



UNIVERSIDADE D
COIMBRA



Sergio Espel de Oliveira

DESENVOLVIMENTO E MAQUINAGEM EM
COMPÓSITO COM FIBRA CURTA DE CARBONO

Tese no âmbito do doutoramento em Engenharia Mecânica, Ramo de Integridade Estrutural, orientada pelo Professor Doutor José António Martins Ferreira e pelo Professor Doutor Carlos Alexandre Bento Capela, apresentada à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra ao Departamento de Engenharia Mecânica.

Dezembro de 2018



Desenvolvimento e maquinagem em compósito com fibra curta de carbono

*Development and machining of composites with short
carbon fiber reinforced*

Autor

Sergio Espel de Oliveira

Orientador:

José António Martins Ferreira

Coorientador:

Carlos Alexandre Bento Capela

Dezembro de 2018

Dedico a José Bonifácio de Andrada e Silva,
brasileiro de Santos, São Paulo, pela grande
dedicação ao trabalho científico e pela busca de
um mundo mais justo.

AGRADECIMENTOS

A elaboração deste trabalho só foi possível com ajuda e apoio dado pelo corpo técnico do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra, que prestaram um elevado serviço a este desenvolvimento. Da mesma forma agradeço ao Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Politécnico de Leiria, Portugal.

Pela dedicação ao longo das atividades deste estudo prestada pelo Professor Orientador José António Martins Ferreira. O apoio dado na execução das etapas laboratoriais pelo Professor Carlos Alexandre Bento Capela, Coorientador deste trabalho.

Em razão da importante colaboração dada, agradeço ao colega Joel da Silva de Jesus.

Ao Professor Doutor Viliam Sinka, pela diretiva dada em 2010 e pela troca inicial de ideias sobre a eventual aplicabilidade do processo proposto.

Agradeço à Polícia Federal do Brasil, aqui representada pela pessoa do Delegado Geral Regional, André Ribor, que em 2014 sugeriu a continuação e complementação dos meus estudos académicos em universidades da Europa.

O meu reconhecimento e agradecimento à minha esposa Mariana Rodrigues de Almeida Espel de Oliveira pelo apoio e ajuda nas diversas etapas deste trabalho.

O desenvolvimento deste tema teve início em 2008 e ao longo de 10 anos recebeu sugestões, críticas ou apoio de diversas organizações e empresas. Agradeço a todas elas de maneira simbólica, fazendo aqui referência ao Centro de Educação Tecnológica Paula Souza, à empresa Geômetra BTE, Bureau de Tecnologia Engenharia, à FAB, Força Aérea Brasileira e à EMBRAER, Empresa Brasileira de Aeronáutica.

Ao CNPQ, Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento que através do programa Ciência Sem Fronteiras, deu suporte financeiro a esta investigação científica.

Agradeço ao Serviço de Suporte a Propriedade Intelectual do CNPQ e à Divisão de Inovação e Transferência do Saber da Universidade de Coimbra, pela orientação recebida sobre uma eventual transferência para UC e CNPQ, da patente INPI-Br, nº 102014029459-7, cancelada em 2015, conforme regras e contrato do CNPQ sobre o eventual uso futuro deste estudo.

A todos, que mesmo indiretamente prestaram alguma ajuda ou apoio, meus sinceros agradecimentos.



O compósito pode ser definido como um material final formado por dois materiais distintos, matriz e reforçador, que juntos transferem parte de suas propriedades individuais ao material resultante desta combinação, sempre realizada seguindo uma regra de mistura estabelecida. Um aumento nas propriedades mecânicas e a relevante redução de peso do produto final são em geral obtidas com a fabricação de partes e componentes em materiais assim compostos. No entanto, as operações para fabricação de produtos, genericamente chamados de peças em compósito, são complexas e de elevado custo de produção. Na indústria aeroespacial, o uso da sala limpa para moldar cada parte separadamente com intenso manuseio do operador, o processo de cura dentro do equipamento de autoclave durante horas e o forte controle de qualidade para cada fase, aumentam muito o custo de fabrico de cada peça.

Este cuidadoso processo é em geral aplicado a lotes de fabricação com pequena quantidade de peças, onde o uso generalizado de sistemas da robótica ou sistemas automáticos de produção se torna muitas vezes inviável ou até mesmo, impossível.

Sob esta visão, o desenvolvimento aqui proposto representa um primeiro passo para avaliar um processo de produção de componentes e partes completas por operação de maquinagem, executada a partir de uma placa ou bloco de compósito, previamente preparado. O compósito proposto neste processo pode, em alguns casos específicos, ser usado na substituição de outros materiais para pequenos lotes de fabricação, onde as formas desejadas ou requeridas, possam ser obtidas por operação de maquinagem convencional ou equipamento CNC.

Buscando este objetivo, este desenvolvimento apresenta uma comparação do resultado obtido em placas de compósito com matriz epoxídica e reforçador de fibra curta de carbono, com uma liga de alumínio de baixa resistência mecânica e utilizada na indústria em geral.

De maneira sistemática, foi realizado um trabalho de investigação científica para determinar uma possível formulação de compósito compatível com o processo proposto, a fim de estabelecer o comportamento deste material durante a maquinagem e ao final, mensurar as propriedades mecânicas obtidas neste procedimento de fabrico de partes e componentes. Ensaio complementares relativos ao fenómeno de fadiga do compósito foram realizados.

Os valores obtidos neste estudo mostram que as principais propriedades mecânicas encontradas no compósito após este processo de fabricação são menores que os valores encontrados nas ligas de alumínio comercialmente disponíveis.

No entanto, a maquinabilidade, a rugosidade final obtida, a estabilidade do processo e a redução de peso no produto final, obtida em alguns casos, recomendam novos estudos futuros para otimizar processos envolvidos e elevar valores de propriedades mecânicas essenciais.

Palavras-chave: Compósito, Fibras curtas de carbono, Processo de maquinagem, Fresagem, Propriedades mecânicas.

The composite is defined as a final material formed of two distinct materials, matrix and reinforce, which together transfer part of their individual properties to the resulting material of this combination, performed following a defined mixing rule.

Increase in the mechanical properties and the relevant reduction of weight of the final product are generally obtained with the manufacture of parts and components in composites.

However, the operations for fabrication of components and composite parts are complex and costly to manufacture.

In the aerospace industry, the use of the clean room to shape each part separately with intensive operator handling, the curing process within the autoclave equipment for hours, and the strong quality control for each stage greatly increase the manufacturing cost of each part. This careful process is usually applied to small lots of parts manufacturing where the widespread use of robotic system or automatic production system becomes infeasible.

In this view, the development proposed here represents a first step in evaluating a complete component production process by machining performed from a previously prepared composite plate or block. The composite proposed in this process may, in some specific cases, be used in the substitution of other materials for small batches of fabrication, where its shapes can be obtained by machining.

It comparison of the results obtained in epoxy matrix composite and carbon fiber reinforcement plates with a low mechanical strength aluminium alloy used in the aerospace industry is presented.

Aiming at this objective, a scientific research was carried out to determine a possible composite formulation compatible with the proposed process, to establish the behaviour of this composite during machining and to measure the mechanical properties obtained at the end of the process. Tests relating to fatigue phenomenon of composite were performed.

The values obtained in this study show that the main mechanical properties found in the proposed composite after this manufacturing process are smaller than the values found in the commercially available aluminium alloys.

However, the machinability, final roughness obtained, process stability and weight reduction in the final product resulted in some cases recommend further studies to optimize the processes involved and raise values of essential mechanical properties.

Keywords: Composite, Short Carbon Fibers, Machining Process, Milling, Mechanical properties.

| | |
|--|----------|
| Agradecimentos | i |
| Resumo | iii |
| Abstract | v |
| Índice geral | vii |
| Índice de figuras | xi |
| Índice de tabelas | xv |
| Nomenclatura | xvii |
| | |
| CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO | 1 |
| | |
| 1.1. Enquadramento | 2 |
| 1.2. Objetivo | 4 |
| 1.3. Metodologia científica e geral. Estrutura da tese | 4 |
| 1.3.1. Conceitos básicos e expressões matemáticas de aplicação geral | 5 |
| 1.3.1.1. Densidade e Princípio de Arquimedes | 5 |
| 1.3.1.2. Porosidade | 6 |
| 1.3.1.3. Ferramentas da Estatística. Dispersão e Desvio Padrão | 7 |
| 1.3.2 Estrutura da tese e do desenvolvimento apresentado | 8 |
| | |
| CAPÍTULO 2 - MATERIAL COMPÓSITO DE FIBRA CURTA E PROCESSO | |
| | |
| 2.1 - Introdução | 11 |
| 2.2 - Definição, classificação, características e constituintes do compósito | 11 |
| 2.3 - Principais tipos de resina | 12 |
| 2.3.1 - Resina de epoxídica como matriz | 15 |
| 2.3.2 - Resina epoxídica e temperatura de transição vítrea | 16 |
| 2.4 - Principais tipos de fibra | 18 |
| 2.4.1 – Formas de fornecimento de fibras e reforçadores | 20 |
| 2.5 - Principais processos de fabrico | 21 |

| | |
|--|----|
| 2.5.1 - Fabricação de componentes e partes por processo laminação | 21 |
| 2.5.2 – Fabricação por aplicação resina catalisador com pistola | 22 |
| 2.5.3 – Fabricação de componentes e partes por injeção de resina em molde | 24 |
| 2.5.4 – Fabricação de componentes em molde por compressão | 26 |
| 2.5.5 – Fabricação de componentes e partes por aplicação de bolsa de vácuo | 27 |
| 2.5.6 – Fabricação de componentes e partes em autoclave | 28 |
| 2.5.7 – Fabricação por enrolamento filamentar polar e helicoidal | 30 |
| | |
| 2.6 - Compósito de fibra curta | 31 |

CAPÍTULO 3 – LIGAS DE ALUMÍNIO E SUAS APLICAÇÕES

| | |
|--|----|
| 3.1 - Introdução | 35 |
| 3.2 – Definição de ligas, classificação e características | 36 |
| 3.3 – Aplicação e uso na indústria em geral | 40 |
| 3.3.1 - Ligas de Alumínio de uso aeroespacial | 42 |
| 3.3.2 - Propriedades mecânicas e seleção da liga de alumínio de comparação | 44 |
| 3.4 - Fundamentos da Fadiga Mecânica. Comportamento das ligas de alumínio | 46 |
| 3.4.1 - Aplicabilidade da curva S-N em condições diversas das adotadas no ensaio | 52 |

CAPÍTULO 4 - PRINCÍPIOS BÁSICOS DA MAQUINAGEM

| | |
|---|----|
| 4.1 - Introdução | 59 |
| 4.2 - Tipos de maquinagem e maquinagem de compósito | 59 |
| 4.3 – Fresagem, direções e ferramentas | 60 |
| 4.4 - Escolha da máquina e ferramenta para o procedimento de fresagem | 61 |
| 4.5 – Rugosidade, conceitos e normas utilizadas | 66 |
| 4.6 – Temperatura na região de corte durante a maquinagem | 71 |
| 4.7 – Meios lubrificantes e refrigeração durante a maquinagem | 73 |

CAPÍTULO 5 - FABRICO DE BLOCO E PLACA DE COMPÓSITO

| | |
|---|----|
| 5.1 – Introdução | 75 |
| 5.2 - Método de fabrico de bloco e placa de compósito | 75 |
| 5.3 - Seleção da matriz e reforçador utilizados nas placas de compósito | 78 |
| 5.3.1 - Seleção da matriz utilizada nas placas de compósito | 78 |
| 5.3.2 - Seleção do reforçador utilizado nas placas de compósito | 79 |
| 5.4 – Fabrico de placas com reforçador de 6mm, 2mm e 0,5mm | 80 |

CAPÍTULO 6 - PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS E TEORIA ASSOCIADA

| | |
|--|----|
| 6.1 - Introdução | 83 |
| 6.2 – Medição de densidade | 83 |
| 6.3 - Geometria e dimensões dos provetes | 84 |
| 6.4 - Medição dos parâmetros de rugosidade | 84 |
| 6.5 - Medição da temperatura de corte no processo de maquinagem | 86 |
| 6.6 - Ensaio de tração uniaxial | 87 |
| 6.7 - Ensaio de fadiga | 90 |
| 6.8 - Análise microscópica da distribuição de fibra | 91 |
| 6.9 - Microscopia eletrónica (SEM) da distribuição de fibra e secção de rutura | 91 |

CAPÍTULO 7 - DISCUSSÃO E RESULTADOS FASE 1, SELEÇÃO DO COMPÓSITO

| | |
|--|-----|
| 7.1 - Introdução da Fase 1 do desenvolvimento | 93 |
| 7.2 - Resultados medição de rugosidade, Fibra curta de 6mm, 2mm e 0,5mm | 93 |
| 7.3 - Resultados de medição da temperatura na maquinagem | 96 |
| 7.4 - Resultados Ensaio de Tração Uniaxial, Fibra Curta de 6mm, 2mm e 0,5mm | 97 |
| 7.5 - Teoria da Decisão, Múltiplos Critérios. Aplicação em Engenharia de Projeto | 100 |
| 7.5.1 - Aplicação Método Múltiplos Critérios, Fibra Curta de 6mm, 2mm E 0,5mm | 102 |

| | |
|--|-----|
| 7.5.1.1 - Critério 1: Maior Tensão Média Máxima de Rutura | 103 |
| 7.5.1.2 - Critério 2: Maior Valor do Módulo de Elasticidade | 103 |
| 7.5.1.3 - Critério 3: Maior Velocidade de corte a 80% da Temperatura de Transição Vítreo | 103 |
| 7.5.1.4 - Critério 4: Menor Valor (R_a), Rugosidade média observada | 104 |
| 7.6 - Conclusão desta fase do desenvolvimento proposto | 105 |

CAPÍTULO 8 – DISCUSSÃO E RESULTADOS FASE 2, COMPÓSITO DE ESTUDO

| | |
|---|-----|
| 8.1 – Introdução da Fase 2 do desenvolvimento | 107 |
| 8.2 - Fração volúmica, porosidade e Densidade do Compósito de Estudo | 107 |
| 8.3 - Influência da fração volúmica nas propriedades mecânicas | 109 |
| 8.4 - Resultados Análise Microscópica e Microscopia Eletrónica dos provetes | 111 |
| 8.5 - Análise do tipo de fratura | 115 |
| 8.6 - Influência da Porosidade na Tensão Média de Resistência à Tração | 116 |
| 8.7 - Análise da resistência à fadiga do compósito de estudo | 117 |
| 8.7.1 - Influência da porosidade na curva S-N mensurada | 121 |
| 8.8 – Comparação do compósito de estudo com Liga de Alumínio | 123 |
| 8.8.1- Comparação das Propriedades Mecânicas | 123 |
| 8.8.2 - Comparação da rugosidade média e estabilidade do processo de Maquinagem | 125 |
| 8.8.3 - Comparação do comportamento frente ao fenómeno de fadiga | 127 |
| 8.9 – Conclusão desta fase do desenvolvimento proposto | 130 |

CAPÍTULO 9 - CONCLUSÃO GERAL E PROPOSTA DE INVESTIGAÇÃO COMPLEMENTAR

| | |
|---|-----|
| 9.1. Conclusão Geral | 133 |
| 9.2. Propostas de investigação complementar | 137 |

| | |
|---------------------|-----|
| BIBLIOGRAFIA | 139 |
|---------------------|-----|

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 1

| | |
|--|---|
| Figura 1.1. Disposição do reforço ao longo da matriz. | 2 |
|--|---|

Capítulo 2

| | |
|---|----|
| Figura 2.1. Enfraquecimento da estrutura do polímero. | 17 |
| Figura 2.2. Esquema da execução da operação manual de laminação. | 22 |
| Figura 2.3. Esquema da execução da operação com pistola em laminação. | 23 |
| Figura 2.4. Esquema da execução com pistola, compósito de fibra cortada ou particulados. | 23 |
| Figura 2.5. Esquema da execução do processo injeção, tecido de fibra, molde e contramolde. | 24 |
| Figura 2.6. Esquema da execução do processo de injeção, fibras curtas ou particulado, molde e contramolde. | 25 |
| Figura 2.7. Esquema da execução do processo por compressão e tecido em fibra. | 26 |
| Figura 2.8. Esquema da execução da operação com bolsa de vácuo | 27 |
| Figura 2.9. Esquema da execução da operação em autoclave | 29 |
| Figura 2.10. Esquema da execução da operação de enrolamento filamentar polar e helicoidal. | 30 |
| Figura 2.11. Fibras Picadas (<i>Milled Carbon Fiber</i>). | 31 |
| Figura 2.12. Fibra curta de carbono (<i>short carbon fiber</i>). | 32 |
| Figura 2.13. Corda em Fibra de Carbono (<i>Carbon Fiber Yarn</i>). | 32 |

Capítulo 3

| | |
|---|----|
| Figura 3.1. Codificação das ligas de alumínio segundo a AMERICAN SOCIETY FOR METALS. | 37 |
| Figura 3.2. Evolução das ligas de alumínio. | 44 |
| Figura 3.3. Carregamento cíclico e o monótono, caracterizado por uma aplicação até rutura. | 46 |
| Figura 3.4. Carregamento em função do valor da Razão de Tensão (R) adotado. | 50 |
| Figura 3.5. Curva S-N, liga de alumínio A850.0-F, em molde de fundição. | 51 |
| Figura 3.6. Efeitos na curva S-N provocados pelos Fatores de tamanho (CD) e corrosão (CC). | 53 |
| Figura 3.7. Curvas S-N com os dados originais e curva S-N e ajustada ao ensaio pulsante. | 56 |

Capítulo 4

| | |
|--|----|
| Figura 4.1. Tipos de operação de corte em fresagem: (a) Direção Radial; (b) Direção Periférica e (c) Direção Axial. | 61 |
| Figura 4.2. Fresadora (CNC), MIKRON, modelo VCE 500, em preparação para maquinagem. | 62 |
| Figura 4.3. Esquema mostrando os principais parâmetros presentes na operação de fresagem. | 63 |
| Figura 4.4. Dimensões do provete e placa de compósito. | 64 |
| Figura 4.5. Esquema de maquinagem com parâmetros diferentes por trilha. | 65 |
| Figura 4.6. Provete maquinado nas condições definidas neste desenvolvimento. | 65 |
| Figura 4.7. Rugosidade se soma à Textura secundária, Desvio de forma. | 66 |
| Figura 4.8. Representação do perfil e da anamorfose presente. | 67 |
| Figura 4.9. Avaliação dos estados de superfície por Perfilómetro de Contato. | 68 |
| Figura 4.10. Perfilómetro de Contato, filtro mecânico por sapata. | 68 |
| Figura 4.11. Rugosidade média (R_a). | 69 |
| Figura 4.12. Rugosidade máxima (R_z). | 70 |

Capítulo 5

| | |
|--|----|
| Figura 5.1. Molde e contramolde montados: | 76 |
| Figura 5.2. Molde em compressão e pórtico da prensa modelo W15, Mazzola. | 76 |
| Figura 5.3. Retirada da placa de compósito fabricada do molde e contramolde. | 77 |
| Figura 5.4. Placa de compósito, largura 100mm, comprimento 150mm e espessura 5mm. | 77 |

Capítulo 6

| | |
|---|----|
| Figura 6.1. Medida da (ms) massa seca e (mm) massa do provete emerso em água. | 84 |
| Figura 6.2. Perfilómetro de Contato, Mitutoyo SurfTest, model 402. | 85 |
| Figura 6.3. Câmara Termográfica, Testo, <i>model 875-2i</i> . | 87 |
| Figura 6.4. Máquina Instron, modelo 4206, ensaio de tração. | 88 |
| Figura 6.5. Diagrama de Ensaio de Tração para material Dúctil. | 89 |
| Figura 6.6. Diagrama de Ensaio de Tração para material Frágil. | 89 |

Capítulo 7

| | |
|---|-----|
| Figura 7.1. Rugosidade média (R_a), compósito de fibra curta com comprimento de 6mm, 2mm e 0,5mm. | 95 |
| Figura 7.2. Rugosidade máxima (R_z), compósito de fibra curta com comprimento de 6mm, 2mm e 0,5mm. | 95 |
| Figura 7.3. Espectro de cores correspondente as temperaturas, durante a maquinagem, provete fibra 6mm, 4500 rpm. | 96 |
| Figura 7.4. Espectro de cores correspondente as temperaturas, durante a maquinagem, provete fibra 2mm, 4500 rpm. | 96 |
| Figura 7.5. Compósito de fibra curta com comprimento de 6mm, 2mm e 0,5mm e as respetivas temperaturas nas diversas velocidades de corte. | 98 |
| Figura 7.6. Compósito de fibra curta com comprimento de 6mm, 2mm e 0,5mm e a Tensão média de rutura à tração (σ_{rut}) nas diversas velocidades de corte. | 100 |
| Figura 7.7. Compósito de fibra curta com comprimento de 6mm, 2mm e 0,5mm e o Módulo de Elasticidade (E) nas diversas velocidades de corte. | 101 |

Capítulo 8

- Figura 8.1.** Compósito de fibra curta com comprimento de 0,5mm e a Tensão média de rutura à tração (σ_{rut}) nas diversas frações volúmicas. 110
- Figura 8.2.** Compósito de fibra curta com comprimento de 0,5mm e o Módulo de Elasticidade (E) nas diversas frações volúmicas. 111
- Figura 8.3.** Face do provete código 0,5mm_17,5%_1500_4, melhor dispersão de fibras. 112
- Figura 8.4.** Face do provete código 2mm_70%_4500_2, pior dispersão de fibras. 112
- Figura 8.5.** Provete código 0,5mm_20%_1500_1, mostrando a secção fraturada. 114
- Figura 8.6.** Provete código 0,5mm_20%_1500_2, mostrando a secção fraturada. 114
- Figura 8.7.** Curva levantada para provete de resina sem reforçador. Gráfico de referência adotado para comparação com comportamento Dúctil. 115
- Figura 8.8** Curva levantada provete de compósito com fração volúmica 20%. Gráfico de referência adotado para comparação com comportamento Frágil. 115
- Figura 8.9.** Forma da seção de rutura do provete número 28, fibra cortada com 5mm, (V_f) igual a 17,5%, matriz epoxídica de resina Biresin[®]CH83-2. 116
- Figura 8.10.** Curva em fadiga S-N do compósito de estudo, fração volúmica 17,5%, matriz epoxídica de resina Biresin[®]CH83-2. 121
- Figura 8.11.** Curva S-N relativas aos materiais Liga de Alumínio A850.0-F e compósito de estudo, $V_f = 17,5\%$, matriz epoxídica de resina Biresin[®]CH83-2. 127
- Figura 8.12.** Curva S-N Liga A850.0-F e compósito de estudo, em função da S_{max} amplitude máxima Tensão de Tração, pela Tensão de Rutura (σ_{rut}), em percentagem. 128

ÍNDICE DE TABELAS

Capítulo 2

| | |
|--|----|
| Tabela 2.1. Características e propriedade gerais de algumas matrizes termo rígidas. | 14 |
| Tabela 2.2. Propriedade de Compósitos com matriz polimérica em resina epóxi. | 15 |
| Tabela 2.3. Características e propriedades gerais de algumas fibras e outros | 19 |

Capítulo 3

| | |
|--|----|
| Tabela 3.1. Uso industrial das principais ligas de alumínio. | 43 |
| Tabela 3.2. Principais características e propriedades mecânicas da liga A850.0-F. | 45 |
| Tabela 3.3. Conversão da curva original S-N, para as condições de ensaio observadas nos ensaios de fadiga do compósito de estudo. | 55 |

Capítulo 4

| | |
|---|----|
| Tabela 4.1. Esquema de maquinagem com parâmetros diferentes a cada trilha. | 64 |
|---|----|

Capítulo 5

| | |
|---|----|
| Tabela 5.1. Propriedades e características matriz epoxídica adotada, CR-120 e CR-83. | 79 |
| Tabela 5.2. Propriedades e características do reforçador, fibra curta de carbono. | 80 |
| Tabela 5.3. Identificação e características dos compósitos fabricados neste desenvolvimento. | 82 |

Capítulo 6

| | |
|---|----|
| Tabela 6.1. Comprimento limite de amostragem (<i>cutoff</i>), recomendado. | 86 |
|---|----|

Capítulo 7

| | |
|--|-----|
| Tabela 7.1. Resultado (R_a) e (R_z), comprimento de fibra 6mm, 2mm e 0,5mm. | 94 |
| Tabela 7.2. Resultado Temperatura máxima (T_{max}), compósito com fibra 6mm, 2mm e 0,5mm. | 97 |
| Tabela 7.3. Tensão média à tração (σ_{rut}) e Módulo de Elasticidade (E) comprimento de fibra. | 99 |
| Tabela 7.4. Metodologia Multicritérios. Quadro comparativo dos compósitos comprimento de fibra 6 mm, 2 mm e 0,5 mm. | 104 |

Capítulo 8

| | |
|---|-----|
| Tabela 8.1. Valores relativo à densidade do material dos provetes e porosidade, em ensaio de tração unidirecional. | 108 |
| Tabela 8.2. Tensão média à tração (σ_{max}) e Módulo de Elasticidade (E), comprimento de fibra 0,5mm. | 109 |
| Tabela 8.3. Correlação entre a variável porosidade (p_s), máxima e a variável Tensão média máxima à tração (σ_{rut}). | 117 |
| Tabela 8.4. Valores obtidos no ensaio de fadiga compósito de estudo, fração volúmica 17,5%, matriz epoxídica de resina Biresin®CH83-2. | 120 |
| Tabela 8.5. Correlação entre a variável porosidade (p_s) presente no provete e a variável amplitude máxima observada no número de ciclos na rutura à fadiga. | 122 |
| Tabela 8.6. Propriedades mecânicas e físicas do compósito de estudo e da liga de alumínio fundido A850.0-F. | 124 |
| Tabela 8.7. Resultado obtido nesta simulação simplificada. | 125 |
| Tabela 8.8. Resultado obtido nesta simulação simplificada, dimensionamento à fadiga. | 129 |

NOMENCLATURA

Abreviaturas

| | |
|----------|--|
| AC | Amostra de Controlo do parâmetro em estudo |
| ASTM | <i>American Society for Testing and Materials</i> |
| DGEA | Diglicidil Éter de Bisferol A |
| F. Autor | Fonte, Arquivo pessoal do autor |
| P/N | Número da peça, " <i>part number</i> ". Identifica um componente, parte ou peça. |
| RTM | <i>Resin Transfer Moulding</i> |
| SFRC | <i>Short Fiber Reinforcement Composites</i> : Compósito Reforçado por Fibra Curta |
| SFRP | <i>Short Fiber Reinforcement Polymer</i> : Polímero Reforçados por Fibras Curtas |
| SFTC | <i>Short Fiber Thermoplastic Composites</i> : Compósito de matriz Termoplástica Reforçados por Fibras Curtas |

Simbologia

| | |
|-------|---|
| A_i | Área inicial da secção |
| C_e | Fator de Ajuste da curva S-N, determinado para condição (e) de ensaio |
| c | Comprimento da fibra cortada presente no compósito |
| D | Dano provocado por fadiga |
| DP | Desvio Padrão |
| E | Módulo de Elasticidade ou módulo Young |
| E_f | Módulo de Elasticidade final, antes da rutura |
| E_0 | Módulo de Elasticidade inicial |
| e | Espessura do provete |
| ID | Identificação do provete |
| F | Força aplicada |
| h | Largura medida do provete |
| h_a | Altura máxima da apara em maquinagem |
| l | Comprimento inicial do provete |
| l_e | Comprimento limite de amostragem, <i>cutoff</i> |
| l_m | Percurso de medição, na linha média |

| | |
|-----------|--|
| l_t | Percurso total de medição, na linha média |
| MD | Média aritmética do conjunto de dados |
| M_g | Margem de segurança no cálculo estrutural |
| M_x | Média aritmética do conjunto de dados relativo a variável x |
| m | Massa do corpo |
| m_s | massa seca do provete |
| m_m | massa do provete emerso em água |
| n | Velocidade do fuso em maquinagem; Índice numérico genérico |
| N | Número de ciclos decorridos |
| N_R | Número de ciclos decorridos, quando da rutura |
| P_{max} | Força máxima efetivamente aplicada na ciclagem, ensaio de fadiga |
| P_{min} | Força mínimo efetivamente aplicada na ciclagem, ensaio de fadiga |
| P_m | Força média efetivamente aplicada na ciclagem, ensaio de fadiga |
| p_s | porosidade do material |
| p_{SM} | porosidade teórica máxima do material |
| Q | diâmetro do corpo cilíndrico do material em estudo |
| r | Coeficiente de correlação de Pearson |
| r_f | Rotação da ferramenta |
| R | Razão de tensão aplicada no ensaio de fadiga |
| R_z | Rugosidade máxima |
| R_a | Rugosidade média |
| R_z | Soma da altura máxima dos picos e profundidade máxima |
| S_A | Tensão média de tração uniaxial atuando na secção |
| S_d | Amplitude de tensão da curva S-N, condição de ensaio corrigida |
| S_i | Amplitude de tensão da curva S-N, condição de ensaio original |
| S_p | Limite de proporcionalidade |
| S_{fo} | Tensão de limite de fadiga |
| S_{max} | Tensão máxima de um ciclo de fadiga |
| S_{min} | Tensão mínima de um ciclo de fadiga |
| S_x | Desvio padrão do conjunto de dados relativo a variável x |
| S_v | Amplitude de tensão ou tensão máxima para rutura do material |
| T_G | Temperatura de transição vítrea |
| Z_i | Soma do maior afastamento acima e abaixo da linha média, valores absolutos |

| | |
|---------------------|---|
| Z_p | Altura máxima dos picos |
| Z_v | Profundidade máxima |
| V | Volume total de um corpo ou amostra |
| V_a | Velocidade de avanço em maquinagem |
| V_c | Velocidade de corte em maquinagem |
| V_{cr_n} | Parâmetro de valoração da alternativa “n” |
| V_f | Fração volúmica de fibra no compósito |
| V_v | Volume do total de poros de uma amostra ou corpo |
| W_f | Fração mássica de fibra no compósito |
| y_i | Valores absolutos das ordenadas de afastamento |
| σ | Desvio Padrão no estudo de fadiga |
| σ_m | Tensão média à tração na direção normal |
| σ_{rut} | Tensão de rutura |
| ρ_p | Densidade do provete |
| ρ_t | Densidade teórica do compósito |
| ρ_w | Densidade da água |
| ε | Extensão nominal |
| ε_p | Extensão no Limite de proporcionalidade |
| ε_r | Deformação na rutura |
| ε_m | Deformação media de ciclo de fadiga |
| ε_{max} | Deformação máxima de um ciclo de fadiga |
| ε_{min} | Deformação mínima de um ciclo de fadiga |
| Δl | Variação do comprimento inicial do provete submetido a tração |
| ΔS | Gama de tensões de fadiga |

Glossário e definição de termos específicos

| | |
|---------------------|---|
| Amostra de controlo | Referência quantitativa adotada na análise do benefício ou malefício advindos da adição de um elemento ao fenómeno em estudo. |
| Bloco | Corpo no formato de paralelepípedo em compósito ou metal. Seu tamanho pode variar em função do tamanho da peça desejada. |

| | |
|---------------|--|
| Componente | Elemento de um conjunto. Na área aeroespacial é um subconjunto montado em um veículo capaz de voar. |
| Lote de peças | Conjunto em processamento ou fabrico, com um número fixo e determinado de componentes ou partes. |
| Peça | Qualquer parte ou componente em processo de fabricação, ou em procedimento de busca e suprimento. |
| Placa | Corpo no formato de paralelepípedo, com uma das três dimensões muito menor que as outras duas. |
| Parte: | Elemento de um subconjunto identificado por um código ou número, passível de troca ou substituição. |
| Provete | Corpo de Prova, identificado por um código único. Em geral, submetido a um ensaio, com valores obtidos arquivados. |

INTRODUÇÃO

Os materiais compósitos de matriz polimérica reforçados com fibra de carbono são em geral largamente usados na indústria mundial, nomeadamente nas aplicações aeroespaciais. A grande utilização nesta área se deve em parte às propriedades mecânicas presentes no compósito, que permitem a redução de peso e conseqüente redução de consumo de combustíveis, convergindo para as crescentes exigências de proteção ambiental, definidas por estudos ecológicos.

Ademais, Edward Bruhn em seu livro *“Analysis and Design of Flight Vehicle Structures”*, considerado por muitos, o mais importante livro publicado na área de Projetos Aeroespaciais, coloca em primeiro lugar o Critério de Segurança e em segundo lugar, o Critério de Menor Peso, quando do desenvolvimento de uma parte ou componente aeroespacial [Bruhn, 1973]. No entanto, a fabricação de partes e componentes a partir de compósitos envolve complexos processos, com intenso manuseio por parte de operadores, em várias etapas da manufatura e de garantia de qualidade.

O uso de sala limpa e com controlo térmico, para moldar cada parte separadamente numa tarefa repetitiva e cuidadosa. O processo de cura sob pressão e temperatura pré-estabelecida, dentro de equipamento de autoclave, durante dezenas de horas e o forte uso de ferramentas e procedimentos para garantia da qualidade em cada fase, tornam o custo de produção muito elevado.

Por outro lado, um número total de partes por lote de fabrico é em geral pequeno dentro da indústria aeroespacial, conforme citação [De Paiva, 2013], página 20, para peças estruturais aeronáuticas, *“em particular, a dimensão dos lotes produzidos são de tal forma reduzidos, que uma redução de tempo irá promover, igualmente uma redução no custo unitário de cada peça produzida”*.

Lote de reduzido é a razão pela qual a automatização industrial e equipamentos robóticos raramente são usados durante esta fase da produção de partes e componentes em compósito. Dentro desta realidade, as empresas aeroespaciais e as forças aéreas de todo mundo, buscam simplificar o processo de fabrico já em uso.

Outros processos também precisam ser desenvolvidos, mesmo que aplicado a limitado tipo de partes ou componentes, mas que de alguma forma, possam de alguma maneira, reduzir custos e facilitar a produção com os materiais compósitos.

1.1. Enquadramento

Podemos definir compósito como sendo um material composto, pertencente a uma classe de materiais de fabricação, formada por uma fase contínua denominada Matriz e uma fase dispersa, muitas vezes nomeada Reforço ou Modificador, cujas propriedades do material aglomerado final, são obtidas a partir da combinação das propriedades dos constituintes individuais, seguindo uma dosagem pré-estabelecida, usando por exemplo a chamada Regra de Mistura, sem reação química entre os materiais da matriz e do reforçador.

A figura 1.1, mostra as várias condições e direções que o fabricante de compósito ou peças de compósito, pode adotar para posicionar o reforçador dentro da fase contínua, matriz. Tais reforços, são em geral, classificados considerando a direção da força (F), aplicada ao componente ou parte [Kardos, 1985]. A direção do reforçador é de grande influência nas propriedades mecânicas do compósito [Santos, 2012].

Os tipos mais comuns são os particulados aleatoriamente distribuído (*random particle-reinforced*), fibras descontínuas unidirecionais (*discontinuous aligned fibre-reinforced*), fibras descontínuas aleatoriamente distribuídas e em direções variadas (*discontinuous random-oriented fibre-reinforced*) e fibras contínuas unidirecionais (*continuous fibre-reinforced*).

As Propriedades Mecânicas do compósito com reforçadores de fibras contínuas unidirecionais podem servir apenas de referência inicial para estimativas relacionadas a outras direções de reforçadores, como estabelece [Soufen *et al.*, 2012]. Estudos específicos precisam ser realizados para obter o comportamento mecânico em cada um dos tipos de compósito.

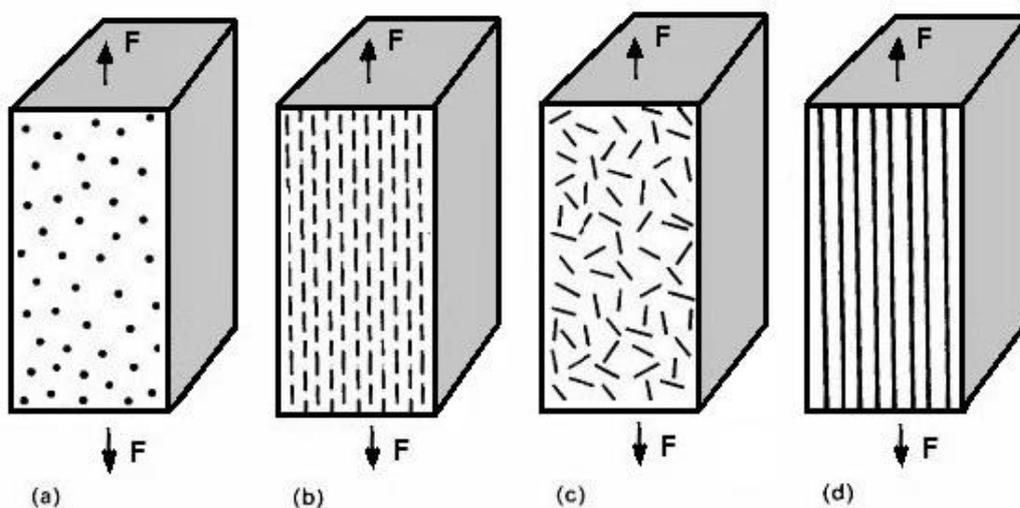


Figura 1.1. Disposição do reforço ao longo da matriz; (a) particulado aleatoriamente distribuído; (b) fibras descontínuas unidirecionais; (c) fibras descontínuas aleatoriamente distribuídas e em direções variadas; (d) fibras contínuas unidirecionais.

A necessidade de estudos específicos para cada tipo de compósito caracterizado na figura 1.1, mencionada na referência [Soufen *et al.*, 2012], foi o ponto de partida deste desenvolvimento. Desta forma foi realizado um trabalho de investigação científica sobre o tipo de compósito com fibras descontínuas aleatoriamente distribuídas e em direções variadas (*discontinuous random-oriented fibre-reinforced*), com vistas a uma melhor compreensão de seu comportamento e de suas propriedades mecânicas mais importantes.

A partir deste estudo, propõem um processo de fabrico de partes e componentes por maquinagem, tendo como matéria-prima, bloco ou placa com fibras descontínuas cortada em um comprimento fixo, direções do reforço orientadas aleatoriamente, em matriz de resina.

O bloco é um corpo no formato de paralelepípedo fabricado em instalações apropriadas, de maneira automatizada, com tipo de compósito mencionado e destinado à operação de maquinagem subsequente.

O tamanho e a dimensão das arestas devem ser de livre escolha, podendo assumir a forma de uma placa.

Para utilização na produção de partes ou componentes aeroespaciais, o processo de fabrico do bloco precisa ser realizado em sala limpa, com controlo térmico, com a cura efetuado por horas e dentro do equipamento de autoclave, em condições de pressão e temperatura predefinidas, ao longo do tempo de processamento dentro da autoclave.

Um alargado uso de ferramentas de garantia da qualidade é necessário para cada fase de fabrico realizada.

Nesta forma de processo de fabrico, o uso de sistema da robótica ou sistema automatizado de produção, visando agilizar a fabricação dos blocos, podem ser aplicados com facilidade, graças a padronização dos tamanhos dos blocos ou placas produzidas.

Isto aumenta consideravelmente o número de partes por cada lote de fabrico, viabilizando métodos automáticos de produção e de garantia da qualidade. Esta automatização contribui muito para redução do custo de produção.

Neste desenvolvimento, os blocos são iguais em suas dimensões e em razão da dimensão adotada na largura 100 mm, comprimento 150 mm e espessura de 5 mm, assume a forma geométrica de uma placa.

O compósito é de matriz epoxídica, termo rígida, com fibras de carbono, descontínuas aleatoriamente distribuídas e em direções variadas e com comprimento médio das fibras cortadas iguais a 6 mm, 2 mm e 0,5 mm.

O processo de maquinagem utilizado foi de fresagem por *Computer Numeric Control (CNC)*, utilizado na fase final de fabrico, visando construir a forma final do componente ou parte. Este processo é viável quando aplicado à produção de pequenos lotes de peças e largamente utilizado na indústria aeroespacial no fabrico de componentes ou partes a partir de blocos

produzidos em titânio, aço e nomeadamente, em ligas de alumínio.

É importante lembrar que o compósito formado por resina e fibra de carbono, é de difícil detecção por radares, dando a este trabalho uma motivação estratégica e militar.

1.2. Objetivo

Este desenvolvimento investiga a viabilidade e as limitações de uso do processo de fabrico de partes ou componentes por maquinagem de bloco ou placa de compósito de fibra de carbono cortada e matriz epoxídica.

Apresenta as principais propriedades mecânicas obtidas do bloco de compósito, após a maquinagem. Verifica o comportamento do compósito durante a operação de maquinagem e o padrão de rugosidade obtida. Mede e avalia a temperatura máxima na região de corte do material, durante o processo de maquinagem. Em estudo complementar, avalia o Fenómeno de Fadiga do compósito de estudo em provetes fabricados com o processo proposto.

Como uma referência prática, compara as propriedades do material no final do processo proposto, com as propriedades equivalentes de uma liga de alumínio de uso industrial.

1.3. Metodologia científica e geral. Estrutura da tese

O desenvolvimento do processo de fabricação mecânica utiliza várias metodologias aplicadas às diversas fases desta tarefa. Entre estas destacamos o método científico, método empírico, debate de ideias (*brainstorming*) e o método indutivo.

No entanto, quando o desenvolvimento está centrado em fazer observação da realidade e realizar experimentos, o método científico é aquele que melhor suporta este tipo de trabalho, conforme enfatiza a citação, página 3, "*If your project involves making observations and doing experiments, your project might better fit the Steps of the Scientific Method*" [Tayal, 2013].

O método científico na sua definição tradicional, é um caminho para busca de conhecimento que passa pela observação de um fato, formulação de um problema, elaboração de hipótese, execução de experiência controlada que testa a hipótese, análise do resultado experimental e conclusão [Marsulo e Silva, 2005].

Para os casos onde o problema considera benefício ou malefício advindos da adição de um elemento, é muito importante definir uma amostra de controlo (*control sample*), também conhecida nas áreas de biociência como "*placebo*".

Uma amostra de controlo reduz o risco da atribuição errónea de alguma propriedade

anteriormente presente nas amostras, ao novo elemento adicionado, alterando assim, aspectos da realidade estudada [Falk e Rubinstein, 1987].

Este desenvolvimento considera o método científico e a aplicação do conceito de amostra de controlo, como as principais metodologias adotadas no estudo da maquinagem dos compósitos de fibra curta de carbono.

1.3.1. Conceitos básicos e expressões matemáticas de aplicação geral

As definições e expressões matemáticas de uso específico em um capítulo, são apresentadas no mesmo local do texto onde são aplicadas.

No entanto, os conceitos, definições e expressões matemáticas de uso em mais de um capítulo são apresentadas a seguir.

1.3.1.1. Densidade e Princípio de Arquimedes

A densidade, muitas vezes nomeada como massa volúmica ou massa volumétrica, é o quociente entre a massa e o volume de um corpo.

Para um corpo constituído de um tipo de material amórfico, a determinação do valor numérico da densidade passa pela aplicação do Princípio de Arquimedes [Pottker e Appoloni, 2011].

Por esta tradicional lei da hidrostática, um corpo imerso na água torna-se mais leve devido a uma força exercida pelo líquido sobre o corpo, vertical e para cima, que reduz a força peso do corpo, chamado de peso aparente ou submerso.

Essa força do líquido sobre o corpo, é denominada empuxo ou impulsão.

Desta forma, identificado o valor da densidade do provete por (ρ_p), conhecendo (m_s) e (m_m), respetivamente a massa seca e a massa imersa do provete e (ρ_w) corresponde ao valor da densidade da água à temperatura do ensaio, o valor (ρ_p) é determinado pela equação (1.1).

$$\rho_p = [m_s / (m_s - m_m)] \cdot \rho_w \quad (1.1)$$

A densidade de um corpo constituído por um tipo de material amórfico, com valor de densidade (ρ_t) conhecida, pode ser usada como referência em estudos complementares, através da comparação de (ρ_t) com o valor da densidade medida experimentalmente [Pottker e Appoloni, 2011].

O cálculo teórico da densidade para um corpo constituído de dois tipos de materiais amórficos,

com densidades parciais conhecidas, como é o caso do compósito formado por matriz e reforçador, deve considerar os valores da densidade correspondente a parte do corpo formada por matriz e a parte do corpo formada por reforçador.

Desta forma, identificado o valor da densidade do material da matriz (ρ_m), o valor da densidade do material do reforçador (ρ_r) e ainda, a fração mássica de fibra no compósito (W_f), a densidade teórica do compósito (ρ_t) é determinada pela equação (1.2). Este valor teórico pode ser usado como referência na comparação com a densidade medida experimentalmente.

$$\rho_t = (\rho_r \cdot W_f) + [\rho_m \cdot (1 - W_f)] \quad (1.2)$$

A fração mássica de fibra no compósito (W_f) é definida como sendo o quociente entre a massa de fibra e a soma das massas de todos os outros constituintes da mistura.

A fração volúmica de fibra no compósito (V_f) é definida como sendo o quociente entre o volume de fibra e a soma dos volumes de todos os outros constituintes da mistura.

$$W_f = (V_f \cdot \rho_r) / [(V_f \cdot \rho_r) + [(1 - V_f) \cdot \rho_m]] \quad (1.3)$$

Este desenvolvimento adota como parâmetro de estudo do compósito de fibra curta de carbono e matriz epoxídica, a fração volúmica de fibra no compósito (V_f). A conversão em fração mássica de fibra no compósito (W_f) é dada pela equação (1.3). A Tabela 5.3, intitulada, Identificação e características dos compósitos fabricados neste desenvolvimento, apresenta a fração mássica de fibra no compósito (W_f) e a fração volúmica (V_f), utilizadas.

1.3.1.2. Porosidade

Porosidade é a característica de um material conter espaços interiores vazios ou muitas vezes, com fluido gasoso ou fluido líquido, chamados genericamente de “poros”.

A medição da porosidade do material (p_s) é expressa em percentagem, e é definida como o volume dos poros (V_v) dividido pelo volume total (V) de uma amostra, conforme equação (1.4).

$$p_s (\%) = [V_v / V] \cdot 100 \quad (1.4)$$

A densidade (ρ) de um corpo é determinada pela divisão da massa pelo volume do corpo. Portanto, é possível determinar seu volume (V) a partir da densidade e massa do corpo (m), conforme apresenta equação (1.5).

$$V = m / \rho \quad (1.5)$$

Substituindo a equação (1.4) na equação (1.3) e considerando que a massa do corpo é a mesma tanto na determinação de (ρ_t) e (ρ_p) , o cálculo da porosidade (p_s) se reduz ao exposto na equação (1.6), em percentagem.

$$p_s (\%) = [(\rho_t - \rho_p) / \rho_t] \cdot 100 \quad (1.6)$$

Neste desenvolvimento, o valor teórico da porosidade do compósito (p_s) foi determinado pela equação (1.6), como uma primeira referência no estudo desta característica do material compósito em estudo [Pottker e Appoloni, 2011].

Segundo [Bortoli,2016], a presença de porosidade tem impacto na previsão de vida à fadiga, mesmo para amplitudes menores de deformação, onde o nível de deformação plástica macroscópica é baixo. O momento onde as deformações em torno do vazão crescem rapidamente, nomeado valor de porosidade crítica, é atingido para níveis elevados de vida calculada e é atingido para valores moderados de vida, determinados experimentalmente.

1.3.1.3. Ferramentas da Estatística. Dispersão e Desvio Padrão

Dispersão, também nomeada como variabilidade ou espalhamento, mostra como estão distribuídos os elementos analisados, em relação a uma referência estabelecida. Em estatística as medidas de dispersão utilizadas são a variância, o desvio padrão e a amplitude interquartil. Em razão do generalizado uso do desvio padrão (DV) na indústria, muito aplicado ao estudo da estabilidade do processo mecânico de fabrico por maquinagem, este parâmetro estatístico foi adotado neste desenvolvimento conforme equação (1.7) e equação (1.8), cálculo da média aritmética (MD) da amostra.

$$DV = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^n (X_n - MD)^2}{n}} \quad (1.7)$$

$$MD = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^n X_n \quad (1.8)$$

O conceito de dispersão também é aplicado na avaliação do posicionamento das fibras ao longo do material adotado com matriz [Glaskova, *et al.*, 2011].

O método usualmente conhecido para medir a correlação entre duas variáveis é o coeficiente de correlação linear de Pearson, também conhecido como coeficiente de correlação do momento produto. Este foi o primeiro método de correlação, introduzido por Karl Pearson em 1897 e ainda hoje muito usado na avaliação da correlação entre variáveis medidas em nível intervalar [Lira, Neto, 2008].

O coeficiente de correlação linear de Pearson (r) está definido na equação (1.9), onde (x) e (y) são variáveis hipotéticas e (MX) e (MY) são suas respectivas médias. Os valores (Sx) e (Sy) são os desvios padrão do conjunto de dados de cada variável e (k) o número comum de elementos das amostras.

$$r = \frac{\sum_{n=1}^k (x - MX) \cdot (y - MY)}{(k-1) \cdot Sx \cdot Sy} \quad (1.9)$$

Quanto mais próximo o valor de (r) estiver de zero, menor a correlação linear. Quanto mais próximo de 1, maior correlação positiva e quanto, mais próximo de -1 , maior correlação negativa. O coeficiente de correlação (r) é usado como um verificador de correlação entre variáveis, ao longo deste desenvolvimento.

1.3.2 Estrutura da tese e do desenvolvimento apresentado

Esta tese está estruturada em 9 capítulos e o texto apresentado segue a Norma Portuguesa [NP 405-1, 1998]. O desenvolvimento e a investigação científica necessária foram realizadas em duas fases consecutivas.

A Fase 1 apresenta os estudos ensaios e resultados realizados em três formulações diferentes de compósito de fibra curta de carbono com matriz epoxídica, visando identificar aquela que melhor se aproxima dos objetivos propostos.

Numa etapa nomeada de Fase 2, o compósito selecionado na fase anterior, identificado como Compósito de Estudo, foi estudado, testado e comparado com uma liga de alumínio, buscando conhecer o desempenho do compósito de fibra curta de carbono e matriz polimérica, após a operação de maquinagem realizada, conforme processo proposto de fabrico.

Para realizar este desenvolvimento foi necessário a execução de inúmeras tarefas. As principais tarefas realizadas foram:

- Estudo de fibras cortadas, seus tipos e aplicações.
- Estudo de Resinas, nomeadamente as poliméricas.
- Estudo de liga de alumínio e sua aplicação na indústria em geral.
- Estudo dos processos de maquinação em geral e em compósitos.
- Produção do material compósito com os diferentes comprimentos de fibra.
- Produção do material compósito com as diferentes percentagens de fibra.
- Maquinagem de provetes com registo de temperaturas.
- Medição da rugosidade superficial de cada provete ensaiado.
- Realização de ensaios de tração com determinação das principais propriedades.
- Analisar os resultados obtidos nos diversos ensaios realizados e de outras fontes.
- Comparação dos resultados entre uma liga de alumínio e o compósito selecionado.
- Discussão dos resultados e comparação com bibliografia científica e tecnológica.
- Síntese e construção de conclusões, justificativas e proposição de trabalhos futuros.

Este trabalho de investigação científica foi realizado seguindo o documento denominado Relatório de Planeamento de Atividades de Investigação, Unidade Curricular UC03006803, Projecto de Tese de Integridade Estrutural, Estudos Doutorais, intitulado *“Utilização de Compósito em Substituição de Ligas de Alumínio na Fabricação de Componentes Maquinados”*. Tal texto foi apresentado e aprovado em julho de 2015 pela Comissão Científica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra e pelo Comité Técnico CNPQ, Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento.

MATERIAL COMPÓSITO DE FIBRA CURTA E PROCESSO

2.1 – Introdução

A Tecnologia do Compósito é relativamente recente no cenário industrial e como este assunto sempre esteve de alguma forma relacionado ao desenvolvimento de equipamentos militares, foi muitas vezes tratado como informação sigilosa [Rezende e Botelho, 2000], [Mangalgi, 1999]. Em razão disto, praticamente são poucas as normas e padrões internacionais sobre a nomenclatura, uso e definições relativas aos compósitos de maneira geral.

A revisão bibliográfica deste desenvolvimento tomou como base normas de padronização e definição de termos técnicos, nomeadamente o identificado como [MIL-HDBK-17-1E], *COMPOSITE MATERIALS HANDBOOK, V. 1. POLYMER MATRIX COMPOSITES GUIDELINES FOR CHARACTERIZATION OF STRUCTURAL MATERIALS*, publicado pelo U. S. DEPARTMENT OF DEFENSE e documento de referência sobre os conceitos básicos relacionados aos compósitos ao longo deste desenvolvimento.

2.2 - Definição, classificação, características e constituintes do compósito

Conforme citação do livro *Materiais Compósitos*, página 1, “Um material diz-se compósito quando resulta da combinação de dois ou mais materiais distintos. O exemplo clássico e mais vulgar são os compósitos fibrosos, isto é, que resultam da dispersão de fibras num material aglomerante, que se designa por matriz” [Moura, *et al.*, 2005].

O avanço tecnológico fez surgir compósitos constituídos por fibras de reforço, com orientação definida ou não, dispersos em uma matriz metálica, cerâmica ou polimérica [Chung, 2009].

Suas propriedades variam em função dos materiais constituintes conforme regra de mistura, de suas quantidades relativas e da geometria da fase dispersa, isto é, de sua forma, tamanho, distribuição e orientação [MIL-HDBK-17-1E].

Um levantamento de artigos científicos e outros documentos da área de tecnologia dos materiais, realizado em 2011 e atualizado em 2014, mostrou uma distribuição heterogênea de documentos emitidos no ambiente acadêmico, industrial e revistas científicas, associados a palavra compósito. Um resumo baseado na figura 1.1 é mostrado a seguir:

- Perto de 70% dos documentos encontrado são estudos ou fazem referência ao compósito com fibras contínuas unidirecionais (*continuous fibre-reinforced*).
- Perto de 20% dos documentos encontrados são estudos ou fazem referência ao compósito com particulado aleatoriamente distribuído (*random particle -reinforced*), incluído aqui os reforçadores e materiais cerâmicos.
- Perto de 8% dos documentos encontrados são estudos ou fazem referência ao compósito com fibras descontínuas unidirecionais (*discontinuous aligned fibre-reinforced*), incluindo aqui trabalhos e estudos relativos as emendas em tecido de fios de fibra de carbono, como sendo uma descontinuidade.
- Perto de 2% dos documentos encontrado são estudos ou fazem referência ao compósito com fibras descontínuas aleatoriamente distribuídas e em direções variadas (*discontinuous random-oriented fibre-reinforced*).

Somente esta distribuição de documentos já mostra como o campo de estudo relacionado ao uso das fibras descontínuas aleatoriamente distribuídas e em direções variadas (*discontinuous random-oriented fibre-reinforced*), ainda apresenta um grande espaço para trabalhos de investigação científica, com resultados e aplicações ainda por serem descobertas.

2.3 - Principais tipos de resina

A matriz do compósito pode ser constituída por material cerâmico, metálico ou polimérico. As matrizes poliméricas são as mais utilizadas na indústria em geral. Polímeros são macromoléculas oriundas de unidades estruturais orgânicas menores denominadas monómeras. As monómeras são moléculas de baixa massa molecular que através do processo de polimerização gradual ou polimerização em cadeia, formam diferentes estruturas maiores denominadas macromoléculas poliméricas [Smith, 1998].

As macromoléculas obtidas pela aplicação e ajuste de diferentes parâmetros do processo de polimerização, à diferentes monómeras, resultam em materiais poliméricos de características

e propriedades mecânicas específicas, com uso em determinadas soluções de engenharia.

Quando a combinação da matriz polimérica com reforçador confere ao compósito final obtido, menores valores de massa específica, associados à elevada resistência mecânica e rigidez, esses materiais são denominados compósitos poliméricos avançados [Moura, *et al.*, 2005].

Os compósitos poliméricos avançados, por sua vez, são obtidos geralmente pela utilização de fibras contínuas pré-impregnadas com uma matriz Termo rígida ou Termoplástica.

A matriz termo rígida, também denominada termoendurecível, quando aquecida a uma temperatura predefinida, assumem uma forma permanente sólida que se mantém mesmo quando a massa é resfriada. Em alguns polímeros termoendurecíveis, o aquecimento é obtido por reação exotérmica com outros componentes identificados como catalisadores ou aceleradores, que além de gerar o aquecimento mencionado, podem contribuir por reação química, para a formação da estrutura macromolecular.

A matriz termoplástica, também denominada apenas por plásticos, tem sua estrutura molecular quebrada sempre que for aquecida a uma determinada temperatura, retornado a uma forma sólida permanente quando resfriada.

Os compósitos com matriz termo rígida estão mais presentes nas aplicações em produtos da indústria náutica, automotiva e aeroespacial [Romão, 2012].

A tabela 2.1 mostra características e propriedade gerais de algumas matrizes termo rígidas utilizadas na indústria náutica, automotiva e aeroespacial [Mangalgiri, 1999].

A intensa utilização de compósitos de matriz polimérica reforçados com fibra de carbono e aramida oferecem vantagens múltiplas. As mais importantes são em seguida apresentadas, [Romão, 2012], [Mangalgiri, 1999], [Neto e Pardini, 2006], [Pires, 2012] e [Moura, *et al.*, 2005]:

- Baixa massa específica associada a elevados valores de resistência e rigidez;
- Elevadas resistências à fadiga;
- Elevada resistência à corrosão;

Em aplicações estruturais identificadas como Classe II, de alta importância para segurança produto [FAA-Advisory, 1996], existem algumas desvantagens para a utilização de compósitos no setor aeronáutico, quando comparados aos materiais metálicos:

- Estrutura laminar com interfaces fracas entre os materiais adjacentes;
- Estrutura laminar apresenta interfaces fracas com outras partes da estrutura;
- A resistência é reduzida em planos fora daquele o qual a tensão é aplicada;

- Baixa tenacidade à fratura quando comparado aos metálicos;
- Degradação quando de sua utilização em elevadas temperaturas (acima de 200°C);
- Maior probabilidade de defeitos na fabricação quando comparado os metálicos;
- Maior amplitude de variação nas propriedades do material final quando comparado aos metálicos.

Tabela 2.1. Características e propriedade gerais de algumas matrizes termo rígidas.

| Resina Termo rígida | Uso, aplicação e limites | Características gerais e especiais | Propriedades Físicas e Mecânicas |
|--|---|--|--|
| Epoxídica | Custo elevado Muito utilizada na indústria, sendo 80% compósitos; Uso moderado em alta temperatura; | Baixa contração (2-3%); Sem liberação de voláteis durante a cura; Podem ser polimerizados de muitas formas de estruturas moleculares e morfológicas; Fornecimento abrangendo largas faixas de propriedades; | Massa Volúmica: 1,1-1,4 g/cm ³ ; Módulo elasticidade em tração: 2,7-5,5 GPa; Resistência à tração: 40-85 MPa; |
| Fenólica | Baixo custo; Baixa viscosidade; Fácil manuseio; Aplicações em médias e altas temperaturas; | Liberação de voláteis durante a cura; Mais frágil que as epoxídicas; Baixa estabilidade no fabrico; | Massa Volúmica: 1,2-1,4 g/cm ³ ; Módulo Elasticidade em tração: 2,7-4,1 GPa; Resistência à tração: 35-60 MPa; |
| Poliéster | Baixo custo; Fácil uso; Mais adequada para aplicações em temperatura ambiente; | Alta contração (7-8%); Larga faixa de propriedades, no entanto, inferiores às epoxídicas; Frágil; Baixa temperatura vítrea; | Massa Volúmica: 1,1 – 1,4 g/cm ³ ; Módulo Elasticidade em tração: 1,3–4,1 GPa; Resistência à tração: 40-85 MPa; |
| Observação: Valores médios encontrados em aplicação da indústria em geral, apenas para referência inicial [Mangalgiri, 1999]. | | | |

Mesmo apresentando vantagens evidentes e desvantagens contornáveis, os desafios da utilização de compósitos em larga escala são muitos.

2.3.1 - Resina epoxídica como matriz

A resina epoxídica é uma resina termo rígida de alto desempenho, que pode ser obtida por diversas formulações químicas diferentes. A solidificação é obtida quando se acrescenta à resina epoxídica um agente catalisador, numa determinada proporção de massas, seguido de aquecimento externo ou provocado por reação química exotérmica.

O primeiro passo no desenvolvimento do processo de preparo da resina através da epícloridrina aconteceu em 1927 nos Estados Unidos. O mérito da primeira síntese de uma resina baseada no bisfenol-a foi compartilhado entre P. Castan, da Suíça e o norte americano S. O. Greenlee em 1936, com o início sua exploração comercial a partir de 1938.

Em geral, uma resina epoxídica, também nomeada poliepóxido, é obtida por uma reação polimérica entre epícloridrina e bisfenol-a. A maior parte das resinas epoxídicas fabricadas contém em sua formulação o Diglicidil Éter de Bisferol A (DGEA), conforme destaca [Moura, *et al.*, 2005].

Esse tipo resina é largamente usada como matéria-prima em vários setores industriais. Seu uso nas indústrias da área electro eletrônica, de embalagem, construção civil e de transporte, vem aumentando a cada ano [Neto e Pardini, 2006] e [Flamínio, *et al.*, 2006].

A tabela 2.2, mostra resultados obtidos com os mais diversos tipos de reforçadores em compósitos com matriz polimérica, tipo resina epoxídica.

Tabela 2.2. Propriedade de Compósitos com matriz polimérica em resina epóxi.

| Material (Resina e Reforçador) | Fração Volúmica da fibra [%] | Densidade [g/cm ³] | Tensão de rutura [MPa] | Módulo de elasticidade [GPa] |
|--|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|------------------------------------|
| Epóxi | --- | 1,20 | 70 | 6 |
| Epóxi / Vidro E | 57,0 | 1,97 | 780 | 22 |
| Epóxi / Aramida | 60,0 | 1,40 | 1350 | 40 |
| Epóxi / Carbono | 58,0 | 1,54 | 1550 | 80 |
| Epóxi / Boro | 60,0 | 2,00 | 1400 | 106 |
| Observação: Valores médios obtidos em processamento simples nas indústrias de médio ou pequeno porte. Valores conforme referência [Leitão, 2007]. | | | | |

Face à baixa contração pós cura entre 2% e 3%, baixa liberação de voláteis durante a cura e a existência de várias formulações que permitem obter largas faixas de propriedades, as resinas epoxídicas vêm sendo usadas intensamente na fabricação de compósitos, com os mais diversos tipos de reforçadores [Leitão, 2007].

2.3.2 - Resina epoxídica e temperatura de transição vítrea

Uma característica importante a ser considerada no estudo ou aplicação de qualquer resina, é o valor da Temperatura de transição vítrea (T_g). Para alguns materiais sólidos orgânicos, inclusive as resinas poliméricas como a resina epoxídica, o fenômeno de transição vítrea marca o fim do estado vítreo [Pires, 2012].

Esta mudança de estado conduz a uma forte redução no valor medido das propriedades mecânicas observadas no estado vítreo. Citação retirada de [Paiva, *et al.*, 2006], página 80, diz, *“Para que o compósito polimérico reparado atenda aos requisitos de serviço exigidos no setor aeronáutico, além das elevadas propriedades mecânicas como tração, compressão, cisalhamento, é importante que seja verificada a sua temperatura máxima de serviço, baseando-se no conhecimento da temperatura de transição vítrea, que pode ser determinada por análise térmica dinâmico-mecânica (DMTA)”*.

A transição vítrea de um sólido para um estado de maior elasticidade, ocorre com o aumento de temperatura e em alguns casos, com a redução da pressão. A consequência desse aumento de temperatura é um material de comportamento ainda vítreo, mas que apresenta propriedades mecânicas de um sólido com característica elástica semelhante à borracha [Dalmolin, 2016].

Esta transição é um fenômeno diferente daquele que ocorre quando do congelamento ou cristalização, classificados como transição de fase de primeira ordem, envolvendo descontinuidades e alteração nas propriedades dinâmicas e termodinâmicas, como volume e energia interna.

A transição vítrea é marcada pela temperatura (T_g), valor este determinado pelo estudo do comportamento da capacidade térmica do material, ao longo da faixa de temperatura em que ocorre a transição.

A Temperatura de transição vítrea (T_g) é o valor próximo da média das temperaturas, calculada entre a temperatura inicial e a temperatura final da faixa onde a mudança de estado ocorre, na chamada transição vítrea. Seu valor exato pode ser calculado determinando o ponto de

cruzamento da linha reta anterior ao início da mudança, com a linha reta posterior a transição, no gráfico de Capacidade térmica, em função da temperatura da resina.

Este novo nível de energia interna da estrutura molecular permite que as cadeias da fase vítrea adquiram pequena mobilidade. A tendência de um material em passar por esta mudança de estado, quando sofre aquecimento, é chamada de capacidade de formação da fase amórfica a partir da fase vítrea.

Essa característica depende da composição do material e está presente entre os polímeros de maneira geral. Desta maneira, as matrizes a base de resina epoxídica precisam ser estudadas sobre este aspecto e comportamento.

Desta forma, nas aplicações práticas onde as propriedades mecânicas são importantes, é necessário evitar que a temperatura do componente adentre à faixa de temperaturas onde a transição vítrea ocorre, pois nesta condição, é esperado uma forte redução nos valores das propriedades mecânicas, em relação às medidas em temperaturas menores. Abaixo da temperatura (T_G), o polímero do componente não tem energia interna suficiente para permitir o deslocamento de uma cadeia de moléculas em relação a outra. O estado vítreo é caracterizado por um material estável, duro, rígido e quebradiço. A figura 2.1, mostra esquematicamente a mudança estrutural que ocorre com a proximidade do Temperatura de transição vítrea (T_G), conforme [Dalmolin, 2016].

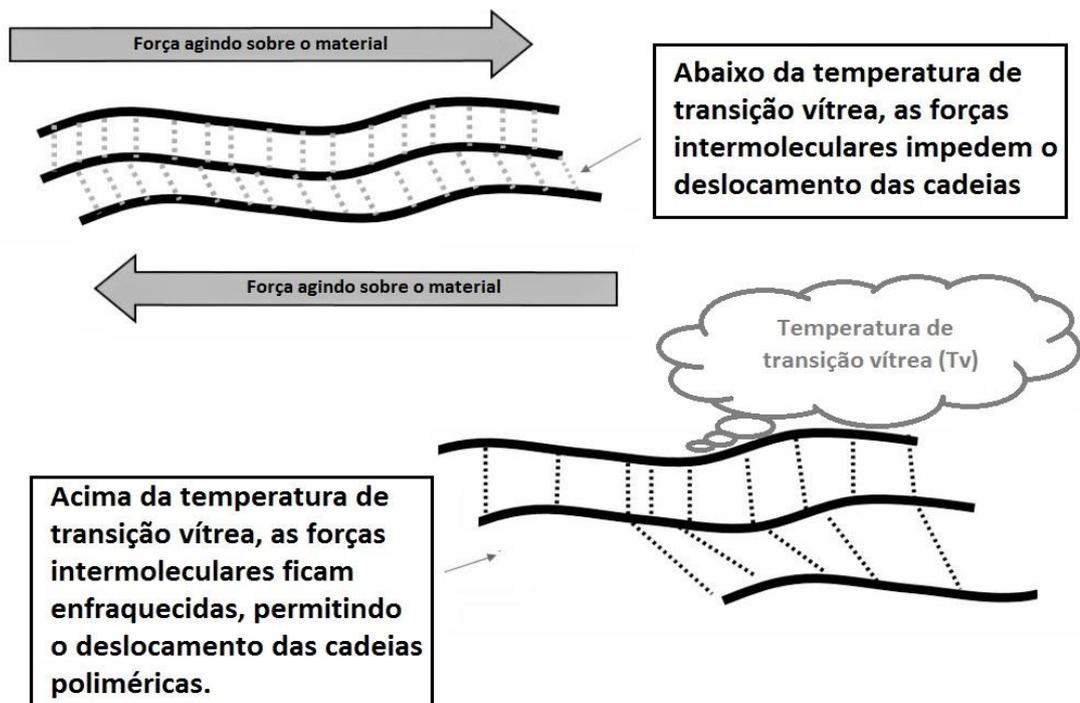


Figura 2.1. Enfraquecimento da estrutura do polímero [Dalmolin, 2016].

Em razão da importância deste parâmetro para o estudo em desenvolvimento, foram realizadas medições de temperatura nas fases do processo, onde houvesse risco de superação da Temperatura de transição vítrea (T_g) da resina utilizada.

Um fator a ser considerado na determinação dos eventuais danos à estrutura molecular da resina, é a baixa condutividade térmica do compósito em geral.

Conforme [Michelle, 1999], a exposição da matriz epoxídica do compósito a uma fonte de calor precisa ser duradoura, caso contrário, os danos serão apenas superficiais, face a alta resistência a condução de calor presente na resina epoxídica. Apenas como exemplo e referência, a condutividade térmica da resina curada epoxídica, à 25°C é em geral menor que 0,3 [W/mK], conforme citação [Chung e Lin, 2016], "*However, epoxy resins have a poor thermal conductivity (0.15-0.25 W/mK)*".

Conforme foi detalhado no Capítulo 5, subitem 5.3, Seleção da resina utilizada, nos provetes com comprimento de fibra 6,0mm e 2mm, a resina utilizada foi a Biresin®CR120, combinada com o endurecedor CH120-3, fornecidos pela Sika [Capela, *et al.*, 2017].

Segundo *Sika Deutschland GmbH, Stuttgarter*, [Wildhagen e Michalek, 2014], a temperatura de transição vítrea (T_g) da resina Biresin®CR120, endurecedor CH120-3, é de 120°C.

Os provetes com comprimento de fibra 0,5mm, a resina Biresin®CR83, combinada com o endurecedor CH83-2, fornecidos pela Sika [Correia, 2017].

Também por *Sika Deutschland GmbH, Stuttgarter*, na referência [Wildhagen e Michalek, 2016], a temperatura de transição vítrea (T_g) da resina Biresin®CR83, endurecedor CH83-2, é de 84°C. A Temperatura de transição vítrea (T_g) da resina é um balizador importante na definição da temperatura máxima de operação do componente fabricado a partir do compósito em estudo, em qualquer aplicação prática deste material compósito [Pires, 2012].

2.4 - Principais tipos de fibra

Os compósitos de matriz polimérica são em geral reforçados com fibras naturais, fibras sintéticas, fios metálicos e outros materiais e formas [Moura, *et al.*, 2005].

A tabela 2.3 mostra características e propriedades de materiais utilizados como reforçadores em matriz polimérica, na indústria náutica, automotiva e aeroespacial [Moura, *et al.*, 2005].

A utilização de fibras mais resistentes como as fibras de carbono e aramida, seguida de uma intensa pesquisa para obtenção de novos polímeros visando o fabrico de matrizes de alto

desempenho, tem permitido atender os desafios inerentes à complexidade de produção de estruturas aeroespaciais [Mangalgi, 1999] e [Romão, 2012].

No setor aeronáutico, os materiais compósitos em uso são baseados em fibras contínuas como reforço, dos tipos mostrados na tabela 2.3 e matrizes poliméricas, como apresentado nas tabelas 2.1 e 2.2, respetivamente.

Tabela 2.3. Características e propriedades gerais de algumas fibras e outros reforçadores.

| Tipo de fibra e Material massivo Áreas de uso mais intenso | Módulo de Elasticidade E [GPa] | Resistência à Tração σ_{rut} [MPa] | Densidade [Kg/dm ³] |
|---|--|---|---|
| Fibra Vidro E - uso geral, naval | 72 | 3500 | 2,54 |
| Fibra Vidro S - uso naval e aeroespacial | 87 | 4300 | 2,49 |
| Fibra Carbono (Pitch CP) – uso geral, aeroespacial | 690 | 2200 | 2,15 |
| Fibra Carbono (PAN C) – uso aeroespacial | 345 | 2300 | 1,85 |
| Fibra sisal – natural [Silva, 2011], uso geral | 16 | 887 | 1,41 |
| Fibra bananeira – natural [Silva, 2011], em ensaio | 32 | 883 | 1,35 |
| Boro – uso aeroespacial | 395 | 3100 | 2,70 |
| Sílica – uso geral e aeroespacial | 72 | 5800 | 2,19 |
| Tungsténio – uso aeroespacial | 414 | 4200 | 19,3 |
| Berílio – uso aeroespacial | 240 | 1300 | 1,83 |
| Fibra Aramídica - Kevlar [®] 49, uso aeroespacial | 131 | 3600 | 1,45 |
| Materiais Convencionais e Massivos | | | |
| Aço | 210 | 340 - 2100 | 7,83 |
| Ligas de Alumínio | 70 | 140 – 620 | 2,70 |
| Observação: Valores médios encontrados em aplicação da indústria em geral, apenas para referência inicial [Moura, <i>et al.</i> , 2005] e [Silva, 2011]. | | | |

Existe ainda uma grande variedade de fibras em fase de estudo ou usadas em aplicações específicas, que visam obter compósitos para condições de uso singulares. Entre as fibras desenvolvidas para aplicações especiais estão as fibras de amianto, poliamidas e poliésteres.

2.4.1 – Formas de fornecimento de fibras e reforçadores

Os fabricantes de fibras e reforçadores disponibilizam estes materiais em diversas formas e quantidades, para facilitar o uso ou a aplicação em processos de fabrico específicos.

As principais formas de fornecimento de fibras e reforçadores são:

- Bobinas helicoidais. Um filamento ou cordão de fibra é enrolado sobre um cilindro de papel e distribuído seguindo uma helicoidal, compondo um carretel (*Roving*). Esta forma de fornecimento permite em etapas seguintes, o corte para uso em compósito de fibra curta ou o entrançamento formando cordas de pequenos diâmetros (0,2mm – 0,8mm). Estas cordas de pequeno diâmetro podem ser utilizadas nos processos de tecelagem formando tecidos diversos.
- Mantas em formatos diversos. O filamento é cortado em pedaços menores, distribuídos aleatoriamente sobre um plano retangular. Em seguida é feita a pulverização de uma substância agregadora em pó ou emulsão líquida. Após cura do agregador aplicado, a referida manta apresenta certa flexibilidade e assim, permite o manuseio para o fabrico de componentes e partes em compósito, pela aplicação da resina matriz (*Chopped Strand Mat*). Existem também mantas onde o filamento sem corte é colocado em direções aleatória e acompanhado o plano. O corte do filamento é executado nas bordas da manta (*Continuous Random Mat*).
- Tecidos simples ou entrelaçados. Utilizando técnicas de tecelagem, os filamentos ou as cordas de filamentos, são trançados formando tecidos que serão utilizados no fabrico de componente de compósitos, com a adição da resina matriz. Para facilitar o manuseio do tecido sem danificar a trama executada no processo de tecelagem, é pulverizado uma fina camada de uma substância agregadora ou resina termo rígida, para permitir uma certa flexibilidade do tecido sem desfazer o trançado original (*Prepreg Mat*).

Existem outras inúmeras maneiras para o fornecimento de reforçadores em fibras e outros materiais. Todas elas foram desenvolvidas para facilitar as operações os processos de fabrico de partes e componentes em compósitos.

2.5 - Principais processos de fabrico

O processo simplificado para fabrico de partes e componentes em compósito proposto neste desenvolvimento é voltado para pequenos lotes de fabricação, para peças com formato geométrico passível de ser obtido por maquinagem e em alguns casos específicos, substituir o processo atual de fabrico, envolvendo operações complexas [De Paiva, 2013].

Assim, um levantamento foi realizado procurando identificar os principais processos de fabrico hoje em uso e suas características fundamentais, visando uma eventual comparação preliminar com o processo proposto.

Ademais, as propriedades finais de um compósito dependem também do modo como os materiais são processados e da maneira como a matriz e o reforçador são manuseados e colocados nos componentes e partes fabricadas.

Existe um grande número de processo de fabrico utilizados pela indústria em geral, alguns destes processos forma desenvolvidos especialmente para fabricação de um determinado tipo de produto.

Os processos de fabricação que de alguma forma tenham alguma relação com a produção de blocos e placas em compósito, proposta neste desenvolvimento, estão apresentados em seguida.

2.5.1 - Fabricação de componentes e partes por processo laminação

A resina previamente misturada ao catalisador é aplicada à uma manta ou tecido de fibras, apoiado em um molde de precisão, num trabalho de laminação feito manualmente, com a ajuda de um rolo ou pincel (*hand lay-up*) [Ashbee, 1993].

Para evitar que o componente ou parte se fixe no perfil do molde, um verniz isolador e uma capa protetora (*gelcoat*) são aplicados antes do início do processo de laminação.

Em sucessivas operações de aplicação, a manta de fibras fica completamente impregnada. O

laminado é deixado a curar nas condições atmosféricas normais.

Este processo exige equipamentos de uso individual para a proteção do operador e não garante uma espessura de material compósito constante no componente fabricado.

A figura 2.2, mostra de maneira esquemática a execução da operação de laminação.

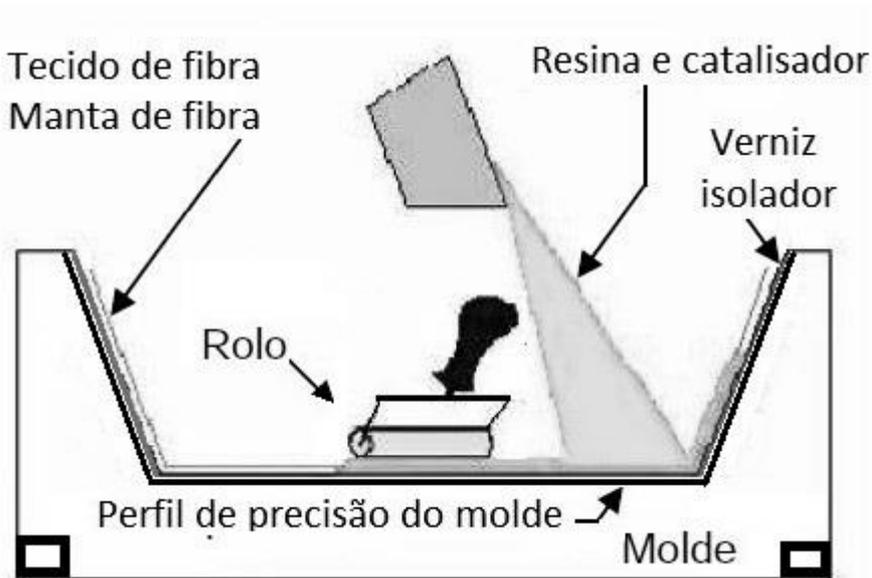


Figura 2.2. Esquema da execução da operação manual de laminação [adaptado Pires, 2012].

Uso mais frequente: Fabricação de componentes e partes da indústria náutica, indústria de reservatórios submetidos à baixa pressão e indústria aeronáutica para aeronaves de pequeno porte, componentes e partes de importância secundária, Classe III, segundo [FAA-Advisory, 1996].

2.5.2 – Fabricação por aplicação resina catalisador com pistola

Numa primeira maneira de trabalho a resina é misturada ao catalisador na saída da pistola de aplicação. A mistura é pulverizada na manta ou tecido de fibras, apoiado em um molde de precisão, num trabalho feito por operador ou mecanismo automatizado (*splay lay-up*). Para evitar que o componente ou parte se fixe no perfil do molde, um verniz isolador e uma capa protetora (*gelcoat*) são aplicados antes do início do processo.

Desta maneira, em sucessivas operações de aplicação a manta ou tecido de fibras fica completamente impregnada. O produto é deixado a curar nas condições atmosféricas normais [Ashbee, 1993].

A figura 2.3, mostra de maneira esquemática a execução da operação com uso de pistola.

Os moldes com formato cilíndrico permitem a fabricação de reservatórios em compósito para armazenamento de líquidos, com elevada resistência a corrosão alcalina.

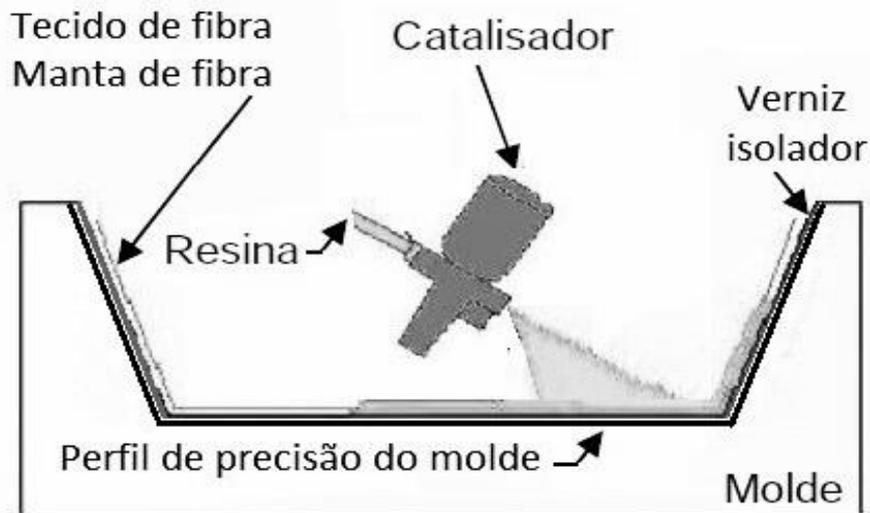


Figura 2.3. Esquema da execução da operação com pistola em laminação [Pires, 2012].

Numa segunda maneira de trabalho, a resina é misturada ao catalisador e também às fibras cortadas ou particulados, na saída da pistola de aplicação. A mistura é pulverizada na superfície de precisão do molde, num trabalho repetitivo feito por operador ou mecanismo automatizado (*splay lay-up*).

O compósito depositado é deixado a curar nas condições atmosféricas normais.

A figura 2.4, mostra de maneira esquemática a execução da operação com uso de com pistola, na fabricação de partes em compósito de fibra cortada ou particulados.

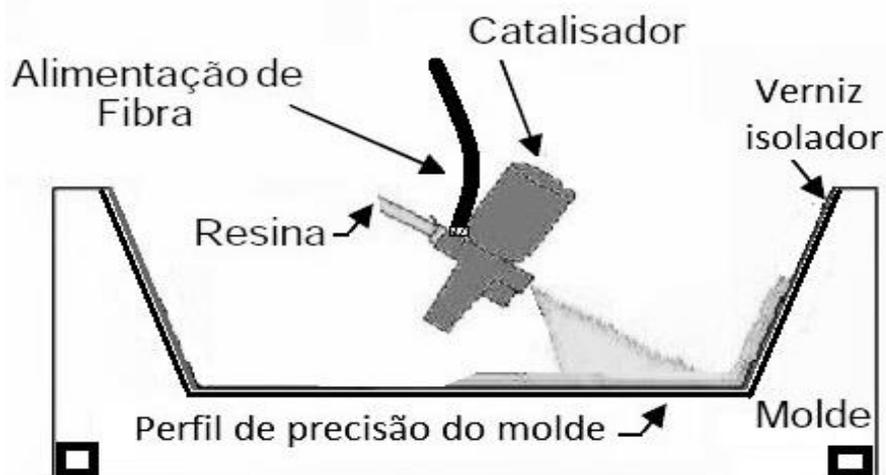


Figura 2.4. Esquema da execução com pistola, compósito de fibra cortada ou particulados.

Para evitar que o componente ou parte se fixe no perfil do molde, um verniz isolador e uma capa protetora (*gelcoat*) são aplicados antes do início do processo de pulverização.

Este processo exige equipamentos de uso individual para a proteção do operador e não garante uma espessura de material compósito constante no componente fabricado.

Os moldes com formato cilíndrico permitem a fabricação de reservatório em compósito, nomeadamente utilizados para armazenamento de líquidos sob baixa pressão. Os compósitos em geral apresentam elevada resistência a corrosão alcalina.

Uso mais frequente: Fabricação de componentes e partes da indústria náutica, indústria de reservatórios submetidos à baixa pressão e indústria aeronáutica para aeronaves de pequeno porte, componentes e partes de importância secundária, Classe III, segundo [FAA-Advisory, 1996].

2.5.3 – Fabricação de componentes e partes por injeção de resina em molde

Numa primeira maneira de trabalho, a resina é misturada ao catalisador na entrada do molde preenchendo o espaço entre o molde e o contramolde, montado e fixado sobre vedações que impedem a fuga ou entrada de outras substâncias. A mistura penetra nos espaços vazios do tecido de fibras previamente colocado, formando a espessura e a forma externa com maior precisão (RTM, *Resin Transfer Moulding*) [Ashbee, 1993].

A figura 2.5, mostra de maneira esquemática a execução do processo envolvendo molde e contramolde.

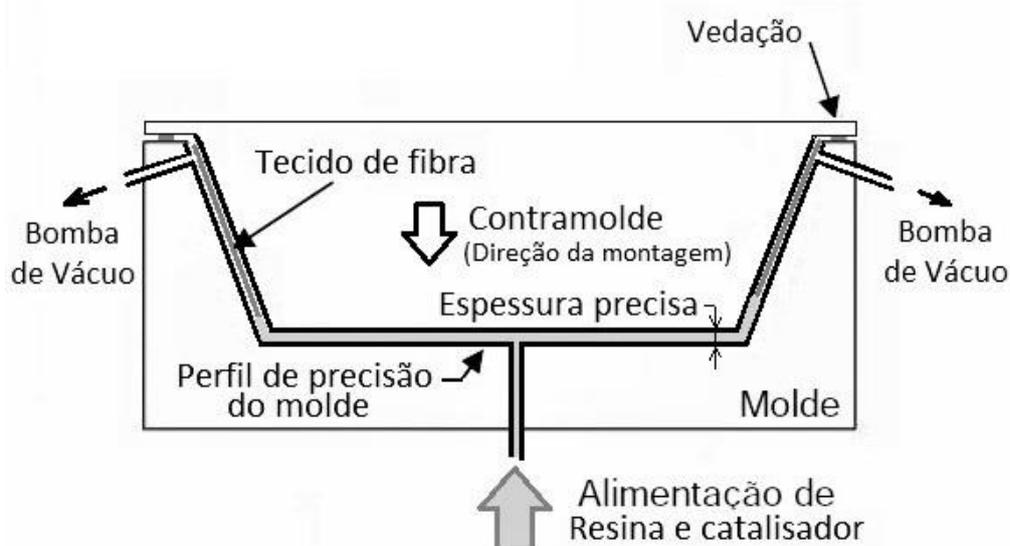


Figura 2.5. Esquema da execução do processo injeção, tecido de fibra, molde e contramolde.

Para peças de grandes dimensões é necessário o uso de bomba de vácuo para facilitar a entrada da resina em todo espaço e evitar o aumento da porosidade no produto final.

Para evitar que o componente ou parte se fixe no perfil do molde, um verniz isolador é aplicado antes do início do processo no molde e no contra molde.

Em alguns casos, o conjunto é deixado a curar nas condições atmosféricas normais. Em lotes de produção de partes e peças mais numerosos, o conjunto é aquecido para acelerar o processo de cura.

Numa segunda maneira de trabalho, a resina é misturada ao catalisador e também às fibras cortadas ou particulados, na entrada da resina e catalisador. A mistura penetra nos espaços formando a espessura e a forma externa com maior precisão. Para evitar que o componente ou parte se fixe no perfil do molde, um verniz isolador é aplicado antes do início do processo, no molde e no contra molde.

Em alguns casos, o conjunto é deixado a curar nas condições atmosféricas normais. Em lotes de produção de partes e peças mais numerosos, o conjunto é aquecido para acelerar o processo de cura.

A figura 2.6, mostra de maneira esquemática a execução do processo envolvendo molde e contramolde. Para peças de grandes dimensões é necessário o uso de bomba de vácuo para facilitar a entrada da resina em todo espaço e evitar o aumento da porosidade no produto final.

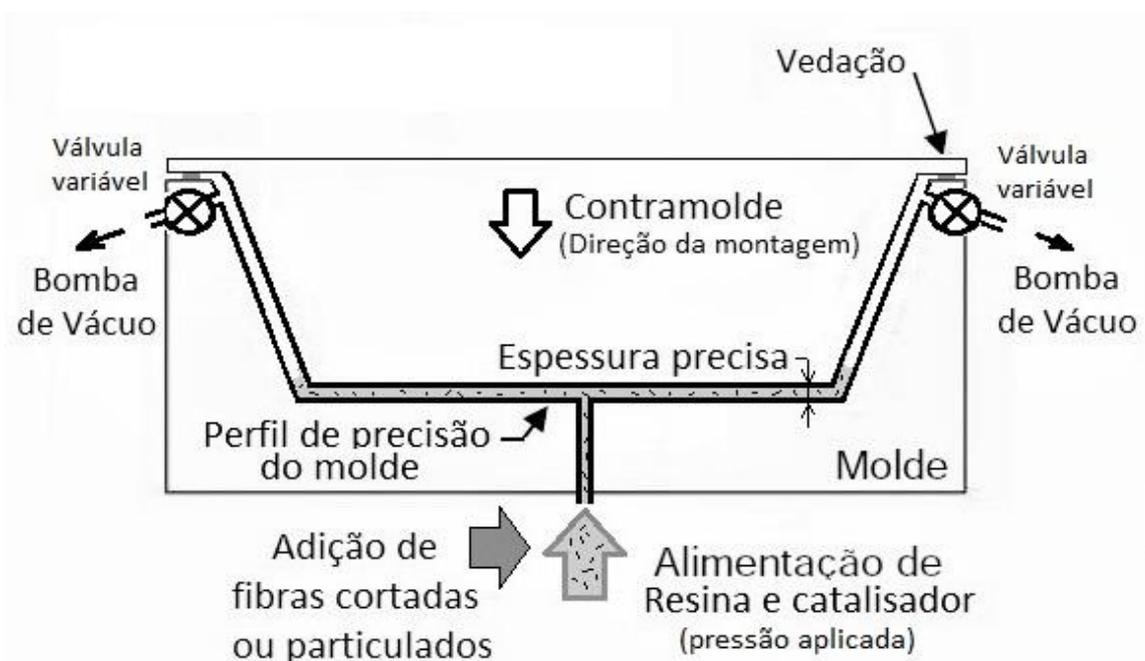


Figura 2.6. Esquema da execução do processo de injeção, fibras curtas ou particulado, molde e contramolde.

Uso mais frequente: Na fabricação de componentes e partes da indústria automobilística e indústria aeronáutica como pequenos suportes internos e tampas, utilizados em grandes quantidades em aeronaves comerciais, Classe III, segundo [FAA-Advisory, 1996].

2.5.4 – Fabricação de componentes em molde por compressão

Sem o contramolde montado no conjunto do dispositivo, a resina é misturada ao catalisador e aplicada por pistola no tecido apoiado no molde. Este processo admite o uso de fibras cortadas ou particulado misturados diretamente ao fluido viscoso formado pela resina e catalisador. A mistura é derramada no molde antes da colocação do contramolde.

Em seguida, o contramolde é pressionado pela força (F), como mostra a figura 2.7 (*Press molding*) [Ashbee, 1993].

Nesta forma de trabalho, a mistura precisa ter um volume maior que o volume do componente ou parte final produzida, para evitar falhas e porosidade elevada. O excesso é extraído pelas válvulas variáveis na parte superior do conjunto montado.

Em razão disto, é recomendado o uso de um medidor de pressão para garantir a leitura deste parâmetro ao longo do procedimento realizado.

A figura 2.7, mostra de maneira esquemática a execução do processo envolvendo compressão, molde e contramolde. O tecido de fibra está apoiado no molde montado e fixado sobre vedações que impedem a fuga ou entrada de outras substâncias.

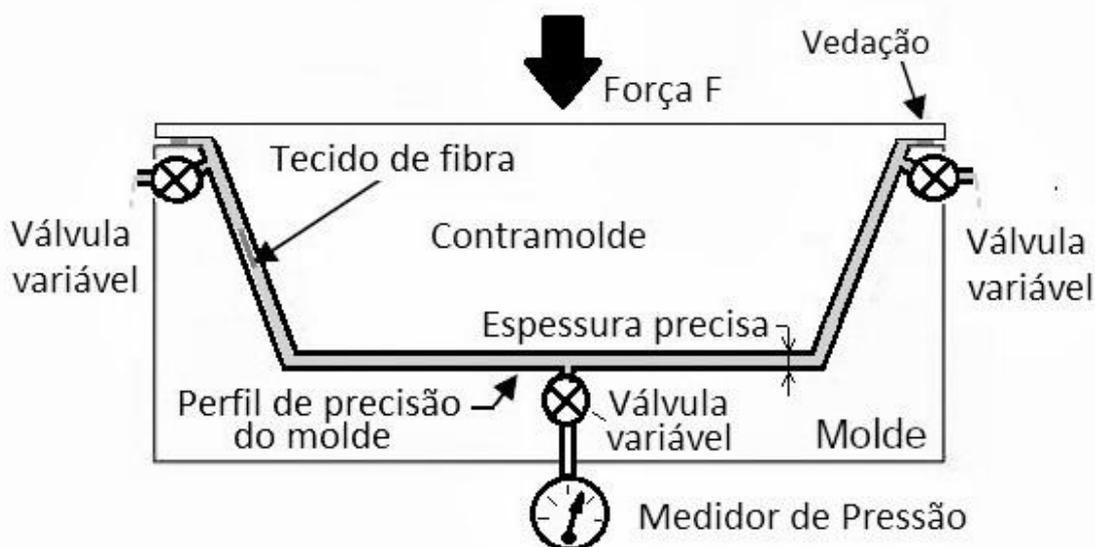


Figura 2.7. Esquema da execução do processo por compressão e tecido em fibra.

Para evitar que o componente ou parte se fixe no perfil do molde, um verniz isolador é aplicado no molde e no contra molde, antes do início do processo.

Em alguns casos, o conjunto é deixado a curar nas condições atmosféricas normais. Em lotes de produção de peças mais numerosos, o conjunto é aquecido para acelerar o processo de cura.

Uso mais frequente: Indústria de pequeno porte na produção de tampas e acessórios para outras máquinas e suporte para fabricação de molde do tipo injeção com termoplástico.

2.5.5 – Fabricação de componentes e partes por aplicação de bolsa de vácuo

Resina é misturada ao catalisador na saída da pistola de aplicação. A mistura é pulverizada no tecido de fibras, apoiado em um molde de precisão, num trabalho feito por operador ou mecanismo automatizado. Várias camadas de tecido são sucessivamente superpostas, sempre seguida de pulverização da mistura de resina e catalisador. Uma fina lâmina de termoplástico é superposta à última camada de tecido impregnada por pulverização.

Em seguida, uma bolsa flexível envolve o conjunto do dispositivo molde e impregnado, conforme mostra figura 2.8, e a bomba de vácuo é acionada, permanecendo em serviço até o final do processo de cura [Ashbee, 1993].

Para evitar que o componente ou parte se fixe no perfil do molde, um verniz isolador e em alguns casos, uma capa protetora (*gelcoat*) são aplicados antes do início do processo.

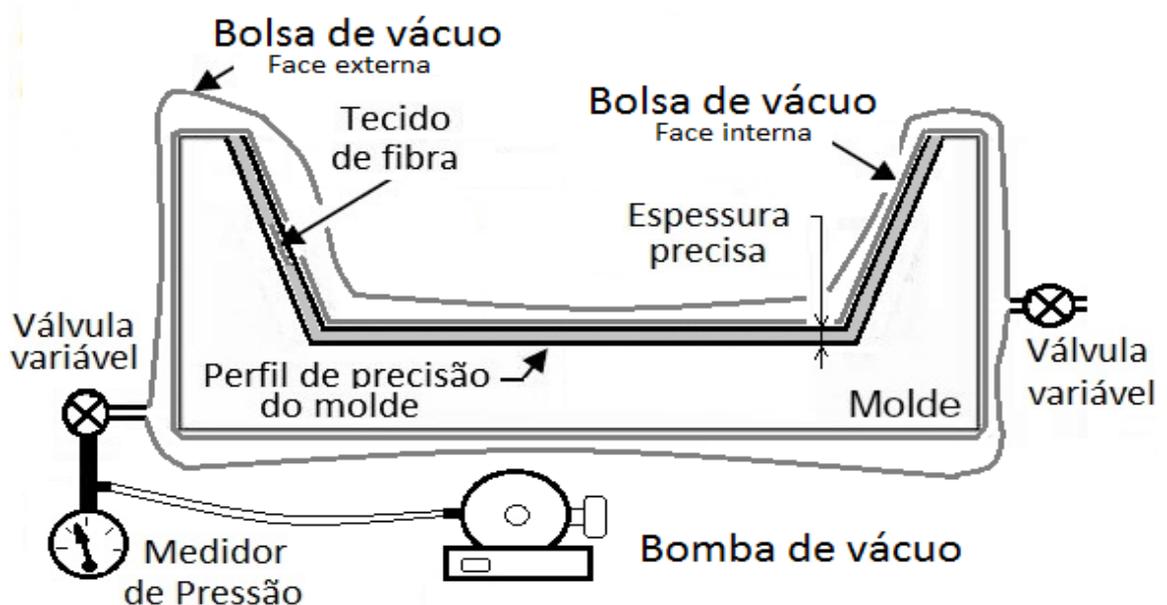


Figura 2.8. Esquema da execução da operação com bolsa de vácuo [Ashbee, 1993].

O produto é deixado a curar nas condições atmosféricas normais, sob pressão atmosférica que comprime o conjunto bolsa e dispositivo. Em alguns casos em que se trabalha com resinas de alta performance, o conjunto molde bolsa de vácuo é colocado em um vaso de pressão com temperatura de cura controlada.

Em alguns casos, este processo possui a vantagem de isolar os voláteis liberados durante a cura, evitando a contaminação do meio ambiente em torno do conjunto molde.

Uso mais frequente: Fabricação de componentes e partes indústria aeronáutica para aeronaves de diversas categorias, componentes e partes de importância secundária, Classe III, segundo [FAA-Advisory, 1996]. Na indústria espacial, é muito usado na fabricação de componentes e partes de míssil de aplicação militar e outros materiais bélicos.

2.5.6 – Fabricação de componentes e partes em autoclave

A autoclave utilizada na produção de componentes e partes para a indústria aeroespacial é um vaso de pressão equipado com um sistema de aquecimento controlado por malha fechada, dispositivo informático de leitura e correção de parâmetros do processo [Pardini e Gonçalves, 2009].

Este tipo de equipamento foi especialmente desenvolvido para fabrico de partes e componentes em compósito com resina de alta performance, muitas delas restritas à indústria bélica ou aeronaves militares.

O conjunto de sensores, válvulas, resistências elétricas, moto compressores, termopares e ventiladores, dão à autoclave características de equipamento mecatrónico que permite cura da resina com vários patamares de temperaturas em função do tempo de processamento.

Nas resinas de alta performance é possível programar o sistema para permanecer horas em temperaturas superiores a 200°C e reduzir de forma rápida para temperatura ambiente, voltando novamente a temperaturas elevadas em minutos.

Antes do molde ser colocado dentro da autoclave, a resina é misturada ao catalisador na saída da pistola de aplicação. A mistura é pulverizada no tecido de fibras, apoiado em um molde de precisão, num trabalho feito por operador ou mecanismo automatizado. Várias camadas de tecido são sucessivamente superpostas, sempre seguida de pulverização da mistura de resina e catalisador. Uma fina lâmina de termoplástico é superposta à última camada de tecido impregnada por pulverização.

Em seguida, uma membrana de material impermeável e muito flexível de silicone, borracha

ou outro material similar, envolve o molde e impregnado, conforme mostra figura 2.9, e todo o conjunto é inserido dentro da autoclave.

Após o trancamento da autoclave contendo em seu interior diversas peças moldadas, o sistema automático é acionado, seguindo um programa informático característico da cura desejada para a resina em uso.

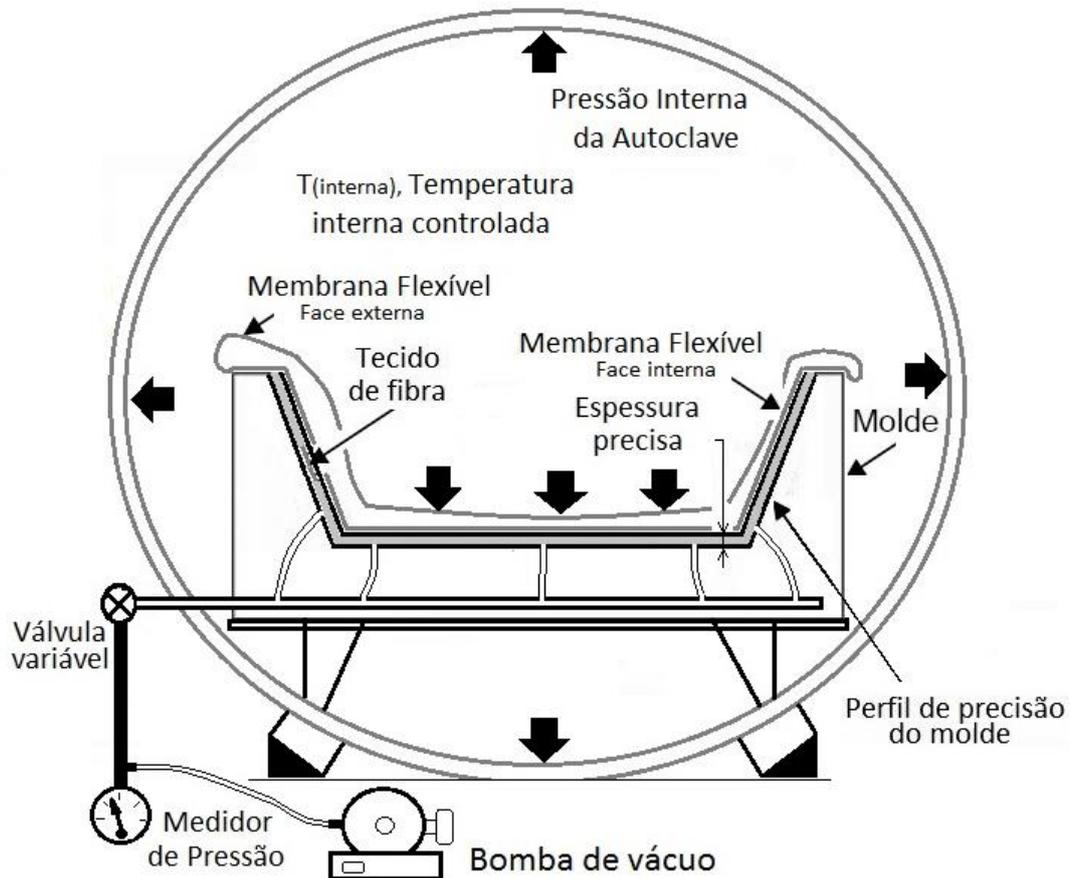


Figura 2.9. Esquema da execução da operação em autoclave [Pardini e Gonçalves, 2009].

O primeiro comando liga a bomba de vácuo, em seguida a pressurização do vaso é acionada. Por meio de pequenos condutos, o ar entre a membrana e o perfil preciso do molde é sugado em direção a bomba de vácuo, como mostra a figura 2.9.

O sistema de controlo deteta a pressão adequada e dá início a ciclos de aquecimento e resfriamento conforme padrão definido pelo fornecedor da resina, permanecendo em serviço até o final do processo de cura [Ashbee, 1993] e [Pardini e Gonçalves, 2009].

Para evitar que o componente ou parte se fixe no perfil do molde, um verniz isolador e em alguns casos, uma capa protetora (*gelcoat*) são aplicados antes do início do processo.

Este equipamento possui a vantagem de isolar os voláteis liberados durante a cura, evitando a contaminação do meio ambiente em torno da autoclave.

Uso mais frequente: Fabricação de componentes e partes da indústria aeronáutica para aeronaves de diversas categorias, componentes e partes estruturais, Classe II, segundo [FAA-Advisory, 1996]. Na indústria espacial, é muito usado na fabricação de componentes e partes estruturais de veículos lançadores e satélites e outros usos em equipamentos bélicos [Pardini e Gonçalves, 2009].

2.5.7 – Fabricação por enrolamento filamental polar e helicoidal

A indústria espacial desenvolveu um tipo de vaso de alta pressão em compósito, visando reduzir o peso do reservatório metálico utilizado no transporte de oxigénio líquido nas grandes viagens espaciais.

O processo se inicia com um recipiente de paredes muito finas construído com aço inoxidável ou plástico termo regido. O formato corresponde ao formato interno do reservatório final em compósito.

Usando duas máquinas fiadeiras conforme mostra a figura 2.10, a operação de enrolamento filamental helicoidal (*lathe type*) e enrolamento filamental polar cruzado (*whirling arm*), aplicando a fibra impregnada de resina e catalisador, sobre o recipiente de parede fina, em operações alternadas, trocando de máquina a cada avanço na espessura considerado significativo [Ashbee, 1993].

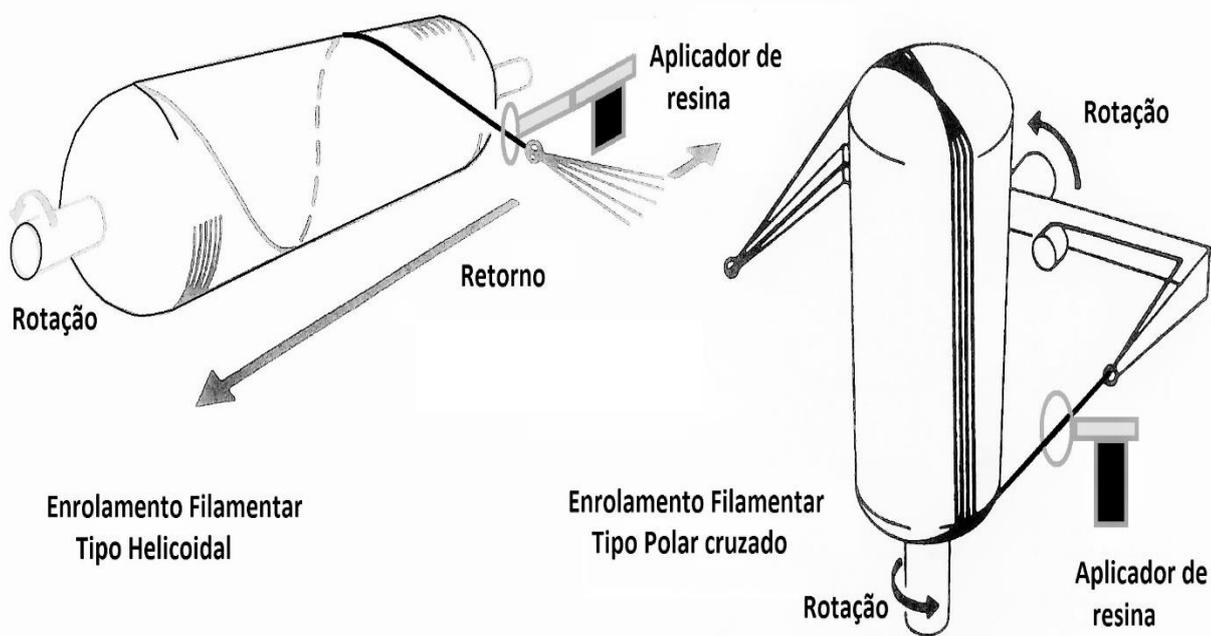


Figura 2.10. Esquema da execução da operação de enrolamento filamental polar e helicoidal.

Encerrada a operação de aplicação da fibra e resina nas máquinas fiadeiras, o conjunto recipiente, fibra e resina é colocado num molde, para em seguida ser fechado com o contramolde. Uma elevada pressão interna ao vaso em fabrico é aplicada e todo o conjunto é aquecido em condições de temperatura controlada ao logo do tempo de cura.

Para evitar que o componente ou parte se fixe no perfil do molde, um verniz isolador e em alguns casos, uma capa protetora (*gelcoat*) são aplicados antes do início do processo na superfície do molde e do contra molde.

Uso mais frequente: Fabricação de reservatórios de alta pressão, tubos e partes estruturais na indústria aeronáutica para aeronaves diversas, Classe II, segundo [FAA-Advisory, 1996]. Na indústria espacial é muito usado na fabricação de reservatórios de alta pressão, tubos e partes estruturais de veículos lançadores e satélites e outros usos em equipamentos bélicos.

2.6 - Compósito de fibra curta

Num levantamento realizado em catálogos de fabricantes, foi possível identificar três formas disponíveis de reforçadores, para obtenção de uma estrutura formada por fibras de carbono descontínuas, cortadas em um determinado comprimento fixo:

- Fibra Moída (*Milled Carbon Fiber*): A fibra de carbono é primeiramente produzida em diâmetro de $5\mu\text{m}$ a $10\mu\text{m}$ e cortada em processo mecânico de moagem, sendo obtida uma quantidade de fibras pronta para uso com comprimentos variando de $27\mu\text{m}$ a $800\mu\text{m}$. Ver figura 2.11, Fibras Picadas (*Milled Carbon Fiber*) diâmetro da fibra $7,2\mu\text{m}$ e comprimento médio $300\mu\text{m}$.



Figura 2.11. Fibras Picadas "*Milled Carbon Fiber*" (F. Autor: Fonte, Arquivo pessoal do autor).

- Fibra Cortada (*Chopped Carbon Fiber*): A fibra de carbono é primeiramente produzida em diâmetro de $5\mu\text{m}$ a $10\mu\text{m}$ e pronta para uso, com comprimentos variando de 0,4mm a 25mm. Ver figura 2.12, Fibras Cortadas (*Chopped Carbon Fiber*) ou Fibra curta de carbono (*short carbon fiber*), diâmetro da fibra $7\mu\text{m}$ e comprimento médio 25mm.



Figura 2.12. Fibra curta de carbono “*short carbon fiber*” [Apply, Procotex, 2015] .

- Corda em Fibra de Carbono (*Carbon Fiber Yarn*): A fibra de carbono é primeiramente produzida em diâmetro de $5\mu\text{m}$, a $10\mu\text{m}$ e trançada em processos de tecelagem, formando cordas de vários diâmetros (0,2mm – 1,0mm). O diâmetro é determinado pela quantidade de fibras trançadas. Esta corda pode ser cortada por processo mecânico, sendo obtida uma quantidade de reforçadores para uso com comprimentos livremente definidos no corte. Ver figura 2.13, cordas em Fibra de Carbono (*Carbon Fiber Yarn*), com diâmetro de 0,87 mm, antes do corte.

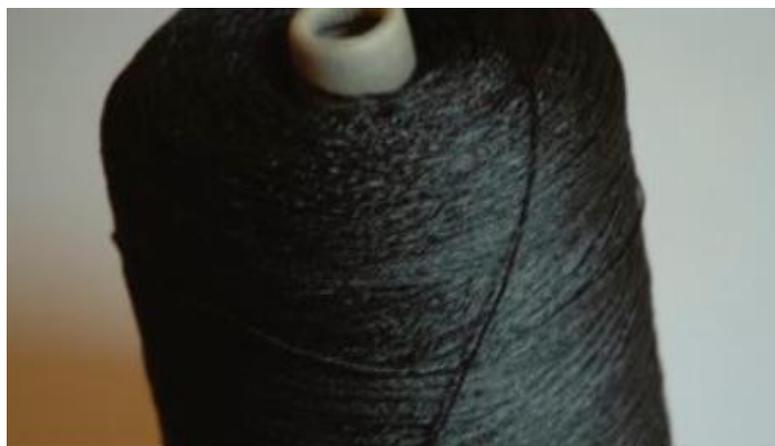


Figura 2.13. Corda em Fibra de Carbono “*Carbon Fiber Yarn*” (F. Autor).

A corda em fibra de carbono apresenta boas características de aderência com a resina epoxídica, em razão das entrâncias e saliências presentes na superfície, que aumentam a adesividade com a matriz. No entanto, para obtenção de fibra curta se torna necessário o desenvolvimento de um complexo processo de corte da corda, em um determinado comprimento fixo.

As fibras curtas de carbono são pouco usadas na indústria em geral. Esta realidade está mudando com o surgimento de empresas especializadas no corte e comercialização deste tipo de material, apresentado em diversos comprimentos padronizados de fibra.

LIGAS DE ALUMÍNIO E SUAS APLICAÇÕES

3.1 – Introdução

Este desenvolvimento investiga a viabilidade e as limitações de uso do processo de fabrico de partes ou componentes por maquinagem em bloco ou placa de compósito com fibra de carbono cortada e matriz epoxídica. Visando este objetivo específico, uma comparação do processo proposto com o similar realizado em blocos de ligas de alumínio, foi adotada neste desenvolvimento como a principal referência de avaliação.

Para melhor entender o processo de maquinagem em ligas de alumínio e suas aplicações na área aeroespacial visando a comparação mencionada, torna se importante o conhecimento teórico e tecnológico relacionado a estas ligas metálicas.

O uso do alumínio e suas ligas é uma tarefa complexa que tem início em tempos remotos.

Estudos arqueológicos mostram que ceramistas da Pérsia e do Egito produziam seus vasos com um tipo de argila que continha óxido de alumínio em artefactos feitos a mais de sete milênios passados. O oxido de alumínio é um elemento abundante do planeta, no entanto a forma metálica do alumínio mesmo em baixos teores de pureza, não é encontrado na natureza.

Somente em 1809 ocorreu a primeira obtenção do que até então, mais se aproximava do metal alumínio. Foi através da fusão de ferro na presença de alumina feito por Humphrey Davy.

Em 1821 o francês Berthier descobre um minério avermelhado, que contém 52% de oxido de alumínio, perto da aldeia de Lês Baux, no sul da França. O nome do local logo foi associado ao minério descoberto e tal material avermelhado passou a ser conhecido como Bauxita.

Em 1827 Friederich Wöhler desenvolveu na Alemanha, um processo para produzir o alumínio em pó, primeiro passo para aproveitamento e uso do alumínio [ABAL, 2018].

A partir desta experiência, vários investigadores em diversos países diferentes, aperfeiçoaram e desenvolveram novos processo de fabricação, transformando o alumínio de um material mais caro do que o ouro no século IXX, no segundo metal mais usado pela indústria do século XXI.

Apesar disto, raramente o alumínio é utilizado em altos graus de pureza.

Em geral, o alumínio é combinado com um ou mais elementos, formando ligas metálicas desenvolvidas para aplicações práticas diferentes, como maior resistência mecânica, ou maior resistência à corrosão ambiental, ou menor fluência às altas temperaturas, ou maior resistência ao fenômeno de fadiga mecânica ou ainda, maior maquinabilidade [Dwivedi, 2014].

Para este desenvolvimento aqui apresentado, é importante mencionar que tais características são em geral de caráter excludente.

O significado disto é que numa aplicação real onde é importante selecionar uma liga de alta resistência mecânica, dificilmente a liga selecionada atenderá com eficiência elevada, outras características como resistência a corrosão ambiental ou fácil maquinagem [Dwivedi, 2014].

A metalurgia do alumínio apresenta duas fases distintas e complementares:

- Obtenção da alumina a partir do minério da bauxita;
- Eletrólise da alumina;

Inicialmente a bauxita é submetida a uma purificação para eliminar, principalmente, os óxidos de ferro, titânio e silício que a acompanham. Em seguida é aquecida para eliminação da água. Após esse tratamento inicial é preciso um banho de soda cáustica no qual se obtém uma solução de aluminato de sódio.

Essa solução, diluída em recipientes apropriados é transformada em hidróxido de alumínio. Quando aquecimento em fornos especiais, a 1200°C, ocorre a transformação em alumina.

No passo seguinte nomeado eletrólise é feita em células eletrolíticas, onde se coloca a alumina juntamente com criolita e outros fundentes, mantendo-se a temperatura entre 850 e 900°C.

O alumínio metálico, mais denso que o banho, vai ao fundo da célula por deposição. Finalmente, o material no fundo do tanque é escoado para as fôrmas e por resfriamento natural, o alumínio é moldado em lingotes solidificados [Godoy, 2011].

3.2 – Definição de ligas, classificação e características

Uma liga metálica consiste em criar combinações com outros elementos a partir de um material base, através da adição de determinadas quantidades de cada elemento, de modo a que sejam obtidas melhorias de algumas propriedades do material base.

O alumínio é um metal caracterizado por uma alta capacidade de se ligar a outros tipos de metais, formando diversas ligas de uso específico.

Os elementos químicos das ligas e tratamentos térmicos foram inicialmente registados em especificações e normas por diversos países produtores. No entanto, as normas e padrões definidos primeiramente pela Aluminum Association, sediada nos Estados Unidos da América e num segundo momento, desenvolvidas e mantidas por agências Federais, Organismos Militares e pela ASTM, entre outras instituições, formam a base da padronização atual relativas as ligas de alumínio comercializadas no mundo.

A figura 3.1, Normas e codificação das ligas de alumínio segundo [ASM, 2009], mostra de maneira simplificada a forma em que as ligas estão identificadas segundo a AMERICAN SOCIETY FOR METALS, USA.

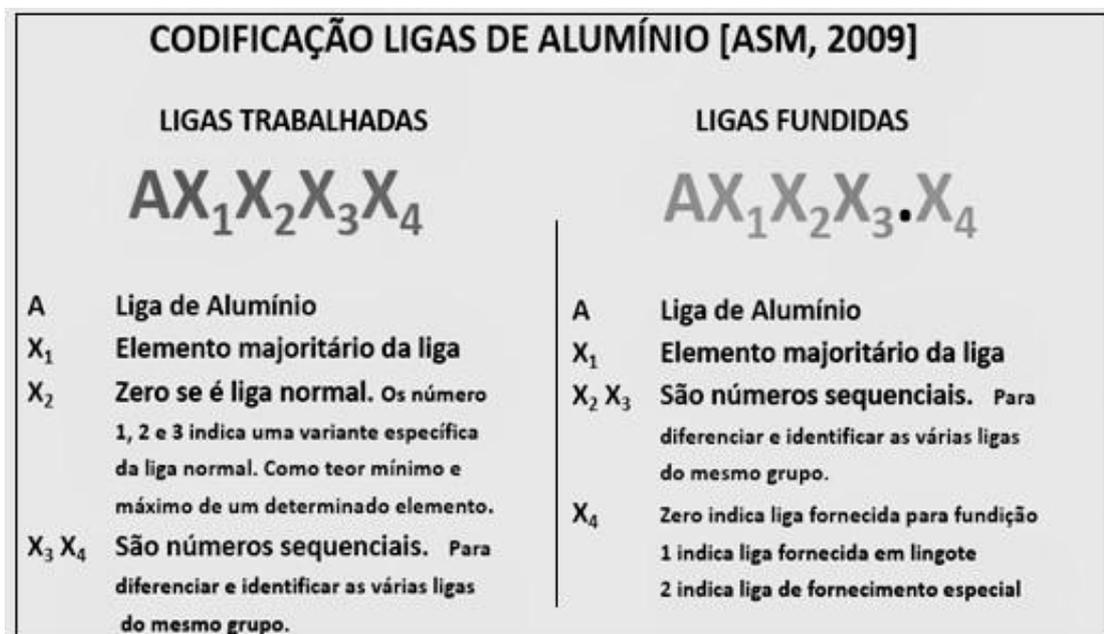


Figura 3.1. Codificação das ligas de alumínio segundo a AMERICAN SOCIETY FOR METALS.

Os métodos e normas são frequentemente sujeitos à profunda revisão envolvendo inspeção do processo de fabrico, determinação de propriedades química, mecânica e física das ligas padronizadas. Os padrões são tão rigorosos e o número de provetes testados é tão grande, que os valores publicados por estas normas internacionais, são adotados pela comunidade científica, académica e industrial, como referência em estudos realizados.

Por estas normas o metal base presente na liga é o alumínio com alto grau de pureza, identificado pela letra “A” no início do código, figura 3.1.

As especificações para os elementos de liga em alumínio são definidas como segue [Oliveira, 2011]:

- Elementos de liga principais: Definem a série de elementos que controlam a fusibilidade e suas propriedades desenvolvidas.
- Elementos de liga secundários: Controlam o comportamento na solidificação, modificam a estrutura eutética, promove o refinamento das fases primárias, o controle do tamanho e forma do grão, promovem ou limitam a formação de fases e reduzem a oxidação.
- Impurezas: Influenciam na fusibilidade, limites de propriedades e na forma do diagrama das fases eutéticas e fases interdendríticas frágeis do material [Nascimento, 2007].
- insolúveis, que podem limitar ou ainda, podem promover propriedades desejadas [ASM, 2009].

A designação de uma liga no sistema de nomenclatura para ligas em alumínio não está internacionalmente padronizada. Muitos países têm desenvolvido e publicado seus próprios padrões. De maneira geral, as diversas normas existentes apresentam variações de código seguindo a forma originalmente desenvolvida pela Aluminum Association, Ohio, USA [Davis, 2001], onde a classificação por grupo é assim apresentada:

- Grupo 1XXX: Alumínio com grau de pureza igual a 99,00% ou superior. Aplicação nomeadamente na área elétrica e química. Este grupo é caracterizado por possuir excelente resistência à corrosão, alta condutividade térmica e elétrica, baixa resistência mecânica e excelente trabalhabilidade. Os elementos ferro e silício são as principais impurezas [Godoy, 2011].
- Grupo 2XXX: Este grupo possui metal cobre como principal elemento de liga. Estas ligas apresentam melhores propriedades mecânicas, quando submetidas a tratamento térmico adequado. Não possui boa resistência à corrosão, como outras ligas de alumínio e, sob certas condições podem apresentar corrosão intergranular. Este tipo de liga é intensamente usado na área aeroespacial onde, a boa resistência mecânica e a moderada trabalhabilidade justificam o uso [Godoy, 2011]. Em áreas sujeitas a corrosão, o componente é revestido com uma fina camada protetiva em liga de alumínio do grupo 1XXX, processo conhecido como “*cladding*”. A aplicação desta película resulta numa redução dos valores originais das propriedades mecânicas da liga suporte [ASM, 1990] e [Rambabu, *et al.*, 2017].

- Grupo 3XXX: Neste grupo o manganês é principal elemento de liga. Não é uma liga tratável termicamente em razão dos níveis de manganês e outros elementos de liga. Uma das mais conhecidas ligas do grupo 3XXX é a liga 3003, designada a vários fins, onde se requer moderada resistência mecânica, boa resistência à corrosão e boa trabalhabilidade, como no caso de utensílios domésticos em geral [Godoy, 2011].
- Grupo 4XXX: Neste grupo o principal elemento de liga é o silício. Quando acrescentado em quantidade suficiente causa substancial redução do ponto de fusão, sem produzir fragilidade nas ligas. Ligas deste grupo são usadas para fabricação de arames de solda e para processo de solda por brasagem. [Godoy, 2011].
- Grupo 5XXX: O magnésio é o elemento de liga mais presente. Quando usado como principal elemento de liga, ou juntamente com o manganês, confere à liga de moderada à alta resistência mecânica. As principais características deste grupo é boa resistência à corrosão em atmosfera marinha e boa soldabilidade. Sua maior aplicação está em equipamentos navais, equipamentos de transporte, componentes aeroespaciais submetidos a nevoa salina e indústria automobilista [Godoy, 2011].
- Grupo 6XXX: As ligas deste grupo contêm silício e magnésio em proporções aproximadamente iguais para formar silicato de magnésio, tornando a liga tratável termicamente. Embora seja uma liga menos resistente que outras ligas, apresentam boas características de conformabilidade e resistência à corrosão. Face a média resistência mecânica e a boa resistência a corrosão é utilizada na indústria alimentícia. Face ao ponto de fusão mais baixo, as ligas deste grupo são muito usadas em produtos extrudidos aplicados na construção civil [Godoy, 2011].
- Grupo 7XXX: Este grupo apresenta o zinco como principal elemento de liga. Quando contém pequenas quantidades de magnésio, é passível de tratamento térmico resultando em alta resistência mecânica. Normalmente, outros elementos como o cobre e o cromo são também acrescentados em pequenas quantidades [Godoy, 2011]. É usado na área aeroespacial onde a elevada resistência mecânica e a moderada trabalhabilidade justifica este uso. Em áreas sujeitas a corrosão, o componente é revestido com uma fina camada protetiva em liga de alumínio do grupo 1XXX, processo conhecido como “*cladding*”. A aplicação desta película resulta numa redução dos valores das propriedades mecânicas presentes na liga suporte [ASM, 1990] e [Rambabu, *et al.*, 2017].

- 8XXX - Ligas que incluem algumas composições com estanho e lítio, caracterizando composições diversas das anteriores. Neste grupo de ligas estão aquelas composições preparadas para atender a uma determinada aplicação, com características bem definidas na tarefa de projeto. Desta forma, é neste grupo que encontramos ligas compostas para obtenção de elevadas propriedades mecânicas, em detrimento de outras propriedades com menor importância na aplicação destinada. Seu uso é maior na indústria aeroespacial onde são encontradas ligas com alta resistência mecânica e por outro lado, outras ligas com baixa resistência mecânica, mas com elevada resistência a corrosão. As primeiras citadas são aplicadas a componentes estruturais submetidos a elevados carregamentos mecânicos, enquanto as do segundo tipo de composição, caracterizadas por elevada resistência a corrosão, são aplicadas em estruturas secundárias, submetidas a ambiente agressivo como componentes de ar condicionado, sistemas de combustível, sistema de resfriamento e outros [Davis, 2001] e [Rambabu, *et al.*, 2017].
- 9XXX: Este grupo está em fase de implantação e de identificação de resultados relativos a novas ligas. Reservado para uso quando do desenvolvimento de ligas com diferente elemento, não presente nos grupos hoje existentes e listados entre 1XXX e 8XXX.

O fornecimento das ligas de alumínio é dividido em duas categorias, identificadas pela forma de sua utilização e entrega, na indústria de manufatura de bens em geral.

A primeira categoria se refere as composições de ligas para uso em processo de fundição, extrusão, forjamento e outros trabalhos a quente.

A segunda, são ligas trabalháveis a frio como as partes e peças transformadas por laminação, estampagem e outras.

O processo de maquinagem se aplica às duas categorias, em razão do uso deste processo de fabrico tanto em ligas laminadas, como também em partes fundidas ou forjadas.

As ligas das duas categorias também podem sofrer tratamentos térmicos ou mecânicos, objetivado melhorar propriedades mecânicas em geral.

3.3 - Aplicação e uso na indústria em geral

As aplicações das diversas ligas estão diretamente associadas às propriedades do material no final do processo de fabricação de partes e componentes em ligas de alumínio.

O entendimento do mecanismo de formação da estrutura cristalina e a forma como o tratamento térmico pode alterar propriedades deste material é importante para a correta escolha da liga para uma aplicação real.

O alumínio na condição fundido dissolve outros metais e substâncias metaloides, nomeados como materiais solubilizados. Quando o alumínio se resfria e se solidifica, alguns dos constituintes da liga podem ser retidos em solução sólida, permanecendo presos na estrutura cristalina do material base da liga [Zolotarevsky, *et al.*,2007].

Os átomos são arranjados em uma rede cristalina regular formando moléculas de tamanhos diferentes, dependendo da forma e do tamanho do elemento de liga e do material base.

O metal quente pode manter mais elementos de liga em solução sólida do que quando frio, e conseqüentemente, quando resfriado, ele tende a precipitar o excesso dos elementos de liga da solução para fora do sólido em formação. Desta forma, o controle do tempo de resfriamento pode permitir maior retenção dos elementos de liga na solução em processamento. Este procedimento baseado em solubilidade de fases deu origem aos tratamentos térmicos identificados como solubilização, resfriamento rápido ou têmpera e precipitação, também nomeado de envelhecimento [Braga, 2011].

Este precipitado retido pode ser na forma de partículas duras, contendo ou sendo formado por compostos intermetálicos. Estes agregados de átomos endurecem a liga, melhorando sua resistência mecânica.

Isto também ocorre no tratamento aplicado em ligas que contém magnésio e silício. Esta descoberta conduziu ao desenvolvimento das principais ligas estruturais utilizadas hoje na engenharia aeroespacial [ABAL, 2018].

As principais condições e tratamentos térmicos aplicados em ligas de alumínio são:

- F: Como fabricado: Na condição de entrega pelo fabricante da liga de alumínio. Os mais comuns são os fundidos, laminados, extrudidos e forjados.
- O: Recozido: Produtos são recozidos pelo fabricante de ligas de alumínio. O recozimento é um tratamento térmico para obter a resistência mecânica mais baixa, aliviando tensões internas da estrutura cristalina e assim, facilitar trabalhos de conformação futura.
- W: Solubilizado: Também nomeado de tratamento de têmpera instável é aplicável somente às ligas que envelhecem espontaneamente na temperatura ambiente.
- T: Termicamente tratado para produzir têmperas estáveis. A letra T é sempre seguida por um ou mais dígitos que identificam a forma em que a tempera foi aplicada.

Os casos mais comuns utilizados no tratamento de ligas de alumínio são [ABAL, 2018]:

- T3: Solubilizado, trabalhado a frio e envelhecido naturalmente.
- T4: Solubilizado e envelhecido naturalmente.
- T5: Conformado em alta temperatura e envelhecido artificialmente.
- T6: Solubilizado e envelhecido artificialmente.
- T7: Solubilizado e estabilizado.
- T8: Solubilizado, deformado a frio e envelhecido artificialmente.
- T9: Solubilizado, envelhecido artificialmente e trabalhado a frio.
- T10: Conformado em alta temperatura, resfriado, trabalhado a frio e envelhecido artificialmente

3.3.1 - Ligas de Alumínio de uso aeroespacial

Uma parte significativa das estruturas produzidas pela indústria aeroespacial são construídas por metais como titânio, aço e alumínio. Existe uma tendência mundial de substituir uma parte destes metais por materiais compostos, ainda mais leves do que as tradicionais ligas metálicas, para as mesmas condições de trabalho.

Desde o final da década de 1920, quando o primeiro avião comercial entrou em operação, iniciando o serviço regular de transporte de passageiros, o alumínio já estava compondo a estrutura do aparelho, revestindo o habitáculo, a fuselagem e as asas [Rambabu, *et al.*, 2017]. Ao combinar certas propriedades como resistência mecânica e leveza, as ligas de alumínio foram desde o início do século XX, um dos principais materiais utilizados na indústria aeronáutica, permitindo aos engenheiros e projetista, a concepção de estruturas mais leves e confiáveis, essenciais ao setor aeroespacial.

O quadro mostrado na tabela 3.1, apresenta o uso industrial das principais ligas de alumínio, onde se vê o campo de aplicação destes materiais na Indústria aeroespacial desde seu início, até aos dias presentes [Dwivedi, *et al.*, 2014].

Um resumo da evolução da resistência mecânica desta liga é apresentado na figura 3.2 que a primeira liga utilizada na indústria aeroespacial foi a A2017, Tratamento T4, com 260 MPa de Tensão de Rutura à Tração. Historicamente foi a aeronave alemã Junkers F-13, a primeira a utilizar o inovador material alumínio

Tabela 3.1. Uso industrial das principais ligas de alumínio.

| Prefixo AA | Norma UNS | Composição [%] | Condição na entrega | Rot [MPa] | Ced. [Mpa] | Aplicações/Características |
|---|--------------|---|------------------------------------|--------------|---------------|---|
| LIGAS DE TRABALHO MECÂNICO - NÃO TRATÁVEIS | | | | | | |
| 1100 | A91100 | 0,12 Cu; | Recozido (O) | 90 | 35 | Alimentos, produtos químicos, permutadores de calor, refletores de luz |
| 3003 | A93003 | 0,12 Cu; 1,2 Mn; 0,1 Zn; | Recozido (O) | 110 | 40 | Utensílios culinários, reservatórios de pressão e tubagens, latas de bebidas |
| 5052 | A95052 | 2,5 Mg; 0,25 Cr; | Def. Frio (H32) | 230 | 195 | Tubagens de óleo e combustível em aeronaves, tanques de combustível, rebites, arame |
| LIGAS DE TRABALHO MECÂNICO - TRATÁVEIS TERMICAMENTE | | | | | | |
| 2024 | A92024 | 4,4 Cu; 1,5 Mg; 0,6 Mn; | Tratado termic. (T4) | 470 | 325 | Estruturas aeronáuticas, rebites, jantes de caminhão, parafusos |
| 6061 | A96061 | 1,0 Mg; 0,6 Si; 0,3 Cu; | Tratado termic. (T4) | 240 | 145 | Camiões, canoas, automóveis, mobiliário, tubagens |
| 7075 | A97075 | 5,6 Zn; 2,5Mg; 1,6 Cu; 0,23 Cr; | Tratado termic. (T6) | 570 | 505 | Estruturas aeronáuticas e outras de elevado carregamento |
| LIGAS DE FUNDIÇÃO - TRATÁVEIS TERMICAMENTE | | | | | | |
| 295.0 | A02950 | 4,5 Cu; 1,1 Si; | Tratado termic. (T4) | 221 | 110 | Volantes, jantes de caminhões e aviões, carters |
| 356.0 | A03560 | 7,0 Si; 0,3 Mg; | Tratado termic. (T6) | 228 | 164 | Caixas de transmissão, blocos de motor |
| LIGAS DE LÍTIO | | | | | | |
| 2090 | - | 2,7 Cu; 0,25 Mg; 2,2 Li; 0.12Zr; | Tratado termic. e def. frio (T83) | 455 | 455 | Estruturas aeronáuticas e de tanques criogénicos |
| 8090 | - | 1,3 Cu; 0,95 Mg; 2,0 Li; 0,1 Zr; | Tratado termic. e def. frio (T651) | 465 | 360 | Estruturas aeronáuticas e outras de elevado carregamento |
| Observação: Conteúdo da tabela retirado das referências [Dwivedi, <i>et al.</i> , 2014], [ASME, 2015] e [Rambabu, <i>et al.</i> , 2017]. | | | | | | |

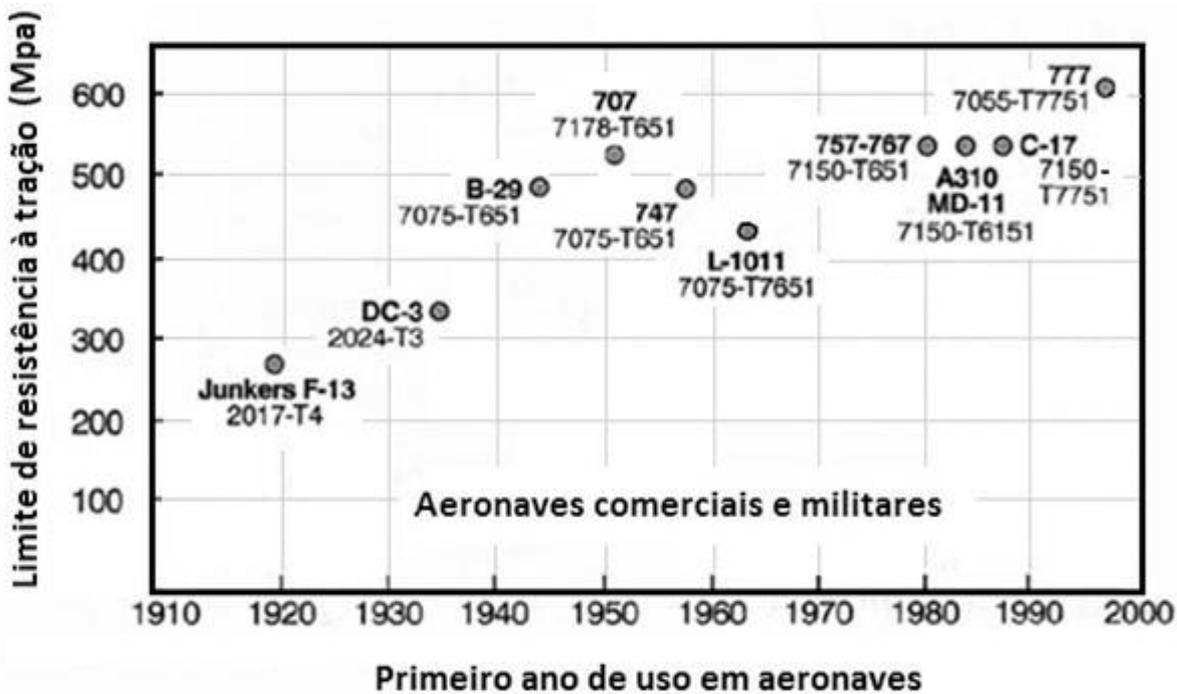


Figura 3.2. Evolução das ligas de alumínio [Campbell, 2006] e [Rambabu, *et al.*, 2017].

Com o desenvolvimento de aeronaves cada vez mais complexas, a resistência mecânica deixou de ser a única propriedade de interesse no aperfeiçoamento de novas ligas metálicas [Rambabu, *et al.*, 2017].

Conforme apresentado no capítulo 3, subitem 3.1, o alumínio passou também a ser combinado com um ou mais elementos, formando ligas metálicas desenvolvidas para a obtenção de maior resistência à corrosão ambiental, com a correspondente diminuição de resistência aos esforços mecânicos [Dwivedi, 2014].

A constatação deste fato fica evidente quando da comparação entre a liga A1199, com Tensão de Ruptura a Tração de 59 MPa, desenvolvida e usada em aplicações aeroespaciais onde uma elevada resistência a corrosão é exigida, com a liga A7475-T61, Tensão de Ruptura a Tração 683 MPa, desenvolvida para aplicações em componentes estruturais aeroespaciais de alta resistência mecânica [ASM, 1990] e [Vicente, 2014].

3.3.2 - Propriedades mecânicas e seleção da liga de alumínio de comparação

O estudo das propriedades mecânicas das ligas de alumínio precisa ser feito considerando a forma e a condição em que este material se encontra, no componente ou parte finalizada.

As ligas de alumínio fornecidos em laminados tem propriedades diferentes se comparadas às

mesmas ligas na condição de forjada ou fundida. Da mesma forma, tratamento final aplicado ao material no componente na fase final de fabrico, pode aumentar ou diminuir o valor das propriedades mecânicas no produto final.

A seleção de uma liga de alumínio para comparação com o compósito de estudo apresentado nos Capítulos 7 e 8, foi feita considerando três critérios:

- Critério 1: Liga de alumínio de aplicação em estruturas secundárias, identificada na fase de projeto como componente da Classe III de uso aeroespacial, onde o risco de danos graves em caso de falha é menor. Definições conforme referência [FAA-Advisory, 1996].
- Critério 2: Liga de alumínio utilizada no fabrico de componentes e partes dotadas de formas geométricas complexas, obtidas por maquinagem ou fundição.
- Critério 3: Menor valor de tensão de rutura à tração entre as ligas de alumínio que atendam aos critérios 1 e 2. Temperatura máxima de operação do componente 60°C.

Com base nos dados das referências bibliográficas [ASM, 1999], [Kaufman, 2008] e [Rambabu, *et al.*, 2017], foi selecionada a liga de alumínio fundido A850.0-F [ASM, 2009].

Esta liga é pouco usada na indústria aeroespacial e quando isto ocorre, o uso é sempre em estruturas secundárias, Classe III, conforme definição [FAA-Advisory, 1996].

Uma das aplicações possíveis com temperatura de operação inferior a 180°C, está relacionada ao fabrico de conexões do sistema de ventilação de aeronaves, além de outras aplicações em estruturas secundárias de aeronaves em geral. Outra aplicação possível na indústria aeroespacial é em tampas de acesso em míssil de uso militar.

A tabela 3.2 mostra as principais características e propriedades mecânicas da liga de alumínio A850.0-F, bem como dados sobre os elementos de liga presentes na composição.

Tabela 3.2. Principais características e propriedades mecânicas da liga de alumínio A850.0-F.

| Liga de Alumínio Fundido A850.0-F Composição, Elementos de Liga | Limite Operação [°C] | Tensão Rutura Tração (1) [MPa] | Módulo Elasticidade (2) [GPa] | Densidade Teórica (3) [g/cm ³] |
|---|----------------------------|---|-------------------------------------|--|
| A850.0-F, Tipo Limite Mínimo e Máximo: Si 0,7%; Fe 0,7 %, Cu 0,7-1,3%; Mn 0,1%; Mg 0,1%; Cr (-)%; Ni 0,7-1,3%; Zn (-)%; Ti 5,5-7,0%; Sn (-)% | 180 | 140 | 71 | 2,88 |
| Observação: Liga de alumínio de aplicação em estruturas secundárias, identificada na fase de projeto como componente da Classe 3 de uso aeroespacial, onde o risco de danos graves em caso de falha é menor. Definições conforme referência [Bruhn, 1973]. Propriedades (1), (2) e (3) conforme referência [Kaufman, Rooy, 2004] | | | | |

3.4 – Fundamentos da Fadiga Mecânica. Comportamento das ligas de alumínio

Fadiga pode ser definida como um fenômeno associado à estrutura dos materiais, que causa falha prematura ou dano permanente a um componente sujeito a carregamento variável no tempo ou nomeadamente, a carregamento identificado como cíclico. A figura 3.3 mostra o carregamento monótono caracterizado pela aplicação de um carregamento até a rutura do material e outro nomeado de cíclico, onde por um número de aplicações (N) o material é submetido ao carregamento e descarregamento sem rutura [Pereira, 2006].

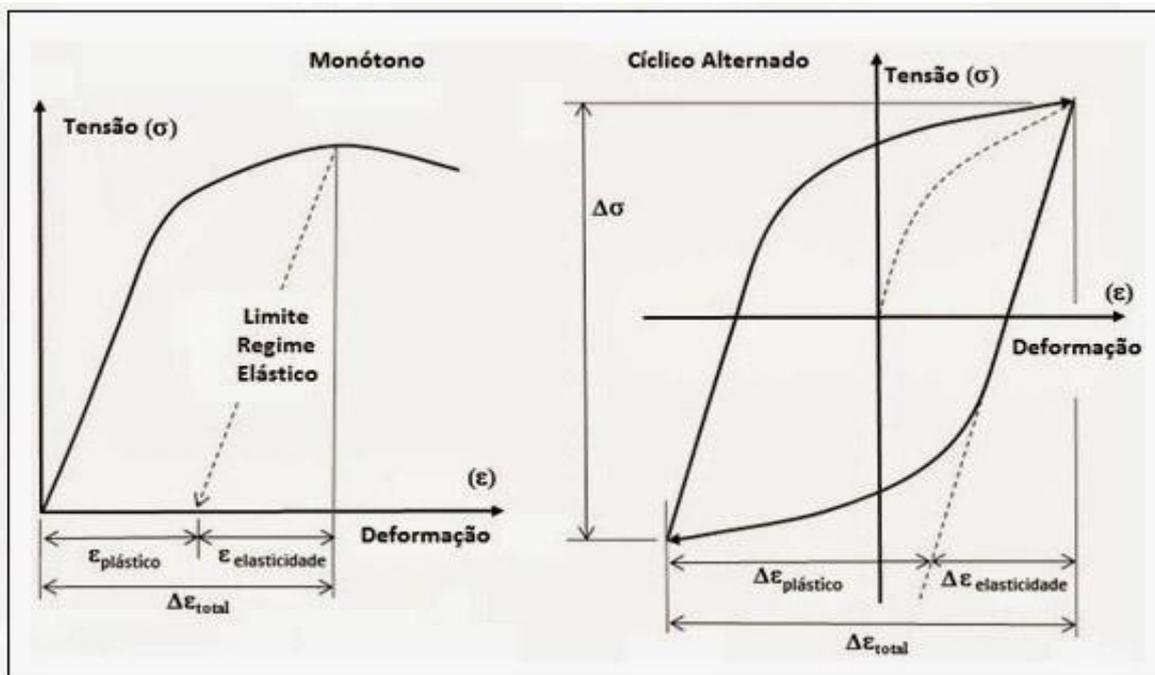


Figura 3.3. Carregamento cíclico e o carregamento monótono até a rutura [Pereira, 2006].

Conforme citação da página 223 [Rosa, 2002], “fadiga é uma redução gradual da capacidade de carga do componente, pela rutura lenta do material, consequência do avanço quase infinitesimal das fissuras que se formam no seu interior. Este crescimento ocorre para cada flutuação do estado de tensões. As cargas variáveis, sejam cíclicas ou não, fazem com que, ao menos em alguns pontos, tenhamos deformações plásticas também variáveis com o tempo. Estas deformações levam o material a uma deterioração progressiva, dando origem à fenda, a qual cresce até atingir um tamanho crítico, suficiente para a rutura final, em geral brusca, apresentando características macroscópicas de uma fratura frágil”.

O fenômeno de fadiga pela norma ASTM E1823-2010, “É o processo de mudança localizada, permanente e progressiva na estrutura, que ocorre no material sujeito a flutuações de tensões e deformações que pode culminar em fendas ou completa fratura depois de um número

suficiente de flutuações”, conforme página 53 [Rodrigues, 2012] e [ASTM E 1823, 2010].

Ao longo dos anos, foram desenvolvidas várias ligas de alumínio visando melhorar propriedades como resistência mecânica, resistência à corrosão, resistência à fadiga ou obter baixa fluência em temperaturas comuns nos projetos aeroespaciais e exigidas nas aplicações de usos gerais. A resistência à fadiga das ligas de alumínio é muito estudada [Rangel, 2012].

Nomeadamente, as ligas de série 7XXX combinam uma tensão de rotura bastante elevada, com uma boa tenacidade à fratura e resistência à corrosão.

Apesar destas características de elevada importância, a resistência à fadiga de longa duração é relativamente baixa. Em valores médios e aproximados, para as ligas de série 7XXX, a probabilidade de falha do material no ensaio de fadiga cíclica, recai sobre a amplitude tensão de 140 MPa, em um número de 5 milhões de ciclos de carregamento.

Além disto, a comunidade científica e acadêmica ainda não fixou posição definitiva sobre a existência ou não de um valor de amplitude de tensão que assegure um número infinito de ciclos sem falha.

Para exemplificar a dúvida existente, o trabalho [Pereira, 2006] sugere que liga de alumínio não tem um valor de amplitude de tensão limite de fadiga para vida infinita. Por outro lado, a referência [Quintino, 2012], adota para liga de alumínio AA5083-H111 um valor de tensão limite fadiga igual 1/3 da tensão de rotura monótona do material, como um valor aproximado e apenas usado em análises iniciais, fazendo no próprio texto ressalva sobre este assunto.

No conjunto de dados e propriedades mecânicas apresentadas na referência *Aluminum Alloy Castings Properties, Processes and Applications*, [Kaufman, Rooy, 2004], é possível identificar uma das poucas informações quantitativas sobre um possível valor de amplitude de tensão limite de fadiga para vida infinita de ligas de alumínio. O critério definido no mencionado documento toma como base o ensaio de fadiga rotativa, seguindo a norma [ASTM-E 466, 2007] e fixa 500 milhões de ciclos, o valor de amplitude de tensão limite de fadiga para vida infinita. No mesmo documento, poucas ligas atingem este número de ciclos sem rotura.

Este ponto é de suma importância para o desenvolvimento aqui apresentado, em razão do uso do valor da amplitude de tensão limite de fadiga para vida infinita como um dos parâmetros de comparação do comportamento das estruturas frente ao fenômeno de fadiga, para materiais diferentes ou tratamentos diferentes do mesmo material.

Face a inexistência de consenso na bibliografia revisada, o valor da amplitude de tensão limite de fadiga para vida infinita não foi discutido neste trabalho.

A resistência de um material à fadiga está dependente de entre outros fatores, do acabamento superficial e a presença de defeitos internos e superficiais. Abordagem adotada neste assunto

foi medir e acompanhar a rugosidade, a porosidade e a condição da superfície dos provetes após maquinagem. O estudo da superfície foi realizado através de micrografia nas faces maquinadas e um intenso trabalho de mensuração da rugosidade presente.

A tarefa de projetar um produto com função estrutural exige atenção especial com uma possível falha catastrófica, provocada pelo fenómeno de fadiga no material de um dos componentes estruturais [FAA-Alerts, 2012].

As normas e livros fixaram quatro posicionamentos adotados na tarefa de projetar estruturas seguras [Bruhn, 1973] e [FAA-Advisory, 1996]:

- Vida Infinita: Este critério exige que as tensões atuantes estejam abaixo da amplitude de tensão limite de fadiga, para um número infinito de ciclos. Só se aplica quando tal limite possa ser identificado.
- Vida Finita: Condições de carregamento sensivelmente imprevisíveis, ou ao menos, não claramente repetitivos, são usadas para definir um limite de tempo para uso com segurança de um determinado componente estrutural. Findo este período, o componente deve ser removido da estrutura e descartado.
- Falha Segura: Neste critério delineado na fase de projeto, é considerado a possibilidade de ocorrência de fendas de fadiga, porém, sem levar ao colapso as estruturas. Antes da falha do componente crítico, as fissuras devem ser detetadas e tais componentes são substituídos. Este encaminhamento exige inspeções programadas e periódicas, com procedimento detalhado a cada passo da execução.
- Tolerante ao Dano: A tarefa de projeto apoiada por ferramentas FEM, método dos elementos finitos, considera a possível existência de fenda em um determinado elemento estrutural. No entanto, na sua conceção inicial, as estruturas dispõem de elementos na região da falha, que passam a conduzir parte do carregamento, antes transferido pelo componente agora danificado (simulação FEM). Esta transferência de carregamento para outros elementos estruturais, evita que esta fenda progrida e assim ocorrendo, proporciona uma sobrevida da estrutura, como um todo. Inspeções programadas e periódicas, com procedimento para avaliar o progresso das fendas, são necessárias. A substituição do componente danificado é feita em data programada.

O estudo do comportamento de um material frente ao fenómeno de fadiga, começa pelo levantamento experimental da curva nomeada S-N, Amplitude de Tensão Máxima aplicada em função do número de ciclos do carregamento repetitivo até à rutura.

Este levantamento experimental é utilizado mundialmente para obtenção de dados específicos sobre um determinado material, submetido a condições padronizadas de ensaio. Os dados assim obtidos são necessários para análise do comportamento à fadiga de um material utilizado no componente estrutural, conforme mencionado no capítulo Introdução, do documento “*FITNET Fitness-for-Service (FFS), Procedure*”, referência [Koçab, *et al.*, 2005].

A determinação experimental da curva Amplitude de Tensão Máxima (S) em função do número de ciclos do carregamento (N), tem início na seleção do tipo tensões cíclicas atuantes durante o ensaio, seguindo os padrões definidos por norma reconhecida internacionalmente.

Estas tensões cíclicas podem ser de natureza axial, tração e compressão, tensão de flexão, ou tensão torsional.

A aplicação de tensão no material é caracterizada por parâmetros como (S_{max}) Tensão máxima, (S_{min}) Tensão mínima, (ΔS) Intervalo de tensão, (S_a) Amplitude de tensão e (S_m) Tensão média aplicada [Takahashi, 2014].

A determinação dos valores de (S_{max}), Tensão máxima e (S_a), Amplitude de tensão segue as equações (3.1) e (3.2).

$$S_a = (S_{max} - S_{min}) / 2 \quad (3.1)$$

$$S_m = (S_{max} + S_{min}) / 2 \quad (3.2)$$

A gama de tensão ($\Delta\sigma$) é obtido pela diferença entre (S_{max}) Tensão máxima e (S_{min}) Tensão mínima.

Razão de amplitudes (A) e a Razão de tensão (R) estão definidas nas equações (3.3) e (3.4).

$$A = (S_a / S_m) \quad (3.3)$$

$$R = (S_{min} / S_{fmax}) \quad (3.4)$$

Conforme [Takahashi, 2014], a forma em que o ensaio de fadiga é realizado, tem efeitos importantes na curva obtida da Tensão Máxima Aplicada (S) em função do número de ciclos do carregamento aplicado (N). A figura 3.6, mostra exemplos de carregamento em função do valor da Razão de Tensão (R) adotado.

O mesmo material também responde diferentemente ao mesmo tipo de carregamento mostrado na figura 3.4, quando a temperatura do provete ou o ambiente em torno do provete sofre variações. Um exemplo disto é a presença de névoa salina que pode alterar o resultado do ensaio para determinados materiais.

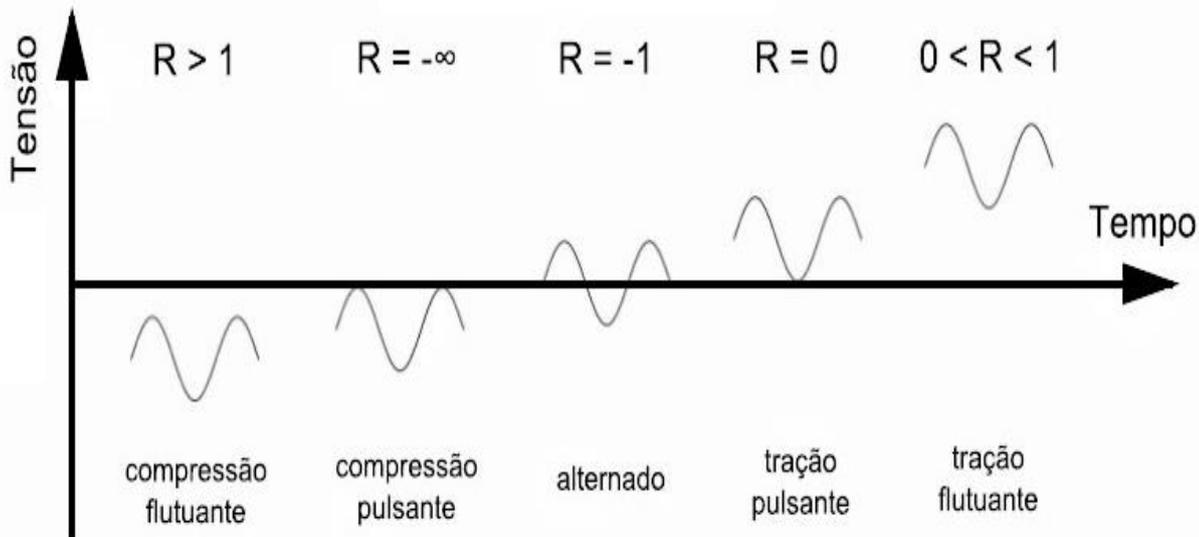


Figura 3.4. Carregamento em função do valor da Razão de Tensão (R) adotado (F. Autor).

Outro aspecto a considerar neste tipo de ensaio é que, nomeadamente os metais, quando submetidos a deformações plásticas reversíveis, exibem um comportamento, designado de comportamento cíclico, que é distinto do comportamento monótono do material em que o carregamento é aplicado uma única vez até a rutura. Os comportamentos cíclicos típicos como endurecimento cíclico, amaciamento cíclico, relaxação cíclica da tensão média e fluência cíclica, podem se apresentar nos ensaios de fadiga e provocar modificações na forma e nos valores da curva S-N, obtidos durante o decorrer do ensaio de fadiga [Pereira, 2006]. Desta maneira, o levantamento da curva S-N e o uso da informação nela contida, só terá algum valor prático se as condições do ensaio como temperatura do em torno do provete, tipo de carregamento, frequência de aplicação da carga e padrão de procedimento definido por uma norma reconhecida internacionalmente, estiverem disponíveis para consulta, juntamente com a própria curva S-N.

O método mais usado para avaliação do fenómeno de fadiga dos materiais, adotado pela maioria dos fabricantes de materiais metálicos à mais de um século, é o ensaio de fadiga em flexão rotativa de R. R. Moore.

Neste tipo de ensaio um provete padronizado é acoplado a uma máquina e gira com rotação constante, ao mesmo tempo, um conjunto de contrapesos ajustáveis aplica um momento fletor puro e constante ao longo do eixo do provete [Takahashi, 2014].

O provete objeto de estudo tem a forma semelhante à de uma ampulheta, com corpo central cuidadosamente polido e rugosidade obtida dentro dos limites definidos pela norma [ASTM-E

466, 2007], “*Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials*”. A secção circular com menor diâmetro do corpo ensaiado deve ter 7,62mm (equivalente 0,3 in) e toda a superfície deve estar isenta de entalhes e tratamentos superficiais de qualquer tipo.

Desta forma, a curva S-N relativa à liga de alumínio adotada como referência neste desenvolvimento, foi obtida de fonte reconhecida internacionalmente e caracterizada por todos os dados relativos ao ensaio que a definiu, com a correspondente norma de padronização adotada durante a execução do ensaio.

A figura 3.5 reproduz a curva S-N relativa à liga de alumínio A850.0-F e foi retirada da referência [Kaufman, 2008], página 424.

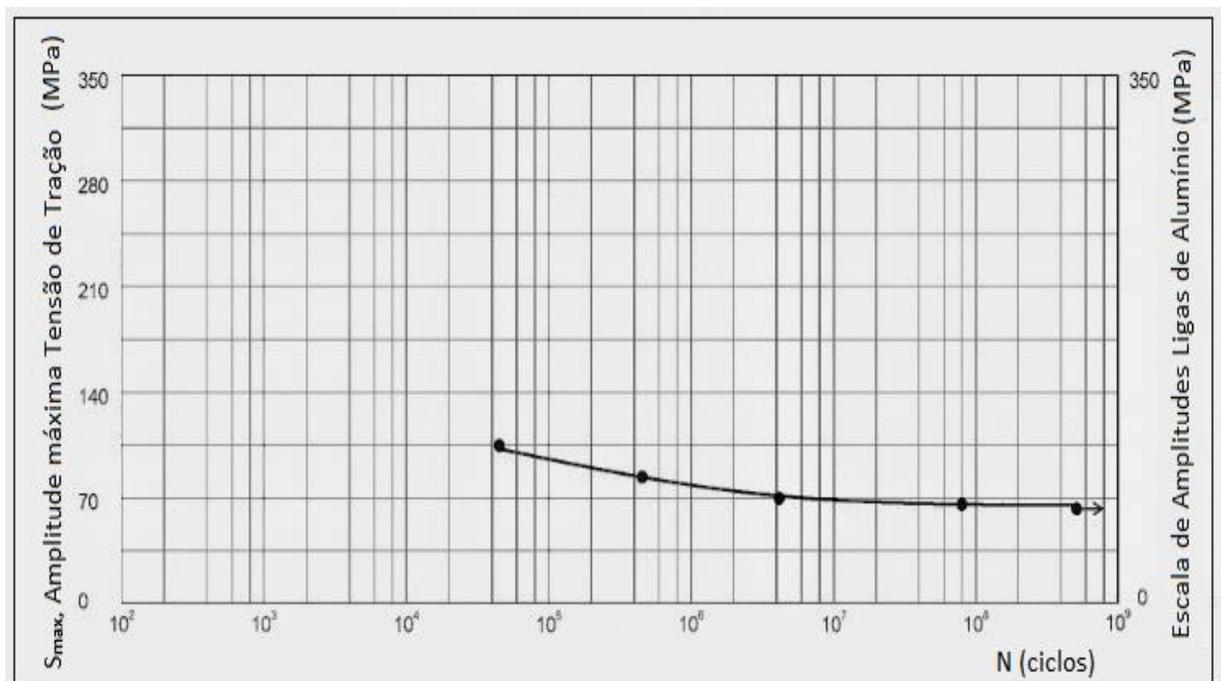


Figura 3.5. Curva S-N, liga de alumínio A850.0-F, em molde de fundição [Kaufman, 2008].

A letra “F” no código da liga de alumínio indica que o material esfriou naturalmente em molde de fundição, sem qualquer tratamento térmico ou mecânico posterior a isto.

Os valores foram levantados por ensaio padronizado, realizado em máquina de ensaios de fadiga por flexão rotativa, seguindo a norma de provete de secção circular, liso, rugosidade máxima $R_a = 5\mu\text{m}$, com 7,62mm de diâmetro da secção circular no centro do corpo, de acordo com [ASTM 606, 1992].

Foi utilizando equipamento “*R. R. Moore Rotating Beam Fatigue Testing System*”, código de identificação do ensaio 850.RB01, seguindo procedimento relativo à norma [ASTM-E 466, 2007] e [ASTM E 1823, 2010].

A indicação “RB” no código de ensaio, significa “*Rotating Bending at room temperature*”, flexão rotativa à temperatura do laboratório, padronizada em 25°C.

Por se tratar de um ensaio de fadiga por flexão rotativa, o valor Razão de tensão (R) definida pela equação (3.4), assume um valor de -1, caracterizando um carregamento alternado, conforme mostra figura 3.6, Carregamento em função do valor da Razão de Tensão.

A frequência de aplicação do carregamento é definida pela rotação da máquina de fadiga por flexão rotativa, com no máximo 1000 rpm.

3.4.1 – Aplicabilidade da curva S-N em condições diversas das adotadas no ensaio

Os valores da curva S-N e o uso da informação nela contida dependem sobre maneira, das condições específicas em que o ensaio foi realizado. Características como temperatura do em torno do provete, tipo de carregamento, rugosidade, dimensão do provete, tratamento superficial do material, confiabilidade intrínseca e a característica corrosiva do ambiente em torno de ensaio, podem alterar substancialmente uma curva padrão S-N, obtida em condições definidas pelas normas e procedimentos [Pereira, 2006] e [Takahashi, 2014].

Um caminho para utilização de curvas S-N em condições de ensaio com pequenas diferenças em relação às condições normalizadas adotadas no levantamento original da curva S-N é a utilização de um fator modificador (C), que ajusta a curva S-N para a nova condição de aplicação, conforme equação (3.5) e (3.6) [Lee, *et al.*, 2011] e [KFM-Guideline, 2003].

A amplitude de tensão ajustada (S_d) é obtida pelo produto do fator multiplicador (C_e) pela amplitude de tensão (S_i), obtida da curva S-N original.

$$S_d = S_i \cdot C_e \quad (3.5)$$

$$C_e = (C_L \cdot C_D \cdot C_{RD} \cdot C_{St} \cdot C_C \cdot C_R \cdot C_T \cdot C_m) \quad (3.6)$$

Onde os valores dos fatores modificadores são em seguida definidos:

- Fator de carregamento (C_L)
- Fator de tamanho (C_D)
- Fator de acabamento superficial (C_{RD})
- Fator de tratamento superficial (C_{St})
- Fator de efeito da corrosão (C_C)
- Fator de confiabilidade dos dados levantados (C_R)
- Fator de temperatura no em torno do provete (C_T)
- Fator de mudança da amplitude de tensão média (C_m)

Estes fatores podem ser aplicados juntos ou separadamente, de maneira a obter curvas S-N mais próximas das condições de ensaio desejadas. A figura 3.6, mostra de maneira esquemática e ilustrativa, os efeitos hipotéticos provocados pelo Fator de tamanho (C_D) e pelo Fator de efeito da corrosão (C_C).

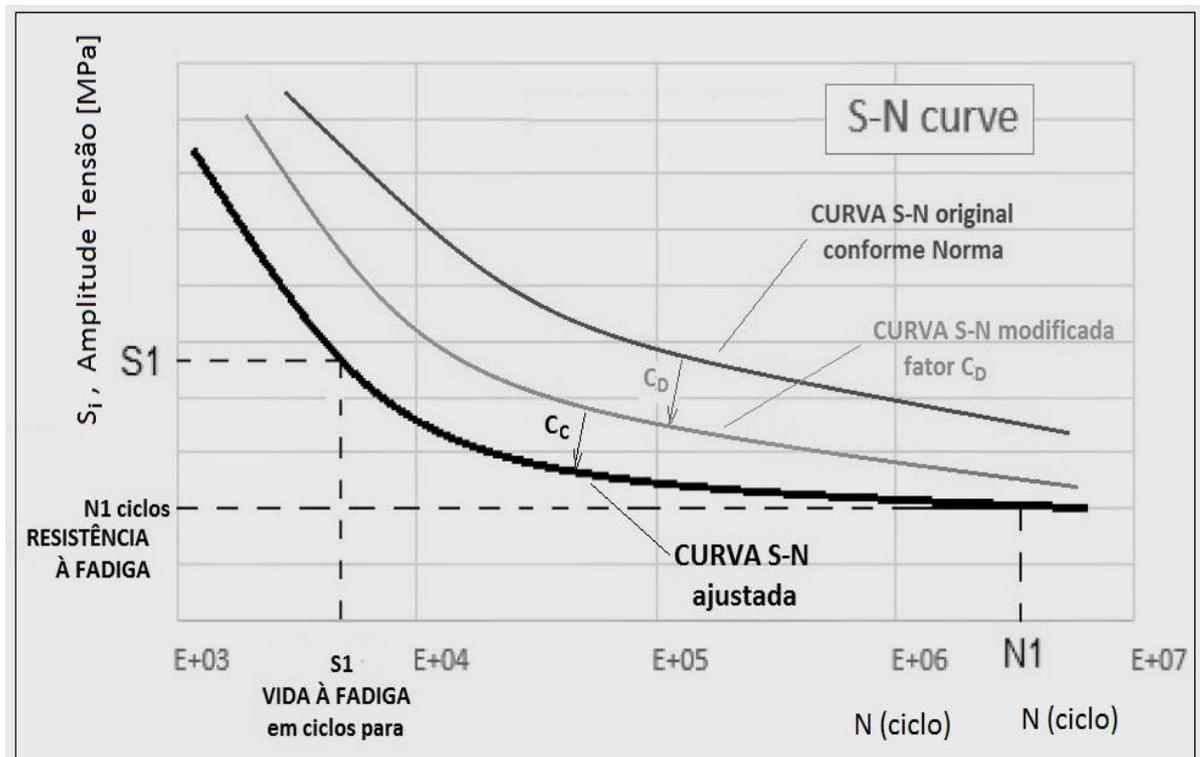


Figura 3.6. Efeitos na curva S-N provocados pelos Fatores de tamanho (C_D) e corrosão (C_C).

Conforme detalhado no Capítulo 8, subitem 8.7, Fadiga em compósito, os ensaios para avaliação do fenômeno de fadiga mecânica no compósito de estudo, foram realizados com a máquina de princípio electro mecânico, controlo em circuito fechado, marca Instron, modelo ElectroPuls™ E10000, All-Electric Dynamic Test Instrument.

Foram feitos ensaios com ciclo de carga tração pulsante, ($R=0$), onda sinusoidal, com frequência de 15Hz, conforme classificação feita figura 3.6, nomeada, Carregamento em função do valor da Razão de Tensão (R) adotado.

A temperatura do laboratório ficou sujeita a controlo por equipamento de ar condicionado instalado e oscilou em torno de 23°C.

O provete de ensaio de fadiga, também nomeado como espécime, foi maquinado conforme Capítulo 4, subitem 4.4, denominado, Escolha da máquina e ferramenta para o procedimento de fresagem. A secção crítica de ensaio adotada é retangular com 3mm (nominal) de espessura por 8mm de largura, o que resulta uma área de 24mm².

Os ensaios de fadiga foram realizados a uma distância superior a 43 Km do Oceano Atlântico, o que torna nula qualquer influência de névoa salina.

Não foi instalado nenhum equipamento de refrigeração ou aquecimento no em torno dos provetes durante o decorrer dos ensaios.

Com base nestas informações, a equação (3.5) foi aplicada à Curva S-N, liga de alumínio A850.0-F, representada na figura 3.7, resultando numa curva S-N modificada e ajustada às condições do ensaio do compósito em estudo, com os parâmetros apresentados a seguir:

- Fator de carregamento (C_L): Este valor considera a mudança da condição de ensaio de fadiga por flexão rotativa, utilizada no levantamento da Liga de Alumínio A850.0-F, para a condição de ensaio de tração cíclica uniaxial. O material no ensaio rotativo é submetido ao estado de tensão duplo, onde atuam esforços de tração e corte nos pontos da secção, oriundos da flexão aplicada. Nesta condição, os esforços de tração são maiores em pontos da superfície quando comparados com os pontos centrais. Diferentemente no ensaio tração pulsante, onde ocorre um estado simples de tensão uniforme ao longo de toda a secção tracionada. Este estado de tensão é caracterizado por uma tensão média mais intensa. Segundo [Marin, 1962], o valor recomendado para Fator de carregamento é de 0,95.
- Fator de tamanho (C_D): Não aplicável ao caso, em razão da pouca variação do diâmetro do provete de ensaio rotativo, valor nominal 7,61 mm. O valor de C_D adotado é igual a 1,00.
- Fator de acabamento superficial (C_{RD}): Fator não aplicável neste caso, em relação a proposta de curva S-N ajustada. A rugosidade e a condição geral da superfície do provete são semelhantes ao padrão da norma. O valor de (C_{St}) adotado é 1,00.
- Fator de tratamento superficial (C_{St}): Não aplicável neste caso, em razão da não mudança no tratamento da liga A850.0-F, em relação à nova curva S-N proposta. O valor de (C_{St}) adotado é 1,00.
- Fator de efeito da corrosão (C_c): Fator não aplicável neste caso, em razão da manutenção do mesmo ambiente de ensaio da liga A850.0-F, norma [ASTM-E 466, 2007]. O valor de C_c adotado é 1,00.
- Fator de confiabilidade dos dados levantados (C_R): Fator não aplicável neste caso, em razão de nenhuma mudança nos parâmetros de confiabilidade do ensaio realizado liga A850.0-F, em relação à curva S-N ajustada. Neste aspeto, o número elevado de provetes testados é o parâmetro mais importante. O valor de (C_R) adotado é 1,00.

- Fator de temperatura no em torno do provete (C_T): Foi usada a mesma temperatura no em torno da liga A850.0-F, para nova condição de levantamento da curva S-N. O valor de C_T adotado é 1,00.
- Fator de mudança da amplitude de tensão média (C_m): Considerado por vários autores, como o fator mais importante no ajuste da curva S-N para nova condição de ensaio. Quando o valor da amplitude média de tensão é maior do que aquela imposta no ensaio de fadiga rotativa, o esforço de tração assume valores maiores no ponto mais alto da senoidal, aplicada. Isto caracteriza que na nova condição de ensaio proposta para $R=0$, pulsante, onde atua um valor da tensão de tração significativamente maior, quando comparada com o ensaio original $R=-1$, flexão rotativa, para um mesmo valor da amplitude de tensão adotado. Isto caracteriza um estado mais gravoso frente ao fenômeno de fadiga mecânica dos materiais, em razão do maior valor das tensões de tração aplicadas à estrutura interna do material testado. O valor de C_m adotado é a 0,89 [FKM-Guideline, 2003].

A tabela 3.3, apresenta um resumo dos cálculos realizados para o ajuste da curva original S-N, às condições de ensaio observadas nos ensaios de fadiga do compósito de estudo, Capítulo 8, subitem 8.7, que aborda fadiga em compósito.

Tabela 3.3. Conversão da curva original S-N, para as condições de ensaio observadas nos ensaios de fadiga do compósito de estudo.

| Levantamento da Curva S-N: Liga de Alumínio A0850.0 - F, para $R = -1$ e ajustada para $R = 0$ | | | | | | | | |
|--|----|----------------------------|-------------------|---|-------|---|----------------------------|-------------------|
| AA0850.0-F, resfriada em molde de fundição | | | | Procedimento de ensaio [ASTM-E 466, 2007] | | | | |
| ID amostra | R | Amplitude ΔS [MPa] | Número N [ciclos] | C_L | C_m | R | Amplitude ΔS [MPa] | Número N [ciclos] |
| A805.0_F_conjunto1 | -1 | 98,7 | 45710 | 0,95 | 0,89 | 0 | 83,5 | 45710 |
| A805.0_F_conjunto2 | -1 | 82,7 | 425320 | 0,95 | 0,89 | 0 | 69,9 | 425320 |
| A805.0_F_conjunto3 | -1 | 71,2 | 4032517 | 0,95 | 0,89 | 0 | 60,2 | 4032517 |
| A805.0_F_conjunto4 | -1 | 65,7 | 80139325 | 0,95 | 0,89 | 0 | 55,5 | 80139325 |
| A805.0_F_conjunto5 | -1 | 64,7 | 520389803 | 0,95 | 0,89 | 0 | 54,7 | 520389803 |

Para melhor visualização da mudança realizada para o ajuste da curva original S-N, às condições de ensaio observadas nos ensaios de fadiga do compósito de estudo, a figura 3.7 mostra a variação esperada nos valores da curva original.

As duas curvas S-N, uma antes com os dados originais e uma segunda ajustada às novas condições de ensaio são baseadas em parâmetros calculados conforme equações (3.5) e (3.6).

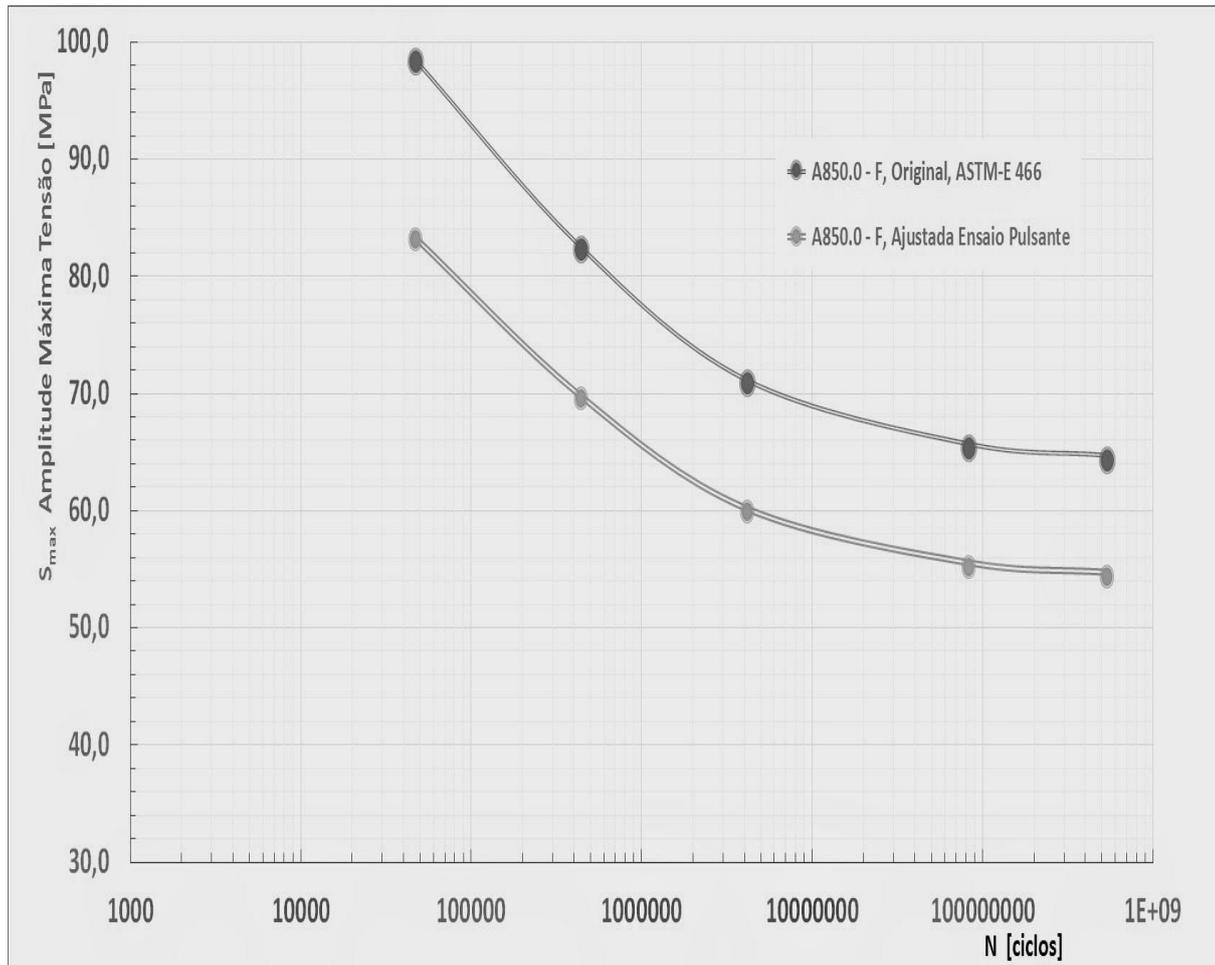


Figura 3.7. Curvas S-N com os dados originais e curva S-N e ajustada ao ensaio pulsante.

A fadiga em metais ocorre quando o material é submetido a tensões repetitivas ou cíclicas e fratura a tensões muito mais baixas do que as que a peça poderia suportar quando submetida a uma tensão estática simples, como sucede num ensaio de tração.

Atualmente é de extrema importância compreender o fenômeno de fadiga, já que 90% dos sistemas mecânicos projetados e sujeitos a tensões cíclicas falham devido à fratura por fadiga [Quintino, 2014].

Na indústria aeroespacial este fenómeno é ainda mais crítico, colocando em risco vidas humanas e grande perda material [FAA-Alerts, 2012].

Por estas razões, o comportamento à fadiga é um dos principais assuntos de estudo deste desenvolvimento.

PRINCÍPIOS BÁSICOS DA MAQUINAGEM

4.1 - Introdução

Este desenvolvimento investiga a viabilidade e as limitações de uso do processo de fabrico de partes ou componentes por maquinagem em bloco ou placa de compósito com fibra de carbono cortada e matriz epoxídica.

Dentro deste objetivo, o processo de maquinagem passa a ter importância capital e o conhecimento teórico e tecnológico relacionado a este processo, precisa ser apresentado para melhor compreensão do processo proposto.

Maquinagem é entendida como um trabalho de remoção de parte do material de um corpo, alterando a geometria e a forma anterior, através de forças aplicadas por ferramentas adequadas.

Apesar de ser um processo muito antigo, com marcas deixadas em artefactos anteriores à descoberta da escrita, o primeiro estudo em maquinagem que se conhece é atribuído ao investigador Coquillat, no ano de 1851. O objetivo foi medir o trabalho realizado por uma ferramenta de furar, na remoção de uma dada quantidade de material [Batista, 2010].

Vários fatores devem ser considerados quando se escolhe um processo de maquinação mais adequado para cada caso.

Como exemplo a considerar nesta seleção está a forma e dimensão da parte ou componente a ser trabalhado, o material a ser processado, número de peças a ser produzida, tolerâncias desejada, acabamento superficial requerido e custo total do processamento.

Os principais processos de maquinagem convencional por execução de corte do material são o processo de torneamento, fresagem, furação e serramento.

4.2 - Tipos de maquinagem e maquinagem de compósito

Os princípios em que se baseiam a maquinagem de plásticos e compósitos são basicamente os mesmos dos metais.

No entanto, a geometria da ferramenta de corte e a velocidade de corte devem ser ajustadas adequadamente, já que corre o risco de aquecer demasiadamente o material no ponto onde é cortado.

A baixa condutividade térmica dos plásticos e compósitos requer muito cuidado na seleção de velocidade de corte, no tipo e na geometria da ferramenta, no avanço e no fluido de corte adotado.

A maquinagem hoje é largamente usada nas mais diferentes indústrias e numa infinidade de materiais metálicos, poliméricos e naturais, como madeira, rocha mineral, osso e outros.

O emprego de Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono (PRFC) em componentes estruturais eleva a confiabilidade dos materiais compósitos e lhes garante cada vez mais aplicações e sua descoberta, logo foi acompanhada pelo desenvolvimento de processos para maquinagem destes materiais, chamados de genericamente de compósito.

O aumento do emprego do processo de maquinagem em projetos recentes, como os inovadores Boeing 787 e Airbus A-350, reafirmam o potencial dos compósitos e sua capacidade de reduzir componentes e massa sem que ocorra comprometimento do comportamento mecânico o que impulsionou ainda mais os estudos da maquinagem em compósito [Martins, 2014] e [Davim, 2005].

Entre os tipos de maquinagem por corte utilizados na indústria aeroespacial, três deles são de uso mais intenso:

- Serramento de material compósito para separação de peças e eliminação de excessos.
- Furação de material compósito para permitir passagem de fixadores e componentes.
- Fresagem de material compósito para eliminação de excessos em torno da peça.

Existe uma tendência de expansão do uso destes processos na indústria de maneira geral e nomeadamente na indústria aeroespacial.

4.3 – Fresagem, direções e ferramentas

Fresagem é um tipo de processo de maquinagem onde, basicamente, a remoção de material é realizada com uma ferramenta rotativa de múltiplas arestas de corte, que executa movimento controlados pelo operador, ou programados por dispositivo informático, sobre

uma peça, em praticamente todas as direções do sistema de referência XYZ [Martins, 2014]. É esta ação de corte em várias direções e formas, que torna o processo de fresagem um método de maquinagem eficiente e versátil, que permite a obtenção de formas geométricas complexas [Batista, 2010]. Por esta razão, a maquinagem por fresagem foi adotada neste desenvolvimento.

Uma fresa normalmente executa uma ou um grupo das seguintes operações básicas de corte:

- Operação Radial de corte;
- Operação Periférica de corte;
- Operação Axial de corte;

A figura 4.1 esquematiza a operação realizada do tipo Radial, Periférica e Axial. Mostrando o eixo de rotação da aresta de corte e o avanço da peça em processo de maquinagem.

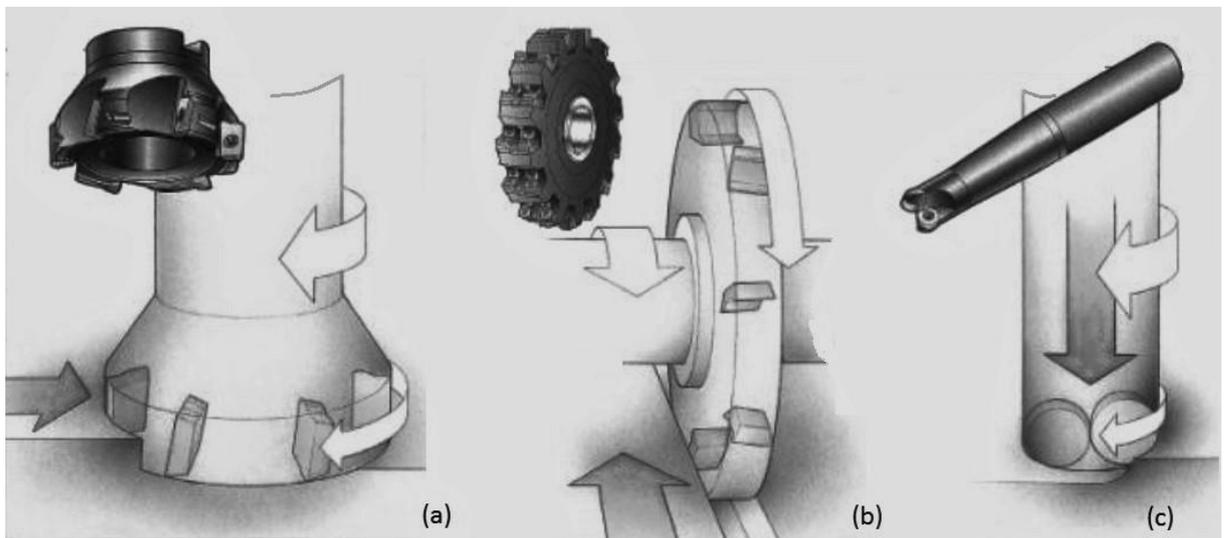


Figura 4.1. Tipos de operação de corte em fresagem: (a) Direção Radial; (b) Direção Periférica e (c) Direção Axial [Sandvik, 2016].

Considerando que a maquinagem de provetes para este desenvolvimento envolve a remoção de material em áreas planas, foi adotado a direção radial para aplicação neste fabrico de provetes.

4.4 - Escolha da máquina e ferramenta para o procedimento de fresagem

Conforme mencionado no início deste capítulo, a indústria aeroespacial usa o processo de maquinagem no fabrico de partes e componentes em compósito como um processo apenas complementar, aos processos descritos no Capítulo 2, subitem 2.5 - Principais processos de fabrico.

Na revisão bibliográfica realizada, poucas informações foram encontradas fazendo referência ao fabrico de componentes e partes a partir da maquinagem de blocos ou parte de compósito. No entanto, em [Westrupp, 2008], ANÁLISE DA VIABILIDADE DA USINAGEM DE COMPÓSITO DE MATRIZ DE EPÓXI COM CARGAS DE FERRO VISANDO A SUA UTILIZAÇÃO EM MOLDES DE INJEÇÃO, é apresentado um trabalho completo de maquinagem de compósito para uso na indústria de ferramental em geral.

O mesmo trabalho sugere que a maquinagem de determinados compósitos pode ser feita com equipamentos convencionais ou equipamentos CNC, com ferramentas convencionais, bastando um estudo de adaptação das condições e parâmetros de corte da ferramenta utilizada.

Desta maneira e com apoio dos principais fornecedores de ferramenta para fresagem, foi selecionada a ferramenta da marca Sandvik, tipo de corte na direção Radial, Topo, modelo R390-020A20-11M [Sandvik, 2016].

A maquinagem usando a Tecnologia CNC [Machado, *et al.* 2009], permite a um pequeno grupo de profissionais, fabricar pequenos lotes de peças com Custos de Produção e Ciclo de Fabricação, significativamente menores [De Paiva, 2013].

Isto sugere que a maquinagem de bloco compósito possa ser vantajosa se executada em máquina de fresagem CNC [De Paiva, 2013].

Em razão disto, foi escolhida a fresadora com Comando Numérico Computadorizado (CNC), da marca MIKRON, modelo VCE 500, figura 4.2, em preparação para operação de maquinagem.



Figura 4.2. Fresadora (CNC), MIKRON, *model* VCE500. Preparação para maquinagem (F. Autor).

Os principais parâmetros presentes na operação de corte na fresagem são assim definidos:

- Velocidade de corte (V_c). Conhecida como movimento da aresta de corte, esta velocidade é indicada em m/min representa a velocidade na qual a aresta de corte trabalha em contato com a peça. Este é um valor específico da ferramenta e garante uma execução eficaz da operação dentro do que se é esperado da ferramenta.
- Velocidade do fuso (n). Indicada em rpm, representa o número de rotações que o eixo da máquina executa e conseqüentemente o número de voltas que fresa cumpri por minuto. Este é um valor ajustado em cada máquina e calculado anteriormente, em função da velocidade de corte recomendada para uma determinada operação.
- Velocidade de avanço (V_a). Ajustada em mm/rotação, corresponde ao avanço da ferramenta em relação à peça. Pode ser definida em unidade de distância por rotação da ferramenta ou em unidade de distância por tempo. Nesta segunda maneira, recebe a denominação Velocidade de Avanço do Eixo Ferramenta.
- Altura máxima da apara (h_a). Indicada em mm, corresponde ao valor máximo entre a face da peça antes da maquinagem e a superfície maquinada instantes depois do corte.

A figura 4.3. mostra de maneira esquemática estes principais parâmetros presentes na operação de fresagem [Martins, 2014] e [Dias, 2016].

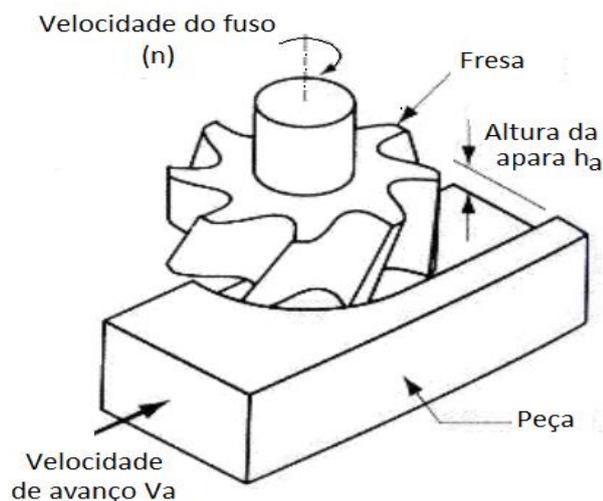


Figura 4.3. Esquema mostrando os principais parâmetros presentes na operação de fresagem.

A fresadora foi programada para executar as operações necessárias para maquinar a placa de compósito em provetes definidos na figura 4.4, Dimensões do provete e placa de compósito.

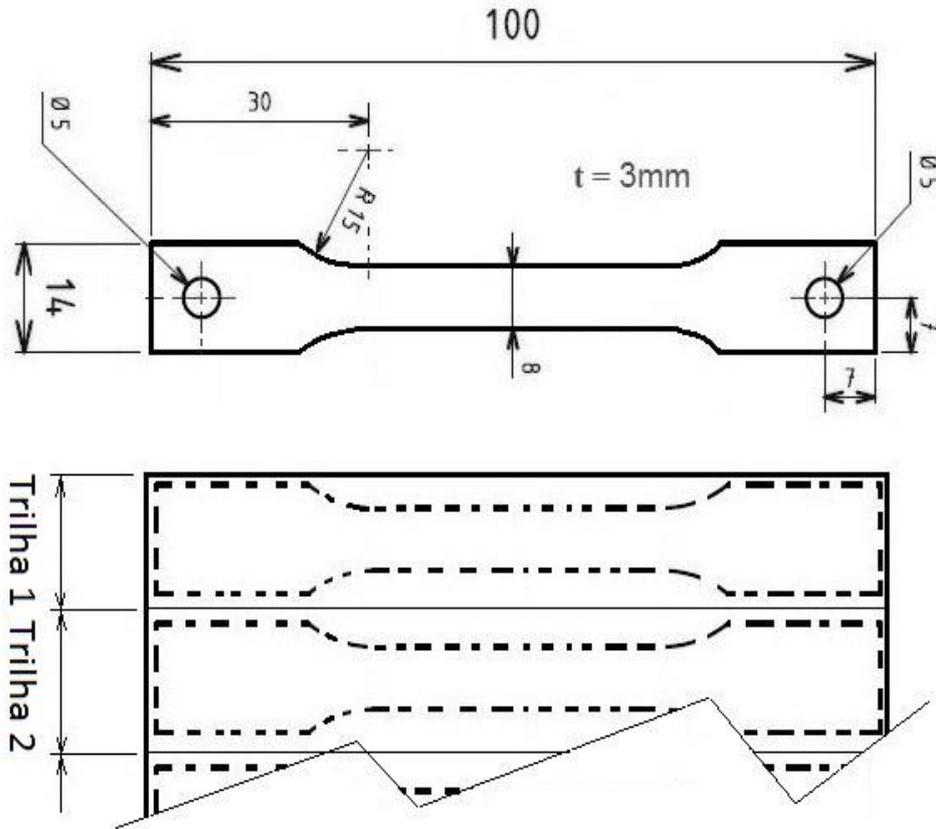


Figura 4.4. Dimensões do provete e placa de compósito.

O programa da fresadora com Comando Numérico Computadorizado (CNC), da marca MIKRON, modelo VCE 500, foi preparado de maneira a permitir condições de corte diferentes a cada trilha executada pela ferramenta, conforme mostra figura 4.5 e tabela 4.1

Tabela 4.1. Esquema de maquinagem com parâmetros diferentes a cada trilha.

| Velocidade rotacional do fuso, (n) [rpm] | Velocidade aresta de corte, (Vc) [mm/minuto] | Velocidade de avanço, (Va) [mm/rpm] | Velocidade de avanço eixo [mm/min.] | Inclinação do eixo ferramenta [grau] | Altura Máxima (ha) [mm] | Aplicado à trilha identificada por número |
|--|--|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------|---|
| 750 | 50 | 0,1 | 75 | 0,0 | 1,0 | 1 e 2 |
| 1500 | 100 | 0,1 | 150 | 0,0 | 1,0 | 3 e 4 |
| 3000 | 200 | 0,1 | 300 | 0,0 | 1,0 | 5 e 6 |
| 4500 | 300 | 0,1 | 450 | 0,0 | 1,0 | 7 e 8 |

Observação: Trilhas numeradas conforme esquema definido na figura 4.5 e aumento progressivo da velocidade de corte. A definição dos parâmetros de corte foi feita com base no valor definido pelo fabricante da ferramenta para Velocidade de corte (Vc) [Sandvik, 2016].

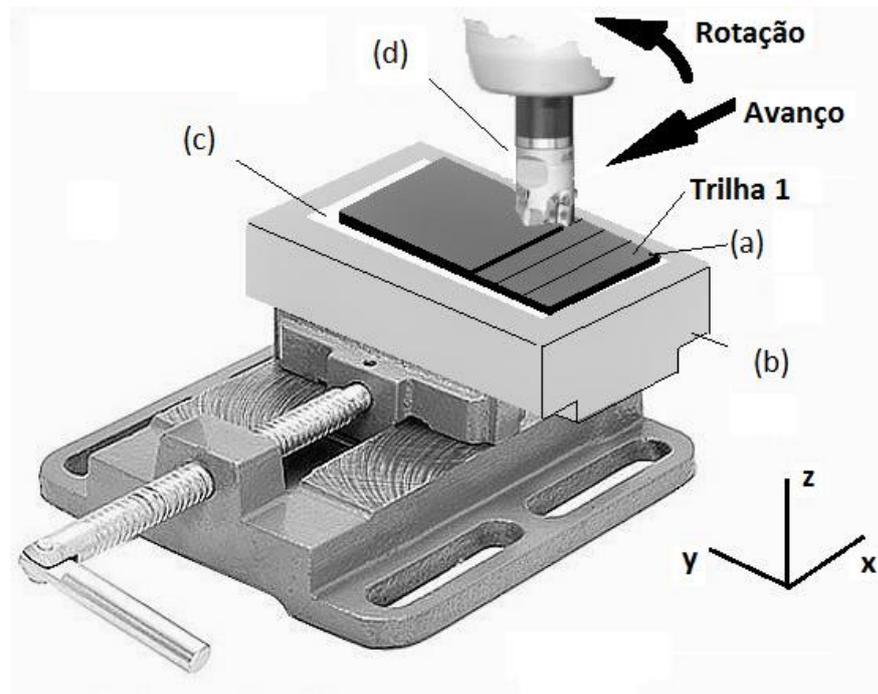


Figura 4.5. Esquema de maquinagem com parâmetros diferentes por trilha; (a) Placa de compósito; (b) Dispositivo de fixação; (c) Fita dupla face adesiva; (d) Ferramenta de corte.

A figura 4.6 mostra um provete maquinado nas condições definidas neste desenvolvimento. O provete equivale a uma peça simples produzida na indústria com compósito de matriz epoxídica, e reforçador em fibra curta de carbono aleatoriamente distribuído e em direções variadas, ao longo da matriz.

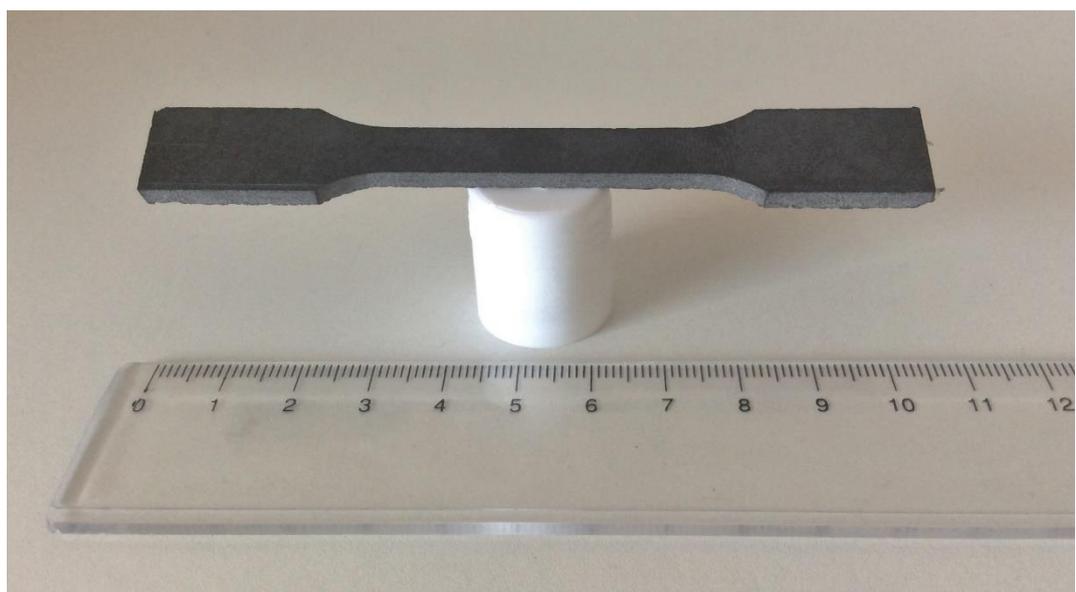


Figura 4.6. Provete maquinado nas condições definidas neste desenvolvimento (F. autor).

4.5 – Rugosidade, conceitos e normas utilizadas

Toda superfície sólida é rugosa, pois apresenta um conjunto de desvios micro geométricos, caracterizado pelas pequenas saliências e reentrâncias. A textura que surge desta característica é em parte, resultado dos processos de fabrico aplicados durante a preparação da cada superfície [Rolin, 2012]. Em alguns casos, os processos de conformação como fundição, forjamento ou maquinagem, são selecionados em razão da rugosidade desejada e definida na fase de projeto do produto.

Nomeadamente no processo de maquinagem, a rugosidade da superfície precisa ser medida em várias velocidades e avanços do corte, para cada material diferente, em razão da variação significativa dos valores de rugosidade obtidos em cada condição de maquinagem [Prakash Rao *et al.*, 2014].

Uma análise mais detalhada da superfície maquinada final, mostra irregularidades formadas por sulcos ou marcas deixadas pela ferramenta que atuou sobre o material [Marchiori, 2013]. Num estudo micrográfico, o perfil de uma superfície pode ser definido como a linha produzida pela apalpação de uma agulha sobre uma superfície. A medição de uma superfície através de um sistema mecânico de apalpação produz uma linha semelhante a figura 4.7 [Raja, *et al.*, 2002].

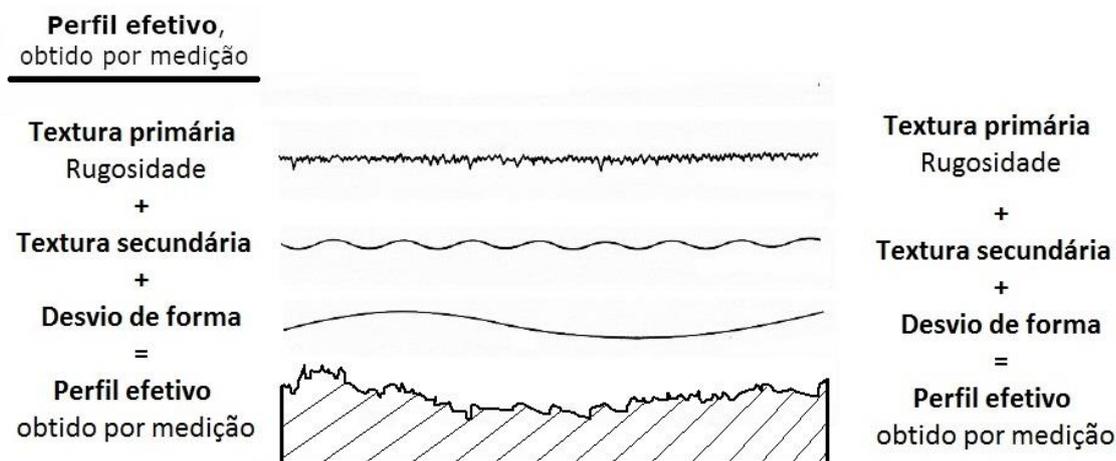


Figura 4.7. Rugosidade se soma à Textura secundária, Desvio de forma, resultando no Perfil Efetivo mensurado.

A compreensão do perfil efetivo passa por métodos de medição dos três estados de superfície, denominados Textura primária, Textura secundária e Desvio de forma. Entre estes métodos de medição, o mais utilizado é o da exploração do perfil de superfície, ampliado e com anamorfose num plano normal à superfície considerada. A figura 4.8, mostra uma

representação onde a ampliação vertical é maior do que a ampliação horizontal [Morais, 2006], comumente chamado de perfil de análise da superfície.

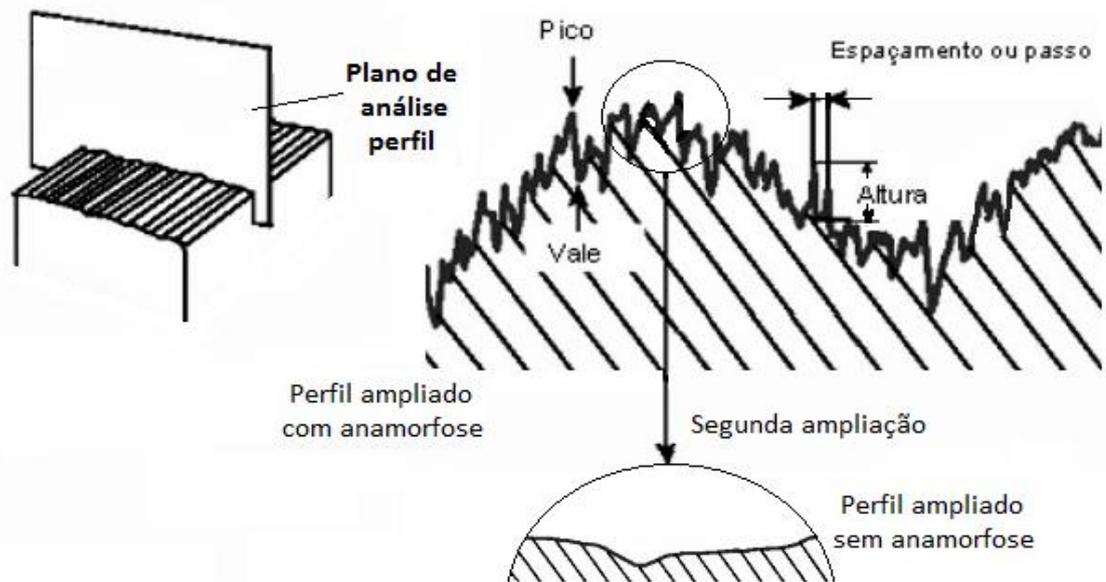


Figura 4.8. Representação do perfil e da anamorfose presente [Morais, 2006].

Existe uma gama alargada de meios de avaliação dos estados de superfície em geral, através da análise de uma área ou da análise ao longo de um perfil. Entre os diversos meios de avaliação dos estados de superfície, o mais utilizado nas investigações científicas e na indústria em geral, é o Instrumento Apalpador ou Perfilómetro de Contato completo, representado esquematicamente na figura 4.9 [Morais, 2006].

O princípio de medição mecânica da rugosidade de uma superfície segue o mesmo princípio de funcionamento empregado no Perfilómetro desenvolvido por Gustav Schultz em 1934. Nestes apalpadores mecânicos, em geral fabricados em material de altíssima dureza e resistência ao desgaste, percorrem o comprimento total de medição, sofrendo uma amplificação por meio mecanismos finos como alavancas, engrenagens e sapatas, que fornece um sinal de saída proporcional ao deslocamento sofrido pelo apalpador. O sinal mecânico é convertido em sinal elétrico pelo transdutor e passa a ser tratado eletronicamente até o registo dos valores medidos [Rolin, 2012].

Para as medições de superfícies obtidas por maquinagem, cumpre destacar a importância dos filtros eletrónicos e filtros mecânicos.

Entre os filtros mecânicos, a sapata mostrada na figura 4.10, permite de maneira simples reduzir ou até retirar o efeito do desvio de forma, apresentado na figura 4.8, uma das parcelas do perfil efetivo. Esta variação não periódica é em geral causada por distorções ou empenamento no dispositivo de fixação do componente na máquina [Fernandes, *et al.* 2008].

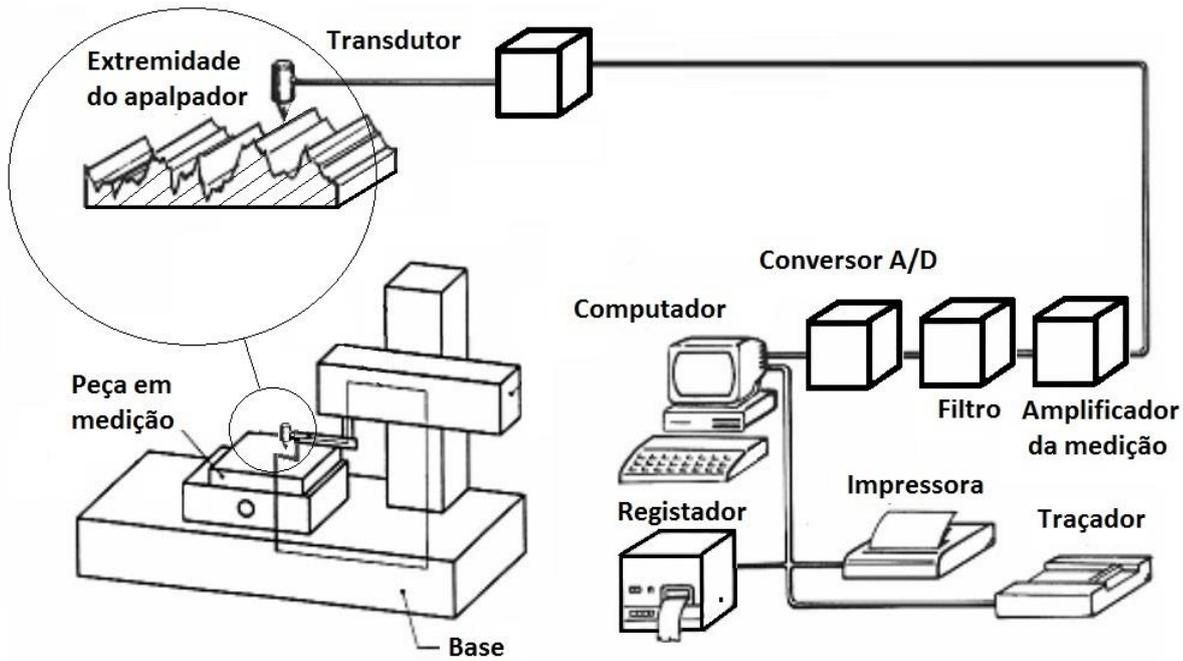


Figura 4.9. Avaliação dos estados de superfície por Perfilômetro de Contato. Unidade de medição e unidade de processamento de medidas.

Os filtros eletrônicos são em geral para reduzir ou eliminar imperfeições repetitivas ou periódicas que são causadas pelo avanço da ferramenta durante o processo de maquinação do componente em fabrico. Segundo [Raja, *et al.*, 2002], as principais funções matemática utilizadas nos filtros eletrônicos são a função 2RC, a função Gauss, o Spline e a Regressão Gaussiana Robusta.

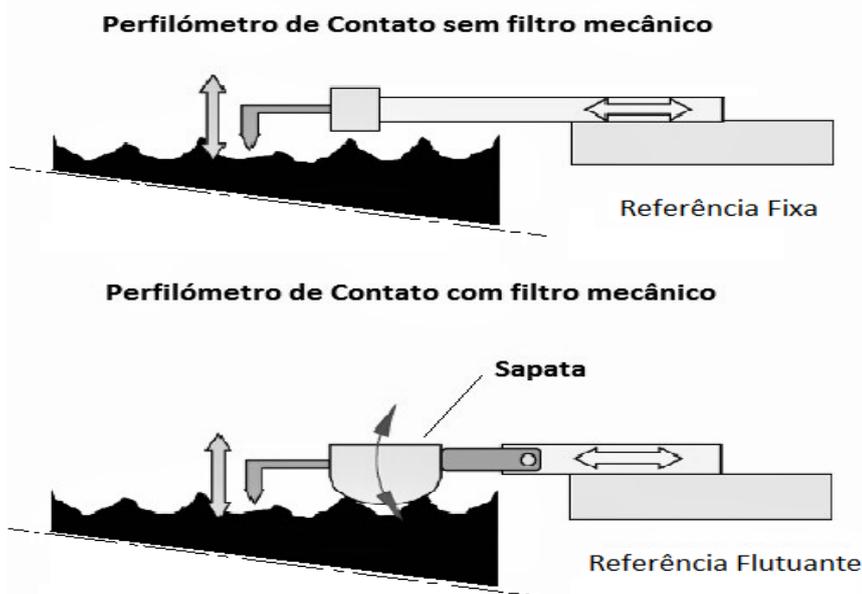


Figura 4.10. Perfilômetro de Contato, filtro mecânico por sapata.

Todas tomam como base para filtragem eletrônica, o padrão de linhas igualmente espaçadas oriundas do avanço da ferramenta de maquinação ou em alguns em alguns casos, o padrão esperado de rugosidade para o perfil específico.

Existem vários sistemas adotados para medição de rugosidade e todos eles fixam a forma do cálculo e determinação prática dos Parâmetros de Avaliação da Rugosidade, balizados por padrões precisos para cada tipo de resultado. O Sistema M e o Sistema E são os mais utilizados nas investigações científicas e na indústria de maneira geral. O Sistema M adota a determinação de uma linha média que divide as áreas do perfil de rugosidade. Tal linha média passa a ser a referência nas medições de picos e vales. Já o Sistema E, são linhas de envoltório determinadas por dois círculos que rolam sobre a superfície em estudo.

No Sistema M os Parâmetros de Avaliação da Rugosidade denominados Rugosidade média (R_a) e Rugosidade máxima (R_z) são muito utilizados na determinação do da textura primária num determinado perfil em análise, nomeadamente nos perfis produzidos por maquinação, conforme a figura 4.8 mostra.

Os parâmetros Rugosidade média (R_a) e Rugosidade máxima (R_z), foram adotados neste estudo como referência de avaliação de rugosidade, em razão do uso extensivo destes valores em experimentos académicos e na indústria de maneira geral.

A Rugosidade média (R_a) pode ser definida com sendo a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento (y_i), dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição (l_m) [Correia, 2017]. Esta grandeza pode ser representada como sendo a altura de um retângulo, cuja área é igual à soma absoluta das áreas delimitadas entre o perfil de rugosidade e a linha média. Tendo por comprimento o percurso de medição (l_m), a equação (4.6) permite calcular (R_a), como mostra a figura 4.11, numa forma esquematizada e ampliada [NBR ISO 4287, 2002].

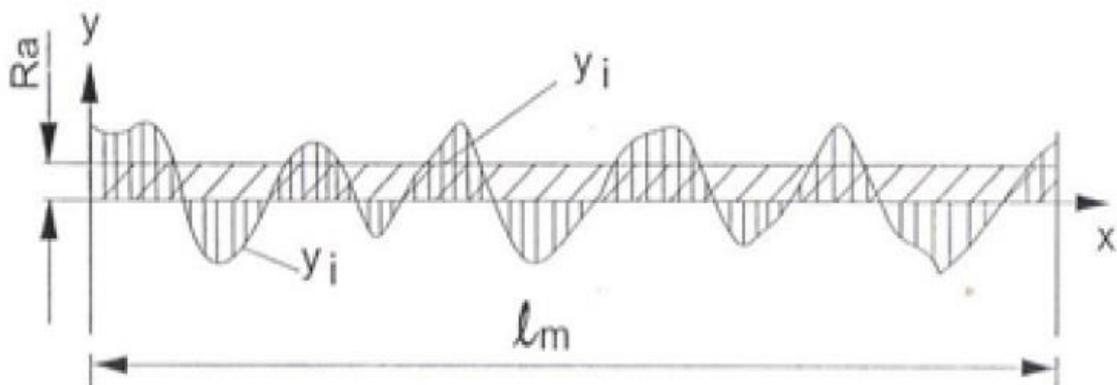


Figura 4.11. Rugosidade média (R_a) [Marchiori, 2013].

$$R_a = \frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} |Z(x)| dx \quad (4.6)$$

A rugosidade parcial (R_z) é definida como a soma da altura máxima dos picos do perfil (Z_p) com a profundidade máxima dos vales do perfil (Z_v), dentro de um comprimento limite de amostragem (*cutoff*), aqui identificado como (l_e). Este parâmetro pode ser calculado ou obtido graficamente [Silva, 2006].

A norma [NBR ISO 4287, 2002] baseada na norma [ISO 4287, 1977] e a instrução do fabricante *Mitutoyo*, [Bulletin No. 2229, 2016], definem Rugosidade máxima (R_z) como sendo um parâmetro de rugosidade, corresponde à média aritmética dos 5 valores de Rugosidade parcial (R_z) [Pereira, 2011]. Em alguns casos, o valor o Percurso de medição (l_m) e o valor do Percurso total de medição, na linha média (l_t), assumem valores iguais.

A rugosidade local (Z_i) é definida como a soma dos valores absolutos das ordenadas dos pontos de maior afastamento, acima e abaixo da linha média, existentes dentro de um (l_e), comprimento limite de amostragem (*cutoff*). Na representação gráfica do perfil, este valor corresponde à altura entre os pontos máximo e mínimo do perfil, calculado pela equação (4.7) e dentro do comprimento (l_e) de amostragem, figura 4.12 [Rolin, 2012].

$$R_z = \frac{1}{n} (R_{z_1} + R_{z_2} + \dots + R_{z_n}) \quad (4.7)$$

$$n = \frac{l_m}{l_e} \quad (4.8)$$

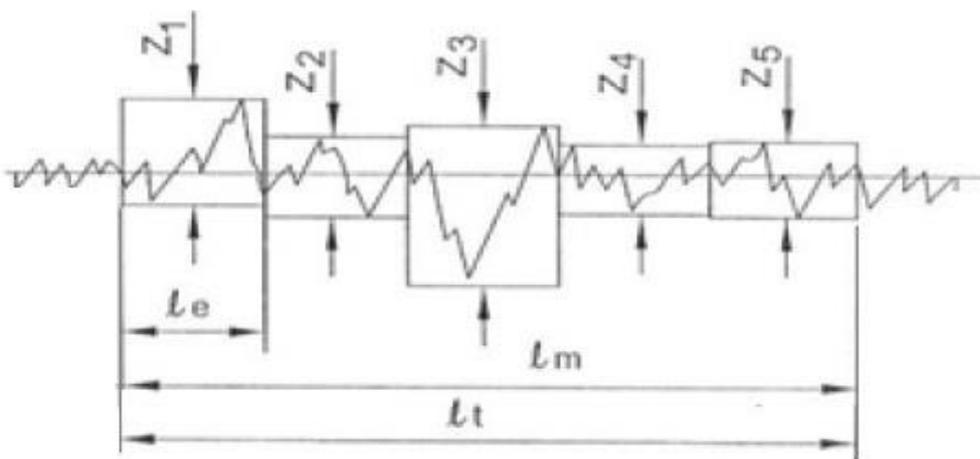


Figura 4.12. Rugosidade máxima (R_z).

Entre os diversos parâmetros de avaliação da superfície maquinada existentes, a Rugosidade média (R_a) e a Rugosidade máxima (R_z) foram adotadas no desenvolvimento deste estudo.

4.6 – Temperatura na região de corte durante a maquinagem

Durante a execução do processo de maquinagem, o aquecimento localizado na área de contato entre o material e a ferramenta de corte é considerado um importante fator para o desempenho da ferramenta e também, pode ser considerado como uma das causas de eventuais danos provocado na superfície do material maquinado.

No ponto onde o material é cortado no processo de maquinagem, a temperatura próxima da ferramenta de corte pode atingir valores altos, em parte causado pelo forte atrito da ferramenta com o material que está sendo maquinado. O maior valor de temperatura medido durante o processo de maquinagem é identificado como sendo a Temperatura máxima (T_{max}), sempre para uma específica condição de corte.

Conforme mencionado em 2.3.2, Resina de epoxídica e temperatura vítrea, os valores elevados de temperatura na citada região precisam ser medidos e comparados com o valor da Temperatura de transição vítrea (T_G).

Além disto, a medida da temperatura durante o corte é o fator mais importante na investigação e seleção de ferramentas, permitindo controlar os aspetos que influenciam no uso, na vida e no desgaste das mesmas [Casto, *et al.*, 1994].

A temperatura, também, influencia a precisão da máquina e a rugosidade superficial do acabamento final obtido na superfície maquinada [Ay, Yang, 1997].

Existem diversos métodos experimentais para medição da temperatura na região de corte. Os mais usados são o método Calorimétrico, leitura por Termopar, o método por Vernizes Termo Sensíveis e a medição associada à Radiação Emitida.

No método Calorimétrico, a temperatura média das aparas geradas na maquinação é determinada pelo calorímetro de água. O interior do dispositivo é isolado termicamente do ambiente e recebe as aparas geradas em um determinado tempo, fazendo variar a temperatura da água. Através de equações calorimétricas que consideram o peso total das aparas, a temperatura inicial e final da água, é possível determinar a temperatura média de entrada das aparas.

O método por Vernizes Termo Sensíveis utiliza um material com a propriedade de mudar de cor ao sofrer aquecimento. Seguindo uma tabela de conversão de cor em temperatura é

possível estimar seu valor. Tal material é depositado na superfície da ferramenta ou na superfície do material a se maquinado.

No outro método utilizado, um termopar é colocado na superfície da ferramenta ou na superfície do material a se maquinado, na região próxima do corte.

O método baseado na Radiação Emitida só passou a ser usado a partir do desenvolvimento do Pirômetro, instrumento usado para inferir temperaturas sem que haja contato com a superfície aquecida ou resfriada.

Através da avaliação da radiação emitida por uma superfície e a comparação deste espectro com um padrão anteriormente estabelecido, é possível estabelecer valores de temperatura em uma região analisada.

O avanço tecnológico recente permitiu o desenvolvimento do termômetro infravermelho, que possui uma lente ótica, um sistema de amplificadores e filtros que transmitem a radiação do corpo até um sensor de radiação infravermelha. O sinal elétrico gerado pelo sensor é proporcional à radiação emitida a partir da região focada e pode ser associado a temperatura da superfície, por um processo de calibração do equipamento.

Dispositivos deste tipo permitem a construção de um espectro de cores, associadas às temperaturas de uma escala definida anteriormente e o registo gráfico desta imagem.

O estudo dos materiais metálicos durante o processo de maquinação pode lançar mão de qualquer um destes processos de determinação da temperatura na região de corte, em razão da alta condutividade térmica dos metais. Um exemplo disto é a condutividade térmica da liga de alumínio A850.0-F, à 25°C é de 166 [W/mK], segundo [Kaufman, Rooy, 2004].

No entanto, para leitura desta mesma temperatura quando da maquinação de compósito, quase que exclusivamente, é utilizado o método baseado na Radiação Emitida, termômetro infravermelho, também conhecido como câmara termográfica.

Isto está relacionado a baixa condutividade térmica do compósito em geral, que dificulta a leitura por termopar sobre a superfície do material ou por Vernizes Termo Sensíveis.

Apenas como exemplo e referência, a condutividade térmica da resina curada epoxídica, Biresin®CR83, a 25°C é inferior 0,3 W/mK, segundo [Chung e Lin, 2016].

A importante medição do valor normalmente elevado de temperatura na região de corte da ferramenta foi realizada com câmara termográfica e comparado com o valor limite da Temperatura de transição vítrea (T_g), no desenvolvimento deste trabalho.

4.7 – Meios lubrificantes e refrigeração durante a maquinagem

Não foi aplicado nenhum meio lubrificação ou aspiração de aparas neste procedimento, considerando premissas iniciais definidas no começo do Capítulo 5, limitando este desenvolvimento apenas aos processos e materiais comumente encontrados nas indústrias de médio e pequeno porte do setor de produção e comercialização de compósitos.

FABRICO DE BLOCO E PLACA DE COMPÓSITO

5.1 - Introdução

O método de fabrico do bloco ou placa de compósito com fibra curta de carbono é etapa essencial deste desenvolvimento em razão das características específicas que o material precisa apresentar, nomeadamente maquinabilidade, isotropia adequada e resistência mecânica comparável às ligas de alumínio em uso.

Ademais, umas das premissas iniciais neste desenvolvimento foi a utilização de processos e materiais comumente encontrados nas indústrias de médio e pequeno porte do setor de produção e comercialização de compósitos, que limita a utilização determinados materiais e equipamentos. Por esta razão, foi adotado um método simplificado de cura da resina em temperatura ambiente, seguido de endurecimento por de 12 Horas. Nos processos realizados nos laboratórios do fabricante da resina, existe um procedimento que controla a temperatura, pressão, humidade e contaminação ambiental.

Esta investigação experimental foi realizada seguindo estas diretrizes iniciais, especialmente neste capítulo, proporcionando diretrizes para estudos e trabalhos futuros que abordem a otimização de processos e materiais utilizados.

5.2 - Método de fabrico de bloco e placa de compósito

Entre as técnicas e processos para o fabrico de componentes e partes em compósito apresentados no capítulo 2, subitem 2.5, foi escolhida o processo de fabricação por compressão, em razão de simplicidade e uso em empresas de pequeno e médio porte do setor de produção de peças em compósito. Considerando as possíveis formas bloco ou placa, a escolha recaiu sobre o formato de placa na dimensão de 100mm de largura, 150mm de comprimento e 5mm de espessura.

A figura 5.1 mostra esquematicamente o molde e o contramolde montados sob efeito de compressão da força aplicada (F).

As placas de compósitos foram fabricadas pelo processo de moldagem manual e pressionadas no molde em uma máquina servo mecânica, modelo W15 de Compressão, fabricante Mazzola, como é mostrado na figura 5.2, foto do local.

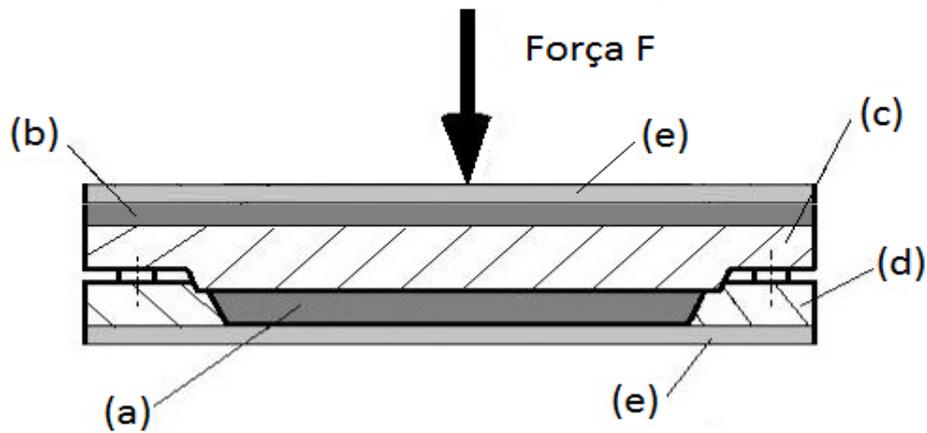


Figura 5.1. Molde e contramolde montados: (a) Placa de compósito; (b) Membrana de borracha; (c) Contramolde em aço; (d) Molde em aço; (e) Base removível em alumínio.

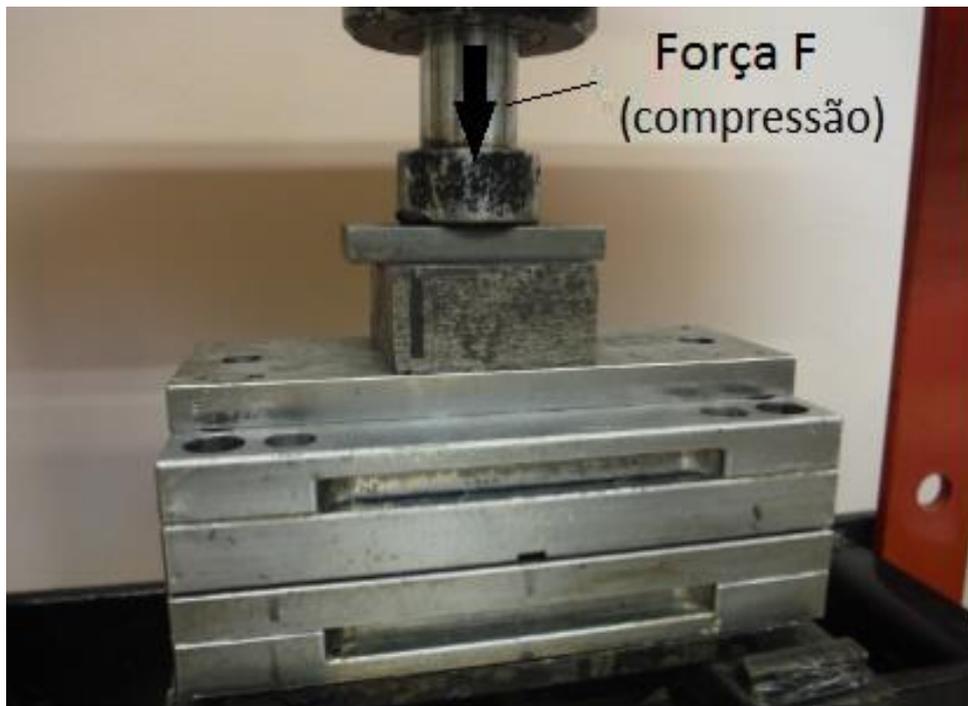


Figura 5.2. Molde em compressão e pórtico da prensa modelo W15, Mazzola (F. Autor).

A cura da matriz do compósito ocorreu em condições ambiente sob compressão da prensa modelo W15, Mazzola. A força aplicada durante a cura foi de 7500 daN, que corresponde a uma pressão sobre o molde ao redor de 50,7 bar.

Encerrado o processo de cura da matriz do compósito, o molde foi desmontado para retirada da placa fabricada, conforme esquematiza a figura 5.3.

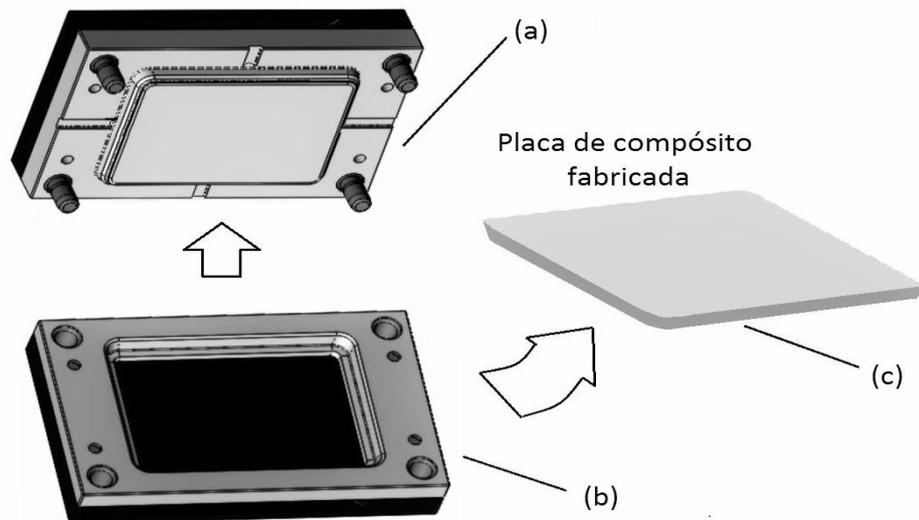


Figura 5.3. Retirada da placa de compósito fabricada do molde, contramolde: (a) Contramolde em aço; (b) Molde em aço; (c) Placa de compósito de 5mm x 100mm x 150mm.

O produto obtido neste processo simplificado de fabricação é mostrado na figura 5.4, antes do processo de maquinagem.



Figura 5.4. Placa de compósito, largura 100mm, comprimento 150mm e espessura 5mm, antes do processo de maquinagem (F. Autor).

Este processo de compressão utilizado para fabricação de placas em compósito de fibras curtas de carbono apresenta simplificações em relação ao detalhado no Capítulo 2, subitem 2.5.4, Fabricação de componentes em molde por compressão. No entanto, tais simplificações são comumente adotadas em indústrias de pequeno e médio porte.

5.3 - Seleção da matriz e reforçador utilizados nas placas de compósito

A seleção da matriz e do reforçador de cada compósito processado e testado neste desenvolvimento foi feita com base nas das premissas iniciais adotadas e mencionadas na introdução deste capítulo.

5.3.1 - Seleção da matriz utilizada nas placas de compósito

No capítulo 2, subitem 2.3, os principais tipos de resina foram apresentados e conceitualmente analisados.

No mesmo subitem, fica claro que o uso de matriz polimérica no fabrico de componentes e partes com compósitos é quase uma regra nas indústrias desta área [Romão, 2012].

Os diversos tipos de polímeros desenvolvidos deram origem a duas classes matrizes em uso, conhecidas como:

- Matriz polimérica termo rígida
- Matriz polimérica termoplástica

A matriz termo rígida, também denominada termoendurecível, quando aquecida a uma temperatura predefinida, assumem uma forma permanente sólida que se mantém mesmo quando a massa é resfriada. Esta característica faz das resinas termoendurecidas a matriz mais adequada à aplicação proposta.

No Capítulo 2, a tabela 2.1 mostra características e propriedade gerais de algumas matrizes termo rígidas utilizadas na indústria náutica, automotiva e aeroespacial [Mangalgiri, 1999].

Na mesma tabela é possível observar que as resinas epoxídicas termoendurecidas têm características e propriedades que melhor se adequam ao fabrico de componentes e partes em compósito, onde o número de peças por lote de produção é pequeno.

Considerando estas informações apresentadas, a escolha da resina para uso neste desenvolvimento, ficou assim definida:

Resina utilizada nos provetes com comprimento de fibra 6,0mm e 2mm; Biresin®CR120, combinada com o endurecedor CH120-3, fornecidos pela Sika [Capela, *et al.*, 2017]. No Anexo 2, Parte 1, foi disponibilizado uma especificação resumida deste produto.

Resina utilizada nos provetes com comprimento de fibra 0,5mm; Biresin®CR83, combinada

com o endurecedor CH83-2, fornecidos pela Sika [Correia, 2017]. No Anexo 2, Parte 2, foi disponibilizado uma especificação resumida deste produto

A tabela 5.1 resume as propriedades e características matriz epoxídica adotada.

Tabela 5.1 Propriedades e características matriz epoxídica adotada, CR-120 e CR-83

| Código resina epoxídica, Sika Deutschland, GmH | Densidade Resina curada [g/cm ³] | Deformação máxima em Tração [%] | Tensão rutura tração [MPa] | Módulo de Elasticidade Tração [MPa] | Temperatura Transição Vítrea [°C] |
|--|---|--|-------------------------------------|--|--|
| Biresin [®] CR120, bisfenol, A-epichlorhydrin 1,4-bis (2,3-epoxypropoxy) butane, hardener CH120-3 | 1,16 | 3,8 | 76 | 3400 | 113 |
| Biresin [®] CR83, bisfenol, A-epichlorhydrin 1,4-bis (2,3-epoxypropoxy) butane, hardener CH183-2 | 1,15 | 6,7 | 84 | 2960 | 84 |
| Observação: CR120, Propriedades mensuradas 16 horas após cura completa, na temperatura 55°C, conforme Anexo 2, Parte 1 e [Wildhagen, Michalek, 2014]. CR84, Propriedades mensuradas após cura completa, na temperatura 25°C, conforme Anexo 2, Parte 2 e [Wildhagen, Michalek, 2016]. | | | | | |

Todos os demais valores disponibilizados no Anexo 2, parte 1 e 2, foram obtidos em exaustivos ensaios feitos pelo fabricante, em condições laboratoriais ideais. Assim, é esperada uma redução nos valores apresentados pela especificação do fabricante, quando comparada à preparação e cura em condições industriais normalmente observadas em indústrias de médio e pequeno porte. Desta maneira, tais informações devem ser consideradas como o máximo possível de ser alcançadas com este tipo de resina epoxídica.

5.3.2 - Seleção do reforçador utilizado nas placas de compósito

A seleção do reforçador adotado neste desenvolvimento, foi baseado no capítulo 2, subitem 2.4, tabela 2.3, que mostra características e propriedades de materiais utilizados como reforçadores em matriz polimérica, na indústria náutica, automotiva e aeroespacial [Moura, *et al.*, 2005].

A tabela 2.2 mostra o resultado médio das propriedades mecânicas possíveis com a combinação de matriz epoxídica com vários tipos de fibras.

Uma análise direta dos dados permite identificar a combinação resina epoxídica com fibra de carbono como a melhor escolha entre os materiais para reforçadores disponíveis nas empresas de médio e pequeno porte do setor de fabrico de peças em compósito.

Desta maneira, o reforçador adotado neste desenvolvimento foi a fibra de carbono cortada nos comprimentos 6mm, 2mm e 0,5mm [Apply, Procotex, 2015]. Analisando referência [Tiensong et al., 2008], foi possível estabelecer os valores de comprimento adotados.

A tabela 5.2 mostra um resumo das principais propriedades e características do reforçador adotado. No Anexo 2, Parte 3, foi disponibilizado uma especificação resumida deste produto.

Tabela 5.2 Propriedades e características do reforçador, fibra curta de carbono.

| Código fibra carbono, Apply Carbon, S. A. Procotex, S. A. | Densidade fibra carbono [g/cm ³] | Diâmetro médio da fibra [μm] | Tensão ruptura tração [MPa] | Módulo de Elasticidade Tração [GPa] | Deformação máxima em Tração [%] |
|---|---|---------------------------------------|--------------------------------------|--|--|
| CF – 6 mm, ± 0,1 CF – 2 mm, ± 0,1 CF – 0,5 mm, ± 0,1 | 1,85 | 7,0 ± 2 | 3500 | 230 | 1,5 |
| Observação: Fibra cortada de carbono, Propriedades mensuradas na temperatura 25°C, conforme Anexo 2, Parte 3 e [Apply, Procotex, 2015]. Fibra produzida a partir do processo ex-PAN, com 94% de carbono contido. | | | | | |

5.4 – Fabrico de placas com reforçador de 6mm, 2mm e 0,5mm

Considerando as premissas iniciais apresentadas na introdução deste capítulo, foi adotado um método simplificado de cura da resina em temperatura ambiente, seguido de endurecimento por de 12 Horas. Nos processos realizados nos laboratórios do fabricante resina, existe um procedimento que controla a temperatura, pressão, humidade e contaminação ambiental.

Primeiramente foi realizado um procedimento manual de separação das fibras sobre uma folha de papel, visando desembaraçar as fibras cortadas. Em seguida, as fibras desembaraçadas são colocadas num recipiente contendo 150 ml do solvente diclorometano, para decolar filamentos e limpar a superfície dos filamentos, eliminando resíduos de lubrificantes e água. Esta mistura é agitada por vibração mecânica durante 5 minutos, seguida de um período de 3 minutos em repouso.

A mistura de fibras cortadas e solvente é colocada num equipamento de limpeza por ultrassons pelo período de 7 minutos com o intuito de aumentar a dispersão das fibras e eliminar impurezas ainda aderentes aos filamentos cortados.

A mistura passa por filtros separando as fibras do solvente contaminado. As fibras são colocadas numa peneira metálica para secagem à temperatura ambiente, durante cerca de 40 horas.

Na segunda etapa, a resina epóxi já misturada ao catalisador nas proporções indicadas pelo fabricante, recebe a percentagem mássica de fibra predeterminada para a placa em fabrico.

A resina misturada à fibra é agitada por um bastão de vidro num recipiente por 5 minutos para dispersar as fibras cortadas, criando uma mistura homogénea.

Para a retirar das bolhas de ar introduzidas durante o procedimento realizado, a mistura é submetida ao vácuo por um tubo sugador especial, durante 10 minutos.

Na terceira etapa, a mistura de fibras com resina é colocada na cavidade do molde num volume maior do que o volume da placa a ser fabricada. O contra molde é montado permitindo a saída do excesso de mistura.

O molde e o contramolde é posicionado no pórtico da prensa para aplicação a um esforço de compressão, conforme mostrado nas figuras 5.1 e 5.2.

A compressão sobre o conjunto é mantida por no mínimo 12 horas. Concluído o processo de cura, a placa é então retirada do molde como mostra a figura 5.3.

O processo foi realizado com sucesso, resultando em três tipos de compósito reforçado com fibra curta de carbono e matriz epoxídica, caracterizados e identificados na tabela 5.3.

Conforme mencionado no Capítulo 4, subitem, 4.4, Escolha da máquina e ferramenta para o procedimento de fresagem as placas de compósito foram maquinadas

O mesmo trabalho sugere que a maquinagem em equipamento CNC, processo de fresagem, com ferramenta a ferramenta da marca Sandvik, tipo de corte na direção Radial, Topo, modelo R390-020A20-11M [Sandvik, 2016].

Cada provete fabricado recebeu um código que seguiu o padrão CCmm_VV%_RRRR_n, onde o número CC indica em milímetro o comprimento médio da fibra cortada. O valor VV corresponde à fração volúmica de fibra. O RRRR é a rotação da ferramenta de corte no processo de fresagem e n é o número sequencial do provete.

Pelo comprimento médio da fibra de carbono é possível identificar na tabela 5.3, o correspondente compósito no provete assim identificado.

Tabela 5.3 Identificação e características dos compósitos fabricados neste desenvolvimento.

| Código do compósito | Comprimento Médio da Fibra [mm] | Código resina epoxídica Sika Deutschland GmhH | Fração volúmica de fibra [%] | Fibra; Apply Carbon, Procotex | Temperatura Transição Vítrea [°C] |
|--|---------------------------------|--|------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| Compósito 1 | 6,0 | Biresin [®] CR120, bisfenol, A-epichlorhydrin 1,4-bis (2,3-epoxypropoxy) butane, hardener CH120-3 | 61,0 | CF – 6 | 113 |
| Compósito 2 | 2,0 | Biresin [®] CR120, bisfenol, A-epichlorhydrin 1,4-bis (2,3-epoxypropoxy) butane, hardener CH120-3 | 61,0 | CF – 2 | 113 |
| Compósito 3 | 0,5 | Biresin [®] CR83, bisfenol, A-epichlorhydrin 1,4-bis (2,3-epoxypropoxy) butane, hardener CH183-2 | 17,5 | CF – 0,5 | 84 |
| Tipo do compósito | Fração Volúmica | Comprimento médio da fibra de carbono cortada (mm) | ρ_m matriz | ρ_r reforço | Fração Mássica |
| Compósito 1 | 61,0% | 6,0 | 0,9500 | 1,8400 | 75,0% |
| Compósito 2 | 61,0% | 2,0 | 0,9500 | 1,8400 | 75,0% |
| Compósito 3 | 17,5% | 0,5 | 0,9500 | 1,8500 | 29,2% |
| <p>Observação: CR120, Propriedades mensuradas 16 horas após cura completa, na temperatura 55°C, conforme Anexo 2, Parte 1 e [Wildhagen, Michalek, 2014]. CR84, Propriedades mensuradas após cura completa, na temperatura 25°C, conforme Anexo 2, Parte 2 e [Wildhagen, Michalek, 2016]. Fibra [Apply, Procotex, 2015]. Densidade da matriz ρ_m, resina e endurecedor, mistura anterior a cura. Conversão $W_f = (V_f \cdot \rho_r) / [(V_f \cdot \rho_r) + [(1 - V_f) \cdot \rho_m]]$, equação (1.3).</p> | | | | | |

PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS E TEORIA ASSOCIADA

6.1 - Introdução

A execução de experiência controlada que testa a hipótese ou teoria formulada, é um dos passos obrigatórios na aplicação da metodologia científica [Marsulo e Silva, 2005].

Este capítulo apresenta de maneira resumida os procedimentos e equipamentos usados na realização da etapa experimental deste desenvolvimento.

6.2 – Medição de densidade

Existem diversas formas de mensurar a densidade do compósito, conforme mencionado no Capítulo 1, subitem, 1.3.1.1. Densidade e Princípio de Arquimedes.

Um dos mais simples é através da preparação de uma balança analítica de precisão para medir (m_s) massa seca, (m_m) massa do corpo ou provete emerso em água [Barbosa, Breitschaft, 2006].

A figura 6.1, apresenta esquematicamente as etapas necessárias para definição dos valores de (m_s) e (m_m). Inicialmente é colocada sobre a balança de precisão, a massa do conjunto formado por vasilhame, água e suporte de sustentação do provete. A função Eliminar Tara é acionada, retirando da leitura da massa inicial. Em seguida o corpo é posicionado fora da água e a leitura é registada como (m_s). Finalmente, o cabo é deslocado submergindo o corpo e a nova leitura é registada como (m_m).

A mensuração da densidade de cada provete foi realizada usando a balança de precisão, AND, modelo GH-202, à temperatura controlada do laboratório ajustada em 25,0 °C.

A temperatura da água destilada colocada no recipiente na mesma condição térmica da sala, variou entre 25,3 °C e 26,1 °C e na leitura do valor de massa, a temperatura da água foi medida por termopar e registada na folha de cálculo de densidade. Os valores mensurados relativos a densidade do material dos provetes, estão apresentados no Capítulo 8, subitem 8.2, Fração volúmica, porosidade e Densidade do Compósito de Estudo



Figura 6.1. Medida da (m_s), massa seca e (m_m) massa do provete emerso em água.

6.3 - Geometria e dimensões dos provetes

A fabricação dos provetes a partir da maquinação de placas de compósito, em equipamento CNC, seguiu os procedimentos apresentados no Capítulo 5, Fabrico de bloco e placa de compósito, subitem 5.5 – Maquinagem dos provetes. Tais processos garantiram as dimensões exigidas pela figura 5.3, Geometria e dimensões dos provetes dos provetes, para este tipo de experimentos laboratoriais.

No entanto, face a importância fundamental do valor da área da seção submetida ao ensaio de tração uniaxial no resultado da Tensão média à tração (σ_m), as dimensões da seção de cada provete foram medidas e registadas nas folhas de cálculo, no correspondente ID do provete testado.

Neste desenvolvimento cada particular seção retangular do provete foi medida com paquímetro digital Mitutoyo, *model* 402, intervalo de medição de 0-150 mm, resolução 0,01 mm e exatidão entre +0,02 e -0,02 mm.

6.4 - Medição dos parâmetros de rugosidade

A textura que surge das características singulares das ferramentas e equipamentos de maquiagem é resultado em parte de todos os processos de fabrico aplicados na preparação da cada superfície [Rolin, 2012]. A avaliação da condição superficial observada nos provetes testados neste estudo, foi realizada conforme apresentado e detalhado no Capítulo 4, subitem 4.5, mostrando a rugosidade, conceitos e normas utilizadas.

Os ensaios de rugosidade foram realizados usando um Perfilômetro de Contato, com filtro eletrônico e filtro mecânico por sapata, *Mitutoyo Surftest, Analyzer for Surftest Series 178, model 402*, figura 6.2, de acordo com a norma [NBR ISO 4287, 2002] baseada na norma [ISO 4287, 1997] e a instrução do fabricante *Mitutoyo*, [Bulletin No. 2229, 2016]. Uma especificação técnica do equipamento de ensaio *Mitutoyo Surftest, model 402*, pode ser consultada no Anexo1, Parte 3.



Figura 6.2. Perfilômetro de Contato, *Mitutoyo Surftest, model 402* (F. Autor).

Foram realizadas medições em cada provete buscando regiões diferentes da superfície e selecionadas aleatoriamente. O valor da rugosidade máxima, (R_z) e o valor da rugosidade média (R_a), foram registrados. Estas medições foram realizadas com uma velocidade de avanço da ponta do perfilômetro fixado em 1 mm/s, seguindo os pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição (l_t). Conforme tabela 6.1, sugerida pelo fabricante do equipamento [Bulletin No. 2229, 2016] e [Marchiori, 2013], o percurso de medição (l_t) foi adotado igual a 12,5mm, que corresponde ao valor do comprimento limite de amostragem (*cutoff*) igual a 2,5mm, multiplicado por 5, número de amostras parciais adotado.

Tabela 6.1. Comprimento limite de amostragem (*cutoff*), recomendado.

| Rugosidade R_a [μm] | Mínimo <i>cut – off</i> [mm] |
|------------------------------------|------------------------------|
| De 0 até 0,1 | 0,25 |
| Maior que 0,1 até 2,0 | 0,80 |
| Maior que 2,0 até 10,0 | 2,50 |
| Maior que 10,0 | 8,00 |

Conforme [Marchiori, 2013], o ajuste do equipamento relativo ao percurso de medição (l_t) tem pouca influência na determinação da rugosidade média (R_a). No entanto a rugosidade máxima (R_z), é bastante alterada por este valor ajustado.

Os valores medidos da rugosidade média (R_a) e da rugosidade máxima (R_z), estão apresentados nos capítulos de resultados obtidos.

6.5 - Medição da temperatura de corte no processo de maquinagem

No ponto onde o material é cortado no processo de maquinagem, a Temperatura máxima (T_{max}) na região próxima da ferramenta de corte pode atingir valores altos, em parte causado pelo forte atrito da ferramenta com o material a ser maquinado.

A avaliação da temperatura presente nos provetes durante o processo de maquinagem foi realizada conforme apresentado no Capítulo 4, subitem 4.6, Temperatura na região de corte durante a maquinagem.

A medição do valor normalmente elevado de temperatura na região de corte da ferramenta, foi efetuado com câmara termográfica para ser comparado com o valor limite da Temperatura de transição vítrea (T_G), ao longo do desenvolvimento deste estudo.

O equipamento usado nas medições de temperatura foi a Câmara Termográfica, Testo, *model 875-2i, serie number 60456481*, figura 6.3.

Uma especificação técnica do equipamento de medição Testo, *model 875-2i*, pode ser consultada no Anexo1, Parte 2.



Figura 6.3. Câmara Termográfica, Testo, *model 875-2i* (F. Autor).

Os valores medidos da temperatura na região de corte do material durante o processo de maquinagem, estão apresentados nos capítulos de resultados obtidos.

6.6 - Ensaio de tração uniaxial

Os ensaios de tração uniaxial tiveram como objetivo determinar a Tensão média máxima de rutura a tração (σ_{\max}), a deformação do material submetido a tensão e consequentemente, o Módulo de Elasticidade (E), também chamado de Modulo Young. Todos os ensaios decorreram à temperatura ambiente e segundo os procedimentos descritos na norma ASTM relativa ao procedimento deste ensaio [ASTM E8/E8M, 2013]. Foram usados provetes com geometria e dimensões mostradas no Capítulo 4, subitem 4.4, Escolha da máquina e ferramenta para o procedimento de fresagem, figura 4.4. Forma semelhante de provete foram também utilizados em trabalhos como [Ferreira, Richardson, 1997] e [Khan, 2013], no estudo de outros materiais.

Os ensaios foram realizados em máquina do tipo eletromecânico da marca Instron, High Wycombe, UK, *Universal Testing machine, model 4206*, com uma capacidade estrutural do pórtico de 100 kN, célula de carga de 50 kN e uma velocidade máxima do travessão de 500 mm/min, mostrada na figura 6.4. Esta máquina é constituída por um motor que através de um

sistema de polias e correias, transmite o movimento a dois parafusos sem fim, deslocando o travessão. Uma especificação resumida do equipamento pode ser consultada no Anexo 1, parte 4.

O movimento vertical do travessão superior da máquina induz a carga uniaxial no provete de ensaio. O controlo é feito por uma consola elétrica de comando, a qual permite ainda a aquisição em tempo real dos sinais da carga, deslocamento do travessão e extensão do provete. Os resultados podem ser registados numa impressora, ou adquiridos por uma porta interface IEEE-488 que possibilita a ligação da consola a um computador. Nos ensaios realizados foi utilizada uma taxa de deslocamento do travessão de 1 mm/min.



Figura 6.4. Máquina Instron, modelo 4206, ensaio de tração (F. Autor).

Durante o ensaio foram registados a carga e aumento de comprimento por deformação de uma determinada parte do corpo do provete, identificada pelo comprimento inicial (ℓ). O registo da carga aplicada e a deformação medida são usados para a obtenção do diagrama de ensaio de tração que, de modo geral, pode apresentar uma das configurações apresentadas nas figuras 6.18 e 6.19, como sugere [Branco, 1998] e [ASTM E8/E8M, 2013].

Neste tipo de diagrama é representado a Tensão média à tração (σ_m), na direção normal, em função da extensão nominal (ϵ). O valor da extensão é obtido pela divisão da variação do comprimento ($\Delta\ell$) com aplicação da força, pelo valor do comprimento inicial (ℓ) do provete submetido a esforço de tração, conforme mostra a equação (6.1).

$$\epsilon = \Delta\ell / \ell \quad (6.1)$$

A Tensão média à tração (σ_m) aplicada na direção normal e representada no diagrama, é calculada dividindo a força (F) pela Área inicial da secção (A_i) do provete, de acordo com a equação (6.2).

$$\sigma_m = F / A_i \quad (6.2)$$

Os materiais dúcteis apresentam valores elevados de extensão antes da rutura, como representado no diagrama da figura 6.5 [Branco, 1998] e [Gedney, 2002].

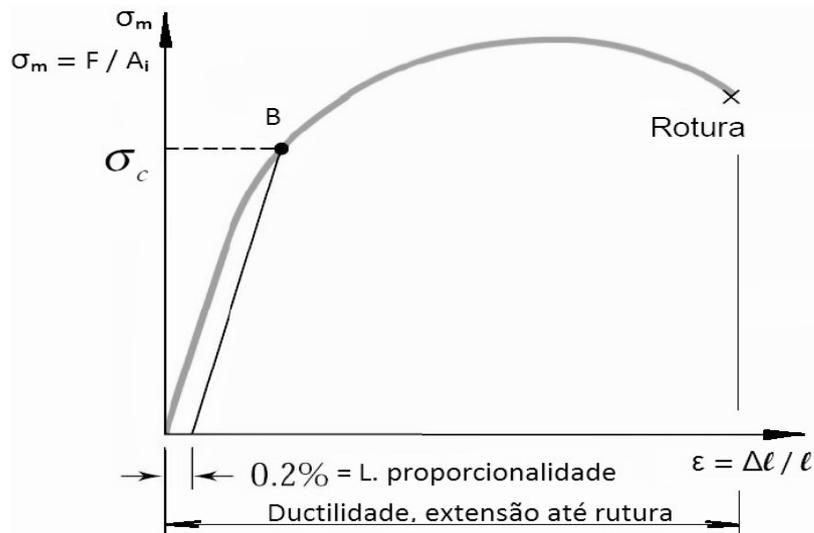


Figura 6.5. Diagrama de Ensaio de Tração para material Dúctil. Usado na comparação com dados obtido[Branco, 1998].

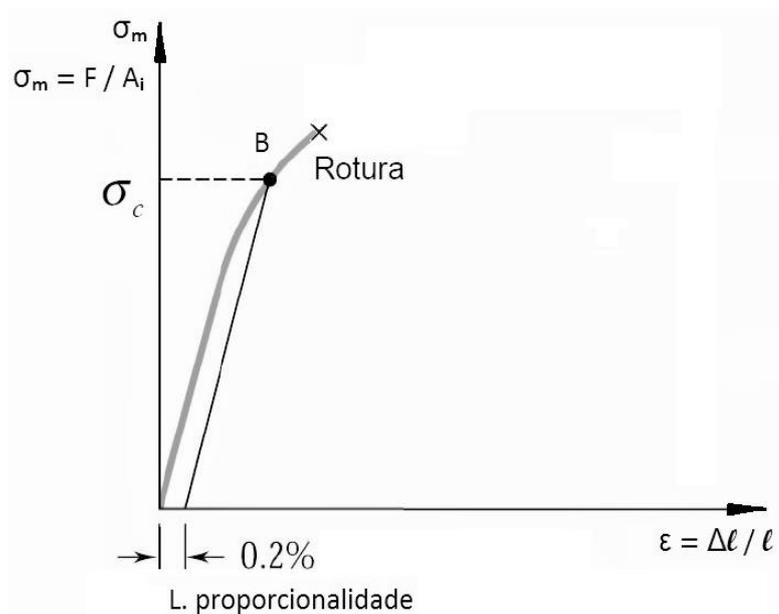


Figura 6.6. Diagrama de Ensaio de Tração para material Frágil. Usado na comparação com dados obtido [Branco, 1998].

Os materiais frágeis apresentam valores pequenos de extensão antes da rutura, como representado no diagrama da figura 6.6 [Branco, 1998].

O diagrama do ensaio de tração permite obter propriedades do material de importância fundamental para o projeto mecânico em geral [Branco, 1998]. Uma região do gráfico de alargado interesse é a parte caracterizada por um comportamento linear da Tensão média à tração (σ_m) em função da extensão nominal (ϵ). Esta linearidade caracterizada por um comportamento elástico somada a uma baixa histerese dá ao material um espectro aumentado de aplicações [Oliveira, 1984]. Num desenvolvimento inicial de um material, é estudado primeiramente o comportamento linear presente no diagrama de ensaio de tração e em estudos posteriores, são avaliadas a histerese e a fluência à temperatura ambiente.

A determinação do Módulo de Elasticidade, também conhecido como Módulo de Young, permite uma avaliação deste comportamento linear para materiais Dúcteis e Frágeis, como mostra as figuras 6.5 e 6.6, onde o ponto (A) representa a Tensão média limite de proporcionalidade (σ_p).

O valor de (E) pode ser determinado pela equação (6.3), onde (ϵ_p) é a Extensão no Limite de proporcionalidade.

O valor da Tensão média limite de proporcionalidade (σ_p) é determinado seguindo os critérios descritos na norma de ensaio [ASTM E8/E8M, 2013].

$$E = \sigma_p / \epsilon_p \quad (6.3)$$

Os valores medidos nos ensaios de tração uniaxial como a Tensão média máxima de rutura a tração (σ_{rut}) e a conseqüente determinação do Módulo de Elasticidade (E), estão apresentados nos capítulos de resultados obtidos.

6.7 - Ensaios de fadiga

Os ensaios de fadiga foram realizados com equipamento electro mecânico da Instron modelo ElectroPuls™ E10000 All-Electric Dynamic Test Instrument. Uma descrição completa do comportamento ao fenómeno de fadiga do compósito de estudo está apresentada no Capítulo 8 deste desenvolvimento. O artigo denominado “*Fatigue behavior of short carbon fiber reinforced epoxy composites*”, referência [Capela, et al., 2018], apresenta o comportamento frente ao fenómeno de fadiga para outras frações volúmicas e um procedimento envolvendo a previsão de vida à fadiga para uma fração volúmica adotada, numa determinada condição de carregamento de interesse.

6.8 - Análise microscópica da distribuição de fibra

A caracterização e análise da dispersão de fibras na superfície foi realizada diretamente sobre a face maquinada dos provetes. A operação de maquinagem cortou fibras e resina epoxídica expondo uma superfície apropriada para observação com auxílio de microscópio ótico, onde é possível visualizar posição relativa das fibras cortadas, espaços vazios e buracos provocados pela operação de maquinagem [Cardoso, 2013].

Tais equipamentos óticos estão acoplados a sistema informático, que captura a luz refletida ou transmitida em áreas transparentes e faz um tratamento da imagem de alta resolução.

A análise da dispersão das fibras ao longo do material matriz foi realizada recorrendo ao microscópio digital 3D modelo Hirox RH-2000, Câmara 2.38 Mega-pixel, CMOS Image Sensor, total de linhas e colunas em pixels 1952(H) ×1241(V).

6.9 - Microscopia eletrónica (SEM) da distribuição de fibra e secção de rutura

As análises realizadas nos gráficos de tensão em função da deformação e a observação da superfície da secção de fratura com auxílio de microscopia eletrónica (SEM), permitiu avaliar o tipo de fratura ocorrida em cada provete.

O Microscópio Eletrónico de Varrimento com Emissão de Campo da FEG SEM XL-30 Philips, Siemens, com EDS (Noran 6), campo de termiónico SEM, controlo das emissões inteiramente automático e resolução entre 800.000X com 2nm, foi usado nesta tarefa.

DISCUSSÃO E RESULTADOS FASE 1, SELEÇÃO DO COMPÓSITO

7.1 - Introdução da Fase 1 do desenvolvimento

Nesta fase denominada Fase 1, foram realizados estudos e ensaios em três formulações diferentes de compósito, com reforçador aleatoriamente distribuído e em direções variadas de fibra curta de carbono e matriz epoxídica.

Para os compósitos 1, 2 e 3, foram adotados como comprimento médio da fibra de carbono, os valores 6mm, 2mm e 0,5mm, respectivamente. A tabela 5.3 mostra a Identificação e características dos compósitos fabricados nesta fase do desenvolvimento.

Além disto, nesta fase foram realizados estudos comparativos, objetivando identificar a formulação do compósito que mais se adequa ou processo de fabrico propostos.

Os resultados e a discussão dos valores encontrados nesta fase do desenvolvimento estão em seguida apresentados, bem como, a comparação com bibliografia científica e tecnológica disponível.

7.2 – Resultados medição de rugosidade, fibra curta de 6mm, 2mm e 0,5mm

Os valores medidos da rugosidade média (R_a) e da rugosidade máxima (R_z), estão apresentados tabela 7.1, Resultado (R_a) e (R_z) para compósito com fibra 6 mm, 2 mm e 0,5mm.

Os valores do Desvio Padrão expresso em percentagem estão calculados conforme equação (1.7) apresentada no Capítulo 1, subitem 1.3, Metodologia científica e geral.

Os valores medidos da rugosidade média (R_a) estão representados no gráfico mostrado na figura 7.1, para permitir uma avaliação preliminar entre as composições de compósito de fibra curta com comprimento de 6mm, 2mm e 0,5mm.

Os valores medidos da rugosidade máxima (R_z) estão representados no gráfico mostrado na figura 7.2, para permitir uma avaliação preliminar entre as composições de compósito de fibra curta com comprimento de 6mm, 2mm e 0,5m.

Tabela 7.1. Resultado (R_a) e (R_z), comprimento de fibra 6mm, 2mm e 0,5mm.

| Fibra, Wp e Rotação | c [mm] | V _f [%] | r _f [rpm] | Rugosidade | |
|----------------------|--------|--------------------|----------------------|-----------------------------|------------------------------|
| | | | | R _a , Média [μm] | R _z , Máxima [μm] |
| 2mm_75%_4500_9 | 2 | 61 | 4500 | 7,90 | 25,0 |
| 2mm_75%_4500_8 | 2 | 61 | 4500 | 7,40 | 28,0 |
| Média [μm] | | | 4500 | 7,65 | 26,50 |
| Desvio Padrão [%] | | | | 3,27% | 5,66% |
| 2mm_75%_3000_7 | 2 | 61 | 3000 | 6,80 | 26,0 |
| 2mm_75%_3000_6 | 2 | 61 | 3000 | 6,40 | 17,0 |
| 2mm_75%_3000_5 | 2 | 61 | 3000 | 6,80 | 19,0 |
| Média [μm] | | | 3000 | 6,67 | 20,67 |
| Desvio Padrão [%] | | | | 3,00% | 4,84% |
| 2mm_75%_1500_4 | 2 | 61 | 1500 | 6,60 | 23,0 |
| 2mm_75%_1500_3 | 2 | 61 | 1500 | 6,20 | 19,0 |
| Média [μm] | | | 1500 | 6,40 | 21,00 |
| Desvio Padrão [%] | | | | 3,13% | 9,52% |
| 2mm_75%_750_2 | 2 | 61 | 750 | 6,30 | 25,00 |
| 2mm_75%_750_1 | 2 | 61 | 750 | 6,10 | 24 |
| Média [μm] | | | 750 | 6,20 | 24,50 |
| Desvio Padrão [%] | | | | 1,61% | 2,04% |
| 6mm_75%_4500_1 | 6 | 61 | 4500 | 8,80 | 31,0 |
| 6mm_75%_4500_2 | 6 | 61 | 4500 | 8,50 | 24,0 |
| Média [μm] | | | 4500 | 8,65 | 27,50 |
| Desvio Padrão [%] | | | | 1,73% | 12,73% |
| 6mm_75%_3000_3 | 6 | 61 | 3000 | 6,40 | 26,0 |
| 6mm_75%_3000_4 | 6 | 61 | 3000 | 7,20 | 25,0 |
| Média [μm] | | | 3000 | 6,80 | 25,50 |
| Desvio Padrão [%] | | | | 5,88% | 1,96% |
| 6mm_75%_1500_5 | 6 | 61 | 1500 | 6,60 | 22 |
| 6mm_75%_1500_6 | 6 | 61 | 1500 | 6,80 | 27 |
| Média [μm] | | | 1500 | 6,70 | 24,50 |
| Desvio Padrão [%] | | | | 1,49% | 10,20% |
| 6mm_75%_750_7 | 6 | 61 | 750 | 6,40 | 25,0 |
| 6mm_75%_750_8 | 6 | 61 | 750 | 6,70 | 26,0 |
| Média [μm] | | | 750 | 6,55 | 25,50 |
| Desvio Padrão [%] | | | | 2,29% | 1,96% |
| 0,5mm_17,5%_4500_8 | 0,5 | 17,5 | 4500 | 4,70 | 29,0 |
| 0,5mm_17,5%_4500_7 | 0,5 | 17,5 | 4500 | 4,50 | 20,0 |
| Média [μm] | | | 4500 | 4,60 | 24,50 |
| Desvio Padrão [%] | | | | 2,17% | 18,37% |
| 0,5mm_17,5%_3000_6 | 0,5 | 17,5 | 3000 | 4,50 | 26,0 |
| 0,5mm_17,5%_3000_5 | 0,5 | 17,5 | 3000 | 4,20 | 24,0 |
| Média [μm] | | | 3000 | 4,35 | 25,00 |
| Desvio Padrão [%] | | | | 3,45% | 4,00% |
| 0,5mm_17,5%_2250_4 | 0,5 | 17,5 | 2250 | 3,20 | 17,0 |
| 0,5mm_17,5%_2250_3 | 0,5 | 17,5 | 2250 | 2,70 | 24,0 |
| Média [μm] | | | 2250 | 2,95 | 20,50 |
| Desvio Padrão [%] | | | | 8,47% | 17,07% |
| 0,5mm_17,5%_1500_3.2 | 0,5 | 17,5 | 1500 | 2,70 | 19,0 |
| 0,5mm_17,5%_1500_2.2 | 0,5 | 17,5 | 1500 | 3,10 | 21,0 |
| 0,5mm_17,5%_1500_1.2 | 0,5 | 17,5 | 1500 | 4,20 | 22,0 |
| Média [μm] | | | 1500 | 3,33 | 21,50 |
| Desvio Padrão [%] | | | | 16,50% | 2,33% |
| 0,5mm_17,5%_750_2 | 0,5 | 17,5 | 750 | 2,70 | 19,0 |
| 0,5mm_17,5%_750_1 | 0,5 | 17,5 | 750 | 2,00 | 20,0 |
| Média [μm] | | | 750 | 2,35 | 19,50 |
| Desvio Padrão [%] | | | | 14,89% | 2,56% |

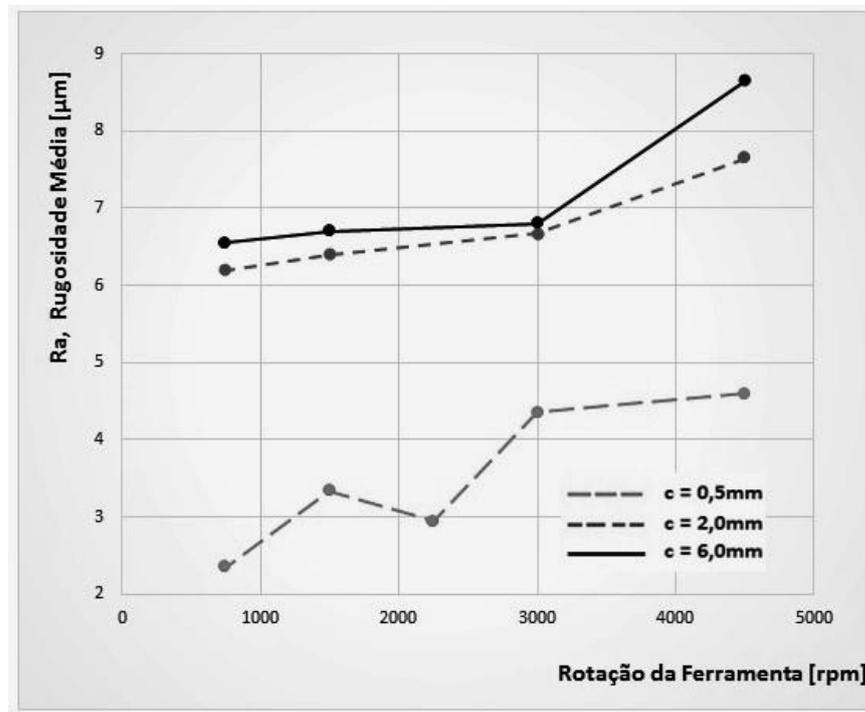


Figura 7.1. Rugosidade média (R_a), compósito de fibra curta com comprimento de 6mm, 2mm e 0,5mm.

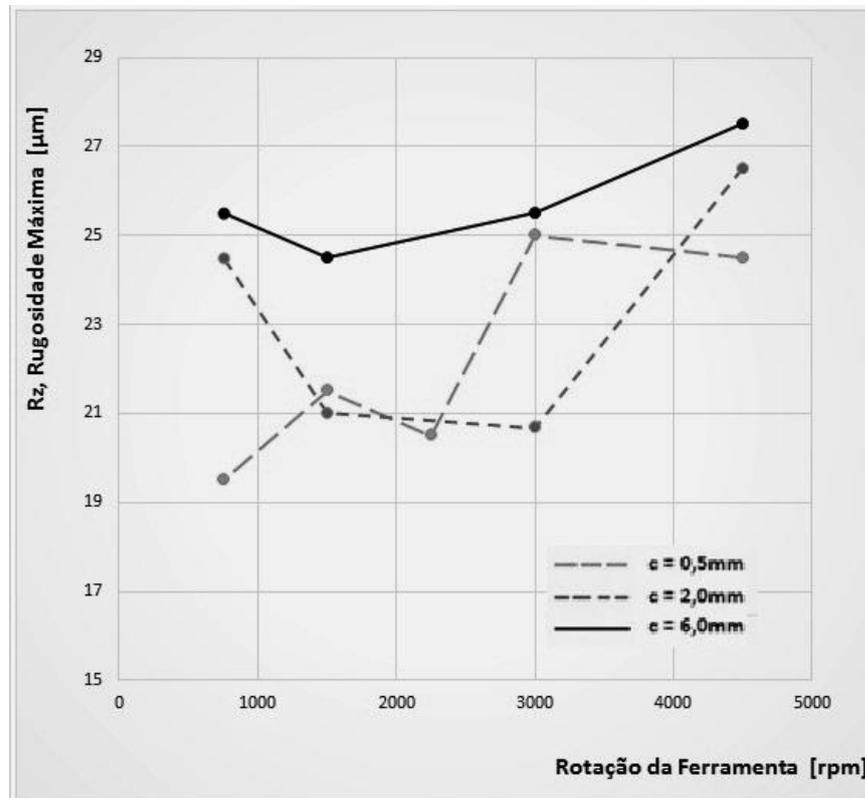


Figura 7.2. Rugosidade máxima (R_z), compósito de fibra curta com comprimento de 6mm, 2mm e 0,5mm.

7.3 – Resultados de medição da temperatura na maquinagem, fibra de 6mm, 2mm e 0,5mm

A medição da temperatura na região próxima ao corte durante a execução do processo de maquinagem, realizada na preparação dos provetes, foi efetuada conforme Capítulo 6, subitem 6.5, Medição da temperatura de corte no processo de maquinagem. As figuras 7.3 e 7.4, mostram como exemplo, duas das imagens obtidas com a Câmara Termográfica, Testo, *model 875-2i*.

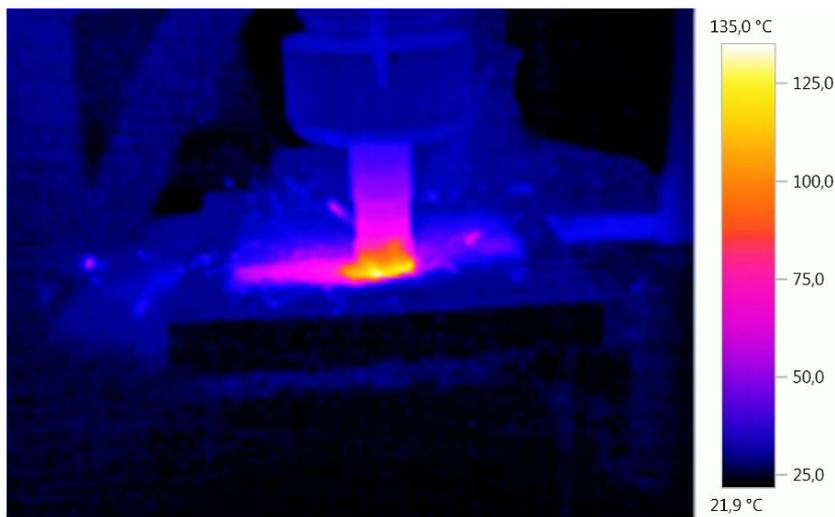


Figura 7.3. Espectro de cores correspondente as temperaturas durante a maquinagem, provete fibra 6mm, 4500 rpm.

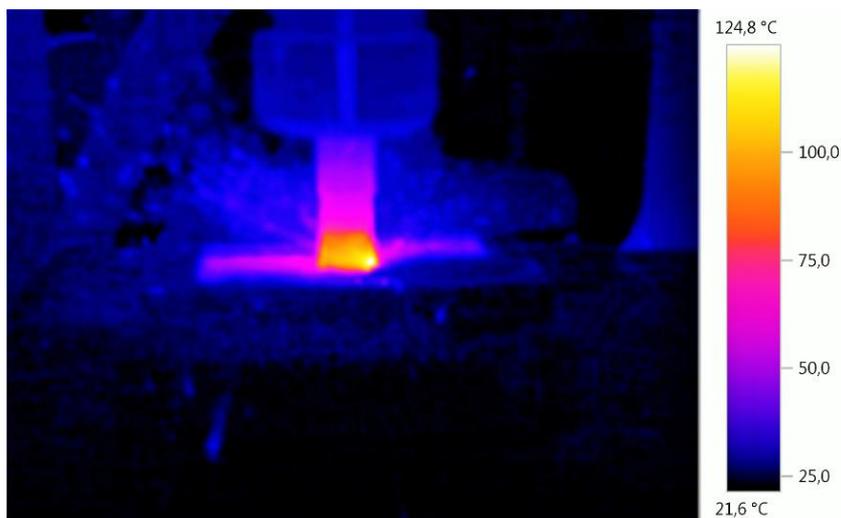


Figura 7.4. Espectro de cores correspondente as temperaturas durante a maquinagem, provete fibra 2mm, 4500 rpm.

Os valores medidos de temperatura, estão apresentados tabela 7.2, Resultado Temperatura máxima T_{max} para compósito com fibra 6mm, 2mm e 0,5mm.

Tabela 7.2. Resultado Temperatura máxima (T_{max}), compósito com fibra 6mm, 2mm e 0,5mm.

| Fibra, Wp e Rotação | c [mm] | V_f [%] | r_f [rpm] | Temperatura Região de Corte |
|---------------------|--------|-----------|-------------------|--|
| | | | | T_{max} : Temperatura Máxima [°C] Exatidão; +/- 2,0 [°C] Taxa de Aquisição; 9 Hz |
| 2mm_75%_4500_9 | 2 | 61 | 4500 | 124,8 |
| 2mm_75%_3000_7 | 2 | 61 | 3000 | 119,3 |
| 2mm_75%_1500_4 | 2 | 61 | 1500 | 100,7 |
| 2mm_75%_750_2 | 2 | 61 | 750 | 88,8 |
| Média | | | 750 - 4500 | 108,4 |
| 6mm_75%_4500_1 | 6 | 61 | 4500 | 135,0 |
| 6mm_75%_3000_3 | 6 | 61 | 3000 | 121,9 |
| 6mm_75%_1500_5 | 6 | 61 | 1500 | 104,7 |
| 6mm_75%_750_7 | 6 | 61 | 750 | 90,7 |
| Média | | | 750 - 4500 | 113,1 |
| 0,5mm_17,5%_4500_8 | 0,5 | 17,5 | 4500 | 102,7 |
| 0,5mm_17,5%_3000_6 | 0,5 | 17,5 | 3000 | 101,9 |
| 0,5mm_17,5%_3000_6 | 0,5 | 17,5 | 2250 | 76,6 |
| 0,5mm_17,5%_2250_4 | 0,5 | 17,5 | 1500 | 64,4 |
| 0,5mm_17,5%_4500_7 | 0,5 | 17,5 | 750 | 38,7 |
| Média | | | 750 - 4500 | 70,4 |

Os valores medidos da Temperatura máxima (T_{max}) estão representados no gráfico mostrado na figura 7.5, para permitir uma avaliação preliminar entre compósito de fibra curta com comprimento de 6mm, 2mm e 0,5mm e as respectivas temperaturas nas diversas velocidades de corte. As temperaturas médias para os compósitos com fibras de 2mm, 6mm e 0,5mm durante o processo de maquinagem, foram respectivamente 108,4 C°, 113,1 C° e 70,4 C°. Cálculo foi feito para uso em estudos de transferência de calor, durante o processo realizado.

7.4 – Resultados Ensaio de Tração Uniaxial, Fibra Curta de 6mm, 2mm e 0,5mm

Os ensaios de tração foram realizados conforme descritos no Capítulo 6, subitem 6.6, nos provetes obtidos por maquinagem a partir de placas de compósito.

Cabe mencionar que muitos fatores podem afetar a forma e os valores do diagrama do ensaio de tração, alterando substancialmente os resultados [Gedney, 2002].

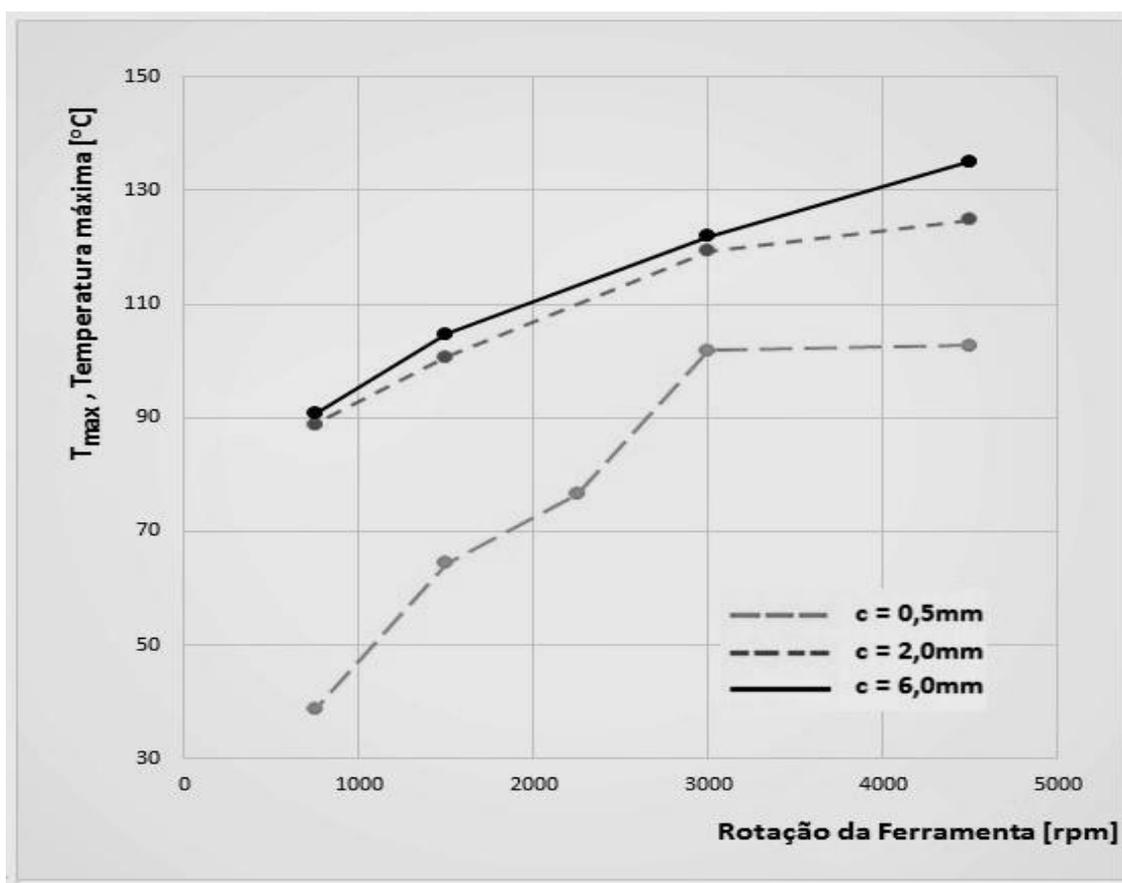


Figura 7.5. Compósito de fibra curta com comprimento de 6mm, 2mm e 0,5mm e as respectivas temperaturas nas diversas velocidades de corte.

Entre as fontes mais comuns de erro estão a precisão inadequada do dispositivo medidor de deformação, o desliz das garras de fixação do extensómetro e ainda, o ângulo diferente de zero entre o eixo do provete e o eixo de aplicação de carga, conforme alerta estudo [Li, et al., 2005].

Toda a parte prática da execução destes ensaios coube a equipa de especialistas do Laboratório de Ensaio Mecânicos do Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Coimbra, que buscaram minimizar estas fontes de erros mencionadas. As propriedades mecânicas mensuradas estão na tabela 7.3. Tensão média à tração imediatamente antes da rutura (σ_{rut}) e Módulo de Elasticidade (E) comprimento de fibra 6mm, 2mm e 0,5mm.

Os valores medidos da Tensão média de rutura à tração (σ_{rut}) estão representados no gráfico mostrado na figura 7.6, para permitir uma avaliação preliminar entre compósito de fibra curta com comprimento de 6mm, 2mm e 0,5mm e as respectivas velocidades de corte.

Tabela 7.3. Tensão média à tração (σ_{rut}) e Módulo de Elasticidade (E) comprimento de fibra.

| Fibra, Vf e Rotação ID provete | c [mm] | Vf [%] | rf [rpm] | Propriedades Mecânicas | |
|-----------------------------------|--------|--------|-------------|------------------------|---------------|
| | | | | σ_{max} [MPa] | E [GPa] |
| 2mm_75%_4500_9 | 2 | 61 | 4500 | 50,92 | 14,11 |
| 2mm_75%_4500_8 | 2 | 61 | 4500 | 61,81 | 14,27 |
| Média [μm] | | | 4500 | 56,37 | 14,19 |
| Desvio Padrão [%] | | | | 9,66% | 0,56% |
| 2mm_75%_3000_7 | 2 | 61 | 3000 | 66,74 | 21,60 |
| 2mm_75%_3000_6 | 2 | 61 | 3000 | 48,24 | 10,80 |
| 2mm_75%_3000_5 | 2 | 61 | 3000 | 72,47 | 9,96 |
| Média [μm] | | | 3000 | 62,48 | 14,12 |
| Desvio Padrão [%] | | | | 19,39% | 2,97% |
| 2mm_75%_1500_4 | 2 | 61 | 1500 | 64,71 | 19,89 |
| 2mm_75%_1500_3 | 2 | 61 | 1500 | 54,55 | 9,83 |
| Média [μm] | | | 1500 | 59,63 | 14,86 |
| Desvio Padrão [%] | | | | 8,52% | 33,85% |
| 2mm_75%_750_2 | 2 | 61 | 750 | 48,85 | 13,39 |
| 2mm_75%_750_1 | 2 | 61 | 750 | 43,39 | 15,31 |
| Média [μm] | | | 750 | 46,12 | 14,35 |
| Desvio Padrão [%] | | | | 5,92% | 6,69% |
| | | | | | |
| 6mm_75%_4500_1 | 6 | 61 | 4500 | 86,98 | 14,76 |
| 6mm_75%_4500_2 | 6 | 61 | 4500 | 56,96 | 16,62 |
| Média [μm] | | | 4500 | 71,97 | 15,69 |
| Desvio Padrão [%] | | | | 20,85% | 5,93% |
| 6mm_75%_3000_3 | 6 | 61 | 3000 | 76,21 | 24,15 |
| 6mm_75%_3000_4 | 6 | 61 | 3000 | 70,53 | 18,18 |
| Média [μm] | | | 3000 | 73,37 | 21,17 |
| Desvio Padrão [%] | | | | 3,87% | 14,10% |
| 6mm_75%_1500_5 | 6 | 61 | 1500 | 76,31 | 22,12 |
| 6mm_75%_1500_6 | 6 | 61 | 1500 | 66,21 | 21,63 |
| Média [μm] | | | 1500 | 71,26 | 21,88 |
| Desvio Padrão [%] | | | | 7,09% | 1,12% |
| 6mm_75%_750_7 | 6 | 61 | 750 | 60,44 | 22,46 |
| 6mm_75%_750_8 | 6 | 61 | 750 | 85,54 | 19,19 |
| Média [μm] | | | 750 | 72,99 | 20,83 |
| Desvio Padrão [%] | | | | 17,19% | 7,85% |
| | | | | | |
| 0,5mm_17,5%_4500_8 | 0,5 | 17,5 | 4500 | 85,45 | 9,97 |
| 0,5mm_17,5%_4500_7 | 0,5 | 17,5 | 4500 | 96,83 | 15,28 |
| Média [μm] | | | 4500 | 91,14 | 12,63 |
| Desvio Padrão [%] | | | | 6,25% | 0,21 |
| 0,5mm_17,5%_3000_6 | 0,5 | 17,5 | 3000 | 105,05 | 15,99 |
| 0,5mm_17,5%_3000_5 | 0,5 | 17,5 | 3000 | 98,80 | 15,32 |
| Média [μm] | | | 3000 | 101,93 | 15,66 |
| Desvio Padrão [%] | | | | 3,06% | 2,14% |
| 0,5mm_17,5%_2250_4 | 0,5 | 17,5 | 2250 | 90,70 | 18,11 |
| 0,5mm_17,5%_2250_3 | 0,5 | 17,5 | 2250 | 101,67 | 16,22 |
| Média [μm] | | | 2250 | 96,18 | 17,17 |
| Desvio Padrão [%] | | | | 5,71% | 5,51% |
| 0,5mm_17,5%_1500_3.2 | 0,5 | 17,5 | 1500 | 82,76 | 13,90 |
| 0,5mm_17,5%_1500_3.2 | 0,5 | 17,5 | 1500 | 79,55 | 14,30 |
| 0,5mm_17,5%_1500_3.2 | 0,5 | 17,5 | 1500 | 85,23 | 11,44 |
| 0,5mm_17,5%_1500_3.2 | 0,5 | 17,5 | 1500 | 86,75 | 14,03 |
| 0,5mm_17,5%_1500_3.2 | 0,5 | 17,5 | 1500 | 98,50 | 9,96 |
| 0,5mm_17,5%_1500_2.2 | 0,5 | 17,5 | 1500 | 103,22 | 10,80 |
| 0,5mm_17,5%_1500_1.2 | 0,5 | 17,5 | 1500 | 101,84 | 21,60 |
| Média [μm] | | | 1500 | 91,12 | 13,72 |
| Desvio Padrão [%] | | | | 9,93% | 26,20% |
| 0,5mm_17,5%_750_2 | 0,5 | 17,5 | 750 | 100,25 | 14,36 |
| 0,5mm_17,5%_750_1 | 0,5 | 17,5 | 750 | 83,02 | 9,27 |
| Média [μm] | | | 750 | 91,64 | 11,82 |
| Desvio Padrão [%] | | | | 9,40% | 21,54% |

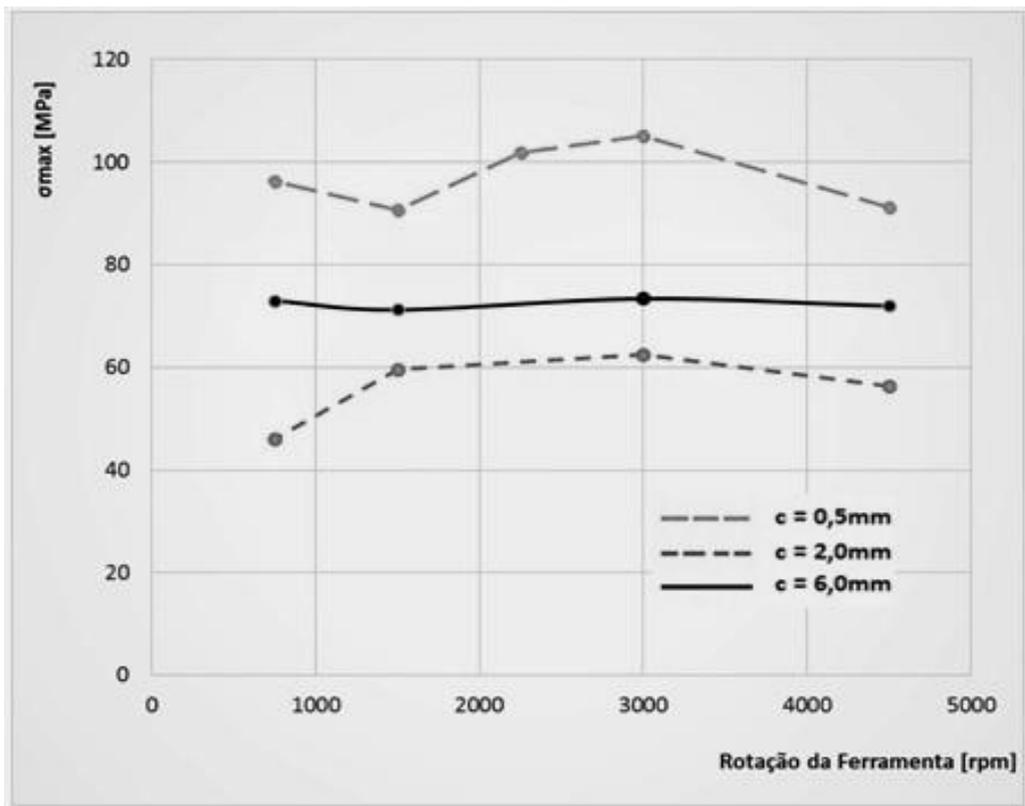


Figura 7.6. Compósito de fibra curta com comprimento de 6mm, 2mm e 0,5mm e a Tensão média de rutura à tração (σ_{rut}) nas diversas velocidades de corte.

Os valores medidos do Módulo de Elasticidade (E) estão representados no gráfico mostrado na figura 7.7, para permitir uma avaliação preliminar entre compósito de fibra curta com comprimento de 6mm, 2mm e 0,5mm e as respectivas velocidades de corte.

7.5 - Teoria da Decisão, Múltiplos Critérios. Aplicação em Engenharia de Projeto

Desde sempre durante a fase de projeto, a engenharia considerou na seleção e no uso dos materiais as propriedades mecânicas das alternativas possíveis e disponíveis, buscando aumentar a confiabilidade e segurança do produto proposto. A evolução dos materiais fez incluir também nesta seleção, as propriedades térmicas e propriedades advindas dos processos de fabricação como rugosidade e outras [Ashby, 2012].

Além disto, a pesquisa de uma solução construtiva de um projeto mecânico é, sem dúvida alguma, a parte mais importante do seu desenvolvimento [Oliveira, 1984]. Durante a busca pela solução construtiva mais adequada, a escolha entre duas ou mais alternativas de projeto é uma tarefa muito presente, nomeadamente quando da seleção de materiais.

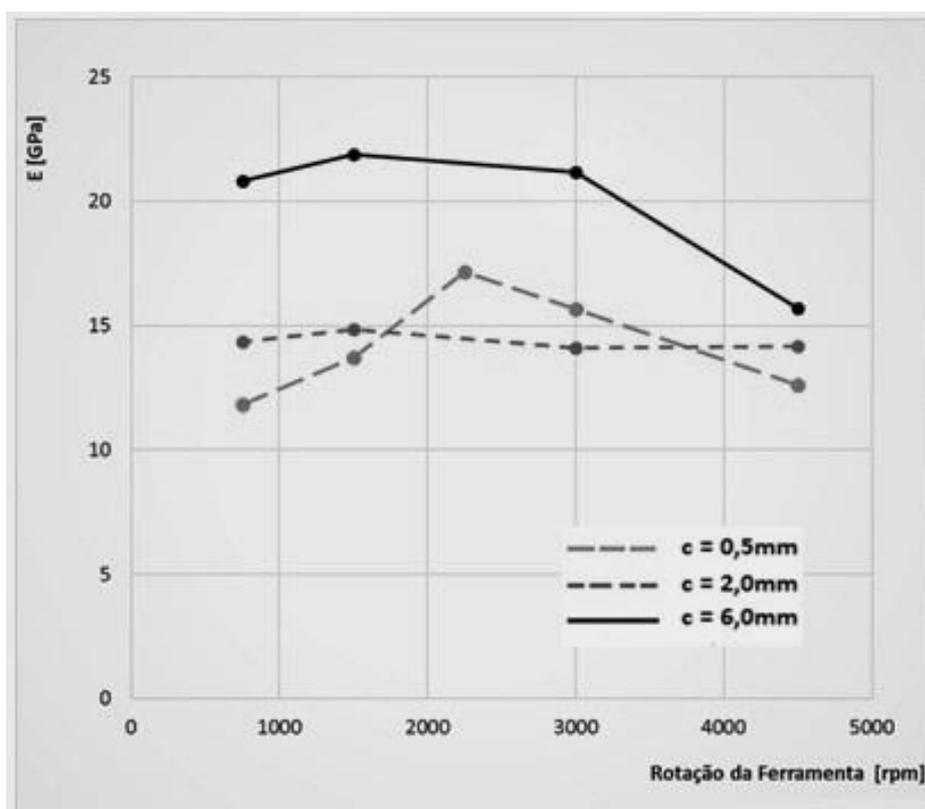


Figura 7.7. Compósito de fibra curta com comprimento de 6mm, 2mm e 0,5mm e o Módulo de Elasticidade (E) nas diversas velocidades de corte.

Das alternativas hoje em uso na fase de seleção de materiais, a escolha entre os inúmeros compósitos existentes é uma tarefa difícil e em geral, suportada por ferramentas da Teoria da Decisão. Isto é uma tarefa tão difícil que muitas vezes, as grandes empresas preferem encomendar uma formulação de compósito nova, muitas vezes específica para aquela aplicação desejada [Ashby, 2012].

Quando a aplicação mecânica desejada de um compósito não justifica o desenvolvimento de uma formulação própria de um compósito específico, a escolha entre várias alternativas viáveis é feita usando uma das muitas ferramentas da Teoria da Decisão, entre elas, uma das mais aplicadas é o Método Múltiplos Critérios, muitas vezes nomeada como Seleção por Multicritérios.

A teoria das decisões é um campo de conhecimento que pode ajudar na tomada de decisão em situações complexas ou de incerteza. Um problema de decisão geralmente atrai a atenção de grupos com interesses divergentes, encerra visões controversas e conflituosas, mesmo considerando apenas os aspectos tecnológicos. Um decisor ou grupo de decisores poderá ter que fazer trocas, adotando uma alternativa que abra mão de um objetivo menos valioso, em prol de outro mais valioso [Luz, *et al.*, 2006].

Metodologia multicritério é instrumento que permite a avaliação de ações e alternativas segundo um ponto de vista particular do decisor. Numa orientação analítica reativa os elementos mais objetivos são selecionados como características das alternativas que afetam a sua atratividade, em relação ao objetivo pretendido [Oliveira, 1984].

Desta forma, a decisão em projeto de engenharia é um problema envolvendo uma escolha com critérios múltiplos, isto é, a escolha tem início na classificação de um número de alternativas, onde cada uma das quais é primeiramente ordenadas em vários “rankings”, criados separadamente por critérios quantificáveis [Scott, *et al.*, 2000]. A escolha recai sobre a alternativa que acumular mais pontos dentro dos critérios selecionados pelo decisor.

7.5.1 - Aplicação Método Múltiplos Critérios. Fibra Curta de 6mm, 2mm e 0,5mm

Entre as inúmeras alternativas de parâmetros relacionados com possíveis critérios de avaliação das três formulações testadas na Fase 1, o compósito 1 (Fibra curtas com comprimento de 6 mm), compósito 2 (Fibra curtas com comprimento de 2 mm) e compósito 3 (Fibra curtas com comprimento de 0,5 mm), foram selecionados 4 parâmetros, buscando abrir mão de um objetivo menos valioso, em prol de outro mais valioso, segundo metodologia multicritérios de avaliação de alternativas [Luz, *et al.*, 2006].

Desta forma, os parâmetros selecionados são:

- Critério 1: Maior Média da Tensão Média Máxima de Rutura
- Critério 2: Maior Média do Valor do Módulo de Elasticidade
- Critério 3: Maior Velocidade de corte a 80% Temperatura Transição Vítrea.
- Critério 4: Menor média do Valor (R_a), Rugosidade média observada.

Em todos os critérios selecionados, o valor numérico do parâmetro de valoração da alternativa “n” (V_{cr_n}), foi calculado pela divisão do valor da grandeza adotada (G_n) do critério, mensurada no composto “n”, pelo maior valor médio encontrado da grandeza (G_{max}), observada durante o ensaio ou levantamentos de dados, conforme equação (7.1). O número (n) representa o compósito em análise, podendo assumir os números identificadores 1, 2 ou 3.

$$V_{cr_n} = (G_n) / (G_{max}) \quad (7.1)$$

Desta forma, o valor do parâmetro (V_{cr_n}) sofrerá variação entre o mínimo de 0,0 e o máximo de 1,0 ponto, em valores adimensionais. Para simplificação do Método Múltiplos Critérios, não foi adotado nenhum peso ou fator de importância. Assim sendo, todos os quatro critérios são considerados de igual importância neste processo de decisão.

7.5.1.1 – Critério 1: Maior Tensão Média Máxima de Rutura

O valor do parâmetro (V_{cr_n}) foi fixado usando a maior média entre os valores da Tensão Máxima de Rutura mensurados para cada tipo de provete do compósito ensaiado. Os valores foram retirados da tabela 7.3, Tensão média à tração (σ_{rut}) e para o comprimento de fibra 6mm, 2mm e 0,5mm, as maiores médias foram respectivamente 73,37 MPa, 62,48 MPa e 101,93 MPa. O valor calculado conforme equação (7.1) foi colocado na tabela 7.4, Metodologia Multicritérios, Quadro comparativo dos compósitos comprimento de fibra 6mm, 2,0mm e 0,5mm.

7.5.1.2 - Critério 2: Maior Valor do Módulo de Elasticidade

O valor do parâmetro (V_{cr_n}) foi fixado usando a maior média entre os valores do Módulo de Elasticidade (E) mensurados para cada tipo de provete do compósito ensaiado. Os valores foram retirados da tabela 7.3, Módulo de Elasticidade (E) e para o comprimento de fibra 6mm, 2mm e 0,5mm, as maiores médias foram respectivamente 21,88 GPa, 14,86 GPa e 17,17 GPa. O valor calculado conforme equação (7.1) foi colocado na tabela 7.4, Metodologia Multicritérios. Quadro comparativo dos compósitos comprimento de fibra 6mm, 2,0 mm e 0,5mm.

7.5.1.3 - Critério 3: Maior Velocidade de corte a 80% da Temperatura de Transição Vítea

O valor do parâmetro (V_{cr_n}) foi adotado como sendo a maior rotação de corte executada, imediatamente abaixo do valor de 80% da temperatura de transição vítrea observada na maquinagem do compósito (n) em análise. O valor calculado conforme equação (7.1) foram retirados da tabela 7.2, Resultado Temperatura máxima (T_{max}), compósito com fibra 6mm, 2,0 mm e 0,5mm. Conforme foi detalhado no Capítulo 5, subitem 5.3, a resina utilizada nos provetes com comprimento de fibra 6,0mm e 2mm, foi a Biresin®CR120, a Temperatura de

transição vítrea (T_G) é de 120°C. Para os provetes com comprimento de fibra 0,5 mm, foi utilizada a Biresin®CR83, a Temperatura de transição vítrea (T_G) é de 84°C.

O valor calculado com a equação (7.1) foi colocado na tabela 7.4, Metodologia Multicritérios. Quadro comparativo dos compósitos comprimento de fibra 6 mm, 2 mm e 0,5mm.

Tabela 7.4. Metodologia Multicritérios. Quadro comparativo dos compósitos comprimento de fibra 6 mm, 2 mm e 0,5 mm.

| Nº | Formulação do compósito | Critério 1 | | Critério 2 | | Critério 3 | | Critério 4 | | Total de Pontos |
|-----------------------------|---|----------------------------------|------------|---------------------|------------|---------------|------------|------------------------------|------------|-----------------|
| | | σ_{max} (Mpa) maior média | V_{cr_n} | E (Gpa) maior média | V_{cr_n} | Rotação (rpm) | V_{cr_n} | Rugosidade R_a (μm) | V_{cr_n} | |
| 1 | Comprimento fibra 6,0mm ($V_f = 65\%$), Biresin®CR120, Temperatura de transição vítrea (TG) 120°C | 73,37 | 0,72 | 21,88 | 1,00 | 750 | 0,50 | 6,55 | 0,36 | 2,58 |
| Total de Pontos Composito 1 | | | | | | | | | | 2,58 |
| 2 | Comprimento fibra 2,0mm ($V_f = 65\%$), Biresin®CR120, Temperatura de transição vítrea (TG) 120°C | 62,48 | 0,61 | 14,86 | 0,68 | 750 | 0,50 | 6,20 | 0,38 | 2,17 |
| Total de Pontos Composito 2 | | | | | | | | | | 2,17 |
| 3 | Comprimento fibra 0,5mm ($V_f = 17,5\%$), Biresin®CR83, Temperatura de transição vítrea (TG) 84°C | 101,93 | 1,00 | 17,17 | 0,78 | 1500 | 1,00 | 2,35 | 1,00 | 3,78 |
| Total de Pontos Composito 3 | | | | | | | | | | 3,78 |

7.5.1.4 – Critério 4: Menor Valor (R_a), Rugosidade média observada

Para valor do parâmetro (V_{cr_n}) foi adotado a menor média da Rugosidade média (R_a) mensurada nos provetes do compósito (n) em análise. O valor de (R_a) é mais usado para avaliação preliminar do processo de maquinagem, enquanto o valor da Rugosidade máxima (R_z) tem seu uso maior na otimização do processo [Davim, 1998]. Os valores foram retirados da tabela 7.1, Resultado (R_a) e (R_z), comprimento de fibra 6mm, 2,0mm e 0,5mm. O valor calculado conforme equação (7.1), modificada para $V_{cr_n} = (G_{min})/(G_n)$, foi colocado na tabela 7.4, Metodologia Multicritérios. Como neste caso interessa o menor valor (R_a), foi adotado o menor valor médio encontrado da grandeza como (G_{min}).

7.6 – Conclusão desta fase do desenvolvimento proposto

Na Fase 1 do desenvolvimento foi possível avaliar o comportamento do compósito de fibra curta, por meio dos resultados obtidos em três formulações diferentes, envolvendo matriz epoxídica e reforçadores em fibra curta de carbono, conforme características mostradas na tabela 5.3 do Capítulo 5, que são apresentadas resumidamente como:

- **Compósito 1;** Fibra curta com comprimento de 6,0 mm, Fração volúmica 61%, (Fração mássica 75%) matriz Biresin®CR120, bisfenol, A - epichlorhydrin 1,4-bis (2,3-epoxypropoxy), butane, hardener CH120-3.
- **Compósito 2;** Fibra curta com comprimento de 2,0 mm, Fração volúmica 61%, (Fração mássica 75%) matriz Biresin®CR120, bisfenol, A - epichlorhydrin 1,4-bis (2,3-epoxypropoxy), butane, hardener CH120-3.
- **Compósito 3;** Fibra curta com comprimento de 0,5 mm, Fração volúmica 17,5%, (Fração mássica 29,2%) Biresin®CR83, bisfenol, A - epichlorhydrin 1,4-bis (2,3-epoxypropoxy) butane, hardener CH183-2.

As principais conclusões obtidas nesta parte do desenvolvimento foram:

- A rugosidade (R_a) apresenta uma tendência de aumento menor até uma velocidade de rotação da ferramenta de 3000 (rpm). Acima deste valor da velocidade de rotação da ferramenta de corte, a rugosidade (R_a) apresenta um aumento mais expressivo.
- Após a operação de maquinagem executada, a Tensão média à tração (σ_{max}) não apresentou variação acentuada com o aumento da velocidade de corte.
- Após a operação de maquinagem executada, o Módulo de Elasticidade (E) apresentou redução acentuada para valores de rotação da ferramenta superiores a 3000 (rpm)
- O uso da Metodologia Multicritérios utilizada em conjunto com as premissas apresentadas no início deste desenvolvimento, conduziu à seleção do compósito 3, Fibra Curta com 0,5mm de comprimento, na Fração volúmica de 17,5%, definindo este como sendo o Compósito de Estudo da próxima fase. Esta formulação específica atingiu um total de pontos acumulados de 3,78. Ver tabela 7.4, onde estão descritos os valores usados na metodologia Multicritérios.

DISCUSSÃO E RESULTADOS FASE 2, COMPÓSITO DE ESTUDO

8.1 - Introdução da Fase 2 do desenvolvimento

Nesta etapa denominada Fase 2, foram realizados estudos, ensaios e análises no compósito com reforçador aleatoriamente distribuído e em direções variadas, de fibra curta de carbono de comprimento 0,5 mm [Apply, Procotex, 2015] e matriz epoxídica CR83-2 [Wildhagen, Michalek, 2016], identificado com Compósito de Estudo.

A fração volúmica do reforçador presente na mistura é de 17,5% e esta formulação foi selecionada conforme Capítulo 7, subitem 7.6, Teoria da Decisão.

A formulação do compósito de estudo contém a resina Biresin®CR83, combinada com o endurecedor CH83-2, fornecidos pela Sika [Wildhagen, Michalek, 2016].

Os resultados e a discussão dos valores encontrados nesta fase do desenvolvimento são apresentados, bem como, a comparação com bibliografia científica e tecnológica disponível.

8.2 - Fração volúmica, porosidade e Densidade do Compósito de Estudo

A densidade de cada um dos provetes foi mensurada conforme apresenta esquematicamente a figura 6.1, cumprindo as etapas necessárias para definição dos valores de (m_s) e (m_m).

A tabela 8.1, mostra valores relativo à densidade do material dos provetes e porosidade. Apresenta os parâmetros de cálculo e os valores mensurados, a determinação da densidade do material.

O valor teórico (p_{SM}), porosidade máxima do material do provete de fibra curta de carbono 0,5 mm, foi determinado pela (equação 1.6), como uma primeira referência no estudo da densidade do compósito de fibra curta de carbono e resina epoxídica [Pottker e Appoloni, 2011].

Este valor de referência foi estabelecido como amostra de controlo do parâmetro densidade (AC), buscando assim, reduzir o risco da atribuição errônea de valores a esta propriedade, que de alguma forma já estavam presentes na amostra de controlo [Falk e Rubinstein, 1987].

O parâmetro porosidade máxima do material do provete representa o cálculo da equação (1.6), para os valores máximos de densidade da resina e da densidade da fibra de carbono, expresso em percentagem. Tais valores são fornecidos pelos fabricantes destes materiais [Wildhagen, Michalek, 2016] e [Apply, Procotex, 2015].

Tabela 8.1. Valores relativo à densidade do material dos provetes e porosidade, em ensaio de tração unidirecional.

| Fibra, V_f , 1500 [rpm] ID provete | c [mm] | W_t [%] | V_f [%] | Densidade Teórica [g/cm ³] | Densidade Medida [g/cm ³] | Porosidade Máxima [%] |
|---|--------|-----------|-------------|---|--|-----------------------|
| 0,5mm_20%_1500_3 | 0,5 | 32,74 | 20 | 1,3120 | 1,2120 | 7,62 |
| 0,5mm_20%_1500_1 | 0,5 | 32,74 | 20 | 1,3120 | 1,2372 | 5,70 |
| Média | | | 20 | | 1,2246 | 6,66 |
| Desvio Padrão | | | 20 | | 0,0126 | 0,96 |
| 0,5mm_17,5%_1500_2 | 0,5 | 29,23 | 17,5 | 1,2905 | 1,1468 | 11,13 |
| 0,5mm_17,5%_1500_4 | 0,5 | 29,23 | 17,5 | 1,2905 | 1,1736 | 9,06 |
| 0,5mm_17,5%_1500_3 | 0,5 | 29,23 | 17,5 | 1,2905 | 1,1750 | 8,95 |
| Média | | | 17,5 | | 1,1652 | 9,71 |
| Desvio Padrão | | | 17,5 | | 0,0130 | 1,00 |
| 0,5mm_15%_1500_2 | 0,5 | 25,58 | 15 | 1,2690 | 1,1468 | 9,63 |
| 0,5mm_15%_1500_4 | 0,5 | 25,58 | 15 | 1,2690 | 1,1736 | 7,52 |
| Média | | | 15 | | 1,1602 | 8,57 |
| Desvio Padrão | | | 15 | | 0,0134 | 1,06 |
| 0,5mm_10%_1500_1 | 0,5 | 17,78 | 10 | 1,2260 | 1,1773 | 3,97 |
| 0,5mm_10%_1500_4 | 0,5 | 17,78 | 10 | 1,2260 | 1,1677 | 4,75 |
| Média | | | 10 | | 1,1725 | 4,36 |
| Desvio Padrão | | | 10 | | 0,0048 | 0,39 |
| 0,5mm_5%_1500_2 | 0,5 | 9,29 | 5 | 1,1830 | 1,1468 | 3,06 |
| 0,5mm_5%_1500_3 | 0,5 | 9,29 | 5 | 1,1830 | 1,1750 | 0,68 |
| Média | | | 5 | | 1,1609 | 1,87 |
| Desvio Padrão | | | 5 | | 0,0141 | 1,19 |
| Amostra Controle - 0,0mm_0%_1500_1 | 0,5 | 0,00 | 0 | 1,1400 | 1,1324 | 0,66 |
| Amostra Controle - 0,0mm_0%_1500_4 | 0,5 | 0,00 | 0 | 1,1400 | 1,1292 | 0,95 |
| Média | | | 0 | | 1,1308 | 0,81 |
| Desvio Padrão | | | 0 | | 0,0016 | 0,14 |

8.3 - Influência da fração volúmica nas propriedades mecânicas

Os ensaios de tração foram realizados conforme descritos no Capítulo 6, subitem 6.6, nos provetes obtidos por maquinagem a partir de placas de compósito.

As propriedades mecânicas mensuradas estão na tabela 8.2. Tensão média à tração (σ_{max}) e Módulo de Elasticidade (E) comprimento de fibra 0,5mm.

Tabela 8.2. Tensão média à tração (σ_{max}) e Módulo de Elasticidade (E), comprimento de fibra 0,5mm

| Fibra, V_f , 1500 [rpm] ID provete | c [mm] | W_t [%] | V_f [%] | Propriedades Mecânicas | | |
|---|--------|-----------|-------------|------------------------|---------------|--------------|
| | | | | σ_{max} [MPa] | Max. Extensão | E [GPa] |
| 0,5mm_20%_1500_3 | 0,5 | 32,74 | 20 | 94,17 | 0,0038 | 16,41 |
| 0,5mm_20%_1500_1 | 0,5 | 32,74 | 20 | 106,13 | 0,0041 | 15,97 |
| Média | | | 20 | 100,15 | 0,0040 | 14,19 |
| Desvio Padrão | | | 20 | 5,98 | 0,0002 | 0,22 |
| 0,5mm_17,5%_1500_2 | 0,5 | 29,23 | 17,5 | 101,84 | 0,0031 | 21,60 |
| 0,5mm_17,5%_1500_4 | 0,5 | 29,23 | 17,5 | 103,22 | 0,0039 | 10,80 |
| 0,5mm_17,5%_1500_3 | 0,5 | 29,23 | 17,5 | 98,50 | 0,0074 | 9,96 |
| Média | | | 17,5 | 101,19 | 0,005 | 14,12 |
| Desvio Padrão | | | 17,5 | 1,98 | 0,002 | 2,00 |
| 0,5mm_15%_1500_2 | 0,5 | 25,58 | 15 | 93,42 | 0,0033 | 19,89 |
| 0,5mm_15%_1500_4 | 0,5 | 25,58 | 15 | 92,10 | 0,0057 | 9,83 |
| Média | | | 15 | 92,76 | 0,0045 | 14,86 |
| Desvio Padrão | | | 15 | 0,66 | 0,0012 | 2,03 |
| 0,5mm_10%_1500_1 | 0,5 | 17,78 | 10 | 80,13 | 0,0033 | 19,89 |
| 0,5mm_10%_1500_4 | 0,5 | 17,78 | 10 | 87,24 | 0,0057 | 9,83 |
| Média | | | 10 | 83,69 | 0,0045 | 14,86 |
| Desvio Padrão | | | 10 | 3,55 | 0,0012 | 2,03 |
| 0,5mm_5%_1500_2 | 0,5 | 9,29 | 5 | 72,15 | 0,0033 | 19,89 |
| 0,5mm_5%_1500_3 | 0,5 | 9,29 | 5 | 73,90 | 0,0057 | 9,83 |
| Média | | | 5 | 73,03 | 0,0045 | 14,86 |
| Desvio Padrão | | | 5 | 0,88 | 0,0012 | 2,03 |
| Amostra Controle - 0,0mm_0%_1500_1 | 0,5 | 0,00 | 0 | 68,12 | 0,0037 | 13,39 |
| Amostra Controle - 0,0mm_0%_1500_4 | 0,5 | 0,00 | 0 | 66,30 | 0,0019 | 15,31 |
| Média | | | 0 | 67,21 | 0,0028 | 14,35 |
| Desvio Padrão | | | 0 | 0,91 | 0,0009 | 0,96 |

Conforme Capítulo 1, Subitem 1.3, a introdução do reforço de fibra curta de carbono , comprimento médio 0,5mm, promove uma mudança substancial nas propriedades mecânicas anteriormente existentes no material base da matriz. Para este caso foi definido como amostra de controlo (AC), o material base da matriz epoxídica (proвете ID 0,0mm_0%_1500_1 e 4), visando determinar com maior clareza, a variação ocorrida em cada propriedade testada, com a inclusão do material reforçador.

Os valores medidos da Tensão média de rutura à tração (σ_{rut}) estão representados no gráfico mostrado na figura 8.1, para permitir uma avaliação preliminar entre compósito de fibra curta com comprimento de 0,5mm e as respetivas frações volúmicas.

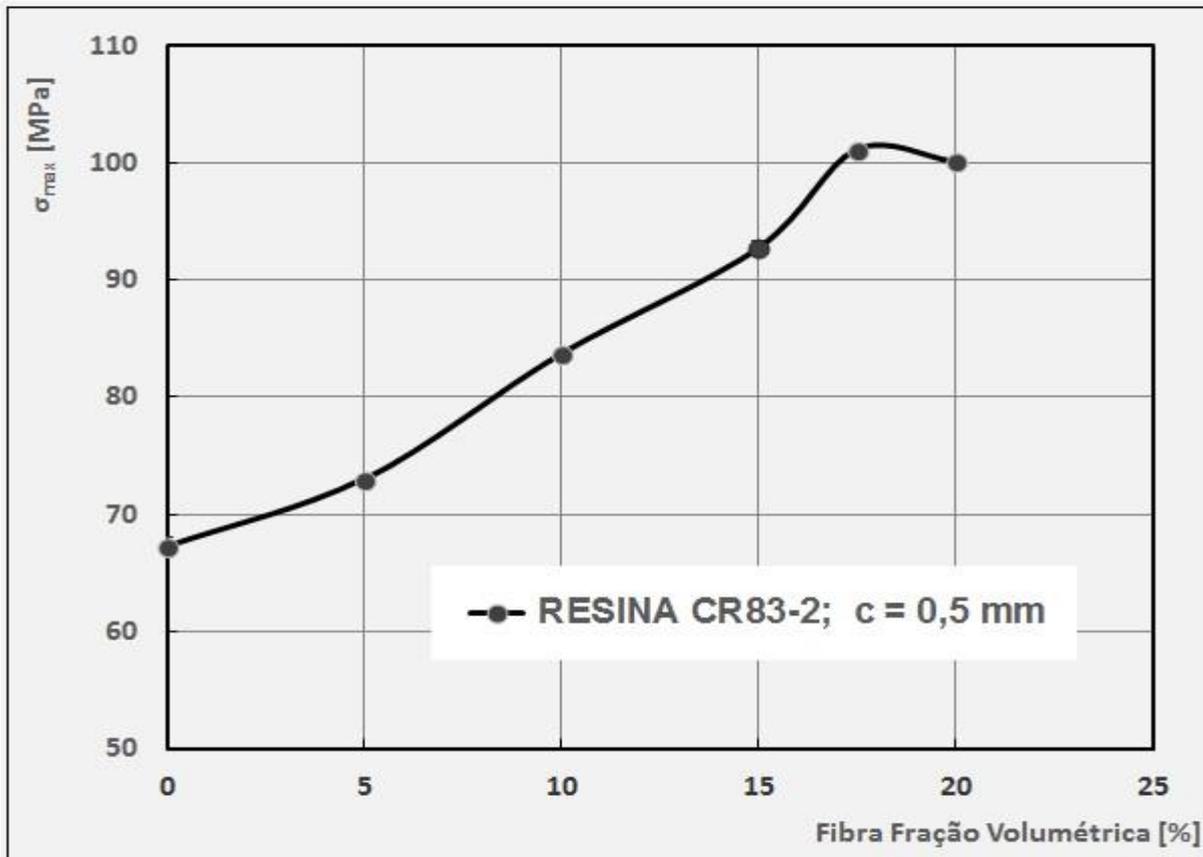


Figura 8.1. Compósito de fibra curta com comprimento de 0,5mm e a Tensão média de rutura à tração (σ_{rut}) nas diversas frações volúmicas.

A curva matemática aproximada relativa aos pontos de tensão de rutura média mensurados, foi baseada no cálculo por equação de potência e apresenta um ponto de máximo valor do parâmetro em função da variação da fração volúmica, esta na faixa de fração volúmica entre 17,0% e 17,8% e mostra a grande importância do valor da fração volúmica nos resultados obtidos nos ensaios de tração unidirecional [Pathak, *et al.*, 2016].

Os valores medidos do Módulo de Elasticidade (E) estão representados no gráfico mostrado na figura 8.2, para permitir uma avaliação preliminar entre compósito de fibra curta com comprimento de 0,5mm e as respetivas frações volúmicas.

Da mesma forma mencionada anteriormente, curva matemática aproximada relativa aos pontos dos módulos de elasticidade mensurados foi baseada no cálculo matemático baseado na equação matemática de potência.

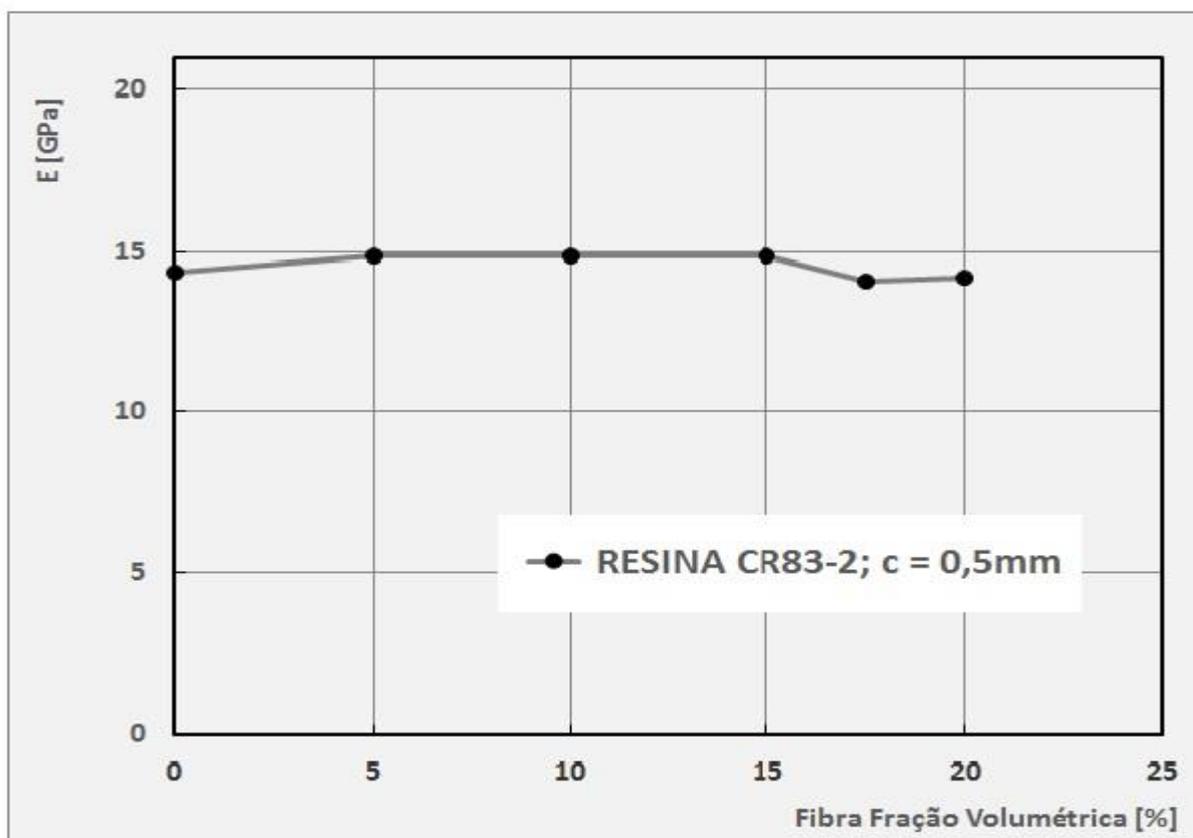


Figura 8.2. Compósito de fibra curta com comprimento de 0,5mm e o Módulo de Elasticidade (E) nas diversas frações volúmicas.

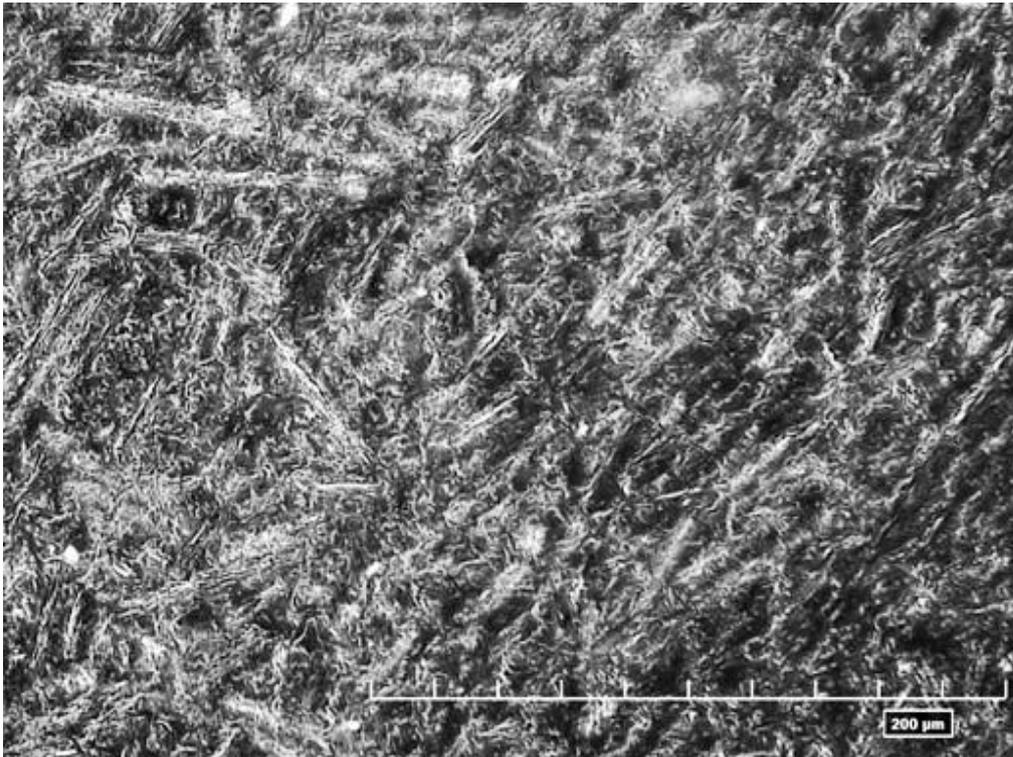
O gráfico representado na figura 8.2, apresenta valores com pequena variação entre 0% e 15%. A partir deste ponto, uma ligeira queda nos valores dos módulos medidos é observada.

8.4 - Resultados Análise Microscópica e Microscopia Eletrônica dos provetes

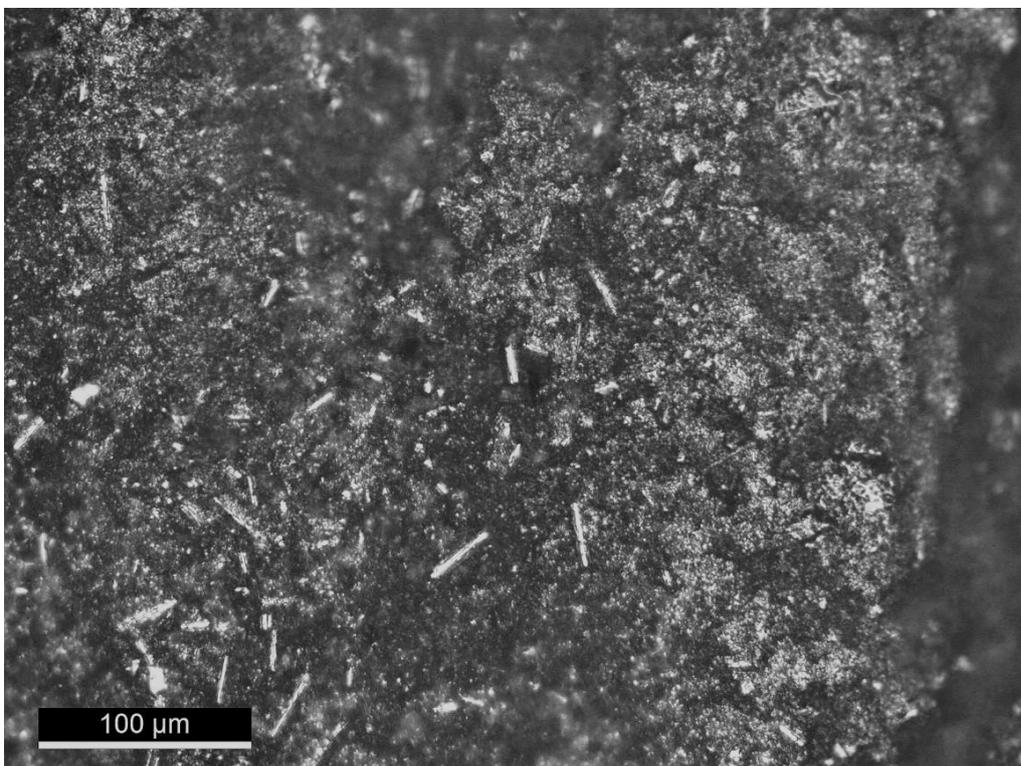
A caracterização e análise da dispersão de fibras na superfície foi realizada diretamente sobre a face maquinada dos provetes conforme apresentado no Capítulo 6, subitens 6.8 e 6.9, abordando microscopia ótica. A microscopia eletrônica (SEM) foi utilizada para avaliar a distribuição de fibra e outros detalhes da seção de fratura.

Para execução da microscopia ótica o equipamento usado foi microscópio digital 3D, modelo Hirox RH-2000, Câmara 2.38 Mega-pixel, CMOS Image Sensor, total de linhas e colunas em pixels 1952(H) ×1241(V).

As figuras 8.3 e 8.4, mostram faces de provetes em imagem retiradas microscópio digital 3D, modelo Hirox RH-2000.



Figuras 8.3. Face do provete código 0,5mm_17,5%_1500_4, melhor dispersão de fibras (F. Autor).



Figuras 8.4. Face do provete código 2mm_70%_4500_2, pior dispersão de fibras (F. Autor).

A figura 8.3 mostra uma região da face do provete código 0,5mm_17,5%_1500_4, depois de maquinada expondo fibras e a matriz de resina. O compósito em análise e formado por resina Biresin[®]CR83, combinada com o endurecedor CH83-2, fornecidos pela Sika [Wildhagen, Michalek, 2016] fibras de carbono cortada no comprimento médio 0,5 mm [Apply, Procotex, 2015]. A fração volúmica utilizada na regra de mistura para este provete foi de 17,5% de fibras de carbono cortadas.

A fase observada com o microscópio digital 3D, modelo Hirox RH-2000, foi maquinada a uma rotação de 1500 rpm, conforme Capítulo 4, subitem 4.4, Escolha da máquina e ferramenta para o procedimento de fresagem.

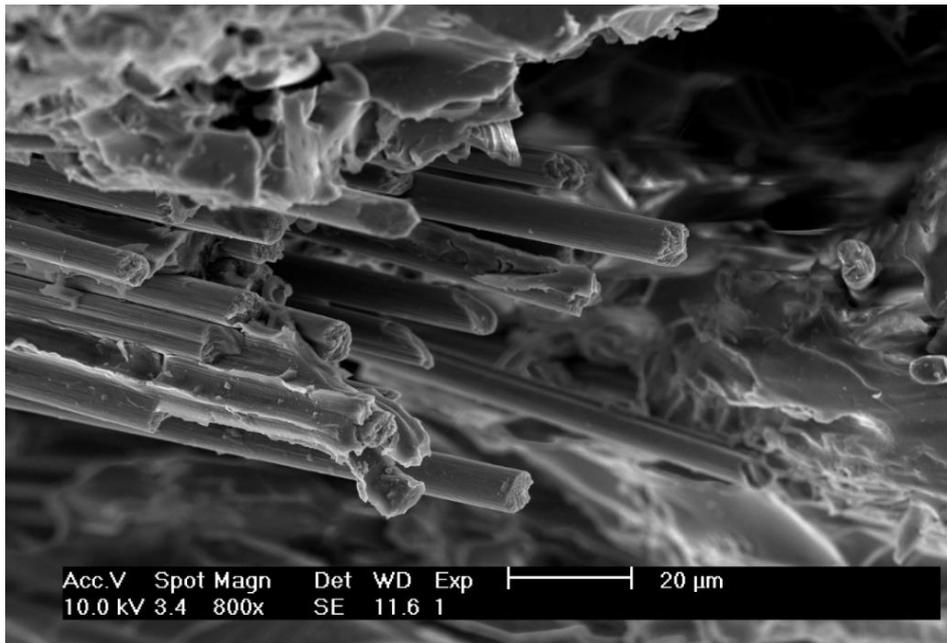
Na imagem vista na figura 8.3 é possível identificar alguns poros e em alguns locais, uma direção preferencial de alinhamento das fibras. A aleatoriedade obtida neste compósito de fibras curtas pode ser classificada entre todos os provetes avaliados, como distribuição aleatória mediana. Neste provete foi obtido o melhor nível de classificação de distribuição aleatória de fibras entre todos os provetes avaliados.

A figura 8.4 mostra o provete código 2mm_70%_4500_2, depois de maquinada expondo fibras e a matriz de resina. O compósito em análise e formado por resina Biresin[®]CR120, combinada com o endurecedor CH120-3, fornecidos pela Sika [Wildhagen e Michalek, 2014] e fibras de carbono cortada no comprimento médio 2,0 mm [Apply, Procotex, 2015]. A fração mássica utilizada na regra de mistura para este provete foi de 61% de fibras de carbono cortadas.

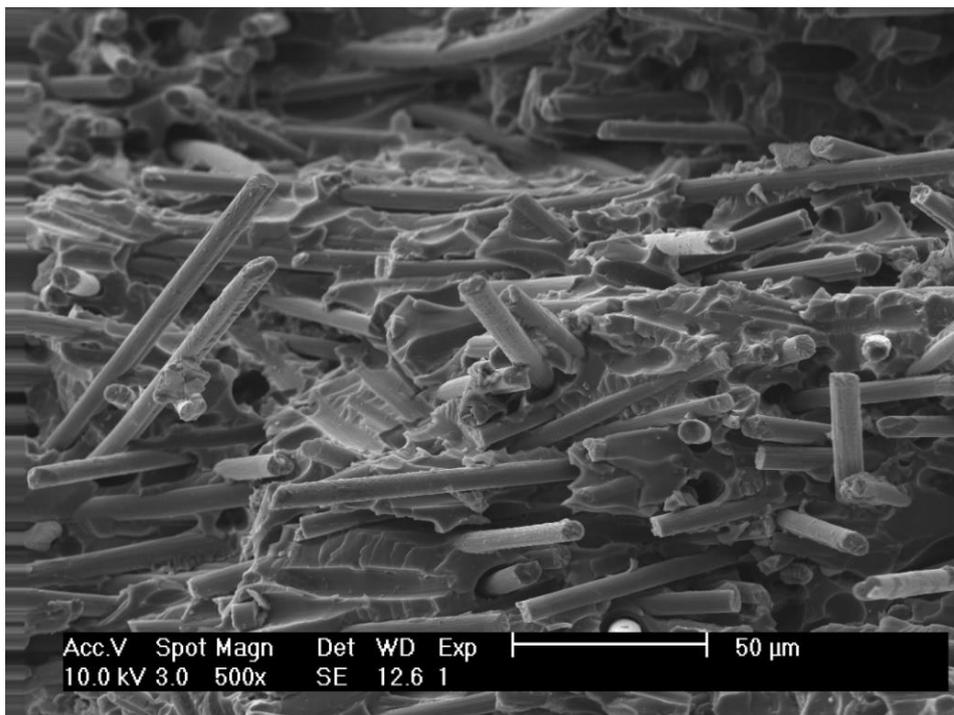
A fase observada com o microscópio digital 3D, modelo Hirox RH-2000, foi maquinada a uma rotação de 4500 rpm. Na imagem vista na figura 8.4 é possível identificar poros, grandes falhas e em alguns locais, uma direção preferencial de alinhamento das fibras ortogonais ao plano da fotografia. A aleatoriedade obtida neste compósito de fibras curtas pode ser classificada, entre todos os provetes avaliados, como aleatoriedade baixa. Neste provete foi obtido o pior nível de classificação de distribuição aleatória de fibras entre todos os provetes avaliados.

A observação da superfície da secção de fratura foi realizada com auxílio do Microscópio Eletrónico de Varrimento com Emissão de Campo da FEG SEM XL-30 Philips, Siemens, com EDS (Noran 6), campo de termiónico SEM.

As figuras 8.5 e 8.6, mostram as secções fraturadas em seus detalhes. É possível ver fibras de carbono rompidas e outras que descolaram da matriz, deixando um orifício com diâmetro semelhante ao diâmetro da fibra. Este fenómeno é conhecido como arrancamento (*pull-out*).



Figuras 8.5. Provete código 0,5mm_20%_1500_1, mostrando a secção fraturada (F. Autor).



Figuras 8.6. Provete código 0,5mm_5%_1500_2, mostrando a secção fraturada (F. Autor).

Os registros fotográficos apresentados nas imagens das figuras 8.5 e 8.6, mostram fibras inteiras e orifícios do mesmo diâmetro da fibra. Isto indica que a rotura aconteceu por extração da fibra pela falha na ligação fibra e matriz epoxídica ou por falha de adesividade nesta área de contato fibra matriz.

8.5 - Análise do tipo de fratura

O ensaio de tração da resina sem reforçador, considerada neste desenvolvimento como amostra de controlo, apresentou um comportamento dúctil, conforme mostra a figura de 8.7 e o padrão discutido em 6.6, Ensaio de tração uniaxial.

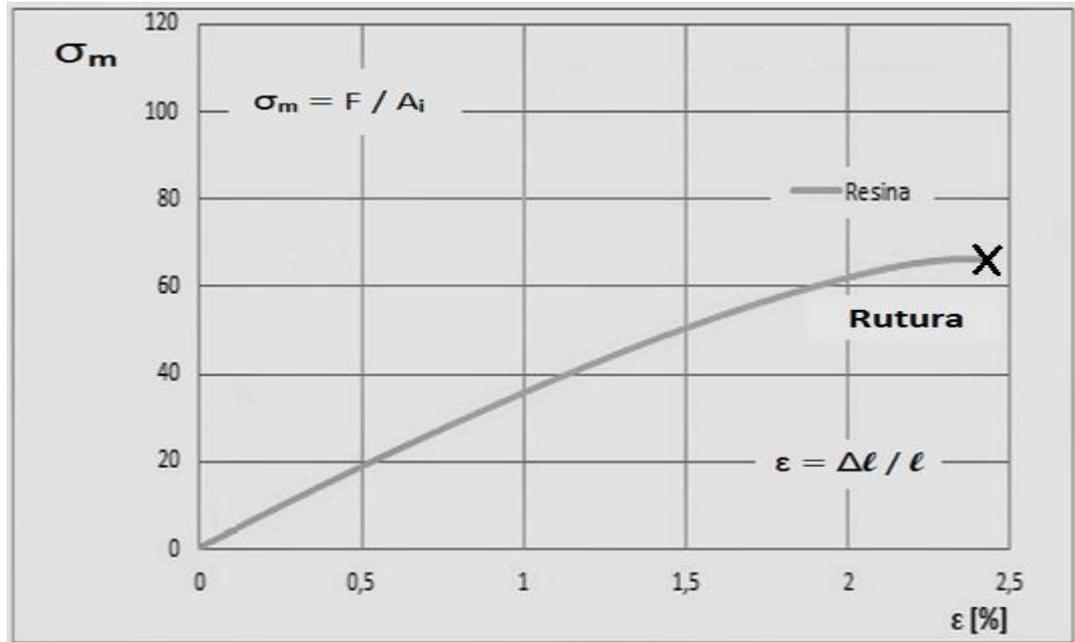


Figura 8.7. Curva levantada para provete de resina sem reforçador [Correia, 2017]. Gráfico de referência adotado para comparação com comportamento Dúctil [Branco, 1998].

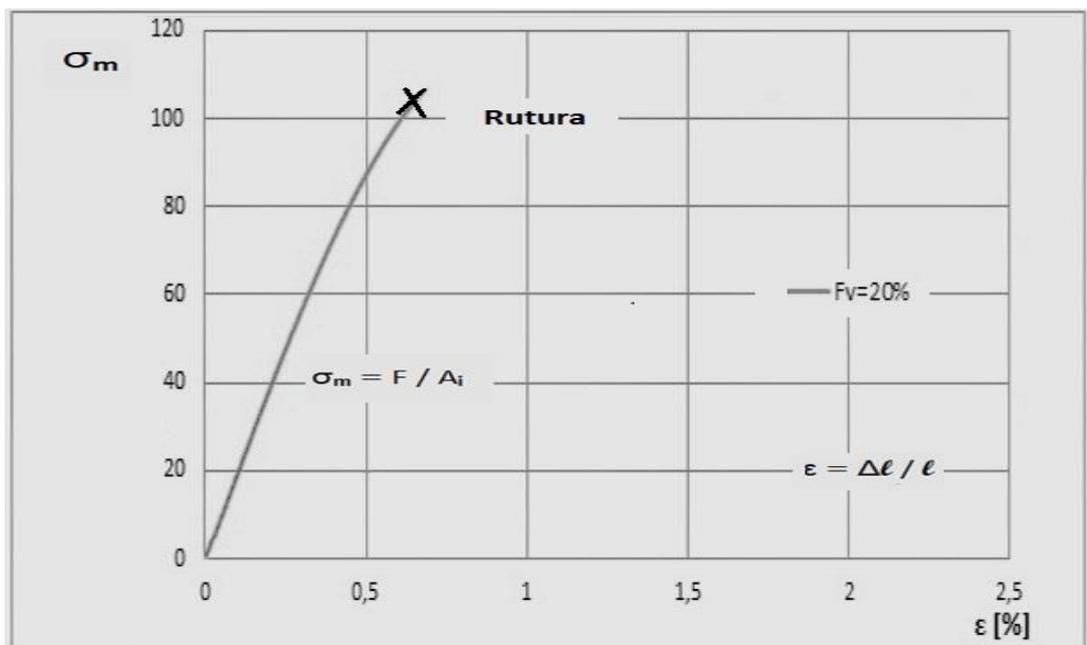


Figura 8.8 Curva levantada provete de compósito com fração volúmica 20% [Correia, 2017]. Gráfico de referência adotado para comparação com comportamento Frágil [Branco, 1998].

O ensaio de tração da resina e reforçador na regra de mistura de 20% de massa volúmica, apresentou um comportamento tipicamente frágil, conforme mostra a figura de 8.8 e o padrão discutido em 6.6, Ensaio de tração uniaxial [Branco, 1998].

A figura 8.9 mostra apenas de maneira ilustrativa a forma da seção de rutura do provete número 28, com reforçador em fibra cortada no comprimento de 5mm, fração volúmica (V_f) igual a 17,5% e matriz epoxídica de resina Biresin[®]CH83-2. Não foi observada estrição da seção de rutura, o que é comum acontecer em fratura do tipo frágil [Branco, 1998].



Figura 8.9. Forma da seção de rutura do provete número 28, fibra cortada com 5mm, (V_f) igual a 17,5%, matriz epoxídica de resina Biresin[®]CH83-2 (F. Autor).

8.6 - Influência da Porosidade na Tensão Média de Resistência à Tração

O coeficiente de correlação linear de Pearson (r) foi calculado para os provetes submetidos a ensaio de tração uniaxial, definido na equação (1.9), onde (x) e (y) são variáveis hipotéticas e (MX) e (MY) são suas respectivas médias. Os valores (Sx) e (Sy) são os desvios padrão do conjunto de dados de cada variável e (k) o número comum de elementos das duas amostras (x) e (y) testadas [Lira, Neto, 2008].

O resultado relativo ao cálculo do coeficiente de correlação linear de Pearson (r) está apresentado na tabela 8.3, mostrando a correlação entre a variável porosidade (p_s), máxima e a variável Tensão média máxima à tração (σ_{rut}).

Conforme Capítulo 1, Ferramentas da Estatística, subitem 1.3.1.3, o cálculo de (r) considerando o valor da Tensão média máxima à tração (σ_{rut}) dividida pela média da particular amostra do

tipo de compósito, resultou (r) igual a -0,06, numa escala que vai de -1 até 1. Sendo assim, existe uma correlação negativa entre a porosidade presente no material do provete e a Tensão média máxima à tração (σ_{rut}), conforme [Lira, Neto, 2008].

Tabela 8.3. Correlação entre a variável porosidade (p_s), máxima e a variável Tensão média máxima à tração (σ_{rut}).

| Fibra, V_f , 1500 [rpm] ID provete | c [mm] | V_f [%] | Porosidade Máxima [%] | Tensão σ_{max} [MPa] | Quociente Tensão σ_{max} e Média |
|---|--------|-------------|-----------------------------|-----------------------------------|---|
| 0,5mm_20%_1500_3 | 0,5 | 20 | 7,62 | 94,17 | 0,94 |
| 0,5mm_20%_1500_1 | 0,5 | 20 | 5,70 | 106,13 | 1,06 |
| Média | | 20 | 6,66 | 100,15 | Nº elementos amostra = 2 |
| Desvio Padrão | | 20 | 0,96 | 5,98 | |
| 0,5mm_17,5%_1500_2 | 0,5 | 17,5 | 11,13 | 101,84 | 1,01 |
| 0,5mm_17,5%_1500_4 | 0,5 | 17,5 | 9,06 | 103,22 | 1,02 |
| 0,5mm_17,5%_1500_3 | 0,5 | 17,5 | 8,95 | 98,50 | 0,97 |
| Média | | 17,5 | 9,71 | 101,19 | Nº elementos amostra = 3 |
| Desvio Padrão | | 17,5 | 1,00 | 1,98 | |
| 0,5mm_15%_1500_2 | 0,5 | 15 | 9,63 | 93,42 | 1,01 |
| 0,5mm_15%_1500_4 | 0,5 | 15 | 7,52 | 92,10 | 0,99 |
| Média | | 15 | 8,58 | 92,76 | Nº elementos amostra = 2 |
| Desvio Padrão | | 15 | 1,06 | 0,66 | |
| 0,5mm_10%_1500_1 | 0,5 | 10 | 3,97 | 80,13 | 0,96 |
| 0,5mm_10%_1500_4 | 0,5 | 10 | 4,75 | 87,24 | 1,04 |
| Média | | 10 | 4,36 | 83,69 | Nº elementos amostra = 2 |
| Desvio Padrão | | 10 | 0,39 | 3,56 | |
| 0,5mm_5%_1500_2 | 0,5 | 5 | 3,06 | 72,15 | 0,99 |
| 0,5mm_5%_1500_3 | 0,5 | 5 | 0,68 | 73,90 | 1,01 |
| Média | | 5 | 1,87 | 73,03 | Nº elementos amostra = 2 |
| Desvio Padrão | | 5 | 1,19 | 0,88 | |
| Amostra Controle - 0,0mm_0%_1500_1 | 0,5 | 0 | 0,66 | 68,12 | 1,01 |
| Amostra Controle - 0,0mm_0%_1500_4 | 0,5 | 0 | 0,95 | 66,30 | 0,99 |
| Média | | 0 | 0,81 | 67,21 | Nº elementos amostra = 2 |
| Desvio Padrão | | 0 | 0,15 | 0,91 | |
| Coefficiente de correlação linear de Pearson (r); Tensão σ_{max} / Média = | | | | | -0,06 |

8.7 Análise da resistência à fadiga do compósito de estudo

Estudos iniciais mais relevantes sobre as características da fratura nos compósitos relatam que o processo de deformação e o dano nestes materiais é diferente do que o que acontece nos metais e nos polímeros [Pereira, 2013].

Uma das primeiras peculiaridades observadas no mecanismo de fratura dos compósitos foi a importância da interface fibra e matriz, onde a aderência entre estes materiais nem sempre é homogênea e sem falhas.

Esta área crítica facilita a propagação simultânea de todos os tipos de dano que possam ocorrer nestes materiais, com microfissuração da matriz, perda de aderência na região da interface fibra e matriz, ruptura de fibras e outros.

Genericamente, os materiais compósitos, quando comparados aos metálicos, apresentam uma resistência superior à fadiga.

Existem evidências baseadas em experimentos diversos, que alguns metais têm um limite de resistência à fadiga inferior a 50% do valor máximo admissível para carregamentos estáticos, enquanto os compósitos podem atingir valores limite entre 60 a 80% da tensão de ruptura [Pereira, 2013].

No entanto, além das dificuldades já mencionadas com problemas críticos ocorrendo na interface fibra e matriz, surge também o fenômeno de Fluência Cíclica, mais associado à estrutura orgânica da matriz.

A fluência cíclica ou "*Cyclic creep*", ocorre devido à acumulação de deformação permanente associada ao fenômeno de histerese do material da matriz devido ao dano provocado com cada ciclo do ensaio de fadiga. Este aumento progressivo é percebido pelo aumento das deformações com o aumento do número de ciclos.

Os materiais termoplásticos SFR sofrem também fluência cíclica [Avanzini, et al., 2011] e [Avanzini, et al., 2013]. Ou seja, durante carregamentos cíclicos observa-se um amaciamento, ou decréscimo do valor do módulo de elasticidade.

A falha de componentes em materiais compósitos pode ocorrer, como em qualquer outro material, por excesso de carga, fadiga e fluência.

O dano provocado por carregamentos cíclicos, em materiais compósitos, vai-se acumulando com cada ciclo, levando à fratura ou perda da funcionalidade do componente. Ao contrário dos materiais homogêneos, como metais, em que o dano ocorre inicialmente de forma mais lenta, evoluindo para uma só fissura que se propaga na direção perpendicular à direção de aplicação da carga, nos materiais compósitos reforçados com fibras curtas a fratura é caracterizada por vários modos de falha, tais como; microfissuração, perda de coesão entre a fibra e a matriz, fratura das fibras, aparecimento de espaços vazios e fratura multidirecional [Correia, 2017].

Conforme detalhado no Capítulo 3, subitem 3.4, Fundamentos da Fadiga Mecânica o estudo

do comportamento de um material frente ao fenómeno de fadiga mecânica começa com o levantamento da curva S-N, em ensaio de fadiga cíclica.

A parte prática da execução destes ensaios de fadiga do compósito de estudo, coube a equipa de especialistas do Laboratório de Ensaio Mecânicos do Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Coimbra. Foram realizados ensaios na formulação proposta para o compósito de estudo e outras formulações possíveis para este tipo de compósito de fibra curta de carbono, com matriz epoxídica. Os resultados completos destes ensaios podem ser consultados na referência [Correia, 2017].

As condições presentes na execução do ensaio de fadiga do compósito de estudo estão detalhadas no Capítulo 3, subitem 3.4, Fundamentos da Fadiga Mecânica. Comportamento das ligas de alumínio. Foi utilizada a máquina de princípio electro mecânico, controlo em malha fechada, marca Instron, modelo ElectroPuls™ E10000, All-Electric Dynamic Test Instrument. Foram feitos ensaios com ciclo de carga tração pulsante, ($R=0$), onda sinusoidal, com frequência de 15Hz, conforme classificação feita figura 3.3, Carregamento em função do valor da Razão de Tensão (R) adotado, conforme resultados registados a tabela 8.4.

A temperatura do laboratório ficou sujeita a controlo por equipamento de ar condicionado instalado e oscilou em torno de 23°C.

O provete no ensaio de fadiga, foi maquinado conforme Capítulo 4, subitem 4.4, onde se detalha a maquinagem dos provetes. A secção crítica de ensaio adotada é retangular com 3mm (nominal) de espessura por 8mm de largura, o que resulta uma área de 24mm².

A caracterização do ensaio de fadiga realizado e os resultados da tabela 8.4 estão em conformidade com a definição dos parâmetros adotados neste ensaio específico, a seguir apresentados:

- e Espessura mensurada do provete específico.
- h Largura mensurada do provete específico.
- R Razão de tensão aplicada no ensaio de fadiga, $R=0$, Ensaio Tração Pulsante.
- N Número de ciclos registado no instante da rutura em fadiga do provete.
- P_{max} Força máxima efetivamente aplicada na ciclagem, ensaio de fadiga.
- P_{min} Força mínimo efetivamente aplicada na ciclagem, ensaio de fadiga.
- P_m Força média efetivamente aplicada na ciclagem, ensaio de fadiga.
- S_{max} Tensão máxima de um ciclo de fadiga
- S_{min} Tensão mínima de um ciclo de fadiga
- ΔS Gama de tensões de fadiga

Tabela 8.4. Valores obtidos no ensaio de fadiga compósito de estudo, fração volúmica 17,5%, matriz epoxídica de resina Biresin[®]CH83-2 [Correia, 2017].

| Levantamento da Curva S-N - Compósito de Estudo, Fibra Curta de Carbono | | | | | | | | | | | | |
|---|---|--------|--------|--------------------------|--------------------------|------------------------|-------------------------|------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------|----------------------|
| Resina epoxídica CR83-2, fibra c = 0,5mm, V _f = 17,5%; Razão de Tensão (R); Frequência 15 Hz; Temperatura 23°C | | | | | | | | | | | | |
| Fibra, V _f , 1500 [rpm] ID provete | R | h [mm] | e [mm] | P _{max} [kN] | P _{min} [kN] | P _m [kN] | A [mm ²] | ΔP [kN] | S _{max} [MPa] | S _{min} [MPa] | Amplitude ΔS [MPa] | Número N [ciclos] |
| 0,5mm_17,5%_1500_7 | 0 | 7,95 | 3,22 | 1,28 | 0,000 | 0,640 | 25,60 | 1,280 | 50,0 | 0,0 | 50,0 | 223118 |
| 0,5mm_17,5%_1500_3 | 0 | 8,22 | 3,27 | 1,61 | 0,000 | 0,806 | 26,88 | 1,613 | 60,0 | 0,0 | 60,0 | 20783 |
| 0,5mm_17,5%_1500_8,2 | 0 | 8,23 | 3,38 | 1,67 | 0,000 | 0,835 | 27,82 | 1,669 | 60,0 | 0,0 | 60,0 | 20000 |
| 0,5mm_17,5%_1500_2 | 0 | 8,26 | 3,16 | 1,44 | 0,000 | 0,718 | 26,10 | 1,436 | 55,0 | 0,0 | 55,0 | 162368 |
| 0,5mm_17,5%_1500_12 | 0 | 8,07 | 3,17 | 1,28 | 0,000 | 0,640 | 25,58 | 1,279 | 50,0 | 0,0 | 50,0 | 454445 |
| 0,5mm_17,5%_1500_15 | 0 | 7,56 | 3,42 | 1,42 | 0,000 | 0,711 | 25,86 | 1,422 | 55,0 | 0,0 | 55,0 | 46193 |
| 0,5mm_17,5%_1500_16 | 0 | 7,29 | 3,31 | 1,51 | 0,000 | 0,754 | 24,13 | 1,508 | 62,5 | 0,0 | 62,5 | 14902 |
| 0,5mm_17,5%_1500_17 | 0 | 7,27 | 3,29 | 1,55 | 0,000 | 0,777 | 23,92 | 1,555 | 65,0 | 0,0 | 65,0 | 3924 |
| 0,5mm_17,5%_1500_14 | 0 | 7,47 | 3,43 | 1,15 | 0,000 | 0,576 | 25,62 | 1,153 | 45,0 | 0,0 | 45,0 | 2956860 |

A figura 8.10, nomeada como Curva em fadiga S-N do compósito de estudo, fração volúmica 17,5%, matriz epoxídica de resina Biresin[®]CH83-2 apresenta os resultados do ensaio realizado e uma aproximação em linha feita em função matemática De Potencia, objetivando a obtenção de uma curva S-N, passível de comparação com curva S-N de outros materiais.

A expressão matemática De Potência adotada neste desenvolvimento, equação (8.1), para o compósito de estudo, com reforçador aleatoriamente distribuído e em direções variadas, de fibra curta de carbono de comprimento 0,5 mm [Apply, Procotex, 2015], fração volúmica 17,5%, matriz epoxídica e matriz epoxídica CR83-2 [Wildhagen, Michalek, 2016], maquinado com fresagem conforme detalhado no Capítulo 4, subitem 4.4, na velocidade do fuso (n) igual a 1500 rpm.

$$\Delta S_{max} = 106 N^{-0,058} \quad (8.1)$$

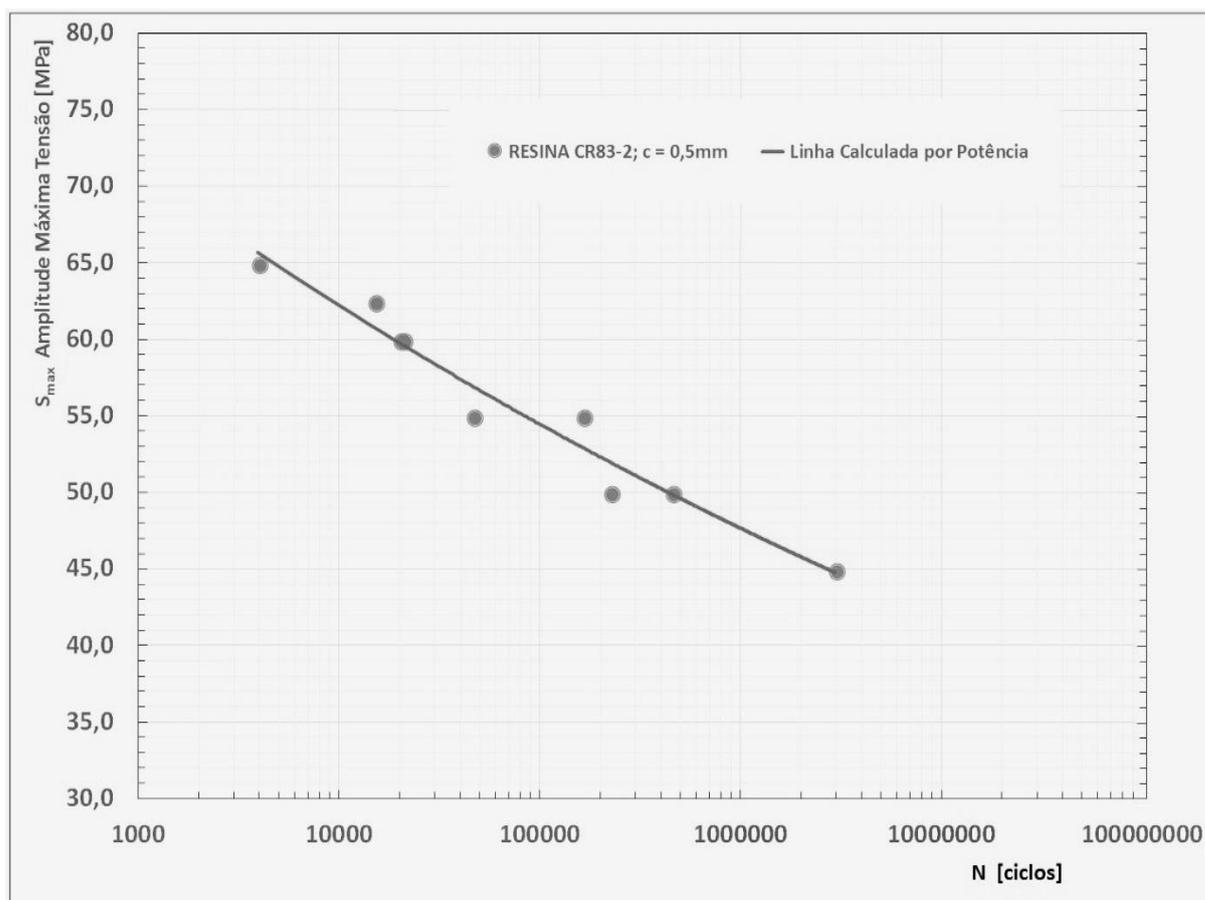


Figura 8.10. Curva em fadiga S-N do compósito de estudo, fração volúmica 17,5%, matriz epoxídica de resina Biresin[®]CH83-2 [Capela, *et al.*, 2018].

8.7.1 - Influência da porosidade na curva S-N mensurada

A densidade de cada um dos provetes submetido a ensaio de fadiga foi mensurada conforme apresenta esquematicamente a figura 6.1, cumprindo as etapas necessárias para definição dos valores de (m_s) e (m_m) e detalha a referência [Lourenço, 2017].

A tabela 8.5, mostra valores relativo à densidade do material dos provetes e porosidade máxima calculada conforme subitem 8.2, denominado Fração volúmica, porosidade e Densidade do Compósito de Estudo. Apresenta também dos parâmetros de cálculo e os valores da densidade do material.

O valor teórico (p_{SM}), porosidade máxima do material do provete de fibra curta de carbono 0,5 mm, foi determinado pela equação (1.5), como uma primeira referência no estudo da densidade do material composto, compósito de fibra curta de carbono e resina epoxídica [Pottker e Appoloni, 2011].

O coeficiente de correlação linear de Pearson (r) foi calculado para os provetes submetidos a

ensaio de fadiga com a formulação do compósito de estudo. O valor de (r) foi definido na equação (1.9), onde (x) e (y) são variáveis hipotéticas e (MX) e (MY) são suas respectivas médias ou referência adotada para o parâmetro em estudo [Lira, Neto, 2008].

O cálculo da influência da porosidade na vida a fadiga do compósito de estudo, considerou como referência do parâmetro estudado o valor teórico da curva de aproximação em linha feita com a função matemática De Potência, equação (8.1).

A curva De Potência apresentada na figura 8.10, representa a curva S-N do compósito em estudo e foi calculada com base na expressão matemática definida na equação (8.1) e foi usada para definir a referência no cálculo do coeficiente de correlação linear de Pearson (r) adotado. O resultado relativo ao cálculo do coeficiente de correlação linear de Pearson (r) está apresentado na tabela 8.5, mostrando a correlação entre a variável porosidade (p_s) , máxima e a variável Tensão média máxima à tração (σ_{rut}) .

Tabela 8.5. Correlação entre a variável porosidade (p_s) presente no provete e a variável amplitude máxima observada no número de ciclos na rutura à fadiga.

| Efeito da Porosidade no Fenômeno de Fadiga - Compósito de Estudo, Fibra Curta de Carbono | | | | | | | | | |
|---|--------|--------|--|---------------------------------------|-----------------------|----------------------------|-------------------|---|---|
| Resina epoxídica CR83-2, fibra $c = 0,5\text{mm}$, $V_f = 17,5\%$; Razão de Tensão (R) ; Frequência 15 Hz; Temperatura 23°C | | | | | | | | | |
| Fibra, V_f , 1500 [rpm] ID provete | Wt [%] | Vf [%] | Densidade Teórica [g/cm ³] | Densidade Medida [g/cm ³] | Porosidade Máxima [%] | Amplitude ΔS [MPa] | Número N [ciclos] | Amplitude Referência ΔS_r [MPa] | Amplitude $(\Delta S - \Delta S_r)$ [MPa] |
| 0,5mm_17,5%_1500_7 | 25,58 | 15 | 1,2905 | 1,2768 | 1,06 | 50,0 | 223118 | 51,9 | -1,9 |
| 0,5mm_17,5%_1500_3 | 25,58 | 15 | 1,2905 | 1,2708 | 1,53 | 60,0 | 20783 | 59,5 | 0,5 |
| 0,5mm_17,5%_1500_8,2 | 25,58 | 15 | 1,2905 | 1,2711 | 1,50 | 60,0 | 20000 | 59,7 | 0,3 |
| 0,5mm_17,5%_1500_2 | 25,58 | 15 | 1,2905 | 1,2886 | 0,14 | 55,0 | 162368 | 52,9 | 2,1 |
| 0,5mm_17,5%_1500_12 | 25,58 | 15 | 1,2905 | 1,2560 | 2,67 | 50,0 | 454445 | 49,8 | 0,2 |
| 0,5mm_17,5%_1500_15 | 25,58 | 15 | 1,2905 | 1,2831 | 0,58 | 55,0 | 46193 | 56,9 | -1,9 |
| 0,5mm_17,5%_1500_16 | 25,58 | 15 | 1,2905 | 1,2808 | 0,75 | 62,5 | 14902 | 60,7 | 1,8 |
| 0,5mm_17,5%_1500_17 | 25,58 | 15 | 1,2905 | 1,2698 | 1,60 | 65,0 | 3924 | 65,6 | -0,6 |
| 0,5mm_17,5%_1500_14 | 25,58 | 15 | 1,2905 | 1,2519 | 2,99 | 45,0 | 2956860 | 44,7 | 0,3 |
| Média | | | | 1,2609 | 2,30 | | | | |
| Desvio Padrão | | | | 0,0090 | 0,70 | | | | |
| Coeficiente de correlação linear de Pearson (r) ; Amplitude $(\Delta S - \Delta S_r)$ [MPa] = | | | | | | | | -0,04 | |

O parâmetro porosidade máxima do material do provete representa o cálculo da equação (1.5), para os valores máximos de densidade da resina e da densidade da fibra de carbono,

expresso em percentagem. Tais valores são fornecidos pelos fabricantes destes materiais [Wildhagen, Michalek, 2016] e [Apply, Procotex, 2015].

Conforme Capítulo 1, subitem 1.3.1.3, o cálculo de (r) considerando o valor variável ΔS Gama de tensões de fadiga é subtraída pela referência adotada, resultou na base de valores usados para o cálculo do coeficiente (r) e apresentado na tabela 8.5.

O cálculo assim estruturado resultou num valor de (r) igual a $-0,04$, numa escala que vai de -1 até 1 .

Sendo assim, existe uma correlação negativa entre a porosidade presente no material do provete e a variável (ΔS) , Gama de tensões de fadiga dos provetes avaliados, para o mesmo número de ciclos de rotura à fadiga, conforme [Lira, Neto, 2008].

Este cálculo realizado e a constatação advinda dele, confirma as informações experimentais presentes na referência [Correia, 2017].

8.8 – Comparação compósito de estudo com Liga de Alumínio

A comparação com a liga de alumínio fundido A850.0-F, do processo de fabricação de componentes e partes por maquinagem, a partir de blocos ou placas de compósito de fibra curta de carbono, distribuídas aleatoriamente e em direções variadas, em matriz epoxídica, aborda os seguintes aspetos:

- Propriedades Mecânicas; Tensão Média de Rutura à Tração e Modulo de Elasticidade
- Rugosidade Média (R_a), obtida na maquinagem do compósito de estudo
- Comportamento frente ao fenómeno de fadiga mecânica dos materiais

Esta parte do desenvolvimento apresenta os principais parâmetros adotados nesta comparação.

8.8.1. Comparação das Propriedades Mecânicas

A tabela 8.6 mostra as principais propriedades mecânicas e físicas do compósito de estudo e da liga de alumínio fundido A850.0-F, material adotado como referência de comparação, com o compósito estudado neste desenvolvimento. Os valores apresentados nesta tabela estão conforme Capítulo 3 e Capítulo 7.

A adoção da Temperatura Limite de Operação do componente ou parte em compósito como sendo 80% da Temperatura de Transição Vítrea, baseiam-se no facto da resina epoxídica usada

na produção dos provetes ser amorfa e termoendurecível. Conforme, citação página 49 da referência [Pires, 2012], “Estas resinas, quando sujeitas a temperaturas elevadas, apenas sofrem uma única transformação antes de ocorrer a sua decomposição, a transição vítrea”.

A tabela 8.6 mostra os valores adotados para limitar o uso do compósito de estudo em aplicações práticas.

Um cálculo estático simplificado foi feito considerando as seguintes premissas [Bruhn, 1973]:

- Definir um corpo cilíndrico com diâmetro (Q) e comprimento de 100mm.
- Submeter o corpo a uma força uniaxial estática de tração, valor 500 N.
- Definir uma margem de segurança estática (M_g). Adotado, $M_g = 34\%$ [Bruhn, 1973].

Tabela 8.6. Propriedades mecânicas e físicas do compósito de estudo e da liga de alumínio fundido A850.0-F.

| Material considerado | Limite Operação [°C] (1) (2) | Tensão Rutura Tração [MPa] | Módulo Elasticidade [GPa] | Densidade Teórica [g/cm ³] |
|---|------------------------------|----------------------------|---------------------------|--|
| Liga de Alumínio Fundida A850.0-F, [Kaufman, Rooy, 2004] | 180 | 140 | 71 | 2,88 |
| Compósito Fibra curta de carbono 0,5 mm, matriz epoxídica CR83-2 | 67 | 101 | 14 | 1,16 |
| Observação: Liga de alumínio conforme Capítulo 3, subitem 3.3.2, Propriedades mecânicas e seleção liga de alumínio. Compósito, Capítulo 8, subitem 8.3, Influência da fração volúmica nas propriedades mecânicas. Temperatura (1) igual a 80% da temperatura de fluência da liga. Temperatura (2) igual a 80% da temperatura de transição vítrea da resina CR83-2. | | | | |

Com esta informação é possível definir o diâmetro (Q) do hipotético cilindro, para cada material diferente. A escolha recai sobre o cilindro de menor massa, e conseqüentemente, menor peso. O valor da massa é calculado para cada material e diâmetro (Q), aplicando a equação (8.2) e correspondente valor de densidade de cada alternativa de material.

$$M_g = [(S_E - S_A) / S_E] * 100 \quad (8.2)$$

Assumindo que (S_E) é a Tensão de tração que provoca a rutura do material num ciclo monótono. O valor (S_A) é a Tensão de tração uniaxial atuando na secção do cilindro, devidamente reduzida pela margem de segurança adotada.

A tabela 8.7, mostra o resultado obtido nesta simulação simplificada.

Apesar do cilindro hipotético criado com base nas informações relativas ao material identificado como Compósito de fibra curta de carbono 0,5 mm, matriz epoxídica CR83-2, ter um diâmetro maior do que o do cilindro em liga de alumínio A850.0-F, a massa é menor do que o do cilindro em alumínio e conseqüente, o peso do cilindro em compósito é menor. Isto ocorre em razão da grande diferença das densidades dos materiais.

Tabela 8.7. Resultado obtido nesta simulação simplificada.

| Dimensionamento Simplificado Tração Estática Material considerado | Tensão ruptura Tração [MPa] | Margem segurança mínima [%] | Diâmetro secção cilindro [mm] | Tensão atuante tração [MPa] | Densidade teórica material [g/cm³] | Massa Total Cilindro [g] |
|--|------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|--|---------------------------------|
| Liga de Alumínio Fundida A850.0-F, [Kaufman, Rooy, 2004] | 140 | 34 | 2,62 | 92,4 | 2,88 | 1,56 |
| Compósito Fibra curta de carbono 0,5 mm, matriz epoxídica CR83-2 | 101 | 34 | 3,09 | 66,66 | 1,18 | 0,89 |
| Observação: O componente feito com compósito de fibra curta de carbono, comprimento médio 0,5mm e resina epoxídica CR83-2, tem 57% da massa do mesmo componente fabricado com liga de alumínio fundida A850.0-F | | | | | | |

8.8.2. Comparação da rugosidade média e estabilidade do processo de maquinagem

A comparação entre valores de rugosidade obtidas pelo processo de maquinagem entre materiais diferentes e condições de corte distintas é de pouco valor prático face o elevado número de variáveis envolvidas neste processo, como mostra o Capítulo 4, subitem 4.8, Maquinagem de Ligas de Alumínio e Rugosidade obtida.

No entanto, é importante comparar os resultados da Rugosidade média (R_a) obtida no processo aqui realizado, com o mesmo parâmetro obtido com uma liga de alumínio fundido, semelhante a liga de referência A850.0-F, até como ponto de passagem para trabalhos futuros de otimização.

Assim sendo, os seguintes resultados são apresentados:

- Maquinagem Liga fundida A306.0-F, referência [Borba, 2013]: Valor (R_a) média de 3 amostras foi igual a 2,30 [μm].
- Maquinagem compósito de estudo, Fibra 0,5mm, Matriz epoxídica CR83-2, maquinagem a 1500 [rpm]; Valor (R_a) média de 3 amostras foi igual a 3,33 [μm].

O importante nesta avaliação inicial é que os dois valores de rugosidade (R_a) apresentados, 2,30 [μm] e 3,33 [μm], estão classificados como de Alta Qualidade de Acabamento, segundo a norma [NBR ISO 4287, 2002].

Outro ponto importante para uma eventual aplicação na indústria em geral é uma avaliação mesmo que simplificada, da estabilidade do processo de maquinagem executado, conforme mencionado em [Ferraresi, 1970].

Em geral, o parâmetro mais usado nos experimentos para avaliar a estabilidade do processo de maquinagem é o Desvio Padrão, calculado considerando os valores da rugosidade média (R_a), mensurada numa amostra de pelo menos 3 corpos de prova maquinados em condições semelhantes de processamento.

O valor do desvio padrão assim calculado é um bom indicador das variações do processo ao longo do tempo de execução, considerando efeitos causados pela vibração da máquina, homogeneidade do material maquinado, porosidade do material, aquecimento no ponto de corte, desgaste da ferramenta de corte e em alguns casos, a quebra ou a perda do corte da ferramenta utilizada da maquinagem em estudo.

Os valores de desvio padrão encontrados em experimentos semelhantes são:

- Maquinagem Liga fundida A306.0-F, referência [Borba, 2013]: Valor (R_a) média de 3 amostras foi igual a 2,30 [μm], com primeira leitura 2,65 [μm], segunda leitura 2,78 [μm] e terceira leitura 1,48 [μm] e desvio padrão igual 28,22%.
- Maquinagem compósito de estudo, Fibra 0,5mm, Matriz epoxídica CR83-2, maquinagem a 1500 [rpm]; Valor R_a média de 3 amostras foi igual a 3,33 [μm], com primeira leitura 2,70 [μm], segunda leitura 3,10 [μm] e terceira leitura 4,20 [μm] e o desvio padrão foi igual a 16,50%, conforme tabela 7.1. denominada, Resultado (R_a) e (R_z), comprimento de fibra 6mm, 2mm e 0,5mm.

Os valores de desvio padrão da rugosidade média medida mostram que o processo de maquinagem do compósito de estudo tem estabilidade similar ao processo de maquinagem de Liga fundida A306.0-F, referência [Borba, 2013].

8.8.3. Comparação do comportamento frente ao fenômeno de fadiga

Para servir de apoio a esta tarefa de comparação, no Capítulo 3, subitem 3.4, Fundamentos da Fadiga Mecânica. Comportamento das ligas de alumínio, foi mostrado a curva S-N da liga de alumínio fundido A850.0-F, adaptada as condições de ensaio aplicadas ao compósito de estudo.

A figura 8.11 mostra as curvas S-N relativas aos dois materiais.

A comparação do desempenho de materiais ou diferentes ligas de metais frente ao fenômeno de fadiga, precisa ser feita por parâmetros expresso em percentagem ou considerando a probabilidade de falha à fadiga num determinado número de ciclos (N), em cada caso ou para cada material [Swanson, 1963].

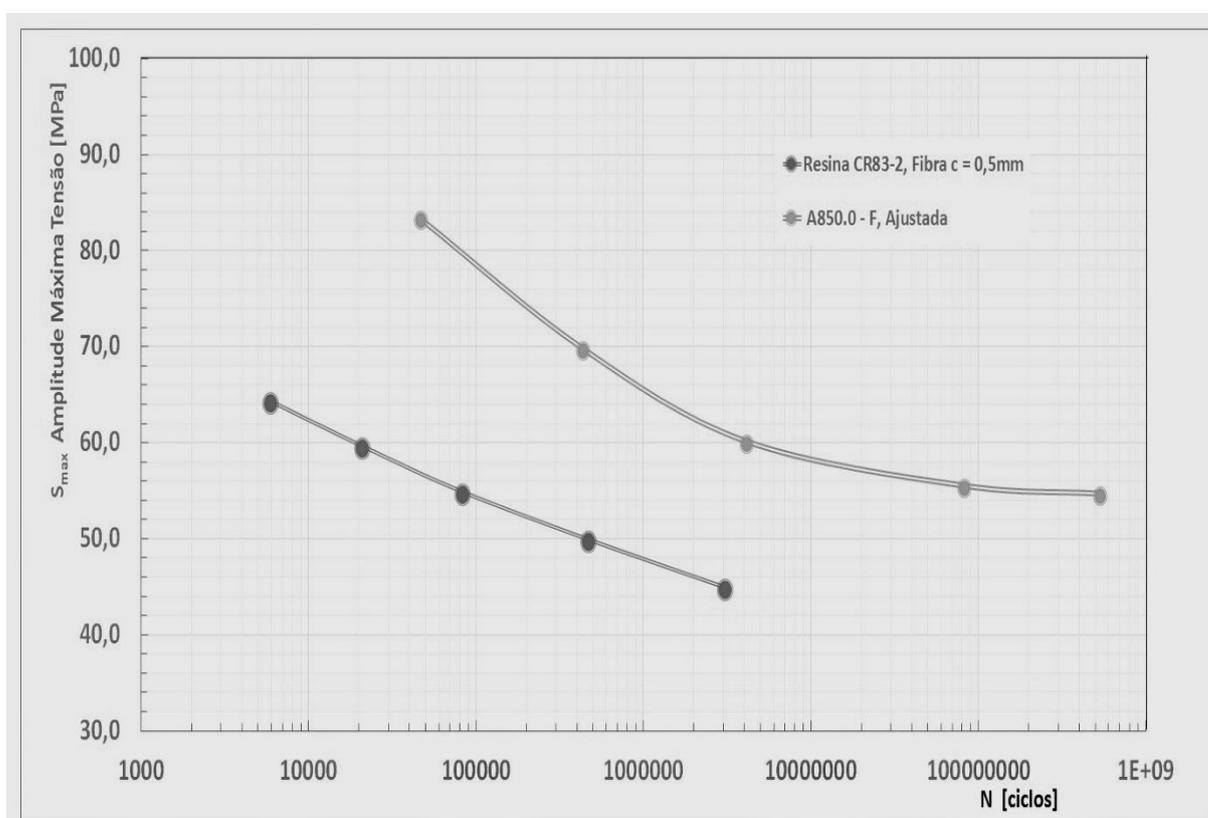


Figura 8.11. Curva S-N relativas aos materiais Liga de Alumínio A850.0-F e compósito de estudo, $V_f = 17,5\%$, matriz epoxídica de resina Biresin[®]CH83-2.

O estudo Estocástico de falha em um determinado número de ciclos (N) segue a Distribuição Estatística de Weibull, conforme é apresentado na referência [Rodrigues, 2012].

Esta metodologia de comparação entre o desempenho do material M1 e o desempenho material M2 pela análise das probabilidades de falha, exige amostras numerosas, submetidas a ensaios de fadiga com procedimentos e equipamentos iguais, o que inviabiliza o uso desta ferramenta estatística neste desenvolvimento [Wang, *et al.*, 2001].

Outro caminho adotado é utilizar o quociente da S_{max} amplitude máxima Tensão de Tração, pela Tensão de Rotura σ_{rut} dos materiais ensaiados, expresso em percentagem.

A figura 8.12 apresenta as Curva S-N da Liga A850.0-F e do compósito de estudo, em função da S_{max} amplitude máxima Tensão de Tração, pela Tensão de Rotura σ_{rut} , em percentagem.

A mesma figura 8.20 confirma citação de [Pereira, 2013], página 56, que afirma, “...alguns metais têm um limite de resistência à fadiga inferior a 50% do valor máximo admissível para carregamentos estáticos, enquanto os compósitos podem atingir valores limite entre 60 a 80% da tensão de rotura”.

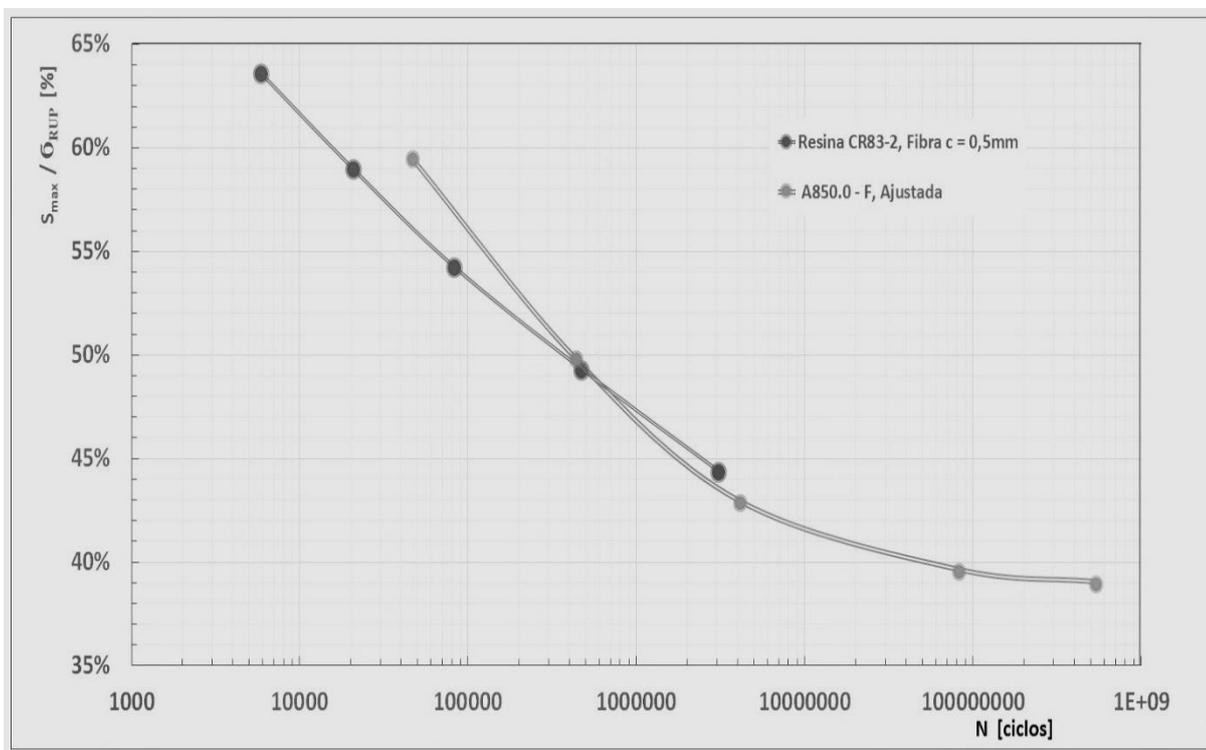


Figura 8.12. Curva S-N Liga A850.0-F e compósito de estudo, em função da S_{max} amplitude máxima Tensão de Tração, pela Tensão de Rotura σ_{rut} , em percentagem.

Como simulação de uma hipotética aplicação de materiais diferentes para um mesmo caso,

pelo critério de resistência à fadiga para fins de comparação dos resultados e decisão, o renomado livro “*Analysis and Design of Flight Vehicle Structures*”, propõem o seguinte cálculo simplificado [Bruhn, 1973]:

- Definir um corpo cilíndrico com diâmetro (Q) e comprimento de 100mm.
- Submeter o corpo a uma força uniaxial estática de tração, valor 500 N.
- Estabelecer uma vida à fadiga para o componente. Foi adotado 1.000.000 de ciclos.
- Definir uma margem de segurança à fadiga (M_g). Adotado, $M_g = 20\%$ [Bruhn, 1973].

Com esta informação é possível definir o diâmetro (Q) para cada material diferente.

A escolha recai sobre o cilindro de menor massa, e conseqüentemente, menor peso.

O valor da massa do cilindro hipotético é calculado pela aplicação da equação (8.3) no cálculo do valor do diâmetro (Q), para cada material, considerando o correspondente valor de densidade de cada alternativa de material.

$$M_g = [(S_v - S_A) / S_v] * 100 \quad (8.3)$$

A tabela 8.8. mostra o resultado obtido nesta simulação simplificada.

Tabela 8.8. Resultado obtido nesta simulação simplificada, dimensionamento à fadiga.

| Dimensionamento Simplificado à Fadiga com o material abaixo | Amplitude tensão rutura em 10⁶ ciclos [MPa] | Margem segurança mínima [%] | Diâmetro secção cilindro [mm] | Tensão atuante tração [MPa] | Densidade teórica material [g/cm³] | Massa Total Cilindro [g] |
|--|---|------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|--|---------------------------------|
| Liga de Alumínio Fundida A850.0-F, [Kaufman, Rooy, 2004] | 67 | 20 | 3,45 | 53,6 | 2,88 | 2,69 |
| Compósito Fibra curta de carbono 0,5mm, matriz epoxídica CR83-2 | 47 | 20 | 4,11 | 37,6 | 1,18 | 1,57 |
| Observação: O componente feito com compósito de fibra curta de carbono, comprimento médio 0,5mm e resina epoxídica CR83-2, tem 58% da massa do mesmo componente fabricado com liga de alumínio fundida A850.0-F | | | | | | |

8.9 – Conclusão desta fase do desenvolvimento proposto

Na Fase 2 do desenvolvimento foi possível avaliar o comportamento do compósito de estudo, e os efeitos do processo de maquinagem na composição formada por matriz epoxídica e reforçador de fibra curta de carbono com comprimento medio de 0,5 mm, conforme detalha a tabela 5.3 do Capítulo 5, em seguida apresentada de maneira resumida como:

- **Compósito 3;** Fibra curta com comprimento de 0,5 mm, Fração volúmica 17,5%, Biresin®CR83, bisfenol, A - epichlorhydrin 1,4-bis (2,3-epoxypropoxy) butane, hardener CH183-2.

Os parâmetros analisados foram suficientes para permitir uma primeira comparação com a liga de alumínio de baixa resistência a tração, identificada por A0850.0-F.

As principais conclusões obtidas nesta parte do desenvolvimento foram:

- Os ensaios mostram que quanto maior for a porosidade presente no compósito, menor será a Tensão média máxima na rutura mensurada. Assim sendo, existe uma correlação negativa entre a maior presença de porosidade e a Tensão média máxima a tração (σ_{rut}), conforme Coeficiente de correlação de Pearson calculado, igual a um valor negativo de 0,06. A porosidade é em geral associada aos métodos de processo de fabrico utilizados no preparo da placa de compósito. No entanto, como premissa inicial foi adotado um método simplificado de cura da resina em temperatura ambiente, seguido de endurecimento por 12 Horas, normalmente usado em empresas de pequeno porte do ramo de compósito. Os processos realizados nos laboratórios do fabricante de resina, aplicam um procedimento que controla a temperatura, a pressão, a humidade e a contaminação ambiental, que conduz a uma porosidade menor. Este defeito, alta porosidade, pode ser minimizado por ações adotadas durante a fase de processamento do compósito.
- A melhor formulação do Compósito de Estudo nos provetes ensaiados, está na gama de fração volúmica entre 17,0% e 17,8%, considerando a mesma resina epoxídica, o mesmo processo de fabrico e a mesma fibra de carbono com comprimento médio de 0,5 mm.

- A fratura observada para o Compósito de Estudo foi classificada como do tipo frágil, tanto pela análise das imagens óticas e imagens obtidas com o Microscópio eletrônico (SEM), como também, pela caracterização do diagrama Tensão média máxima a tração (σ_{rut}), em função da extensão nominal (ϵ).
- Foi feita uma avaliação inicial nos valores de rugosidade (Ra), apresentados por uma liga de alumínio fundida, igual a 2,30 [μm] e pelo Compósito de Estudo, que resultou em 3,33 [μm]. Além da proximidade dos dois valores, ambos estão classificados como de Alta Qualidade de Acabamento, segundo a norma [NBR ISO 4287, 2002].
- Um ponto importante para uma eventual aplicação na indústria em geral é uma avaliação, mesmo que simplificada, da estabilidade do processo de maquinagem executado, conforme mencionado em [Ferraresi, 1970]. Isto foi feito utilizando o parâmetro Desvio Padrão dos valores da rugosidade média (Ra), sendo este, o parâmetro mais usado nos experimentos para avaliar a estabilidade do processo de maquinagem. Este cálculo deve ser feito em uma amostra de pelo menos três corpos de prova maquinados em condições semelhantes de processamento. Os valores de desvio padrão encontrados nesta comparação foram semelhantes. Maquinagem liga fundida A306.0-F, desvio padrão igual 28,22% e maquinagem Compósito de Estudo, Fibra 0,5mm, matriz epoxídica CR83-2, maquinagem a 1500 [rpm], o desvio padrão foi igual a 16,50%. Os valores de desvio padrão da rugosidade média medida mostram que o processo de maquinagem do compósito de estudo tem estabilidade similar ao processo de maquinagem de Liga fundida A306.0-F, referência [Borba, 2013].
- O ensaio de fadiga mostrou uma coerência dos resultados obtidos nesta fase do desenvolvimento com os resultados encontrados na bibliografia revisada para compósitos semelhantes, mostrando um desempenho equivalente a liga de alumínio estudada. Os cálculos realizados para a comparação entre o compósito de estudo e a liga de alumínio selecionada e que serviram de base para a conclusão deste trabalho, se mostraram adequados e coerentes com a revisão bibliográfica realizada, conforme artigos e livros indicados em cada etapa deste capítulo [Capela, *et al.*, 2018].

- A amostra de controlo adotada, provete fabricado com resina sem reforçador, foi usada com sucesso na avaliação dos resultados nos ensaios de tração em função da massa volúmica adotada, demonstrando no experimento, qual a efetiva contribuição do reforçador nestas propriedades mensuradas.
- Os ensaios mostram que quanto maior for a porosidade presente, menor será a variável gama de tensões de fadiga do provete mensurada no ensaio. Sendo assim, existe uma correlação negativa entre a porosidade presente no material do provete e a variável (ΔS), Gama de tensões de fadiga dos provetes avaliados, para o mesmo número de ciclos de rutura à fadiga. Este cálculo realizado e a constatação advinda dele, confirma as informações experimentais presentes na referência [Correia, 2017]. A porosidade é em geral associada ao tipo e métodos de processo de fabrico utilizado no preparo da placa de compósito. Este defeito pode ser minimizado por ações durante a fase de processamento do compósito.

CONCLUSÃO GERAL E PROPOSTA DE INVESTIGAÇÃO COMPLEMENTAR

9.1. Conclusão Geral

Neste desenvolvimento foi realizado um trabalho de investigação científica sobre a viabilidade e as limitações de uso do processo de fabrico de partes ou componentes por maquinagem, iniciada a partir de um bloco de compósito preparado anteriormente.

Os resultados das propriedades do compósito de estudo e da liga de alumínio selecionada foram comparados, estabelecendo assim, uma referência ainda que inicial, para uma aplicação deste processo em componentes e partes de uso na indústria em geral, nomeadamente na indústria aeroespacial.

Os diversos ensaios e o estudo das melhores informações académicas disponíveis sobre o assunto, permitiram as seguintes conclusões:

- O compósito selecionado apresentou maquinabilidade e rugosidade final compatível com os obtidos em ligas de alumínio de uso industrial. A estabilidade do processo é compatível com a encontrada nas ligas de alumínio processadas em fundição, seguidas de maquinagem. Os valores de rugosidade foram semelhantes aos encontrados nos experimentos académicos referenciados no capítulo 8 e podem ser confirmados na indústria de maneira geral, com ênfase na indústria aeroespacial, com base nas normas mencionadas ao longo deste desenvolvimento.
- O compósito selecionado apresentou Tensão de Rutura (101 MPa) à tração unidirecional. O referido valor está 28,6% abaixo do valor da liga de alumínio fundida A850.0-F (140 MPa). Este valor de Tensão de Rutura obtido em tração unidirecional observado na liga de alumínio fundida A850.0-F é um dos mais baixos valores de tensão rutura entre as ligas usadas na indústria aeroespacial. Isto ocorre em razão da Liga A850.0-F ter sido desenvolvida para maior resistência à oxidação, com a consequente resistência a esforços mecânicos menor.

As análises realizadas sugerem que este valor reduzido de resistência à tração do Compósito de Estudo está relacionado ao processo simplificado de fabrico adotado neste desenvolvimento e usado por empresas de médio e pequeno porte, no fabrico de componentes e partes em compósito. No preparo realizado em laboratórios dos fabricantes de resina, as condições existentes durante o processamento são consideradas ideais. Nestes procedimentos laboratoriais a temperatura é controlada, bem como a pressão, a humidade e a contaminação ambiental. Esta conclusão é perceptível quando observamos os valores obtidos na amostra de controlo (placebo), caracterizada por resina sem reforçadores, que de forma geral, apresentaram valores menores, quando comparados aos valores obtidos pelo fabricante da resina em condições laboratoriais ideais.

- O compósito selecionado apresentou Módulo Elasticidade quatro vezes menor que o Módulo de Elasticidade da liga de alumínio A0850.0-F. Este aspeto está relacionado a característica intrínseca do Compósito de Estudo e ao processo simplificado de fabrico adotado neste desenvolvimento. Esta constatação limita o uso deste material em componentes e partes onde é exigida alta rigidez mecânica.
- Os ensaios mostram que quanto maior for a porosidade presente, menor será a Tensão de Rutura média máxima mensurada. Assim sendo, existe uma correlação negativa entre a maior presença de porosidade e a Tensão média máxima a tração (σ_{rut}), conforme Coeficiente de correlação de Pearson calculado no Capítulo 8. A porosidade é em geral associada ao tipo e métodos de processo de fabrico utilizado no preparo da placa de compósito. Este defeito pode ser minimizado por ações durante a fase de preparação do compósito.
- Foi feita uma avaliação inicial entre os dois valores de rugosidade (Ra) apresentados pela liga de alumínio fundida igual a 2,30 [μm] e pelo compósito de estudo que resultou em 3,33 [μm]. Além da proximidade dos dois valores, ambos estão classificados como de alta qualidade de acabamento, segundo a norma [NBR ISO 4287, 2002].
- Um ponto importante para uma eventual aplicação na indústria é a avaliação, mesmo que simplificada, da estabilidade do processo de maquinagem, conforme mencionado em [Ferraresi, 1970]. Isto foi feito neste desenvolvimento utilizando o parâmetro

desvio padrão calculado com os valores da rugosidade média (R_a) mensurados, numa amostra de pelo menos três corpos de prova maquinados em condições semelhantes de processamento. Na maquinagem da liga fundida A306.0-F o desvio padrão é igual a 28,22%, conforme Referência Bibliográfica [Borba, 2013]. A maquinagem do compósito de estudo, Fibra 0,5mm, matriz epoxídica CR83-2, maquinagem a 1500 [rpm], o desvio padrão foi igual a 16,50%. Os valores de desvio padrão da rugosidade média mensurada mostram que o processo de maquinagem do composto de estudo tem estabilidade similar ao processo de maquinagem de Liga fundida A306.0-F.

- Os ensaios do Compósito de Estudo foram iniciados com a placa sem reforçador, utilizando somente a resina epoxídica adotada, com cura em processo simplificado de fabrico. A resina básica sem reforçado foi adotada como provete amostra de controlo, como recomenda Método Científico aplicado. A partir desta referência, foi introduzida quantidades, expressas em percentagem de massa, progressivamente maiores. Este procedimento permitiu identificar até que valor de percentagem, a quantidade de reforçador conduz a ganhos nas propriedades mecânicas. Uma análise matemática da curva obtida de Tensão média máxima a tração (σ_{rut}) em função da massa volúmica em percentagem, permitiu concluir que a regra de mistura mais adequada está na gama de fração volúmica entre 17,0% e 17,8%, considerando a mesma resina epoxídica, o mesmo processo de fabrico e a mesma fibra de carbono com comprimento médio de 0,5 mm.
- O projeto de estruturas aeroespaciais coloca em primeiro lugar o Critério de Segurança e em segundo lugar o Critério de Menor Peso, quando do desenvolvimento de um componente para aplicação nesta área. O compósito com reforçador aleatoriamente distribuído e em direções variadas, de fibra curta de carbono de comprimento 0,5 mm [Apply, Procotex, 2015] e matriz epoxídica CR83-2 [Wildhagen, Michalek, 2016], identificado como Compósito de Estudo, aplicado a um cálculo simplificado a tração unidirecional de componente estrutural hipotético, submetido a carregamento estático, revelou uma redução superior a 42% no peso final do componente, quando comparado à Liga de Alumínio A850.0-F.
- No dimensionamento simplificado do componente hipotético, quando considerado o fenómeno de fadiga mecânica, o compósito com reforçador aleatoriamente distribuído e em direções variadas, de fibra curta de carbono de comprimento 0,5 mm [Apply,

Procotex, 2015] e matriz epoxídica CR83-2 [Wildhagen, Michalek, 2016], identificado como Compósito de Estudo, submetido ao carregamento cíclico pulsante, revelou uma redução superior a 40% no peso final do hipotético componente, quando comparado à Liga de Alumínio A850.0-F

- Os resultados encontrados nos ensaios realizados ao longo deste desenvolvimento mostraram a importância da redução da porosidade presente no compósito. Isto ficou mais evidente no ensaio de tração uniaxial, onde foi possível verificar que quanto maior for a porosidade presente, menor será a Tensão Rutura média máxima mensurada. Desta maneira, foi possível determinar uma correlação negativa entre a maior presença de porosidade e a Tensão Rutura média máxima a tração (σ_{rut}), pelo cálculo do Coeficiente de Correlação de Pearson. A porosidade é em geral associada ao tipo e métodos de processo de fabrico utilizado no preparo da placa de compósito. Este defeito indesejado pode ser minimizado, por ações durante a fase de preparo, cura e manuseio do compósito dos blocos e placas fabricados.
- Os ensaios mostram que quanto maior for a porosidade presente, menor será a variável gama de tensões de fadiga do provete, mensurada no ensaio. Sendo assim, existe uma correlação negativa entre a porosidade presente no material do provete e a variável (ΔS), Gama de Tensões de Fadiga dos provetes avaliados, para o mesmo número de ciclos de rutura à fadiga. Este cálculo realizado e a constatação advinda dele, confirmam as informações experimentais presentes na referência [Correia, 2017]. A porosidade é em geral associada ao tipo e métodos de processo de fabrico utilizado durante o preparo da placa de compósito [Capela, *et al.*, 2018]. Este defeito pode ser minimizado por ações implementadas na fase de processamento do compósito.

Os valores de propriedades e outros parâmetros mensurados ao longo deste desenvolvimento, mostram que as principais propriedades mecânicas encontradas no material após este processo de fabrico são em geral, menores que os valores dos mesmos parâmetros encontrados nas ligas de alumínio comercialmente disponíveis.

No entanto, a boa maquinabilidade do compósito de estudo, a rugosidade final obtida nos mesmos níveis encontrados na indústria em geral, a estabilidade do processo de fresagem e a redução de peso no produto final, obtida em alguns casos, recomendam novos estudos futuros para otimizar processos envolvidos e elevar valores de propriedades mecânicas essenciais.

9.2. Propostas de investigação complementar

Como é natural em um trabalho de investigação científica relacionado a um assunto pouco conhecido, ao longo desse desenvolvimento foram detetados problemas, desvios e outras formas de anomalias não previstas no planeamento inicial deste trabalho. Além disto, também foram visualizadas novas oportunidades de melhorias e ganhos não previstos na proposta original.

Desta forma, é importante salientar que os assuntos a seguir apresentados são recomendados para melhoria do processo proposto, ampliação das possíveis aplicações desta metodologia de fabrico e para aumento de sua abrangência e uso:

- Estudo das propriedades mecânicas nas direções x , y e z do bloco de compósito de fibra curta de carbono, com o objetivo de obter um material com a maior isotropia possível, melhorando o processo de fabrico dos blocos e placas em compósito.

Motivo: O processo simplificado adotado não permite obter um material com a isotropia adequada, pois tanto as propriedades da resina são passíveis de pequenas variações nas diversas direções possíveis, como a posição em relação aos eixos x , y e z dos reforçadores no interior do bloco, podem não ser aleatórias como é desejável.

- Otimização dos parâmetros de corte durante a etapa de maquinagem para obtenção da forma final do componente ou parte.

Motivo: O desenvolvimento de ferramentas de corte específicas para esta operação de maquinagem pode permitir a obtenção de rugosidade ainda melhor e uma redução no tempo total de fresagem. A determinação de velocidades e temperaturas ideais para a mesma operação, podem aumentar a eficiência do processo.

- Estudo da porosidade observada no provete, visando a redução deste defeito.

Motivo: A redução deste problema pode contribuir para a eficiência do processo e proporcionar um aumento de valores das propriedades mecânicas encontradas com processo simplificado, usado neste desenvolvimento.

- Estudo da tenacidade, linearidade em tração, linearidade em compressão, histerese e fluência são necessários para melhor delinear os limites de uso deste processo.
- Realização de um conjunto de ensaios de endurance, segundo a norma MIL-STD-810G, *“ENVIRONMENTAL ENGINEERING CONSIDERATIONS AND LABORATORY TESTS”*.
Motivo: Neste conjunto de ensaios um componente fabricado com compósito de fibra curta de carbono e matriz epoxídica é submetido à fadiga cíclica, desgaste por movimento e variações ambientais, como temperatura e sujidade [MIL-STD-810G, 2008]. Tais ensaios identificam o comportamento deste material, em condições reais de uso.

- [ABAL, 2018] Comitê da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ALUMÍNIO (2010), Alumínio e suas Aplicações., , Rua Humberto I, nº 220, 4º andar, Vila Mariana, CEP: 04018-030,SP, Brasil. Disponível em www.abal.org.br . Acesso em 27 maio 2018.
- [Apply, Procotex, 2015] Apply Carbon, S.A., Procotex, S.A. (2015). Technical Data Sheet, CF-0,5 mm; Cut Carbon Fibers. Languidic, 404 rue de l'industrie, Z. A. Lanveur, França. Disponível para consulta no anexo 2.
- [Ashbee, 1993] Ashbee, K. H. G. (1993). Fundamental Principles of Fiber Reinforced Composites. University of Tennessee. Editora Technomic Publishing Company, 2ª Edição, Inc, EUA. ISBN 0-87762-923-4.
- [Ashby, 2012] Ashby, M. (2012). Seleção de Materiais no Projeto Mecânico. Editora Elsevier Brasil, tradução Arlet Simille, versão eletrônica ISBN 978-85-352-4521-9.
- [ASM, 2009] AMERICAN SOCIETY FOR METALS Committee (2009). ASM Handbook; Introduction to aluminum and aluminum alloys. Published by ASM International, Ohio, EUA.
- [ASM, 1990] AMERICAN SOCIETY FOR METALS Committee (1999). Properties of Wrought Aluminum and Aluminum Alloys. Published by ASM International, pages 62-122, Ohio, EUA. DOI: 10.1361/asmhba0001060. Acesso 17 de outubro de 2017.
- [ASME, 2015] ASME Committee (2015). ASME, *Boiler & Pressure Vessel Code MATERIALS, Part B, Nonferrous Material Specifications on Materials*. Library of Congress Catalog Card Number 56-3934. The American Society of Mechanical Engineers. Two Park Avenue, NY, USA. Disponível em www.techstreet.com. Acesso em 13 de junho de 2015.
- [ASTM E8/E8M, 2013] American Society for Testing and Materials Committee (2013), *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, USA.
- [ASTM-E 466, 2007], American Society for Testing and Materials Committee (2007). ASTM-E 466-07, *Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials*, ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, USA.

- [ASTM E 1823, 2010] American Society for Testing and Materials Committee (2010). ASTM E 1823-10a. *Standard Terminology Relating to Fatigue and Fracture Testing*, ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, USA.
- [Avanzini, *et al.*, 2013] A. Avanzini, G. Donzella, D. Gallina, S. Pandini, C. Petrogalli (2013). Fatigue behavior and cyclic damage of peek short fiber reinforced composites. *Composites Part B: Composites*, 45(1), pp.397–406. Disponível em: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359836812003915>. Acesso em 14 de março de 2017.
- [Avanzini, *et al.*, 2011] A. Avanzini, G. Donzella, D. Gallina (2011). Fatigue damage modelling of PEEK short fibre composites. *Procedia Engineering*, 10, pp.2052–2057. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.340>. Acesso em 20 de maio de 2018.
- [Ay, Yang, 1997] AY, H., YANG, W. (1997). *Heat transfer and life of metal cutting tool in turning*, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Great Britain, Elsevier Science Ltd., Vol.41, no.3. pp.613-623. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(97\)00105-1](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(97)00105-1). Acesso 20 de junho de 2018.
- [Batista, 2010] Batista, R. (2010). Tendências do Corte por Arranque de Aparas – Maquinagem. Dissertação apresentada ao Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, Produção, Desenvolvimento e Engenharia Automóvel, Universidade do Porto, Portugal. Disponível em <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/58387/1/000143359.pdf>. Acesso em 27 de junho de 2018.
- [Barbosa, Breitschaft, 2006] Barbosa, V. C., Breitschaft, A. M. S. (2006). Um aparato experimental para o estudo do princípio de Arquimedes. Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro RJ, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 28, n. 1, p. 115 - 122, Brasil. Disponível em: www.sbfisica.org.br. Acesso 11 de maio de 2018.
- [Borba, 2013] Borba, R. B. (2013). ESTUDO DA INFLUÊNCIA DAS AFIAÇÕES EM BROCAS ESCALONADAS DE CANAL RETO NA FURAÇÃO DA LIGA DE ALUMÍNIO SAE 306. Dissertação de Mestrado da Universidade Federal de São João del-Rei em Engenharia Mecânica. Código Bibliográfico f.92-103, CDU 669.71, MG, Brasil. Disponível em www.ufsj.edu.br/portal2-repositorio/File/ppmec/RODRIGO_BORBA.pdf. Acesso 03 de junho de 2018.

-
- [Bortoli, 2016] Bortoli, L. T. (2016). Previsão de Vida à Fadiga Através de Modelo Baseado na Micromecânica de Defeitos. Dissertação de Mestrado, Publicação ENM.DM-237ª/16, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 118 p. Disponível em repositorio.unb.br/bitstream/10482/22084/1/2016_TiagodeBortoliLuciano.pdf. Acesso 20 de maio de 2018.
- [Braga, 2011] Braga, A. P. V. (2011). Análise de ligas de alumínio aeronáuticas conformadas por jateamento com granalhas – Caracterização e previsão de deformação. Tese de mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Brasil. DOI: 10.11606/D.3.2011.tde-24052011-151943. Acesso 24 de junho de 2017.
- [Branco, 1998] Branco, C. A. G. M. (1987). Mecânica dos Materiais. Editora Fundação Calouste Gulbenkian, ISBN 9789723108255, Lisboa, Portugal.
- [Bruhn, 1973] Bruhn, E. F. (1973), *Analysis and Design of Flight Vehicle Structures*. Editora Jacobs Pub, EUA. ISBN-13: 978-0961523404.
- [Bulletin No. 2229, 2016] Mitutoyo America Corporation Office (2016), *Quick Guide to surface ROUGHNESS MEASUREMENT, Reference guide for laboratory and workshop*, 3M 1116-04, Printed in EUA, Dec. 2016. Disponível em www.mitutoyo.com. Acesso 20 de março de 2018.
- [Campbell, 2006] Campbell, F. C. (2006) Manufacturing technology for aerospace structural materials. Editora Butterworth-Heinemann Publication, Impresso por Elsevier Publications, New York, NY, EUA. ISBN 9780080462356.
- [Capela, et al., 2017] Capela, C., Oliveira, S. E., Ferreira, J. A. M. (2017). *Fatigue behavior of short carbon fiber reinforced epoxy composites*. *Fibers and Polymers* 2017, Vol.18, No.6, 1200-1207, DOI 10.1007/s12221-017-7246-0.
- [Capela, et al., 2018] Capela, C., Oliveira, S. E., Ferreira, J. A. M. (2018). *Mechanical Behavior of High Dosage Short Carbon Fiber Reinforced Epoxy Composites*. *Contents lists available at ScienceDirect Composites Part B*, journal homepage: www.elsevier.com/locate/compositesb, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.11.035>.
- [Cardoso, 2013] Cardoso, M. J. B., Barbosa, R. C., Almeida, K. V., Sousa, W. J. B., Fideles, T. B., Fook, M. V. L. (2013). Estudo físico-químico e morfológico de superfície do PEUAPM modificada. Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Campina Grande. Publicado na Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v.8.2 (2013) 68–73, ISSN 1809-8797. Disponível em www2.ufcg.edu.br/revistaremap/index.
-

-
- php/REMAP/article/download/335/277 . Acesso 15 de maio de 2018.
- [Casto, *et al.*, 1994] Casto, S.L.; Valvo, E.L.; Piacentini, M.; Ruisi, V.F. (1994). *Cutting temperatures evaluation in ceramic tools: experimental texts, numerical analysis and SEM observation*. CIRP ANNALS, Manufacturing Technology, v. 43, n. 1, p. 73-76, Editora CIRP, Switzerland. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62167-2](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62167-2).
- [Chung e Lin, 2016] Chung, S. L., Lin, J. S. (2016). *Thermal Conductivity of Resin Composites Filled Combustion Synthesized h-BN Particles*. Artigo publicado em *Molecules, MDPI*, n. 21(5), 670, DOI: 10.3390/molecules21050670. Citação p. 2-11.
- [Chung, 2009] Chung, Deborah D. L. (2009), *COMPOSITE MATERIALS, Science and Applications*, Editora Springer, Springer-Verlag, London, UK. ISBN978-1-4471-2547-1. DOI: 978-1-84882-831-5.
- [Correia, 2017] Correia, A. L. (2017). Estudo do efeito da percentagem de fibra na resistência à fadiga de compósitos de fibra curta carbono / epóxi. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade de Coimbra, código 35-2017-COR. Disponível em Biblioteca Polo II, exemplar 1321108039, Portugal.
- [Davim, 1998] Davim, J. P. (1998), *Princípios da Maquinagem*. Publicado por Publindústria Edições Técnicas, ISBN 978-972-8953-24-9, Porto, Portugal.
- [Davim, 2005] Davim, J. P. (2005), *Machining Composites Materials*, Editora John Wiley Professio Publishing Limited, EUA.
- [Davis, 2001] Davis, J. R. (2001). *Aluminum and Aluminum Alloys. Alloying: Understanding the Basics*. Copyright ASM International, p351-416, DOI:10.1361/ autb2001p351, EUA.
- [Dalmolin, 2016] Dalmolin, C. (2016). *Química de Polímeros, Propriedades Térmicas de Polímeros – Udesc*, repositório, SC, Brasil. Disponível em www.joinville.udesc.br. Acesso 15 de abril de 2017.
- [De Paiva, 2013] De Paiva, T. J. C. R. (2013). *Preparação de trabalho e programação CAM para a maquinagem de componentes aeronáuticos*. Dissertação de mestrado em Engenharia mecânica, IST, Técnico Lisboa, Portugal, citação página 20. Disponível em fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395145918972/Tese_Tiago%20Paiva.pdf. Acesso 27 de junho de 2018.
- [Dias, 2016] Dias, T. M. C. (2016). *Otimização dos Parâmetros de Maquinagem no Processo de Fresagem*. Dissertação de mestrado Escola Superior de Tecnologia e Gestão Instituto Politécnico de Bragança, Portugal. Disponível em bibliotecadigital.ipb.pt/bitstream/
-

-
- 10198/13192/1/ Tese_vfinal.pdf. Acesso 27 de junho de 2018.
- [Dwivedi, et al., 2014] Dwivedi, A. P., Sharma, S., Misra, R. K. (2014). *Advanced Materials Manufacturing & Characterization A356 Aluminum Alloy and applications*. Publicado em International Journal of Advanced Materials Manufacturing and Characterization, v. 4, n, 2, p 81-86, India. DOI: 10.11127/ijammc.2014.08.01.
- [FAA-Advisory, 1996] FAA, Federal Aviation Administration Committee (1996), *ELIGIBILITY, QUALITY AND IDENTIFICATION OF AERONAUTICAL REPLACEMENT PARTS, 20-62D*. U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, WASHINGTON, DC 20590, EUA. Disponível em <http://av-info.faa.gov/>. Acesso 08 de junho de 2018.
- [FAA-Alerts, 2012] FAA, Federal Aviation Administration Committee (2012), *AVIATION MAINTENANCE ALERTS 43-16A U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION*, WASHINGTON, DC 20590, EUA. Disponível em <http://av-info.faa.gov/> . Acesso 13 de junho de 2015.
- [Falk e Rubinstein, 1987] C. T. Falk, P. Rubinstein (1987). *Haplotype relative risks: an easy reliable way to construct a proper control sample for risk calculations*. Ann Hum Genet. 1987 Jul;51(Pt 3), 227-33, PMID: 3500674, National Center for Biotechnology Information, U.S. National Library of Medicine, 8600 Rockville Pike, MC 20894, EUA. Disponível em <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/3500674> . Acesso 05 de maio de 2018.
- [Fernandes, et al.,2008] Fernandes, M. M. Corrêa, W. Leite, H. Wiebeck, F. R. Valenzuela-Diaz, S. M. Toffoli, (2008), *USINAGEM DE PLÁSTICOS DE ENGENHARIA. UMA OPÇÃO DE PROCESSAMENTO*, Anais do 9º Congresso Brasileiro de Polímeros. <https://www.ipen.br/biblioeca/cd/cbpol/2007/PDF/652.pdf> . Acesso em 04 de março de 2016.
- [Ferraresi, 1970] Ferraresi, D. (1970). *Usinagem dos Metais, Fundamentos da usinagem dos Metais, Volume 1*. Editora Edgard Blücher LTDA, USP, SP, Biblioteca UC Nº 132068771, Brasil.
- [Ferreira, Richardson, 1997] Ferreira JAM, Costa JDM, Richardson MOW (1997). Effect of notch and test conditions on the fatigue of a glass-fibre-reinforced polypropylene composite. *Composites Science and Technology* 57, 1243-1248.
- [Ferreira, et al., 2013] Ferreira, J.A.M., Esteves, M., Ramalho, A., Nobre, J.P. (2013), *Tribological and mechanical behaviour of epoxy/nanoclay composites*. Artigo publicado em *Tribology Letters*, Volume 52, Issue 1, Pages 1-10, Editora Springer. Portugal. DOI:
-

<https://doi.org/10.1007/s11249-013-0174-2>. Acesso 10 de julho de 2016.

- [Flamínio, *et al.*, 2006] Flamínio, L. N., Pardini, L. C. (2006), *COMPÓSITOS ESTRUTURAIS. Ciência e Tecnologia*, Editora EDGAR BLUCHER, Brasil. ISBN 9788521203971.
- [Gedney, 2002] Gedney, R. (2002), *Guide to Testing Metals Under Tension*. Admet Inc, Norwood, Massachusetts. Article of *Advanced Materials & Processes*, February 2002, pages 29 a 31, EUA. Disponível em <https://www.admet.com/wp-content/uploads/2015/12/Practical-Guide-to-Metal-Testing.pdf> . Acesso em 12 de abril de 2018.
- [Glaskova, *et al.*, 2011] Glaskova, T., Zarrelli, M., Borisova A., Timchenko K., Aniskevich A., Giordano, M. (2011) Method of quantitative analysis of filler dispersion in composite systems with spherical inclusions. *Composites Science and Technology* Volume 71, Issue 13, 9 September 2011, Pages 1543-1549, ScienceDirect, UK. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2011.06.009> . Acesso em 10 de maio de 2018.
- [Godoy, 2011] Godoy, P. R. P. (2011). Caracterização da textura e do orelhamento (“earing”) da liga AA3104 após a redução a frio. Dissertação em Mestrado em Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de Lorena, Lorena, 2011.
- [ISO 4287, 1997] International Stantart Organization (1997). Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Terms, feinitions and surface texture parameters.
- [Kardos, 1985] Kardos, J. L. (1985). Critical issues in achieving desirable mechanical properties for short fiber composites. *Washington University and Pure & Appl. Chem.*, Vol. 57, Nº 11, pp. 1651-1657, 1985. Printed in Great Britain, IUPAC, UK. DOI: <https://doi.org/10.13517pac198557111651> . Acesso em 06 de junho de 2018.
- [Kaufman, 2008] Kaufman, J. G. (2008). *Properties of Aluminum Alloys: Fatigue Data and the Effects of Temperature, Product Form, and Processing*. Editora ASM International, ASM World Headquarters, 9639 Kinsman, Materials Park, Ohio, Postal Code OH 44073-0002, EUA. ISBN-13- 978-0-87170-839-6, ISBN -10: 0-87170-839-6.
- [Kaufman, Rooy, 2004] Kaufman, J. G., Rooy, E. L. (2004), *Aluminum Alloy Castings Properties, Processes and Applications*. Editora ASM World Headquarters, 9639 Kinsman, Materials Park, Ohio, Postal Code OH 44073-0002. ISBN 0-87170-803-5.
- [Koçab, *et al.*, 2005] Koçab, M., Webster, S., Janosch, J. J., Ainsworth, R. A., Koers, R. (2008), *FITNET Fitness-for-Service (FFS) Procedure*. Printed by GKSS, Geesthacht, Alemanha.

-
- [Khan, 2011] Khan SU, Iqbal K, Munir A, Kim JK (2011). Quasi-static and impact fracture behaviors of CFRPs with nanoclay-filled epoxy matrix. Publicado em *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 42, p.253-264, Editora Elsevier. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.11.011>. Acesso 20 de outubro de 2017.
- [KFM-Guideline, 2003] FKM, Conselho Alemão de Pesquisa em Engenharia, versão em inglês Haibach, E. (2003). *Analytical Strength assessment of components in mechanical engineering*. Na 5ª edição, Editora Forschungskuratorium Maschinbau, Fankfurt, Alemanha. ISBN 3-8163-0425-7.
- [Leitão, 2007] Leitão, Eduardo Silva (2007), *Caracterização Mecânica de Compósitos Poliméricos Bobinados em Diversas Orientações do Reforço*. Dissertação de Mestrado apresentada ao IPEN, INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES. Autarquia associada à Universidade de São Paulo, USP, SP, Brasil. Disponível em pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/Eduardo%20da%20Silva%20Leitao_M.pdf . Acesso 9 de outubro de 2015.
- [Lee, et al., 2011] Lee, Y. L., Barkey, M., Kang, H. T. (2011). *Metal Fatigue Analysis Handbook. Practical Problem-solving Techniques for Computer-aided Engineering*. W/hardcover. Imprint by Butterworth-Heinemann Published, Alemanha. ISBN: 9780123852052.
- [Li, et al., 2005] Li, X., Wang, X., Chang, W. C., Chao, Y.J., Chang, M. (2005). Effect of Tensile Offset Angles on Micro / Nanoscale Tensile Testing. Published in *Review of Scientific Instruments*, Volume 76, Issue 3, 2005, pages #033904, *Review of Scientific Instruments* 2005, American Institute of Physics, EUA. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1865732>.
- [Lira, Neto, 2008] Lira, S. A., Neto, A. C. (2008). COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO PARA VARIÁVEIS ORDINAIS E DICOTÔMICAS DERIVADOS DO COEFICIENTE LINEAR DE PEARSON. Artigo publicado na *Revista Ciência e Engenharia da Universidade Federal de Uberlândia* , v 15, n 1-2 de 2006, p. 45-53. ISSN 1983-4071. Disponível em www.seer.ufu.br/index.php7cieng/article/view/529/489. Acesso 12 de maio de 2018.
- [Lourenço, 2017] Lourenço, L. M. G. (2017). *Caracterização física e mecânica de compósitos híbridos de matriz polimérica*. Dissertação de Mestrado da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, Portugal. Disponível em iconline.ipleiria.pt/bitstream/10400.8/2928/1/Tese_LL_280922017_PT.pdf . Acesso 26 de julho de 2018.
-

-
- [Luz, *et al.*, 2006] Luz, S. O. C., Sellitto, M. A., Gomes, L. P. (2006). MEDIÇÃO DE DESEMPENHO AMBIENTAL BASEADA EM MÉTODO MULTICRITERIAL DE APOIO À DECISÃO: ESTUDO DE CASO NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA. Publicado por Gestão & Produção, volume 13, n.3, p. 557-570, set.-dez. 2006, Brasil. Disponível em www.scielo.br/pdf/gp/v13n3/15.
- [Machado, *et al.*, 2009] Alisson Rocha, Abrão, Alexandre Mendes, Coelho, Reginaldo Teixeira e Silva, Marcio Bacci. Teoria da usinagem dos materiais, Editora Blucher, 2009, Brasil. ISBN 9788521204527.
- [Mangalgi, 1999] Mangalgi, P. D. (1999); *Composites materials for aerospace applications*. Artigo publicado no Bulletin of Materials, Science. v. 22, n. 3, p. 657-664, 1999. DOI <https://doi.org/10.1007/BF02749982> . Acesso em 19 de junho de 2018.
- [Marchiori, 2013] Marchiori, M. M. (2013), Estudo de um Sistema de Mediação a Laser na Análise da Textura da Superfície Gerada por Torneamento, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil. Disponível em lume.ufgrs.br/bitstream/handle/10183/79829/000897449.pdf . Acessado em 16 de março de 2018.
- [Marin, 1962] Marin, J. (1962). *Mechanical Behavior of Engineering Materials*. Editora Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J, EUA.
- [Marsulo e Silva, 2005] Marsulo, M. A. G.; Silva, R. M. G (2005). Os métodos científicos como possibilidade de construção de conhecimentos no ensino de ciências. Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias Vol. 4 Nº 3, Espanha. Disponível em reec.uvigo.es/volumenes/volumen4/ART3_Vol4_N3.pdf . Acesso 05 de maio de 2018.
- [Martins, 2014] Martins, F. R. (2014). Caracterização do fresamento de chapas de compósito polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC). Tese de doutoramento apresentada a Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, SP. Disponível repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/265932/1/Martins_FranciscoRomeo_D.pdf. Acesso 27 de junho de 2018.
- [Michelle, 1999] Michelle L. Costa, Mirabel C. Rezende e Luiz C. Pardini (1999), Métodos de Estudo da Cinética de Cura de Resinas, CNPQ, Brasil. Artigo publicado na revista Polímeros, vol 9, n 2, 1999, p. 37 a 44. DOI <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-14281999000200011>. Acesso 26 de setembro de 2015.
- [MIL-HDBK-17-1E, 1997] U. S. DEPARTMENT OF DEFENSE TEST METHOD STANDARD Committee (1997). *COMPOSITE MATERIALS HANDBOOK, V. 1. POLYMER MATRIX*
-

-
- COMPOSITES GUIDELINES FOR CHARACTERIZATION OF STRUCTURAL MATERIALS*. Departments and Agencies of the Department of Defense and the Federal Aviation Administration, 700 Robbins Avenue Bldg 4D, Philadelphia, PA 19111-5094, EUA.
- [MIL-STD-810G, 2008] U. S. DEPARTMENT OF DEFENSE TEST METHOD STANDARD Committee (2008), MIL-STD-810G, *ENVIRONMENTAL ENGINEERING CONSIDERATIONS AND LABORATORY TESTS*. Departments and Agencies of the Department of Defense and the Federal Aviation Administration, 700 Robbins Avenue Bldg 4D, Philadelphia, PA 19111-5094, EUA.
- [Morais, 2006] Morais, S. (2006), *Desenho técnico básico 3*, Universidade do Porto, AEFEP, Porto Editora, Portugal, ISBN: 972-96525-2-X.
- [Moura, et al., 2005] Moura, M. F. S. F., Morais, A. B., Magalhães, A. C. (2006), *MATERIAIS COMPÓSITOS, Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*, Editora PUBLINDUSTRIA, Portugal. ISBN 972-8953-000-3.
- [Nascimento, 2007] Nascimento, F. M. F. (2007). *Processamento por Fricção Linear Caracterização e análise de ligas de alumínio processadas AA5083-O e AA7022-T6* Dissertação Mestrado em Engenharia de Materiais, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal. Disponível em fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395137455865/Dissertação.pdf. Acesso 22 de maio de 2018.
- [NBR ISO 4287, 2002] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2002), *do perfil, Termos, definições e parâmetros da rugosidade*. Rio de Janeiro, Caixa Postal 1680, Brasil. Disponível em www.abnt.org.br. Acesso 19 de março de 2018.
- [Neto e Pardini, 2006] Neto, F. L.; Pardini, L. C. (2006). *Compósitos Estruturais: ciência e tecnologia*. Publicado por Edgard Blucher, 1ª edição, 2006, Brasil. ISBN 8521203977.
- [NP 405-1, 1998] Comitê CT7, Instituto Português da Qualidade (1998). *Informação e documentação Referências bibliográficas Parte 1: Documentos impressos*. ISC 01.140.20, Portugal. Disponível em www.ipq.pt.
- [Oliveira, 1984] Oliveira, S. E. (1984). *Transdutor de pressão diferencial. Estudo e desenvolvimento*. Tese de mestrado, Unicamp, Universidade Estadual de Campinas, Brasil. Disponível em : <http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/324310>. Acesso 23 de agosto de 2017.
-

-
- [Oliveira, 2011] Oliveira, R. R. (2011). AVALIAÇÃO DA TENSÃO RESIDUAL EM ALUMÍNIO 7050, CONFORMADO PELO PROCESSO PEEN FORMING. Dissertação de Mestrado em Ciências na área de Tecnologia Nuclear; materiais. IPEN, INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES, Autarquia associada à Universidade de São Paulo, USP, SP, Brasil. DOI 10.11606/D.85.2011.tde-16062011-162345. Acesso 31 de maio de 2018.
- [Paiva, *et al.*, 2006] Paiva, J. M. F., Mayer, S., Cândido, G. M., Rezende, M. C. (2006), Avaliação da Temperatura de Transição Vítrea de Compósitos Poliméricos Reparados de Uso Aeronáutico. Artigo publicado em *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, vol. 16, nº 1, p. 79-87. 2006. Centro Técnico Aeroespacial, SP, Engenharia Ambiental, UNISAL, SP, EMBRAER, SP, ITA, SP, citação retirada da página 80, Brasil. DOI <http://dx.doi.org/10.150/S0104-14282006000100016>. Acesso 29 de março de 2018.
- [Pardini e Gonçalves, 2009] L. C. Pardini, Gonçalves, A. (2019). Processamento de compósitos Termo estruturais de carbono reforçado com fibras de carbono. Artigo publicado *Journal of Aerospace Technology and Management* V. 1, n. 2, July to December 2009, Brasil. DOI: 10.5028/jatm.2009.0102231241. Acesso 27 de junho de 2018.
- [Pathak, *et al.*, 2016] Pathak, *Improved mechanical properties of carbon fiber/graphene oxide-epoxy hybrid composites. Composites Science and Technology*, 135, pp.28–38, EUA. Disponível em <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0266353816303967>, Acesso em 16 de março de 2017.
- [Pereira, 2006] Pereira, H. F. S. G. (2006). COMPORTAMENTO À FADIGA DE COMPONENTES ESTRUTURAS SOB A ACÇÃO DE SOLICITAÇÕES DE AMPLITUDE VARIÁVEL. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia, FEUP, Universidade do Porto, Portugal. Disponível em repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/11308/2/Texto%20integral.pdf. Acesso 23 de maio de 2018.
- [Pereira, 2011] Pereira, A. M. H. (2011), Comportamento Mecânico de Juntas Soldo-coladas, Dissertação de Doutoramento em Engenharia Mecânica, FCTUC, Universidade de Coimbra, Portugal.
- [Pereira, 2013] Pereira, C. S. (2013). Reforçada com Fibras de Carbono sujeitos a Solicitações de Torção e Flexão. Dissertação de Mestrado em Sistemas e Equipamentos Mecânicos, ISEC, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Portugal. Disponível em www.researchgate.net/profile/Christof_Pereira2/publication/276544109_Fatigue_in_Tubular_Components_of_Reinforced_Epoxy_Matrix_with_Carbon_Fibers_subjected_to
-

-
- [_Bending_and_Torsional_Loads/links/5559f5ca08ae6943a877c581/Fatigue-in-Tubular-Components-of-Reinforced-Epoxy-Matrix-with-Carbon-Fibers-subjected-to-Bending-and-Torsional-Loads.pdf](#). Acesso 17 de janeiro de 2016.
- [Pires, 2012] Pires, J. M. C. (2012). Comportamento mecânico a temperaturas elevadas de perfis pultrudidos de compósito de GFRP. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, IST, Técnico Lisboa, Portugal, citação página 49. Disponível em fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395144752337/Tese%20FINAL.pdf. Acesso 26 de julho de 2018.
- [Pottker e Appoloni, 2011] Pottker, W. E., Appoloni, C. R. (2011). MEDIDA DA POROSIDADE DE MATERIAIS AMORFOS POR TRANSMISSÃO DE RAIOS GAMA. Faculdades de Palmas, FACEPAL, Palmas, PR, Brasil, Universidade Estadual de Londrina, UEL, Departamento de Física, Londrina, Brasil. Disponível em www.uel.br/grupos/gfna/08.PDF. Acesso 07 de maio de 2018.
- [Prakash Rao, et al., 2014] Prakash Rao C.R., Bhagyashekar M.S., Narendravishwanathc (2014). *Effect of Machining Parameters on the Surface Roughness while Turning Particulate Composites*. Publicado em *Procedia Engineering, Elsevier*, v. 97: pp. 421 – 431, 2014. DOI <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.266>. Acesso 16 de março de 2018.
- [Quintino, 2012] Quintino, B. M. D. (2012). Aplicação do processo de fricção linear (FSP) na melhoria da resistência à fadiga de juntas de topo soldadas por MIG na liga AA5083-H111. Dissertação Mestrado em Engenharia Mecânica na Especialidade de Sistemas de Produção, Universidade de Coimbra, Portugal.
- [Raja, et al., 2002] Raja J., Muralikrishnan B., Fu S., Liu X. (2002), *Recent Advances in Separation of Roughness, Waviness and Form*. The University of North Carolina at Charlotte, Artigo publicado em *Precision Engineering, Elsevier*, v. 26, n. 2, pp. 222-235. DOI [https://doi.org/10.1016/S0141-6359\(02\)00103-4](https://doi.org/10.1016/S0141-6359(02)00103-4). Acesso 16 de março de 2018.
- [Rambabu, et al., 2017] Rambabu, P., Prasad, N. E., Kutumbarao, V. V., Wanhill, R. J. H. (2017). *Aluminium Alloys for Aerospace Applications*. Springer Science and Business Media Singapore. Publicado em *Aerospace Materials and Material Technologies, Indian Institute of Metals Series, Singapura*. DOI 10.1007/978-981-10-2134-3_2. Acesso 22 de maio de 2018.
- [Rangel, 2012] Rangel, J. P. V. (2012), Aplicação do processo de fricção linear (FSP) na melhoria da resistência à fadiga de juntas T soldadas por MIG na liga AA6082, Dissertação de

Mestrado em Engenharia Mecânica, FCTUC, Universidade de Coimbra, Portugal.

- [Rezende e Botelho, 2000] Rezende, M. C., Botelho, E. C. (2000). O Uso de Compósitos Estruturais na Indústria Aeroespacial. Revista Ciência e Tecnologia, vol 10, nº 2, 2000. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/po/v10n2/3106.pdf>. Acesso realizado em: 24 de outubro de 2014.
- [Rodrigues, 2012] Rodrigues, E. A. (2012). Corrosão e propriedades mecânicas de tração e fadiga da liga de alumínio 7050-T73651. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Brasil, citação página 53. Disponível em repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/265253. Acesso 03 de novembro de 2017.
- [Rolin, 2012] Rolin, A. S., (2012) AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO E TRIBOLÓGICO DE PARAFUSOS DE CLASSE 10.9 PARA EMPREGO EM GUINDASTE OFF-SHORE. Tese MS. da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Programa Petrobrás, RJ, Brasil, registo CCT-UENF 29/2014. Disponível em unenf.br/posgrauacao7engenharia-de-materiais/wp-content/uploads/sites/2/2013/07/TeseMestrado.pdf. Acesso 15 de março de 2018.
- [Romão, 2012] Romão, E. G. M. (2012). Estudo da adesividade (tack) de pré-impregnados de resina epóxi reforçada com fibras de carbono. Dissertação de mestrado da Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, CDU 541.6(043), SP, Brasil. Disponível em <http://hdl.handle.net/11449/94452>. Acesso 23 de julho de 2016.
- [Rosa, 2002] Rosa, E. (2002). ANÁLISE DE RESISTÊNCIA MECÂNICA DE PEÇAS E COMPONENTES ESTRUTURAIS, MECÂNICA DA FRATURA E FADIGA, Grupo de Análise e Projeto Mecânico, Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil, citação retirada da página 223. Editora da UFSC Santa Catarina, Brasil.
- [Sandvik, 2016] Bodenhem, P. (2016). Fresa CoroMill® 390 para cantos a 90 graus, R390-020A20-11M. Sandvik AB (publ), reg. no 556000-3468AB, Sandvik Coromant, Mossvågen 10 SE-811 81 Sandviken, Suécia. Disponível em www.sandvik.com.
- [Santos, 2012] Santos, D. S. C. (2012), Estudo do impacto a baixa velocidade em compósitos epóxi/fibra de vidro nanoreforçados, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, FCTUC, Universidade de Coimbra, Portugal.

- [Silva, 2006] Silva, F. P. (2006) O USO DA DIGITALIZAÇÃO TRIDIMENSIONAL A LASER NO DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE TEXTURAS APLICADAS AO DESIGN DE PRODUTOS. Dissertação de Mestrado UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, Escola de Engenharia, Brasil. Disponível em <http://hdl.handle.net/10183/10388>. Acesso 22 de março de 2018.
- [Silva, 2011] Leandro José da Silva, L. J., (2011). Estudo experimental e numérico das propriedades mecânicas de compósitos poliméricos laminados com fibras vegetais. Dissertação Mestrado da Universidade Federal de São João del-Rei, Catalografia Bibl. F178p, MG, Brasil. Disponível em www.ufsj.edu.br/portal2-repositorio/File/ppmec/Leandro_da_Silva_1.pdf. Acesso em 04 de novembro de 2015.
- [Scott, *et al.*, 2000] Scott, M. J., Antonsson, E. K. (2000). ARROW'S THEOREM AND ENGINEERING DESIGN DECISION MAKING. Publicado em *Research in Engineering Design* Volume 11, Number 4, 2000, pages 218-228. Disponível em link.springer.com/article/10.1007/s001630050016#citeas. Acesso em 10 de outubro de 2017.
- [Smith, 1998] Smith, W.F (1998). Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. University of C.F., printed UCF, 3rd edition, EUA.
- [Soufen, *et al.*, 2012] Soufen C. A., Correia, G. V., Grizola, O. S., Pintão, C. A. F., Imaizumi, M. Capella, M. C., (2012), PROPRIEDADES MECÂNICAS EM LAMINADOS FIBRAS DE VIDRO E FIBRA DE CARBONO EM RESINA EPÓXI, 20º CBECIMAT, Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Joinville, SC, Brasil, Dept of Mechanical Engineering, FE, Unesp, Bauru SP, Brasil, Dept of Physics, Bauru, SP, Brasil.
- [Swanson, 1963] Swanson, S. R. (1963). An Investigation of the fatigue of aluminum alloy due to random loading. Institute of Aerophysics, University of Toronto. Published by Military and Defense Documentation Center for Scientific and Technical Information, number AD 407071, Virginia, EUA. Disponível em www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/407071.pdf. Acesso 03 de novembro de 2017.
- [Takahashi, 2014] Takahashi, B. X. (2014). Metodologia moderna para análise de fadiga baseada em elementos finitos de componentes sujeitos a fadiga uni e multiaxial. Dissertação de mestrado apresentada a Escola Politécnica de Universidade de São Paulo, USP, Zip Code, 005508-900, SP, Brasil. DOI 10.11606/D.3.2014.tde-19032015-173219. Acesso 23 de maio de 2018.

- [Tayal, 2013] Tayal, S. P. (2013). Engineering Design Process. Publicado no International Journal of Computer Science and Communication Engineering, IJCSCE Special issue on “Recent Advances in Engineering & Technology” NCRAET-20 13, Haryana, Índia. IJCSCE Special issue on “Recent Advances in Engineering & Technology” NCRAET-2013, p 1 -5. ISSN 2319-7080. Disponível em static.ijcsce.org/wp-content/uploads/2013/06/IJCSCE1040113.pdf. Acesso 05 de maio de 2018.
- [Tiansong *et al.*, 2008] Tiansong, L., Dechang J., Peigang H., Meirong W., Defu L. (2008), “*Effects of fiber length on mechanical properties and fracture behavior of short carbon fiber reinforced geopolymer matrix composites*”. Publicado em Materials Science and Engineering A, v 487, n. 1-2, p.181-185, Editora Elsevier. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.06.040>.
- [Vicente, 2014] Vicente, M. A. P. (2014). Melhoria da vida à fadiga em ligas aeronáuticas de alumínio por *micro-shot peening*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica na Especialidade de Produção e Projecto, Universidade de Coimbra, Portugal.
- [Wang, *et al.*, 2001] Wang, Q. G., Apelian, D., Lados, D. A. (2001). *Fatigue behavior of A356-T6 aluminum cast alloys. Part I. Effect of casting defects*. Publicado no Journal of Light Metals, Elsevier 1, 73-84, MA 01602, EUA. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1471-5317\(00\)00008-0](https://doi.org/10.1016/S1471-5317(00)00008-0). Acesso 16 de maio de 2018.
- [Westrupp, 2008] Westrupp, F. L. (2008), Análise da viabilidade da Usinagem de compósito de matriz de epóxi com carga de ferro visando a sua utilização em Moldes de Injeção. Tese de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/12456789/106624>. Acesso março de 2014.
- [Wildhagen e Michalek, 2014] Wildhagen, C.; Michalek, G. (2014), Biresin CR120, Product Data Sheet Composite resin system. Sika Deutschland GmbH, Stuttgarter Str. 139, D - 72574, Alemanha. Disponível para consulta no anexo 2.
- [Wildhagen e Michalek, 2016] Wildhagen, C.; Michalek, G. (2016), Biresin CR83, Product Data Sheet Composite resin system. Sika Deutschland GmbH, Stuttgarter Str. 139, D - 72574, Alemanha. Disponível para consulta no anexo 2.
- [Zolotarevsky, *et al.*, 2007] Zolotarevsky, V. S., Belov, N. A., Glazoff, M. V. GLAZOFF (2007). *Casting Aluminum Alloys. Moscow Institute of Steel and Alloys, State Technical University, Russian Federation and Alcoa*, EUA. Printed by Elsevier, ISBN: 978-0-08-045370-5, Amsterdam, Holanda. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-045370-5X5001-9>.

Parte 1

Título: Certificação técnica do extensômetro MTS, Model 632.12C-20

SPECIFICATIONS

Accuracy

- Meets or exceeds ASTM E83 Class B1 and ISO 9513 Class 0.5 standards.

Nonlinearity

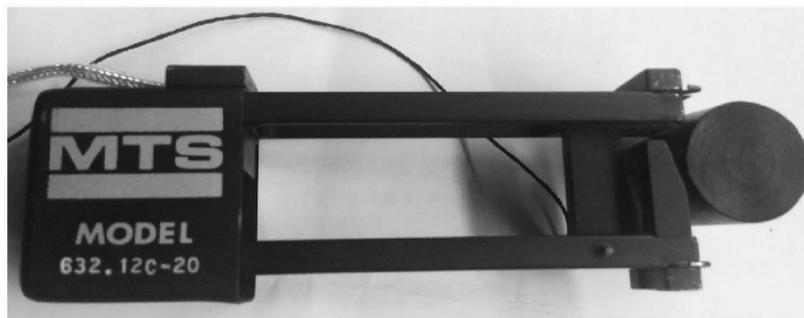
- Typical: 0.18% of range
- Maximum: 0.25% of range

Hysteresis¹

- Typical: 0.07%
- Maximum: 0.1%

Maximum Operating Frequency

- 50 Hz (at small displacements with sinusoidal waveform)



EXTENSOMETER INSPECTION CERTIFICATE

EXTENSOMETER MODEL 632.12C-20
 SERIAL NUMBER 366
 GAUGE LENGTH 25.0 mm
 RANGE +12.5 / -2.5 mm

| DISPLACEMENT | | OUTPUT | | |
|-----------------------|--------|--------|----------------|------------|
| WILLI METERS | STRAIN | MV | COMPRESSION MV | TENSION MV |
| 0.000 | 0.000 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| +2.500 | +0.100 | 4.00 | 4.00 | 3.98 |
| +5.000 | +0.200 | 8.00 | | 7.97 |
| +7.500 | +0.300 | 12.00 | | 11.98 |
| +10.000 | +0.400 | 16.00 | | 16.00 |
| +12.500 | +0.500 | 20.00 | | 20.03 |
| EXCITATION VOLTAGE | | 5.529 | 5.460 | |
| COMPUTED GAUGE FACTOR | | 3.617 | 3.668 | |

MTS recommends that the Extensometer be calibrated with the associated electronics. If MTS D.C. Transducer Conditioners are used, a circuit automatically compensates for deviations, between tension and compression gauge factors.

DATE 12-1-83 INSPECTED Janeh Torpey-Tuma

CALIBRATION CERTIFICATE

This unit has been calibrated in conjunction with a transducer conditioner module on the following ranges. On each range, full scale strain results in 10 volt output.

TYPE 632.12C-20 S/N 366
 COND. TYPE 440.21 S/N 2239
 EXCIT. VOLTAGE 6.000 VDC

| RANGE | F.S. DISP. | F.S. STRAIN |
|-------|-----------------------------|---------------------------|
| 1 | +12.5 -2.5 mm | +0.50 -0.10 |
| 2 | +6.25 -2.5 mm | +0.25 -0.10 |
| 3 | ±2.50 mm | ±0.100 |
| 4 | ±1.25 mm | ±0.050 |

* On ranges s travel is limit and therefore

P/N - 062183-07 JOB
 EXTENSOMETER ASSY-
 632.12C-20, METRIC

100735-09

Parte 2

Título: Especificação técnica da Câmara Termográfica, *Testo, model 875-2i*

Kalibrier-Protokoll

Certificate of conformity • Protocole d'étalonnage
Certificato di taratura • Informe de calibración

We measure it.



Especificações

A testo 875i é uma câmara termográfica prática e resistente. Ela permite determinar e representar sem contacto a distribuição da temperatura em superfícies.

Campos de aplicação típicos:

- Inspeção de edifícios (técnicos de aquecimentos, ventilações e ar condicionado, técnicos de manutenção, escritórios de engenharia, peritos): avaliação energética de edifícios
- Manutenção preventiva: inspeção mecânica e eléctrica de instalações e máquinas
- Supervisão da produção (controlo da qualidade): supervisão de processos de produção

A câmara testo 875i encontra-se disponível em diferentes variantes, de acordo com as exigências de utilização:

- testo 875-1i: objectiva de ângulo largo de alta qualidade 32° x 23°, detector 160 x 120, NETD < 50mK, cartão SD de 2 GB para aprox. 1000 imagens, distância de focagem mínima de 10 cm, câmara digital integrada
- testo 875-2i: objectiva de ângulo largo de alta qualidade 32° x 23°, detector 160 x 120, NETD < 50mK, cartão SD de 2 GB para aprox. 1000 imagens, distância de focagem mínima de 10 cm, câmara digital integrada com LEDs potentes para iluminar, isoterma, Mín/Máx na Área, comentários áudios, visualização da distribuição da humidade de superfície (indicação em tempo real com sonda de humidade por rádio-frequência opcional), tela de alta temperatura (opção)

Controlo de exportações

As câmaras termográficas podem estar sujeitas às restrições de exportação da União Europeia.

Especialmente a testo 875i com 33 Hz apenas se pode exportar para países fora da União Europeia mediante autorização especial das autoridades.

Em caso de exportação, tenha em conta as normas relativas ao controlo de exportações.

Kalibrier-Protokoll

Certificate of conformity * Protocole d'étalonnage
Certificato di taratura * Informe de calibración

We measure it.



Medição

| Propriedade | Valores |
|-----------------------------|---|
| Gama de medição (comutável) | Gama de medição 1, aparelhos até n.º de série 02602262 (ver placa de tipo): -20...100 °C (-4...212 °F) Gama de medição 1, apenas em aparelhos a partir do n.º de série 02602263 (ver placa de tipo): -30...100°C (-22...212°F) Gama de medição 2: 0...350 °C (32...662 °F) Gama de medição 3 (opcional, apenas válido para testo 875i-2): 350...550 °C (662...1022 °F) |
| Exactidão | Gama de medição 1 @ -20...100°C (-4...212°F): ±2°C (±3.6°F) Gama de medição 1 @ -30...-21°C (-22...-5°F), apenas em aparelhos a partir do n.º de série 02602263 (ver placa de tipo): ±3°C (±5.4°F) Gama de medição 2: ±2°C (±3,6°F) ou ±2% d. v.m. (valor maior válido) Gama de medição 3 (opcional, apenas testo 875-2i): ±3% d. v.m. Dados válidos para valores na gama de medição indicada + tolerância. |

Condições do ambiente

| Característica | Valores |
|------------------------------|--|
| Temperatura de utilização | -15...40 °C (5...113 °F) |
| Temperatura de armazenamento | -30...60 °C (-22...140 °F) |
| Humidade do ar | 20...80 %HR, sem condensação |
| Tipo de protecção da caixa | IP54 (Terminais da interface fechados, bateria conectada, lentes instaladas) |

Dados físicos característicos

| Propriedade | Valores |
|-------------|---|
| Peso | 900g (incl. pilha recarregável) |
| Dimensões | 152 x 108 x 262 mm (5,98 x 4,25 x 10,31") |

Kalibrier-Protokoll

Certificate of conformity • Protocole d'étalonnage
Certificato di taratura • Informe de calibración

We measure it.



Imagens infravermelhas

| Propriedade | Valores |
|--|---|
| Campo de visão/distância mín. de focagem | Objectiva standard: 32° x 23° / 0,1m (0,33 ft) Teleobjectiva (apenas válido para testo testo 875-2i, opcional): 9° x 7° / 0,5 m (1,64 ft) |
| Sensibilidade térmica (NETD) | <50mK a 30 °C (86 °F) |
| Resolução geométrica | Objectiva standard: 3,3 mrad Teleobjectiva: 1 mrad |
| Frequência de repetição da imagem | 33Hz na UE e países autorizados para a exportação; caso contrário 9Hz |
| Foco | Manual |
| Tipo de detector | FPA 160 x 120 pixéis, a-Si |
| Gama espectral | 8... 14 µm |

Imagens visuais

| Propriedade | Valores |
|--|---------------------------|
| Campo de visão/distância mín. de focagem | 33° x 25° / 0,4m (1,31ft) |
| Tamanho da imagem | 640 x 480 pixéis |
| Frequência de repetição da imagem | 8... 15 Hz |

Representação da imagem

| Propriedade | Valores |
|--------------------------------|---|
| Visualização da imagem | 3,5" LCD com 320 x 240 pixéis |
| Possibilidades de visualização | Imagem infravermelhos/imagem real/imagem infravermelhos e imagem real |
| Fluxo de vídeo | 25Hz |
| Paleta de cores | 10 opções |

Parte 3

Título: Especificação técnica do equipamento de ensaio *Mitutoyo Surftest, model 402.*

Specifications

(1) Parameter

1) Roughness profile

Ra, Rz (DIN), Rmax (DIN), Rq, Rt, Rp, R3z (R mode)

2) Unfiltered profile

Rz (ISO), Rmax (ISO), Rp (P mode)

3) Roughness & Unfiltered profile

θ_a , Pc, Sm, S, HSC, tp

4) When making measurements in the Free Stroke mode (XF measurement):

(A maximum of 30mm evaluation length can be measured.)

Ra and Rt are obtained from the roughness profile.

Rmax (JIS) is obtained from the unfiltered profile.

- Averaging out data of up to 10 measurements
- Printing results and conditions set
- Recording bearing area curve
- Recording roughness profile and unfiltered profile.

Table 3.7

| VERTICAL MAG. | HORIZONTAL MAG. | |
|---------------|-----------------|-----|
| | H | L |
| 200 | 10 | 5 |
| 500 | 20 | 10 |
| 1000 | 100 | 50 |
| 2000 | 200 | 100 |
| 5000 | | |
| 10000 | | |
| 20000 | | |

V. Mag is determined by range

H. Mag is determined by $\lambda c/L$

(2) Range of indication

Table 3.8

| PARAMETER | METRIC μm | ENGLISH μin |
|--------------|------------------------------|---------------------------|
| Ra, Rq | 0.002 ~ 50 μm | 0.1 ~ 2000 μin |
| θ_a | 0.1 ~ 30.0° | |
| Pc, HSC | 1 ~ 10000 counts/cm | 1 ~ 10000 counts/in |
| Sm, S | 0,25 ~ 1000.00 μm | 10 ~ 40000 μin |
| Rmax, others | 0,01 ~ 250 μm | 1 ~ 10000 μin |

(3) Measurement range

Table 3.9

μm (μin)

| Ra, Rq | Rmax, others |
|-----------|--------------|
| 0.5 (20) | 2.5 (100) |
| 1 (40) | 5 (200) |
| 2 (100) | 10 (400) |
| 5 (200) | 25 (1000) |
| 10 (400) | 50 (2000) |
| 20 (1000) | 100 (4000) |
| 50 (2000) | 250 (10000) |

**(4) Cut – off value (λ_c), Sampling Length (L),
Evaluation length (Im)**

Table 3.10

| λ_c | L | Im | |
|-------------|-------------|-----------------|--------|
| | | R mode | P mode |
| 0.25 (0.01) | 0.25 (0.01) | | |
| 0.8 (0.03) | 0.8 (0.03) | 1x λ_c | |
| 2.5 (0.1) | 2.5 (0.1) | 3x λ_c | L |
| | 8 (0.3) | 5 x λ_c | |

(Note) When making XF measurements, up to Im = 30mm can be measured.

(5) Power supply AC adapter (10V, 1.2A)

(6) Service temperature range 0°C to 40°C

Storage temperature range -10°C to 60°C

(7) Dimensions W: 309 (12.165")

D: 156 (6.142")

H: 71 (2.795")

(8) Weight Approx. 2,7Kg (5.94 Lb)

Parte 4

Título: Instron *Universal Testing machine, model 4206*



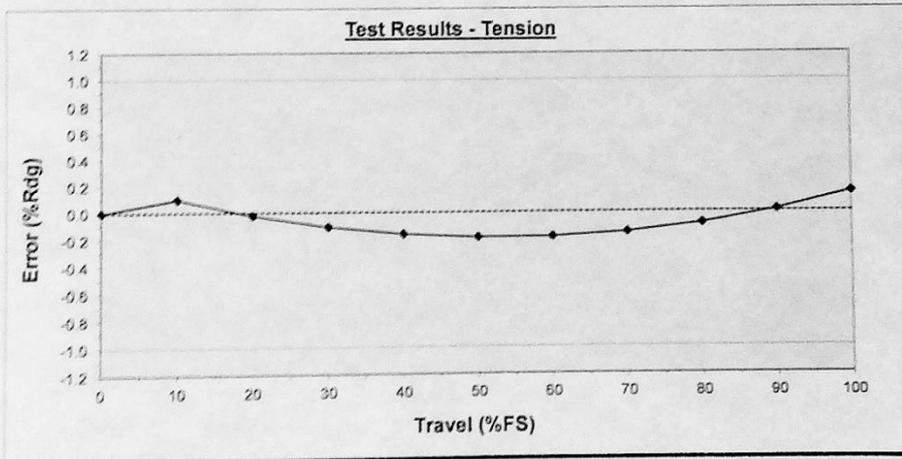
Instron®
 Coronation Road ■ High Wycombe, Bucks HP12 3SY ■ UK
 Tel: +44 1494 464646 ■ Fax: +44 1494 456123 ■ www.instron.com

Test Certificate

EX2630-112

| | | | |
|----------------------|-------------------|---------------|----------|
| Serial No. : 132329 | Readout Device | DK38 | EQU-3736 |
| Test No. : 1 | Displacement Ref. | Heidenhain | EQU-7278 |
| Gauge Length : 50 mm | Temperature (°C) | 23 | |
| Travel : 25.00 mm | Tested by | JM <i>K S</i> | |
| Span Point : 100% | Date | 05/10/2016 | |
| | Span Setting | 2.46053 | mV/V |

| Nominal Travel mm | Range %FS | EXT %FS Run 1 | EXT %FS Run 2 | Repeatability %FS | Average O/P Runs 1 & 2 | Error %Rdg |
|----------------------|--------------|------------------|------------------|----------------------|---------------------------|---------------|
| 25.00 | 100 | 100.154 | 100.141 | 0.013 | 100.1475 | 0.148 |
| 22.50 | 90 | 90.018 | 90.005 | 0.013 | 90.0115 | 0.013 |
| 20.00 | 80 | 79.935 | 79.924 | 0.011 | 79.9295 | -0.088 |
| 17.50 | 70 | 69.900 | 69.885 | 0.015 | 69.8925 | -0.154 |
| 15.00 | 60 | 59.894 | 59.883 | 0.011 | 59.8885 | -0.186 |
| 12.50 | 50 | 49.912 | 49.901 | 0.011 | 49.9065 | -0.187 |
| 10.00 | 40 | 39.941 | 39.930 | 0.011 | 39.9355 | -0.161 |
| 7.50 | 30 | 29.972 | 29.963 | 0.009 | 29.9675 | -0.108 |
| 5.00 | 20 | 19.999 | 19.992 | 0.007 | 19.9955 | -0.023 |
| 2.50 | 10 | 10.012 | 10.008 | 0.004 | 10.0100 | 0.100 |
| 0.00 | 0 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.0000 | 0.000 |



Notes:
 1) Additional system calibration is required to ensure compliance with ASTM E83 and ISO 9513.
 2) Instron certifies that its calibration apparatus is traceable to the National Physical Laboratory, with uncertainty of measurement not exceeding one third of the permissible error of the extensometer under test.

Version 3

| INSTRON CALIBRATION LABORATORY | | |
|--|------------------|-----------|
| Model/Serial No: 4206 H6535 | | |
| Calibration Data | | |
| Parameter | Certificate No: | Date |
| FORÇA | E111070714153413 | 7/07/2014 |
| | | |
| | | |
| Maintenance Data | | |
| Completed | Next Service Due | |
| JULHO 7/07/2014 | JULHO 2015 | |
| INSTRON SERVICE IBERIA  INSTRON | | |
| Tel: +34 935947562 Email: Service.Iberia@Instron.com | | |

INSTRON

| Subsystems and Equipment for Specialized Testing Needs | |
|--|--|
| Grips and Fixtures: | A complete line of general and special purpose grips is available to meet the testing requirements of virtually any material. Test fixtures for flexure, coefficient of friction, peel and special tests are also available. |
| Environmental Testing: | Temperature chambers and furnaces are available to provide precisely controlled high and low temperature testing in air, vacuum or other inert atmospheres. |
| Load Cells: | A broad line of load cells (2518 Series) is available for tension and compression testing, providing measurements in S.I, English or metric units. All are tension, compression and overload protected, as well as self-identifying. |
| Extensometry: | A range of extensometers is available for direct measurement of specimen strain on a variety of materials. |
| Rheometry: | A capillary rheometer accessory is available to evaluate flow behavior of complex fluids and polymer melts. |
| Data Readout: | Several systems for data readout, data analysis, and test control are available ranging from simple digital display to on-line systems at the personal computer or minicomputer level. |
| Food Testing: | Special purpose fixturing for textural measurements of food products is available. |

| Specifications | |
|---|---|
| Capacity: | 150 kN, 15,000kg, (33,750 lb) |
| Force Rating: | 25 kN up to 500mm/min(20in/min)(tension and compression below moving crosshead) 150 kN up to 50mm/min. (2in/min) |
| Load Range: | 0.1N to 150 kN, 1500kg(10g to 33,750lb using interchangeable load cells) |
| Load Weighing System | ±0.5% of reading to 1/10 of (2518-800 and 2512-304 type) of load cell capacity. ±1% of reading to 1/50 of load cell capacity ±1 count on the display accuracy |
| Strain measuring system | ±0.6% of reading ± transducer linearity (at digital readout accessory or analog output.) ±1 count on the display. |
| Position measurement Accuracy (no load): | ±0.1mm(0.004 in) or ±0.15% of displacement |
| Position measurement repeatability (no load): | ±0.05mm(0.002 in) |
| Crosshead speed range: | 0.05 to 500mm/min (0.002 to 20 ipm) |
| Crosshead speed accuracy: | ±0.2% of setting over full speed range (averaged over 100mm (4 in)) |
| Return speed: | 500mm/min (20in/min) |
| Crosshead Guidance: | ±0.2mm/over 100mm, 0.4mm throughout full travel (0.008in/over 4in travel, 0.016in, throughout full travel) TIR relative to vertical axis (no load). |
| * Axial stiffness: | 140kN/mm(800,000lb/in) |
| Crosshead Travel: | 1220mm(48 in)(with screw covers and base adapter excluding optional grips and fixtures) |

* Instron's stiffness specification includes all drive belts and components as well as the frame.

Parte 1

Título: Especificação técnica da resina epoxídica Biresin® CR120

Tooling & Composites

Product Data Sheet
Version 05 / 2014

Biresin® CR120

Composite resin system

Areas of Application

- For infusion or injection processing
- Specially for applications when higher temperature resistance is required

Product Benefits

- Approved by Germanischer Lloyd for the production of components
- One resin with two hardeners with different reactivity
- Uniform mixing ratio of 100 : 30
- The reactivity can be adapted by mixing the hardeners
- Because of low mixed viscosity fast infiltration of dry fabrics and nonwovens
- Glass transition temperatures up to 120°C dependent on curing conditions

Description

- Basis Two-component-epoxy-system
- Resin (A) **Biresin® CR120**, epoxy resin, translucent
- Hardener (B) **Biresin® CH120-3**, amine, colourless to yellowish
- Hardener (B) **Biresin® CH120-6**, amine, colourless to yellowish

| Physical Data | Resin (A) | Hardener (B) | | |
|---------------------------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|------|
| Individual Components | Biresin® CR120 | Biresin® CH120-3 | Biresin® CH120-6 | |
| Viscosity, 25°C | mPas | 900 | < 10 | 35 |
| Density, 25°C | g/ml | 1.13 | 0.94 | 0.93 |
| Mixing ratio | in parts by weight | 100 | 30 | |
| | | Mixture | | |
| Potlife, 100 g / RT, approx. values | min | 90 | | 180 |
| Mixed viscosity, 25°C, approx. values | mPas | 240 | | 250 |

Processing

- The material and processing temperatures should be from 18 to 35°C.
- Before demoulding precuring of at least 2 h at 60°C is recommended.
- To clean brushes or tools immediately Sika Reinigungsmittel 5 is recommended.
- Additional informations are available in "Processing Instructions for Composite Resins".

Biresin® CR120 1/4



Parte 2

Título: Especificação técnica da resina epoxídica Biresin® CR83

Tooling & Composites

Product Data Sheet
Version 04 / 2016

Biresin® CR83 Composite resin system

Product Description

Biresin® CR83 is an epoxy resin system with extremely low viscosity designed specifically for the infusion process for the production of high performance fibre reinforced composites parts and moulds. The system has thermal properties up to 80°C. Biresin® CR83 epoxy resin has a low tendency to crystallise.

Application Areas

Biresin® CR83 is especially suited to the infusion and injection processes due to its low viscosity range. It can be used in the marine and general industrial composite areas. Due to its good wetting properties it is particularly suited for use with carbon fibre reinforcement.

Features / Advantages

- 3 hardeners (B) give a wide range of processing times
- The reactivity can be adapted by mixing the hardeners
- Fast infusion and good wet-out of fabrics and non-wovens due to low viscosity and good wetting characteristics even at low temperatures
- All systems Germanischer Lloyd approved, Certificate No. WP 14 200 17 HH (attached)
- Glass transition temperatures up to 80°C dependent on curing conditions
- Carbon fibres are wet out well by all of the resin systems
- Biresin® CR83 resin (A) has a low tendency to crystallise

| Physical Data | Resin (A) | | Hardener (B) | | |
|---------------------------------------|---------------|-------------------------|-----------------|------------------|------|
| | Biresin® CR83 | Biresin® CH83-2 | Biresin® CH83-6 | Biresin® CH83-10 | |
| Individual Components | | | | | |
| Mixing ratio, parts by weight | 100 | 30 | | | |
| Mixing ratio, parts by volume | 100 | 36 | | | |
| Colour | translucent | colourless to yellowish | | | |
| Viscosity, 25°C | mPa.s | ~610 | <10 | <10 | <10 |
| Density, 25°C | g/ml | 1.14 | 0.95 | 0.94 | 0.95 |
| | | Mixture | | | |
| Potlife, 100 g / RT, approx. values | min | 60 | 180 | 300 | |
| Mixed viscosity, 25°C, approx. values | mPa.s | 155 | 170 | 155 | |

Processing

- The material and processing temperatures should be in the range 18 - 35°C.
- The mixing ratio must be followed accurately to obtain best results. Deviating from the correct mix ratio will lead to lower performance.
- The final mechanical and thermal values are dependent on the applied postcuring cycles.
- It is recommended to clean brushes or tools immediately after use with Sika Reinigungsmittel 5.
- Additional information is available in "Processing Instructions for Composite Resins".

Biresin® CR83 1/4



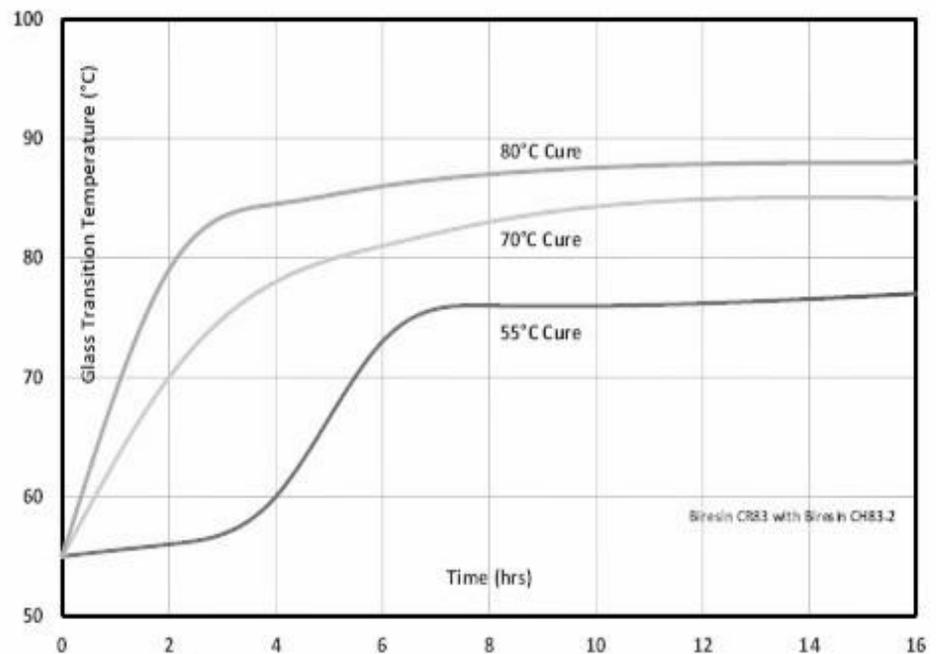
BUILDING TRUST



| Typical Mechanical Properties of Fully Cured Neat Resin | | | | | |
|---|----------------------------|-------------------|--------|--------|---------|
| Biresin® CR83 resin (A) | with hardener (B) Biresin® | | CH83-2 | CH83-6 | CH83-10 |
| Tensile strength | ISO 527 | MPa | 84 | 91 | 86 |
| Tensile E-Modulus | ISO 527 | MPa | 2,960 | 3,200 | 3,100 |
| Elongation at break | ISO 527 | % | 6.7 | 8.4 | 7.9 |
| Flexural strength | ISO 178 | MPa | 129 | 134 | 131 |
| Flexural E-Modulus | ISO 178 | MPa | 3,125 | 3,360 | 3,340 |
| Compressive strength | ISO 604 | N/mm ² | 107 | 111 | 109 |
| Density | ISO 1183 | g/cm ³ | 1.15 | 1.15 | 1.15 |
| Shore-hardness | ISO 868 | | D 85 | D 85 | D 85 |
| Impact resistance | ISO 179 | kJ/m ² | 93 | 84 | 83 |

| Typical Thermal Properties of Fully Cured Neat Resin | | | | | |
|--|----------------------------|----|--------|--------|---------|
| Biresin® CR83 resin (A) | with hardener (B) Biresin® | | CH83-2 | CH83-6 | CH83-10 |
| Heat distortion temperature | ISO 75B | °C | 79 | 79 | 78 |
| Glass transition temperature | ISO 11357 | °C | 84 | 80 | 81 |

Glass Transition Temperature vs. Cure Cycle



When curing a composite part, the whole of the part (including the very middle of the laminate) needs to see the cure temperature.

Biresin® CR83 3 / 4



BUILDING TRUST



| Mechanical Data, neat resin specimen at different post curing conditions | | | | |
|--|-----------------------------------|-------------------|----------------|----------------|
| Part 1: approx. values after 16 h / 55°C (source: accredited testing institute) | | | | |
| Biresin® CR120 resin (A) | with hardener (B) Biresin® | | CH120-3 | CH120-6 |
| Density | ISO 1183 | g/cm ³ | 1.16 | 1.15 |
| Flexural E-Modulus | ISO 178 | MPa | 3,600 | 3,600 |
| Tensile E-Modulus | ISO 527 | MPa | 3,400 | 3,400 |
| Flexural strength | ISO 178 | MPa | 132 | 133 |
| Elongation at maximum flexural strength | ISO 527 | % | 5.0 | 3.6 |
| Tensile strength | ISO 527 | MPa | 76 | 77 |
| Elongation at maximum tensile strength | ISO 527 | % | 3.8 | 4.0 |
| Water absorption | ISO 175 | % | 0.28 | 0.26 |

| Part 2: approx. values after 16 h / 55°C + 3 h / 70°C (source: accredited testing institute) | | | | |
|---|-----------------------------------|-------------------|----------------|----------------|
| Biresin® CR120 resin (A) | with hardener (B) Biresin® | | CH120-3 | CH120-6 |
| Density | ISO 1183 | g/cm ³ | 1.16 | 1.15 |
| Flexural E-Modulus | ISO 178 | MPa | 3,400 | 3,500 |
| Tensile E-Modulus | ISO 527 | MPa | 3,200 | 3,300 |
| Flexural strength | ISO 178 | MPa | 129 | 126 |
| Elongation at maximum flexural strength | ISO 527 | % | 5.3 | 3.5 |
| Tensile strength | ISO 527 | MPa | 74 | 74 |
| Elongation at maximum tensile strength | ISO 527 | % | 4.2 | 4.1 |
| Water absorption | ISO 175 | % | 0.28 | 0.28 |

| Part 3: approx. values after 12 h / 120 °C (source: Sika internal) | | | | |
|---|-----------------------------------|-------------------|----------------|----------------|
| Biresin® CR120 resin (A) | with hardener (B) Biresin® | | CH120-3 | CH120-6 |
| Density | ISO 1183 | g/cm ³ | 1.14 | 1.14 |
| Shore hardness | ISO 868 | - | D 85 | D 85 |
| Flexural E-Modulus | ISO 178 | MPa | 2,600 | 2,500 |
| Tensile E-Modulus | ISO 527 | MPa | 2,800 | 2,700 |
| Flexural strength | ISO 178 | MPa | 115 | 120 |
| Compressive strength | ISO 604 | MPa | 108 | 110 |
| Tensile strength | ISO 527 | MPa | 80 | 80 |
| Elongation at break | ISO 527 | % | 5.8 | 6.1 |
| Impact resistance | ISO 179 | kJ/m ² | 55 | 50 |

| Thermal data of neat resin specimen at different post curing conditions | | | | | |
|--|-----------------------------------|---------|----------------|----------------|-----|
| Biresin® CR120 resin (A) | with hardener (B) Biresin® | | CH120-3 | CH120-6 | |
| Post curing conditions | | | | | |
| Heat distortion temperature | 16 h/55°C | ISO 75A | °C | 74 | 73 |
| | 16 h/55°C + 3 h/70°C | ISO 75A | °C | 81 | 78 |
| | 12 h/120°C | ISO 75B | °C | 115 | 121 |
| Glass transition temperature | ISO 11357 | | °C | 113 | 115 |



Biresin® CR120 3 / 4

Parte 3

Título: Especificação técnica da fibra cortada de carbono 0,5mm



APPLY CARBON S.A. – PROCOTEX S.A. CORPORATION
 404 rue de l'Industrie – Z.A. Lamour – F-56440 LANGUIDIC – FRANCE
 contact@apply-carbon.fr – Tel +33 (0) 2 97 65 10 89 – Fax +33 (0) 2 97 65 11 20



CF-0.5mm cut carbon fibers

TECHNICAL DATA SHEET
FICHE TECHNIQUE

mise à jour / up dated : July 2015

– CF-0.5mm : mixture of all origins carbon and graphite ex-PAN fibers, obtained from spools of pure carbon fibers, cut for the widest range of short fibers applications. Its original sizing, which can vary, is generally compatible with the widest range of thermoplastic and thermosetting matrixes (polymers and elastomers), also : rubbers, papers, concretes, paints etc... its compatibility needs to be checked on each new batch and for each new application.

– CF-0.5mm : mélange de fibres de carbone et graphite ex-PAN de toutes origines, obtenu de bobines de fibres de carbone pures, coupées pour le plus large éventail d'applications fibres courtes. Son ensimage originel, variable, est généralement compatible avec le plus large éventail de matrices thermodurcissables et thermoplastiques (polymères et élastomères) mais aussi : caoutchoucs, papiers, bétons, peintures etc... Sa compatibilité doit être vérifiée à chaque lot et pour toute nouvelle application.

| PROPRIETES VALEURS MOYENNES (val. Min.) <small>Les propriétés chimiques et physiques sont celles d'origine.</small> | PROPERTIES AVERAGE VALUES (minimum values) <small>Chemical and physical properties are unchanged.</small> |
|---|---|
| <i>Teneur en fibres de carbone*</i> <i>dont fibres ex-PAN *</i> | 100 % (100%) 100 % (100%) |
| <i>Teneur en carbone*</i> | 94 % (> 92%) |
| <i>Taux d'ensimage*</i> | 1.4 % ± 0.6 |
| <i>Densité (fibre continue)*</i> | 1.7 < d < 2.0 |
| <i>Ø monofilaments*</i> | 7 µm ± 2 |
| <i>Résistivité volumique*</i> <small>résistivité volumique moyenne de n (n > 1000) monofilaments</small> | 15 µΩm (20 maxi) |
| <i>Résistance en traction*</i> | 3.5 Gpa (3) |
| <i>Allongement à rupture*</i> | 1.5 % (1.2) |
| <i>Module de Young (traction)*</i> | 230 Gpa (200) |
| <i>Longueur moyenne</i> | 0.5 mm ± 0.1 |
| <i>Distribution en masse</i> | 90 % ± 5 |
| <i>Densité apparente</i> | 0.3 kg/dm ³ ± 0.05 |
| <i>Contamination métallique**</i> | < 0.05 g / 1000 g |

The properties underlined in grey are values measured by the company

*Average values excerpt from the technical data sheets of the ex-PAN "high strength" fibers that we use in our mixture for more than 90%. The ≤10% remaining are "high modulus" fibers from same various producers : TORAYCA, TOHO-TENAX, HEXCEL, CYTEC.... All these values, in the same way for length, distribution, bulk density, metal contamination, are given as a rough guide and do not in any way engage APPLY CARBON's responsibility.

*Valeurs moyennes relevées dans les fiches techniques des producteurs des fibres ex-PAN haute résistance qui sont utilisées dans notre mélange pour plus de 90%. Les ≤10% restants sont des "hauts modules" des mêmes divers producteurs: TORAYCA, TOHO-TENAX, HEXCEL, CYTEC.... Toutes ces valeurs, de même que longueur, distribution, densité apparente, contamination métallique, sont données à titre indicatif et ne sauraient pas engager APPLY CARBON contractuellement.

**All our cut fibers are controlled through an X-rays control that permits to eliminate particles from 1 mm³ (Pb, Cu) to 6 mm³ (Al) depending on metal density ; aluminium chips or sheets, even of several cm², can't be detected.

**Toutes nos fibres coupées sont contrôlées par rayons X ce qui permet d'éliminer des particules à partir de 1 mm³ (Pb, Cu) et 6 mm³ (Al) selon la densité du métal : des copeaux ou feuilles d'aluminium très minces, même de plusieurs cm², sont indétectables.

Health and Safety : Carbon fibers are not dangerous for health. However, as short fibers and dusts, they cause irritation on skin, eyes, tract; the sizing sometimes causes allergies. People will have to wear dust protections as face masks, light overalls, glasses, gloves. Carbon fibers are electricity conducting materials.

Santé, Sécurité : Les fibres de carbone ne sont pas dangereuses pour la santé. Toutefois, sous forme de fibres courtes et de poussières, elles sont irritantes pour la peau, les yeux, les voies respiratoires ; les produits d'ensimage peuvent parfois provoquer des allergies. On devra s'en protéger avec des masques à poussières, combinaisons légères, lunettes, gants. Les fibres de carbone sont conductrices d'électricité.

TDS-Apply Carbon_v1