E e F, mostra a fratura dos corpos de prova com a resina SQ 2001, também no sentido do urdume trama, o que se verifica é uma mescla de fratura, parte dúctil e parte frágil, com quebra em ângulo no sentido da trama e quase horizontal no sentido do urdume. A deformação ficou abaixo das anteriores.

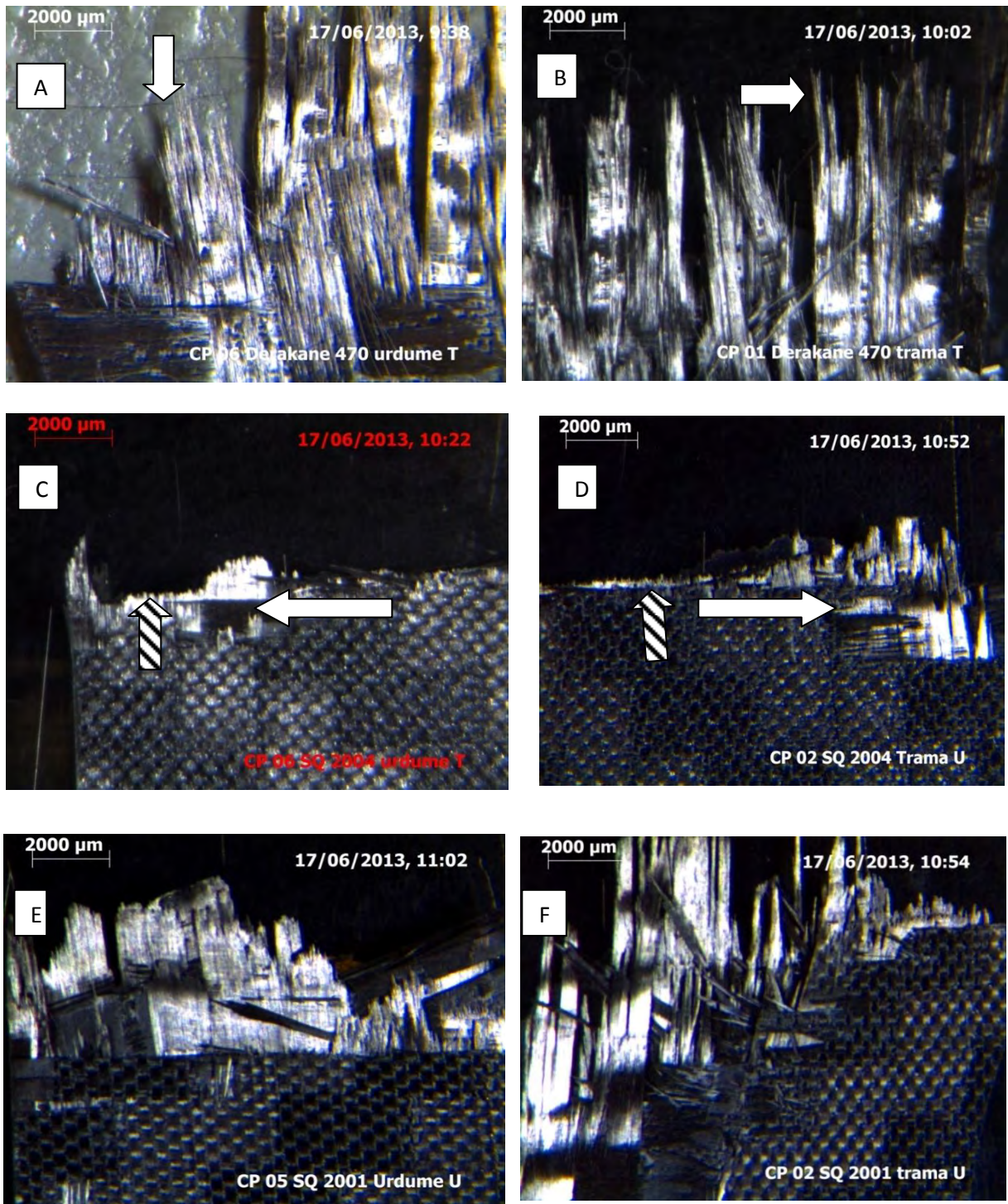


Figura 5.12 – Micrografias obtidas por estereomicrocópia de laminados de tecido de fibra de carbono com resina epóxi, ensaiadas à tração. (A e B – resina Derakane 470), (C e D, resina SQ 2004) e (E e F – resina SQ 2001).

5.6 Resultados da microscopia óptica.

A micrografia da Figura 5.13 A e B são provenientes de laminados de tecidos de fibra de carbono com resina SQ 2001 e quatro camadas. A seta preenchida mostra as camadas de fibra de carbono e a seta sem preenchimento mostram as camadas de resinas existentes. É perceptível nitidamente a divisão entre camadas e a existência da resina SQ 2001. No caso das micrografias C e D com a resina SQ 2001, podemos obter certas informações, a micrografia C com seta sem preenchimento vemos fibras que sofreram arracamentos.

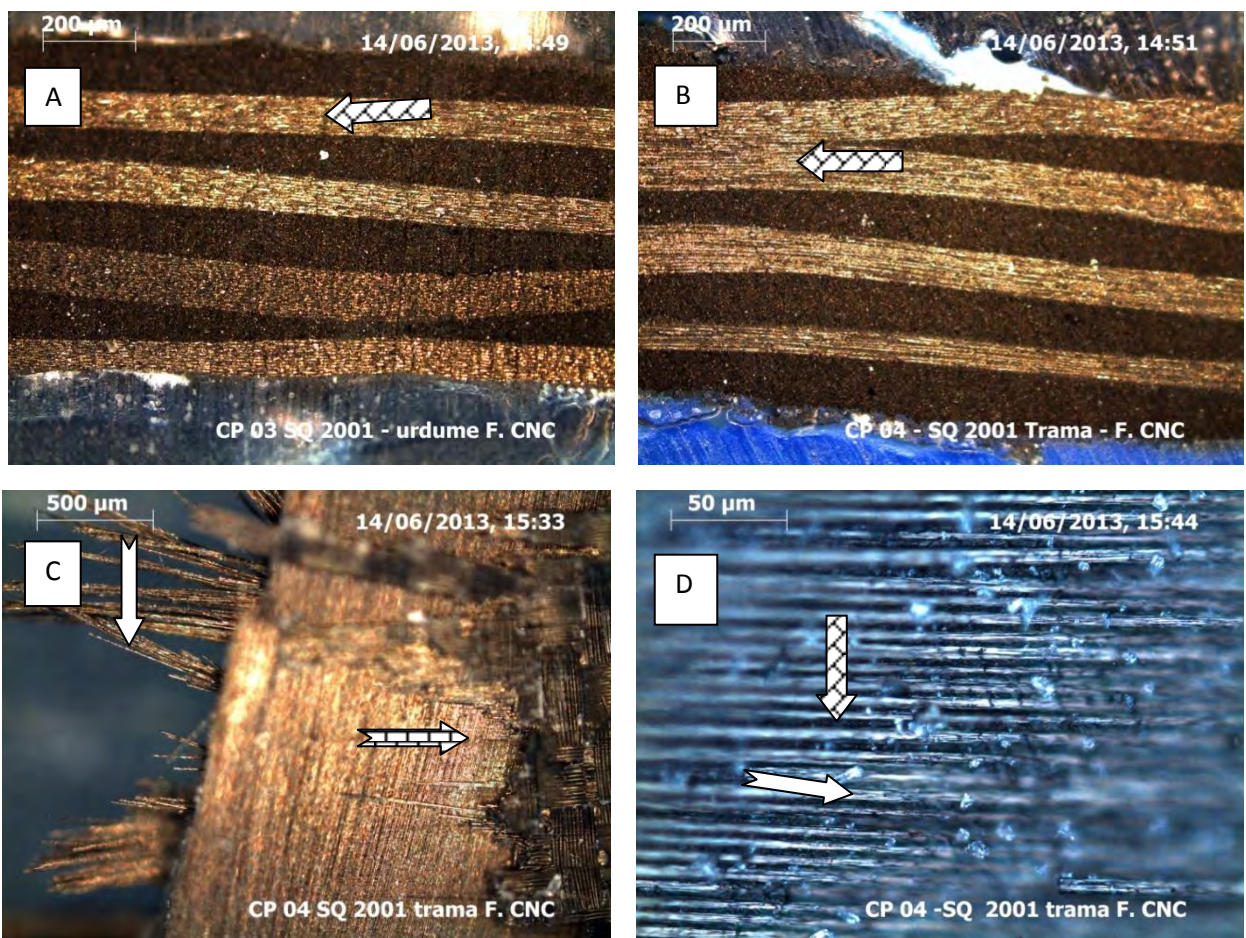


Figura 5.13 – Micrografias obtidas por microscopia óptica de laminados de tecido de fibra de carbono com resina epóxi SQ 2001 das regiões de fratura.

No caso da seta com preenchimento vemos a existência de delaminação e arrancamento de parte da camada de tecido de fibra de carbono. A micrografia D mostra a fibra de carbono com alto grau de impregnação da resina. A seta sem preenchimento indica a fibra de carbono e a seta com preenchimento demonstra a resina. Como já mencionado a resina SQ 2001 proporcionou um tipo de ruptura

onde mesclou tanto a fragilidade da ruptura quanto o arrancamento de parte do tecido laminado.

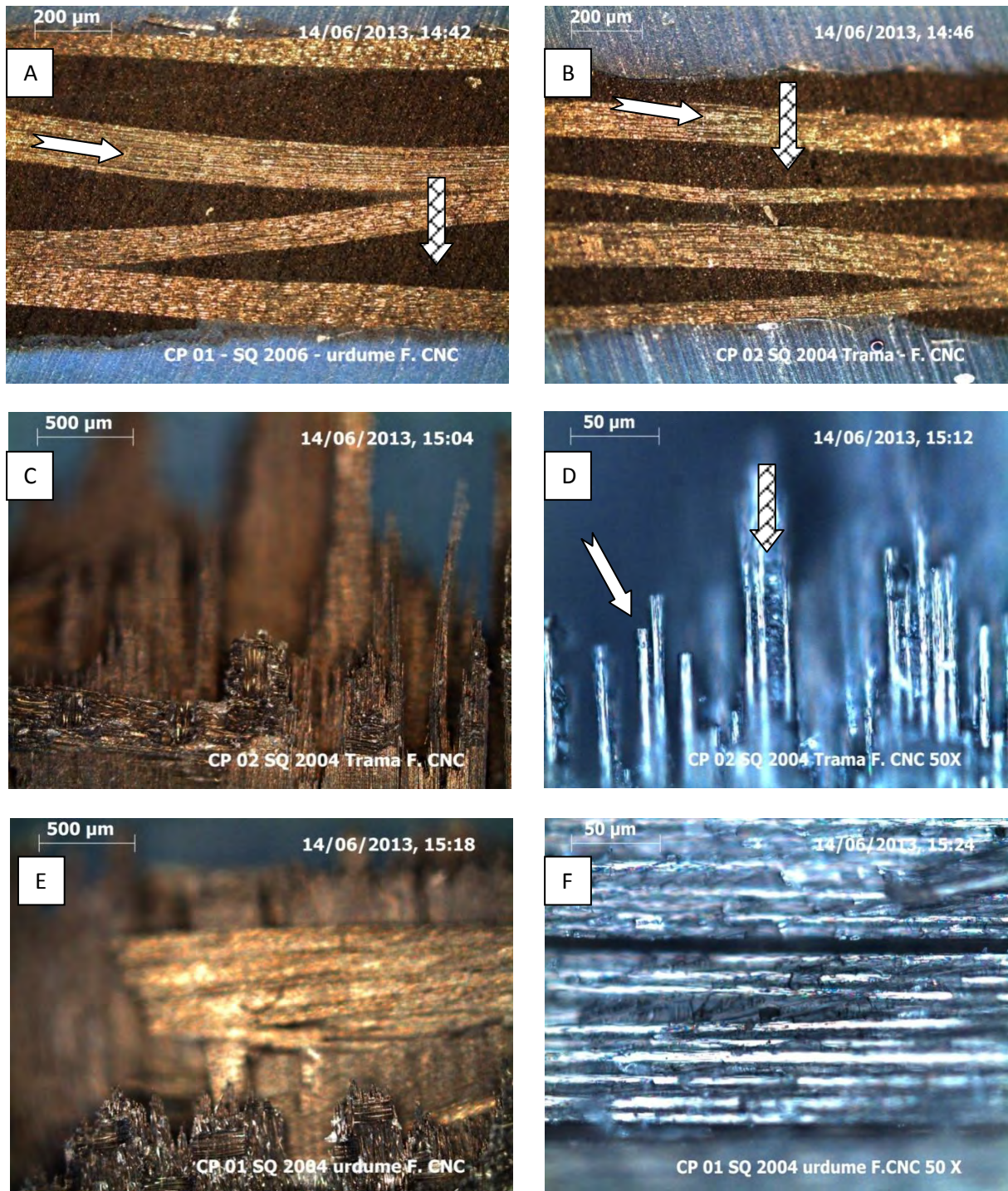


Figura 5.14 – Micrografias obtidas por microscopia óptica de laminados de tecido de fibra de carbono com resina epóxi SQ 2004 das regiões de fratura.

As micrografias (A) e (B) da resina SQ 2004, mostram tanto as fibras, que no caso são indicadas pelas setas sem preenchimento, quanto a resina propriamente, representada pelas setas preenchidas. Na imagem (C) e (E) vemos o mesmo padrão

de fratura, frágil com um pequeno arrancamento na borda. A micrografia (D), a seta sem preenchimento indica a fibra de carbono que foi fratura e a seta preenchida mostra a fibra de carbono impregnada com a resina SQ 2004, mesmo sendo um ponto de fratura, o grau de impregnação entre fibra e matriz está dentro do esperado. A micrografia (F) relaciona tanto a matriz polimérica, a seta sem preenchimento, que no presente caso nota-se microfaturas em virtude da solicitação mecânica que o corpo de provas sofre, porém também demonstra o alto grau de impregnação da fibras e a seta com preenchimento destaca a fibra de carbono.

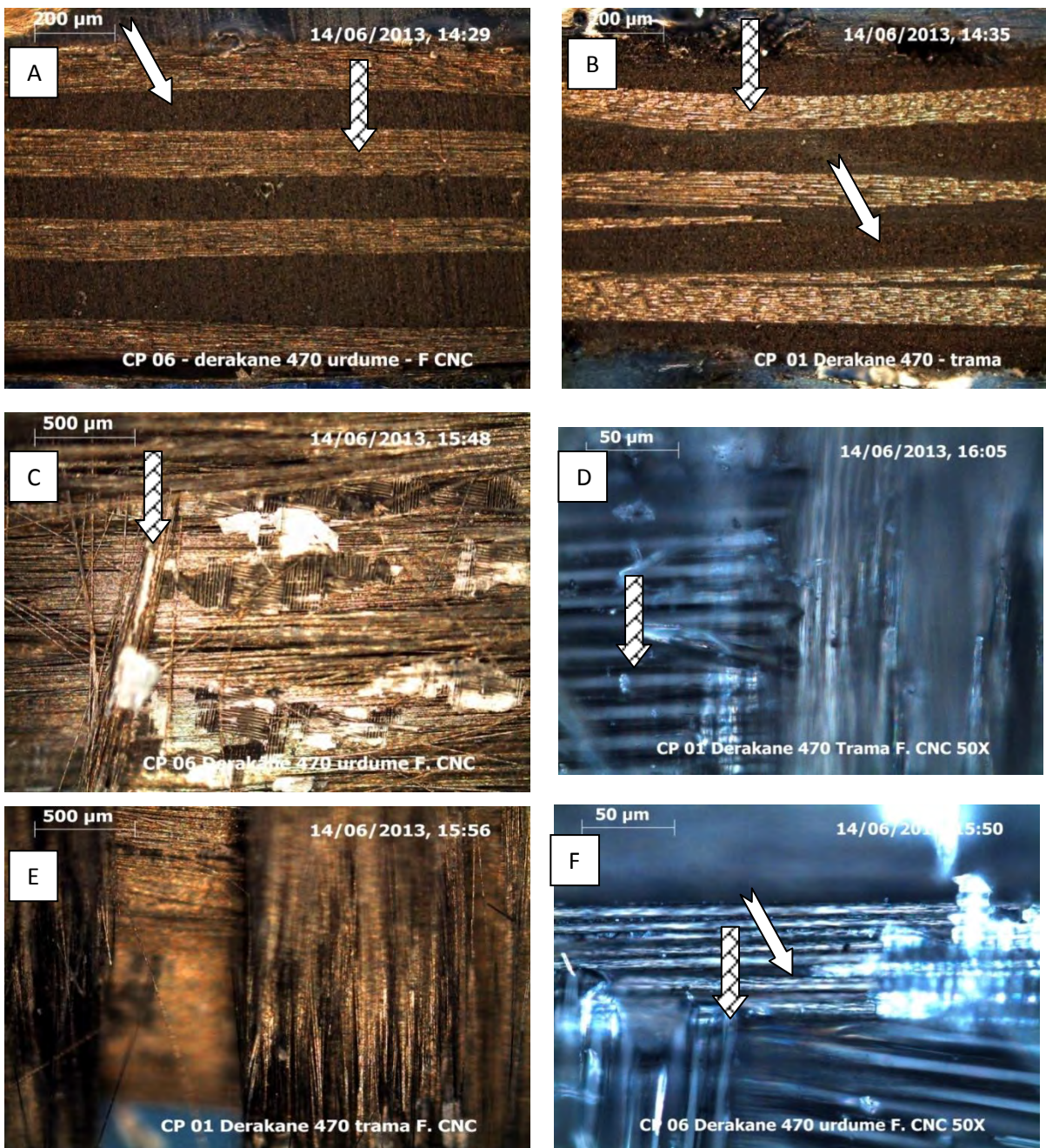


Figura 5.15 - Micrografias obtidas por microscopia óptica de laminados de tecido de fibra de carbono com resina epóxi Derakane 470 as regiões de fratura.

A análise de micrografia de laminados com a resina Derakane 470 possibilitaram formar o entendimento de que, este tipo de resina ocasiona um tipo de fratura com arrancamento, ou seja ajuda a delaminação e o esgarçamento das fibras. Nas micrografias (A) e (B) vemos pelas setas sem preenchimento a resina e as setas com preenchimento mostram as camadas de tecido de fibra de carbono. Com relação a micrografia (C) podemos extrair a informação pela seta com preenchimento, que as fibras foram esgarçadas enquanto que a seta simples demonstra um pequena delaminação da camada. No caso da imagem (D) a seta preenchida mostra a resina enquanto que a seta normal demonstra a fibra. Podemos observar que a impregnação também foi boa atendendo assim os parâmetros estabelecidos no processamento dos laminados. Observando a micrografia (E) vemos tanto o arrancamento de parte do laminado, quanto o esgarçamento dos fios do tecido de fibra de carbono. Na micrografia (F) a seta com preenchimento aponta para uma fibra de carbono enquanto que a seta sem preenchimento mostra a resina entre as fibras de carbono.

5.7 - Resultados da microscopia confocal 3D.

A microscopia confocal foi utilizada para se comparar e entender determinados aspectos destes laminados. As imagens confirmaram que o processo de corte por fresagem CNC é melhor do que o processo de corte por jato d'água com abrasivo, além de mostrar em 3D a topografia das amostras em estudo.

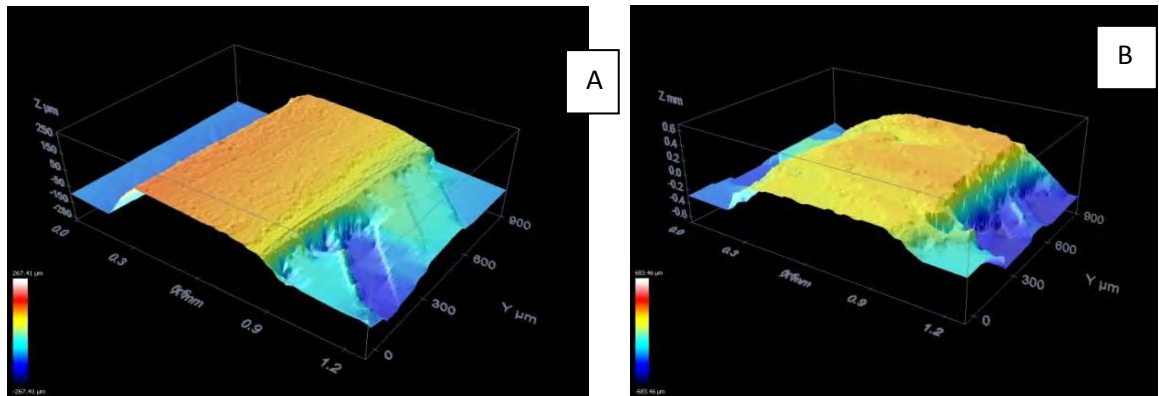
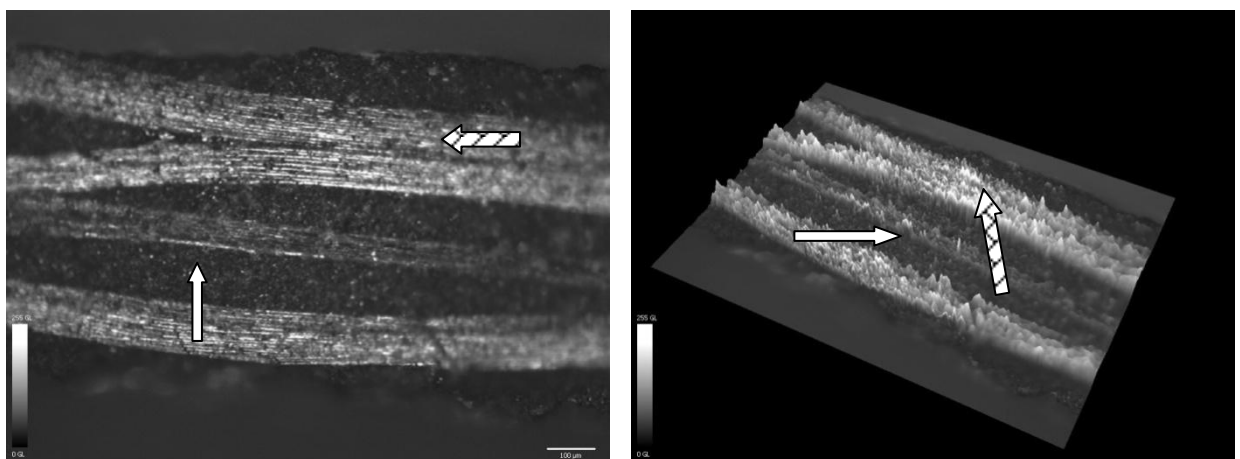


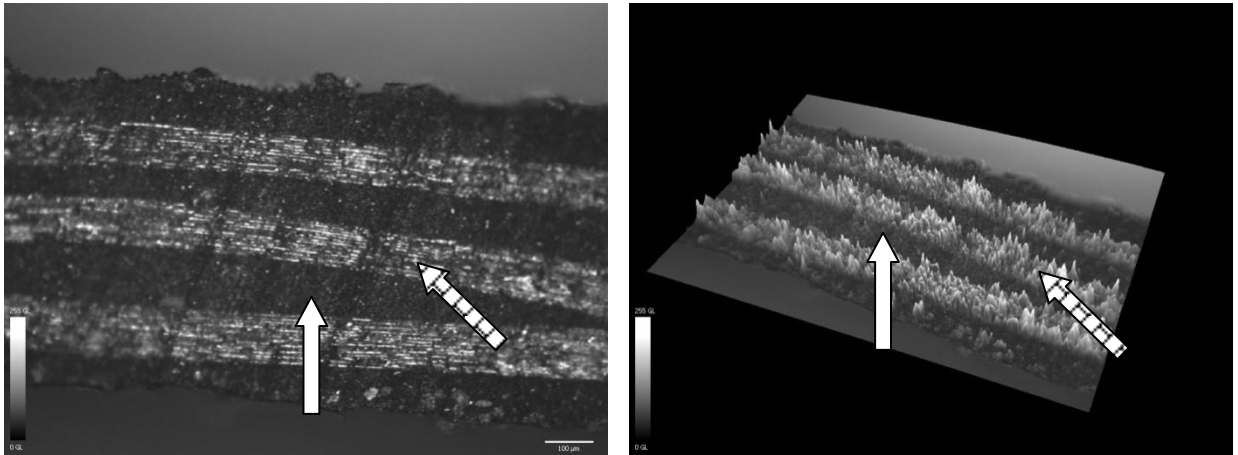
Figura 5.16 Micrografias confocal 3D (A -processo de corte por fresagem CNC) e (B processo de corte por jato d'água).

A micrografia (A) em confocal 3D são do processo de corte por fresagem em cnc. Pela escala que o software fornece, varia do azul (ponto mais profundo) até o vermelho (ponto mais alto). Podemos ver que estas imagens mostram ter uma rugosidade equivalente e homogênea. Ou seja, não possui “vale” ou grandes desníveis. Com relação à micrografia (B) o processo de extração dos corpos de prova por jato d'água mostra claramente grandes “vales”.



(A)

(B)



(C)

(D)

Figura 5.17 – Micrografias confocal 3D (A e B – resina SQ 2001) e (C e D – resina SQ 2004)

Nestas fractografias as Figuras A e C demonstram tanto a resina quanto as camadas de tecido de fibra de carbono. A seta preenchida demonstra as camadas de tecido de fibra de carbono e a setas sem preenchimento mostram a resina. As micrografias B e D também mostram a resina e as camadas de tecidos de fibra de carbono em 3 D. A seta com preenchimento mostra a camada de tecido de fibra de carbono e a seta sem preenchimento mostra as camadas de resina.

O tipo de processamento influencia de forma decisiva as propriedades e mesmo a qualidade dos laminados como a influência existente entre a trama e o urdume em um tecido. Neste ponto nem a literatura nacional menciona. O conhecimento deste fator implica diretamente nas propriedades mecânicas dos laminados. Se um alinhamento incorreto com um desvio de apenas 5° pode comprometer em quase 40% as propriedades mecânicas, tamanha relevância deve ser considerando também com a relação da trama. Com relação ao corte de laminados diz-se que é possível realizar o corte com laser, porém este tipo de corte exige uma configuração específica de lentes tornando complicado ou mesmo inviável, onde optamos pelo processo de corte por fresamento e por jato d'água.

Outro aspecto é com relação à preparação das amostras. Para observar as camadas do tecido e a resina é uma opção adequada o procedimento de embutimento, lixamento e polimento, porém o estudo dos tipos de fratura torna esta técnica inviável, pois descaracteriza a amostra, implicando em um resultado falso. Podemos até afirmar que ao analisarmos a amostra “in natura”, obtemos um melhor

entendimento dos modos de falha. No caso da microscopia confocal, por exemplo, não existe neste caso a necessidade de preparação das amostras, tornando fácil e rápido o processo de análise. O entendimento sobre a rugosidade provocada pelo processo de corte é outro aspecto que não é mencionado. Este conhecimento leva a conclusão que um processo de corte como o jato d'água contribui diretamente para a formação de micro trincas nos laminados em virtude do uso de abrasivo, diminuindo suas propriedades mecânicas. Quando a literatura menciona os tipos de resina e suas propriedades não aponta possíveis características com relação à fratura de laminados, ou seja, neste trabalho observamos que existe uma relação em que a resina implica significativamente na forma da fratura. A viscosidade está associada à forma de fratura.

5.8 – Resultados da microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Com relação à resina SQ 2004, pelas imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura, observamos, que a matriz polimérica envolveu de forma satisfatória o reforço, não deixando grandes vazios, que poderiam gerar falhas mecânicas. Na Figura A, temos um aumento de 2500 vezes, onde se pode ver a impregnação da matriz com o reforço. Na Figura B, com uma ampliação de 5000 vezes, vê-se a superfície da fibra de carbono, juntamente com a matriz. A Figura C, com um aumento de 10.000 vezes, mostra-se novamente a superfície da fibra, a forma de ruptura da fibra neste caso é uma clivagem.

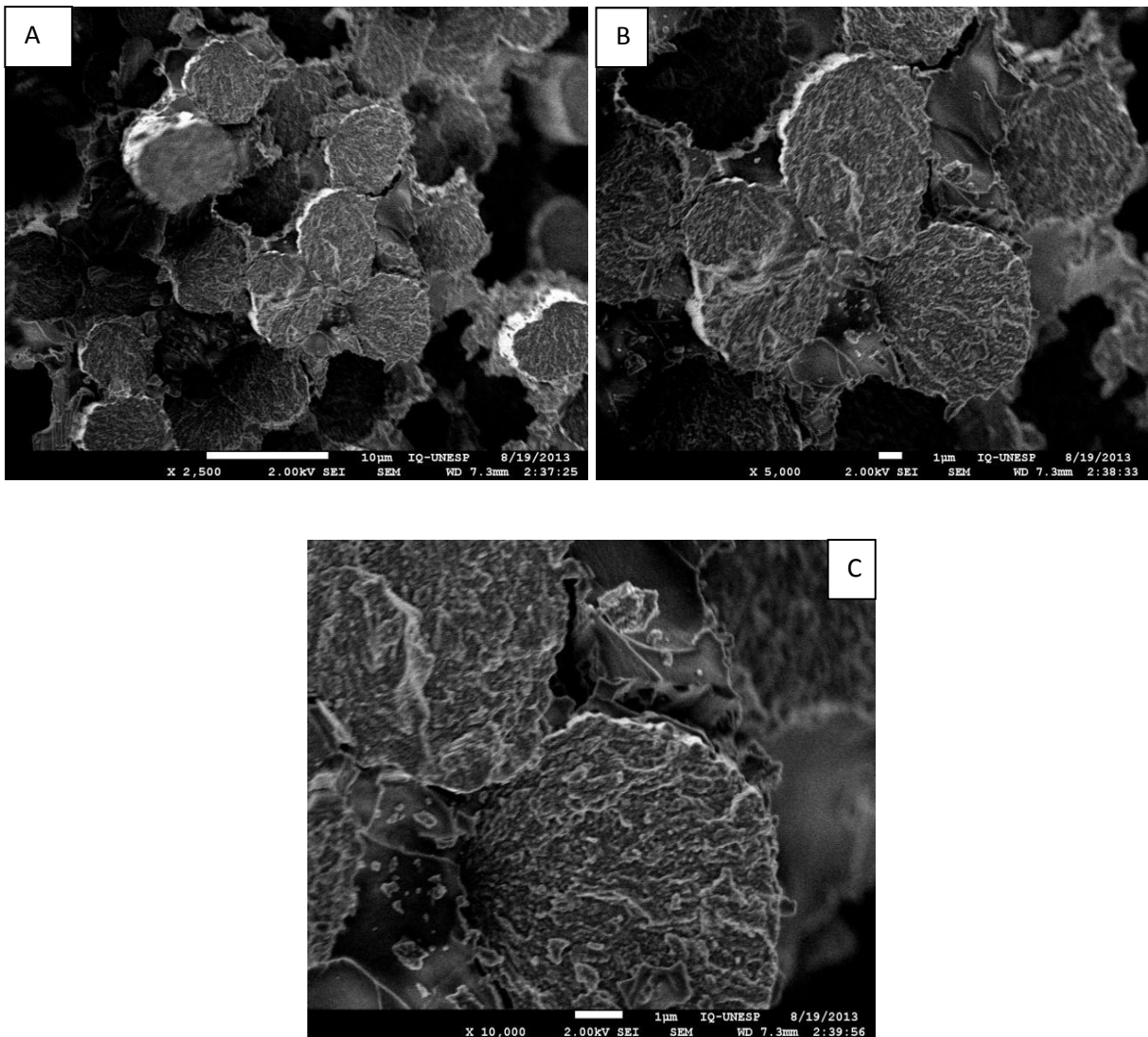


Figura 5.18 – Imagens de microscopia eletrônica de varredura da resina SQ 2004. (A) ampliação de 2.500 x, (B) ampliação de 5.000 vezes e (C) ampliação de 10.000 vezes.

Nas imagens obtidas, vemos também que a resina SQ 2001 teve boa impregnação no reforço, evitando assim grandes vazios no laminado. Na figura A, com ampliação de 2.500 vezes, observa-se o reforço e a matriz polimérica. A existência de cavidades, esta relacionado com o arrancamento da fibra durante a solicitação mecânica, onde também se pode notar que determinadas fibras foram tracionadas, mas não foram arrancadas. A figura B com ampliação de 5.000 vezes, mostra a matriz envolvendo o reforço e a superfície do reforço, que também sofreu ruptura em clivagem. Observa-se, que o reforço foi tracionado, gerando um deslocamento dentro da matriz, mas não foi arrancado. Com relação à figura C, com aumento de 10.000 vezes, observa-se a superfície do reforço, que sofre a ruptura em clivagem, e tendo parte da matriz polimérica sobreposta a sua superfície indicando que a matriz também foi arrancada com o reforço.

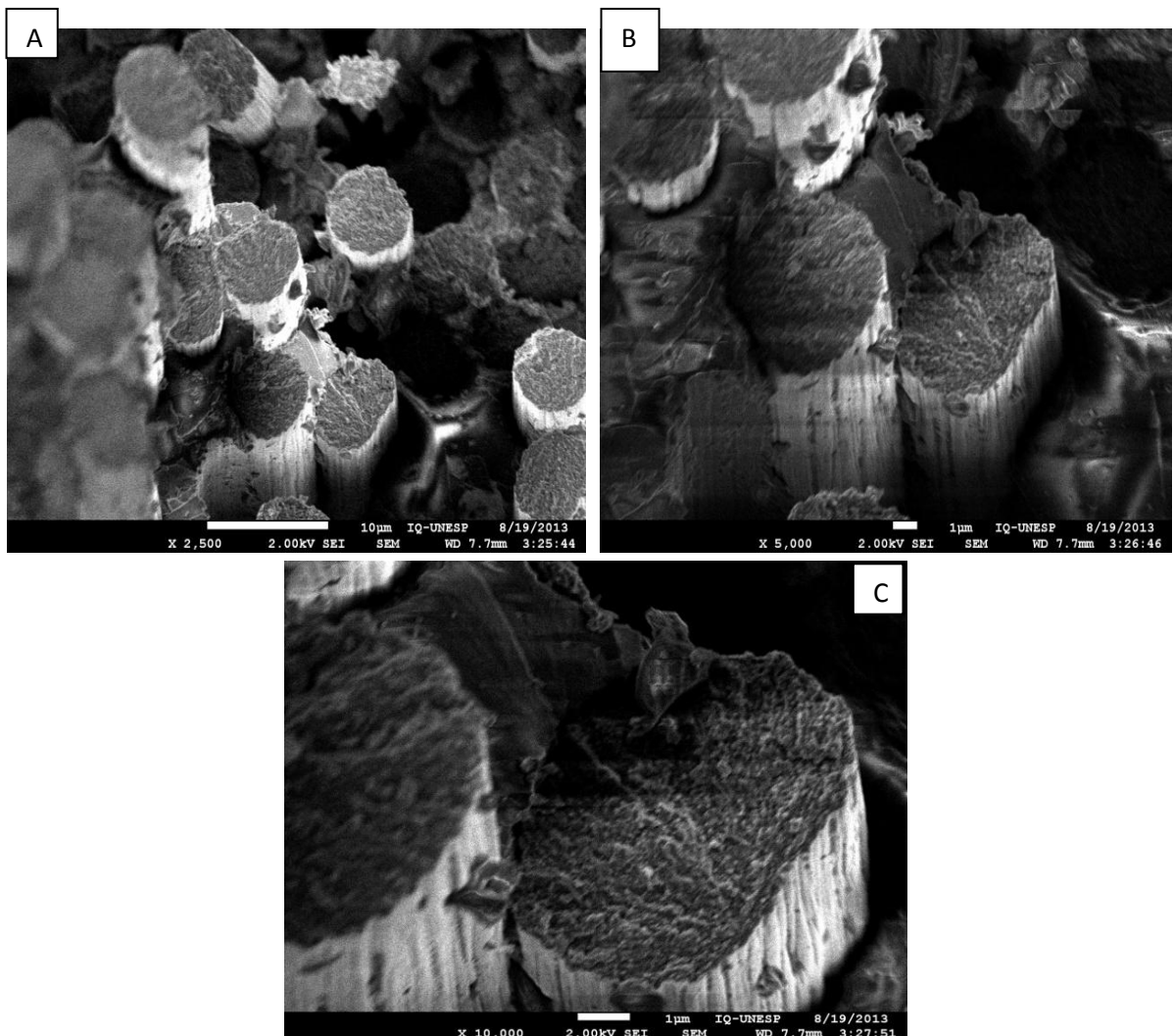


Figura 5.19 – Imagens de microscopia eletrônica de varredura da resina SQ 2001. (A) ampliação de 2.500 x, (B) ampliação de 5.000 vezes e (C) ampliação de 10.000 vezes.

A resina derakane 470 foi a resina que ocupou a terceira colocação em virtude dos seus resultados nos ensaio mecânicas de tração. Na figura A com aumento de 2.500 vezes, observa-se a matriz polimérica e o reforço. O reforço neste caso se deslocou, demonstrado pelo desalinhamento devido à sollicitação mecânica. A matriz não foi capaz de auxiliar o compósito a manter sua integridade com relação ao reforço. Na Figura B, com ampliação de 5.000 vezes, a visão da superfície dos reforços, mostram um arrancamento e não uma ruptura limpa, por clivagem, também é possível observar a matriz entre os reforços. A Figura C, com ampliação de 10.000, mostra a superfície da fibra e uma parte arrancada da outra fibra, reafirmando que a ruptura não foi uma clivagem limpa.

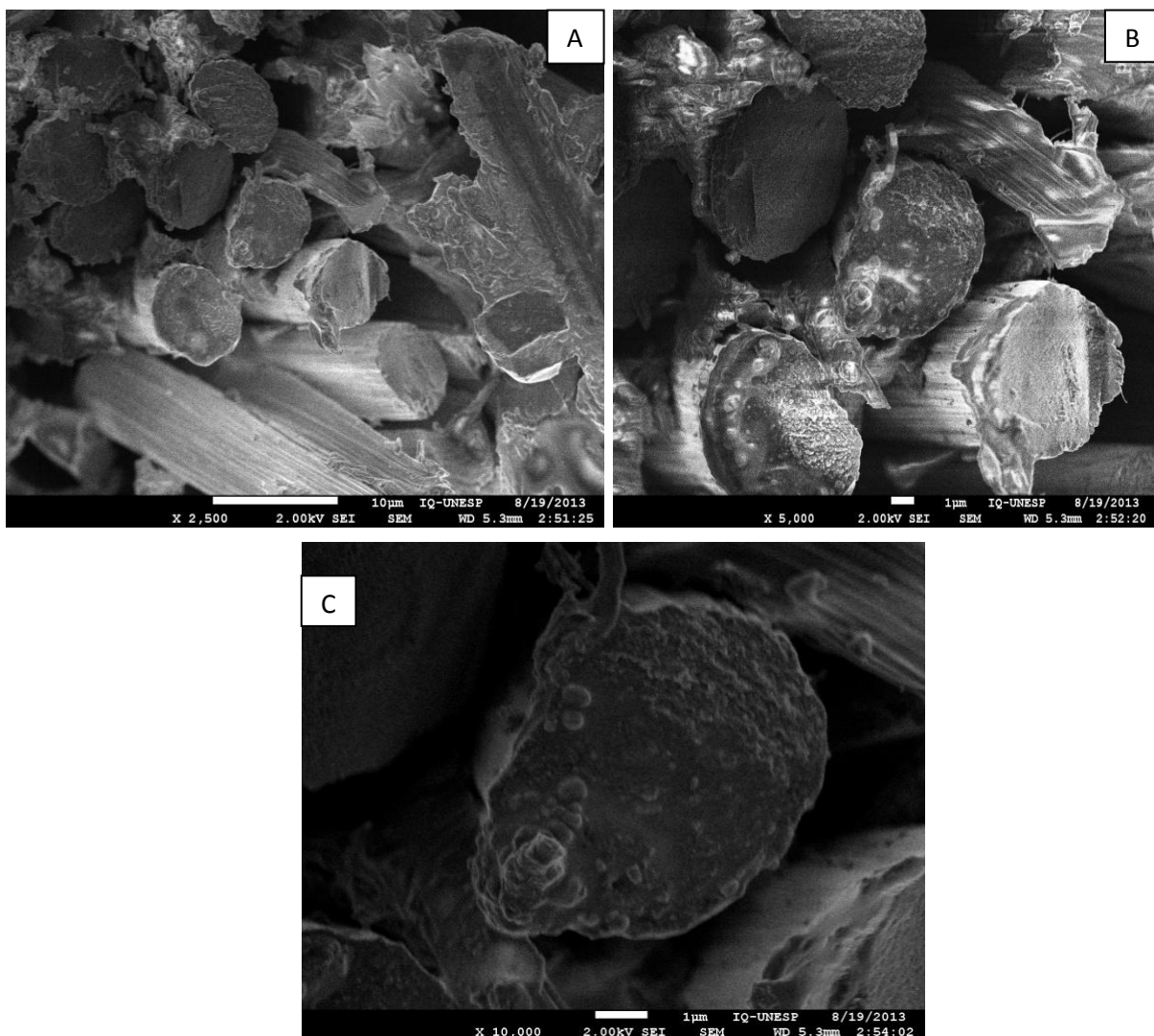


Figura 5.20 – Imagens de microscopia eletrônica de varredura da resina Derakane 470. (A) ampliação de 2.500 x, (B) ampliação de 5.000 vezes e (C) ampliação de 10.000 vezes.

6. Conclusão.

Das análises estatísticas de propriedades mecânicas, rugosidade, microscopia e processos de corte chegamos a seguintes conclusões:

- O sentido de retirada dos corpos de prova na posição do urdume foi o de melhor propriedade mecânica.

- O processo de corte para a retirada dos corpos de prova por fresagem CNC foi o que promoveu melhores dados de rugosidade tanto na obtenção em rugosímetro como em confocal 3D.

- A análise de rugosidade obtida pela microscopia confocal 3D foi muito mais precisa que a análise feita pelo rugosímetro, apesar deste ser totalmente normatizado.

- Da análise estatística dos valores de propriedades mecânicas dos valores de tensão de tração para a resina SQ 2004 e SQ 2001 não foram relevantes, não podendo afirmar qual é a melhor.

- A análise estatística das propriedades mecânicas dos valores de tensão de flexão e condições de deformação tanto no urdume quanto na trama foram melhores para a resina SQ 2004 do que a resina SQ 2001 e Derakane 470.

- As análises das fraturas dos corpos de prova mostraram que a fratura da resina SQ 2004 foi a mais frágil e a Derakane 470 a mais dúctil.

- As análises das fraturas dos corpos de prova mostraram que a melhor impregnação ficou com a resina SQ 2004, seguida da SQ 2001 e Derakane 470.

7. TRABALHOS FUTUROS

Estudo e construção de um duplo compósito.

Aperfeiçoamento das análises através de outras formas de caracterização como a Análise térmica.

Utilização de autoclave como opção para facilitar o processamento do laminado, visando melhorar suas propriedades mecânicas.

8. REFERENCIAS

- ¹MARINUCCI, G. **Materiais compósitos poliméricos**, Ed. Artliber, pg 21-22, 2011.
- ²WIEBECK.H; HARADA, J. **Plásticos de engenharia**, Ed. Artliber, pg 197, 2005.
- ³WIEBECK.H; HARADA, J. **Plásticos de engenharia.**, Ed. Artliber, pg 199, 2005.
- ⁴WIEBECK.H; HARADA, J. **Plásticos de engenharia.**, Ed. Artliber, pg 206, 2005.
- ⁵REZENDE, M.C;BOTELHO,E.C.O. **Uso de compósitos estruturais na indústria aeroespacial**.Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol 10, nº 2, 2000.
- ⁶SEUNG.W. H; NAK,S. C.; MIN.S. L. **Analysis of glass fabric impregnation using a resin drop method**. Journal of Mechanical Science and Technology vol 26 nº5 2012.
- ⁷ROZLI. Z. **Surface Fracture Analysis of Glass Fibre Reinforced Epoxy Composites Treated with Different Type of Coupling**. Agent.European Journal of Scientific Research vol.29 nº1 pg.55-65, 2009.
- ⁸NAM,J; L, JYONGSIK. J. **The effect of fibre content on the mechanical properties of glass fibre mat/polypropylene composites**. Composites: Part A: applied science and manufacturing vol 30, pg 815–822, 1999.
- ⁹SUFYAN. G; LIPPO V.J; LASSILA, A. T; PEKKA K. V. **Static and fatigue compression test for particulate filler composite resin with fiber-reinforced composite substructure**. Dental materials vol 23, pg 17–23, 2007.
- ¹⁰KHOSHBAKHT. M; CHOWDHURY S.J; SEIF, M.A; KHASHABA, U.A. **Failure of woven composites under combined tension-bending loading**. Composite Structures vol 90, pg 279–286, 2009.
- ¹¹KI,Y.K; LIN. Y. **Interlaminar fracture properties of weft-knitted/woven fabric interply hybrid composite materials**. Journal Material Science vol 47, pg 7280–7290, 2012.
- ¹²KOMAL, L.; DIPTI S. **An In-Vitro evaluation of the flexural strength of heat-polymerized poly (methyl methacrylate) denture resin reinforced with fibers**. J Indian Prosthodont Soc vol 11 nº4 pg 215–220, 2011.
- ¹³CEVDET K.; ERALP, A.; NIHAT A, I. **Effects of RTM mold temperature and vacuum on the mechanical properties of epoxy/glass fiber composite plates**. Downloaded from jcm.sagepub.com at UNIV ESTDL PAULISTA DE MESQIT on November vol. 29, 2012.
- ¹⁴VARAPORN, T.; DUMRONG, J. **Comparison between microwave and thermal curing of glass fiber–epoxy composites: effect of microwave-heating cycle on mechanical properties**. Journal of Applied Polymer Science, Vol. 102, pg 1059–1070 2006 .
- ¹⁵WONDERLY, C.; GRENESTEDT J.; FERNLUND, G.; CEˆPUS E. **Comparison of mechanical properties of glass fiber/vinyl ester and carbon fiber/vinyl ester composites**. Composites: Part B vol 36 pg 417–426, 2005. www.elsevier.com/locate/compositesb

- ¹⁶JING, Z; WANG X.; LI Q.; JIANG Y.; HUANG P. **Mechanical properties of short carbon/glass fiber reinforced high mechanical performance epoxy resins.** Journal of Chongqing University (English Edition)
- ¹⁷ BOTELHO, E. C.; REZENDE, M. C. - **Caracterização mecânica de compósitos de poliamida.** Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 12, nº 3, pg 153-163, 2002
- ¹⁸SHAH DIN, A.; MORLIER, J.; GOURINAT, YVES. **Fabrication and mechanical testing of a new sandwich structure with carbon fiber network core.** *Journal of Sandwich Structures and Materials* 2010.
- ¹⁹YUTAKA, T.; ISHIKAWA, N. W.; AKIRA I.; YOICHI H.; SUNAO, S. **Experimental investigation of interlaminar mechanical properties on carbon fiber stitched CFRP laminates.** *Adv. Composite Mater.*, vol. 16, nº. 2, pg 95–113 - 2007.
- ²⁰SWEETY K.; NITHYA, S; PADMAVATHI, N.; PRASAD, N. E.; SUBRAHMANYAM, J. **Tensile properties and fracture behaviour of carbon fibre filament Materials.** *Journal of Materials Science*, vol 45, Issue 1, pg 192-200, 2010.
- ²¹SHAH DIN, A.; MORLIER, J.; GOURINAT, Y.; **Fabrication and mechanical testing of a new sandwich structure with carbon fiber network core.** *Journal of SANDWICH STRUCTURES AND MATERIALS*, vol. 12—September 2010
- ²²YUTAKA, I.; TAKASHI, I.; NAOYUKI, W.; AKIRA, I.; YOICHI, H.; SUNAO, S. **Experimental investigation of interlaminar mechanical properties on carbon fiber stitched CFRP laminates.** *Adv. Composite Mater.*, vol. 16, nº. 2, pg 95–113 2007
- ²³SWEETY K.; NITHYA, S.; PADMAVATHI, N. **Tensile properties and fracture behaviour of carbon fibre filament materials.** *J Mater Sci* vol 45: pg 192–200, 2010.
- ²⁴LEE, S.C., JEONG, S.T.; PARK, J.N.; KIM, S. J.; CHO, G.J.; **A study on mechanical properties of carbon fiber reinforced plastics by three-point bending testing and transverse static response.** *Journal of materials processing technology* vol 201, pg 761–764, 2008.
- ²⁵OMA, S. S.; RUYTER, I. E.; **Mechanical and physical properties of carbon-graphite fiber-reinforced polymers intended for implant suprastructures.** *Dental materials* vol 23, pg 1150–1156, 2007.
- ²⁶ZHENKUN, L.; DENGLIBO, Q.; **Flexural effects of sandwich beam with a plate insert under in-plane bending.** *Optics & Laser Technology* vol 44, pg 1223–1231, 2012.
- ²⁷BOTELHO, E. C.; REZENDE, M. C.; **Caracterização mecânica de compósitos de poliamida.** *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, vol. 12, nº 3, pg 153-163, 2002.
- ²⁸De Baere, I.; Jacques, S.; Van Paepegem, W.; Degrieck, J.; **Study of the Mode I and Mode II interlaminar behaviour of a carbon fabric reinforced thermoplastic.** *Polymer Testing* vol 31, pg 322–332, 2012.
- ²⁹MIMURA, K.; ITO, H.; **Characteristics of epoxy resin cured with in situ polymerized curing agent.** *Polymer* vol 43, pg 7559–7566, 2002.

- ³⁰COSTA, M. L., MIRABEL C. R., PARDINI, L. C.. **Métodos de Estudo da Cinética de Cura de Resinas Epóxi**. Polímeros: Ciência e Tecnologia - Abr/Jun – 1999
- ³¹D'ALMEIDA, J. R.M. MONTEIR, S N. **Efeito da Variação da Razão Resina/Endurecedor sobre a Resistência ao Impacto de uma Resina Epóxi**. Polímeros: Ciência e Tecnologia - Jan/Mar – 1996
- ³²REZENDE, M.C. **Fractografia de Compósitos Estruturais**. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 17, nº 3, 2007.
- ³³JAYAKUMARI, L.S.; THULASIRAMAN, V.; SAROJADEVI, M.; **Synthesis and characterization of bis(4-cyanato 3,5-dimethylphenyl) naphthyl methane/epoxy/glass fiber composites**. POLYMER COMPOSITES—2008.
- ³⁴FRANCO, L.A.L.; BOTELHO, E.C.; CÂNDIDO, G.M.; REZENDE, M.C. **Análise fractográfica do modo de falha de compósitos carbono/epóxi**. Revista Matéria, v. 14, n. 1, pg 694 – 704, 2009.
- ³⁵BOTELHO, E. C.; REZENDE, M. C. - **Caracterização mecânica de compósitos de poliamida**. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 12, nº 3, pg. 153-163, 2002.
- ³⁶SEUNGHAN, S.; JYONGSIK, J.; **Fractographical analysis on the mode II delamination in woven carbon fiber reinforced epoxy composites**. JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE vol 34, pg 5299 – 5306, 1999.
- ³⁷FRANCO, L.A.L.; GRAC, M.L.A.; SILVA, F.S.; **Fractography analysis and fatigue of thermoplastic composite laminates at different environmental conditions**. Materials Science and Engineering A vol 488, pg 505–513, 2008.
- ³⁸GREENHALGH, E. S.; HILEY, M. J. **Fractography of polymer composites: current status and future issues**. The Composites Centre, Imperial College, London, UK, SW7 2AZ.
- ³⁹VINOD S.; VINAY, S.; VINAY, N.; SUNIL, J.; MURALI, S.; RAGHAVENDRA, S.; ABDELHAKIM, N.; **Fracture Morphology of Carbon Fiber Reinforced Plastic Composite Laminates**. *Materials Research*. vol 13 nº3, pg 417-424, 2010.
- ⁴⁰ARSHAD, H. W.; LUTFULLAH, K.; **Preparation and characterization of pitch-based carbon fibers**. New Carbon Materials, vol 24 nº1, pg 83–88, 2009.
- ⁴¹WIEBECK, H., HARADA, J.; PLÁSTICOS DE ENGENHARIA. Ed. Artliber pg 198, 2005.
- ⁴²Gurit_Guide_to_Composites. página 06. <http://www.gurit.com/guide-to-composites.aspx>
- ⁴³Histórico da resina epóxi. <http://www.resepo.com.br/historico.htm>
- ⁴⁴PIRES, 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
- ⁴⁵MARINUCCI, G. **Materiais compósitos poliméricos - capítulo 8 Processos de laminação**. Ed. Artliber, pg 174- 175, 2011.

- ⁴⁶Gurit_Guide_to_Composites. página 14. <http://www.gurit.com/guide-to-composites.aspx>
- ⁴⁷MARINUCCI, G. **Materiais compósitos poliméricos - capítulo 10 Análise microestrutural e microestrutural**. Ed. Artliber ,pg 240,241, 2011.
- ⁴⁸Processos de Fabricação., página 02 ;<http://pt.scribd.com/doc/99845178/53proc3-Processos-de-Fabricacao>
- ⁴⁹Wang.J. **A machinability study of polymer matrix composites using abrasive waterjet cutting technology**. A machinability study of polymer matrix composites using abrasive waterjet cutting technology.
- ⁵⁰Usinagem página 17, <http://www3.fsa.br/mecanica/arquivos/05%20Usinagem.pdf>
- ⁵¹ ARISAWA H.; AKAMA S.; NIITANI H. **High-Performance Cutting and Grinding Technology for CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic)**, Mitsubishi Heavy Industries Technical Review vol. 49 n°. 3 September, 2012.
- ⁵²MARINESCU, I.; TONSHOFF, HK; INASAKI,I. **Tribology of abrasive machining process**. Norwich: William Andrew Inc, 2004.
- ⁵³BIGERELLE, M., HAGEGE,B., MANSORI, M.E; **Mechanical modeling of microcale abrasion in superfinish belt grinding**. Tribology International vol 41 pg. 992-1001, 2008.
- ⁵⁴HECKER,R.L., LIANG,S.Y., WU, X.J; **Grinding force power modeling based on chip thickness analysis**, International Journal advanced Manufacture Tecnologic vol 33: 449-459, 2007.