

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MATERIAIS PARA ENGENHARIA**

**DANIEL BRIGHENTI BORTOLUZZI**

**DESENVOLVIMENTO DE REFORÇOS TRIDIMENSIONAIS POR MEIO DE  
COSTURA EM COMPÓSITOS DE FIBRA DE CARBONO/EPÓXI**

Itajubá

2017

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MATERIAIS PARA ENGENHARIA**

**DANIEL BRIGHENTI BORTOLUZZI**

**DESENVOLVIMENTO DE REFORÇOS TRIDIMENSIONAIS POR MEIO DE  
COSTURA EM COMPÓSITOS DE FIBRA DE CARBONO/EPÓXI**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Materiais para Engenharia como parte dos requisitos para obtenção do *Título de Mestre em Ciências em Materiais para Engenharia*.

Área de Concentração: Não metais

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos Ancelotti Junior

Itajubá

2017

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MATERIAIS PARA ENGENHARIA**

**DANIEL BRIGHENTI BORTOLUZZI**

**DESENVOLVIMENTO DE REFORÇOS TRIDIMENSIONAIS POR MEIO DE  
COSTURA EM COMPÓSITOS DE FIBRA DE CARBONO/EPÓXI**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 17 de fevereiro de 2017, conferindo ao autor o título de *Mestre em Ciências em Materiais para Engenharia*.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Antonio Carlos Ancelotti Junior (Orientador)

Prof. Dr. Luiz Claudio Pardini

Profa. Dra. Patricia da Silva Lopes Alexandrino

Itajubá

2017

Dedico este trabalho aos meus pais, por tudo  
que me proporcionaram até hoje.

## **Agradecimentos**

Aos meus pais por todo apoio, incentivo e confiança durante todo esse tempo.

À minha irmã e ao meu cunhado pelo suporte e ajuda em todos os momentos.

Ao meu orientador Prof. Dr. Antonio Carlos Ancelotti Junior pela amizade, conhecimento transmitido, confiança e auxílio neste trabalho.

À banca examinadora, por disponibilizar de seu tempo e conhecimento, contribuindo imensamente para o engrandecimento deste trabalho.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela bolsa de mestrado.

Agradecimentos aos colegas de trabalho do NTC e aos técnicos do Instituto de Engenharia Mecânica da UNIFEI.

*“Quando temos menos recursos, somos mais criativos. ”*

Malcolm Gladwell

## RESUMO

Desde sua concepção, os setores onde os materiais compósitos estão sendo utilizados vem crescendo gradativamente. Hoje em dia, estes materiais possuem vasta aplicação em componentes estruturais nas indústrias aeroespacial, defesa, transportes, indústria civil e de energia. Os compósitos, principalmente os de fibra de carbono/resina epóxi, apresentam excelentes propriedades no plano. Entretanto a suscetibilidade à delaminação por carregamentos fora do plano, devido à ausência de fibras orientadas na direção da espessura, ainda é uma das fraquezas destes materiais. A introdução de fibras através da direção da espessura tem potencial para aumentar as propriedades fora do plano dos materiais compósitos. Isto pode ser realizado por diferentes métodos de reforço, tais como: *Z-pinning*, costura simples (do inglês, *Stitching*) e *Tufting*. Este trabalho teve como objetivo desenvolver e implementar um método simplificado de aplicação de reforço através da espessura, baseado na técnica de reforço *tufting*, em tecidos estruturais de fibra de carbono. Foi necessário o projeto e a fabricação de um dispositivo de costura para ser integrado à uma máquina com comando numérico computacional (CNC) *Router*. A programação de movimentação do dispositivo foi feita em um *software* e esta foi baseada em uma programação de furação em código G. Sendo assim, as preformas de fibra de carbono foram reforçadas através da espessura com linhas de fibra de vidro e de poliamida 6. Para a fibra de vidro foi utilizado apenas o padrão quadrado de inserção 7mm x 7mm, enquanto que para o fio de poliamida 6 os padrões quadrados utilizados foram de 5mm x 5mm e 7mm x 7mm. A fabricação dos compósitos de fibra de carbono/epóxi com e sem reforços através da espessura e foi realizada pelo processo de infusão VARTM. As propriedades no plano dos compósitos foram avaliadas pelo ensaio de tração. Houve um decréscimo de 10% e 11% na resistência à tração e no módulo de elasticidade, respectivamente, dos compósitos reforçados com linhas de fibra de vidro em relação aos compósitos não reforçados, enquanto que os reforçados com poliamida 6 (padrão de inserção 7x7) apresentaram redução de 37% e 34% na resistência à tração e no módulo de elasticidade, respectivamente, e os reforçados com padrão de inserção 5x5 apresentaram redução de 40% e 32% na resistência à tração e no módulo de elasticidade, respectivamente, em relação aos compósitos sem reforço na direção da espessura. As propriedades fora do plano dos compósitos foram avaliadas pelo ensaio de tenacidade à fratura interlaminar em modo II, *End-Notched Flexure* (ENF). A presença do reforço de fibra de vidro proporcionou um aumento de 27% na resistência à delaminação em relação aos compósitos não reforçados na direção da espessura, enquanto que os compósitos reforçados com poliamida 6 não apresentaram aumentos significativos.

Palavras Chave: Reforço através da espessura, *Tufting*, Tenacidade à fratura interlaminar, Compósitos carbono/epóxi

## ABSTRACT

Since the early development, the sectors where the composite materials are being used has been growing gradually. Nowadays, these materials have extensive application in the structural components in the aerospace, defense, transportation, civil and energy industries. The composites, especially carbon fabric / epoxy resin, have excellent in-plane properties. However, the susceptibility to delamination from out-of-plane loads, due to the lack of fibers oriented through the thickness, it's still one of the weaknesses of these kind of materials. The introduction of reinforcement through the thickness has the potential to increase out-of-plane properties of composite materials. This can be accomplished by different reinforcement methods, such as: Z-pinning, Stitching and Tufting. This work aimed to develop and implement a simplified method of through the thickness reinforcement, based on tufting, in structural fabrics of carbon fibre. To realize this process, it was necessary to design and manufacture a stitching equipment to install on a CNC Router . The device trajectory tracking has been achieved using a software language based on a G-code drilling program. As a result, the carbon fibre preforms were reinforced through the thickness glass fibre and polyamide 6 threads. The glass fiber thread was used only the square pattern of insertion 7mmx7mm, while for the polyamide 6 the square patterns used were 5mmx5mm and 7mmx7mm. The carbon fabric / epoxy composites reinforced through the thickness were infused by the VARTM process. The in-plane properties of the composites were evaluated by Tensile test. There was a drop down of 10% and 11% in tensile strength and modulus, respectively, of composites reinforced with glass fibre threads compared to non-reinforced composites, while those reinforced with polyamide 6 (7x7 square pattern) showed a reduction of 37% and 34% in tensile strength and modulus, respectively, and those reinforced in a 5x5 square pattern resulted in a 40% and 32% reduction in tensile strength and modulus, respectively. The out-of-plane properties and the tufts were assessed by Mode II interlaminar fracture toughness test (ENF), which stands for End-Notched Flexure. The presence of the glass fiber reinforcement provided a 27% increase in the delamination resistance compared to the non-reinforced composites in the thickness direction, while the polyamide 6 reinforced composites showed no significant increases.

**Key-words:** Trough-the-thickness reinforcement; Tufting; Mode II interlaminar fracture toughness; Carbon/epoxy composites



# SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	18
1.1	Considerações Iniciais .....	18
1.2	Objetivos.....	20
1.3	Justificativa .....	20
1.4	Estrutura do Trabalho .....	21
2	REVISÃO DA LITERATURA .....	22
2.1	Materiais compósitos .....	22
2.1.1	Compósitos de matriz polimérica.....	24
2.1.2	Resina epóxi .....	26
2.1.3	Reforços de compósitos.....	27
2.1.4	Fibra de Carbono .....	27
2.1.4.1	Propriedades .....	28
2.1.4.2	Fabricação de materiais compósitos .....	29
2.2	Infusão de Resina Assistida por Vácuo (VARTM) .....	30
2.3	Mecanismo de falha e ensaios de avaliação das propriedades fora do plano e no plano.....	32
2.3.1	Delaminação.....	32
2.3.2	Ensaio de avaliação ENF.....	34
2.3.3	Ensaio de resistência à tração .....	36
2.4	Métodos de reforço tridimensionais.....	37
2.4.1	Z-pinning .....	38
2.4.2	Stitching e Single-sided Stitching .....	39
2.4.3	Tufting .....	43
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	46
3.1	Materiais utilizados.....	46
3.1.1	Materiais para o dispositivo de costura .....	46
3.1.2	Materiais para a preforma e compósito compósito.....	46
3.1.3	Fibra de carbono.....	47
3.1.4	Resina Epóxi.....	48
3.1.5	Linhas de fibra de vidro (FV) e monofilamento de Poliamida 6 (PA 6) .....	48
3.1.6	Materiais Consumíveis .....	50

3.2	Método experimental .....	51
3.2.1	Fabricação do dispositivo de costura.....	52
3.2.2	Fabricação dos compósitos.....	56
3.2.2.1	Preparação das preformas .....	56
3.2.3	Processo de costura Tufting.....	57
3.2.3.1	Processo VARTM.....	61
3.2.4	Volume de fibra e de vazios .....	66
3.2.5	Usinagem dos corpos de prova (CDP's).....	67
3.2.6	Ensaio Estáticos .....	71
3.2.6.1	Ensaio de Tração.....	71
3.2.6.2	Ensaio de tenacidade à fratura interlaminar em modo II .....	72
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	85
4.1	Processo de Costura Tufting .....	85
4.2	Aspectos qualitativos .....	90
4.2.1	Volumes de fibra, resina e vazios.....	90
4.2.2	Microscopia óptica .....	91
4.2.2.1	Inclinação das linhas de reforço 3D.....	91
4.2.2.2	Defeitos de processo .....	94
4.2.2.3	Desalinhamento das fibras e regiões ricas em resina.....	96
4.3	Ensaio estáticos .....	98
4.3.1	Ensaio de resistência à tração .....	98
4.3.2	Ensaio de resistência à fratura interlaminar em modo II (ENF) .....	102
4.3.2.1	Ensaio Non-Precracked (NPC) .....	102
4.3.2.2	Ensaio Precracked (PC) .....	110
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	118
5.1	Conclusões.....	118
5.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	119
	APÊNDICES .....	120
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	124

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Formato e distribuição das fibras na matriz.....	23
Figura 2.2 - Grupo funcional epóxi .....	26
Figura 2.3 - Propriedades dos materiais compósitos comparados à outras classes de materiais .....	29
Figura 2.4 – Desenho esquemático de uma bolsa de vácuo preparada para VARTM. ....	31
Figura 2.5 - Esquema de delaminação em compósitos.....	33
Figura 2.6 - Esquema de movimentação das tensões que propagam a delaminação.....	33
Figura 2.7 - Esquema da configuração dos ensaios DCB, ENF e MMB. ....	34
Figura 2.8 - Esquema de inserção de <i>z-pins</i> . Em a) Posicionamento de espuma com <i>z-pins</i> na preforma de prepreg, b) inserção dos <i>z-pins</i> com um equipamento ultrassônico, c) inserção completa e d) retirada da espuma com excesso de <i>z-pins</i> e amostra da reforçada através da espessura.....	39
Figura 2.9 - Tipos de costura utilizada para reforço em preformas: a) <i>Chain</i> (corrente) e b) <i>Lock</i> (trava).....	41
Figura 2.10 - Exemplos de costura com acesso a um lado da preforma ( <i>single-side stitch</i> ): a) ITA, b) OSS e c) <i>Blind stitch</i> com seus padrões de costura. ....	42
Figura 2.11 - Cabeçote KSL RS 530 para <i>Chain Stitch</i> acoplado a um braço robótico.....	42
Figura 2.12 - a) processo de costura <i>blind stitch</i> e b) componente traseiro de uma caverna de pressão de um Airbus A380 reforçada por <i>blind stitch</i> . ....	43
Figura 2.13 - Esquema do processo de <i>tufting</i> .....	44
Figura 2.14 - a) Cabeçote de <i>tufting</i> modelo KSL KL150 acoplado em um braço robótico Kawasaki FS 20 N e b) cabeçote KSL RS552 acoplado em um braço robótico KUKA KR 240-2. ....	45
Figura 2.15 - Cone de cauda em que as setas vermelhas indicam algumas regiões reforçadas pela técnica <i>tufting</i> .....	45
Figura 3.1 - Ilustração de um tecido <i>plain weave</i> . ....	47
Figura 3.2 - Fluxograma de atividades realizadas no trabalho. ....	51
Figura 3.3 - Modelo da CNC Router presente nas instalações do NTC - UNIFEI. ....	52
Figura 3.4 - a) Guia do suporte e b) suporte da agulha fabricados na oficina mecânica do IEM. ....	53
Figura 3.5 - Impressora 3D <i>Ultimaker</i> <sup>®</sup> . ....	53

Figura 3.6 - Etapas de fabricação: a) fabricação da base do calçador, b) e c) as etapas de fabricação da haste e d) o calçador finalizado.....	54
Figura 3.7 - imagens da agulha utilizada no processo <i>tufting</i> . .....	55
Figura 3.8 - Dispositivo de costura montado.....	55
Figura 3.9 - Esquema com as etapas do processo de costura <i>tufting</i> . .....	57
Figura 3.10 - Esquema de movimentação da agulha para o processo de <i>tufting</i> . .....	58
Figura 3.11 - Dispositivo instalado na Router. ....	58
Figura 3.12 - Padrão quadrado de inserção de 5mm x 5mm e 7mm x 7mm. ....	59
Figura 3.13 - Indicação da canaleta na parte traseira da agulha. ....	60
Figura 3.14 - Montagem do aparato para o método de costura <i>tufting</i> , onde 1) é o suporte da agulha, 2) a agulha, 3) as placas de EVA, 4) a preforma e 5) as barras de fixação da preforma. ....	61
Figura 3.15 - Esquema de um processo VARTM. ....	61
Figura 3.16 - Preforma posicionada no ferramental. ....	62
Figura 3.17 - Esquema da montagem dos conectores (marcados em azul) e mangueiras (marcadas em vermelho). ....	63
Figura 3.18 - Adição de outra camada de <i>peel ply</i> em cima da preforma. ....	63
Figura 3.19 - Identificação (em vermelho) das dobras em uma bolsa de vácuo. ....	64
Figura 3.20 - Bolsa de vácuo preparada para a infusão. ....	64
Figura 3.21 - a) início do processo de infusão e b) infusão completa. ....	65
Figura 3.22 - Usinagem dos corpos de prova para os ensaios de tração. ....	67
Figura 3.23 - Usinagem dos corpos de prova para ensaios em modo II. ....	68
Figura 3.24 - Corpos de prova para o ensaio de tração .....	68
Figura 3.25 - Corpos de prova para o ensaio ENF. ....	69
Figura 3.26 - a) Corpo de prova marcado e b) posicionamento com o auxílio do <i>software</i> . Fonte: Autor.....	71
Figura 3.27 - a) Corpo de prova no início do ensaio e b) no final do ensaio (ruptura). ....	72
Figura 3.28 - Esquema do corpo de prova com suas dimensões e o inserto polimérico no plano médio do compósito. ....	73
Figura 3.29 - Identificação das marcas da calibração de conformidade (círculo vermelho) e das marcações das pontas dos insertos (círculo preto).....	73
Figura 3.30 - Esquema dos comprimentos de fenda a partir da ponta do inserto.....	74
Figura 3.31 - Esquema do corpo de prova no dispositivo de ensaio. ....	75

Figura 3.32 - Esquema do ensaio com $a = 20$ mm. ....	76
Figura 3.33 - Corpo de prova no dispositivo de ensaio com comprimento de fenda $a = 20$ mm. .....	76
Figura 3.34 - Esquema do ensaio com $a = 40$ mm. ....	77
Figura 3.35 - Corpo de prova no dispositivo de ensaio com comprimento de fenda $a = 40$ mm. .....	77
Figura 3.36 - Esquema do ensaio com $a = 30$ mm. ....	78
Figura 3.37 - Corpo de prova no dispositivo de ensaio comprimento de fenda $a = 30$ mm. ...	78
Figura 3.38 - Ilustração da movimentação causada pelas forças cisalhantes e a trinca a partir da ponta do inserto. ....	79
Figura 3.39 - Curva Deslocamento em função da Força para determinação da conformidade $C$ . .....	80
Figura 3.40 - Curva Deslocamento em função da Força para determinação da conformidade $C$ . .....	81
Figura 3.41 - Marcação dos novos comprimentos das fendas a partir do final da trinca. ....	82
Figura 3.42 - Corpo de prova no dispositivo de ensaio comprimento de fenda $a = 20$ mm. ...	82
Figura 3.43 - Corpo de prova no dispositivo de ensaio comprimento de fenda $a = 40$ mm. ...	83
Figura 3.44 - Corpo de prova no dispositivo de ensaio comprimento de fenda $a = 30$ mm. ...	83
Figura 4.1 - Costuras na superfície superior da preforma formadas pela técnica <i>tufting</i> . ....	86
Figura 4.2 - <i>Loops</i> formados no processo <i>tufting</i> com padrão de inserção $7 \times 7$ . ....	86
Figura 4.3 - <i>Loops</i> na superfície inferior da preforma. ....	87
Figura 4.4 - Costuras (a) e <i>loops</i> (b) formados nos testes .....	88
Figura 4.5 - Superfície superior da preforma manufaturada para os ensaios de tração. ....	88
Figura 4.6 - <i>Loops</i> na superfície inferior da preforma manufaturada para os ensaios de tração. .....	89
Figura 4.7 - <i>Loops</i> na superfície inferior da preforma manufaturada para os ensaios em modo II .....	89
Figura 4.8 - Seção longitudinal de um CDP para ensaio de tração reforçado com linha de poliamida 6. ....	92
Figura 4.9 - Seção longitudinal de um CDP para ensaio de tração reforçado com linha de fibra de vidro. ....	92
Figura 4.10 - Seção longitudinal de um CDP para ensaio de tenacidade à fratura interlaminar reforçado com linha de poliamida 6. ....	93

Figura 4.11- Seção longitudinal de um CDP para ensaio de tenacidade à fratura interlaminar reforçado com linha de fibra de vidro. ....	93
Figura 4.12 - Defeito de impregnação em torno da linha de poliamida 6 de um CDP para o ensaio de tração. ....	94
Figura 4.13 - Região em torno de um reforço tridimensional de fibra de vidro.....	95
Figura 4.14 - Região com defeito de impregnação de um CDP para o ensaio de tenacidade à fratura interlaminar. ....	95
Figura 4.15 - Região em torno de um reforço tridimensional de fibra de vidro.....	96
Figura 4.16 - Vista de topo do desalinhamento das fibras ocasionadas pelo processo de costura <i>tufting</i> . ....	97
Figura 4.17 - Vista de topo do desalinhamento das fibras ocasionadas pelo processo de costura <i>tufting</i> com linha de fibra de vidro. ....	97
Figura 4.18 - Vista de topo da região rica em resina ( <i>tufting</i> com linha de poliamida 6). ....	98
Figura 4.19 - Curvas tensão-deformação representativas dos ensaios de resistência à tração.	99
Figura 4.20 - Região de ruptura das amostras a) T2R7FV, b) T1R7PA e c) T4R5PA. ....	100
Figura 4.21 - Micrografia do desalinhamento e da região rica em resina ao redor do reforço. ....	101
Figura 4.22 - Micrografia identificando, em vermelho, defeitos de impregnação em ao redor dos tufts. ....	102
Figura 4.23 - Curvas $P$ em função de $\delta$ do ensaio para os corpos de prova de E1R7PA com $a = 30$ mm. ....	105
Figura 4.24 - Curvas $P$ em função de $\delta$ do ensaio para os corpos de prova do compósito E2R7FV com $a = 30$ mm. ....	106
Figura 4.25 - Curvas $P$ em função de $\delta$ do ensaio para os corpos de prova de E3SR com $a = 30$ mm. ....	107
Figura 4.26 - Curvas $P$ em função de $\delta$ do ensaio para os corpos de prova E4R5PA com $a = 30$ mm. ....	108
Figura 4.27 - Curvas $P$ em função de $\delta$ representativas dos ensaios NPC para todos os compósitos. ....	109
Figura 4.28 - Curvas $P$ em função do $\delta$ do ensaio PC para os corpos de prova de E1R7PA com $a = 30$ mm. ....	112
Figura 4.29 - Curvas $P$ em função do $\delta$ do ensaio para os corpos de prova da E3SR com $a = 30$ mm. ....	114

Figura 4.30 - Curvas  $P$  em função do  $\delta$  do ensaio para os corpos de prova da E4R5PA com  $a = 30$  mm..... 115

Figura 4.31 - Curvas  $P$  em função de  $\delta$  representativas dos ensaios PC para todos os compósitos.  
..... 116

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Propriedades e aplicações das resinas termorrígidas.....	25
Tabela 2.2 - Propriedades nas direções transversais e longitudinais de compósitos poliméricos reforçado por fibras. Em todos os casos, a fração volumétrica da fibra é de 0,6. ....	27
Tabela 3.1 - Principais propriedades do tecido de fibra de carbono.....	47
Tabela 3.2 - Propriedades do sistema epóxi Araldite® LY 5052/ Aradur® 5052. ....	48
Tabela 3.3 - Propriedades da fibra de vidro. Fonte: Texiglass .....	49
Tabela 3.4 - Propriedades do monofilamento de poliamida 6.....	49
Tabela 3.5 - Consumíveis utilizados no processo de costura. ....	50
Tabela 3.6 - Consumíveis utilizados na fabricação dos compósitos. ....	50
Tabela 3.7 - Preformas para ensaio de tração .....	56
Tabela 3.8 - Preformas para ensaio de tenacidade à fratura .....	56
Tabela 3.9 - Dimensões corpos de prova para ensaio de tração. ....	70
Tabela 3.10 - Dimensões corpos de prova para ensaio em modo II.....	70
Tabela 3.11 - Valores de $a$ , $P$ , $\delta$ , e $C$ para o gráfico plotado na Figura 3.38.....	79
Tabela 3.12 - Valores de $a^3$ e $C$ para cada comprimento de fenda.....	80
Tabela 4.1 - Volumes de fibra, resina e vazios dos compósitos para ensaio de tração. ....	90
Tabela 4.2 - Volumes de fibra, resina e vazios dos compósitos para ensaio ENF. ....	91
Tabela 4.3 - Resultados do ensaio de resistência à tração. ....	99
Tabela 4.4 - Valores obtidos para os ensaios com comprimento da fenda de 20 mm.....	103
Tabela 4.5 - Valores obtidos para os ensaios com comprimento da fenda de 40 mm.....	103
Tabela 4.6 - Resultados obtidos para $P_{Máx}$ , $G_Q$ , $A$ e $m$ . ....	103
Tabela 4.7 - Resultados calculados para $\%G_{Qi}$ , $\%G_{Qj}$ , e $G_Q$ . ....	104
Tabela 4.8 - Resultados obtidos para a conformidade, coeficientes $CC$ , $P_{Máx}$ e $G_{IIc}$ .....	105
Tabela 4.9 - Resultados obtidos para a conformidade, coeficientes $CC$ , $P_{Máx}$ e $G_{IIc}$ .....	106
Tabela 4.10 - Resultados obtidos para a conformidade, coeficientes $CC$ , $P_{Máx}$ e $G_{IIc}$ .....	107
Tabela 4.11 - Resultados obtidos para a conformidade, coeficientes $CC$ , $P_{Máx}$ e $G_{IIc}$ .....	108
Tabela 4.12 - Média dos resultados obtidos para cada tipo de compósito. ....	109
Tabela 4.13 - Valores das forças para $a = 20$ mm. ....	110
Tabela 4.14 - Valores das forças para $a = 40$ mm. ....	110
Tabela 4.15 - Resultados obtidos para $P_{Máx}$ , $G_Q$ , $A$ e $m$ . ....	110
Tabela 4.16 - Resultado calculados para $\%G_{Qi}$ , $\%G_{Qj}$ , e $G_Q$ . ....	111



Tabela 4.17 - Resultados obtidos para a conformidade, coeficientes $CC$ , $P_{Máx}$ e $G_{IIc}$ .....	112
Tabela 4.18 - Resultados obtidos para a conformidade, coeficientes $CC$ , $P_{Máx}$ e $G_{IIc}$ .....	113
Tabela 4.19 - Resultados obtidos para a conformidade, coeficientes $CC$ , $P_{Máx}$ e $G_{IIc}$ .....	114
Tabela 4.20 - Resultados obtidos para a conformidade, coeficientes $CC$ , $P_{Máx}$ e $G_{IIc}$ .....	115
Tabela 4.21 - Média dos resultados obtidos para cada tipo de compósito. ....	116

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações Iniciais

Compósito estrutural é um material que apresenta duas ou mais fases, em uma escala macroscópica, no qual o desempenho e as propriedades mecânicas são superiores comparadas àquelas que os materiais constituintes apresentariam individualmente. Uma das fases é descontínua, mais rígida e resistente, conhecida como reforço, enquanto que a fase menos resistente e mais frágil é contínua e chamada de matriz. Em certas ocasiões, devido ao processamento ou por interações químicas entre a matriz e o reforço, há uma fase adicional chamada de interfase (DANIEL & ISHAI, 1994).

Os compósitos estruturais com matrizes poliméricas são materiais de grande interesse para aplicações em engenharia devido à baixa massa específica ( $<2 \text{ g/cm}^3$ ) aliada à alta resistência mecânica ( $\sigma_T > 500 \text{ MPa}$ ). Estes materiais, conhecidos como compósitos bidirecionais (2D), são usualmente confeccionados na forma clássica de empilhamento de camadas individuais de tecidos bidirecionais ou camadas unidirecionais com orientação definida. A fratura interlaminar, ou delaminação entre as camadas, é o modo de falha mais frequente em compósitos. Fraturas deste tipo ocorrem mesmo sob baixo carregamento mecânico, o que, por sua vez, comprometem a integridade estrutural do componente. Devido à esta limitação, as aplicações de compósitos ficam restringidas (PARDINI, 2000).

Para aumentar a resistência à fratura interlaminar e à tolerância a danos, há, atualmente, diferentes técnicas disponíveis, conhecidas como: reforço na direção da espessura; reforço 3D; reforço em Z; *through-the-thickness reinforcement* (TTR). A escolha de uma em vez da outra depende do método de fabricação do compósito (DELL'ANNO, 2007). Geralmente há uma distinção entre técnicas como *3D weaving* e *3D braiding* (tecelagem e trançamento 3D, respectivamente) - que dão origem à preformas complexas, próximas ao formato final da peça, ou para a produção contínua e em larga escala de tecidos com reforço 3D - e técnicas de inserção de reforço na direção da espessura, em um processo posterior ao empilhamento das camadas de tecido, como *Z - pinning*, *Structural Stitching* ("costura") e *Tufting*. Estas últimas técnicas citadas são ideais para aplicação localizada nas peças. No caso do *Structural Stitching* e *Tufting*, os materiais utilizados para o reforço podem ser linhas/fios de fibra de carbono, fibra de vidro,

aramida e poliamida. Enquanto que pinos de fibra de carbono pultrudadas são utilizados para o método *Z – pinning* (TREIBER, 2011).

O *Tufting* é um método de costura que requer acesso somente por um lado da estrutura, denominado também de *Single-sided Stitching* (do inglês, costura de um lado). O método *Structural Stitching* (costura estrutural), pode ser encontrado de duas maneiras: 1) com duas agulhas, sendo uma para a inserção na parte superior e a outra na inferior do compósito, e duas linhas; ou 2) uma agulha e uma linha, na parte superior, e uma bobina com linha, na parte inferior do compósito (DELL'ANNO *et al.*, 2016). A técnica *tufting* é considerada também a versão mais simples de *Single-sided Stitching* e é destinada às peças que serão manufaturadas pelo processo RTM (*Resin Transfer Moulding*, Moldagem por Transferência de Resina) ou pelo processo VARTM (*Vacuum Resin Transfer Moulding*, Moldagem por Transferência de Resina assistida a Vácuo).

O processo de infusão a vácuo é um processo de moldagem utilizado para a fabricação de estruturas compósitas. A sua popularidade se deve, em parte, ao baixo custo do conjunto de ferramental e à segurança ambiental (o processo elimina mais do que 90% dos compostos orgânicos voláteis emitidos por resinas de poliéster insaturadas). Além disso, o baixo envolvimento do operador aumenta a reprodutibilidade do processo em comparação com as técnicas de molde aberto como *hand-lay-up* ou *spray-up* e os componentes são, relativamente, de alto teor de fibras, com até 60% em volume (RAGONDET, 2005).

Antigo método de fabricação de tapetes e vestimentas, *Tufting* se tornou uma tecnologia comercial de reforço 3D para compósitos de matriz polimérica termofixa. Implica na inserção de linhas adicionais, com uma única agulha, através das camadas de um compósito. As linhas podem ser completamente inseridas a uma determinada altura da espessura da preforma, ortogonalmente à superfície ou em ângulo. Quando a agulha penetra toda a espessura da estrutura, forma-se um *loop* na parte inferior do compósito. Os *loops* não ficam nem tensionados nem interligados e os *tufts* (parte da linha inserida que fica entre as camadas do compósito) se mantêm na posição, devido à fricção natural entre a linha e o tecido do compósito. Como citado anteriormente, esta tecnologia requer acesso apenas por uma das superfícies, o que a torna ideal para aplicação de reforço localizado em peças com formato complexo (DELL'ANNO *et al.*, 2016).

O *tufting* é um método relativamente barato, de fácil aplicação, e ainda pouco explorado que modifica as propriedades iniciais fora e no plano dos materiais compósitos. Em relação às propriedades fora do plano, pode-se dizer que este método aumenta a resistência à fratura

interlaminar e à delaminação, e sua tolerância a danos mecânicos (OSMANI *et al.*, 2016). Enquanto que as propriedades no plano, tais como: Resistência à tração, compressão e cisalhamento; sofrem um decréscimo entre 10 - 30%, se comparados aos compósitos bidimensionais. Isto ocorre devido à criação de regiões ricas em resina, danos nas fibras causados pela agulha, regiões com maiores concentrações de resina ou, até mesmo, impregnação incompleta do compósito. Por esses motivos deve-se ter um relevante estudo da região de aplicação do reforço e levar em consideração o quanto se pode ganhar com o aumento das propriedades fora do plano, em detrimento da perda das propriedades no plano (KOISSIN *et al.*, 2009a; DECONINCK *et al.*, 2014).

Até o momento, os reforços 3D têm sido aplicados em peças estruturais de aeronaves, automóveis, trens e navios que estão sujeitas ao impacto (PATRIDGE & HALLET, 2016); em compósitos sanduíche para evitar a delaminação entre as camadas de tecido e a espuma de poliuretano (HENAO *et al.*, 2015) e em testes para uma possível substituição de rebites de metal na fixação de longarinas (MILLS & JONES, 2010).

## 1.2 Objetivos

- Este trabalho tem como objetivo desenvolver e implementar um método simplificado de reforço 3D por costura, baseado na técnica *tufting*, em tecidos estruturais de fibra de carbono;
- Já os objetivos específicos estão relacionados em: Projetar e fabricar um dispositivo, com um sistema de suporte para uma agulha e um calcador, para acoplar na máquina CNC *Router*; selecionar o tipo de tecido e as linhas de reforço para a manufatura das preformas e posteriormente realizar a infusão pelo método VARTM; definir o padrão de costura adequado e analisar os efeitos da inserção da agulha no tecido; avaliar mecanicamente os diferentes reforços e padrões de costura; e por fim, tratar os dados obtidos.

## 1.3 Justificativa

As estruturas em materiais compósitos podem ser encontradas em diversas espessuras. Nas mais espessas, existe uma grande quantidade de interface fibra/matriz entre as camadas, as

quais estão sujeitas a carregamentos fora do plano e ao impacto, o que, por sua vez, torna o compósito suscetível à delaminação. Isto acarreta em perda de propriedades do compósito e pode gerar falhas catastróficas na estrutura. Em razão disto, tem-se estudado diferentes métodos de reforço na direção Z (perpendicular ao plano) capazes de aumentar a resistência à delaminação e ao impacto.

A escolha do método de reforço *tufting* para este trabalho se deu em virtude de esta ser uma das técnicas de costura mais simples e de relativa facilidade de adaptação no ambiente de pesquisa. Além disso, acredita-se que seja relevante apresentar resultados em relação ao aumento da resistência ao impacto e à delaminação de matérias compósitos utilizando esta tecnologia, que é relativamente pouco estudada no Brasil.

## 1.4 Estrutura do Trabalho

O presente capítulo aborda uma breve descrição dos materiais compósitos e métodos de reforços tridimensionais, assim como os objetivos e estudos realizados.

O Capítulo 2 descreve o estado da arte de materiais compósitos, principalmente dos compósitos poliméricos reforçados com fibra de carbono CFRP (do inglês, *Carbon Fibre Reinforced Polymers*). Descreve também o processo VARTM, utilizado para a fabricação dos compósitos, o mecanismo de falha de compósitos e os ensaios estáticos utilizados para determinar as propriedades no plano e fora do plano, sendo eles os ensaios de tração e tenacidade à fratura interlaminar em modo II, respectivamente. Por fim, apresenta os principais métodos de reforço 3D com inserção de reforço através da espessura.

O Capítulo 3 apresenta informações sobre os materiais utilizados durante o desenvolvimento do trabalho e os métodos para a fabricação de preformas e compósitos de fibra de carbono, reforçados com fibra de vidro e poliamida 6. Apresenta também os métodos de caracterização por microscopia e digestão ácida, assim como os ensaios realizados para a obtenção das propriedades no plano e fora do plano dos compósitos fabricados.

O Capítulo 4 exhibe os resultados obtidos nos ensaios de tração e tenacidade à fratura interlaminar, por meio de gráficos e tabelas, que elucidam o comportamento dos diferentes tipos de compósitos fabricados neste trabalho.

O Capítulo 5 destaca as conclusões gerais do trabalho, assim como as sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 Materiais compósitos

O uso de materiais compósitos na indústria tem crescido comparado às décadas passadas. Isto se deve às elevadas propriedades mecânicas destes materiais, como a resistência e a rigidez em relação à sua massa, comparadas aos tradicionais materiais de engenharia (ZHAO *et al.*, 2016). Este tipo de material tem sido amplamente utilizado em componentes para aeronaves e foguetes, cascos de barcos, artigos esportivos e materiais biomédicos (HU, 2012).

Materiais compósitos são uma combinação física entre dois ou mais materiais, que atuam em conjunto para fornecer propriedades superiores àquelas que os materiais apresentariam individualmente (DE VERDIERE, 2009). Pode-se dizer que o compósito apresenta duas fases, uma delas é chamada de reforço, fase descontínua, e aquela em que o reforço é incorporado é conhecida como matriz. O reforço pode ser em forma de fibras e particulados, já a fase matriz é contínua (KAW, 2006).

O reforço é responsável por suportar as cargas aplicadas, e a matriz tem a função de distribuição e transmissão dos esforços (GAY *et al.*, 2003). As propriedades dos compósitos estão relacionadas às propriedades dos seus constituintes, à geometria, à orientação e à distribuição das fases. A geometria e a orientação do reforço interferem na anisotropia do material e a distribuição determina a homogeneidade ou uniformidade do compósito (DANIEL & ISHAI 1994).

Assim, os materiais compósitos são classificados conforme o tipo de matriz, tipo de reforço utilizado, orientação e distribuição do reforço, pelas propriedades mecânicas e também pelo método de processamento (BOWER, 1992).

As principais matrizes utilizadas em materiais compósitos são classificadas de acordo com sua estrutura e natureza química, como: matrizes poliméricas (termoplásticas e termorrígidas), cerâmicas e metálicas (PARDINI & LEVY, 2006). Quanto aos reforços, os mais utilizados são a fibra de carbono, fibra de vidro e fibra de aramida. Além destes, há também as fibras vegetais de bananeira e coco, fibras de Boro, fibras de quartzo e cerâmica como a de  $Al_2O_3$ . Os reforços nem sempre estão na forma de fibras longas, podem ser em forma de partículas, *whiskers*, fibras curtas ou contínuas ou em lâminas. A maioria dos reforços utilizados em materiais compósitos são no formato de fibras, por serem mais fortes e resistentes que em

qualquer outra forma. Neste caso, o maior interesse é nas fibras avançadas, que oferecem alta resistência e rigidez combinadas a uma baixa massa específica (CHAWLA, 1998). A Figura 2.1 mostra os tipos de fibra e a forma que se apresentam distribuídas na matriz.

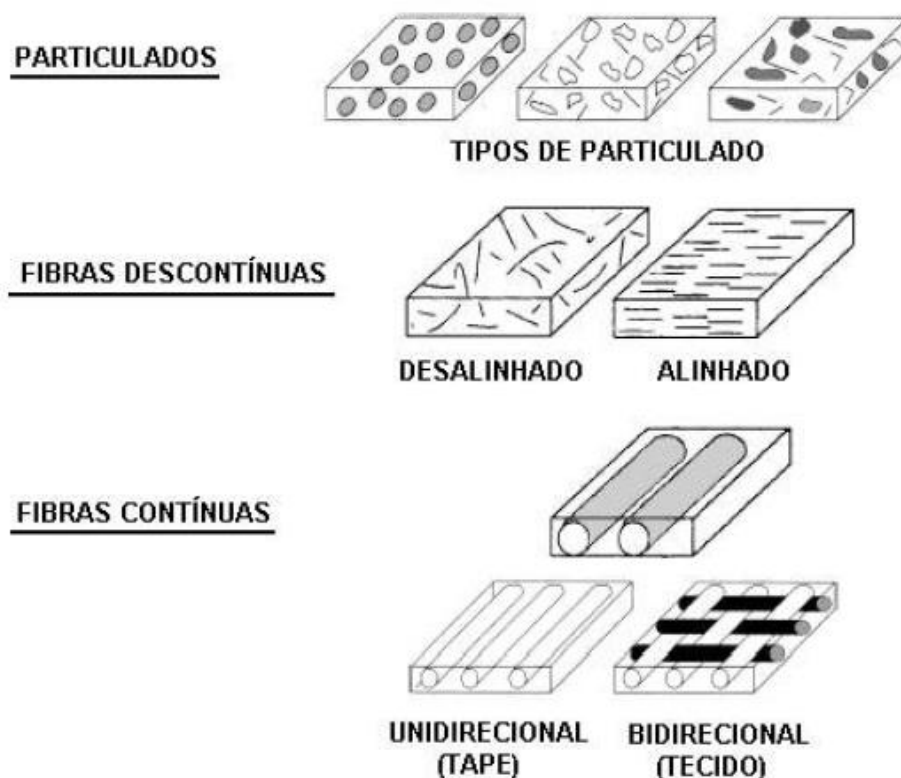


Figura 2.1 - Formato e distribuição das fibras na matriz.

Fonte: (ANCELOTTI JR, 2006)

A forma mais usual de fabricação de materiais compósitos utilizada é o empilhamento de camadas individuais de tecido, podendo este ser unidirecional ou bidirecional, com orientação definida (PARDINI & LEVI, 2006). No entanto, a resistência dos compósitos de compósito é limitada pela sua baixa propriedade de tenacidade à fratura interlaminar tornando-os suscetíveis à delaminação. A ligação entre as camadas depende muito das propriedades da resina, o que torna os compósitos propensos ao descolamento destas, modo de falha que é conhecido por delaminação (MARTINS, 2014). A delaminação pode ser fator limitante de resistência para diversas aplicações (SUN & SUN, 2004). Nos compósitos tradicionais, a configuração 2D das camadas e a fragilidade da matriz fazem com que a região interlaminar fique suscetível às trincas (DELL'ANNO *et al.*, 2016).

A Resistência e rigidez fora do plano dependem da fase matriz, e esta exhibe baixas propriedades comparadas às propriedades no plano, que, por sua vez, dependem das

propriedades das fibras. Estes materiais estão sujeitos à delaminação, especialmente para estruturas mais espessas. (ZHANG *et al.*, 2012). Aumentar a resistência à delaminação destes materiais faz com que haja uma menor possibilidade de iniciar uma trinca e também uma diminuição na propagação da mesma nas regiões interlaminares (DELL'ANNO *et al.*, 2007).

Para aumentar a resistência à fratura interlaminar e a tolerância a danos, há, atualmente, diferentes técnicas disponíveis, conhecidas como: Reforço na direção da espessura; reforço 3D; reforço em Z; *through-the-thickness reinforcement (TTR)*. A escolha de uma em vez da outra depende do método de fabricação dos compósitos.

Geralmente há uma distinção entre técnicas como *3D weaving* e *3D braiding* (tecelagem e trançamento 3D, respectivamente) - que dão origem à preformas complexas, próximas ao formato final da peça, ou para a produção contínua e em larga escala de tecidos com reforço 3D - e técnicas de inserção de reforço na direção da espessura, em um processo posterior ao empilhamento das camadas de tecido, como *Z - pinning*, *Structural Stitching* ("costura") e *Tufting*. Estas últimas técnicas citadas são ideais para aplicação localizada nas peças (TREIBER, 2011).

Os materiais compósitos de enfoque neste trabalho serão de matriz polimérica termorrígidas com fibras contínuas (tecidos bidimensionais) reforçados na direção da espessura pela técnica de costura *Tufting* e fabricados pelo método VARTM.

### **2.1.1 Compósitos de matriz polimérica**

Os compósitos de matriz polimérica (PMC - *Polymer-Matrix Composites*) podem ser classificados de duas formas: Os fabricados com matrizes termoplásticas e os fabricados com matrizes termorrígidas (termofixas).

Polímeros termoplásticos são materiais que apresentam a capacidade de amolecer e fluir quando submetidos ao calor e aumento de pressão. Quando estes são retirados, o polímero solidifica-se em um produto com formas definidas. Subseqüentes aplicações de temperatura e pressão fazem com que o polímero amoleça e fique fluido novamente. Esta alteração é uma transformação física, reversível (CANEVAROLO JR, 2006). Exemplos de polímeros utilizados como matrizes termoplásticas são o PEEK (poli-éter-éter-cetona), PPS (sulfeto polifenileno), Poliamidas 6 e 6.6 e PEI (polieterimida).



Polímeros termorrígidos são polímeros em rede. Endurecem permanentemente durante a sua formação e se forem sujeitos ao aquecimento novamente, não amolecem. Passam por um processo químico de cura irreversível, formação de ligações cruzadas. Durante os tratamentos térmicos, as ligações prendem as cadeias umas às outras para resistir aos movimentos de vibração e rotação em temperaturas elevadas. Dessa forma, os materiais não amolecem quando aquecidos (CALLISTER & RETHWISCH, 2012).

A seleção do tipo de resina para uma determinada aplicação vai depender da responsabilidade estrutural e do ambiente de operação do compósito. As resinas bismaleimida, por exemplo, são utilizadas em estruturas submetidas à alta temperatura (250°C) e alta resistência. As resinas termorrígidas são fáceis de processar, principalmente porque apresentam compatibilidade com os reforços fibrosos (ANCELOTTI JR, 2006).

Os exemplos de resinas termorrígidas mais utilizadas são as fenólicas, bismaldeida e epóxi. A Tabela 2.1 cita as propriedades básicas das resinas mais aplicadas.

Tabela 2.1 - Propriedades e aplicações das resinas termorrígidas. Fonte: Adaptada de (MAZUMDAR, 2002)

<b>Resina</b>	<b>Massa Específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Resistência à Tração (MPa)</b>	<b>Módulo de elasticidade em Tração (GPa)</b>	<b>Aplicações e Características</b>
<b>Epóxi</b>	1,2 - 1,4	60 - 100	3,0 - 4,5	Peças estruturais Apresenta diversas formulações Baixa retração volumétrica na cura
<b>Fenólica</b>	1,2 - 1,4	50 - 60	3,0 - 4,0	Formulação auto extingüível Baixa toxicidade quando em chama Alta resistência à temperatura
<b>Bismaldeida</b>	1,1 - 1,3	75 - 105	3,0 - 5,0	Boas propriedades mecânicas Boas propriedades elétricas Alta resistência ao impacto

## 2.1.2 Resina epóxi

As resinas epóxi, classificadas como termorrígidas, são as de maior destaque para o uso estrutural, por apresentarem excelentes propriedades térmicas e mecânicas em relação à outras matrizes poliméricas, como bom módulo e resistência à tração, excelente resistência química e propriedades elétricas, na faixa de temperatura de  $-60^{\circ}\text{C}$  a  $+180^{\circ}\text{C}$  (TSANTZALIS *et al.*, 2007).

Epóxi (ou resina epoxídica) é um polímero que contém pelo menos dois grupos, conhecido como epóxi, epóxido, oxirano ou etano epóxi em sua estrutura, o diglicidil eter de bisfenol A (DGEBA) é um exemplo (CHAWLA, 1998). A Figura 2.2 indica o grupo funcional epóxi.

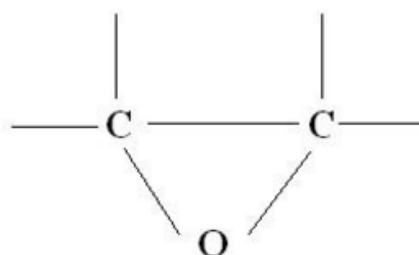


Figura 2.2 - Grupo funcional epóxi  
Fonte: Adaptado de (MALLICK, 2007)

DGEBA é o agente inicial líquido e deve haver um agente de cura (DETA - dietilenotriamina) adicionado para que haja a cura (polimerização) e endurecimento da resina. A formação de ligações cruzadas entre as moléculas de DGEBA formam um arranjo tridimensional resultando em um material sólido (MAZUNDAR, 2002). As propriedades da resina dependem da densidade das ligações cruzadas. O módulo de elasticidade, a temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ), a resistência química, assim como a expansão térmica, aumenta proporcionalmente com o aumento da densidade de ligações cruzadas, no entanto a resistência à fratura diminui (MALLICK, 2007).

Este tipo de resina tem se tornado um dos mais utilizados como matriz em compósitos poliméricos reforçados com fibra, devido às propriedades citadas acima e pela possibilidade de melhora-las e se escolhendo diferentes tipos de oligômeros epóxidos e endurecedores (WANG, 2012; PETERS, 1998).

### 2.1.3 Reforços de compósitos

Conforme mencionado anteriormente, os reforços podem se apresentar na forma de particulados, fibras contínuas ou descontínuas. As fibras são os elementos dos compósitos que suportam o carregamento mecânico. A seleção do reforço depende do tipo e magnitude de esforço que o compósito será submetido, da temperatura de operação e dos custos envolvidos. Os reforços fibrosos mais utilizados em compósitos estruturais são as fibras de vidro, carbono e aramida. A Tabela 2.2 identifica e compara as principais propriedades dos reforços.

Tabela 2.2 - Propriedades nas direções transversais e longitudinais de compósitos poliméricos reforçado por fibras. Em todos os casos, a fração volumétrica da fibra é de 0,6.

Fonte: Adaptado de (CALLISTER, 2007)

<b>Propriedade</b>	<b>Vidro (Vidro-E)</b>	<b>Carbono (Alta Resistência)</b>	<b>Aramida (Kevlar 49)</b>
Massa específica	2,1	1,6	1,4
Módulo de elasticidade			
Longitudinal (GPa)	45	145	76
Transversal (GPa)	12	10	5,5
Limite de resistência à tração			
Longitudinal (MPa)	1020	1240	1380
Transversal (MPa)	40	41	30
Deformação			
Longitudinal (mm)	2,3	0,9	1,8
Transversal (mm)	0,4	0,4	0,5

### 2.1.4 Fibra de Carbono

Os reforços utilizados em compósitos estruturais são as fibras de carbono, de vidro, de aramida, e menos frequentemente, fibras de quartzo e cerâmicas, como por exemplo, a fibra de alumina. Contudo a fibra de carbono é o material mais comumente utilizado como reforço em compósitos avançados poliméricos, em função de seu alto desempenho e por apresentar elevado módulo elástico, elevada resistência à tração e compressão, baixa massa específica e expansão térmica, além de não ser afetada por umidade, solventes, ácidos e bases na temperatura ambiente, possuir alta condutividade térmica e baixa resistividade elétrica (CALLISTER, 2007). Utilizando-se compósitos reforçados com fibra de carbono, consegue-se materiais de

alto desempenho com uma redução de peso em 50% ou mais e com resistências comparadas aos aços de alta resistência (UUSITALO, 2013).

O desempenho de compósitos reforçados com fibras de carbono está altamente ligado aos seus precursores, sendo que estes devem possuir elevada concentração de carbono, alta massa molar e também um alto grau de orientação molecular (YUSOF & ISMAIL, 2012). Para a fabricação de fibras de carbono há três materiais precursores diferentes: Rayon, piche e Poliacrilonitrila (PAN). Estes precursores são aquecidos até temperaturas de 1700°C, em atmosferas inertes, para que as fibras sejam carbonizadas. O precursor mais utilizado na fabricação de fibras de carbono é o PAN (JONES, 1998).

Quando os filamentos carbonizados passam por sucessivos processos de tratamentos térmicos à temperaturas iguais ou superiores a 2000 °C, apresentam uma estrutura mais ordenada em forma grafítica. Temperaturas mais elevadas de tratamentos térmicos fazem com que o módulo dos filamentos de grafite seja aumentado, contudo a resistência ainda é baixa. Para um aumento na resistência há a necessidade de um estiramento em temperaturas acima de 2000 °C. Nesse estiramento os planos grafíticos estão alinhados ao longo do eixo das fibras (MALLICK, 2007). As fibras formadas tendo o piche como precursor, apresentam uma estrutura interna semelhante a raios ou feixes. A anisotropia das fibras origina módulos elásticos, na faixa de 200-750 (GPa), paralelos ao eixo longitudinal da fibra e de aproximadamente 20 (GPa), na direção normal ao eixo longitudinal. Fibras com ultra módulos podem ser preparadas com o piche líquido de mesofase cristalina, o alto grau de orientação no precursor transfere-se para as fibras carbonizadas, dando origem a cristais de grafite com maior orientação (MIL- HDBK-17, 2002).

Para garantir a adesão fibra/matriz, a superfície das fibras é tratada e esta etapa do processo é realizada durante a fabricação, por meio de tratamentos superficiais à base de plasma, ácido ou recobrimento, com materiais metálicos ou cerâmicos (VASILIEV & MOROZOV, 2001).

#### **2.1.4.1 Propriedades**

Os materiais compósitos se comparados às outras classes de materiais de engenharia, tais como: Metais, cerâmicas e polímeros; apresentam elevada rigidez e resistência relacionados com sua baixa massa específica. Estes materiais compósitos apresentam também excelentes

propriedades de resistência à corrosão e longa vida em fadiga (YASAE *et al.*, 2017). Além disso, possuem baixa expansão térmica, flexibilidade de ser projetado e capacidade de absorção às micro-ondas dos radares (utilizados para a tecnologia *Stealth*) (NIU, 1992).

Dentre as principais desvantagens dos materiais compósitos, pode-se destacar os seguintes pontos: Alto custo da matéria-prima e fabricação, baixa resistência ao impacto, degradação das propriedades estruturais em temperaturas extremas, fraturas catastróficas e difícil detecção de defeitos (BOWER, 1992).

A Figura 2.3 indica as propriedades mecânicas de resistência à tração e módulo elástico e a densidade dos compósitos e as compara com as propriedades de diferentes materiais.

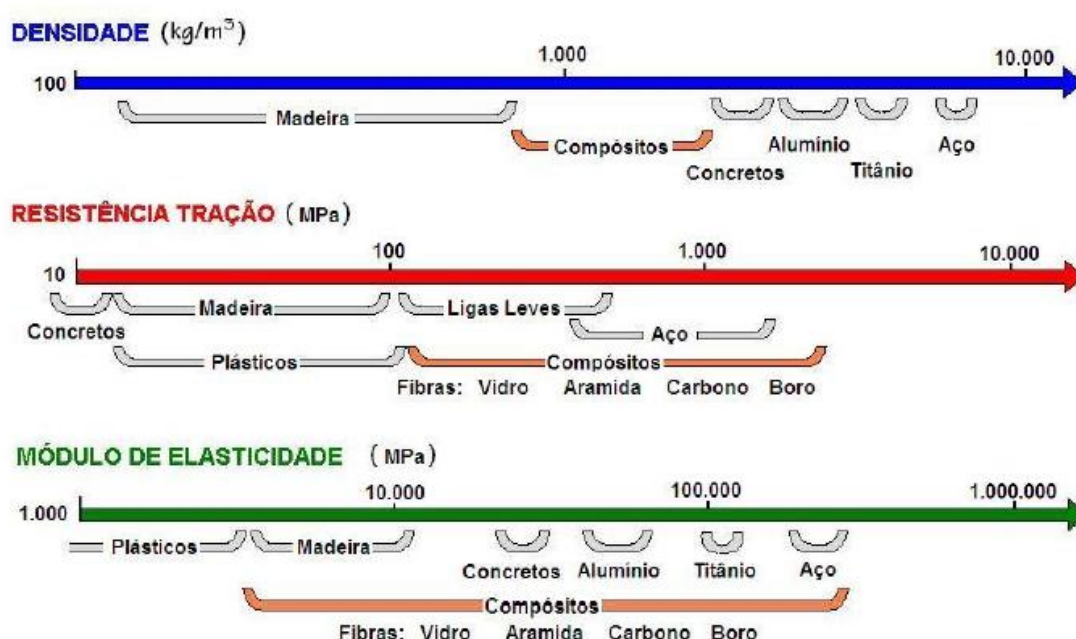


Figura 2.3 - Propriedades dos materiais compósitos comparados à outras classes de materiais

Fonte: Adaptado de (Hexcel Composites, 1997)

#### 2.1.4.2 Fabricação de materiais compósitos

A escolha do processamento adequado para estruturas em compósito é determinada pelo tipo de reforço, matriz e também pelo tipo e formato do produto final (PARDINI & LEVY, 2006). Estes processos podem ser por métodos manuais de laminação ou por métodos automáticos de posicionamento do reforço (AFP - *Automatic Fibre Placement*), geralmente utilizado com *prepregs* (fibras previamente impregnadas com sistemas de resina) (MIL-HDBK-17, 2002). Existem diferentes métodos de processamento para compósitos de matriz polimérica

termorrígida, como a moldagem manual (*hand lay-up*) e a moldagem por aspersão (*spray-up*), pultrusão, enrolamento filamentar (*filament winding*), moldagem por transferência de resina (RTM - *Resin Transfer Moulding*) e uma variação do RTM conhecida como moldagem por transferência de resina assistida a vácuo (VARTM - *Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding*) (CHAWLA, 1998).

## 2.2 Infusão de Resina Assistida por Vácuo (VARTM)

Optar pelo processo de fabricação ideal para compósitos engloba um amplo espectro de possibilidades. Como fatores de influência nesta seleção têm-se, por exemplo, o tamanho, a quantidade, o tipo de material, a espessura, a tolerância, os requisitos de desempenho, entre outros (ROSATO, 2012). Dentre os processos possíveis, um processo que se destaca é o de Infusão de Resina Assistida por Vácuo (VARTM), uma vez que possibilita a obtenção de peças que atendam requisitos estruturais com relativo baixo custo e necessidade de equipamentos e ferramental.

No processo de Infusão de Resina Assistida por Vácuo (VARTM) o reforço, de modo geral, é aplicado diretamente com o molde, sendo as camadas posicionadas, uma a uma, com auxílio de um *binder* ou adesivo. Acessos de resina são posicionados em locais de modo a permitir a impregnação completa da peça antes que esta atinja o estado de gel. Para forçar a migração da resina pela preforma, acessos de vácuo são posicionados no perímetro da peça, que é então selada no molde, usualmente com um filme de poliamida 6, que tem o objetivo de compactar a preforma e desempenhar o papel de um contramolde flexível (MIL-HDBK-17, 2002). A remoção do ar do interior da preforma não apenas a compacta, possibilitando sua consolidação com um maior volume de fibra comparativamente a outros processos, como também tende a drenar as bolhas de ar existentes no interior do molde e presos a resina, o que faz com que a existência de porosidade no compósito seja reduzida (ROSATO, 2012).

A Figura 2.4 apresenta, de forma geral, as disposição e montagem das camadas de material para a confecção de uma peça em VARTM. A cura das peças produzidas por este tipo de processo é usualmente realizada em estufas, entretanto métodos alternativos como uso de ultravioleta, ou micro-ondas também vem sendo utilizados.

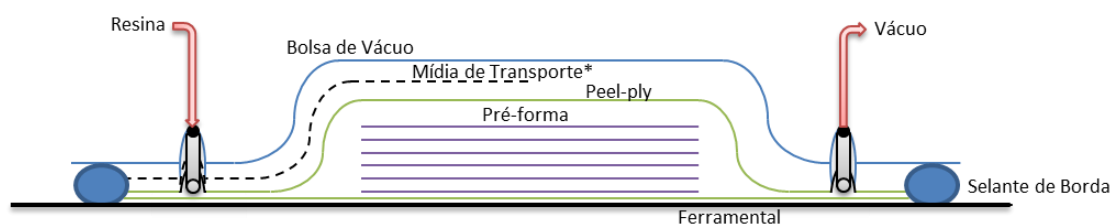


Figura 2.4 – Desenho esquemático de uma bolsa de vácuo preparada para VARTM.

Fonte: (YAMANE, 2016)

Dentre as vantagens do processo VARTM como método de fabricação para peças em compósito de reforço em fibra e matriz polimérica pode-se citar o menor custo de ferramental e maquinário, em relação a outros processos comumente utilizados, além também da inexistência da restrição de tamanho para a peça fabricada, fatores estes que tornam o processo técnico e economicamente interessante (DELSTAR TECHNOLOGIES, 2004)

Mills & Jones (2010) fabricaram compósitos carbono/epóxi com tecido 5HS da marca Hexcel, modelo G0926, e resina epóxi tipo HexFlow RTM, fabricada pela empresa Hexcel. Os autores utilizaram o *tufting* como método de reforço e as linhas utilizadas para a costura foram a de fibra de vidro Vetrotex<sup>®</sup> EC9-68 e a de fibra de carbono Tenax HT. Os padrões quadrados de inserção utilizados foram de 4mm x 4mm e 8mm x 8mm e o método de infusão foi o VARTM. O objetivo do trabalho era a avaliação de estruturas resistentes a danos, fabricadas com compósitos carbono/epóxi, reforçados na direção da espessura pela técnica *tufting*. Os testes de *pull-off* de materiais com reforço (4 x 4) e sem reforço através da espessura mostraram que é necessário exercer maior quantidade de carga para remover/destacar as peças reforçadas com fibra de vidro (2100 N) e fibra de carbono (2000 N) comparadas as sem reforço (1300 N). Sendo assim, houve um aumento de 62% na carga máxima para compósitos reforçados com fibra de vidro e 54% para compósitos reforçados com fibra de carbono comparados aos compósitos sem reforço 3D.

Com o objetivo de avaliar o efeito dos *tufts* em um compósito compósito, Zhang *et al.* (2012) fabricaram, pelo método VARTM, um compósito com tecido *taffeta* de fibra de vidro (marca não informada) e resina poliéster (marca não informada) reforçado na direção da espessura com uma linha de fibra de vidro (marca não informada) em um padrão de inserção quadrado de 5 mm x 5mm. O resultado foi que as peças reforçadas na direção da espessura apresentaram maior resistência à delaminação comparadas as sem reforço tridimensional.

Martins *et al.* (2016) utilizaram o método de infusão VARTM para a fabricação de compósitos carbono/epóxi, reforçados na direção da espessura pelo método *tufting*. Os

compósitos foram fabricados com tecido *2x2 twill weave*, sistema de resina epóxi EPOLAM 5015 e a linha utilizada para o reforço 3D foi a 2K Tenax-J HTA 40 de fibra de carbono enrolada com *zylon*. Os padrões quadrados de inserção utilizados foram de 5mm x 5mm, 10mm x 10mm e 15mm x 15mm. O objetivo do trabalho era avaliar os efeitos do *tufting* nas propriedades de resistência ao impacto de compósitos e a conclusão foi que quanto maior a densidade de costura (5x5) maiores as propriedades fora do plano e de compressão após ao impacto, porque a as linhas de reforço através da espessura concentram energia de propagação dos danos. A maior média das tensões de compressão após o impacto foi de aproximadamente 220 MPa para os compósitos reforçados tridimensionalmente com um padrão de inserção 5x5 e a menor foi de aproximadamente 175 MPa para os compósitos ser reforço 3D.

## **2.3 Mecanismo de falha e ensaios de avaliação das propriedades fora do plano e no plano**

### **2.3.1 Delaminação**

A delaminação, ou fratura interlaminar, é um mecanismo crítico de falha que ocasiona perda de rigidez e pode levar um compósito a uma falha catastrófica. A fragilidade da matriz faz com que a região interlaminar, entre as camadas de tecido, fique suscetível à delaminação quando submetidas a carregamentos fora do plano. Pode-se caracterizar a delaminação como a separação das camadas de um compósito devido às bolsas de gás ou pela presença de particulados estranhos ao compósito durante o processo de laminação (ANCELOTTI JR, 2011). A Figura 2.5 exibe um esquema de delaminação.



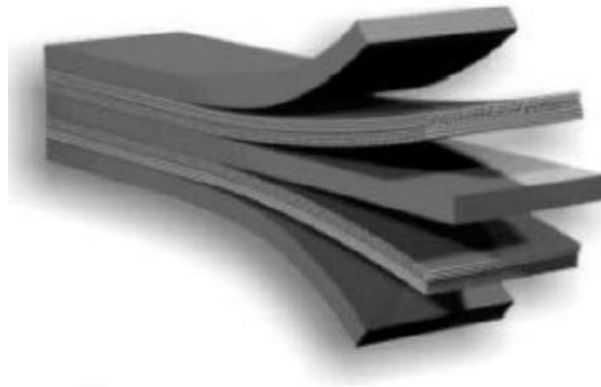


Figura 2.5 - Esquema de delaminação em compósitos.

Fonte: Adaptado de (TU DELFT, 2014)

A resistência à delaminação é evidenciada pela propriedade de tenacidade à fratura interlaminar do compósito e esta propriedade pode ser caracterizada segundo três modos de propagação da delaminação (CÂNDIDO *et al.*, 2014).

O modo I implica na abertura da trinca por tensões de tração. Nos modos II e III as trincas abrem por tensões cisalhantes. No modo II as superfícies da trinca apresentam movimento perpendicular à frente da trinca, enquanto que no modo III este movimento é paralelo à frente da trinca (MARTINS, 2014). A Figura 2.6 elucida os modos de propagação e a movimentação das tensões que geram a delaminação.

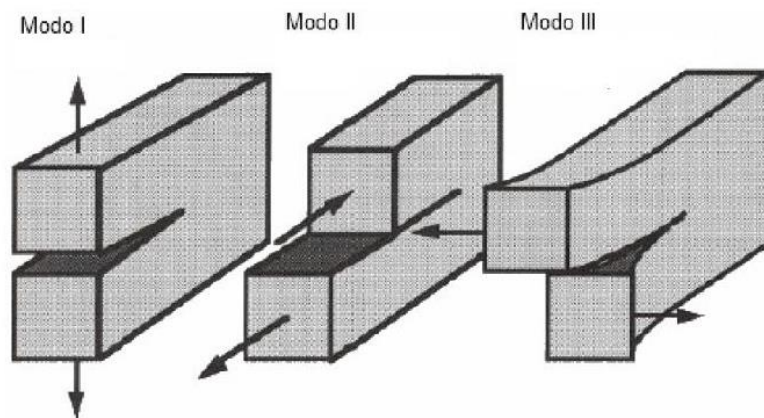


Figura 2.6 - Esquema de movimentação das tensões que propagam a delaminação

Fonte: Adaptado de (ANDERSON, 1994)

A caracterização e medição das taxas críticas de liberação de energia,  $G_c$ , ou tenacidade à fratura interlaminar, pode ser feita por diversos ensaios, sendo os principais o ensaio em Modo I (DCB - do inglês *Double Cantilever Beam*), em Modo II (ENF - do inglês, *End-Notched Flexure*) e em Modo Misto I-II (MMB - do inglês, *Mixed Mode Bending*). Para

todos os casos, há a presença de um inserto plástico inserido no plano médio do compósito que serve como iniciador da delaminação. A Figura 2.7 apresenta a configuração dos três ensaios citados.

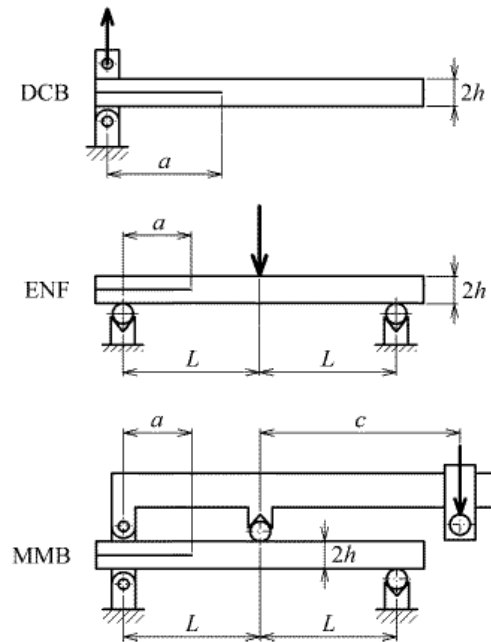


Figura 2.7 - Esquema da configuração dos ensaios DCB, ENF e MMB.

Fonte: Adaptado de (PEREIRA & MORAIS, 2008)

### 2.3.2 Ensaio de avaliação ENF

Um dos métodos de avaliação utilizados para o cálculo da tenacidade à fratura interlaminar  $G_{IIC}$  é o método de calibração por conformidade CCM (do inglês, *Compliance Calibration Method*). A força  $P$ , o deslocamento  $\delta$  da punção e o comprimento da fenda ou trinca  $a$ , são fornecidos para o cálculo de  $G_{IIC}$  de acordo com a Equação 2.1 de Irwin-Kies (KANNINEN & POPELAR, 1985).

$$G_{IIC} = \frac{P^2}{2B} \cdot \frac{dC}{da} \quad (2.1)$$

sendo  $B$  a largura do corpo de prova, a conformidade  $C$  é a relação  $\delta/P$  e  $a$  o comprimento da fenda ou trinca. Para o ensaio ENF assume-se a relação entre a conformidade  $C$  e o cubo do comprimento de fenda  $a$  medido (DAVIES *et al.*, 2001) pela Equação 2.2.

$$C = A + ma^3 \quad (2.2)$$

sendo  $A$  e  $m$  as constantes calibração por conformidade CC (do inglês, *Compliance Calibration*). E o  $G_{IIc}$  é obtido da Equação 2.3.

$$G_{IIc} = \frac{3m \cdot P_{Máx}^2 \cdot a_0^2}{2B} \quad (2.3)$$

Jain *et al.* (1998) fabricaram compósitos carbono/epóxi reforçados tridimensionalmente pelo método *stitching*. Os materiais foram o *uniweave* (Ciba-Geigy Injetex), a resina epóxi (GY260) e a linha de Kevlar® para reforço na direção da espessura, com padrão quadrado de inserção de 6mm x 6mm. Os corpos de prova foram avaliados pelo ensaio ENF e aqueles que apresentavam reforço na direção da espessura tiveram seus valores de tenacidade a fratura  $G_{IIc}$  4 vezes maior comparados aos sem reforço.

De Verdere *et al.* (2007) utilizou um tecido *Non-crimp fabric* - NCF (0°,90°), resina epóxi RTM6 da marca Hexcel e linha de fibra de carbono HTA 1k, da marca Toho Tenax, para reforço na direção da espessura para a fabricação de um compósito carbono/epóxi reforçado com um padrão quadrado de inserção de 5 mm x 5 mm. Para os ensaios de tenacidade à fratura interlaminar em modo II, o valor de  $G_{IIc}$  obtido para os compósitos reforçados tridimensionalmente, pelo método *tufting*, foi aproximadamente 3 vezes superior, comparado aos compósitos que não haviam sido reforçados na direção da espessura.

Trabelsi *et al.* (2010) realizaram ensaios ENF em compósitos reforçados na direção da espessura, pelo método *Stitching*, e em compósitos reforço na direção da espessura. O tecido utilizado foi um 5HS (Hexforce® G0926), a resina utilizada foi a epóxi (Hexflow® RTM 6) e linha utilizada para o reforço foi de Kevlar®, com um padrão quadrado de inserção de 6mm x 6mm. Os corpos de prova reforçados na direção da espessura apresentaram valores de tenacidade à fratura de aproximadamente 6000 J/m<sup>2</sup>, enquanto os sem reforço apresentaram valores de aproximadamente 2000 J/m<sup>2</sup>, representando um aumento no valor de  $G_{IIc}$  de 300% dos compósitos reforçados através da espessura em relação aos sem reforço.

Yasaee *et al.* (2017) avaliou os valores de  $G_{IIc}$  para compósitos de carbono/epóxi com reforço 3D. Os corpos de prova utilizados para o ensaio ENF foram fabricados com um pré-impregnado IM7/85 (Hexcel, UK) e o método de reforço na direção da espessura foi o *Z-pinning*, com um padrão de inserção em grade com 1,75 mm de distância entre os *Z-pins*. Os

resultados obtidos para a tenacidade à fratura interlaminar ( $G_{IIC}$ ) inicial dos corpos de prova reforçados na direção da espessura foram de  $922 \text{ J/m}^2$ , enquanto que para os sem reforço 3D foram de  $663 \text{ J/m}^2$ . Os valores de  $G_{IIC}$  para os compósitos reforçados tridimensionalmente foram aproximadamente 30% maiores em relação aos sem reforço através da espessura.

### 2.3.3 Ensaio de resistência à tração

O ensaio de resistência à tração é um dos ensaios utilizados para avaliar as propriedades no plano de materiais compósitos. A determinação do módulo de elasticidade ( $E$ ) e da resistência à tração ( $\sigma$ ) foi dado pelas Equações 2.4 e 2.5.

$$\sigma = \frac{P}{w \cdot t} \quad (2.4)$$

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (2.5)$$

sendo  $\sigma$  a resistência à tração (MPa),  $P$  a força aplicada em (N),  $w$  e  $t$  a largura e a espessura, respectivamente, em (mm).  $E$  o módulo de elasticidade (GPa), e  $\varepsilon$  a deformação, que é a razão da variação do comprimento final menos inicial, pelo comprimento inicial ( $\Delta L/L$ ) dada em (mm/mm).

Dell'anno *et al.* (2007) fabricaram compósitos carbono/epóxi, com reforço na direção da espessura, com padrão quadrado de inserção de 3 mm x 3 mm. O tecido utilizado foi um 5HS (6K Weav-Rite) fornecido pela Cytec Engineered Materials, resina epóxi Cycom<sup>®</sup> 977-20 e para o reforço 3D a linha utilizada foi de fibra de vidro modelo T8G Saint Gobain<sup>®</sup> Vetrotex<sup>®</sup>. Os valores para o módulo elástico foram de 55 GPa para os compósitos não reforçados e de 54,2 para os compósitos com reforço tridimensional (decréscimo de 2,5%) e os valores de resistência à tração do material não reforçado tridimensionalmente foi de 470 MPa, enquanto que o reforçado através da espessura apresentou 430 MPa (decréscimo de 10%).

De Verdier *et al.* (2009) utilizou um tecido NCF  $\pm 45^\circ$  e Unidirecional UD (Toho Tenax), resina epóxi RTM6 da marca Hexcel e linha de fibra de carbono HTA 1k da marca Toho Tenax, para reforço na direção da espessura, para a fabricação de um compósito

carbono/epóxi reforçado com um padrão quadrado de inserção de 5 mm x 5 mm. Os resultados obtidos no ensaio de tração para a resistência à tração foram de 755 MPa, para os compósitos sem reforço e 654 MPa, para os compósitos com reforço através da espessura. Já o valor do módulo elástico dos compósitos sem reforço foi de 63 GPa, enquanto que o do compósito reforçado foi de 55 GPa. Sendo assim houve um decréscimo de aproximadamente 13% nas propriedades no plano dos materiais com reforço 3D.

Koissin *et al.* (2009b), pelo ensaio de tração, avaliaram as propriedades de módulo elástico e resistência à tração de materiais compósitos carbono/epóxi reforçados tridimensionalmente pela técnica *tufting*. Os compósitos foram produzidos com tecidos NCF (0°, 90°) e  $\pm 45^\circ$ , sistema de resina epóxi RTM6 e linha para reforço 3D da TohoTenax. Os padrões quadrados de inserção foram de 5 mm x 5 mm, 7 mm x 7 mm e 9 mm x 9 mm. Os resultados obtidos nos ensaios de tração foram de 493 MPa para os compósitos reforçados com padrões de 5 x 5 e 7 x 7, 473 MPa para o padrão de inserção 9 x 9 e 433 MPa para o sem reforço. Comparando os compósitos reforçados com o sem reforço, teve-se um aumento de 12% para os padrões de inserção 5 x 5 e 7 x 7 e de 9% para o padrão 9 x 9. Para o compósito sem reforço, o valor do módulo elástico foi de 39,3 GPa, para os compósitos reforçados com padrão de reforço 5x5, 7x7 e 9x9 os valores foram de 38,9 GPa, 39,4 GPa e 39,7 GPa, respectivamente. Portanto os valores do módulo elástico não apresentaram diferenças significativas.

## 2.4 Métodos de reforço tridimensionais

A resistência e rigidez dos compósitos nas direções dominadas por fibra são sempre muito atrativas e apresentam um alto desempenho, quando submetidos a carregamentos no plano, porém a fragilidade da resina que envolve as fibras é sempre uma preocupação. Danos podem se propagar na região interlaminar de um compósito, quando submetidos a carregamentos fora do plano, fazendo com que ocorra a delaminação. Esta baixa resistência à delaminação pode ser suprimida com a inserção de reforços através da espessura (PARTRIDGE & HALLETT, 2016).

Como alternativa para evitar e neutralizar essa suscetibilidade à delaminação, diferentes métodos foram desenvolvidos para reforçar o compósito tridimensionalmente. Alguns métodos modificam a arquitetura do tecido, criando um tecido 3D ou preformas perto do formato final do compósito (do inglês, *near-net-shape*). Alguns exemplos são a tecelagem

3D (do inglês, *3D woven*), entrançamento 3D (do inglês, *3D braiding*) e tricotagem 3D (do inglês, *3D knitting*) (MOURITZ *et al.*, 1999).

Outras técnicas para reforço tridimensional de compósitos são caracterizadas pela inserção de reforços através da espessura, como exemplo temos o *Z-pinning*, a costura (do inglês, *stitching*), costura com acesso apenas por uma das superfícies da preforma - OSS (do inglês, *one-sided-stitching*) e o método *tufting* (processo estudado neste trabalho). Estes processos de inserção antecedem a consolidação ou infusão do compósito (LOMBETTI, 2015) e serão comentados a seguir.

### 2.4.1 *Z-pinning*

*Z-pinning* é o tipo de reforço mais apropriado para compósitos de prepregs. Prepregs, ou também pré-impregnados, são materiais em que o reforço (tecido ou fibra) é impregnado com um sistema pré-catalisado de resina (estágio B) (REINFORCED PLASTICS, 2003). Este processo consiste na inserção de pinos de fibra de carbono, que apresentam pequenos diâmetros na direção da espessura dos compósitos, e é uma etapa realizada antes da peça passar pelo processo de cura. Este método de reforço proporciona ao compósito um considerável aumento da resistência à delaminação (YASAE *et al.*, 2016).

Na década de 1970, utilizavam-se pinos de metal como reforço em compósitos, mas estes eram inseridos manualmente, unidade por unidade, o que demandava muito trabalho e não era viável para a produção em larga escala. Na década seguinte, a empresa Aztec Inc, desenvolveu o UAZ® (*Ultrasonically Assisted Z-Fibre*), um processo que utiliza um equipamento ultrassônico para inserção de pinos de metal e de fibra nos compósitos. É um processo que permite a introdução de uma quantidade maior e mais rápida de reforços na direção da espessura (MOURITZ, 2007). A Figura 2.8 elucida o processo de inserção de *z-pins* em uma preforma de prepreg.

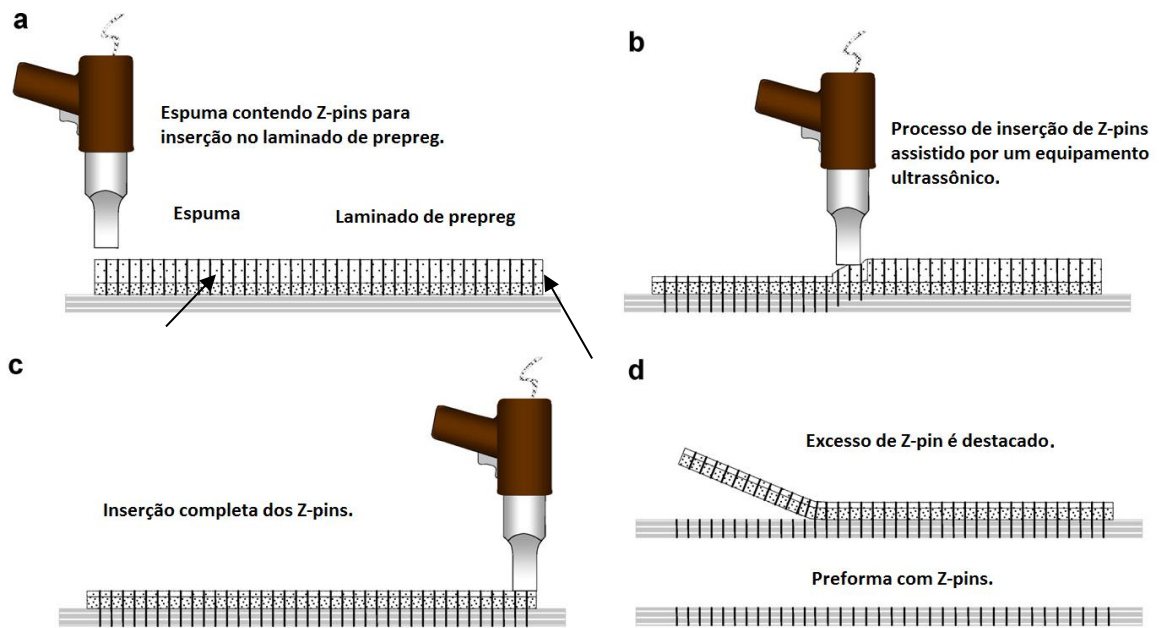


Figura 2.8 - Esquema de inserção de *z-pins*. Em a) Posicionamento de espuma com *z-pins* na preforma de prepreg, b) inserção dos *z-pins* com um equipamento ultrassônico, c) inserção completa e d) retirada da espuma com excesso de *z-pins* e amostra da reforçada através da espessura.

Fonte: Adaptado de (MOURITZ, 2007)

No processo *Z-pinning* tem-se uma espuma na qual estão contidos os pinos de fibra de carbono pultrudados, estes pinos, por sua vez, podem apresentar diferentes padrões de espaçamento e tamanho. Posiciona-se a esponja no local do reforço e com o auxílio de um martelo ultrassônico tem-se a inserção dos pinos nas preformas, feitas a partir de prepreg. Os pinos inseridos na direção da espessura conferem ao compósito um aumento da tenacidade à fratura interlaminar. Assim como os outros métodos de reforços tridimensionais, este também apresenta distorção e ondulação das fibras e a presença de regiões com excesso de resina, fazendo com que haja a diminuição das propriedades no plano (DE VERDIERE, 2009).

As aplicações conhecidas deste método de reforço são: Carros de Fórmula 1 e nas aeronaves militares Boeing Sikorsky RAH-66 Comanche e Northrop F18 (M'MEMBE *et al.*, 2016).

#### 2.4.2 *Stitching e Single-sided Stitching*

A técnica *stitching* em preformas secas começou a ser empregada na década de 80, do século passado, pela necessidade de aumentar e melhorar a produtividade da indústria

aeroespacial. *Boeing Corporation and NASA Langley Research Centre for Aerospace Structures* desenvolveram este método para unir as longarinas às asas por meio de costura (DOW & DEXTER, 1997).

As preformas costuradas surgiram como solução para promover um aumento na tenacidade à fratura de compósitos poliméricos em modo I e modo II. O processo consiste em costurar as camadas individuais, com orientação pré-definida, com filamentos individuais de fibras através da espessura das camadas de reforço distintas, criando um vínculo entre elas (LEE & LIU, 1990).

O processo *stitching* é um dos mais simples e pode ser processado com baixo investimento em máquinas. As máquinas utilizadas para o processo de costura são as mesmas utilizadas na indústria têxtil e pouca adaptação é necessária para uso na fabricação de preformas de fibra de carbono para uso aeronáutico.

A costura de compósitos, inicialmente estudada pela indústria aeronáutica, para aprimorar as uniões de plásticos reforçados com fibra de vidro, especialmente as uniões da asa com as longarinas a fim de aumentar a resistência às falhas, assim como, reduzir a probabilidade de ocorrência de falhas repentinas. As pesquisas revelaram que a resistência das uniões costuradas era superior às uniões de material compósito feitas com técnicas convencionais como colagem, inclusive, em alguns casos, a resistência superou as uniões de material compósito reforçadas com rebites (MOURITZ *et al.*, 1999).

A costura é um método, relativamente de baixo custo, para se juntar camadas de tecido empilhados ao longo das suas bordas, tornando a preforma mais fácil de manipular, antes da moldagem. Sem costura ou qualquer outro tipo de ligação, muitas vezes camadas empilhadas escorregam durante o manuseamento, o que pode causar distorções das fibras nas regiões ricas em resina do compósito. A segunda vantagem da costura é que pode melhorar a resistência à delaminação e tolerância a danos por impacto.

Dois métodos convencionais, costura tipo trava (*lock*) modificada e costura do tipo corrente (*chain*), são os mais comuns (Figura 2.9). A costura tipo corrente utiliza somente uma linha, enquanto que a costura do tipo trava necessita bobinas e linhas separadas (MOURITZ & COX, 2000).

Os parâmetros de costura, que são passíveis de controle, incluem o passo entre as costuras, o espaçamento entre linhas paralelas, o material de costura, e o tex do cabo de costura (MOURITZ & COX, 2010).



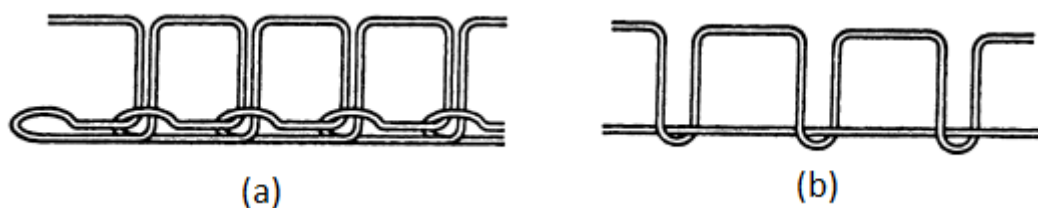


Figura 2.9 - Tipos de costura utilizada para reforço em preformas: a) *Chain* (corrente) e b) *Lock* (trava).

Fonte: Adaptado de (MOURITZ & COX, 2000)

Outros métodos de *stitching* podem ser descritos como: *single-sided stitching*. Esta técnica é assim chamada pelo fato de a(s) agulha(s) necessitar(em) acesso apenas por um lado da preforma para realizar a costura.

A técnica de costura com duas agulhas e duas linhas é chamada de ITA e foi desenvolvido pelo *Institut für Textiltechnik von RWTH Aachen University*. Esta técnica interliga duas linhas em padrão de corrente (*chain*) (TREIBER, 2011).

O método OSS (do inglês, *one-sided stitching*) é um método de costura desenvolvido pela empresa *Altin-Nähtechnik GmbH* e utiliza uma linha e duas agulhas (uma ortogonal e outra inclinada à preforma) durante o processo de costura, a agulha vertical penetra a preforma com uma linha e cria um *loop*, e a agulha inclinada retrai o loop criado e o interliga com outro loop que fora criado no passo anterior (LOMBETTI, 2015).

Outro método é o *Blind Stitching*, no qual uma agulha curvada, conforme a Figura 2.10 c), é inserida na preforma, sem que seja necessário o acesso ao lado oposto da preforma. Esta técnica é proveniente da indústria têxtil e de vestuários e foi adaptada para o reforço 3D de compósitos.

A Figura 2.10 identifica os três tipos de *Single-sided stitches* apresentados.

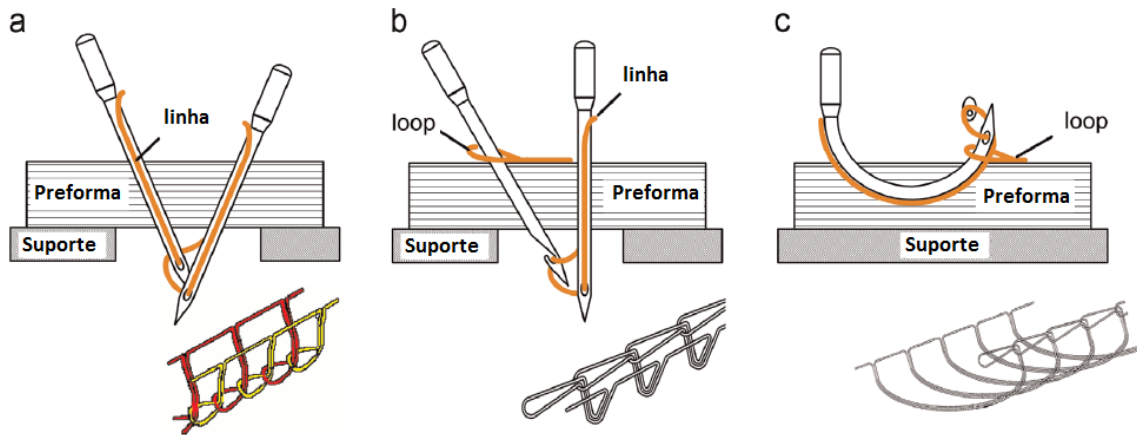


Figura 2.10 - Exemplos de costura com acesso a um lado da preforma (*single-side stitch*): a) ITA, b) OSS e c) *Blind stitch* com seus padrões de costura.

Fonte: Adaptado de (TREIBER, 2011)

A Figura 2.11 apresenta um modelo de equipamento utilizado para a costura em cadeia (*Stitch chain*).

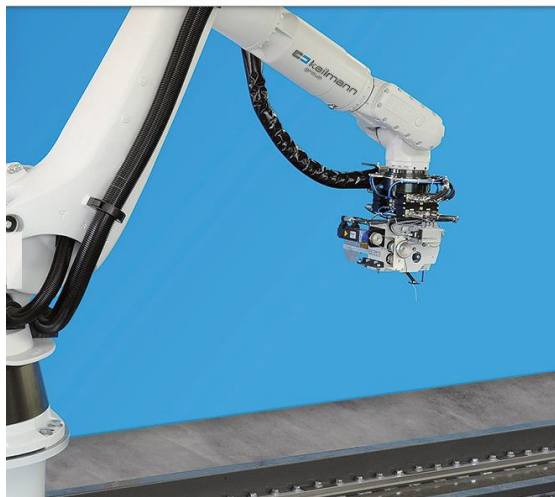


Figura 2.11 - Cabeçote KSL RS 530 para *Chain Stitch* acoplado a um braço robótico.

Fonte: Adaptado de (DATASHEET KSL Keilmann Sondermaschinenbau GmbH)

A Figura 2.12 mostra o detalhe do processo de costura *blind stitch* a) um componente traseiro de uma caverna de pressão de um Airbus A380 contendo reforços por *blind stitch*.

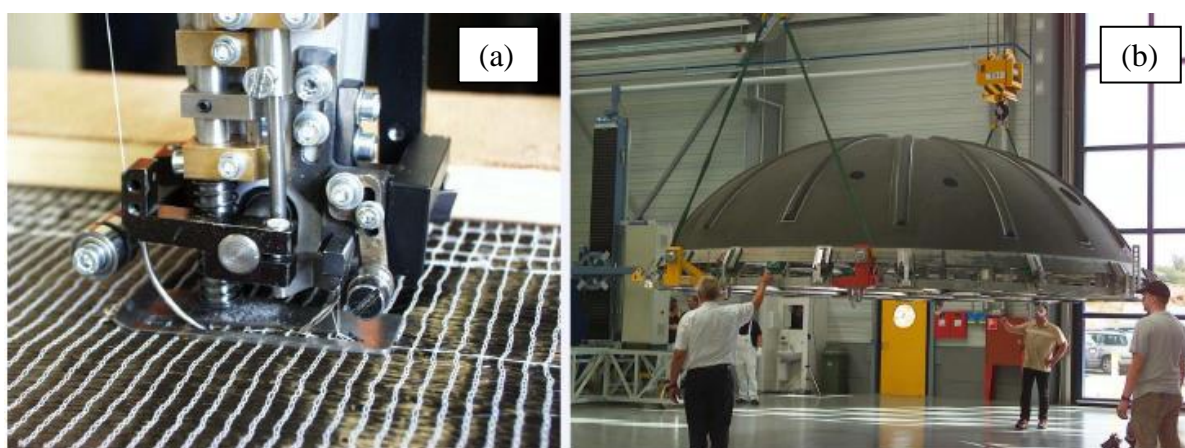


Figura 2.12 - a) processo de costura *blind stitch* e b) componente traseiro de uma caverna de pressão de um Airbus A380 reforçada por *blind stitch*.

Fonte: Adaptado de (FILSINGER *et al.*, 2003)

### 2.4.3 Tufting

Comparada aos outros métodos de costura, *tufting* é uma variação mais simples do método de costura OSS. É uma técnica relativamente nova (início dos anos 2000), pouco explorada na indústria e considerado um tanto econômico para a produção de preformas com arquitetura tridimensional (MILLS & JONES, 2010).

O equipamento de *tufting* foi desenvolvido por *DLR Institute of Structural Mechanics of German Aerospace Centre of Brunswick*, KSL GmbH e Lorsch para operar em máquinas CNC convencionais (SICKINGER & HERRMANN, 2001). Este método, como fora citado em capítulos anteriores, promove aos materiais compósitos um aumento na tolerância a danos e impactos e das propriedades fora do plano, tenacidade à fratura interlaminar, devido a inserção de linhas de reforço através da espessura, porém a inserção da agulha danifica e desalinha as fibras, ocasionando uma diminuição nas propriedades no plano (OSMIANI *et al.*, 2016).

A inserção de linhas de reforço na direção da espessura acontece por meio de uma agulha, através das camadas de tecido de uma preforma. Após esta inserção e o movimento de subida da agulha (pela mesma trajetória) um laço (*loop*) é formado na superfície inferior do compósito (MARASCO, 2005). Diferentemente dos outros métodos de costura, em que os *loops* formados são interligados, amarrados ou travados, no método *tufting* os *loops* formados ficam livres, não exercendo pressão nas superfícies da preforma, e os *tufts* se mantêm em posição no interior da preforma devido ao atrito entre a linha e as camadas de tecido (DELL'ANNO *et al.*, 2016). A Figura 2.13 ilustra um esquema do processo de *tufting*.

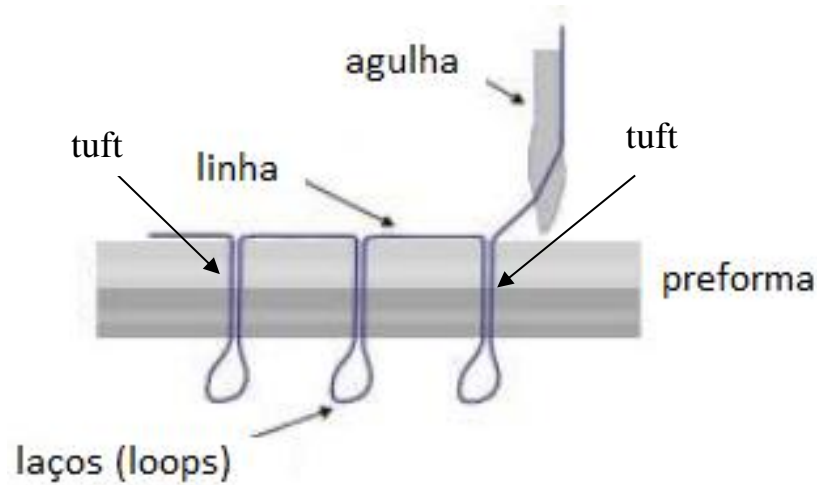


Figura 2.13 - Esquema do processo de *tufting*.

Fonte: Adaptado de (DELL'ANNO, 2007)

Como citado anteriormente, por ser uma variação de uma costura *single-sided stitch*, esta técnica requer acesso apenas por um dos lados da preforma, o que a torna ideal também para aplicação de reforços pontuais de preformas com formato complexo. Outra vantagem é que comparado ao *stitching* e ao *single-sided stitch*, no método de costura *tufting* somente uma linha e uma agulha são utilizados, diferentemente de ITA e OSS que utilizam duas agulhas e duas linhas (Figura 2.10 a) e duas agulhas e uma linha (Figura 2.10 b). Os parâmetros de costura, que são passíveis de controle, incluem o passo entre as costuras, o espaçamento entre linhas paralelas, o material e o Tex da linha de costura (MOURITZ & COX, 2010). A Figura 2.14 identifica dois tipos de cabeçotes de *tufting*, fabricados pela empresa KSL GmbH, conectados e movimentados por braços robóticos, fabricados pelas empresas Kawasaki e KUKA.

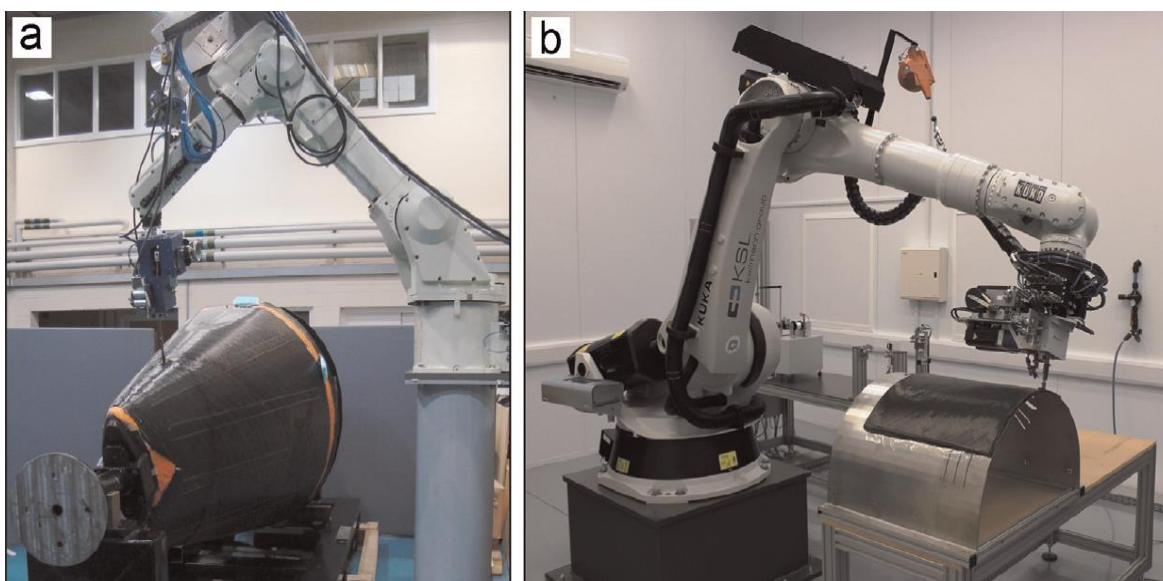


Figura 2.14 - a) Cabeçote de *tufting* modelo KSL KL150 acoplado em um braço robótico Kawasaki FS 20 N e b) cabeçote KSL RS552 acoplado em um braço robótico KUKA KR 240-2.

Fonte: Adaptado de (DELL'ANNO *et al.*, 2016)

A Figura 2.15 mostra um cone de cauda e indica (setas vermelhas) algumas regiões reforçadas pelo método *tufting*.

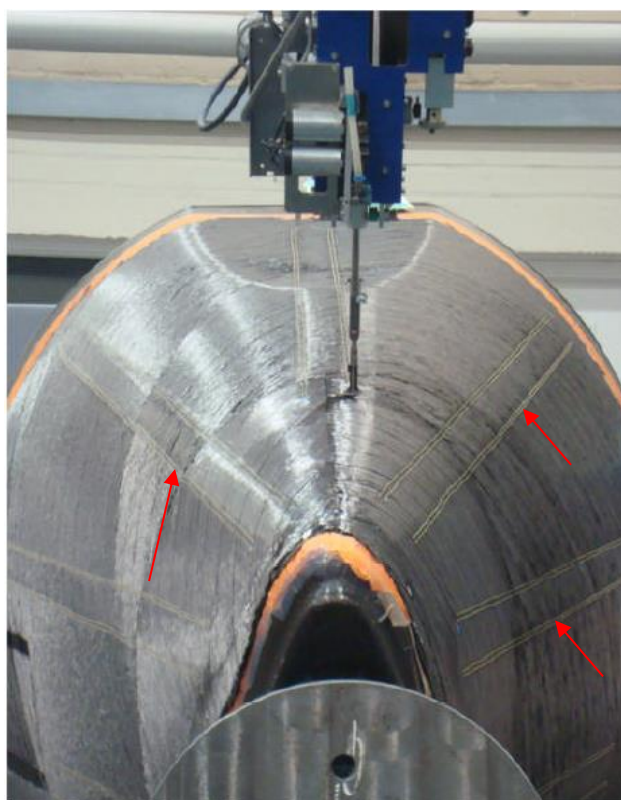


Figura 2.15 - Cone de cauda em que as setas vermelhas indicam algumas regiões reforçadas pela técnica *tufting*.

Fonte: Adaptado de (LOMBETTI, 2015)

## 3 MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 Materiais utilizados

Os materiais podem ser descritos em três etapas para o processo de fabricação dos compósitos, sendo estas:

- Desenvolvimento do dispositivo de costura;
- Processamento da preforma e do compósito;
- Consumíveis.

#### 3.1.1 Materiais para o dispositivo de costura

O dispositivo de costura é composto por três peças, sendo elas: Um calcador, um suporte de agulha, e um guia para o suporte da agulha e para o calcador. Para a fabricação do guia da agulha e do calcador, o material utilizado foi uma liga de alumínio 7075. O calcador foi fabricado com o polímero acrilonitrila butadieno estireno (ABS) e o suporte da agulha com uma liga de aço carbono SAE 1020.

#### 3.1.2 Materiais para a preforma e compósito

Como mencionado anteriormente, os materiais compósitos tradicionais bidimensionais, são formados pelo reforço e a matriz. No entanto, para compósitos reforçados tridimensionalmente, são empregados materiais de reforço também na direção de espessura do compósito. Para a fabricação dos reforços tridimensionais, escopo deste trabalho, foram utilizados:

- Reforço: Tecido plano ou *plain weave* de fibra de carbono;
- Matriz: Resina epóxi;
- Reforços 3D: Fios de fibra de vidro e monofilamentos de poliamida 6 (PA 6).

As características e especificações destes materiais serão detalhadas a seguir.

### 3.1.3 Fibra de carbono

O tecido de fibra de carbono *plain weave* apresenta suas fibras orientadas em  $0^\circ$  e  $90^\circ$ , sendo que a direção  $0^\circ$  representa o urdume e a direção  $90^\circ$  a trama. A Figura 3.1 ilustra um tecido *plain weave* e mostra a disposição das fibras, na qual o urdume é orientado para  $0^\circ$  e a trama orientada para  $90^\circ$ , de acordo com as coordenadas do canto inferior direito da Figura 3.1.

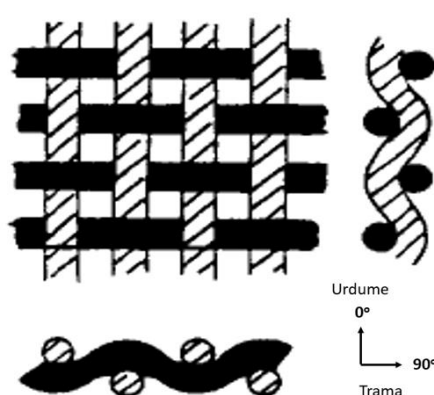


Figura 3.1 - Ilustração de um tecido *plain weave*.

Fonte: Adaptado de (PETERS, 1998)

O tecido utilizado para a manufatura dos compósitos é do tipo *plain weave*, manufaturado pela empresa SIGRATEX<sup>®</sup>, modelo SKDL 8051, fabricado com a fibra Grafil/Pyrofil TR50S, com 6000 filamentos (6k) por cabo de urdume e trama.

A Tabela 3.1 contém as informações referentes ao tecido, segundo informações do fabricante.

Tabela 3.1 - Principais propriedades do tecido de fibra de carbono.

Propriedades	Valor	Unidade
Massa Específica do Filamento	1,82	g/cm <sup>3</sup>
Resistência à Tração	4,9	GPa
Módulo de Elasticidade	240	GPa
Alongamento	2,1	%
Gramatura do Tecido	300	g/m <sup>2</sup>
Espessura	0,4	mm
Nº de Filamentos/Cabo	6000	-
Titulagem	400	Tex

### 3.1.4 Resina Epóxi

A resina epóxi utilizada para este trabalho foi a resina base Araldite<sup>®</sup> LY 5052 (parte A) com o endurecedor Aradur<sup>®</sup> 5052 (parte B), da empresa Huntsman. Esta resina é comumente utilizada para processos de laminação manual e infusão a vácuo. Foi escolhida para este trabalho por apresentar baixa viscosidade, notável molhabilidade e impregnação, compatibilidade com a fibra de carbono e excelentes propriedades mecânicas após a cura, tanto em temperatura ambiente, quanto em altas temperaturas (*Datasheet Huntsman*).

A Tabela 3.2 informa as principais propriedades da resina epóxi de acordo com as especificações do fabricante.

Tabela 3.2 - Propriedades do sistema epóxi Araldite<sup>®</sup> LY 5052/ Aradur<sup>®</sup> 5052. Fonte: *Datasheet Huntsman*

<b>Propriedades</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Tempo de gel à 25 oC	450 - 500	Min
Viscosidade à 25 °C	600 - 700	cP [mPa s]
Transição vítrea (Tg)	114 - 122	°C
Resistência à Tração	84 - 86	MPa
Módulo de Elasticidade	3000 - 3200	MPa
Massa Específica	1,14 – 1,17	g/cm <sup>3</sup>
Coefficiente de Poisson	0,35	-

### 3.1.5 Linhas de fibra de vidro (FV) e monofilamento de Poliamida 6 (PA 6)

Foram utilizados dois materiais diferentes na confecção do reforço na direção Z dos compósitos, sendo um deles a linha de fibra de vidro, fornecida pela empresa Texiglass, produzida com o fio 34/4, isto é, quatro fios entrelaçados com titulação de 34 g/k, cada. Já o monofilamento de PA6 (*Nylon 6*) é produzido pela empresa Mazzaferro. Como não havia informações acerca da carga de ruptura do monofilamento de poliamida 6, houve a necessidade de realizar testes de tração para os fios, de acordo com a norma ASTM D2256 – 02. Para medir o diâmetro da linha de fibra de vidro, foi necessário o auxílio do estereoscópio OLYMPUS SZ61.



As Tabelas 3.3 e 3.4 fornecem as informações referentes à fibra de vidro e ao fio de poliamida 6.

Tabela 3.3 - Propriedades da fibra de vidro. Fonte: Texiglass

<b>Propriedades</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Massa específica do filamento	2,54	g/cm <sup>3</sup>
Carga de ruptura teórica	6,8	kgf
Alongamento	2,8	mm/mm
Tex	136	g/km
Linhas / Fio	4	-
Filamentos / linha	250	-
Nº de Filamentos	1000	-
Diâmetro do fio	0,25	mm

Tabela 3.4 - Propriedades do monofilamento de poliamida 6.

<b>Propriedades</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Massa específica do filamento	1,15	g/cm <sup>3</sup>
Carga de ruptura	4	kgf
Alongamento	36,8	%
Tex	66,8	g/km
No de filamentos/Cabo	1	-
Diâmetro do fio	0,25	mm

### 3.1.6 Materiais Consumíveis

Os materiais consumíveis utilizados para a fabricação das preformas, pelo processo de costura *tufting*, e dos compósitos são mencionados nas Tabelas 3.5 e 3.6, respectivamente.

Tabela 3.5 - Consumíveis utilizados no processo de costura.

<b>Material</b>	<b>Modelo</b>	<b>Fabricante / Distribuidor</b>
Bolsa de vácuo	MAP - Ply MT	MAP
Placa de EVA	Não se aplica	Kreateva

Tabela 3.6 - Consumíveis utilizados na fabricação dos compósitos.

<b>Material</b>	<b>Modelo</b>	<b>Fabricante / Distribuidor</b>
Tecido desmoldante ( <i>peel ply</i> )	MAP - Ply MT	MAP
Desmoldante	Chemlease - 44	Redelease
Selante de borda	MAP / Tape 9880-13A	MAP
Filme para vácuo	Flexnyl MLA SF	MAP
Mídia de distribuição	MAP / IFLUX-E 110-M 1200-100	MAP
Mangueira para vácuo	MAP / 120-WA-120-160	MAP
Tubo / mangueira espiral	Não se aplica	Não se aplica
Registro plástico	Não se aplica	Não se aplica
Acetona PA	Não se aplica	Não se aplica
Registros com espigão (1/2")	Não se aplica	Não se aplica
Molde plano de aço	Não se aplica	Não se aplica

## 3.2 Método experimental

O fluxograma ilustrado na Figura 3.2, elucida as etapas de desenvolvimento do trabalho. Estas serão explicada nos itens seguintes.

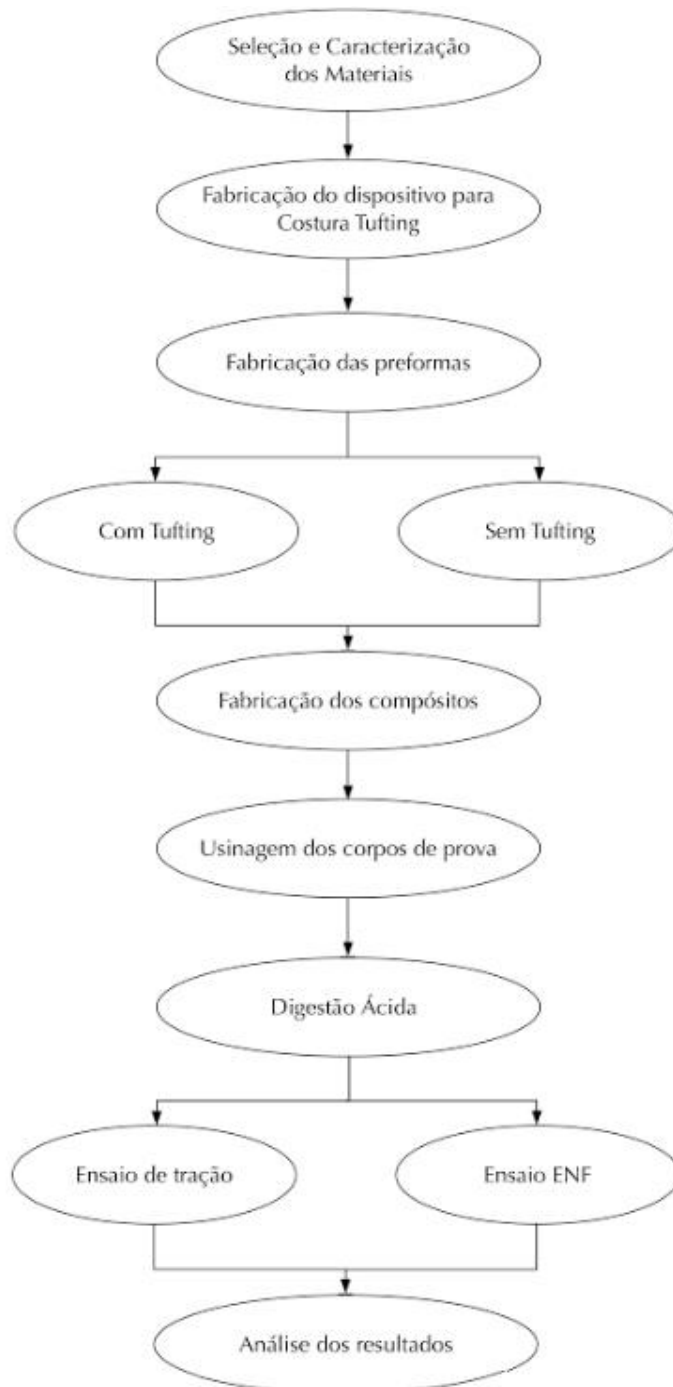


Figura 3.2 - Fluxograma de atividades realizadas no trabalho.

Fonte: Autor

### 3.2.1 Fabricação do dispositivo de costura

Uma vez que a Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) não dispunha de um equipamento de costura *tufting*, específico para essa finalidade, como o utilizado em diferentes trabalhos (ZHU, 2010; RIZI, 2013; LOMBETTI, 2015; HENAO *et al.*, 2015; LIU *et al.*, 2015; DELL'ANNO *et al.*, 2016), parte fundamental deste trabalho consistiu no desenvolvimento e adaptação de um dispositivo de costura à uma mesa de usinagem Router com controle numérico computadorizado. Portanto, foi projetado e fabricado um dispositivo para ser montado e utilizado na CNC Router (Figura 3.3), da marca Excitech®, modelo SHG1212, do Núcleo de Tecnologia em Compósitos - NTC da Universidade Federal de Itajubá.



Figura 3.3 - Modelo da CNC Router presente nas instalações do NTC - UNIFEI.

Fonte: (MARTINS, 2015)

As peças do dispositivo de costura foram projetadas com o auxílio de um *software* de desenho, auxiliado por computador (CAD), para posterior fabricação. Tanto o suporte da agulha, quanto o guia do calcador e da agulha foram fabricados no setor de usinagem do Instituto de Engenharia Mecânica (IEM) da Universidade Federal de Itajubá e são apresentados na Figura 3.4.

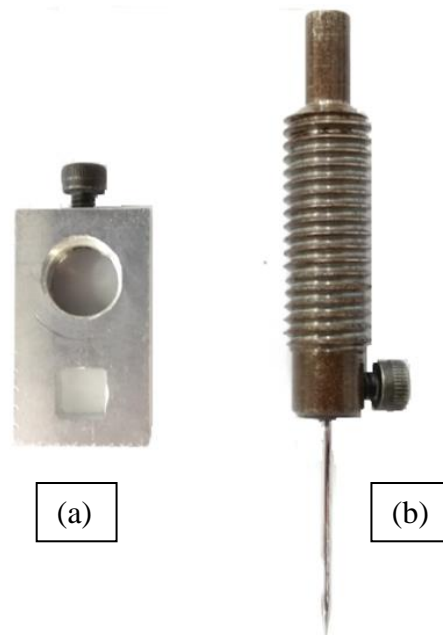


Figura 3.4 - a) Guia do suporte e b) suporte da agulha fabricados na oficina mecânica do IEM.

Fonte: Autor

O calcador foi fabricado por uma impressora 3D da marca Ultimaker®, modelo 2 (Figura 3.5), pertencente ao Núcleo de Tecnologia em Compósitos - NTC da Universidade Federal de Itajubá. As dimensões foram baseadas no calcador utilizado no equipamento de *tufting*, modelo KSL KL150, produzido pela empresa KSL GmbH.



Figura 3.5 - Impressora 3D *Ultimaker*®.

Fonte: Autor

A Figura 3.6 apresenta algumas das etapas da fabricação do calcador. Sendo a) a etapa de fabricação da base do calcador, b) e c) as etapas de fabricação da haste e d) o calcador finalizado.

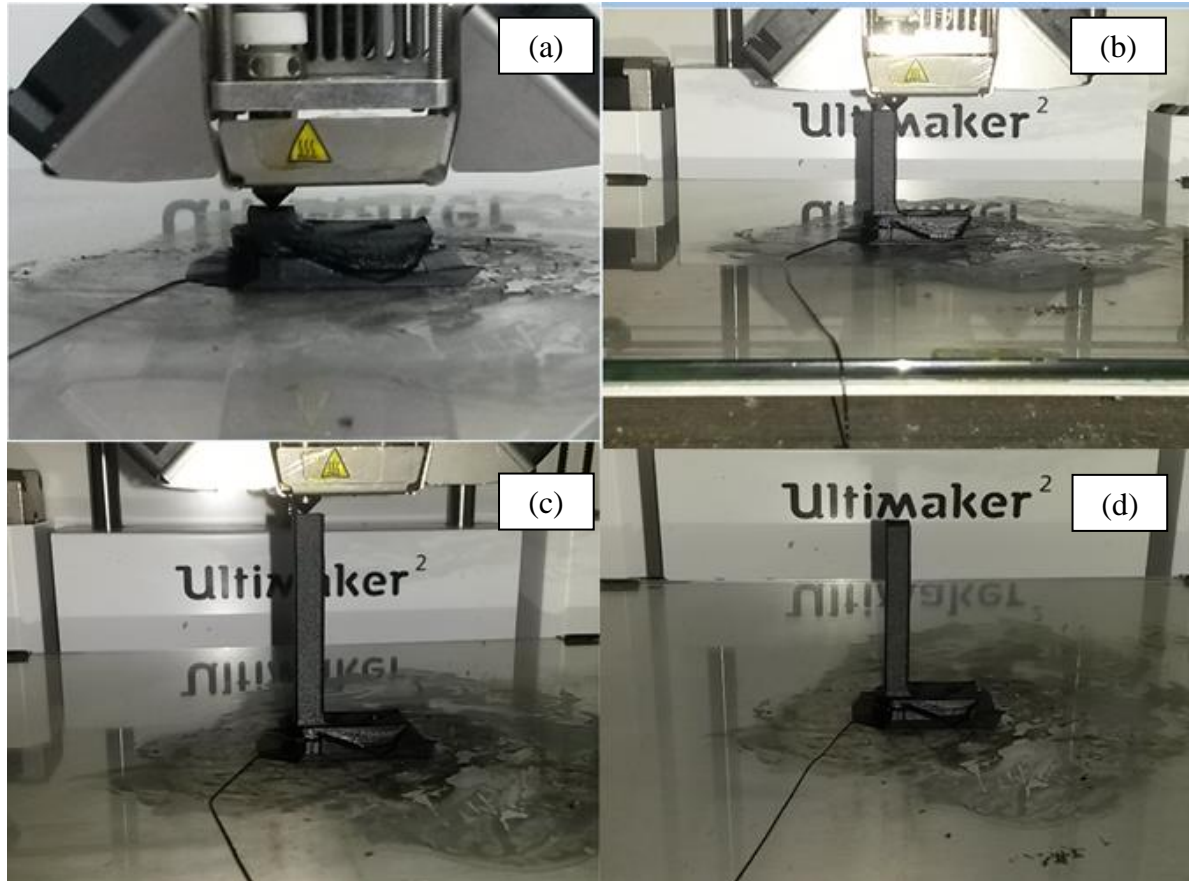


Figura 3.6 - Etapas de fabricação: a) fabricação da base do calcador, b) e c) as etapas de fabricação da haste e d) o calcador finalizado.

Fonte: Autor

A agulha utilizada neste trabalho foi produzida pela empresa Singer<sup>®</sup>, modelo convencional 1955, com diâmetro de 1,40 mm. A Figura 3.7 mostra a lateral e a face de cima da agulha (lado superior esquerdo), a lateral e a face de baixo, que indica a canaleta (lado superior direito), o cabo com a marca e o diâmetro da agulha (lado inferior esquerdo) e o comprimento das agulhas (lado inferior direito). A numeração 140/22 no cabo da agulha significa que a agulha tem 1,40 mm ou  $1/22$  polegadas de diâmetro.

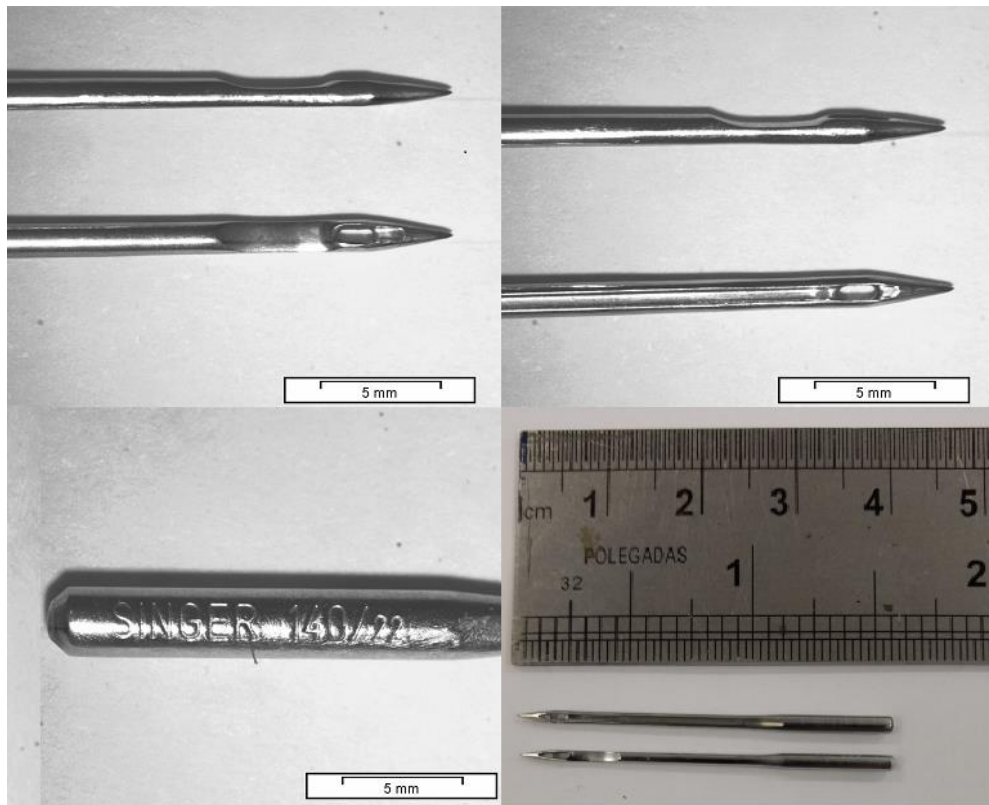


Figura 3.7 - imagens da agulha utilizada no processo *tufting*.

Fonte: Autor

Após o término da fabricação de todos os componentes do dispositivo, o mesmo foi montado para ser testado e utilizado no processo de costura. O dispositivo montado é mostrado na Figura 3.8.



Figura 3.8 - Dispositivo de costura montado.

Fonte: Autor

## 3.2.2 Fabricação dos compósitos

### 3.2.2.1 Preparação das preformas

A primeira etapa foi o corte do tecido *plain weave* para a fabricação de preformas com e sem *tufting*. Para o ensaio de tração foram manufaturadas três preformas, constituídas de cinco camadas  $(0^\circ, 90^\circ)_5$ , posteriormente reforçadas na direção da espessura, e uma preforma com oito camadas  $(0^\circ, 90^\circ)_8$ . Para o ensaio de tenacidade à fratura interlaminar em modo II (ENF), foram fabricadas quatro preformas, das quais, três com dez camadas  $(0^\circ, 90^\circ)_{10}$  e uma com doze camadas  $(0^\circ, 90^\circ)_{12}$  e subsequente reforço 3D. Nas preformas para o ensaio em modo II, foi adicionado um filme plástico de 0,08mm de espessura, na interface entre a quinta e a sexta camada para simular o início da falha por delaminação.

As Tabelas 3.7 e 3.8 indicam a quantidade e as dimensões das camadas utilizadas para as preformas de ensaio de tração e tenacidade à fratura em modo II, respectivamente.

Tabela 3.7 - Preformas para ensaio de tração.

Placa	Nº de camadas	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Tufting
1	5	300	330	Sim
2	5	300	330	Sim
3	8	300	280	Não
4	5	300	330	Sim

Tabela 3.8 - Preformas para ensaio de tenacidade à fratura.

Placa	Nº de camadas	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Tufting
1	10	400	230	Sim
2	10	400	230	Sim
3	12	280	180	Não
4	10	400	230	Sim

As medidas de largura e comprimento, mencionadas nas Tabelas 3.7 e 3.8, são referentes à direção da trama e do urdume, respectivamente. As preformas que foram reforçadas através da espessura foram fabricadas com menos camadas pelo fato de as linhas de reforço 3D aumentarem a espessura do compósito. Os diferentes tamanhos entre os comprimentos das camadas são para compensar a largura das barras fixadoras da preforma.



### 3.2.3 Processo de costura *Tufting*

O esquema da Figura 3.9 elucida as etapas da técnica *tufting*. Este método de reforço tridimensional consiste na inserção de uma linha contínua, assistida por uma agulha, através das camadas de tecido de uma preforma. Após a inserção e o movimento de retorno, na vertical, há um novo movimento até uma posição designada para um novo *tuft* (etapa 1), na sequência, ocorre um novo movimento de penetração da agulha, inserindo a linha através da preforma (etapa 2), até uma pré-determinada profundidade, formando um *loop* livre abaixo da superfície inferior da preforma. Na etapa 3, com o movimento de subida da agulha, o *loop* e o *tuft* se mantêm abaixo e no interior, respectivamente, da preforma devido ao atrito que as camadas de tecido exercem sobre a linha.

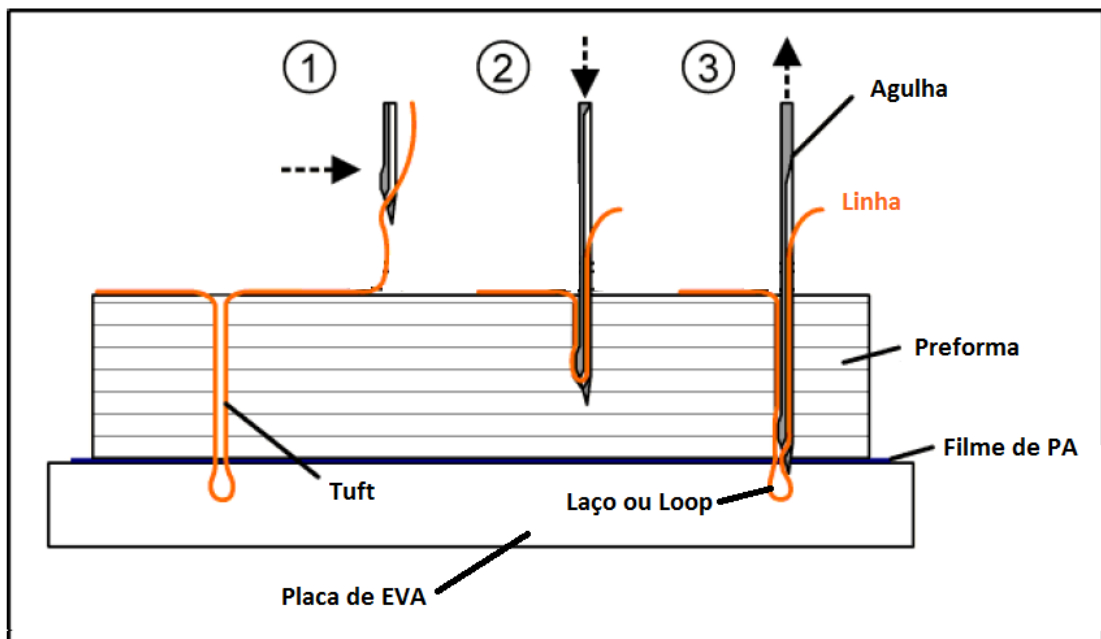


Figura 3.9 - Esquema com as etapas do processo de costura *tufting*.

Fonte: Adaptado de (TREIBER, 2011)

A linguagem de programação utilizada para a movimentação do dispositivo de costura foi feita em Código G (linguagem de programação que comanda máquinas CNC) com auxílio do *software Microsoft Office Excel 2007*. Esta foi baseada em uma programação de furação, pois os movimentos também são realizados no sistema de coordenadas (x,y,z). A costura é realizada na direção x (direção da trama - 90°) e as novas linhas de costura são na direção y (direção do urdume - 0°) como mostra a Figura 3.10.

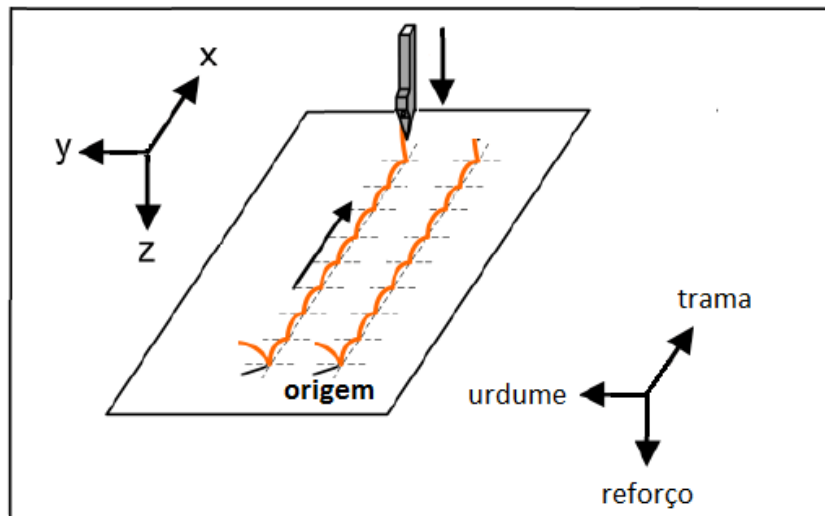


Figura 3.10 - Esquema de movimentação da agulha para o processo de *tufting*.

Fonte: Adaptado de (TREIBER, 2011)

Com o modelo da programação do equipamento feito, o dispositivo de costura foi adaptado à *Router* (Figura 3.11). Sendo assim, testes preliminares foram realizados para avaliar os melhores parâmetros de movimentação.

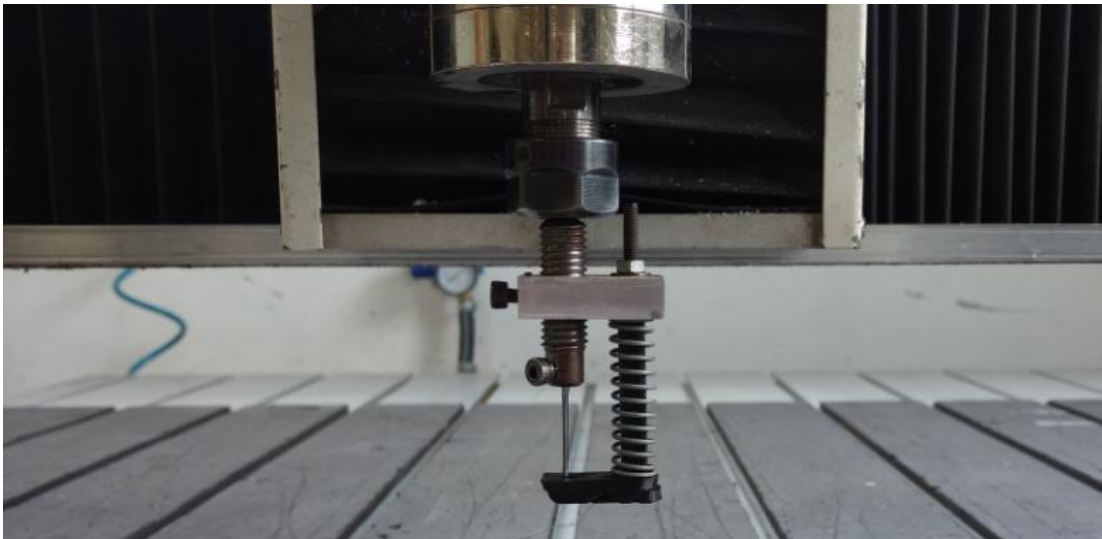


Figura 3.11 - Dispositivo instalado na Router.

Fonte: Autor

Para os primeiros testes, assumiu-se uma baixa velocidade de trabalho (1 *tuft* a cada 13s), dois padrões quadrados de inserção, uma penetração da agulha de 20 mm, a partir da primeira camada de tecido da preforma (origem na direção Z), e o movimento de subida, também relativo à superfície superior da preforma. Este último tem o seu movimento

relacionado ao padrão de inserção. A linha utilizada inicialmente para a costura era de poliamida 6.

Um padrão de inserção quadrado significa que a distância entre dois *tufts* consecutivos é a mesma distância de um *tuft* de uma nova linha. A Figura 3.12 ilustra um padrão quadrado de inserção de 5mm x 5mm e outro de 7mm x 7mm.

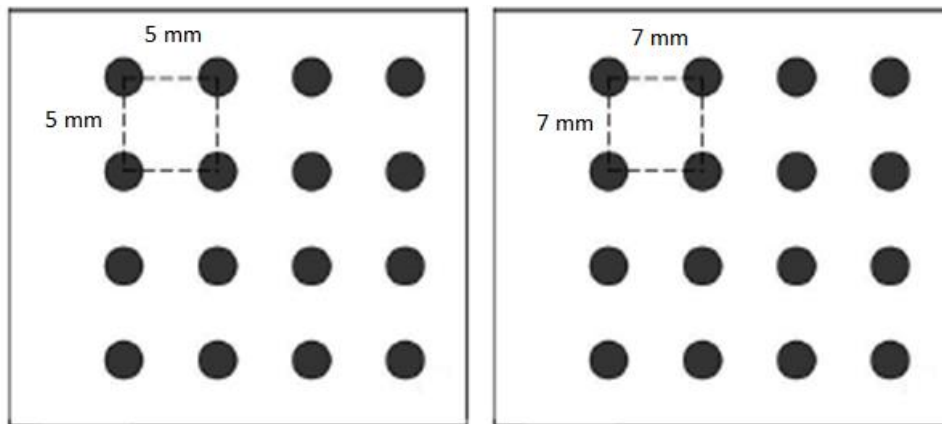


Figura 3.12 - Padrão quadrado de inserção de 5mm x 5mm e 7mm x 7mm.

Fonte: Adaptado de (DELL'ANNO, 2007)

Estes parâmetros foram utilizados com a finalidade de promover o entendimento e conhecimento inicial do processo, sendo posteriormente ajustados para a produção das preformas e também por terem sido utilizados por outros autores (DE VERDIERE *et al.*, 2012; KOISSIN *et al.*, 2009b; ZHANG *et al.*, 2012).

De acordo com Zhu (2010) e Dell'Anno (2007) a agulha, o calcador e o material utilizado como suporte da preforma desempenham papéis importantes durante o processo de costura.

As funções do calcador são de pressionar a preforma e evitar a movimentação das camadas de tecido durante a penetração da agulha, além de segurar a costura na superfície superior da preforma, evitando que o *tuft*, produzido anteriormente, seja retirado do interior da preforma e a costura da superfície seja removida durante a inserção de um novo *tuft*.

O formato e o diâmetro da agulha são importantes, pois quanto menor for seu diâmetro e mais pontiaguda for a agulha, menor a separação dos fios durante a inserção e menor a chance de partir os fios do tecido da preforma. Outra característica importante da agulha é a presença da canaleta na parte traseira, pois no momento em ocorre o movimento de retirada da agulha da preforma, esta canaleta faz com que o contato entre a linha de reforço e as camadas do tecido

seja maior, conseqüentemente mantendo a linha de reforço na direção da espessura (TREIBER, 2011). A Figura 3.13 identifica, em vermelho, a canaleta na parte de trás da agulha.

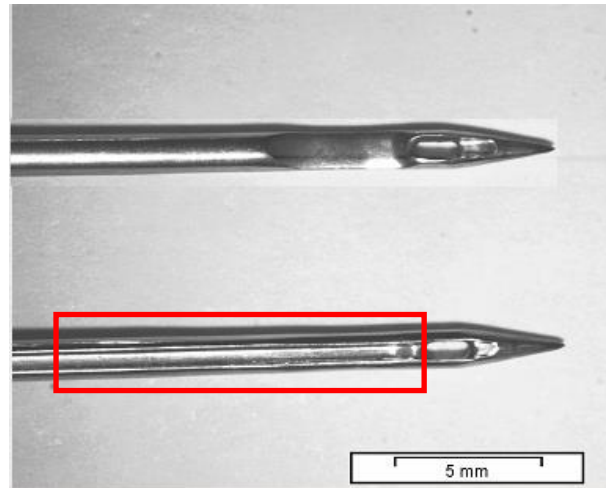


Figura 3.13 - Indicação da canaleta na parte traseira da agulha.

Fonte: Autor

As camadas de tecido foram empilhadas sobre três placas de acetato-vinilo de etileno (EVA), duas com 10 mm de espessura e uma com 5mm, unidas por uma fita dupla face. Entre o tecido e as placas de EVA foi posicionado um filme plástico de poliamida, o mesmo utilizado como bolsa de vácuo, e este tem a finalidade de separar a preforma do EVA e facilitar a remoção da mesma após a costura. As placas de EVA servem como suporte, também protegem e evitam que a agulha tenha um eventual contato com a bancada da Router durante a sua penetração na preforma. Outra vantagem é que as placas deste material garantem uma boa adesão e ancoramento dos *loops* e os mantêm firmes e contínuos durante o processo *tufting*.

Na Figura 3.14 pode ser identificado o dispositivo utilizado para o processo *tufting*. Onde 1 é o suporte da agulha e 2 a agulha, 3 as placas de EVA (branca e verde), 4 é a preforma empilhada e costurada e 5 são as barras que a fixam e evitam um eventual movimento da preforma durante o processo. Não é possível visualizar na Figura 3.14, mas o filme de poliamida 6 está presente entre a superfície inferior da preforma e a placa branca de EVA.

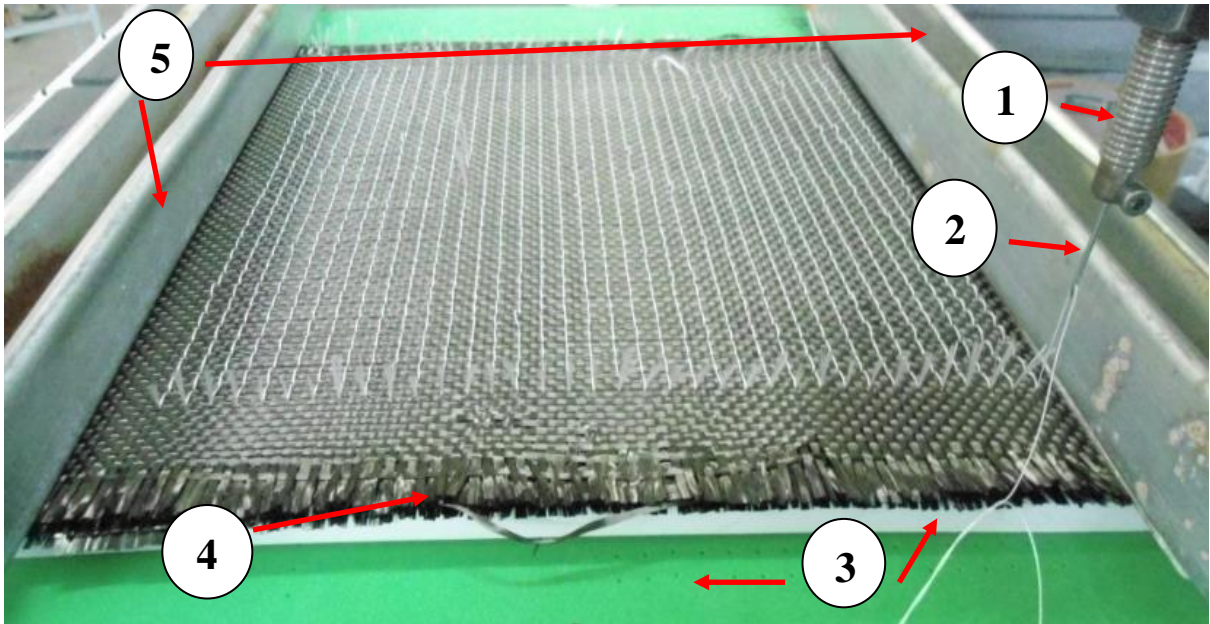


Figura 3.14 - Montagem do aparato para o método de costura *tufting*, onde 1) é o suporte da agulha, 2) a agulha, 3) as placas de EVA, 4) a preforma e 5) as barras de fixação da preforma.

Fonte: Autor

### 3.2.3.1 Processo VARTM

A montagem do sistema para infusão consiste na seleção e preparação do molde ou ferramental; montagem da preforma de acordo com a quantidade pré-determinada de camadas e seu posicionamento no ferramental; adição dos outros materiais consumíveis (tecido desmoldante ou *peel ply* e mídia de transporte); e fechamento do sistema com uma bolsa de vácuo, como é elucidado na Figura 3.15.

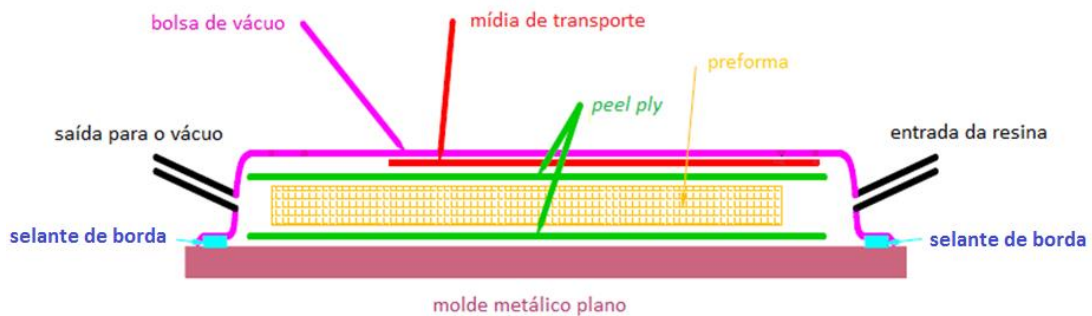


Figura 3.15 - Esquema de um processo VARTM.

Fonte: Adaptado de (ZHU, 2010)

O processo VARTM foi realizado em um ferramental plano, de aço. Antes de iniciar o processo de infusão, o ferramental foi limpo com auxílio do solvente metil-etil-cetona (MEK) e em seguida aplicou-se um desmoldante, na área em que a preforma seria posicionada, e o mesmo foi seco com um soprador térmico. Para facilitar a retirada do compósito, adicionou-se também uma camada de tecido desmoldante (*peel ply*) na região que a preforma seria colocada, esta é então posta sobre o tecido desmoldante e a área útil do ferramental tem seu perímetro envolto por um selante de borda. A Figura 3.16 apresenta uma preforma posicionada na área útil do ferramental após as etapas supracitadas terem sido realizadas.

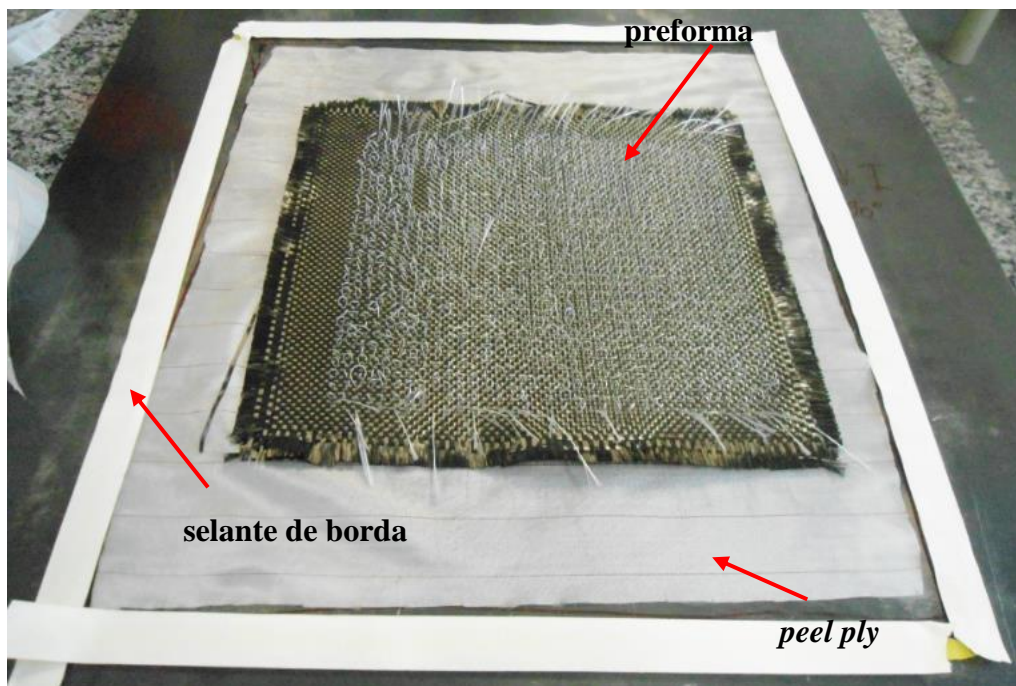


Figura 3.16 - Preforma posicionada no ferramental.

Fonte: Autor

Após o posicionamento correto da preforma, são adicionados sobre o selante de borda, dois conectores nas laterais. Em cada um instala-se uma mangueira de silicone, na parte externa ao selante de borda e uma mangueira em espiral, para uma melhor distribuição da resina, na parte interna. Estes conectores são responsáveis pela entrada da resina e para a saída do vácuo. Em seguida, outra camada de *peel ply* é adicionada sobre a preforma, como está ilustrado nas Figuras 3.17 e 3.18.

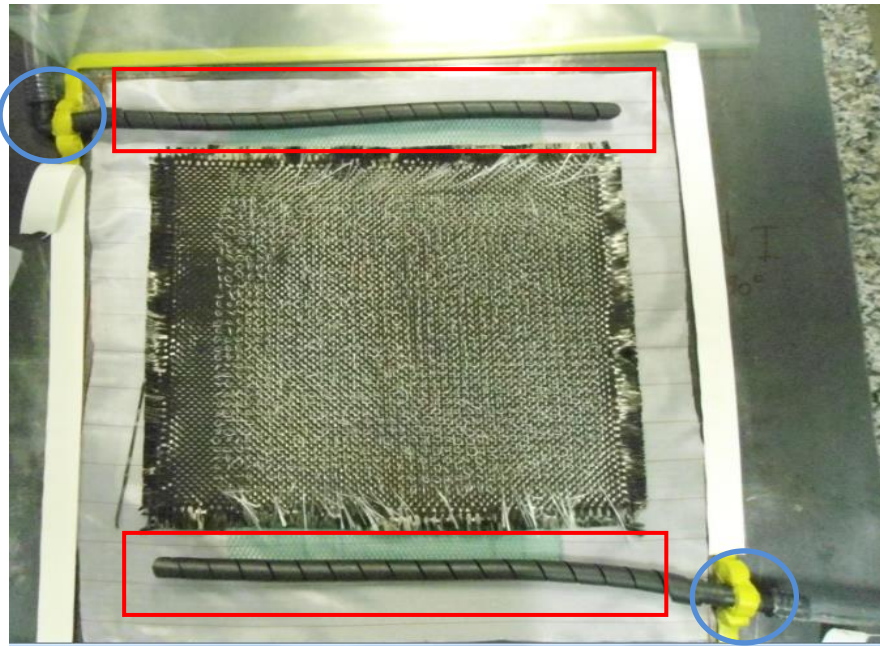


Figura 3.17 - Esquema da montagem dos conectores (marcados em azul) e mangueiras (marcadas em vermelho).

Fonte: Autor



Figura 3.18 - Adição de outra camada de *peel ply* em cima da preforma.

Fonte: Autor

O próximo passo é o fechamento da bolsa de vácuo, para isso, retira-se a proteção do selante de borda e o filme de plástico para vácuo é cuidadosamente colocado sobre toda a área útil em que se tem selante. Após o fechamento, a bomba de vácuo é ligada com uma pressão de

vácuo de aproximadamente 25 pol.Hg, para conferir se não há regiões com pequenos vazamentos de ar e verificar se a bolsa está hermeticamente fechada, como é mostrado na Figura 3.19, para uma preforma de ensaio de tração, e na Figura 3.20 para uma preforma de ensaio de resistência à fratura interlaminar em modo II. As regiões indicadas em vermelho na Figura 3.19 são chamadas de dobras, ou rugas, e são propositalmente adicionadas à bolsa, para que não ocorra o rompimento do filme plástico em virtude da pressão do vácuo.

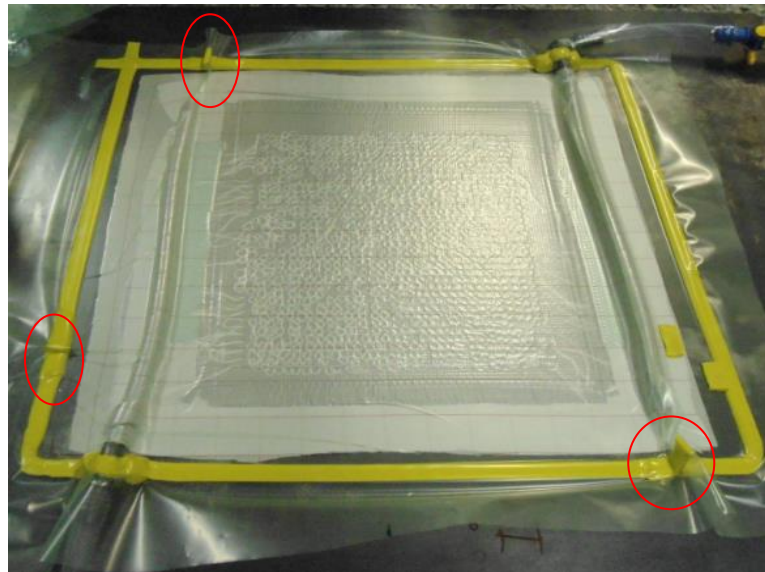


Figura 3.19 - Identificação (em vermelho) das dobras em uma bolsa de vácuo.

Fonte: Autor

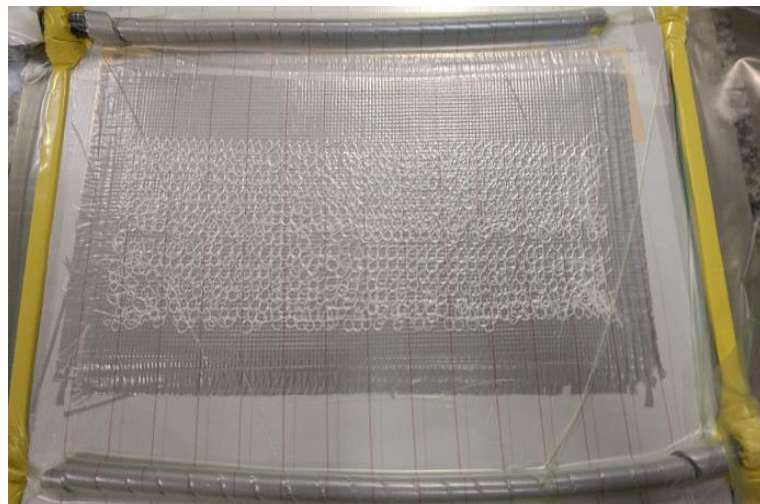


Figura 3.20 - Bolsa de vácuo preparada para a infusão.

Fonte: Autor



Geralmente se utiliza uma média de transporte sobre a segunda camada de tecido desmoldante no processo de infusão, com a funo de facilitar o fluxo da resina, porém, para as preformas que apresentavam costura, não se aplicou. Assumiu-se que a presença da mdia faria com que o compósito pudesse apresentar falhas durante a impregnao e pontos secos, portanto a mdia são foi utilizada na infusão das preformas sem reforço.

Se a bolsa não apresentar nenhum tipo de vazamento, da-se início ao processo de infusão. O vácuo faz com que a resina percorra o total da área útil de maneira uniforme e também auxilia na compactao da preforma.

Adicionam-se as partes A e B da resina (matriz) e leva-se ao misturador por 4 minutos. Depois de misturada, a resina passa pela degasagem, realizada com o auxílio da bomba de vácuo, e assim estará pronta para realizar a infusão. O processo de degasagem é realizado para eliminar os voláteis resultantes da mistura entre as partes A e B. A Figura 3.21 a) e b) representa os estágios em que a resina está percorrendo a preforma e o fim da infusão, respectivamente.

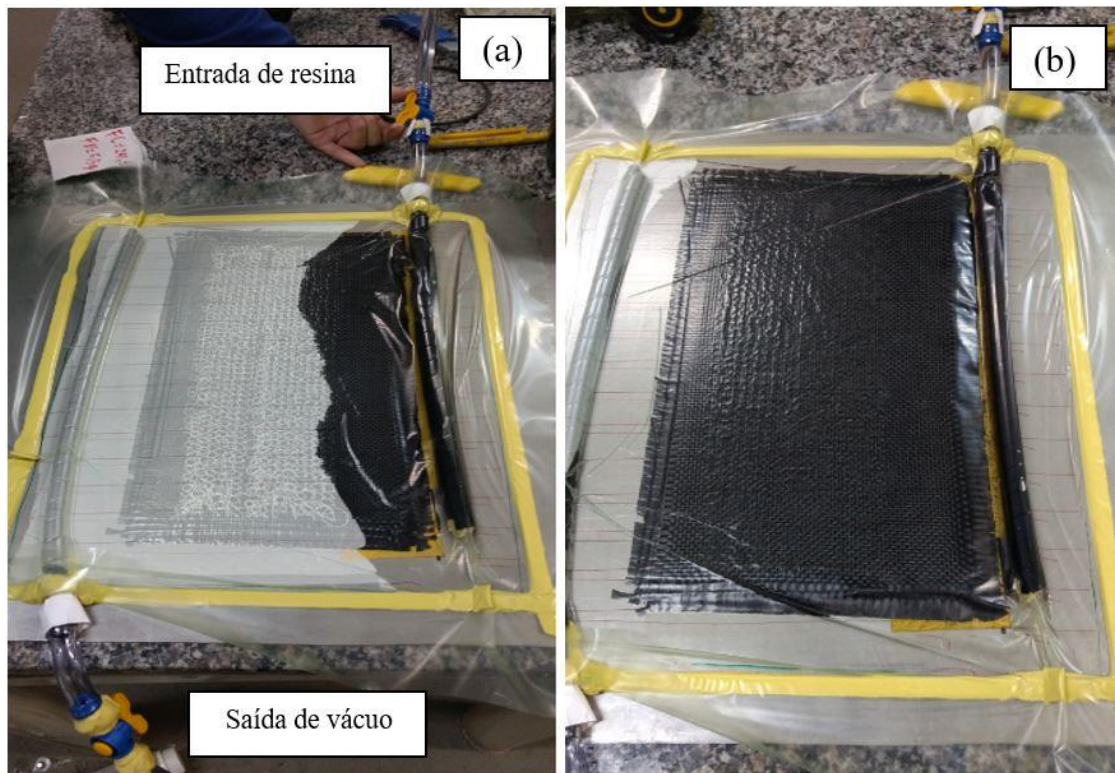


Figura 3.21 - a) início do processo de infusão e b) infusão completa.

Fonte: Autor

Ao final do processo de infusão, o molde é colocado no interior da estufa com rampa de aquecimento de 5°C/min até atingir 80°C de temperatura de patamar. O compósito permaneceu na à 80°C por 4 horas.

### 3.2.4 Volume de fibra e de vazios

Foram cortadas duas amostras de cada compósito feito para os ensaios de Tração e ENF, totalizando 16 amostras, cada uma com massa aproximada de 1 g. As amostras foram pesadas em uma balança de precisão da marca Shimadzu<sup>®</sup>, modelo AUW220D, e no mesmo equipamento foram feitas as medidas da massa específica do compósito pelo método de Arquimedes. Para se obter as medidas de massa específica por este método é necessário que na balança esteja instalado um dispositivo que se possa medir a massa seca do compósito e em seguida a massa específica é calculada com a amostra submersa em água. Antes da amostra ser colocada na água, deve-se medir a temperatura e a densidade da água. Estes procedimentos estão de acordo com a norma ASTM D792 - 08.

As amostras foram colocadas em banhos separados de 40 mL de ácido sulfúrico aquecido a aproximadamente 180°C por 1 hora e 30 minutos, na sequência adicionou-se 70 mL de peróxido de hidrogênio. Estas etapas foram realizadas de acordo com o Procedimento B, descrito na norma ASTM D3171 - 99.

As soluções com as amostras foram colocadas em filtros analíticos de vidro, instalados em um Kitasato, e filtradas a vácuo. As fibras foram lavadas três vezes com água destilada e uma vez com acetona, para a remoção do enxofre proveniente do ácido sulfúrico. Antes da pesagem das fibras, estas foram levadas para uma estufa e efetuou-se a secagem por 40 minutos à 100°C. Após a secagem, as fibras foram pesadas para que os cálculos do volume de fibra ( $V_f$ ), resina ( $V_r$ ) e vazios ( $V_v$ ) fossem determinados. Os valores foram calculados de acordo com as Equações 3.1, 3.2 e 3.3.

$$V_f = \frac{M_f \cdot \rho_c \cdot 100}{M_i \cdot \rho_r} \quad (3.1)$$

$$V_r = \frac{(M_i - M_f) \cdot \rho_c}{M_i \cdot \rho_m} \quad (3.2)$$

$$V_v = 100 - (V_r + V_m) \quad (3.3)$$

sendo  $M_i$  a massa do compósito (g),  $M_f$  a massa de fibra após a digestão ácida (g),  $\rho_c$  a massa específica do compósito (g/mL),  $\rho_r$  a massa específica do reforço (g/mL) e  $\rho_m$  a massa específica da matriz (g/mL).

### 3.2.5 Usinagem dos corpos de prova (CDP's)

Após a fabricação dos compósitos, os corpos de prova para os ensaios de tração e tenacidade à fratura interlaminar em modo II foram cortados na Router, levando em consideração as dimensões especificadas na norma ASTM D3039- 14, para os ensaios de tração, e ASTM D7905- 14, para os ensaios em modo II. As Figuras 3.22 e 3.23 mostram o corte dos CDP's para ensaio de tração e modo II, respectivamente, e no canto superior direito é indicado o sentido do urdume ( $0^\circ$ ), da trama ( $90^\circ$ ) e da costura ( $90^\circ$ ).

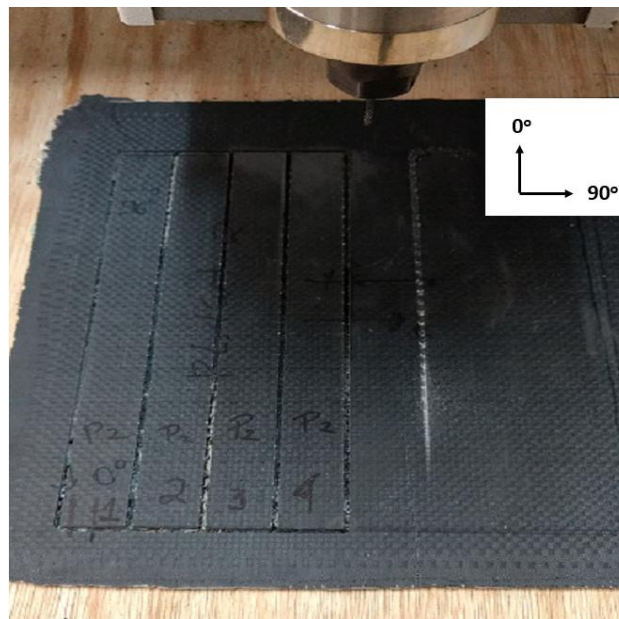


Figura 3.22 - Usinagem dos corpos de prova para os ensaios de tração.

Fonte: Autor



Figura 3.23 - Usinagem dos corpos de prova para ensaios em modo II.

Fonte: Autor

As Figuras 3.24 e 3.25 apresentam os corpos de prova para o ensaio de tração e tenacidade à fratura interlaminar em modo II, respectivamente, após o término da usinagem. No canto superior direito das imagens esta esquematizado a orientação do urdume e da trama,  $0^\circ$  e  $90^\circ$ , respectivamente.

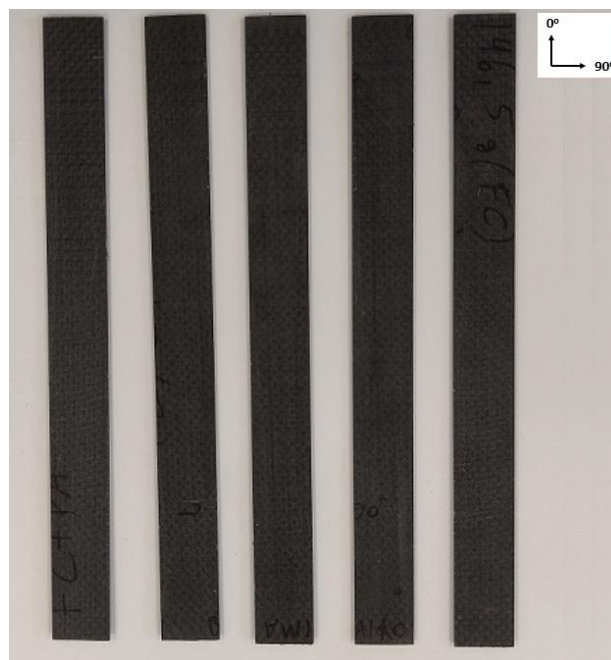


Figura 3.24 - Corpos de prova para o ensaio de tração

Fonte: Autor



Figura 3.25 - Corpos de prova para o ensaio ENF.

Fonte: Autor

Os corpos de prova serão identificados de acordo com o ensaio a que serão submetidos (tração ou tenacidade à fratura interlaminar), placa, padrão quadrado de inserção do reforço e material da linha utilizada para reforço.

Os corpos de prova (CDP) para o ensaio de tração (T) provenientes da placa 1 (1), com padrão quadrado de inserção 7x7 (7) e reforçados através da espessura com poliamida 6 (PA) serão mencionados como: T1R7PA.

Os corpos de prova (CDP) para o ensaio de tração (T) provenientes da placa 2 (2), com padrão quadrado de inserção 7x7 (7) e reforçados através da espessura com *fibra de vidro* (FV) serão mencionados como: T2R7FV.

Os corpos de prova (CDP) para o ensaio de tração (T) provenientes da placa 3 (3), sem reforço através da espessura (SR) serão mencionados como: T3SR.

Os corpos de prova (CDP) para o ensaio de tração (T) provenientes da placa 4 (4), com padrão quadrado de inserção 5x5 (5) e reforçados através da espessura com poliamida 6 serão mencionados como: T4R5PA.

A Tabela 3.9 apresenta os valores médios dos corpos de prova, após a usinagem, para os ensaios de tração.

Tabela 3.9 - Dimensões corpos de prova para ensaio de tração.

CDP	Largura (mm)	Espessura (mm)	Comprimento (mm)
T1R7PA	25,03	2,19	250
T2R7FV	25,16	1,79	250
T3SR	25,07	2,48	250
T4R5PA	24,97	2,23	250
Média	25,057	2,172	N/A
Desv.pad.	0,08	0,28	N/A

Os corpos de prova (CDP) para o ensaio de tenacidade à fratura interlaminar, em modo II (E) provenientes da placa 1 (1), com padrão quadrado de inserção 7x7 (7) e reforçados através da espessura com poliamida 6 (N) serão mencionados como: E1R7PA.

Os corpos de prova (CDP) para o ensaio de tenacidade à fratura interlaminar (E) provenientes da placa 2 (2), com padrão quadrado de inserção 7x7 (7) e reforçados através da espessura com fibra de vidro (FV) serão mencionados como: E2R7FV.

Os corpos de prova (CDP) para o ensaio de tenacidade à fratura interlaminar (E) provenientes da placa 3 (3), sem reforço através da espessura (SR) serão mencionados como: E3SR.

Os corpos de prova (CDP) para o ensaio de tenacidade à fratura interlaminar (E) provenientes da placa 4 (4), com padrão quadrado de inserção 5x5 (5) e reforçados através da espessura com poliamida 6 (PA) serão mencionados como: E4R5PA.

Tabela 3.10 - Dimensões corpos de prova para ensaio em modo II.

CDP	Largura (mm)	Espessura (mm)	Comprimento (mm)
E1R7PA	19,06	4,03	165
E2R7FV	19,05	3,66	165
E3SR	18,89	4,16	165
E4R5PA	18,87	3,47	165
Média	18,967	3,83	N/A
Desv. pad.	0,08	0,03	N/A

### 3.2.6 Ensaios Estáticos

#### 3.2.6.1 Ensaio de Tração

Os ensaios de tração foram realizados para a determinação das propriedades de módulo elástico ( $E$ ) e resistência à tração ( $\sigma$ ), em uma máquina de ensaio universal servo-hidráulica, modelo 8801, da marca Instron®, com uma célula de carga de 100 kN. A velocidade do ensaio foi de 2mm/min, e as dimensões dos corpos de prova estão de acordo com a norma ASTM D3039: 2014.

Os valores das deformações dos corpos de prova, de seus módulos elásticos e a tensão de resistência à tração, foram obtidos com o auxílio de um vídeo extensômetro avançado (AVE, do inglês *Advanced Video Extensometer*), da marca Instron®, instalado na máquina de ensaio universal. A aquisição dos dados é feita por uma câmera digital com alta resolução, que captura as imagens em tempo real da deformação axial do corpo de prova, abstendo-se do uso de um extensômetro de contato para as medições. Anteriormente ao ensaio, há a necessidade de se marcar o corpo de prova, para que seja possível a medição da deformação e também para o posicionamento correto do mesmo nos mordentes do equipamento de ensaio. A Figura 3.26 a) mostra a região marcada em branco no corpo de prova e a Figura 3.26 b) destaca, em vermelho, a posição de alinhamento das marcações.

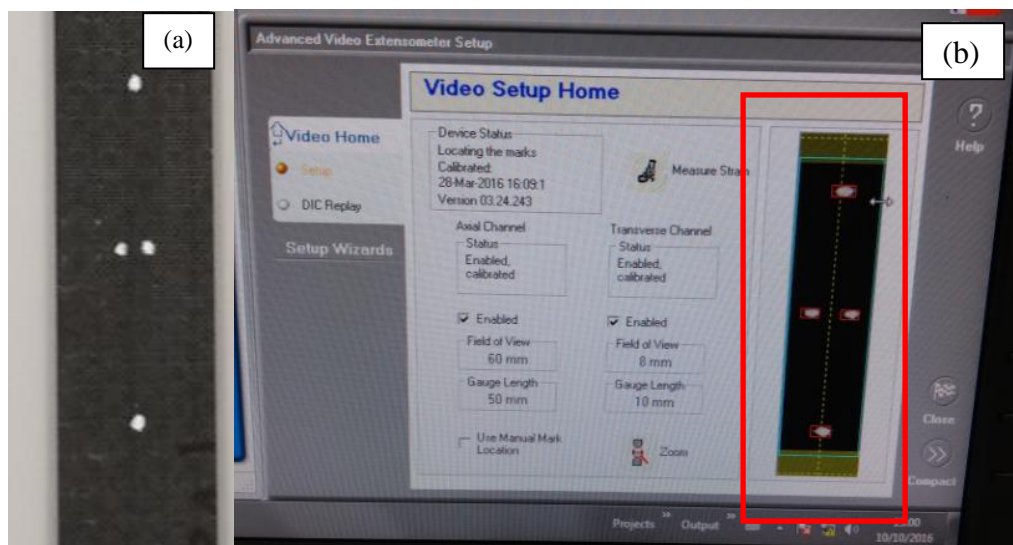


Figura 3.26 - a) Corpo de prova marcado e b) posicionamento com o auxílio do *software*.

Fonte: Autor

Após a alocação do corpo de prova, inicia-se o ensaio, e este é interrompido ou finalizado quando ocorre a ruptura do corpo de prova, como pode ser observado na Figura 3.27 a) e 3.27 b).

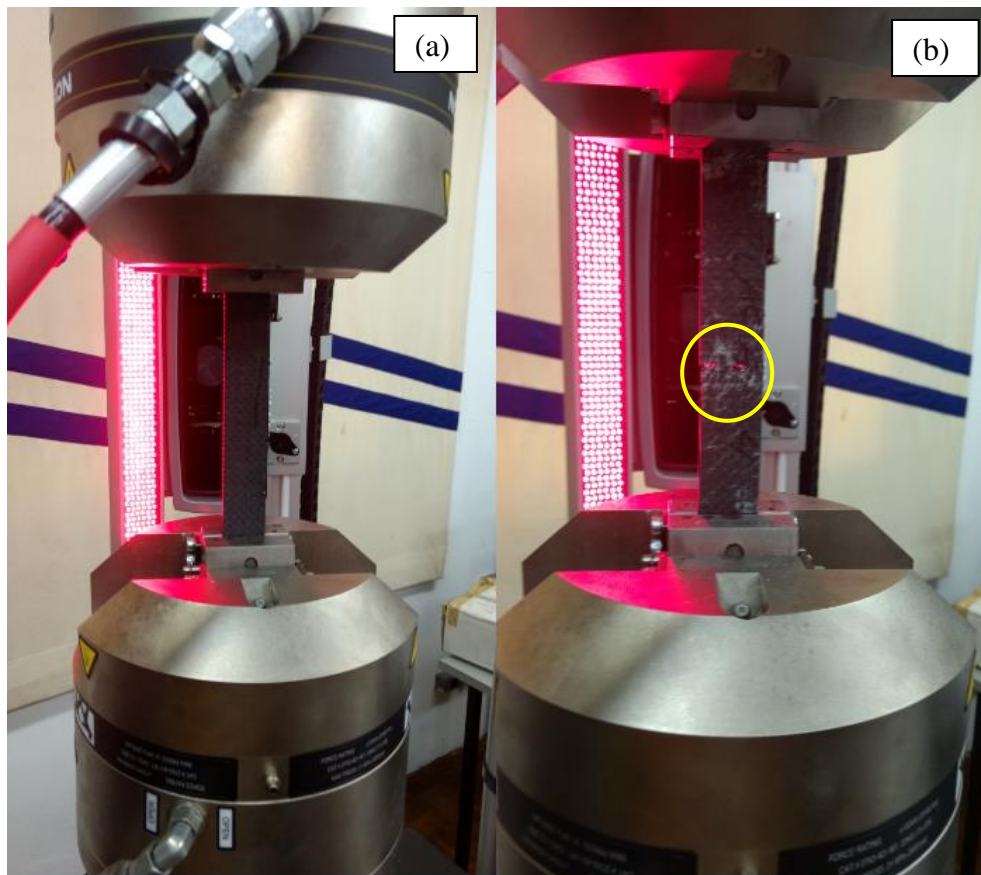


Figura 3.27 - a) Corpo de prova no início do ensaio e b) no final do ensaio (ruptura).  
Fonte: Autor

### 3.2.6.2 Ensaio de tenacidade à fratura interlaminar em modo II

Os ensaios de tenacidade à fratura interlaminar em modo II foram realizados em um dispositivo de flexão de 3 pontos, instalado em uma máquina de ensaio universal, da marca EMIC<sup>®</sup>, com uma célula de carga de 30 kN, modelo DL - 3000, para a determinação da tenacidade à fratura interlaminar ( $G_{IIc}$ ), devido a uma força de cisalhamento no plano ou deslocamento orientado perpendicularmente a direção de delaminação. A velocidade do ensaio, 0,5 mm/min, e as dimensões dos corpos de prova (Figura 3.28) estão de acordo com a norma ASTM D7905: 2014.



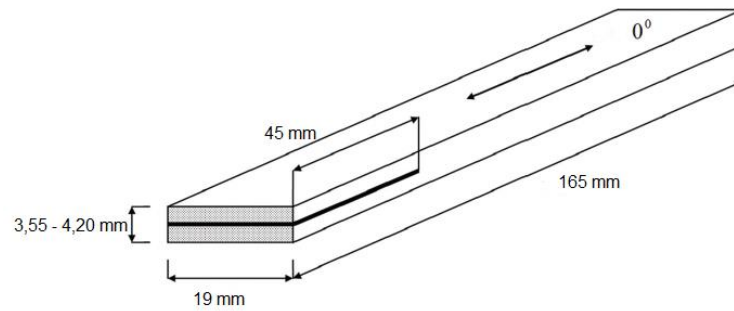


Figura 3.28 - Esquema do corpo de prova com suas dimensões e o inserto polimérico no plano médio do compósito.

Fonte: Adaptado de (CÂNDIDO *et al.*, 2014).

Antes do ensaio foi necessária a aplicação de uma tinta branca nas bordas laterais dos corpos de prova para a realização das marcas da calibração de conformidade (do inglês, *Compliance Calibration Markings*) a partir da ponta do inserto, conforme a Figura 3.29. O círculo vermelho identifica as marcas da calibração de conformidade e o círculo preto identifica as marcações das pontas dos insertos.

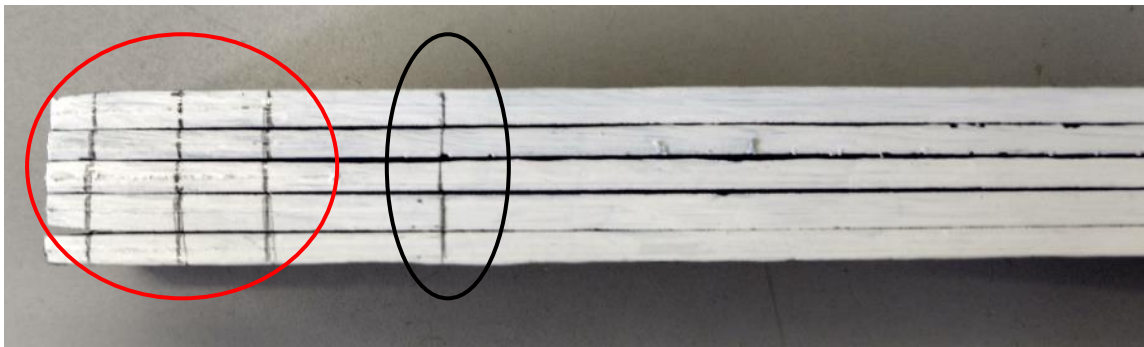


Figura 3.29 – Corpo de prova com tinta branca aplicada nasua lateral e a identificação das marcas da calibração de conformidade (círculo vermelho) e das marcações das pontas dos insertos (círculo preto).

Fonte: Autor

Estas marcações serão denominadas comprimento da fenda e identificadas por ( $a$ ). As Figuras 3.30 e 3.31 elucidam o esquema de marcação de um corpo de prova.

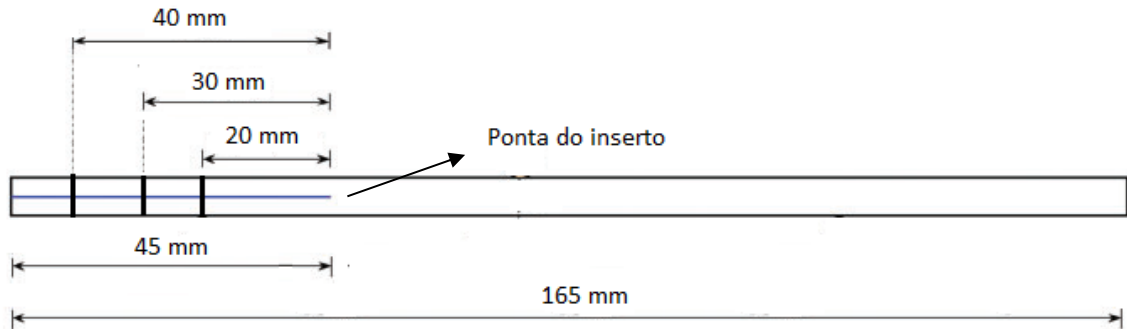


Figura 3.30 - Esquema dos comprimentos de fenda a partir da ponta do inserto.  
Fonte: Adaptado de (SHIVAKUMAR *et al.*, 2015).

A norma ASTM D7905:2014 propõe que o ensaio ocorra em duas etapas, a NPC (do inglês, *Non-Precracked*), que seria para iniciar a delaminação a partir do final do inserto polimérico e determinar os valores da taxa crítica de liberação de energia ( $G_{IIC}$ ), e a PC (do inglês, *Precracked*) que também determinará o  $G_{IIC}$  após o início da delaminação.

Para a obtenção dos valores do  $G_{IIC}$ , tanto do NPC quanto do PC, é necessário, primeiramente, a realização da calibração de conformidade (do inglês, *Compliance Calibration*) e a obtenção dos coeficientes de calibração de conformidade (coeficientes CC). Estes coeficientes CC,  $A$  e  $m$ , são determinados a partir dos dados da regressão linear da curva  $C$  em função de  $a^3$  obtidos pela Equação 3.4.

$$C = A + ma^3 \quad (3.4)$$

sendo ( $C$ ) é a conformidade, ( $a^3$ ) é o cubo do comprimento da fenda, ( $A$ ) é a interseção e ( $m$ ) a inclinação da regressão linear.

Para se determinar os coeficientes CC, da etapa NPC, é necessário que haja três ensaios, um para cada comprimento de fenda. A Figura 3.31 ilustra um esquema do dispositivo de ensaio de 3 pontos para um comprimento de fenda arbitrário.

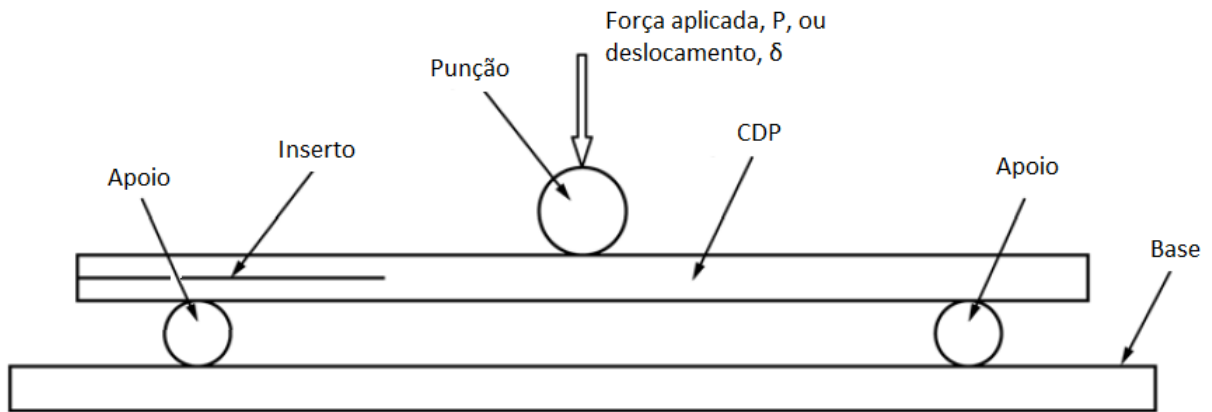


Figura 3.31 - Esquema do corpo de prova no dispositivo de ensaio.  
Fonte: Adaptado de (ASTM D7905:2014).

O primeiro ensaio é realizado para o comprimento de fenda  $a = 20$  mm e a distância entre os apoios é de 100 mm (para todos os ensaios). O corpo de prova é posicionado no dispositivo de ensaio de 3 pontos e a marca da fenda apoiada no centro do apoio da esquerda do dispositivo, após o posicionamento é dado o comando para o início do ensaio. Tem-se então a aplicação de uma força,  $P$ , e um determinado deslocamento,  $\delta$ , do punção. Quando a força  $P$  atinge um valor pré-determinado, que não inicia a delaminação, é necessário que o ensaio seja encerrado e o corpo de prova é retirado e reposicionado no dispositivo para outro comprimento de fenda.

As Figuras 3.32 e 3.33 ilustram um esquema do teste, com  $a = 20$  mm, e um corpo de prova sendo ensaiado, respectivamente.

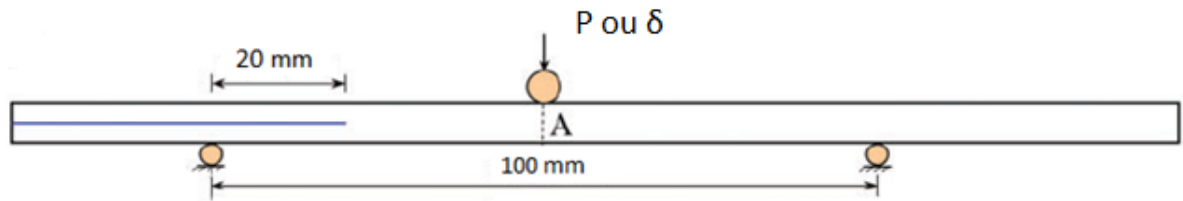


Figura 3.32 - Esquema do ensaio com  $a = 20$  mm.  
Fonte: Adaptado de (SHIVAKUMAR *et al.*, 2015).

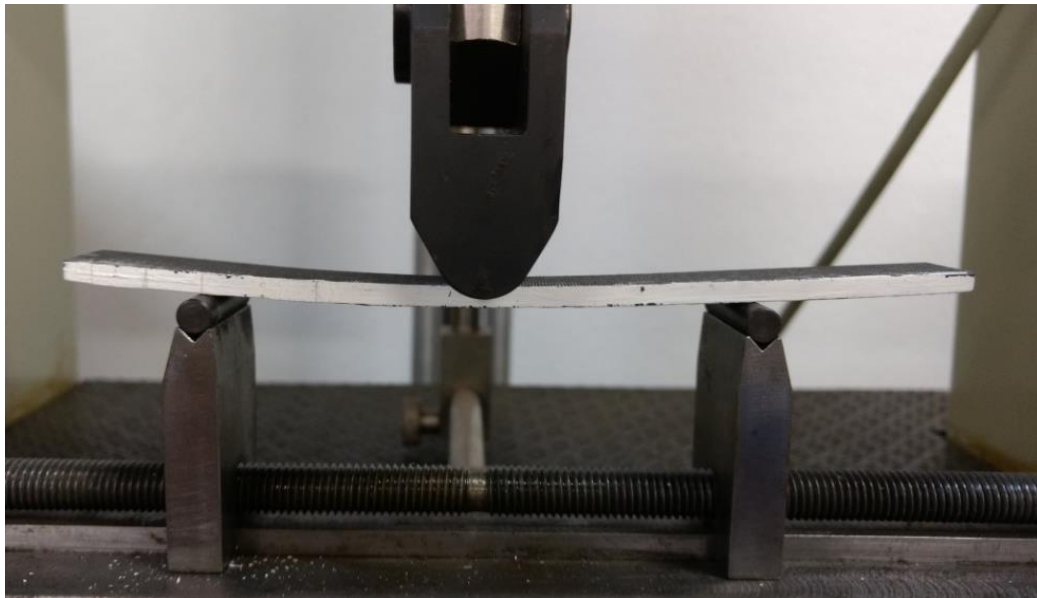


Figura 3.33 - Corpo de prova no dispositivo de ensaio com comprimento de fenda  $a = 20$  mm.

Fonte: Autor

A segunda etapa do ensaio é realizada com  $a = 40$  mm, e o mesmo procedimento do primeiro ensaio é seguido. As Figuras 3.34 e 3.35 ilustram um esquema do teste, com  $a = 40$  mm, e um corpo de prova sendo ensaiado, respectivamente.

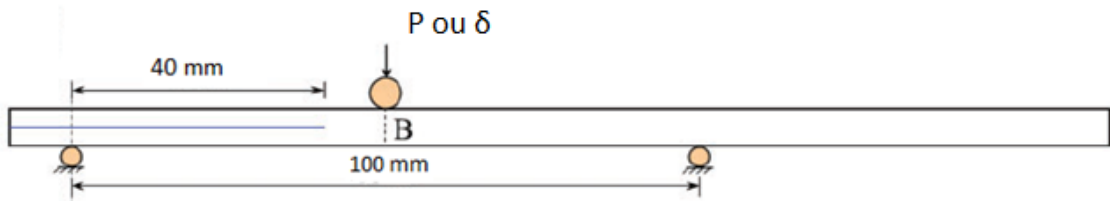


Figura 3.34 - Esquema do ensaio com  $a = 40$  mm.

Fonte: Adaptado de (SHIVAKUMAR *et al.*, 2015).

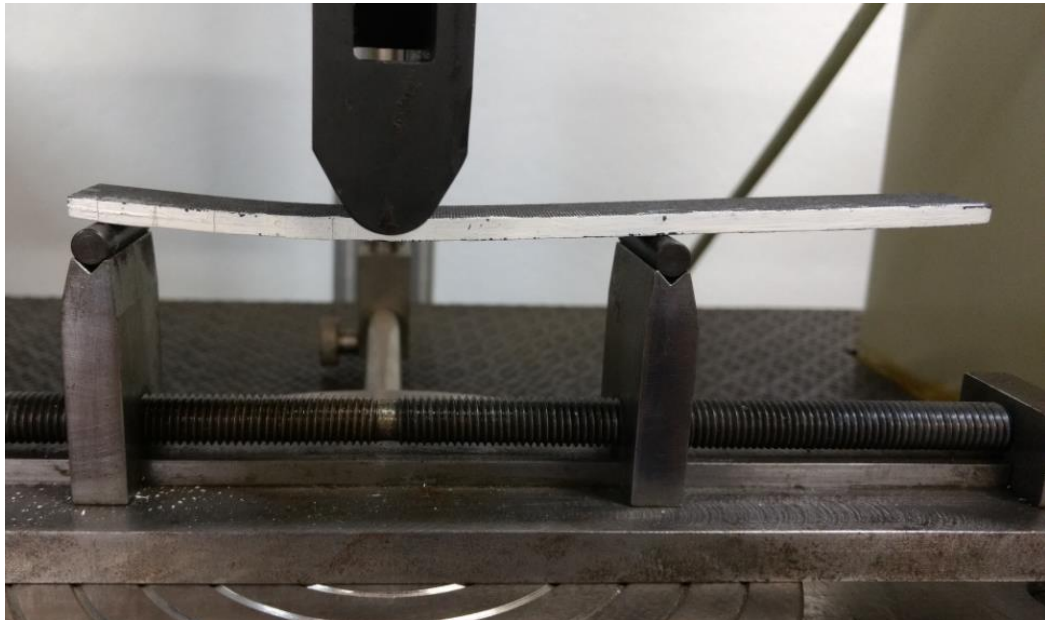


Figura 3.35 - Corpo de prova no dispositivo de ensaio com comprimento de fenda  $a = 40$  mm.

Fonte: Autor

Para a terceira etapa, o comprimento da fenda é de 30 mm. Nesta etapa, o ensaio é realizado até o corpo de prova iniciar a delaminação. O ensaio deve ser interrompido no momento em que ocorre a primeira queda no valor da força,  $P$ . As Figuras 3.36 e 3.37 ilustram um esquema do teste, com  $a = 30$  mm, e um corpo de prova sendo ensaiado, respectivamente.

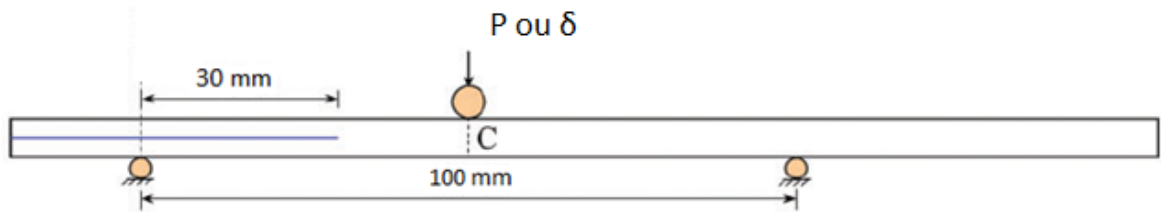


Figura 3.36 - Esquema do ensaio com  $a = 30$  mm.

Fonte: Adaptado de (SHIVAKUMAR *et al.*, 2015).

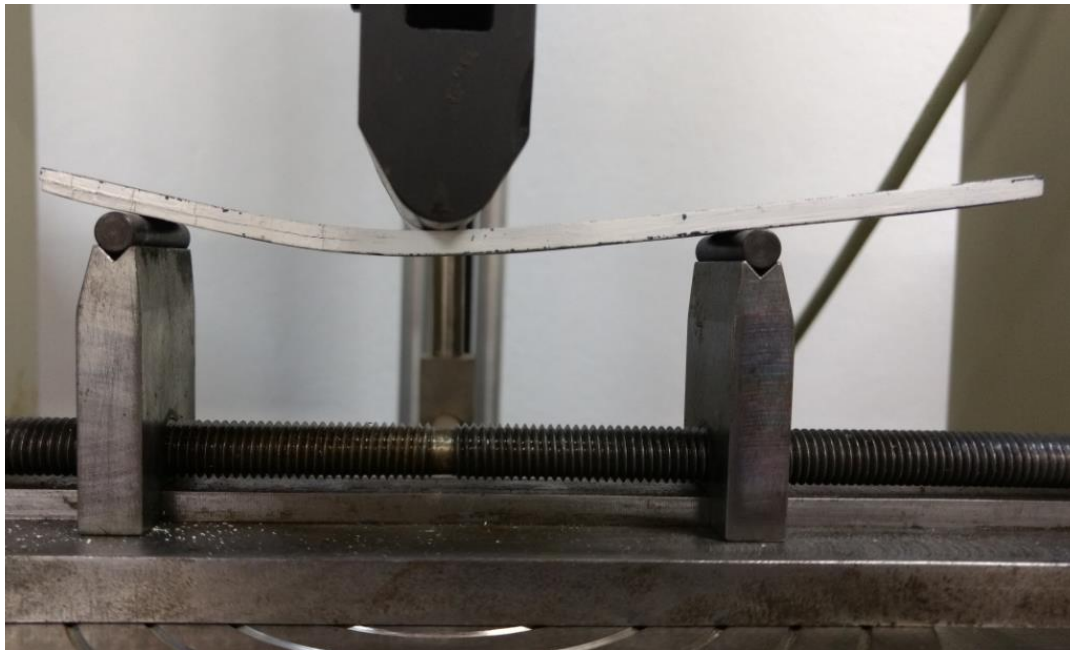


Figura 3.37 - Corpo de prova no dispositivo de ensaio comprimento de fenda  $a = 30$  mm.

Fonte: Autor

A Figura 3.38 identifica a movimentação e propagação da falha por cisalhamento e destaca, em vermelho, a trinca a partir da ponta do inserto após um ensaio com  $a = 30$  mm.

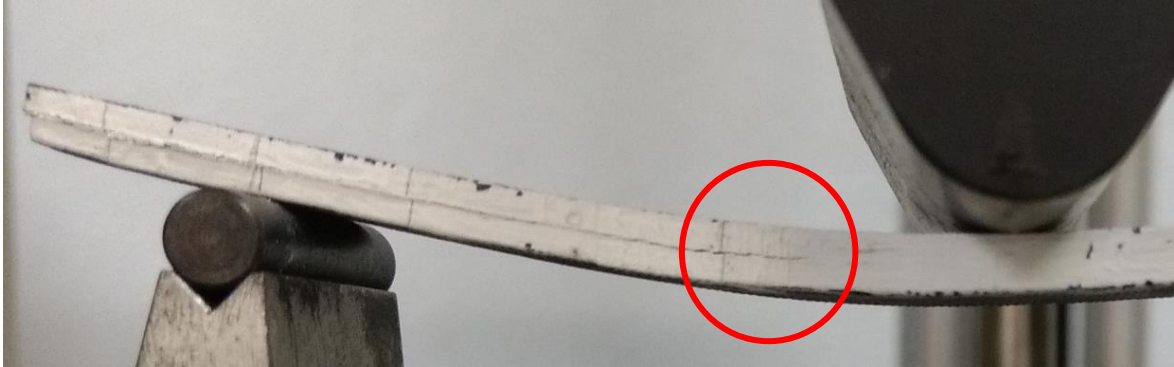


Figura 3.38 - Ilustração da movimentação causada pelas forças cisalhantes e a trinca a partir da ponta do inserto.

Fonte: Autor

Para cada uma das três etapas é gerada uma planilha de dados da força,  $P$ , e do deslocamento,  $\delta$ , do punção. Com estes valores plota-se um gráfico  $\delta$  em função de  $P$  para a determinação da conformidade,  $C$  (Equação 3.4). Este valor é a inclinação da curva  $\delta$  em função de  $P$  determinada pela análise de regressão linear. Para os casos em que o comprimento da fenda é de 20 mm e 40 mm, os dados para plotar o gráfico devem ser tomados a partir da força,  $P$ , maior ou igual a 90 N até o fim do ensaio. A escolha pelos dados acima de 90 N é para excluir as não-linearidades iniciais do ensaio. Para  $a = 30$  mm, os dados de força devem ser maiores ou iguais a 90 N e menor ou igual a 50% da força máxima que causou a delaminação.

A Figura 3.39 apresenta um gráfico representativo do Deslocamento em função da Força para os três comprimentos de fenda e a Tabela 3.11 resume os valores de deslocamento,  $\delta$ , Força,  $P$ , para cada comprimento de fenda, e a conformidade  $C$ .

Tabela 3.11 - Valores de  $a$ ,  $P$ ,  $\delta$ , e  $C$  para o gráfico plotado na Figura 3.38.

$a$ (mm)	$P$ (N)	$\delta$ (mm)	$C$ (mm/N)
20	250	2,53	0,0045
30	393	2,35	0,0054
40	500	2,01	0,0071

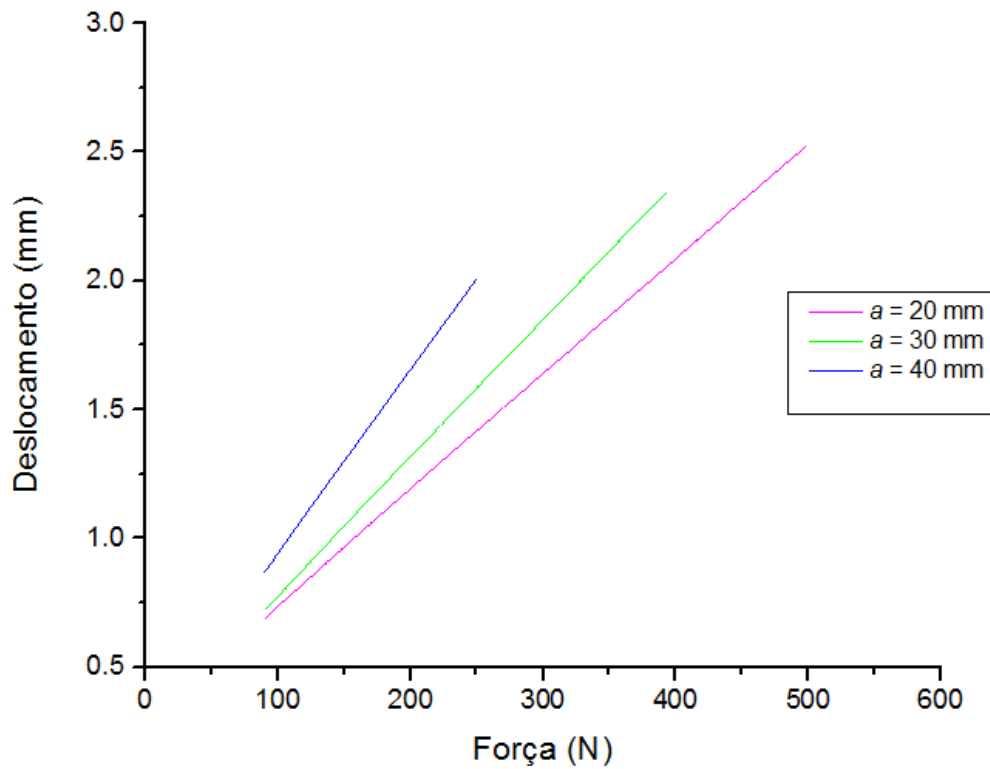


Figura 3.39 - Curva Deslocamento em função da Força para determinação da conformidade  $C$ .

Fonte: Autor

Após a determinação do valor da conformidade  $C$ , para cada tamanho de fenda, os coeficientes  $CC$ ,  $A$  e  $m$  (Equação 3.4), devem ser obtidos usando-se a análise de regressão linear da conformidade,  $C$ , pelo cubo do tamanho da fenda,  $a$  ( $a^3$ ). A Figura 3.40 apresenta um gráfico de  $C$  em função de  $a^3$  e os valores de  $A$  e  $m$ . A Tabela 3.12 apresenta os valores utilizados para o gráfico plotado na Figura 3.39.

Tabela 3.12 - Valores de  $a^3$  e  $C$  para cada comprimento de fenda.

$a$ (mm)	$a^3$ (mm <sup>3</sup> )	$C$ (mm/N)
20	0,000008	0,0045
30	0,000027	0,0054
40	0,000064	0,0071



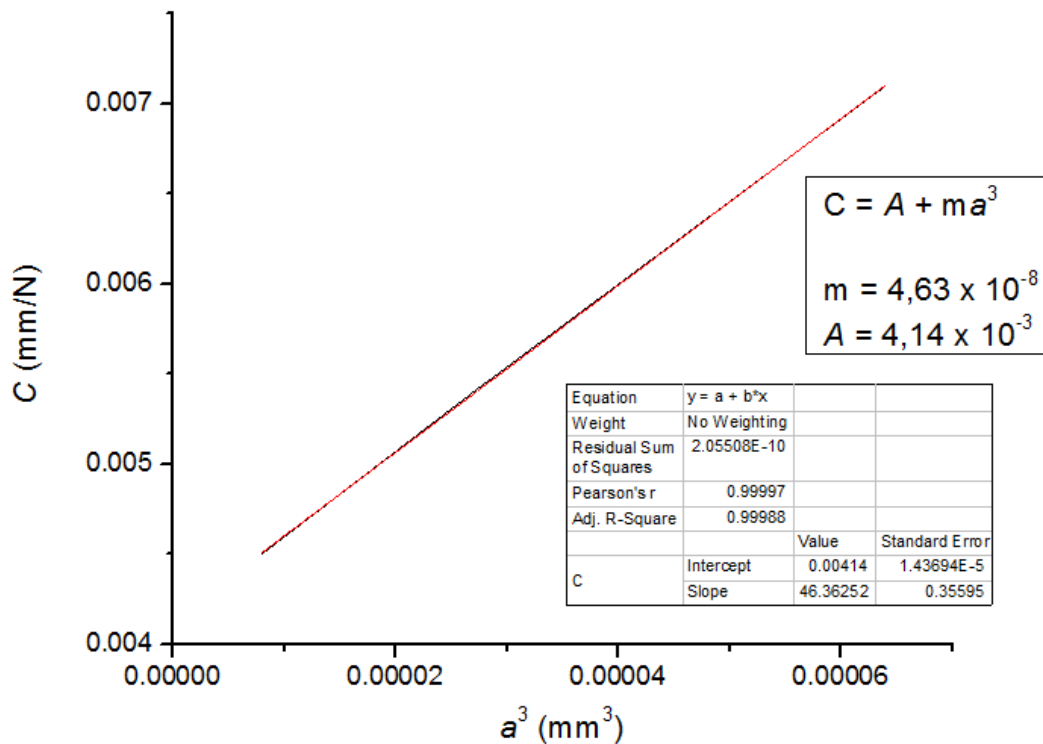


Figura 3.40 - Curva Deslocamento em função da Força para determinação da conformidade C.  
Fonte: Autor

Com os valores dos coeficientes CC calculados, prossegue-se então para o cálculo da taxa crítica de liberação de energia,  $G_{IIc}$ . Os valores de  $G_{IIc}$  são determinados pela Equação 3.5.

$$G_{IIc} = \frac{3m \cdot P_{Máx}^2 \cdot a_0^2}{2B} \quad (3.5)$$

sendo ( $m$ ) o coeficiente CC que representa a inclinação da curva, ( $P_{Máx}$ ) a força máxima para início da delaminação, ( $a_0$ ) o comprimento da fenda para início da delaminação (30 mm) e  $B$  a largura do corpo de prova.

Quando a etapa NPC é concluída, há a necessidade de verificar e refazer novas marcações para o ensaio PC. Após o ensaio do corpo de prova, verifica-se a distância que a trinca percorreu a partir da ponta do inserto e toma-se o fim da trinca. As novas marcações para o ensaio PC serão com os mesmos comprimentos de fenda utilizados para o NPC (20 mm, 30 mm e 40 mm), porém estas medidas serão tomadas a partir do final da trinca e não da ponta do inserto. A Figura 3.41 ilustra como se deve proceder para as novas marcações.

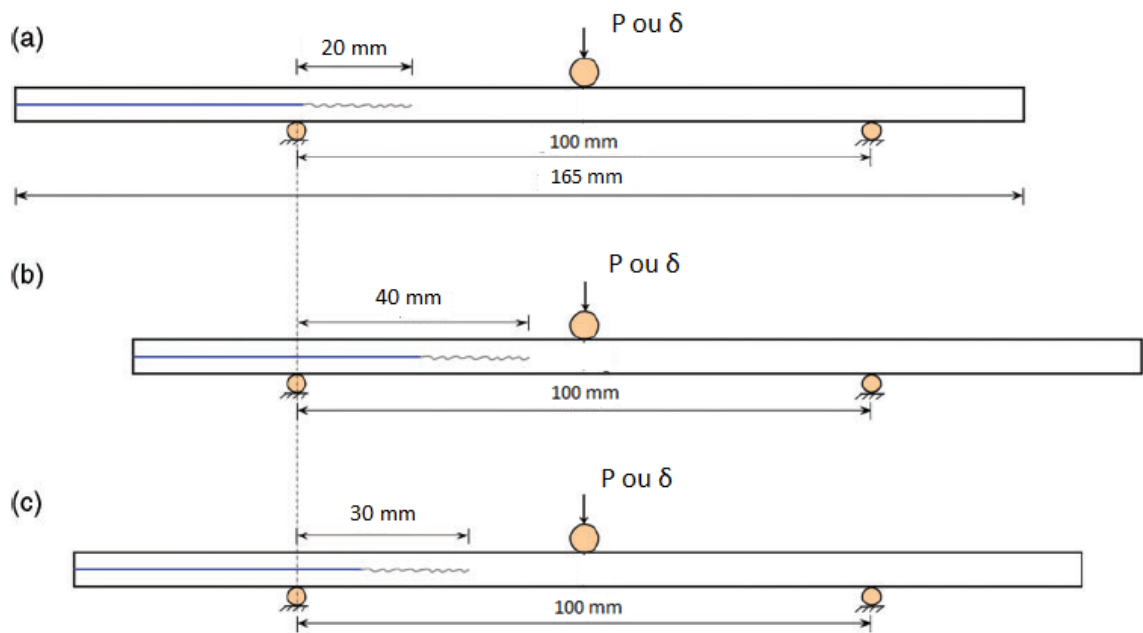


Figura 3.41 - Marcação dos novos comprimentos das fendas a partir do final da trinca.

Fonte: Adaptado de (SHIVAKUMAR *et al.*, 2015).

Os ensaios para a etapa PC serão realizados da mesma forma para etapa NPC, porém os valores das forças e deslocamento do punção serão diferentes. Os coeficientes CC e o  $G_{IIc}$  também serão determinados e calculados de maneira semelhante à etapa NPC. As Figuras 3.42, 3.43 e 3.44 apresentam os corpos de prova sendo ensaiados com as novas marcações de comprimento da fenda.

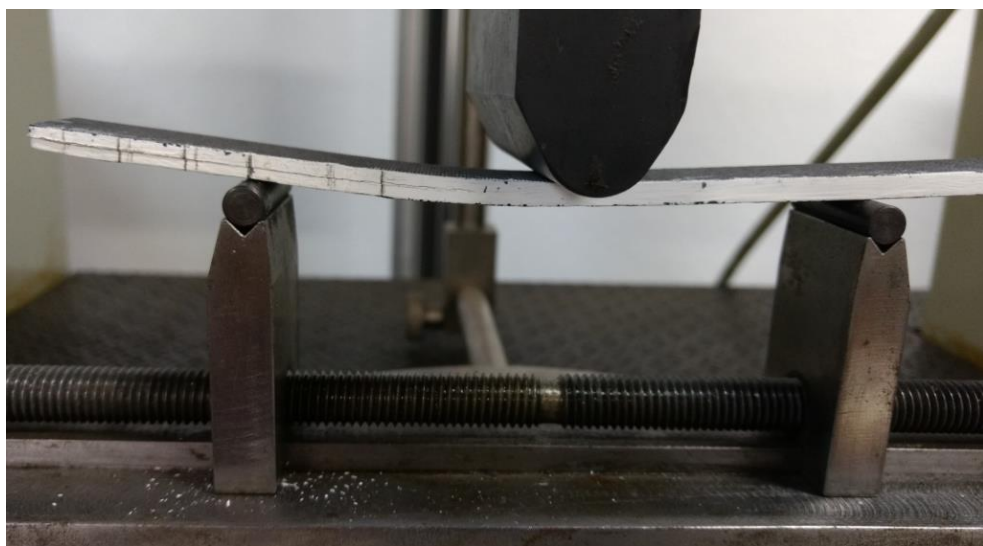


Figura 3.42 - Corpo de prova no dispositivo de ensaio comprimento de fenda  $a = 20$  mm.

Fonte: Autor

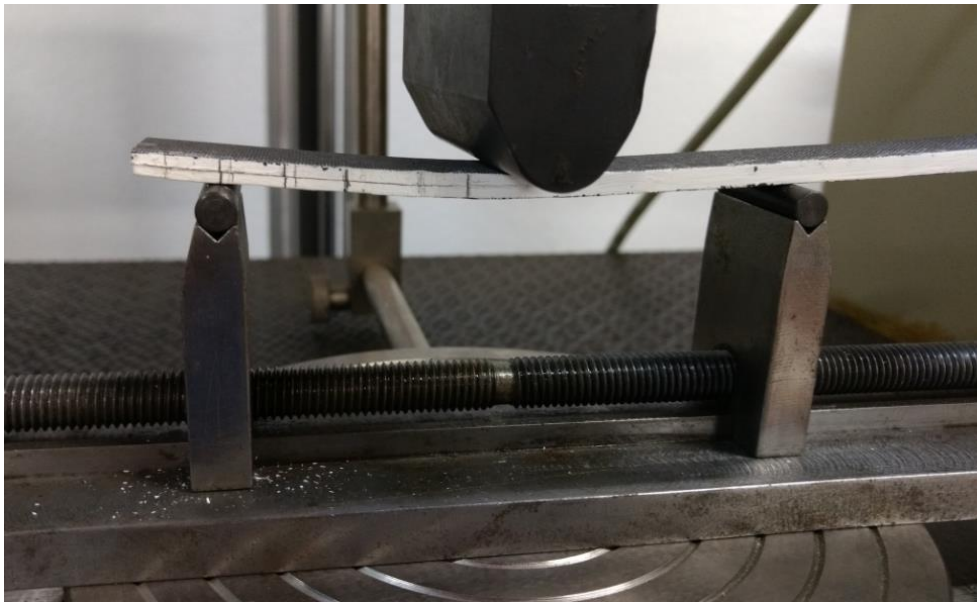


Figura 3.43 - Corpo de prova no dispositivo de ensaio comprimento de fenda  $a = 40$  mm.

Fonte: Autor

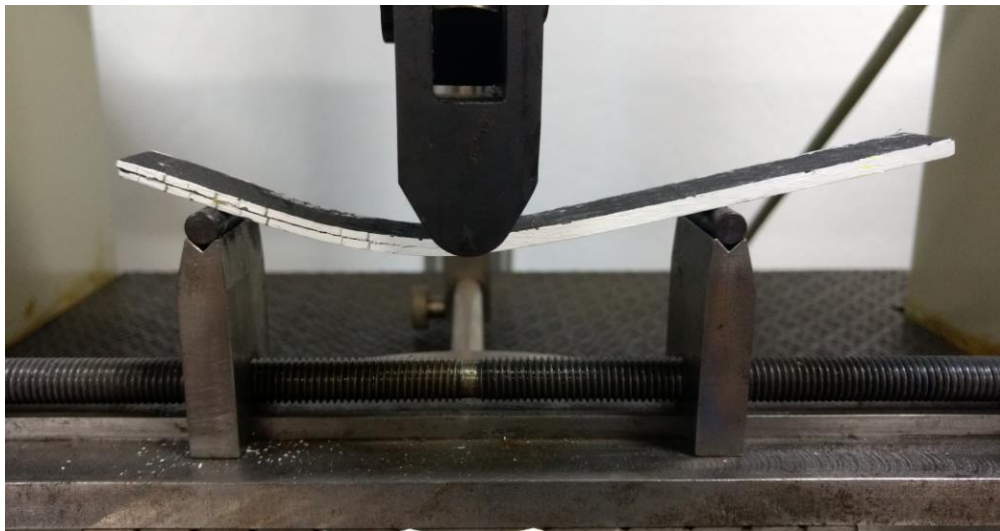


Figura 3.44 - Corpo de prova no dispositivo de ensaio comprimento de fenda  $a = 30$  mm.

Fonte: Autor

### 3.2.6 Microscopia

As micrografias que serão apresentadas e analisadas foram feitas por microscopia óptica e estereoscópica. Os equipamentos utilizados foram o microscópio óptico ZEISS - JENA VERT acoplado à câmera Infinity 1 e o estereoscópio Olympus SZ61, acoplado à câmera Infinity 1.

As amostras foram cortadas na seção transversal para a observação da morfologia interna dos compósitos fabricados, obter informações referentes à homogeneidade e compactação das camadas de fibra de carbono. Algumas micrografias foram feitas das seções longitudinais dos corpos de prova após a usinagem, com a finalidade de identificar as regiões com *tufts* e possíveis defeitos nessas regiões.

Foram registradas também imagens após os ensaios de tenacidade à fratura interlaminar, para identificar regiões ricas em resinas, bem como o rompimento dos *tufts*.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Processo de Costura *Tufting*

Como mencionado anteriormente, os testes iniciais foram realizados com fios de poliamida 6 à baixas velocidades de trabalho, 1 *tuft* a cada 13 segundos, padrões de inserção 5x5 e 7x7 e penetração da agulha de 20 mm e o movimento de retorno da agulha. Se o padrão de inserção escolhido foi o de 5x5, o movimento de retorno da agulha, a partir da origem na direção Z, é de 5 mm, e se o padrão de inserção escolhido foi o de 7x7, o movimento de retorno da agulha, a partir da origem na direção Z, é de 7 mm. Inúmeras tentativas foram realizadas modificando-se os parâmetros de movimentação, porém não se obtinha uma grande sequência de inserções e formação de *loops* e *tufts*.

Outro agravante foi o calcador, pois, em algumas inserções, o mesmo arrastava e/ou enrugava o tecido e também puxava a costura presente na superfície da preforma, desmanchando os *loops* e o *tufts* anteriormente formados. Houve situações em que o calcador se prendeu ao tecido e ocasionou a quebra da agulha. Mesmo tendo importantes funções, não se obteve bons resultados e os testes passaram a ser realizados sem o calcador.

Sendo assim, iniciaram-se os testes somente com a agulha, e as primeiras tentativas foram novamente com os parâmetros iniciais.

Nas primeiras inserções, os resultados não foram satisfatórios. Pôde-se observar que a baixa velocidade de trabalho e os padrões de inserção não tiveram influência nos resultados, contudo a movimentação de 20 mm na direção Z não estava sendo suficiente para a formação dos *loops* e *tufts*. Com isso, o novo valor assumido de inserção foi de 28 mm. Com este novo movimento de penetração conseguiu-se uma considerável sequência de inserções, sem defeitos. Mesmo assim, continuou-se modificando até chegar ao menor valor, que foi de 26 mm.

Após ajustado o parâmetro de inserção, começou-se a modificar a velocidade de trabalho. De 1 *tuft* a cada 13 segundos, passou-se a trabalhar com 1 *tuft* a cada 8 segundos. Bons resultados foram obtidos, porém ainda estava demandando muito tempo e mais testes foram feitos até que se conseguiu chegar em 1 *tuft* a cada 4 segundos. Sendo assim, essa foi estipulada como a velocidade de trabalho.

Tendo estes dois parâmetros ajustados, deu-se início à manufatura das preformas para os ensaios de tração e tenacidade à fratura interlaminar com os padrões de inserção 5x5 e 7x7.

A Figura 4.1 exibe as costuras na superfície superior de uma preforma durante o processo de *tufting* com linha de poliamida 6.

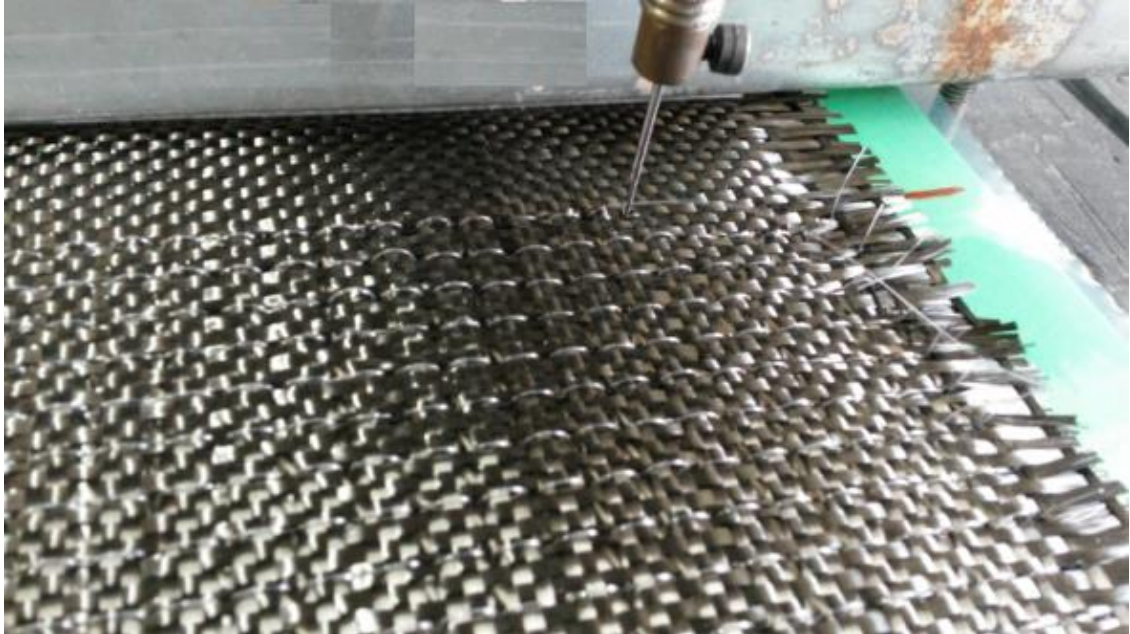


Figura 4.1 - Costuras na superfície superior da preforma formadas pela técnica *tufting*.

Fonte: Autor

A Figura 4.2 ilustra a superfície inferior de preforma costurada para o ensaio de tração, com um padrão de inserção 7x7, sendo possível notar o alinhamento entre os *loops* formados durante o processo (região marcada em vermelho).

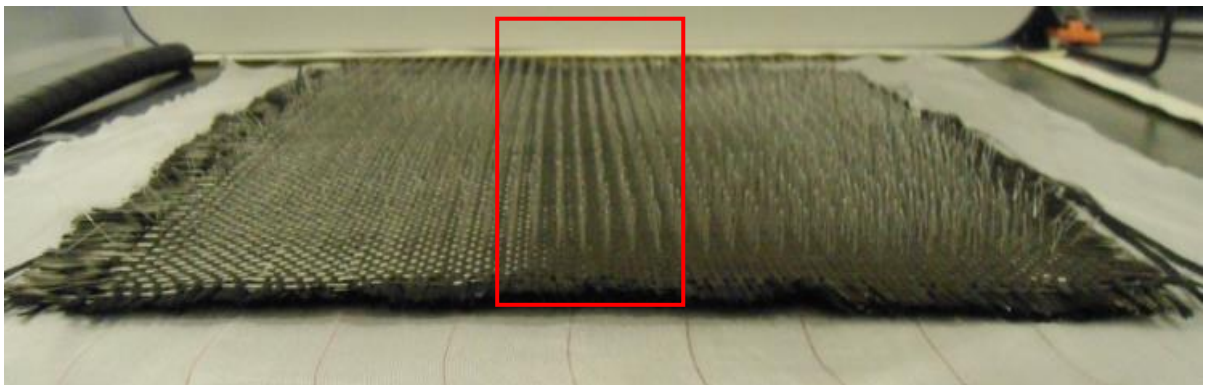


Figura 4.2 - *Loops* formados no processo *tufting* com padrão de inserção 7x7.

Fonte: Autor

Na Figura 4.3 é possível identificar os *loops* formados na preforma para o ensaio de tenacidade à fratura interlaminar. Estes se apresentam alinhados e com um tamanho uniforme em toda extensão da placa.



Figura 4.3 - *Loops* na superfície inferior da preforma.

Fonte: Autor

Após a manufatura das preformas usando linha de poliamida 6, iniciaram-se os testes com a linha de fibra de vidro. Os parâmetros escolhidos foram os pré-estabelecidos para as costuras com poliamida 6, porém, para as preformas com costura de fibra de vidro, somente o padrão de inserção 7x7 foi utilizado.

Os testes foram iniciados mediante a movimentação na direção da espessura, a partir da origem em Z, de 26 mm, velocidade de trabalho de 1 tuft a cada 4 segundos, e o movimento de ascensão da agulha, em relação a superfície superior da preforma, de 7 mm. Diversas tentativas foram feitas, mas os resultados não estavam sendo satisfatórios. Notou-se que quando acontecia o movimento de subida de 7 mm, a alimentação do fio não era suficiente e acontecia uma movimentação da costura anterior e, por este fato, foi necessário o aumento de 1 mm. Portanto, o movimento de subida passou a ser 8 mm.

Novos testes foram realizados, mas ainda assim houve alguns defeitos de inserção, resolveu-se, então, diminuir a velocidade de trabalho de 1 tuft a cada 4 segundos para 1 tuft a cada 5 segundos. Os resultados alcançados foram adequados para que se iniciasse a fabricação das preformas com reforço de fibra de vidro. As Figuras 4.4 a) e 4.4 b) mostram as costuras na parte de cima e os *loops* na parte de baixo da preforma, respectivamente.

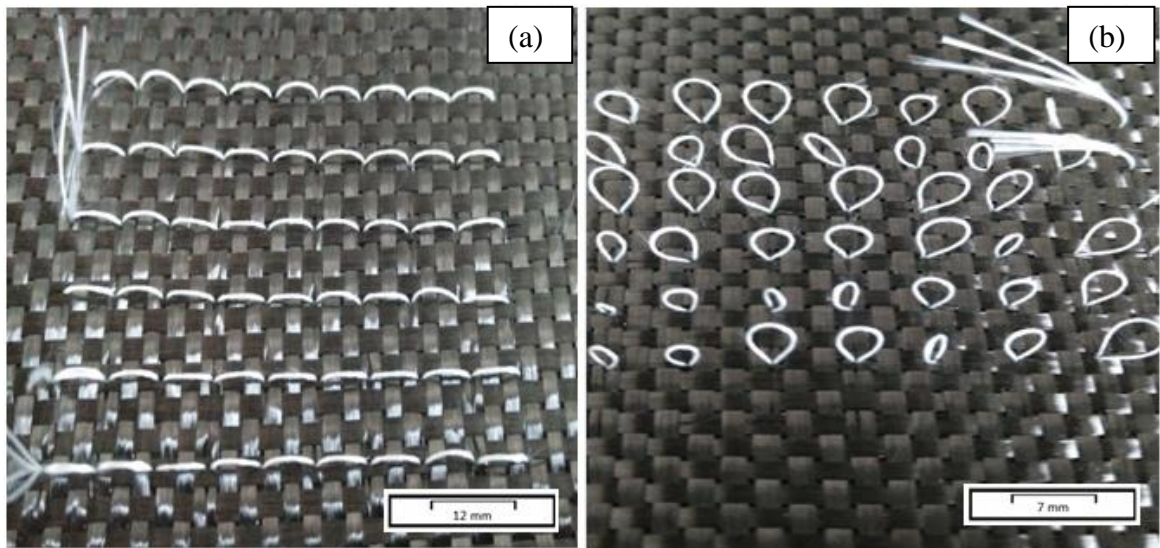


Figura 4.4 - Costuras (a) e *loops* (b) formados nos testes

Fonte: Autor

A Figura 4.5 mostra a preforma preparada para o ensaio de tração logo após o término do processo de *tufting*.

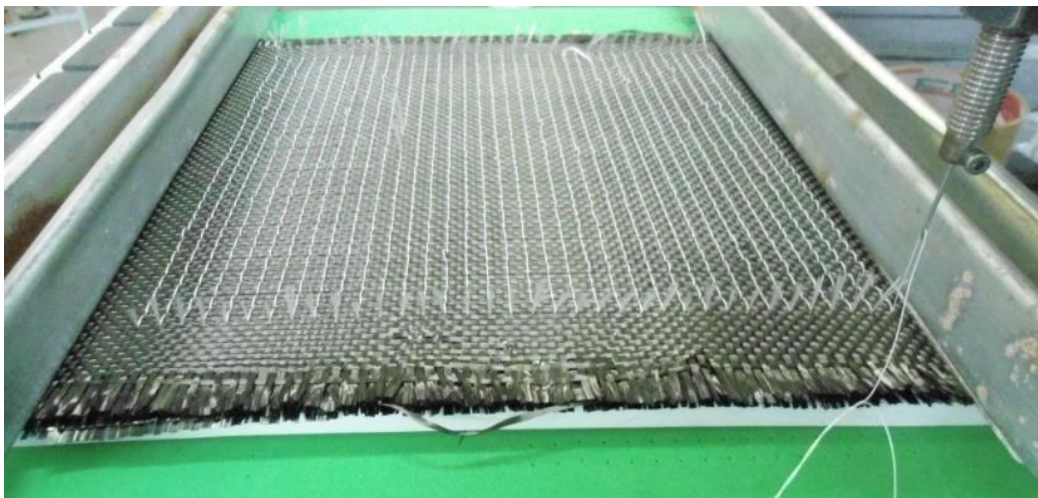


Figura 4.5 - Superfície superior da preforma manufaturada para os ensaios de tração.

Fonte: Autor

As Figuras 4.6 e 4.7 identificam os *loops* formados durante a costura. Comparados aos *loops* formados com a linha de poliamida 6, estes não se apresentam tão ordenados e alguns apresentam tamanhos diferentes. Um dos motivos da diferença de tamanho é que no momento da retirada da preforma do filme de poliamida 6, que separa a preforma da placa de EVA, alguns



*loops* ficam mais fixados que os outros e acabam extraindo a linha e aumentam de tamanho, conseqüentemente os *loops* vizinhos diminuem.

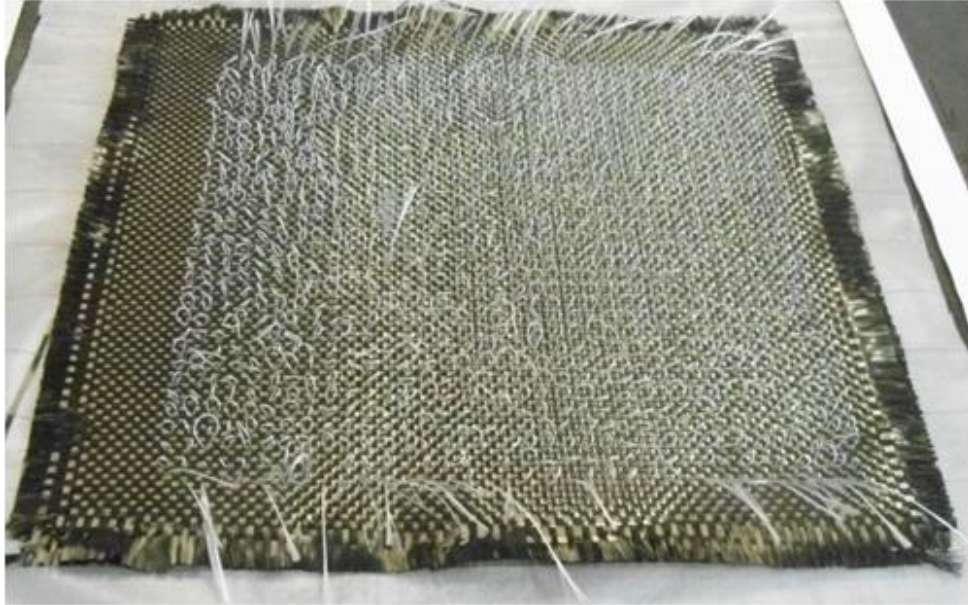


Figura 4.6 - *Loops* na superfície inferior da preforma manufaturada para os ensaios de tração.

Fonte: Autor



Figura 4.7 - *Loops* na superfície inferior da preforma manufaturada para os ensaios em modo II.

Fonte: Autor

## 4.2 Aspectos qualitativos

Após os processos de infusão e usinagem dos corpos de prova, a verificação e avaliação qualitativa dos compósitos fabricados e a digestão ácida para calcular os volumes de fibra, resina e vazios foram realizadas.

A avaliação das seções longitudinais foi feita por meio de micrografias obtidas com o auxílio de um microscópio óptico modelo JENAVERT, da marca ZEISS, e pelo estereoscópio SZ61, da marca OLYMPUS. As principais regiões analisadas foram aquelas localizadas próximas dos *tufts*.

### 4.2.1 Volumes de fibra, resina e vazios

A caracterização dos compósitos por digestão ácida foi realizada para verificação dos compósitos após processo de infusão VARTM avaliando o volume de fibra ( $V_f$ ), volume de resina ( $V_r$ ) e o volume de vazios ( $V_v$ ) para os compósitos fabricados para os ensaios de tração e de ensaio de tenacidade à fratura interlaminar em modo II.

A Tabela 4.1 resume os resultados encontrados para os compósitos fabricados para os ensaios de tração.

Tabela 4.1 - Volumes de fibra, resina e vazios dos compósitos para ensaio de tração.

CDP	$V_f$ (%)		$V_r$ (%)		$V_v$ (%)	
	Média	Desv.Pad	Média	Desv.Pad	Média	Desv.Pad
T1R7PA	43,47	0,23	55,83	0,46	0,7	0,23
T2R7FV	49,5	0,77	49,92	0,65	0,58	0,12
T3SR	55,88	0,11	42,4	0,18	1,72	0,29
T4R5PA	38,1	0,13	60	0,32	1,9	0,45

Os compósitos T2R7FV e T3SR apresentaram os valores esperados de volume de fibra, matriz e vazios. No entanto, T1R7PA e T4R5PA apresentaram valores de volume de matriz superiores aos de reforço pelo fato de a poliamida 6 poder ter ocasionado bolsas de resina superficiais e isso pode interferir nas propriedades mecânicas do material.

A Tabela 4.2 resume os resultados encontrados para os compósitos manufacturados para os ensaios de tenacidade à fratura interlaminar.

Tabela 4.2 - Volumes de fibra, resina e vazios dos compósitos para ensaio ENF.

CDP	V <sub>f</sub> (%)		V <sub>r</sub> (%)		V <sub>v</sub> (%)	
	Média	Desv.Pad	Média	Desv.Pad	Média	Desv.Pad
E1R7PA	45,77	0,36	53,5	0,75	0,73	0,39
E2R7FV	50,91	0,12	48,67	0,17	0,42	0,29
E3SR	49,96	0,48	49,76	0,59	0,28	0,11
E4R5PA	49,73	0,92	48,65	1,41	1,62	0,49

Os compósitos fabricados para os ensaios em modo II apresentaram volumes de fibra, resina e vazios dentro do esperado, com exceção de E1R7PA que apresentou maior volume de resina em relação ao de fibra, isto pode ser devido as bolsas de resina superficiais ocasionadas pela linha de poliamida 6.

## 4.2.2 Microscopia óptica

### 4.2.2.1 Inclinação das linhas de reforço 3D

Através das micrografias obtidas pelo microscópio óptico e pelo microscópio estereoscópio, foi possível avaliar e fazer comparações entre os compósitos fabricados para os ensaios de tração e tenacidade a fratura em modo II.

Nos compósitos fabricados para o ensaio de tração pôde-se perceber que a angulação das linhas de reforço de poliamida 6 e fibra de vidro apresentaram inclinações diferentes após a infusão.

A Figura 4.8 é de uma micrografia, com aumento de 6,7x, da seção longitudinal de um compósito mostrando a inclinação das linhas de poliamida 6 utilizadas como reforço. As linhas vermelhas ajudam a identificar e visualizar a inclinação.

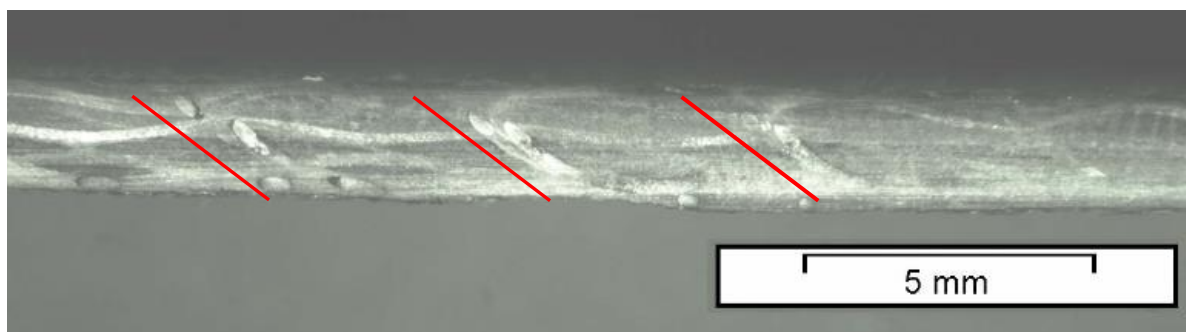


Figura 4.8 - Seção longitudinal de um CDP para ensaio de tração reforçado com linha de poliamida 6.

Fonte: Autor

A Figura 4.9 é de uma micrografia, com aumento de 6,7x, da seção longitudinal de um compósito mostrando a inclinação das linhas de fibra de vidro utilizadas como reforço. As linhas vermelhas ajudam a identificar e visualizar a inclinação.

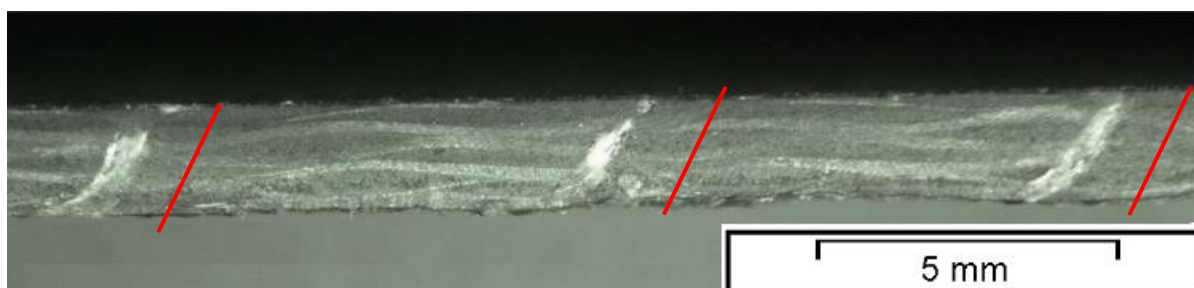


Figura 4.9 - Seção longitudinal de um CDP para ensaio de tração reforçado com linha de fibra de vidro.

Fonte: Autor

Esta diferença de angulação entre as linhas de poliamida 6 e fibra de vidro acontece da etapa de fechamento da bolsa de vácuo antes da infusão. Pelo fato de as linhas de poliamida 6 serem menos flexíveis e maleáveis que as de as linhas de fibra de vidro, elas se inclinam mais quando o vácuo é aplicado. Pode ocorrer também pelo processo de costura não ter compactado a preforma suficientemente.

Para os compósitos fabricados para o ensaio de tenacidade a fratura interlaminar também ocorreu a inclinação das linhas usadas como reforço tridimensional. A Figura 4.10 é de uma micrografia, com aumento de 6,7x, da seção longitudinal de um compósito mostrando a inclinação das linhas de poliamida 6 utilizadas como reforço. As linhas vermelhas ajudam a identificar e visualizar a inclinação.

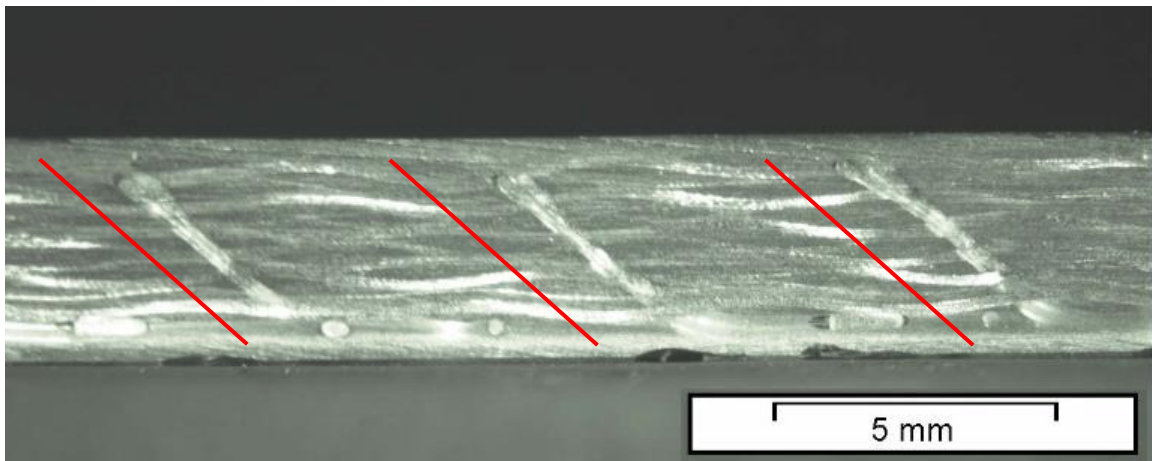


Figura 4.10 - Seção longitudinal de um CDP para ensaio de tenacidade à fratura interlaminar reforçado com linha de poliamida 6.

Fonte: Autor

A Figura 4.11 é de uma micrografia, com aumento de 8x, da seção longitudinal de um compósito mostrando a inclinação das linhas de fibra de vidro utilizadas como reforço. As linhas vermelhas ajudam a identificar e visualizar a inclinação.

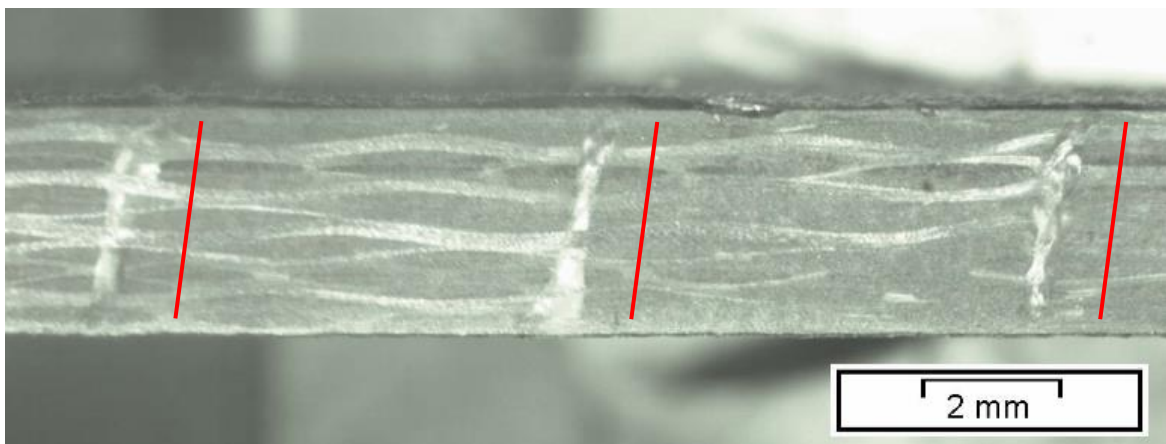


Figura 4.11- Seção longitudinal de um CDP para ensaio de tenacidade à fratura interlaminar reforçado com linha de fibra de vidro.

Fonte: Autor

A angulação das linhas ocorreu novamente pelo mesmo motivo, entretanto a linha de fibra de vidro apresentou uma angulação menor comparada àquela que foi mostrada anteriormente nos compósitos fabricados para o ensaio de tração.

#### 4.2.2.2 Defeitos de processo

Durante a análise das micrografias que evidenciavam as inclinações das linhas utilizadas como reforço, pode-se identificar também que nas regiões em torno das linhas de poliamida 6 estava ocorrendo defeitos de impregnação tanto nos compósitos fabricados para os ensaios de tração quanto para os fabricados para os ensaios de tenacidade à fratura interlaminar.

A Figura 4.12 é de uma micrografia, com aumento de 45x, identificando um defeito de impregnação na região em torno da linha de poliamida 6 em um corpo de prova para ensaio de tração. É possível identificar a linha de poliamida 6 na parte demarcada em vermelho.

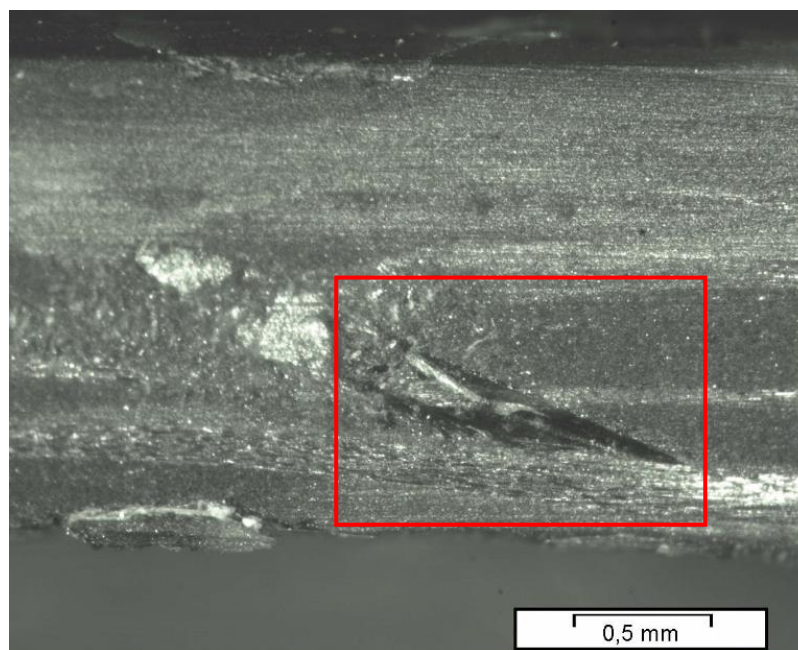


Figura 4.12 - Defeito de impregnação em torno da linha de poliamida 6 de um CDP para o ensaio de tração.

Fonte: Autor

Nas regiões analisadas em torno das linhas de reforço tridimensional de fibra de vidro não se identificou nenhum defeito de impregnação. A Figura 4.13 é de uma micrografia, com aumento de 25x, identificando a região em torno da linha de fibra de vidro em um corpo de prova para ensaio de tração.

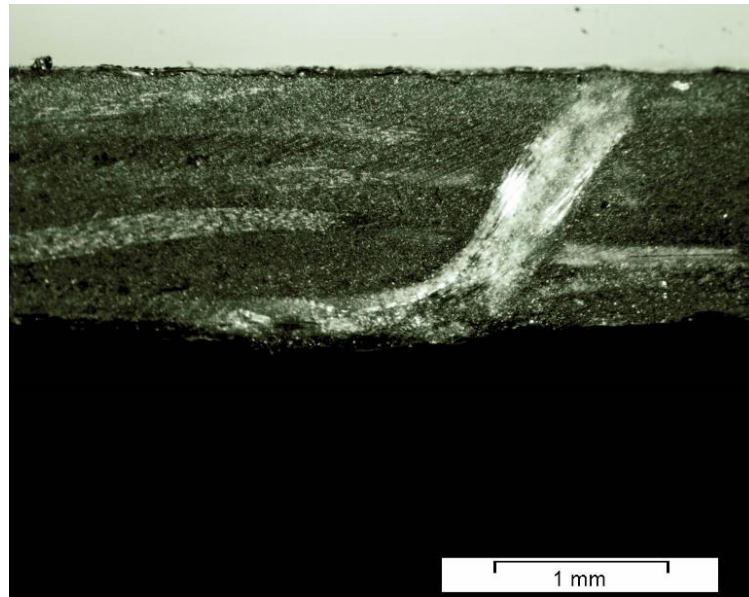


Figura 4.13 - Região em torno de um reforço tridimensional de fibra de vidro.

Fonte: Autor

Assim como para os compósitos fabricados para o ensaio de tração, os fabricados para o ensaio de tenacidade à fratura também apresentaram defeitos de impregnação nas regiões ao redor da linha de poliamida 6. A Figura 4.14 é de uma micrografia, com aumento de 30x, identificando um defeito de impregnação na região em torno da linha de poliamida 6 em um corpo de prova para ensaio de tenacidade à fratura interlaminar onde é possível identificar quase a totalidade da linha de poliamida 6 inserida na direção da espessura.

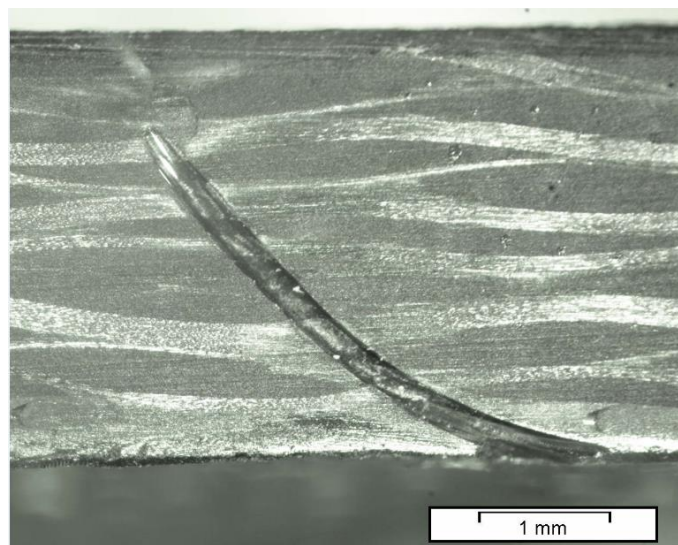


Figura 4.14 - Região com defeito de impregnação de um CDP para o ensaio de tenacidade à fratura interlaminar.

Fonte: Autor

Nas regiões analisadas em torno das linhas de reforço tridimensional de fibra de vidro não se identificou nenhum defeito de impregnação. A Figura 4.15 é de uma micrografia, com aumento de 25x, identificando a região em torno da linha de fibra de vidro.

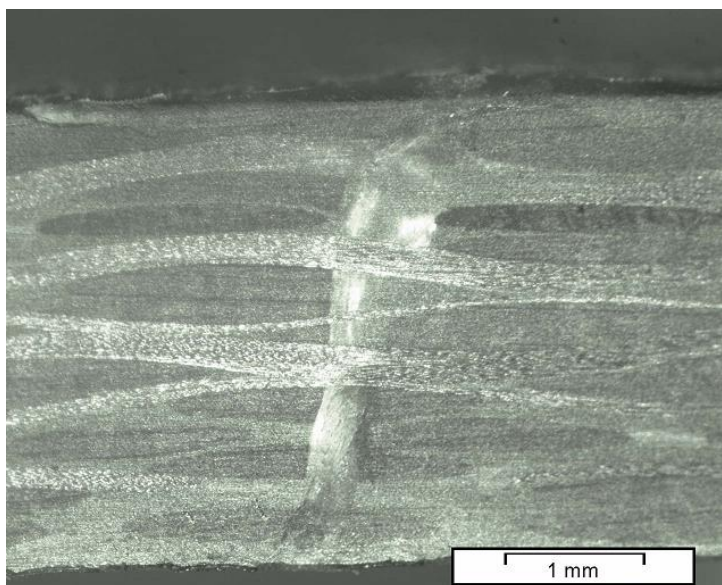


Figura 4.15 - Região em torno de um reforço tridimensional de fibra de vidro.

Fonte: Autor

Nas regiões em volta das linhas de reforço de fibra de vidro não se detectou nenhum defeito de impregnação porque existe compatibilidade entre a fibra de vidro e a resina. Os defeitos de impregnação ao redor das linhas de poliamida 6 podem ser pelo fato de as mesmas não apresentarem compatibilidade com a resina epóxi.

### 4.3 Desalinhamento das fibras e regiões ricas em resina

O desalinhamento das fibras é decorrente do processo *tufting*, pois quando a agulha penetra na preforma e insere a linha de reforço acontece a separação dos filamentos dos cabos do urdume e da trama que formam o tecido. A Figura 4.16 mostra uma preforma reforçada através da espessura com fibra de vidro antes do processo de infusão e as regiões destacadas em vermelho indicam o desalinhamento das fibras.



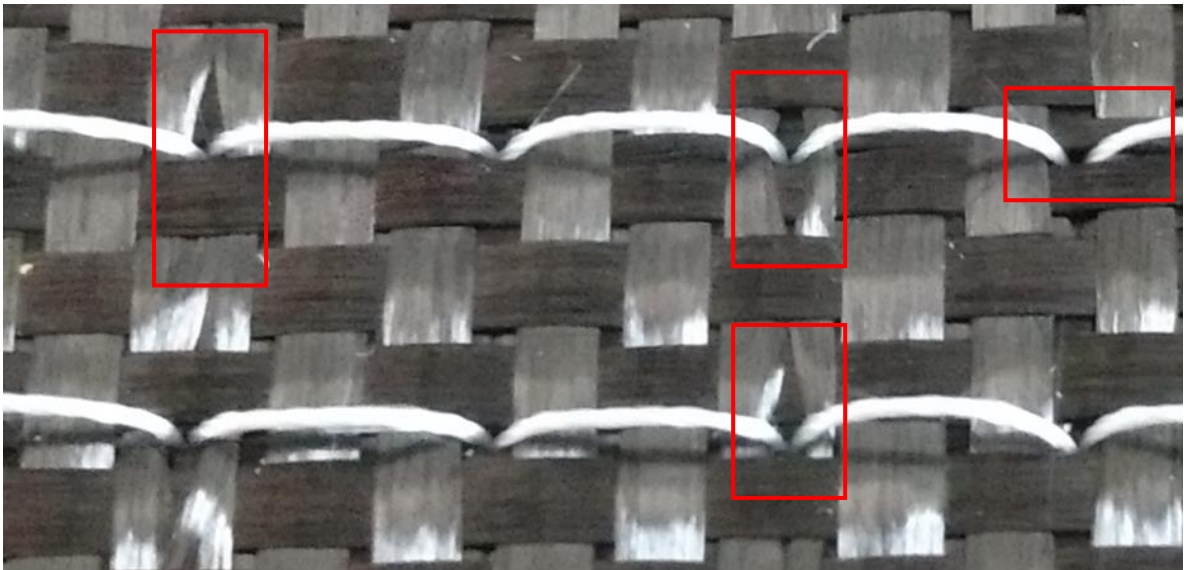


Figura 4.16 - Desalinhamentos das fibras ocasionados pelo processo de costura *tufting*.

Fonte: Autor

Esse desalinhamento causado pela inserção da agulha e a presença da linha inserida através da espessura faz com que essas regiões fiquem vazias e após o processo de infusão se tornam uma área com maior volume de resina e são caracterizadas como regiões ricas em resina. As Figuras 4.17 e 4.18 indicam com setas pretas os desalinhamentos das fibras e as regiões ricas em resina de compósitos reforçados através da espessura com linhas de poliamida 6 e fibra de vidro pelo método *tufting*.

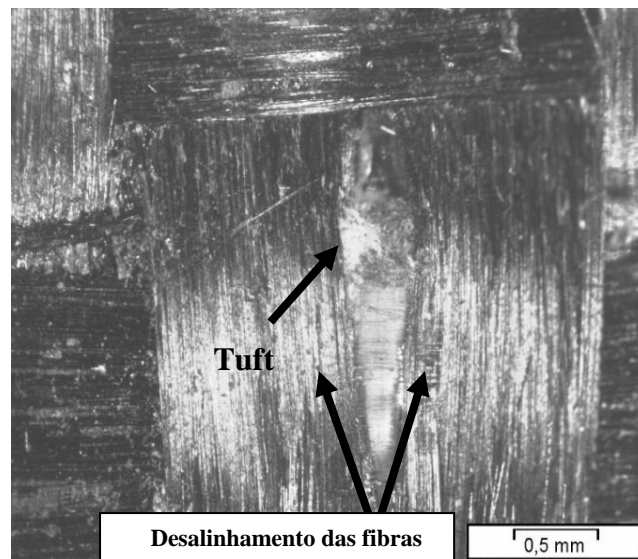


Figura 4.17 - Vista de topo do desalinhamento das fibras ocasionadas pelo processo de costura *tufting* com linha de fibra de vidro.

Fonte: Autor

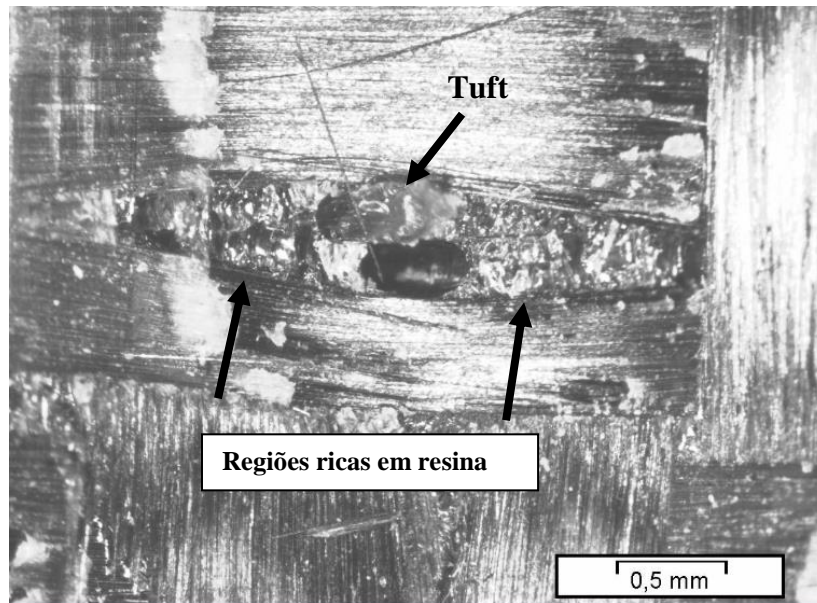


Figura 4.18 - Vista de topo da região rica em resina (*tufting* com linha de poliamida 6).

Fonte: Autor

## 4.4 Ensaios estáticos

### 4.4.1 Ensaio de resistência à tração

Os ensaios de resistência à tração foram realizados em 5 corpos de prova, de cada compósito, para determinação e avaliação das propriedades no plano dos compósitos. A Tabela 4.3 descreve os resultados obtidos para o Módulo de Elasticidade ( $E$ ) e a resistência à tração ( $\sigma_r$ ). A Figura 4.8 mostra as curvas tensão-deformação representativas do ensaio, indicando a tensão de ruptura e inclinação da curva (módulo elástico) para cada tipo de compósito. Os Apêndices de A à D apresentam as curvas e os valores dos ensaios resumidos na Tabela 4.3 e na Figura 4.19.

Tabela 4.3 - Resultados do ensaio de resistência à tração.

Compósito	$E$ (GPa)		$\sigma_r$ (MPa)	
	Média	Desv.Pad	Média	Desv.Pad
T1R7PA	44,49	2,33	483,56	18,85
T2R7FV	59,78	2,47	693,99	25,47
T3SR	67,25	2,57	773,36	24,83
T4R5PA	45,68	3,57	459,5	30,41

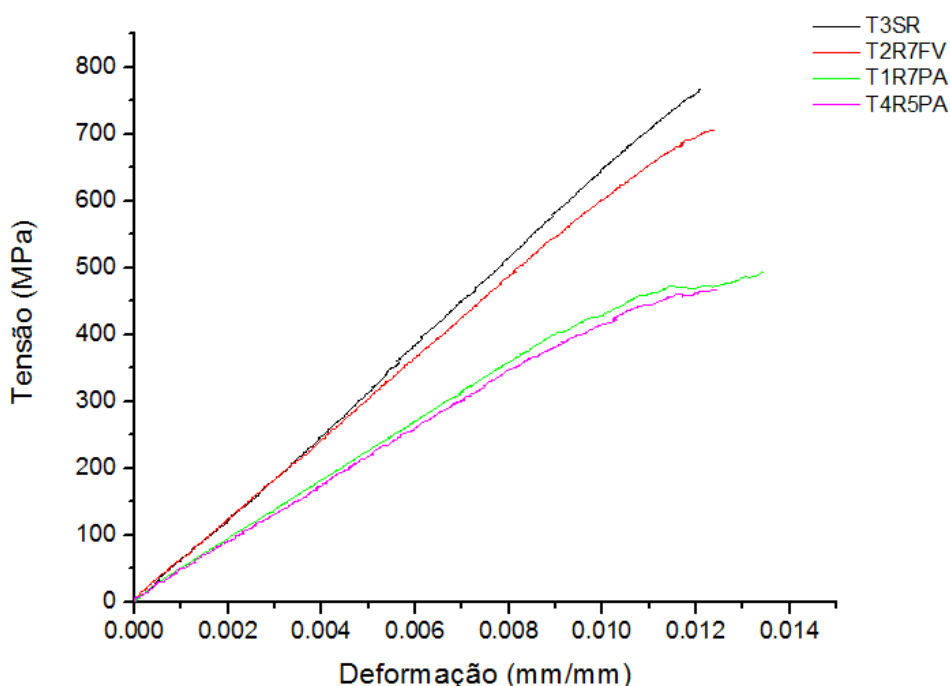


Figura 4.19 - Curvas tensão em função da deformação representativas dos ensaios de resistência à tração.

Fonte: Autor

A tensão de ruptura das amostras reforçadas com fibra de vidro (T2R7FV) reduziu aproximadamente 10% comparada com o compósito sem reforço (T3SR), já amostras reforçadas com poliamida 6, T1R7PA e T4R5PA, tiveram uma redução de aproximadamente 37 % e 40%, respectivamente. A ruptura dos corpos-de-prova reforçados, em todos os casos, aconteceu em uma linha de *tufts*. As regiões selecionadas em vermelho na Figura 4.20 representam a ruptura na região da costura. No canto superior da figura há a indicação do urdume ( $0^\circ$ ) e da trama ( $90^\circ$ ). A costura foi realizada na direção da trama e conforme indicado em amarelo na Figura 4.20b).

O módulo elástico ( $E$ ) dos compósitos reforçados também apresentou uma redução comparado ao do compósito sem reforço, sendo aproximadamente 11%, 34% e 32% para T2R7FV, T1R7PA e T4R5PA, respectivamente.

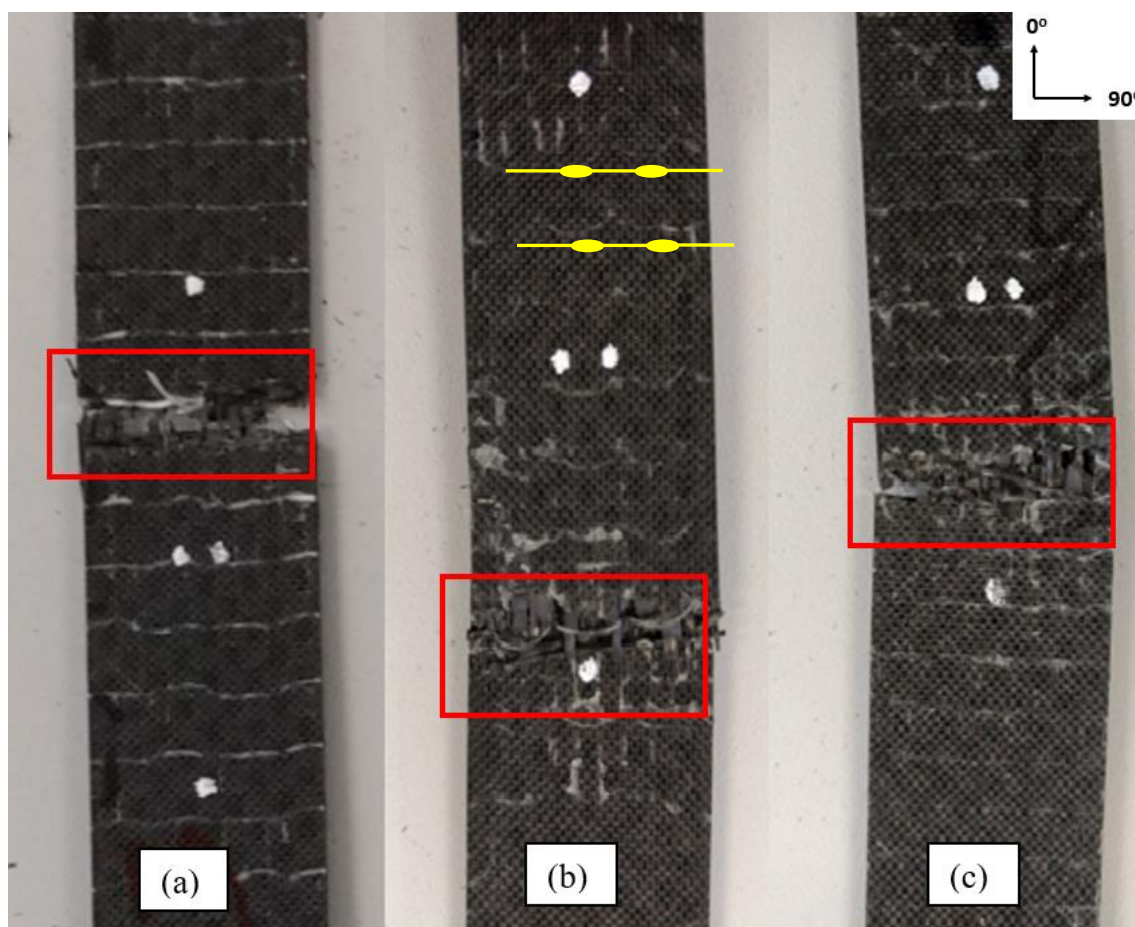


Figura 4.20 - Região de ruptura das amostras a) T2R7FV, b) T1R7PA e c) T4R5PA.

Fonte: Autor

A redução entre 10% - 20% dos valores da tensão de ruptura (DELL'ANNO, 2007; DE VERDIERE 2009, ZHANG, 2012), e do módulo elástico (DE VERDIERE, 2009, TREIBER, 2011) em compósitos reforçados na direção da espessura e a ruptura dos corpos de prova nas linhas de reforço são ocasionadas devido ao desalinhamento, ondulação e quebra das fibras do tecido e a formação de regiões ricas em resina em virtude da inserção de um reforço no compósito (TREIBER, 2011). O desalinhamento e a ondulação das fibras se tornam concentradores de tensão, e o maior volume de resina ao redor das linhas de reforço promove uma iniciação de trinca, favorecendo a diminuição das propriedades no plano (TREIBER, 2011; DELL'ANNO, 2007)

A Figura 4.21 elucida o desalinhamento das fibras do tecido uma região rica em resina para um compósito com reforço de fibra de vidro.

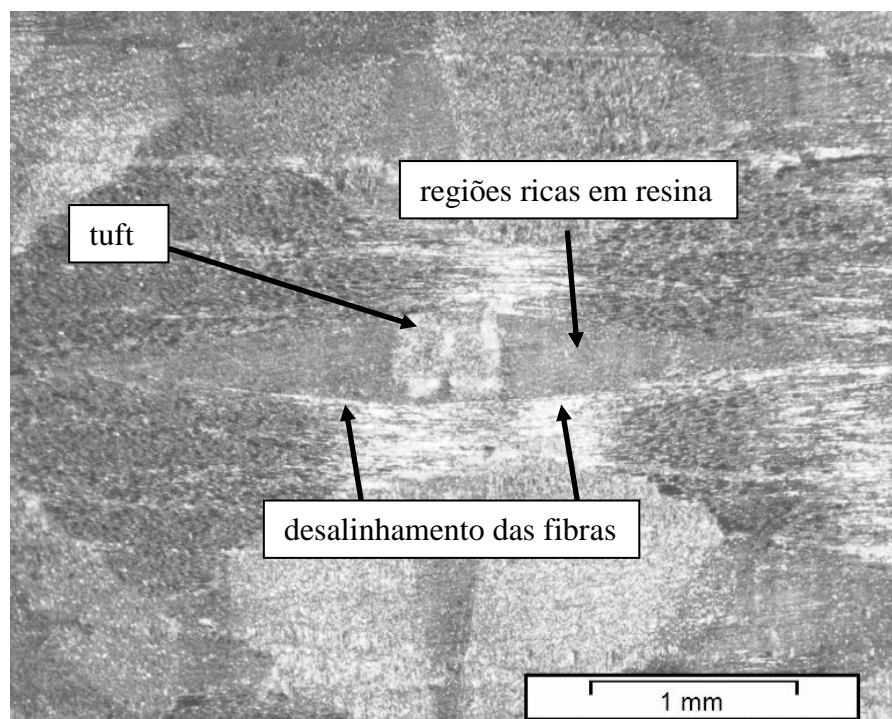


Figura 4.21 - Micrografia do desalinhamento e da região rica em resina ao redor do reforço.

Fonte: Autor

Os elevados valores de redução da tensão de ruptura e do módulo de elasticidade que os materiais reforçados com poliamida 6 apresentaram podem ter sido causados pelo fato de os compósitos apresentarem maior volume de resina em relação ao de reforço, a linha de poliamida 6 se tornar uma perturbação e por apresentar falta de interface com a matriz, não ocorrendo a impregnação da resina durante o processo de infusão - ao contrário das fibras de vidro, que se tornam parte integral do compósito (OSMIANI *et al*, 2016) - e conseqüentemente formando uma região com maior volume de resina no seu entorno (TREIBER, 2011; MOURITZ, 2007). A Figura 4.22 (aumento de 8x) mostra o espaçamento entre os *tufts* e identifica as regiões com defeitos de impregnação, ao redor dos *tufts*, para os compósitos reforçados com poliamida 6.

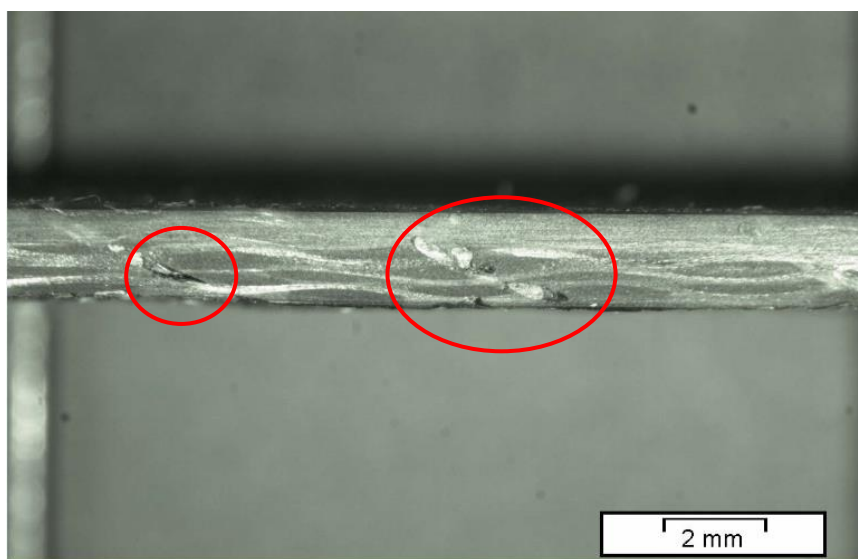


Figura 4.22 - Micrografia identificando, em vermelho, defeitos de impregnação em ao redor dos tufts.

Fonte: Autor

#### 4.4.2 Ensaio de resistência à fratura interlaminar em modo II (ENF)

Os ensaios em modo II foram realizados em 5 corpos de prova, de cada compósito, para a determinação das propriedades fora do plano dos compósitos fabricados.

Como não se tinha informações referentes às forças para cada comprimento de fenda a serem utilizadas nos ensaios e os valores de  $G_{IIc}$ , houve a necessidade da realização de "testes exploratórios" para cada tipo de compósito fabricado e para a etapa de ensaio (NPC e PC). Descreve-se a seguir detalhes os procedimentos adotados nestes "testes exploratórios" citados acima.

##### 4.4.2.1 Ensaio *Non-Precracked* (NPC)

Sendo assim, um corpo de prova de cada compósito com comprimento de fenda de 20 mm foi ensaiado de acordo com o procedimento de ensaio citado na seção 3.2.5.2 até o início da delaminação e a força,  $P$ , necessária para iniciar a delaminação foi denominada de  $P_{c20}$ . Para fendas de 40 mm outro corpo de prova foi ensaiado até que ocorresse a delaminação a partir da ponta do inserto e a força,  $P$ , que iniciou a delaminação foi denominada de  $P_{c40}$ . De acordo com

a norma ASTM D7905:2014, as forças utilizadas nos ensaios para a determinação dos coeficientes CC e do  $G_Q$  devem ser 50% de  $P_{c20}$  e  $P_{c40}$ .  $G_Q$  é tenacidade à fratura interlaminar preliminar, que deve ser checada para validação. Se esta for validada, então  $G_Q = G_{IIC}$ . A Tabela 4.4 descreve as forças utilizadas para  $a = 20$  mm em cada tipo de compósito.

Tabela 4.4 - Valores obtidos para os ensaios com comprimento da fenda de 20 mm.

Compósito	$a$ (mm)	$P_{c20}$ (N)	$0,5 P_{c20}$ (N)
E1R7PA	20	900	450
E2R7FV	20	900	450
E3SR	20	1000	500
E4R5PA	20	640	320

A Tabela 4.5 descreve os valores das forças utilizadas para um comprimento de fenda de 40 mm.

Tabela 4.5 - Valores obtidos para os ensaios com comprimento da fenda de 40 mm.

Compósito	$a$ (mm)	$P_{c40}$ (N)	$0,5P_{c40}$ (N)
E1R7PA	40	450	225
E2R7FV	40	450	225
E3SR	40	500	250
E4R5PA	40	320	160

Tendo os valores das forças para  $a = 20$  mm e  $a = 40$  mm, fez-se um ensaio de acordo com a seção 3.2.5.2 para determinar os valores de  $P_{Máx}$  ( $a = 30$  mm), dos coeficientes CC ( $A$  e  $m$ ) e de  $G_Q$ . A Tabela 4.6 exibe os valores que foram encontrados nos testes para cada tipo de compósito.

Tabela 4.6 - Resultados obtidos para  $P_{Máx}$ ,  $G_Q$ ,  $A$  e  $m$ .

Compósito	$0,5P_{c20}$ (N)	$0,5P_{c40}$ (N)	$P_{Máx}$ (N)	$G_Q$ (J/m <sup>2</sup> )	$A$	$m$
E1R7PA	450	225	698	157,51	7,60E-03	4,52E-08
E2R7FV	450	225	520	184,94	7,70E-03	9,69E-08
E3SR	500	250	757	197,71	4,10E-03	4,82E-08
E4R5PA	320	160	500	168,63	8,30E-03	9,38E-08

Após os ensaios houve a necessidade de avaliar se os valores obtidos validariam  $G_Q$ . A validação é feita de acordo com as Equações 4.1, 4.2 e 4.3.

$$\%G_{Qi} = \left[ \frac{100(P_i a_i)^2}{(P_{M\acute{a}x} a_0)^2} \right] \quad (4.1)$$

$$\%G_{Qj} = \left[ \frac{100(P_j a_j)^2}{(P_{M\acute{a}x} a_0)^2} \right] \quad (4.2)$$

$$G_Q = \frac{3m \cdot P_{M\acute{a}x}^2 \cdot a_0^2}{2B} \quad (4.3)$$

sendo ( $\%G_{Qi}$ ) o valor obtido quando o comprimento da fenda é de 20 mm, ( $P_{M\acute{a}x}$ ) a força que inicia a delaminação, ( $P_i$ ) é  $0,5P_{c20}$ , ( $a_i$ ) é 20 mm e  $a_0$  é 30 mm. E sendo ( $\%G_{Qj}$ ) o valor obtido quando o comprimento da fenda é de 40 mm, ( $P_{M\acute{a}x}$ ) a força que inicia a delaminação, ( $P_j$ ) é  $0,5P_{c40}$ , ( $a_j$ ) é 40 mm e  $a_0$  é 30 mm.  $B$  é a largura do corpo de prova e  $m$  é um dos coeficientes CC. Se ( $\%G_{Qi}$ ) e ( $\%G_{Qj}$ ) satisfizerem a condição  $15 \leq \%G_Q \leq 35$ , então  $G_Q = G_{IIC}$ . A Tabela 4.7 descreve os valores de ( $\%G_{Qi}$ ), ( $\%G_{Qj}$ ) e  $G_Q$  calculados para cada compósito.

Tabela 4.7 - Resultados calculados para  $\%G_{Qi}$ ,  $\%G_{Qj}$ , e  $G_Q$ .

Compósito	$\%G_{Qi}$	$\%G_{Qj}$	$G_Q = G_{IIC}$
E1R7PA	18,47	18,63	157,51
E2R7FV	32,54	33,28	184,94
E3SR	19,23	19,7	197,71
E4R5PA	17,97	18,43	168,63

Como os valores estavam de acordo com o exigido na norma ASTM D7905:2014, pôde-se prosseguir com os ensaios, da etapa NPC, para o cálculo do  $G_{IIC}$  dos compósitos. Os valores de  $G_{IIC}$  serão comparados e analisados no final da seção.



A Figura 4.23 apresenta as curvas de força em função do deslocamento para os corpos de prova do compósito E1R7PA (reforço com fio de poliamida 6 e padrão quadrado de inserção 7x7) ensaiados, na etapa NPC, para um comprimento da fenda de 30 mm e a Tabela 4.8 resume os valores calculados para a tenacidade à fratura interlaminar  $G_{IIC}$ , para a conformidade  $C$ , e para os coeficientes  $CC$ ,  $A$  e  $m$ . Pode-se verificar pela Tabela 4.8 que os valores da conformidade  $C$ , apresentaram valores similares (Desvio Padrão relativo de 4,5%). O mesmo ocorreu para os valores das forças para iniciar a delaminação  $P_{Máx}$  (Desvio Padrão relativo de 4,2%).

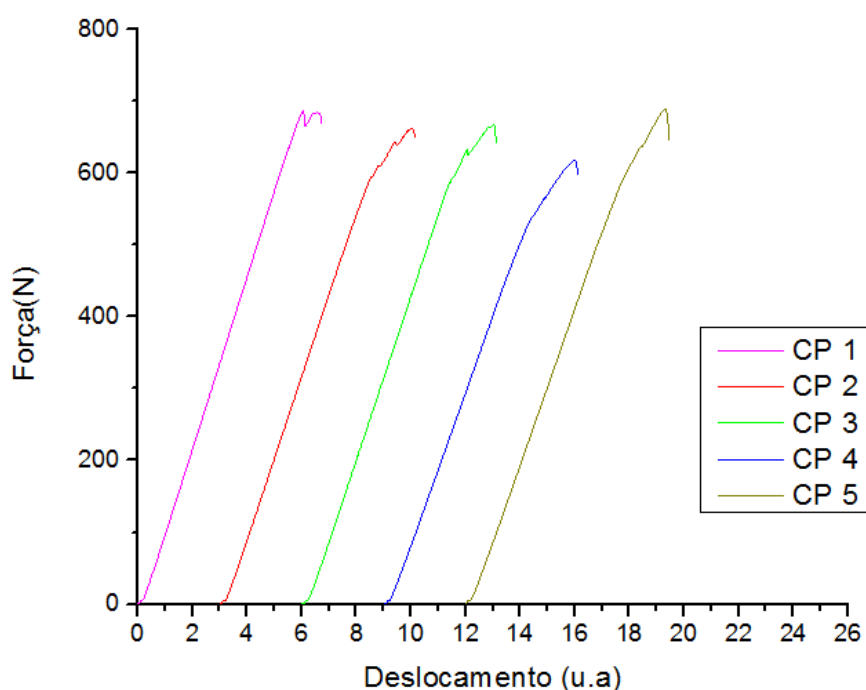


Figura 4.23 - Curvas  $P$  em função do  $\delta$  do ensaio para os corpos de prova de E1R7PA com  $a = 30$  mm.

A curvas CP2 a CP5 foram deslocadas por uma unidade arbitrário para facilitar a visualização.

Fonte: Autor

Tabela 4.8 - Resultados obtidos para a conformidade, coeficientes  $CC$ ,  $P_{Máx}$  e  $G_{IIC}$ .

CP	$a$ (mm)	$P_{Máx}$ (N)	$G_{IIC}$ (J/m <sup>2</sup> )	$\delta$ (mm)	$C$	$A$	$m$
1	30	684	144,02	6,69	0,0084	7,30E-03	4,33E-08
2	30	662	197,08	7,06	0,0088	7,20E-03	6,32E-08
3	30	667	171,04	7,04	0,0087	7,40E-03	5,43E-08
4	30	618	155,62	6,02	0,0094	8,00E-03	5,78E-08
5	30	689	198,03	7,3	0,0092	7,90E-03	5,86E-08
Média	-	664	173,158	6,822	0,0089	0,00756	5,54E-08
Desv.pad.	-	28,8	24,24	0,498	0,0004	0,000364	7,49E-09

A Figura 4.24 apresenta as curvas de força-deslocamento para os corpos de prova do compósito E2R7FV (reforço com fio de fibra de vidro e padrão quadrado de inserção 7x7) ensaiados na etapa NPC para um comprimento da fenda de 30 mm. A Tabela 4.9 resume os valores calculados da tenacidade à fratura interlaminar  $G_{IIc}$ , da conformidade  $C$ , e dos coeficientes  $CC$ ,  $A$  e  $m$ . Pode-se verificar pela Tabela 4.9 que os valores da conformidade  $C$ , não apresentaram diferença significativa (Desvio Padrão relativo de 5,8%), assim como os valores das forças para iniciar a delaminação  $P_{Máx}$  (Desvio Padrão relativo de 2,5%).

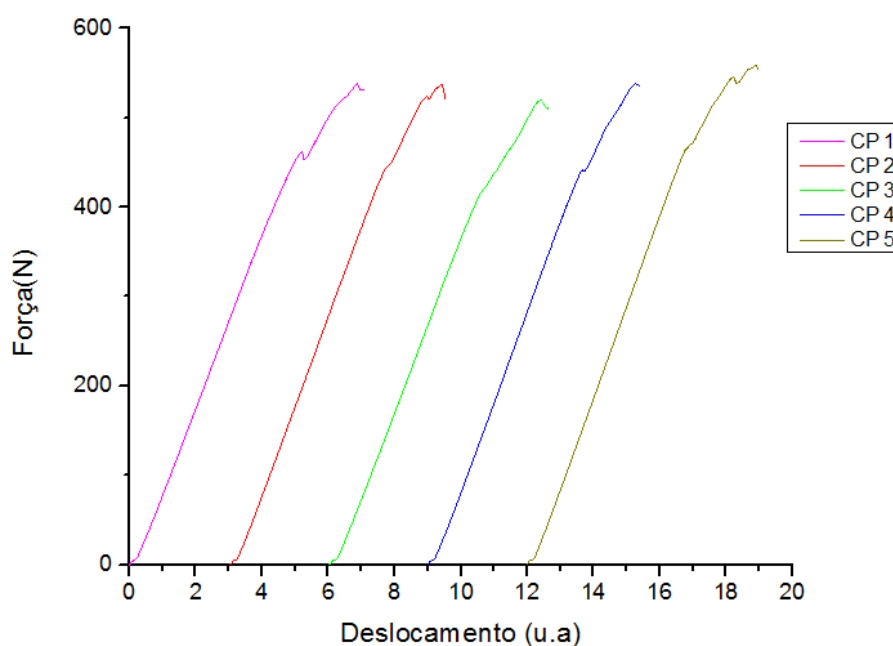


Figura 4.24 - Curvas  $P$  em função do  $\delta$  do ensaio para os corpos de prova do compósito E2R7FV com  $a = 30\text{mm}$ .

As curvas CP2 a CP5 foram deslocadas por uma unidade arbitrária para facilitar a visualização.

Fonte: Autor

Tabela 4.9 - Resultados obtidos para a conformidade, coeficientes  $CC$ ,  $P_{Máx}$  e  $G_{IIc}$ .

CP	$a$ (mm)	$P_{Máx}$ (N)	$G_{IIc}$ (J/m <sup>2</sup> )	$\delta$ (mm)	$C$	$A$	$m$
1	30	537	213,5	6,88	0,0103	7,3E0-03	1,06E-07
2	30	538	205,92	6,43	0,0113	7,60E-03	1,31E-07
3	30	520	184,94	6,43	0,0102	7,70E-03	9,69E-08
4	30	538	175,57	6,33	0,0099	7,60E-03	8,58E-08
5	30	558	182,69	6,92	0,0098	7,50E-03	8,77E-08
Média	-	538,2	192,52	6,598	0,0103	0,0076	1,01E-07
Desv.pad.	-	13,46	16,28	0,28	0,000596	8,16E-05	1,84E-08

A Figura 4.25 apresenta as curvas de força-deslocamento para os corpos de prova do compósito E3SR (sem reforço tridimensional) ensaiados, na etapa NPC, para um comprimento da fenda de 30 mm. A Tabela 4.10 resume os valores calculados para a tenacidade à fratura interlaminar  $G_{IIc}$ , da conformidade  $C$ , e dos coeficientes  $CC$ ,  $A$  e  $m$ . Pode-se verificar pela Tabela 4.10 que os valores da conformidade  $C$ , mantiveram-se similares (Desvio Padrão relativo de 4,4%). O mesmo ocorreu para os valores das forças para iniciar a delaminação  $P_{Máx}$  (Desvio Padrão relativo de 4,2%).

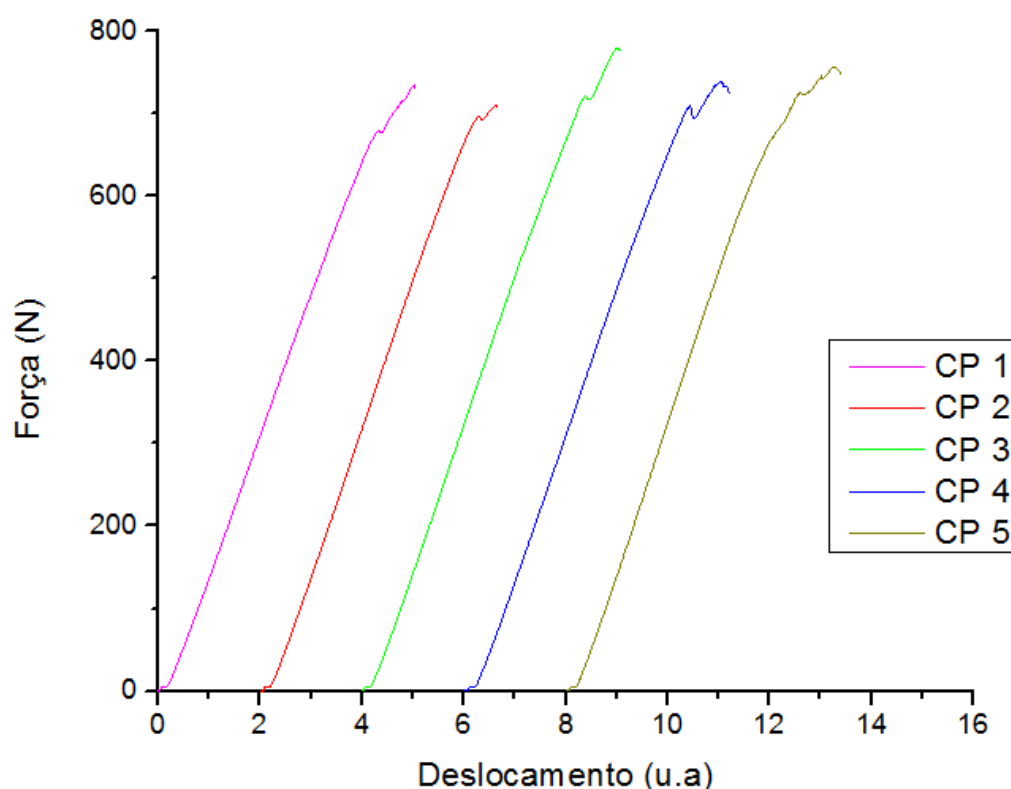


Figura 4.25 - Curvas  $P$  em função do  $\delta$  do ensaio para os corpos de prova de E3SR com  $a = 30$  mm. As curvas CP2 a CP5 foram deslocadas por uma unidade arbitrária para facilitar a visualização.

Fonte: Autor

Tabela 4.10 - Resultados obtidos para a conformidade, coeficientes  $CC$ ,  $P_{Máx}$  e  $G_{IIc}$ .

CP	$a$ (mm)	$P_{Máx}$ (N)	$G_{IIc}$ (J/m <sup>2</sup> )	$\delta$ (mm)	$C$	$A$	$m$
1	30	708	172,13	5,13	0,0058	4,50E-03	4,80E-08
2	30	710	167,82	4,72	0,0055	4,30E-03	4,67E-08
3	30	780	218,55	5,2	0,0055	4,20E-03	5,05E-08
4	30	734	219,85	5,22	0,0060	4,20E-03	6,63E-08
5	30	757	197,17	5,39	0,0054	4,10E-03	4,82E-08
Média	-	737,8	195,10	5,132	0,00564	4,26E-03	5,19E-08
Desv.pad.	-	30,92	24,69	0,25	0,000251	0,000152	8,14E-09

A Figura 4.26 apresenta as curvas de força-deslocamento para os corpos de prova do compósito E4R5PA (reforço com fio de poliamida 6 e padrão quadrado de inserção 5x5) ensaiados na etapa NPC para um comprimento da fenda de 30 mm. A Tabela 4.11 resume os valores calculados para a tenacidade à fratura interlaminar  $G_{IIc}$ , da conformidade  $C$ , e dos coeficientes  $CC$ ,  $A$  e  $m$ . Pode-se verificar pela Tabela 4.11 que os valores da conformidade  $C$ , não apresentaram muita variação nos resultados (Desvio Padrão relativo de 2%). As forças para iniciar a delaminação  $P_{Máx}$ , também apresentaram valores similares (Desvio Padrão relativo de 2,1%).

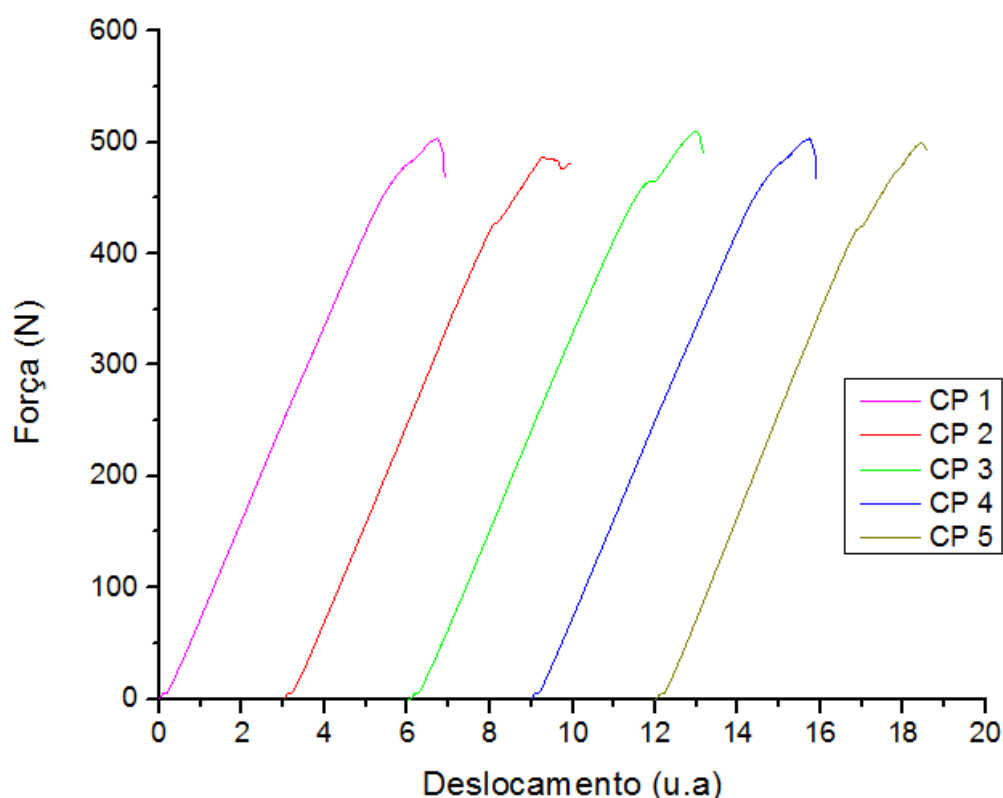


Figura 4.26 - Curvas  $P$  em função do  $\delta$  do ensaio para os corpos de prova E4R5PA com  $a = 30$  mm.

As curvas CP2 a CP5 foram deslocadas por uma unidade arbitrária para facilitar a visualização.

Fonte: Autor

Tabela 4.11 - Resultados obtidos para a conformidade, coeficientes  $CC$ ,  $P_{Máx}$  e  $G_{IIc}$ .

CP	$a$ (mm)	$P_{Máx}$ (N)	$G_{IIc}$ (J/m <sup>2</sup> )	$\delta$ (mm)	$C$	$A$	$m$
1	30	504	173,1	6,91	0,0113	8,80E-03	9,50E-08
2	30	482	161,1	6,95	0,0112	8,70E-03	9,73E-08
3	30	510	171,23	7,17	0,0112	8,90E-03	9,19E-08
4	30	504	172	6,91	0,0113	8,80E-03	9,50E-08
5	30	500	168,63	6,57	0,0107	8,30E-03	9,39E-08
Média	-	500	169,21	6,902	0,0111	0,0087	9,5E-08
Desv.pad.	-	10,67	4,82	0,21	0,00025	0,00023	2E-09

A Figura 4.27 exibe um gráfico representativo do comportamento das curvas força em função do deslocamento e a Tabela 4.12 apresenta os valores médios de cada compósito.

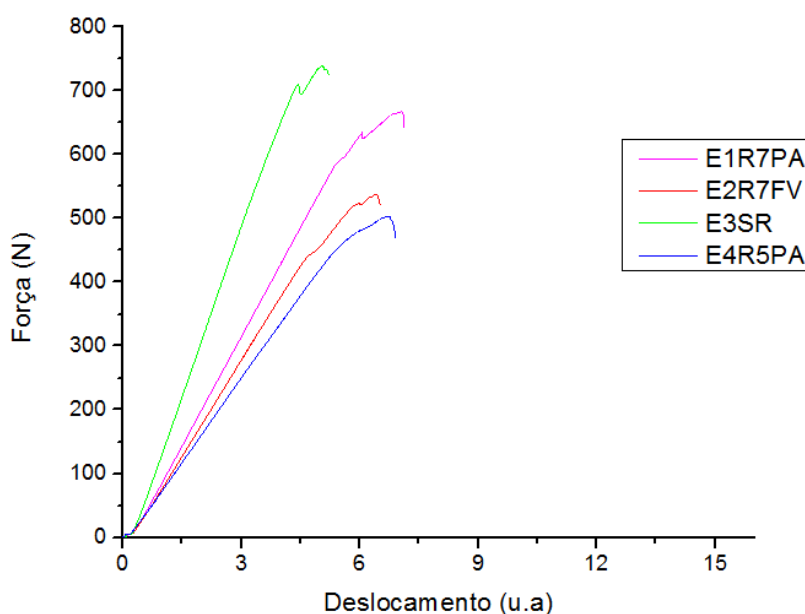


Figura 4.27 - Curvas  $P$  em função de  $\delta$  representativas dos ensaios NPC para todos os compósitos

Fonte: Autor

Tabela 4.12 - Média dos resultados obtidos para cada tipo de compósito.

Compósito	$P_{M\acute{a}x}$ (N)	$G_{IIc}$ (J/m <sup>2</sup> )	$\delta$ (mm)	$C$	$A$	$m$
E1R7PA	664	173,158	6,822	0,0089	7,56E-03	5,54E-08
E2R7FV	538,2	192,524	6,598	0,0103	7,60E-03	1,01E-07
E3SR	737,8	195,104	5,132	0,00564	4,26E-03	5,19E-08
E4R5PA	500	169,212	6,902	0,0111	8,70E-03	9,50E-08

Como na etapa NPC o ensaio é interrompido antes da propagação da delaminação, os reforços não tiveram um papel muito efetivo no aumento de  $G_{IIc}$ . Os valores de  $G_{IIc}$  para os compósitos E2R7FV (reforço de fibra de vidro) e E3SR (sem reforço) são similares. Entretanto, são superiores aos valores dos compósitos E1R7PA e E4R5PA. Essa diferença pode ser relacionada pela falta de compatibilidade entre a resina e a linha de poliamida 6. Isto pode fazer com que a região ao redor das linhas de reforço se tornem regiões ricas em resina e as tornando propagadoras de trincas, fragilizando o material para carregamentos fora do plano.

#### 4.4.2.2 Ensaio *Precracked* (PC)

Para a etapa do ensaio PC também houve a necessidade de ensaios para estimar quais seriam as forças  $P_{c20}$  e  $P_{c40}$  e as validar para que  $G_Q = G_{IIC}$ . As Tabelas 4.13 e 4.14 descrevem os valores calculados e determinados para os comprimentos de fenda de 20 mm e 40 mm, respectivamente.

Tabela 4.13 - Valores das forças para  $a = 20$  mm.

Compósito	$a$ (mm)	$P_{c20}$ (N)	$0,5 P_{c20}$ (N)
E1R7PA	20	800	400
E2R7FV	20	800	400
E3SR	20	900	450
E4R5PA	20	520	260

Tabela 4.14 - Valores das forças para  $a = 40$  mm.

Compósito	$a$ (mm)	$P_{c40}$ (N)	$0,5 P_{c40}$ (N)
E1R7PA	40	400	200
E2R7FV	40	400	200
E3SR	40	450	225
E4R5PA	40	260	130

Tendo os valores das forças para  $a = 20$  mm e  $a = 40$  mm, fez-se um ensaio de acordo com a seção 3.2.5.2 para determinar os valores de  $P_{Máx}$  ( $a = 30$  mm), dos coeficientes CC ( $A$  e  $m$ ) e de  $G_Q$ .

A Tabela 4.15 exhibe os valores que foram encontrados nos testes para cada tipo de compósito.

Tabela 4.15 - Resultados obtidos para  $P_{Máx}$ ,  $G_Q$ ,  $A$  e  $m$ .

Compósito	$0,5P_{c20}$ (N)	$0,5P_{c40}$ (N)	$P_{Máx}$ (N)	$G_Q$ (J/m <sup>2</sup> )	$A$	$m$
E1R7PA	400	200	537	202,83	9,50E-03	1,56E-07
E2R7FV	400	200	506	276,69	8,90E-03	1,53E-07
E3SR	450	225	606	212,81	5,20E-03	8,10E-08
E4R5PA	260	130	422	198,64	9,50E-03	1,56E-07

Após o ensaio, houve a necessidade de avaliar se os valores utilizados validariam  $G_Q$ . A validação é feita de acordo com as equações 4.1, 4.2 e 4.3 (página 104) A Tabela 4.16 descreve os valores de ( $\%G_{Qi}$ ), ( $\%G_{Qj}$ ) e  $G_Q$  calculados para cada compósito.

Tabela 4.16 - Resultado calculados para  $\%G_{Qi}$ ,  $\%G_{Qj}$ , e  $G_Q$ .

Compósito	$\%G_{Qi}$	$\%G_{Qj}$	$G_Q = G_{IIc}$
E1R7PA	24,41	23,92	202,83
E2R7FV	27,22	22,99	276,69
E3SR	22,37	17,84	212,81
E4R5PA	16,48	16,87	198,64

Como os valores estavam de acordo com o exigido na norma ASTM D7905:2014, pôde-se prosseguir com os ensaios para o cálculo do  $G_{IIc}$  dos compósitos. Os valores de  $G_{IIc}$  serão comparados e analisados no final da seção.

A Figura 4.28 apresenta as curvas de força em função do deslocamento para os corpos de prova do compósito ensaiado, na etapa NPC, para um comprimento da fenda de 30 mm e a Tabela 4.17 resume os valores calculados para a tenacidade à fratura interlaminar  $G_{IIc}$ , da conformidade  $C$ , e dos coeficientes  $CC$ ,  $A$  e  $m$ . Pode-se verificar pela Tabela 4.17 que os valores da conformidade  $C$ , apresentaram uma diferença significativa (Desvio Padrão relativo de 9%). O mesmo ocorreu para os valores das forças para iniciar a delaminação  $P_{Máx}$  (Desvio Padrão relativo de 10%).

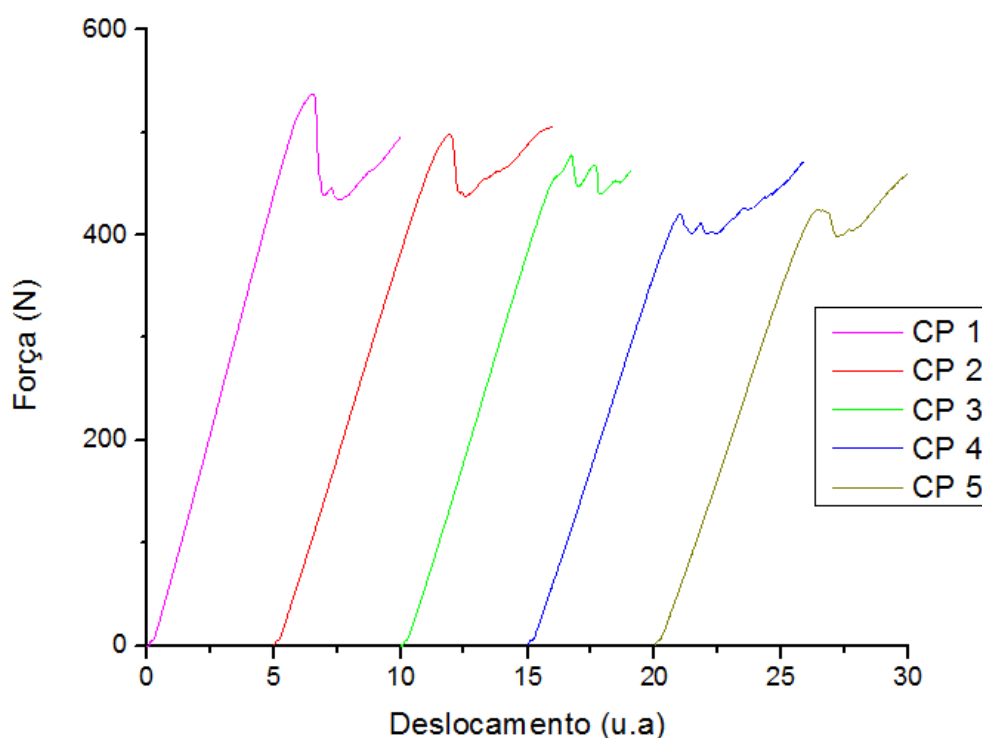


Figura 4.28 - Curvas  $P$  em função do  $\delta$  do ensaio PC para os corpos de prova de E1R7PA com  $a = 30$  mm. As curvas CP2 a CP5 foram deslocadas por uma unidade arbitrária para facilitar a visualização.

Fonte: Autor

Tabela 4.17 - Resultados obtidos para a conformidade, coeficientes  $CC$ ,  $P_{M\acute{a}x}$  e  $G_{IIc}$ .

CP	$a$ (mm)	$P_{M\acute{a}x}$ (N)	$G_{IIc}$ (J/m <sup>2</sup> )	$\delta$ (mm)	$C$	$A$	$m$
1	30	537	202,83	6,56	0,0107	7,80E-03	9,89E-08
2	30	498	254,28	6,94	0,0125	8,50E-03	1,44E-07
3	30	478	216,17	6,74	0,0123	8,70E-03	1,34E-07
4	30	420	168,66	6,04	0,0132	9,20E-03	1,36E-07
5	30	425	191,61	6,46	0,0137	9,40E-03	1,50E-07
Média	-	471,6	206,71	6,548	0,01248	0,00872	1,326E-07
Desv.pad.	-	49,622	31,79	0,3378	0,00114	0,00063	1,989E-08

A Figura 4.29 apresenta as curvas de força-deslocamento para os corpos de prova da E2R7FV (reforço com fibra de vidro e padrão quadrado de inserção 7x7) ensaiados para um comprimento da fenda de 30 mm e a Tabela 4.18 resume os valores calculados para a tenacidade à fratura interlaminar  $G_{IIc}$ , da conformidade  $C$ , e dos coeficientes  $CC$ ,  $A$  e  $m$ . Pode-se verificar pela Tabela 4.18 que os valores da conformidade  $C$ , apresentaram uma diferença significativa (Desvio Padrão relativo de 18,5%). O mesmo não ocorreu para os valores das forças para iniciar a delaminação  $P_{M\acute{a}x}$  (Desvio Padrão relativo de 5,8%). Pode-se verificar, ainda na Figura 4.29, que a curva CP1 distingue-se das demais curvas. Uma possível causa deste comportamento



anômalo deve estar relacionada com a confecção no corpo de prova ou erros na execução do experimento. Uma inspeção mais detalhada neste corpo de prova seria necessária para avaliar o que pode ter ocorrido. Desconsiderando a curva CP1 da análise, a média  $G_{IIc}$  ficaria em 265,25 J/m<sup>2</sup> (Desvio Padrão = 15,35).

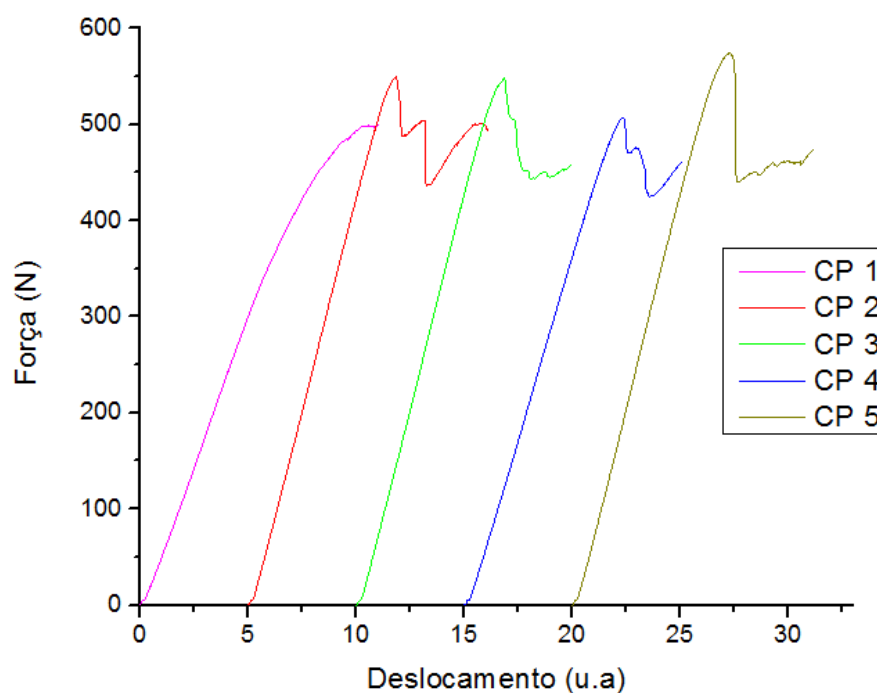


Figura 4.29 - Curvas  $P$  em função do  $\delta$  do ensaio PC para os corpos de prova de E2R7FV com  $a = 30$  mm.

As curvas CP2 a CP5 foram deslocadas por uma unidade arbitrária para facilitar a visualização.

Fonte: Autor

Tabela 4.18 - Resultados obtidos para a conformidade, coeficientes  $CC$ ,  $P_{Máx}$  e  $G_{IIc}$ .

CP	$a$ (mm)	$P_{Máx}$ (N)	$G_{IIc}$ (J/m <sup>2</sup> )	$\delta$ (mm)	$C$	$A$	$m$
1	30	500	321,42	11,09	0,0157	1,02E-02	1,81E-07
2	30	550	284	6,84	0,0113	7,60E-03	1,31E-07
3	30	548	246	6,86	0,0112	8,10E-03	1,16E-07
4	30	506	276	7,33	0,0131	8,90E-03	1,53E-07
5	30	574	255	7,33	0,0098	7,50E-03	8,77E-08
Média	-	535,6	276,48	7,89	0,01222	0,00846	1,34E-07
Desv.pad.	-	31,54045	29,44	1,80	0,002271	0,001119	3,55E-08

A Figura 4.30 apresenta as curvas de força-deslocamento para os corpos de prova da E3SR (sem reforço) ensaiados, na etapa PC, para um comprimento da fenda de 30 mm e a Tabela 4.19 resume os valores calculados para a tenacidade à fratura interlaminar  $G_{IIc}$ , da conformidade  $C$ , e dos coeficientes  $CC$ ,  $A$  e  $m$ . Pode-se verificar pela Tabela 4.19 que os valores da conformidade  $C$ , apresentaram uma diferença significativa (Desvio Padrão relativo de 10,7%). O mesmo ocorreu para os valores das forças para iniciar a delaminação  $P_{Máx}$  (Desvio Padrão relativo de 8%).

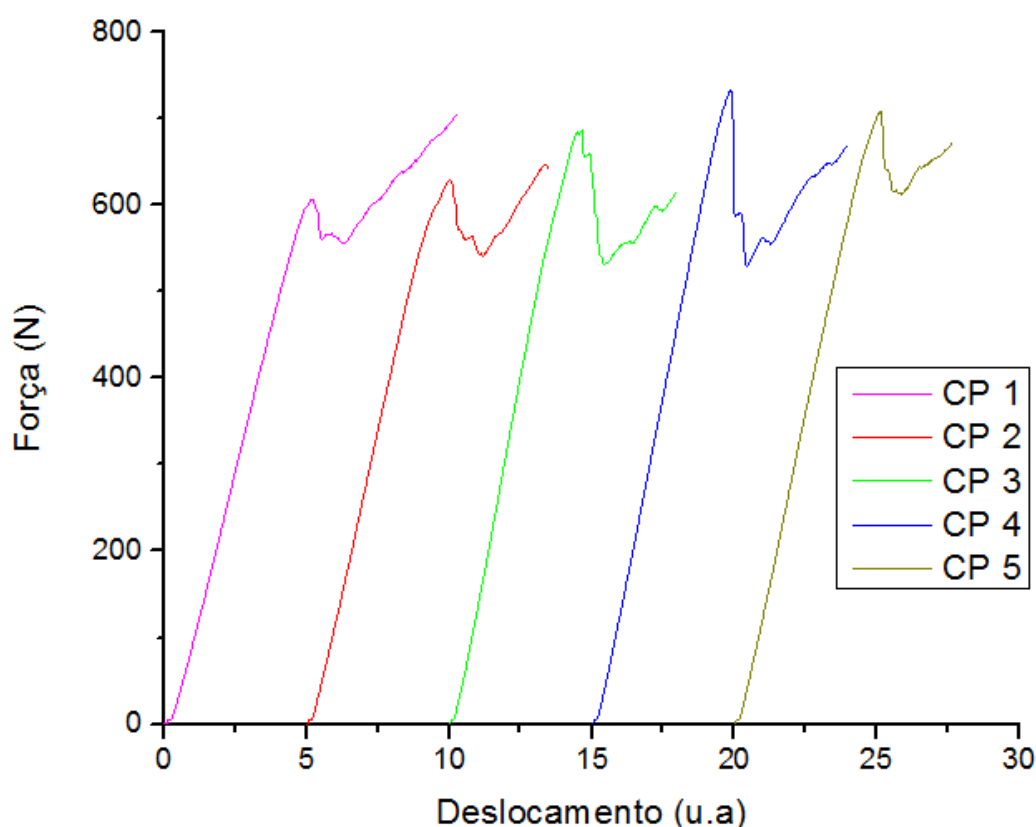


Figura 4.30 - Curvas  $P$  em função do  $\delta$  do ensaio para os corpos de prova da E3SR com  $a = 30$  mm.

As curvas CP2 a CP5 foram deslocadas por uma unidade arbitrária para facilitar a visualização.

Fonte: Autor

Tabela 4.19 - Resultados obtidos para a conformidade, coeficientes  $CC$ ,  $P_{Máx}$  e  $G_{IIc}$ .

CP	$a$ (mm)	$P_{Máx}$ (N)	$G_{IIc}$ (J/m <sup>2</sup> )	$\delta$ (mm)	$C$	$A$	$m$
1	30	606	212,81	5,23	0,0074	5,20E-03	8,10E-08
2	30	628	113,28	5,02	0,0067	5,20-003	4,03E-08
3	30	687	175,99	4,49	0,0056	4,20E-03	5,21E-08
4	30	733	254,48	4,88	0,006	4,20E-03	6,63E-08
5	30	709	249,56	5,14	0,0063	4,40E-03	6,94E-08
Média	-	672,6	201,224	4,952	0,0064	0,0045	6,2E-08
Desv.pad.	-	53,86	58,47	0,29	0,00069	0,00048	1,6E-08

A Figura 4.31 apresenta as curvas de força-deslocamento para os corpos de prova do E4R5PA (reforço com fio de poliamida 6 e padrão quadrado de inserção 5x5) ensaiados, na etapa NPC, para um comprimento da fenda de 30 mm e a Tabela 4.20 resume os valores calculados para a tenacidade à fratura interlaminar  $G_{IIc}$ , da conformidade  $C$ , e dos coeficientes  $CC$ ,  $A$  e  $m$ . Pode-se verificar pela Tabela 4.20 que os valores da conformidade  $C$ , apresentaram uma diferença significativa (Desvio Padrão relativo de 7,4%). O mesmo não ocorreu para os valores das forças para iniciar a delaminação  $P_{Máx}$  (Desvio Padrão relativo de 4,9%).

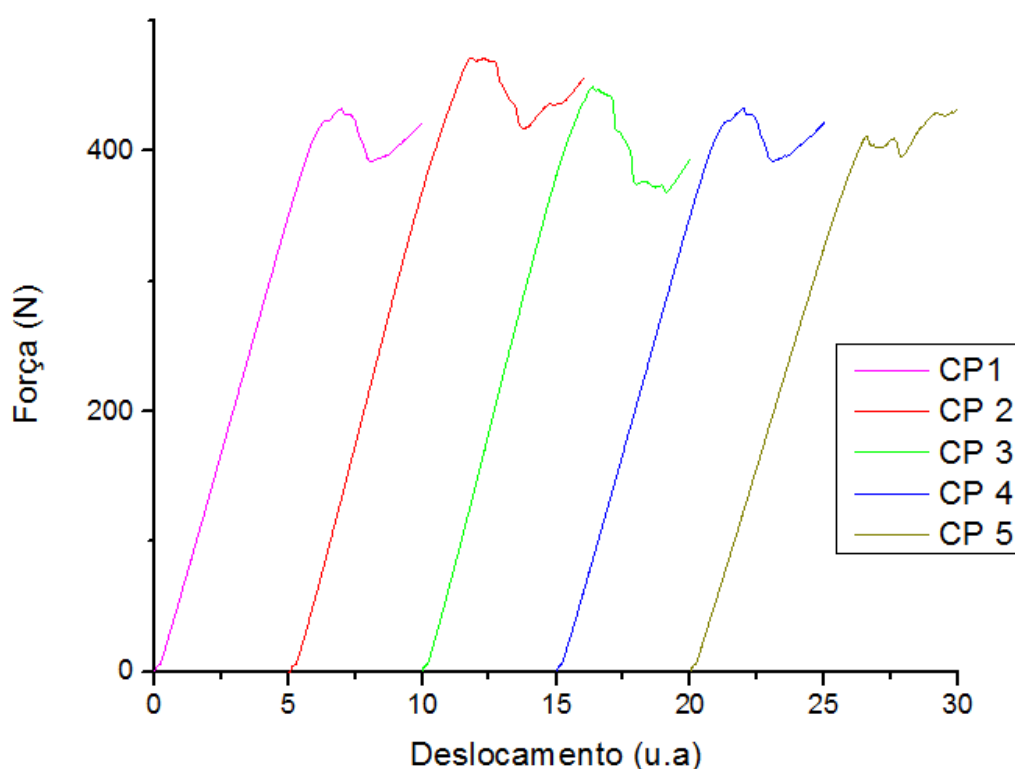


Figura 4.31 - Curvas  $P$  em função do  $\delta$  do ensaio para os corpos de prova da E4R5PA com  $a = 30$  mm.

As curvas CP2 a CP5 foram deslocadas por uma unidade arbitrária para facilitar a visualização.

Fonte: Autor

Tabela 4.20 - Resultados obtidos para a conformidade, coeficientes  $CC$ ,  $P_{Máx}$  e  $G_{IIc}$ .

CP	$a$ (mm)	$P_{Máx}$ (N)	$G_{IIc}$ (J/m <sup>2</sup> )	$\delta$ (mm)	$C$	$A$	$m$
1	30	433	198,64	6,98	0,0137	9,50E-03	1,56E-07
2	30	470	188,8	7,12	0,0125	9,30E-03	1,20E-07
3	30	449	173,91	6,34	0,0123	9,10E-03	1,24E-07
4	30	434	208,77	7,02	0,0137	9,50E-03	1,56E-07
5	30	412	203,87	6,62	0,0147	1,01E-02	1,67E-07
Média	-	439,6	194,79	6,816	0,01338	0,0095	1,4E-07
Desv.pad.	-	21,50	13,82	0,326	0,00099	0,00037	2,1E-08

A Figura 4.32 exibe um gráfico representativo do comportamento das curvas força - deslocamento e a Tabela 4.21 apresenta os valores médios de cada compósito.

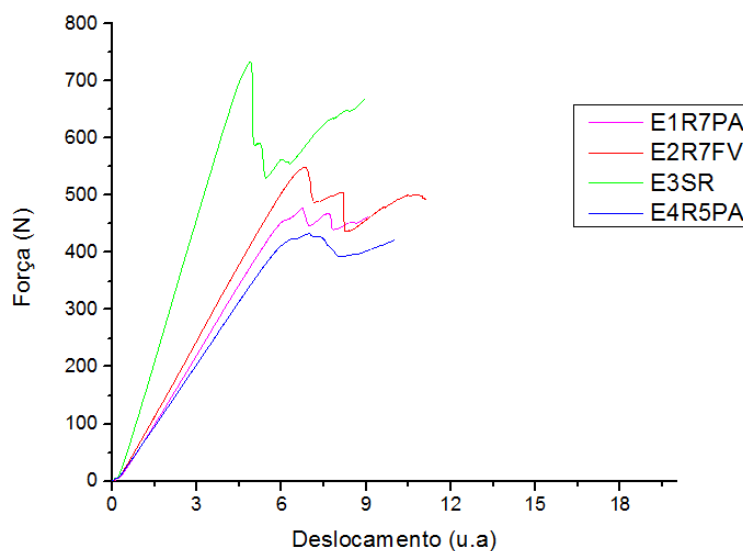


Figura 4.32 - Curvas  $P$  em função de  $\delta$  representativas dos ensaios PC para todos os compósitos.

Fonte: Autor

Tabela 4.21 - Média dos resultados obtidos para cada tipo de compósito.

Compósito	$P_{Máx}$ (N)	$G_{IIc}$ (J/m <sup>2</sup> )	$\delta$ (mm)	$C$	$A$	$m$
E1R7PA	471,60	206,71	6,55	0,0125	8,72E-03	1,33E-07
E2R7FV	535,60	276,48	7,89	0,0122	8,46E-03	1,34E-07
E3SR	672,60	201,22	4,95	0,0064	6,40E-03	6,20E-08
E4R5PA	439,60	194,79	6,81	0,0134	9,50E-03	1,40E-07

Para os ensaios PC a conformidade,  $C$ , e o coeficiente  $CC$ ,  $m$ , apresentaram um aumento, em relação a etapa NPC, e as forças,  $P_{Máx}$ , tiveram um decréscimo para os compósitos E1R7PA, E3SR e E4R5PA de aproximadamente 30%, 9% e 12%, respectivamente, e isso influenciou diretamente nos valores de  $G_{IIc}$ . Já a força,  $P_{Máx}$ , do compósito E2R7FV, manteve-se praticamente constante.

Em uma comparação entre E1R7PA e E4R5PA, esperava-se que o compósito com maior densidade de *tufts* (E4R5PA, com padrão de inserção quadrado 5x5) apresentasse valores de  $G_{IIc}$  superiores, porém todos os resultados para E4R5PA foram inferiores, incluindo os resultados do ensaio de tração, se comparados a todos compósitos. A diminuição nas propriedades no plano e fora do plano de E4R5PA podem ser por este apresentar uma densidade de costura maior que a dos outros compósitos reforçados e, pelo fato de a poliamida 6 não

apresentar compatibilidade com a resina epóxi, ter formado maiores regiões ricas em resina em seu entorno levando a fragilização do compósito.

Comparando os compósitos reforçados com poliamida 6 e fibra de vidro, E1R7PA e E2R7FV, respectivamente, com o mesmo padrão quadrado de inserção (7x7) o reforçado com fibra de vidro apresentou um valor de  $G_{IIC}$  de, aproximadamente, 25,5%.

E1R7PA apresentou um aumento de aproximadamente 3% em seu  $G_{IIC}$  comparado ao E3SR (compósito sem reforço na direção da espessura). É um aumento pouco significativo e evidencia que não seria viável o reforço com poliamida 6, pois seria um processo a mais na etapa de fabricação.

Em relação ao E3SR, a resistência à fratura interlaminar ( $G_{IIC}$ ) de E2R7FV, como era esperado, apresentou um aumento de aproximadamente 27%, comprovando que as linhas de reforço aumentaram o limiar de energia necessário para a delaminação em cisalhamento. Aumentos com valores maiores (60%) foram encontrados por Treiber *et al.*, 2011.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

### 5.1 Conclusões

No presente trabalho foi desenvolvido e estudado no Núcleo de Tecnologia em Compósitos o método de reforço *tufting*, seu comportamento e as propriedades dos compósitos com este tipo de reforço. A partir disso pode ser afirmado que:

- A técnica de reforço tridimensional *tufting* pode ser introduzida no ambiente de trabalho, uma vez que é relativamente simples e não apresentou altos custos, porém necessita de algumas melhorias e ajustes no dispositivo de costura;
- Foi possível a fabricação de preformas reforçadas com dois diferentes tipos de linha para reforço, pelo ajuste dos parâmetros de inserção, sendo que a inserção com poliamida 6 pode ser em uma velocidade maior que a da fibra de vidro;
- Os volumes de fibra, matriz e vazios foram obtidos pela digestão ácida de amostras de cada compósito de compósito fabricada. Os compósitos T2R7FV (reforçado com fibra de vidro) e T3SR (sem reforço) fabricados, por VARTM, para os ensaios de tração apresentaram volumes de fibra de aproximadamente 50% e porosidade inferior a 2%. Já os compósitos T1R7PA e T4R5PA (reforçados com poliamida 6) apresentaram volumes de resina de aproximadamente 56% e 60%, respectivamente, e volumes de vazios abaixo de 2%. Os compósitos fabricados para o ensaio de tenacidade à fratura interlaminar em modo II, apresentaram um volume de fibra de aproximadamente 50%, com exceção do E1R7PA (reforçado com poliamida 6) que atingiu aproximadamente 46%, e o volume de vazios, para todas os compósitos, ficou abaixo de 2%;
- O decréscimo das propriedades no plano estudadas (módulo de elasticidade e da tensão de ruptura) dos compósitos reforçados com fibra de vidro apresentaram valores comparáveis a trabalhos realizados previamente por outros autores. Sendo que as causas para tal decréscimo são o desalinhamento e ondulação das fibras do tecido e as regiões ricas em resina que se comportam como regiões concentradoras de tensões, iniciadoras e propagadoras de trinca;

- Quanto as propriedades fora do plano, para os compósitos reforçados com poliamida 6 não foi possível a obtenção de valores satisfatórios para a tenacidade à fratura interlaminar ( $G_{IIC}$ ). Entretanto, para os compósitos reforçados com fibra de vidro foi possível um aumento de aproximadamente 27%, em relação ao compósito sem reforço, comprovando que o reforço na direção 3D aumenta o limiar de energia para a delaminação em cisalhamento.

## 5.2 Sugestões para trabalhos futuros

A seguir serão citadas algumas sugestões para o desenvolvimento de novos trabalhos:

- Projetar e desenvolver um calcador, acionado pneumaticamente, com movimento independente da agulha e um alimentador e tensionador dos fios utilizados com reforço;
- Utilizar tecidos alternativos ao *plain weave*, como o UD, *Twill* e tecidos HS e também realizar os reforços com diferentes linhas, como Fibra de Carbono e aramida e poliacrilonitrila (PAN);
- Avaliação das propriedades fora do plano pelos ensaios de tenacidade à fratura interlaminar em modo I (DCB);
- Estudar o comportamento de materiais reforçados em ensaios dinâmicos;
- Monitoramento por Emissão Acústica dos processos de fratura.

## APÊNDICES

### APÊNDICE A - Ensaio de tração T1R7PA a 0°

Resultados dos ensaios de resistência à tração dos corpos de prova do compósito T1R7PA que foi reforçado através da espessura com poliamida 6 com um padrão quadrado de inserção 7x7. A Figura A.1 mostra as curvas dos ensaios de tração a 0° e a Tabela A.1 resume os resultados obtidos para a tensão de ruptura,  $\sigma_r$ , e do módulo elástico,  $E$ .

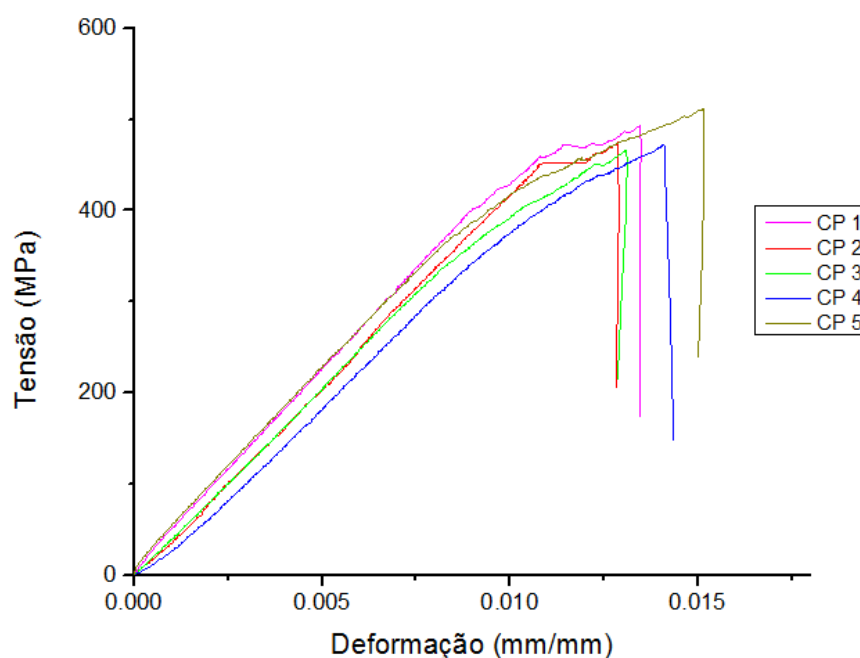


Figura A.1 - Curvas do ensaio de tração do compósito reforçado através da espessura com linha de poliamida 6 com padrão 7x7.

Fonte: Autor

Tabela A.1 - Resultados obtidos no ensaio de resistência à tração.

T1R7PA		
CP	$\sigma_r$ (MPa)	$E$ (GPa)
1	493,47	45,11
2	474,34	47,44
3	466,49	42,83
4	471,56	41,51
5	511,92	45,54
Média	483,56	44,49
Desv.Pad	18,85	2,34



## APÊNDICE B - Ensaio de tração T2R7FV a 0°

Resultados dos ensaios de resistência à tração dos corpos de prova do compósito T2R7PFV que foi reforçado através da espessura com fibra de vidro com um padrão quadrado de inserção 7x7. A Figura B.1 mostra as curvas dos ensaios de tração a 0° e a Tabela B.1 resume os resultados obtidos para a tensão de ruptura,  $\sigma_r$ , e do módulo elástico,  $E$ .

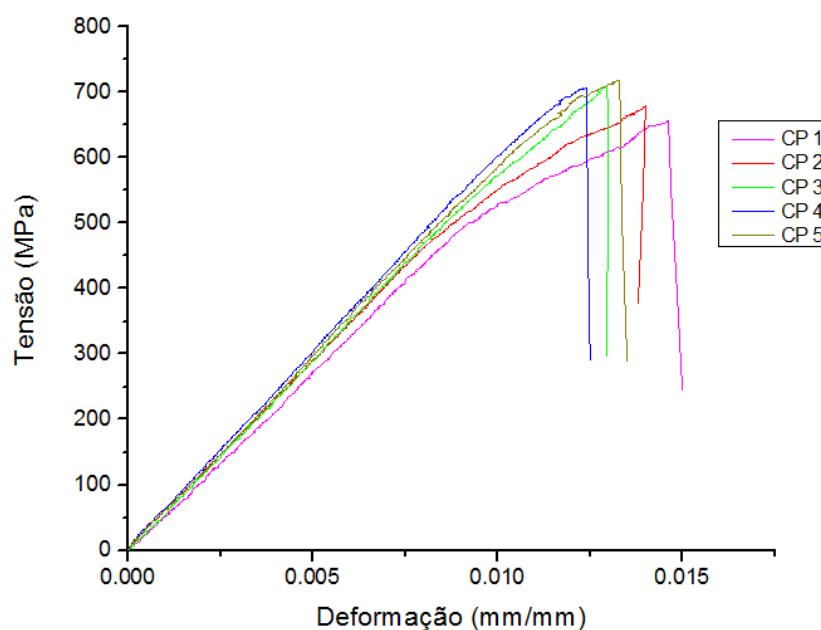


Figura B.1 - Curvas do ensaio de tração do compósito reforçado através da espessura com linha de fibra de vidro com padrão 7x7.

Fonte: Autor

Tabela B.1 - Resultados obtidos no ensaio de resistência à tração.

T2R7FV		
CP	$\sigma_r$ (MPa)	$E$ (GPa)
1	657,168	56,143
2	678,555	58,371
3	708,053	60,756
4	707,034	61,753
5	719,18	61,886
Média	693,998	59,781
Desv.Pad	25,47	2,47

## APÊNDICE C - Ensaio de tração T3SR a 0°

Resultados dos ensaios de resistência à tração dos corpos de prova do compósito T3SR sem reforço através da espessura. A Figura C.1 mostra as curvas dos ensaios de tração a 0° e a Tabela C.1 resume os resultados obtidos para a tensão de ruptura,  $\sigma_r$ , e do módulo elástico,  $E$ .

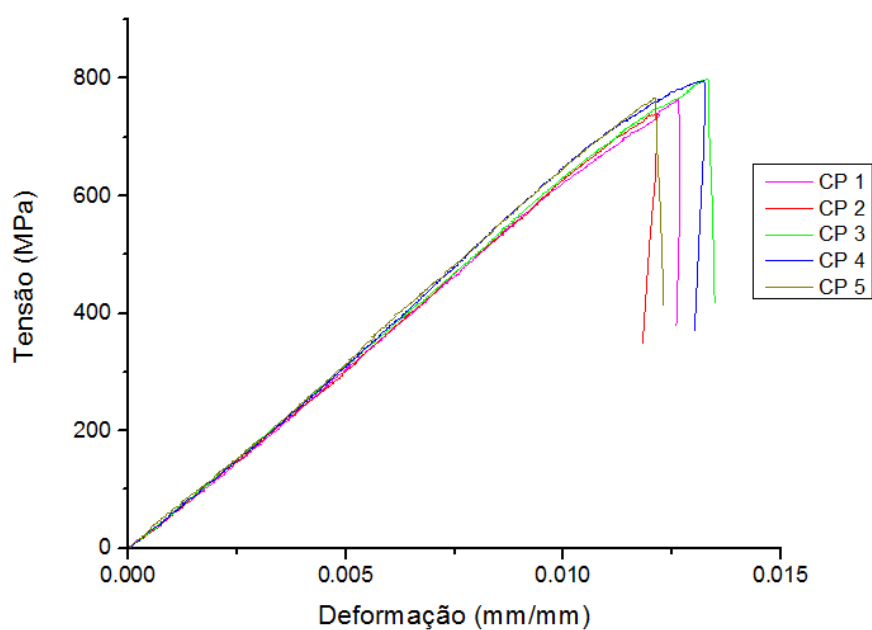


Figura C.1 - Curvas do ensaio de tração do compósito sem reforço através da espessura.

Fonte: Autor

Tabela C.1 - Resultados obtidos no ensaio de resistência à tração.

T3SR		
CP	$\sigma_r$ (MPa)	$E$ (GPa)
1	764,11	65,04
2	739,34	66,80
3	799,02	64,58
4	796,49	69,62
5	767,84	70,19
Média	773,364	67,250
Desv.Pad	24,83	2,57

## APÊNDICE D - Ensaio de tração T4R5PA a 0°

Resultados dos ensaios de resistência à tração dos corpos de prova do compósito T4R5PA que foi reforçado através da espessura com poliamida 6 com um padrão quadrado de inserção 5x5. A Figura D.1 mostra as curvas dos ensaios de tração a 0° e a Tabela D.1 resume os resultados obtidos para a tensão de ruptura,  $\sigma_r$ , e do módulo elástico,  $E$ .

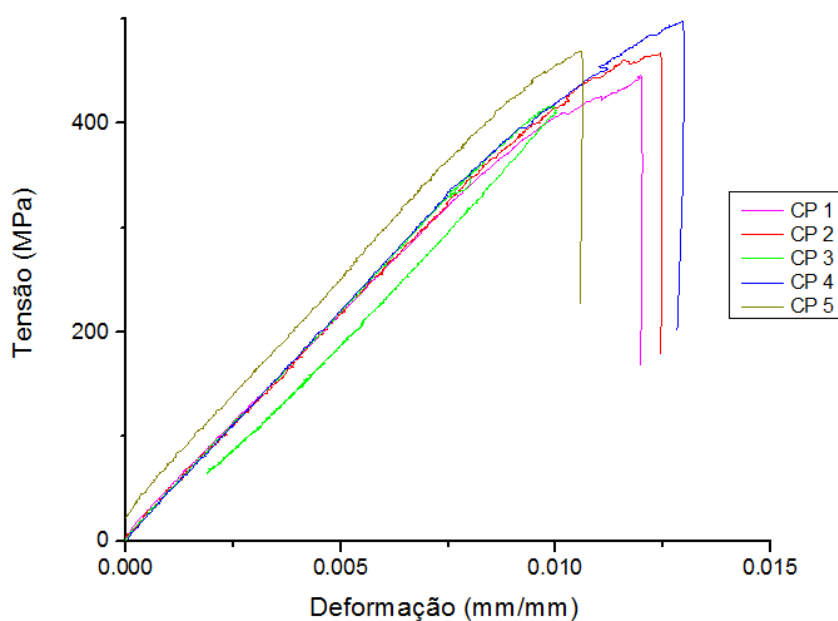


Figura D.1 - Curvas do ensaio de tração do compósito reforçado através da espessura com linha de poliamida 6 com padrão 5x5.

Fonte: Autor

Tabela D.1 - Resultados obtidos no ensaio de resistência à tração.

T4R5PA		
CP	$\sigma_r$ (MPa)	$E$ (GPa)
1	446,27	43,46
2	467,60	43,74
3	416,43	44,40
4	498,43	44,79
5	468,698	51,99
Média	459,500	45,682
Desv.Pad	30,41	3,57

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANCELOTTI JR, A. C. Efeitos da porosidade na resistência ao cisalhamento e nas propriedades dinâmicas de compósitos de fibra de carbono/resina epóxi. **Dissertação de Mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, Brazil, 2006.**

ANCELOTTI JR, A. C. Influência da Porosidade na Resistência à Fadiga de Compósitos de Fibra de Carbono/Epóxi. **Tese de Doutorado. Instituto Tecnológico de Aeronáutica São José dos Campos, São Paulo, Brasil, 2011.**

**ASTM D792. (2013).** “Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement”. International West Conshohocken, PA, United States, DOI: 10.1520/D792-2013, [www.astm.org](http://www.astm.org)

**ASTM D2256. (2002).** “Standard Test Method for Tensile Properties of Yarns by the Single-Strand Method”. International West Conshohocken, PA, United States, DOI: 10.1520/ D2256-2002, [www.astm.org](http://www.astm.org)

**ASTM D3039/M3039. (2014).** “Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials”. International West Conshohocken, PA, United States, DOI: 10.1520/ D3039/M3039-2014, [www.astm.org](http://www.astm.org)

**ASTM D3171. (2015).** “Standard Test Methods for Constituent Content of Composite Materials”. International West Conshohocken, PA, United States, DOI: 10.1520/ D3171-2015, [www.astm.org](http://www.astm.org)

**ASTM D7905/M7905. (2014)** “Standard Test Methods for Determination of the Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites ”. International West Conshohocken, PA, United States, DOI: 10.1520/D7905\_D7905M-14, [www.astm.org](http://www.astm.org)

ANDERSON, T.L. **Fracture mechanics: fundamentals and applications.** CRC press, 1994.

BOWER, D. **Composite Materials.** Hunstville, University of Alabama. 1992.

CALLISTER, W. D. **Materials science and engineering: an introduction,** 7ed. Jhon Wiley & Sons, New York. 2007.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Fundamentals of materials science and engineering: an integrated approach.** John Wiley & Sons, 2012.

CANEVAROLO JR, S. V. **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros.** Artliber, 2006.

CÂNDIDO, G. M.; REZENDE, M. C.; DONADON, M. V.; ALMEIDA, S. F. M. D. Fractografia de Compósito Estrutural Aeronáutico Submetido ao Ensaio de Tenacidade à Fratura Interlaminar em Modo II. **Polímeros Ciência e Tecnologia,** v. 24, n. 1, p. 65-71, 2014.

CHAWLA, Krishan K. **Composite materials: science and engineering**. Springer Science & Business Media, 1998.

DANIEL, I. M.; ISHAI, O. **Engineering mechanics of composite materials**. New York: Oxford university press, 1994.

DAVIES P.; BLACKMAN, B.R.K.; BRUNNER, A.J. Mode II delamination. In: MOORE, D. R.; WILLIAMS, J. G.; PAVAN, A. **Fracture mechanics testing methods for polymers, adhesives and composites**. Elsevier, 2001.

DATASHEET KSL Keilmann Sondermaschinenbau GmbH. Disponível em <http://www.ksl-lorsch.de/en/products/produktgruppen/robot-sewing-unit/two-needle-head-rs-530/> Acesso em Janeiro de 2017.

DE VERDIERE, M. C.; PICKETT, A. K.; SKORDOS, A. A.; WITZEL, V. Effect of tufting on the response of non crimp fabric composites. ECCOMAS Thematic Conference on Mechanical Response of Composites, **Porto Portugal**, p. 12-14, September 2007.

DE VERDIERE, M.C. **Damage and strain rate optical characterisation of standard and tufted non crimp fabric carbon composites for Meso-scale impact models**. 2009. Tese de Doutorado. Cranfield University.

DE VERDIERE, M. C.; PICKETT, A. K.; SKORDOS, A. A.; WITZEL, V. Evaluation of the mechanical and damage behaviour of tufted non crimped fabric composites using full field measurements. **Composites Science and Technology**, v. 69, n. 2, p. 131-138, 2009.

DE VERDIERE, M. C.; SKORDOS, A. A.; WALTON, A. C.;MAY, M. Influence of loading rate on the delamination response of untufted and tufted carbon epoxy non-crimp fabric composites/Mode II. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 96, p. 1-10, 2012.

DECONINCK, P.; CAPELLE, J.; BOUCHARTE, V.; CHEVRIER, P.; RAVAILLER, F. Delamination propagation analysis in tufted carbon fibre-reinforced plastic composites subjected to high-velocity impact. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 33, n. 14, p. 1353-1363, 2014.

DELL'ANNO, G. **Effect of tufting on the mechanical behaviour of carbon fabric/epoxy composites**. Tese de Doutorado. Cranfield University. 2007

DELL'ANNO, G.; CARTIÉ, D. D.; PARTRIDGE, I. K.; REZAI, A. Exploring mechanical property balance in tufted carbon fabric/epoxy composites. **Composites part A: applied science and manufacturing**, v. 38, n. 11, p. 2366-2373, 2007.

DELL'ANNO, G.; TREIBER, J. W. G.; PARTRIDGE, I. K. Manufacturing of composite parts reinforced through-thickness by tufting. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 37, p. 262-272, 2016.

DELSTAR TECHNOLOGIES INC., Delstar - Product Overview, [Online]. Disponível: <http://www.delstarinc.com/pdf/DelStar-Resin-Distribution-Net-2004.pdf>. Acesso em Janeiro, 2017.

DOW, M.B.; DEXTER, H. B. **Development of stitched, braided and woven composite structures in the ACT program and at Langley Research Center.** 1997.

FILSINGER, J., DITTMANN, R. P., BISCHOFF, T., "Nähen als textile Preform- Technik zur Herstellung von Faserverbundstrukturen für Luftfahrtanwendungen am Beispiel der A380-Druckkalotte", **DGLR-Kongress, 17 - 20 November, Munich, Germany** (2003).

GAY, D.; HOA, S. V.; TSAI, S.W. **Composite Materials: Design and Applications**, 3ed., CRC Press, 635 p . 2003.

HENAO, A. GUZMÁN DE VILLORIA, R.; CUARTERO, J.; CARRERA, M.; PICÓN, J.; MIRAVETE, A. Enhanced impact energy absorption characteristics of sandwich composites through tufting. **Mechanics of Advanced Materials and Structures**, v. 22, n. 12, p. 1016-1023, 2015.

HEXCEL Composites. **Prepreg Technology**. Duxford, UK, 1997. Publication No. FGU 017.

HU, N., **Composite and Their Properties**. Rijeka, Croatia, Published by Intech, 2012.

JAIN, L. K.; DRANSFIELD, K. A.; MAI, Y.W. On the effects of stitching in CFRPs—II. Mode II delamination toughness. **Composites Science and Technology**, v. 58, n. 6, p. 829-837, 1998.

JONES, R. M. **Mechanics of composite materials**. CRC press, 1998.

KANNINEN, M. F.; POPELAR, C. H. Elastic–plastic fracture mechanics. **Advance Fracture Mechanics, Oxford University Press, New York**, 1985.

KAW, A. K. **Mechanics of Composite Materials**. Taylor & Francis Group. Boca Raton, 2006.

KOISSIN, V.; KUSTERMANS, J.; LOMOV, S. V.; VERPOEST, I.; NAKAI, H.; KURASHIKI, T.; ZAKO, M. Structurally stitched woven preforms: experimental characterisation, geometrical modelling, and FE analysis. **Plastics, Rubber and Composites**, v. 38, n. 2-4, p. 98-105, 2009a.

KOISSIN, V.; KUSTERMANS, J.; LOMOV, S. V.; VERPOEST, I.; VAN DEN BROUCKE, B.; WITZEL, V. Structurally stitched NCF preforms: quasi-static response. **Composites science and technology**, v. 69, n. 15, p. 2701-2710, 2009b.

LEE, C.; LIU, D. Tensile strength of stitching joint in woven glass fabrics. **J. Eng. Mater. Technol. (Trans. ASME)**, v. 112, n. 2, p. 125-130, 1990.

LIU, L.; ZHANG, T.; WANG, P.; LEGRAND, X.; SOULAT, D. Influence of the tufting yarns on formability of tufted 3-Dimensional composite reinforcement. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 78, p. 403-411, 2015.

LOMBETTI, D. M. **Tufting of complex composite structures**. Tese de Doutorado. Cranfield University. 2015.

MALLICK, P. K. **Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design.** CRC press, 3ed, 2007.

MARASCO, A. I. **Analysis and evaluation of mechanical performance of reinforced sandwich structures: X-Cor™ and K-Cor™.** Tese de Doutorado, Cranfield University. 2005.

MARTINS, A. P. **Delaminagem à fadiga em modo II de compósitos compósitos.** 2014. Dissertação de Mestrado. Universidade de Aveiro.

MARTINS, A. T. D. Projeto e fabricação de Tubos Compósitos em Fibras de Carbono/Epóxi Para Próteses Transtibiais por moldagem com Bladder. **Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, 2015.**

MARTINS, A.T.; KAMEL, K.; BIGAUD, J.; ABOURA, Z. **Effects of tufting parameters on impact properties of carbon fabric composites.** Brazilian conference on composite materials. Gramado, RS-Brasil. 2016

MAZUMDAR, S. K. **Composites manufacturing: materials, product, and process engineering.** CrC press, 2002.

MIL-HDBK-17. **Composite Materials Handbook**, MIL-HDBK-17-F, USA: Department of Defense, vol.1, rev.F. 2002

MILLS, A. R.; JONES, J. Investigation, manufacture, and testing of damage-resistant airframe structures using low-cost carbon fibre composite materials and manufacturing technology. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering**, v. 224, n. 4, p. 489-497, 2010.

MOURITZ, A. P.; BANNISTER, M. K.; FALZON, P. J.; LEONG, K. H. Review of applications for advanced three-dimensional fibre textile composites. **Composites Part A: applied science and manufacturing**, v. 30, n. 12, p. 1445-1461, 1999.

MOURITZ, A. P.; COX, B. N. A mechanistic approach to the properties of stitched laminates. **Composites part A: applied science and manufacturing**, v. 31, n. 1, p. 1-27, 2000.

MOURITZ, A. P. Review of z-pinned composite laminates. **Composites Part A: applied science and manufacturing**, v. 38, n. 12, p. 2383-2397, 2007.

MOURITZ, A. P.; COX, B. N. A mechanistic interpretation of the comparative in-plane mechanical properties of 3D woven, stitched and pinned composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 41, n. 6, p. 709-728, 2010.

M'MEMBE, B. GANNON, S.; YASAEI, M.; HALLETT, S. R.; PARTRIDGE, I. K. Mode II delamination resistance of composites reinforced with inclined Z-pins. **Materials & Design**, v. 94, p. 565-572, 2016.

NIU, M.C.Y. **Composite airframe structures: practical design information and data.** Adaso Adastra Engineering Center, 1992.

OSMIANI, C.; MOHAMED, G.; TREIBER, J. W. G.; ALLEGI, G.; PATRIDGE, I. K. Exploring the influence of micro-structure on the mechanical properties and crack bridging mechanisms of fibrous tufts. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 91, p. 409-419, 2016.

PARDINI, L. C. Preformas para compósitos estruturais. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 10, n. 2, p. 100-109, 2000.

PARDINI, L. C.; LEVY NETO, F. Compósitos estruturais: ciência e tecnologia. **Ed. Edgard Blucher. São Paulo**, 2006.

PARTRIDGE, I. K.; HALLETT, S. R. Use of microfasteners to produce damage tolerant composite structures. **Phil. Trans. R. Soc. A**, v. 374, n. 2071, p. 20150277, 2016.

PEREIRA, A. B.; DE MORAIS, A. B. Mixed mode I+ II interlaminar fracture of carbon/epoxy laminates. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 39, n. 2, p. 322-333, 2008.

PETERS, S.T. (Ed.). **Handbook of composites**. Springer Science & Business Media, 1998.

RAGONDET, A. **Experimental characterisation of the vacuum infusion process**. University of Nottingham, 2005.

**REINFORCED PLASTICS (2003)**. "Technology update: prepregs." *Reinforced Plastics*, vol 47(6), pp. 20-21.

RIZI, S. A. **Integrity assessment of preforms and thick textile reinforced composites for aerospace applications**. 2013. Tese de Doutorado. École de technologie supérieure.

ROSATO, D.V. **Plastics processing data handbook**. Springer Science & Business Media, 2012.

SICKINGER, C.; HERRMANN, A. Structural stitching as a method to design high-performance composites in future. In: **Proceedings TechTextil Symposium**. 2001.

SHIVAKUMAR, K. N.; PANDURANGA, R.; SKUJINS, J.; MILLER, S. Assessment of mode-II fracture tests for unidirectional fiber reinforced composite laminates. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 34, n. 23, p. 1905-1925, 2015.

SUN, X.; SUN, C. Mechanical properties of three-dimensional braided composites. **Composite Structures**, v. 65, n. 3, p. 485-492, 2004.

TRABELSI, W.; MICHEL, L.; OTHOMENE, R. Effects of stitching on delamination of satin weave carbon-epoxy laminates under mode I, mode II and mixed-mode I/II loadings. **Applied composite materials**, v. 17, n. 6, p. 575-595, 2010.

TREIBER, J.W.G. **Performance of tufted carbon fibre/epoxy composites**. Tese de Doutorado, Cranfield University, 2011.



TREIBER, J. W. G.; CARTIÉ, D. D. R.; PARTRIDGE, I. K. **Effects of mesostructure on the in-plane properties of tufted carbon fabric composites**, 5th International Conference on Composites Testing and Model Simulation, Lausanne, Switzerland, 2011.

TSANTZALIS, S. KARAPAPPAS, P.; VAVOULIOTIS, A.; TSOTRA, P.; PAIPETIS, A.; KOSTOPOULOS, V.; FRIEDRICH, K. Enhancement of the mechanical performance of an epoxy resin and fiber reinforced epoxy resin composites by the introduction of CNF and PZT particles at the microscale. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 38, n. 4, p. 1076-1081, 2007.

TU DELFT. Delft University of Technology: TU delft. 2014 Disponível em: <http://www.lr.tudelft.nl/index.php?id=26757&langen#delamination>. Acessado em Janeiro de 2017.

UUSITALO, K. Designing in Carbon Fibre Composites. **Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden**, 2013.

WANG, Q. **The effect of nano size fillers on electrical performance of epoxy resin**. Tese de Doutorado. University of Southampton. 2012.

YAMANE, F. O. **Fadiga de Compósitos de Fibra de Carbono/Epóxi obtidos pelo Processo de Moldagem por Transferência de Resina Assistida a Vácuo**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Itajubá, 2016.

YASAE, M.; MOHAMED, G.; HALLETT, S. R. Interaction of Z-pins with multiple mode II delaminations in composite laminates. **Experimental Mechanics**, v. 56, n. 8, p. 1363-1372, 2016.

YASAE, M.; MOHAMED, G.; PELLEGRINO, A.; PETRINIC, N.; HALLETT, S. R. Dynamic Mode II Delamination in Through Thickness Reinforced Composites. In: **Fracture, Fatigue, Failure and Damage Evolution, Volume 8**. Springer International Publishing, 2017. p. 91-97. 2017.

YUSOF, N.; ISMAIL, A. F. Post spinning and pyrolysis processes of polyacrylonitrile (PAN)-based carbon fiber and activated carbon fiber: A review. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 93, p. 1-13, 2012.

VASILIEV, V.; MOROZOV, E.V. **Mechanics and analysis of composite materials**. Elsevier, 2001.

ZHANG, X., KHELLIL, K.; ABOURA, Z. **Mecahnical Behavior of Stitched 3D Composite**. CONFERENCE ON COMPOSITE MATERIALS, Venice, Italy, 24-28 June 2012.

ZHAO, Y.; SEAH, L. K.; CHAI, G. B. Measurement of interlaminar fracture properties of composites using the J-integral method. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 35, n. 14, p. 1143-1154, 2016.

ZHU, Li. **Damage resistance of aricraft wing structure using low cost carbon fibre composite materials**. Dissertação de Mestrado, Cranfield University, 2010.