



Relatório de Projeto

Mestrado em Engenharia Automóvel

***Técnicas de reparação de compósitos laminados em
estruturas de veículos – Avaliação numérica e
experimental.***

Luiz Fernando Vilas Fonseca

Leiria, *Setembro* de 2018



Relatório de Projeto

Mestrado em Engenharia Automóvel

***Técnicas de Reparação de Compósitos Laminados em
estruturas de veículos – Avaliação numérica e
experimental.***

Luiz Fernando Vilas Fonseca

Projeto de Mestrado realizada sob a orientação da Doutora Maria Leopoldina Mendes Ribeiro de Sousa Alves, Professora da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria e coorientação do Doutor Sérgio Pereira dos Santos, Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

Leiria, *Setembro* de 2018

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Dedicatória

Este projeto de mestrado é dedicado aos principais elementos que me incentivariam e conseguiram me proporcionar esta oportunidade. Dedicção à minha família, especialmente aos meus pais. Também dedico esta tese aos professores que me ajudaram de alguma forma, especialmente o Prof. Hélder Manuel Ferreira Santos que me ajudou desde a minha vinda do Brasil, os professores orientadores da minha tese, Dra. Maria Leopoldina Mendes Ribeiro de Sousa Alves e Eng. Sérgio Pereira dos Santos. Também devo dedicar este trabalho aos amigos e companheiros que adquiri nesta jornada, sejam diretamente e indiretamente ligados a mim.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Agradecimentos

Este trabalho é fruto de muito esforço e apoio da família e dos amigos, então especialmente a eles, agradeço tudo que fizeram por mim, até a hora de conclusão do Mestrado em Engenharia Automóvel. Agradecimentos também às pessoas que me incentivaram entrar nesta aventura de sair do país de origem e tentar um novo desafio académico em um outro país, ao Eng. Hermann Windisch da Mercedes Benz do Brasil pelo apoio e incentivo desse passo na minha vida. Aos amigos que conheci em Portugal e fizeram a minha estadia mais acolhedora. Agradecimento também aos professores do Politécnico de Turim que me ajudaram na pesquisa. Além disso, um agradecimento especial a Jefter Nascimento, sócio-diretor da Polypack do Brasil, que permitiu e incentivou a realização de ensaios mecânicos em suas instalações. Um agradecimento especial para a Engenheira Fernanda Dinis Carvalho, que foi de grande ajuda na reta final e de conclusão do trabalho e do curso em si.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Resumo

Este projeto foi realizado no Instituto Politécnico de Leiria, e visa estudar o comportamento de um material compósito com base em ensaios experimentais e numéricos. O material compósito utilizado neste estudo é a Fibra de Carbono. Em especial, busca-se uma aplicação mais técnica e aprofundada deste tipo de material, sendo ela a aplicação de meios de reparação da Fibra de Carbono e fazer um comparativo estratégico entre as três etapas do processo, sendo o material sem dano, o material danificado e também com o material reparado com uma junta adesiva. As técnicas de reparação também foram abordadas neste trabalho e foi escolhida a que melhor se adequa à realidade do estudo.

Este estudo busca entender o comportamento mecânico dos elementos citados acima e analisar as suas diferenças comportamentais. Após todo o estudo, são abordadas também as possíveis aplicações em um mercado automobilístico, seja na área de reparação em si, ou inclusive em um possível desenvolvimento de produto, podendo variar sua aplicação para diferentes mercados.

Palavras-chave: Reparação, Material Compósito, Adesivos, Simulação numérica

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Abstract

This thesis, was carried out jointly with the Instituto Politécnico de Leiria, aims to study the behavior of a composite material based on experimental and numerical tests. The composite material used in this study was the Carbon Fiber. It is sought a more technical and in-depth application of this type of material, being it the application of means of repair of the Carbon Fiber and seek to make a strategic comparison between the material without damage, the material with the known damage and with the repaired material with an adhesive joint. The repair techniques were also be approached in this work and the chosen one was best suited to the reality of the study.

This study seeks to understand the mechanical behavior of the elements mentioned above and to analyze the difference between them. After all the study, was approached the possible applications in an automotive market, either in repairment area itself, or even in a possible product development, being able to vary its application to different markets.

Keywords: Repairment, Composite Material, Adhesives, Numerical simulation

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Lista de figuras

Figura 1 - Exemplo de fibra de Carbono	6
Figura 2 - Tipos mais comuns de fibras em compósitos [47]	8
Figura 3 – Exemplificação de um material compósito [46].....	8
Figura 4 - Exemplo de composição de Compósitos [48]	10
Figura 5 - Variação da resistência mecânica em função dos ângulos da lamina [49]	11
Figura 6 - Exemplo de utilização SAAB Gripen [50]	12
Figura 7 - Demonstração de utilização de materiais em aeronaves [32]	13
Figura 8 - Exemplo de Veículo com chassis em Fibra de Carbono	15
Figura 9 - Carroceria em fibra de carbono do BMW i8 [66].....	15
Figura 10 - Exemplo de construção de um esqui [51].....	17
Figura 11 - Diferença construtiva entre uma raquete de tênis atual de compósito e uma antiga de madeira [Autor].....	18
Figura 12 - Aplicação de Fibra de carbono em estruturas de bicicletas	19
Figura 13 - Ilustração de um processo de Pultrusão [52]	20
Figura 14 - Processo de Pré impregnação [53]	21
Figura 15 - Modo de fornecimento da fibra de carbono unidirecional [Autor]	21
Figura 16 - Última etapa do processo de pré-impregnação [Autor]	22
Figura 17 - Exemplo de aplicação do processo de pré-impregnação [55]	22
Figura 18 - Análise macromecânica do material.....	26
Figura 19 - Explicação de aplicação de flexão [55]	28
Figure 20 - Esquema de cálculo.....	29
Figura 21 - Ilustração dos eixos mencionados.....	30
Figura 22 – Influências no peso do veículo [Autor]	38
Figura 23 - Exemplo de aplicação de juntas mecânicas.....	39
Figura 24 - Tipos de juntas adesivas	40
Figura 25 - Conceito de Condição Livre de Tensão (Lucas F.M. da Silva).....	41
Figura 26 - Efeitos da espessura do aderente nos modos de falha das juntas colada [48]	41
Figura 27 - Modelo de Volkersen	42
Figura 28 - Curva de tensão x deformação de adesivos [1]	43
Figura 29 - Metodologias de reparo de materiais compósitos para aplicação de adesivos [28]	44
Figura 30 - Métodos de reparação com camadas e adição de materiais [28]	45
Figura 31 - Desenho informativo dos provetes utilizados no ensaio do estudo referenciado [28]	45
Figura 32 - Comparativo da resistência mecânica obtida [28].....	46
Figura 33 - Gráfico de tensão de corte em step [28]	46
Figura 34 - Metodologia aplicada [US 8.475,615 B2]	47
Figura 35 - Aspecto final [US 8.475,615 B2]	47
Figura 36 - Modelo em chanfro de reparo	48
Figura 37 - Distribuição das tensões de corte ao longo de uma junta cisalhada.	49
Figura 38 - Relação entre adesivos.....	52
Figura 39 - Modos de falha de uma junta colada [Autor].....	52
Figura 40 - Modelos CZM disponíveis no Ansys.....	55
Figura 41 - Detalhe do Modelo de reparação.....	56
Figura 42 - Tecido de Fibra de Carbono.....	58
Figura 43 - Combinado de Resina e Endurecedor.....	59
Figura 44 - Desmoldante utilizado para que a placa não aderisse à mesa de trabalho	59

Figura 45 - Local de trabalho para a produção da placa	60
Figura 46 - Montagem completa da placa pronta a ser prensada	61
Figura 47 - Placa de Fibra de Carbono após a prensagem	62
Figura 48 - Processo de cura no forno	62
Figura 49 - Corte da placa nos formatos dos provetes	63
Figura 50 - Planta do provete obtido.....	63
Figura 51 - Provelte obtido após os cortes	64
Figura 52 - Metodo de furação no provete	65
Figura 53 - Modelo de provete utilizado danificado.....	66
Figura 54 - Metodologia de Reparo utilizada no trabalho	66
Figura 55 - Adesivo utilizado para a reparação [56]	67
Figura 56 - Característica de comportamento Mecânico do adesivo [56]	67
Figura 57 - Modelo de provete utilizado reparado.....	68
Figura 58 - ilustração da etapa final da colagem da reparação	68
Figura 59 - Colagem de extensómetros	71
Figura 60 - Extensómetros utilizados	72
Figura 61 - Extensómetros colados	73
Figura 62 - Placa de aquisição NI eDAQ-9172.....	74
Figura 63 - Extensómetros ligados à placa de captura	74
Figura 64 - Montagem de leitura dos extensómetros em LabView	75
Figura 65 - Exemplo de leitura e calibração dos extensómetros	75
Figura 66 - Interface de configuração do extensómetro utilizado.....	76
Figura 67 - Ensaio de Tração.....	77
Figura 68 - Metodologias de falha da fibra de carbono em ensaios de tração	79
Figura 69 - Simplificação ensaio flexão.....	81
Figura 70 - Ilustração de um ensaio de flexão	82
Figura 71 - Menu Ansys ACP.....	83
Figura 72 - Engineering Data no ACP	84
Figura 73 - Modelador de Geometria do Ansys.....	84
Figura 74 - Submenu Model do Ansys ACP.....	85
Figura 75 - Submenu Setup do Ansys ACP.....	85
Figura 76 - Simulação estática do Ansys.....	87
Figura 77 - Gráfico de comparação aos resultados analíticos em tração	90
Figura 78 - Gráfico de comparação aos resultados analíticos em flexão	91
Figura 79 - Ensaio de Tração até 2 kN	92
Figura 80 - Leitura dos extensómetros para estimar coeficiente de Poisson	93
Figura 81 – Ensaio de tração	94
Figura 82 - Imagem ilustrativa dos ensaios com provetes sem dano, sendo acompanhados pela leitura de extensómetros	95
Figura 83 - Fratura no provete sem dano	95
Figura 84 - Figura ilustrativa da fratura diferenciada	96
Figura 85 - Ilustração do ensaio de tração realizado no provete com furo	97
Figura 86 - Ensaio de tração no regime Elástico	98
Figura 87 - Ensaio de tração até a rotura do material	98
Figura 88 - Tipo de falha do material quando submetido até a rotura	99
Figura 89 - Provelte reparado em ensaio de tração	100
Figura 90 - Ensaio de tração com o provete reparado	100
Figura 91 - Comparativo de ensaio de tração em regime elástico.....	101

Figura 92 - Comparativo do Módulo de Elasticidade.....	101
Figura 93 – Ensaio de flexão em provete sem dano	102
Figura 94 - Ensaio de flexão com provete danificado.....	103
Figura 95 - Ensaio de flexão com provete reparado até a fratura	104
Figura 96 - Ensaio experimental do provete reparado	104
Figura 97 - Comparativo experimental dos provetes em flexão.....	105
Figura 98 - Falha do material às beiras da reparação	106
Figura 99 - Comparativo do Módulo de Elasticidade à flexão	106
Figura 100 - Setup do carregamento do provete no Software Ansys	107
Figura 101 - Simulação numérica de um ensaio de tração simplificado.....	108
Figura 102 - Tensão Longitudinal no eixo X do laminado completo por camada	108
Figura 103 - Tensões na direção YY separadas por camada	109
Figura 104 - Concentração de tensão em camada a 90 graus	110
Figura 105 - Tensão atuante em lamina a zero graus	110
Figura 106 - Tensões máximas atuantes por camada na região do furo	111
Figura 107 - Demonstração de um provete com concentrador de tensão	111
Figura 108 - Tensões longitudinais na região da junta colada	112
Figura 109 - Comparativo em elementos finitos dos ensaios de tração realizados	113
Figura 110 - Metodologia de criação dos ensaios de flexão	113
Figura 111 - Demonstração de flecha máxima para 70N em flexão	114
Figura 112 - Gráfico do comportamento do material em FEA	114
Figura 113 - Flecha em Provete com dano	115
Figura 114 - Comportamento em FEA do provete com dano	115
Figura 115 - Demonstração da concentração de tensão em um furo	116
Figura 116 - Deformação para uma aplicação de 70N.....	117
Figura 117 - Demonstração de concentradores de tensão.....	117
Figura 118 - Tensão na superfície colada	118
Figura 119 - Ensaio de flexão em FEA de um provete reparado.....	118
Figura 120 - Comparativo à flexão em FEA dos provetes testados.....	119
Figura 121 - Comparativo de metodologias para provete sem dano em tração	120
Figura 122 - Comparativo de metodologias para provete sem dano em flexão.....	121
Figura 123 - Comparativo de metodologias para provete com dano em tração	121
Figura 124 - Comparativo de metodologias para provete com dano em flexão.....	122
Figura 125 - Comparativo de metodologias para provete reparado em tração	122
Figura 126 - Comparativo de metodologias para provete reparado em flexão.....	123

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Lista de tabelas

Tabela 1 - Classificação de compósitos laminados	10
Tabela 2 - Materiais e suas aplicações no automóvel. [Autor]	14
Tabela 3 - Tipos de estruturas e aplicações	16
Tabela 4 - Equações utilizadas para cálculo de propriedades mecânicas de compósitos laminados [33]	29
Tabela 5 - Organização do empilhamento	30
Tabela 6 - Propriedades dos materiais utilizados	31
Tabela 7 - Mudança de direção das propriedades mecânicas [33]	33
Tabela 8 - Resumo das Propriedades mecânicas no plano XY	37
Tabela 9 - Comparação entre metodologias de união [48]	50

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Lista de siglas

FEA – *Finite Element Analysis* (Análise de elementos Finitos)

ASTM - American Society for Testing and Materials

ht - Espessura do laminado

CFRP - Polímero Reforçado com Fibra de Carbono

UHMWPE - Polietilenos de massa molecular ultraelevada

PAN - Poliacrilonitrila

Teta - Angulo

BMW - Bayerische Motoren Werke

EPA - Environmental Protection Agency

X - Fração volumétrica do material

$\sigma(f)$ - Tensão longitudinal da fibra

$\sigma(m)$ - Tensão longitudinal da matriz

E -Módulo de Young do material na direção longitudinal

V - Fração volumétrica;

Em - Módulo de elasticidade da matriz

Ef - Módulo de elasticidade da fibra

Vm - fração volumétrica da matriz

Vf - fração volumétrica da fibra

El - Modulo de elasticidade longitudinal no plano LT

Et - Modulo de elasticidade transversal no plano LT

ν_{LT} - Coeficiente de Poisson no plano LT

ν_{TL} - Coeficiente de Poisson no plano TL

Glt - Módulo de corte no plano LT

Ex - Modulo de elasticidade longitudinal no plano XY

Ey - Modulo de elasticidade transversal no plano XY

$\sigma(x)$ - Tensão longitudinal do laminado no plano XT

$\sigma(y)$ - Tensão transversal do laminado

CNC - Comando numérico computadorizado

CAD - Desenho assistido por computador

CZM - Modelo da Zona Coesiva

δ - Deformação no eixo longitudinal

P - Força aplicada em Newton

A - Área da secção transversal do provete

L - Comprimento do provete

ACP - ANSYS Composite Prep/Post

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Índice

Dedicatória.....	iii
Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract	ix
Lista de figuras	xi
Lista de tabelas.....	xv
Lista de siglas	xvii
Índice	xx
1. Introdução.....	1
1.1 Organização do documento.....	3
2. Desenvolvimento Teórico.....	5
2.1 Introdução à fibra de Carbono.....	5
2.2 Compósitos laminados	9
2.2.1 Aplicações.....	11
2.3 Metodologias de fabrico da fibra de carbono.....	20
2.3.1 Pultrusão.....	20
2.3.2 Processo de Pré impregnação.....	21
2.3.3 Processo Manual.....	23
3. Estado da arte.....	25
3.1 Determinação de resistência de laminados multidirecionais	26
3.2 Metodologias de união da Fibra de Carbono.....	38
3.2.1 Juntas mecânicas.....	39
3.2.2 Junta colada.....	40
3.2.3 Tipos de adesivos utilizados em Materiais compósitos.	51
3.2.4 Critérios de falhas em materiais compósitos laminados	53
3.2.4.1 Teoria de Tsai-hill	54
3.2.4.2 Teoria de Tsai-Wu.....	54
3.2.4.3 Modelo da Zona Coesiva.....	55
4. Metodologia experimental.....	57
4.1 Metodologia de preparação dos provetes.....	57
4.2 Materiais Utilizados	58
4.3 Metodologia de Fabrico	60

4.4	Metodologia de produção de dano.....	65
4.5	Metodologia de reparação	66
5.	Extensometria	71
6.	Procedimento experimental.....	77
6.1	Ensaio de Tração.....	77
6.2	Ensaio de Flexão	81
6.3	Simulação numérica em Elementos finitos.....	83
7.	Resultados.....	89
7.1	Cálculos Analíticos	89
7.1.1	Cálculos analíticos em tração para todos os provetes.....	89
7.1.2	Cálculos analíticos em flexão para todos os provetes	91
7.2	Resultados experimentais.....	92
7.2.1	Resultados experimentais em tração	92
7.2.2	Resultados experimentais em flexão	102
7.3	Resultados em Simulação numérica	107
7.3.1	Resultados dos provetes em tração.....	107
7.3.2	Resultados dos provetes em flexão	113
7.4	Comparativo entre os resultados	120
8.	Conclusão	125
8.1	Trabalhos futuros.....	126
9.	Bibliografia	127

1. Introdução

Nos últimos anos, no ramo da indústria automóvel as pesquisas sobre novas tecnologias de possível aplicação em seus produtos em desenvolvimento, cresce e obriga uma evolução em termos de materiais de base, eletrônicos, novos modelos, otimização de projetos, redução de custos e principalmente em relação às emissões de poluentes. Este projeto tem o objetivo de ajudar na contribuição científica de desenvolvimento em relação à utilização de materiais compósitos e mais precisamente, ao nível de reparação, abordando os principais pontos em relação ao material, também em relação aos desenvolvimentos já ocorridos neste âmbito e possíveis contribuições futuras, em particular com técnicas de juntas coladas.

Os adesivos são utilizados numa grande variedade de aplicações, sejam em materiais metálicos, poliméricos compósitos, ou até mistos com uma variedade de formas, tamanhos e espessuras. Uma boa vantagem deles é justamente oferecer uma flexibilidade de geometrias, para além das vantagens inerentes à utilização de novas metodologias e juntas mecânicas. Em particular, as juntas adesivas proveem uma maior distribuição da carga, em uma área maior, reduzem significativamente a concentração de tensões e apresentam uma maior resistência a fadiga e corrosão [23].

Uma boa parte do trabalho de investigação desenvolvido nesta área, foi produzido pela evolução da indústria aeronáutica nos anos de 1970 em diante. Em particular, os materiais compósitos oferecem uma elevada resistência mecânica, elevada resistência a fadiga, elevada dureza, baixa expansão térmica e principalmente, uma baixa densidade, ou seja, baixa massa.

Mais recentemente, algumas outras análises foram realizadas através de Elementos Finitos (FEA) que apresentaram um estudo das juntas coladas, focada em materiais compósitos e em seu comportamento, como é o caso de Banea e da Silva [6]

O processo de ligação de duas ou mais estruturas se diz em união adesiva quando incorpora partes como aderentes ou substratos. Adesivos estruturais entram no cenário da engenharia pelo fornecimento de uma ligação poderosa e definitiva entre os aderentes, que passam por uma união físico-química causando duas formas diferentes de resistências, coesiva e adesiva.

Este assunto assume particular importância nos dias de hoje, visto que quer a utilização de compósitos quer a utilização de juntas coladas têm sofrido um aumento significativo nos últimos anos, devido ao baixo peso e alta rigidez por parte dos compósitos, e ao baixo peso e à transferência de carregamentos uniformes por parte dos adesivos.

O objetivo deste projeto é, portanto, usar os métodos experimentais e numéricos para:

- Analisar o comportamento mecânico de uma determinada configuração de um material de fibra de carbono, comparando com a simulação numérica do comportamento do material.
- Analisar o comportamento de variações dessa mesma configuração da fibra de carbono com uma falha já programada e uma variação do material reparado por adesivos, comparando com o item anterior;
- Analisar os métodos de falha da reparação (junta colada).

Este projeto tem por objetivo analisar o comportamento mecânico de um material compósito, mais especificamente a fibra de carbono, em seu estado natural, em uma situação com uma fratura já iniciada e com uma determinada metodologia de reparação da mesma, utilizando materiais adesivos para refazer a união, fazendo um comparativo das principais propriedades mecânicas das situações.

O problema consiste em adquirir informações necessárias para conseguir realizar um estudo da fibra de carbono, seja de modo experimental e numérico. Deve ser feita uma pesquisa para perceber o que já foi feito pela comunidade científica, e tentar abordar uma forma comparativa com uma nova visão técnica sobre o assunto. Este estudo busca entender o comportamento mecânico dos elementos citados acima e analisar a diferença aplicada entre eles. Após o estudo, foi abordado também as possíveis aplicações em um mercado automobilístico, seja na área de reparação em si, ou inclusive em um possível desenvolvimento de produto, podendo variar sua aplicação para diferentes mercados.

1.1 Organização do documento

Serão realizados neste trabalho o estudo do comportamento de um material compósito, de acordo com as metodologias apresentadas por normas ASTM, em três situações diferentes, nas estruturas laboratoriais do Instituto Politécnico de Leiria e com a ajuda dos Softwares Ansys e Labview, para realizar um estudo comparativo entre a simulação numérica e a realização experimental.

No capítulo 2, se dá em uma pequena introdução ao cenário que se encontra a fibra de carbono em si, identificando as suas principais características, suas aplicações e formas apresentadas no mercado. Também possui uma avaliação dos planos de análises já existentes no cenário das metodologias de reparação de materiais compósitos, pensando em uma escolha de determinada metodologia para aplicar neste projeto.

No capítulo 3 é abordado o estado da arte em relação ao tema do assunto e também possui uma abordagem aos principais tipos de adesivos utilizados nos materiais compósitos, suas classificações e comportamentos.

No capítulo 4 é referida a metodologia experimental no que diz respeito a testes a serem realizados no projeto.

Após o estudo do comportamento de todos os elementos envolvidos no projeto, no capítulo 5 são abordadas as metodologias de trabalho utilizada para a realização do projeto, incluindo o fabrico da placa de fibra de carbono, os materiais utilizados, a parte de extensometria, ou seja, de captação dos dados via *Labview*, os devidos cuidados no processo de fabrico.

No capítulo 6 apresenta a abordagem e as características dos ensaios, em relação às três abordagens do projeto, sendo que na primeira abordagem, foi avaliado um provete feito em fibra de carbono e resina, com dimensões de 25x 250 x ht, com a espessura a ser determinada com o número de camadas e a quantidade de resina utilizada, em relação a suas propriedades mecânicas. Após esta abordagem, foi feito um furo de 5mm de diâmetro no centro do provete, como uma forma de simular um dano no provete e também foi feita uma reparação conforme pesquisa bibliográfica para uma melhor adaptação às realidades do projeto.

No capítulo 7, são avaliados resultados analíticos, uma demonstração de como são obtidas as propriedades mecânicas das lâminas e também do compósito laminado. Serão comparados aos resultados experimentais e também em relação às simulações numéricas por Elementos Finitos.

No capítulo 8 conferem-se conclusões a respeito do efeito do dano e da reparação no material de base.

2. Desenvolvimento Teórico

Nesta parte deste documento se desenvolve uma introdução ao mundo dos materiais compósitos laminados, com o objetivo de apontar as principais características da utilização da fibra de carbono, como se constituem, onde são utilizados, das principais utilizações em desportos e engenharias automóveis e aeroespacial, além de uma breve explicação de como são produzidos os tecidos de fibra de carbono.

2.1 Introdução à fibra de Carbono

O compósito reforçado por fibra de carbono ou polímero reforçado por fibra de carbono (CFRP ou simplesmente fibra de carbono) é um compósito filamentosos, obtido a partir de vários tipos de materiais compostos de carbono através da decomposição térmica sem oxigenação, também conhecida como pirólise, contendo pequenas quantidades de materiais inseridos em sua estrutura, como resinas por exemplo. É um material polimérico extremamente resistente e leve que contém a fibra de carbono, normalmente muito custoso de ser produzido, porém é encontrado facilmente em aplicações que exijam uma elevada relação resistência por peso e rigidez, como por exemplo aplicações aeroespaciais, automóvel de alto rendimento, engenharia civil, produtos esportivos e a tendência é de aumentar o seu campo de aplicações para o consumidor e principalmente técnicas.

A fibra de carbono em si (Figura 1), é um polimérico compósito sintético que é composto normalmente de duas fases, matriz e reforço. A matriz, geralmente é uma resina termoendurecível (que não são possíveis de reaproveitar após uma primeira utilização, em termos de fusão do material, pois ele é degradado) como por exemplo a resina epóxi, mas também pode ser composta por polímeros termoplásticos que podem ser reutilizados, como o poliéster, o éster vinílico ou nylon inclusive em algumas aplicações. Sendo um material sintético, a fibra de carbono é composta por filamentos construídos maioritariamente de carbono, mas não apenas desse elemento, pois também existem outros utilizados para a produção dos filamentos e também para a sustentação das fibras. A expressão “fibra de carbono” geralmente se refere a uma variedade de produtos filamentosos compostos por mais de 90% de carbono e filamentos de 5 a 15 μm de diâmetro. Além disso, o compósito deve conter aramida, em polietilenos de massa molecular ultraelevada (UHMWPE) ou em fibras de vidro em adição às fibras de carbono.

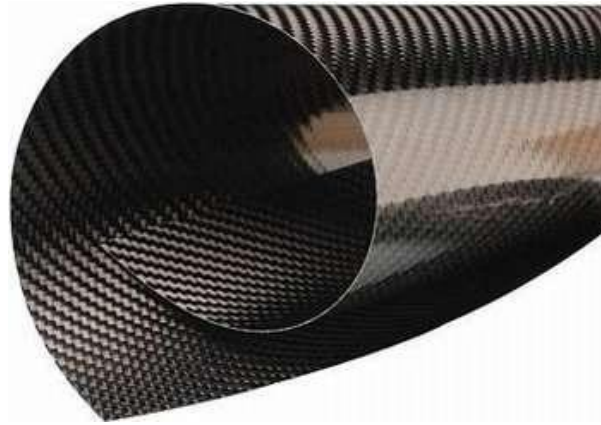


Figura 1 - Exemplo de fibra de Carbono

Relatos de pesquisadores afirmam ser Thomas Edison, o inventor da lâmpada, quem obteve em primeira mão esse material, pela decomposição térmica de algodão, no ano de 1878, para obter filamentos para suas lâmpadas incandescentes.

A exploração comercial da fibra de carbono iniciou-se no ano de 1950, quando se utilizou primeiramente “rayon”, porém concluiu-se que este material produzia pouco carbono, estendendo assim o campo de pesquisa ao redor de materiais, chegando ao poliacrilonitrila e piche de petróleo, sendo atualmente utilizados como material primordial na obtenção dos filamentos, em função de sua alta taxa de carbono.

O aperfeiçoamento deste material ocorreu no decorrer da década de 60, quando Japão e Inglaterra empregaram o poliacrilonitrila (PAN), na produção desta fibra.

Durante os anos de 1970, os esforços visavam à redução do custo das fibras com o uso do precursor piche, menos dispendioso. A Union Carbide comercializou fibras de carbono derivadas do piche de baixo módulo, baseado no precursor piche isotrópico e uma família de alto módulo de fibras de carbono baseado no precursor cristal líquido do piche. Infelizmente, deficiências na resistência à compressão de fibras e o alto custo na purificação do líquido cristalino do piche precursor (Lubin, 1969) têm limitado a aceitação e crescimento de uso das fibras de carbono de alto módulo.

Hoje a fibra de carbono detém uma abrangência sobre bens de consumo, sendo utilizados em celulares, sapatos, móveis, eletrodomésticos, artefacto de uso médico, esportivo e odontológico, está presente em praticamente todos os bens de consumo em todo mundo, o que fatalmente aumenta a demanda pelo material, aumentando sua produção e exigindo de pesquisadores novas técnicas na fabricação e é lógico, diminuindo o custo.

Um material compósito por si só, é feito pela união de uma fibra (reforço estrutural) e uma resina (matriz), ou seja, é a combinação de filamentos estruturais com uma matriz polimérica (normalmente aplicada epóxi). E são muito utilizados em indústrias como a Marítima, Biomédica, Automóvel e principalmente a Aeronáutica.

É importante lembrar que, o material compósito, apesar de ser uma junção de dois outros materiais, cada um deles ainda possui as suas principais características mecânicas, químicas e físicas.

No caso de estudo deste projeto, o polímero reforçado com fibra de carbono, consiste justamente pela resina e pela fibra de carbono em si (considerado o reforço), o reforço em si é na maioria dos casos é considerado o material mais duro, mais resistente e mais rígido do que a matriz, o que faz com que estatisticamente, esse material suporte aproximadamente 70 a 90 % do carregamento aplicado, o que garante a rigidez mecânica, e outras propriedades mecânicas, térmicas e elétricas do material combinado.

Já a matriz polimérica, é o material escolhido que faz com que o reforço estrutural seja mantido unido e que consegue transferir as forças para o reforço, proporcionando justamente a ligação mais forte desses materiais. Além disso, esse material é responsável pelo acabamento superficial do material, que tem funções de isolante químico e de outros danos.

Estes compósitos com reforço de fibra são normalmente construídos em laminados, por uma sequência de empilhamento de lâminas colocadas em diferentes orientações, de forma a se obter as propriedades de resistência e de rigidez desejadas.

Os reforços, no geral, podem ser: fibras retas contínuas, descontínuas ou cortadas, partículas ou flocos, ou fibras contínuas em tecidos, entrelaçadas ou em malha, como o exemplo da Figura 2:

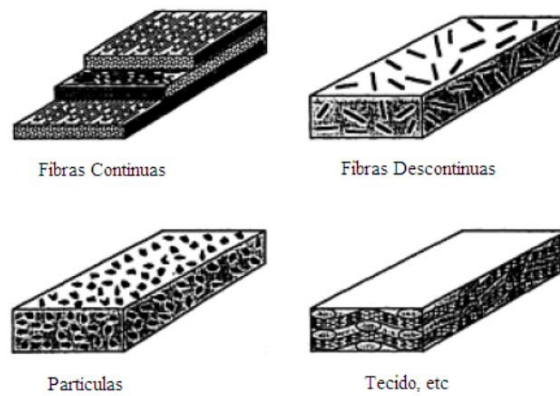


Figura 2 - Tipos mais comuns de fibras em compósitos [47]

A maior vantagem de se utilizar um material compósito em relação aos materiais metálicos é justamente a aposta em redução de peso estrutural com o objetivo de manter as mesmas ou até maiores propriedades mecânicas, devido à sua baixa densidade.

As fibras contínuas possuem uma elevada relação entre o comprimento da fibra e o seu diâmetro. Estes compósitos com reforço de fibra são normalmente construídos em laminados, por uma sequência de empilhamento de lâminas colocadas em diferentes orientações, de forma a se obter as propriedades de resistência e de rigidez desejadas.

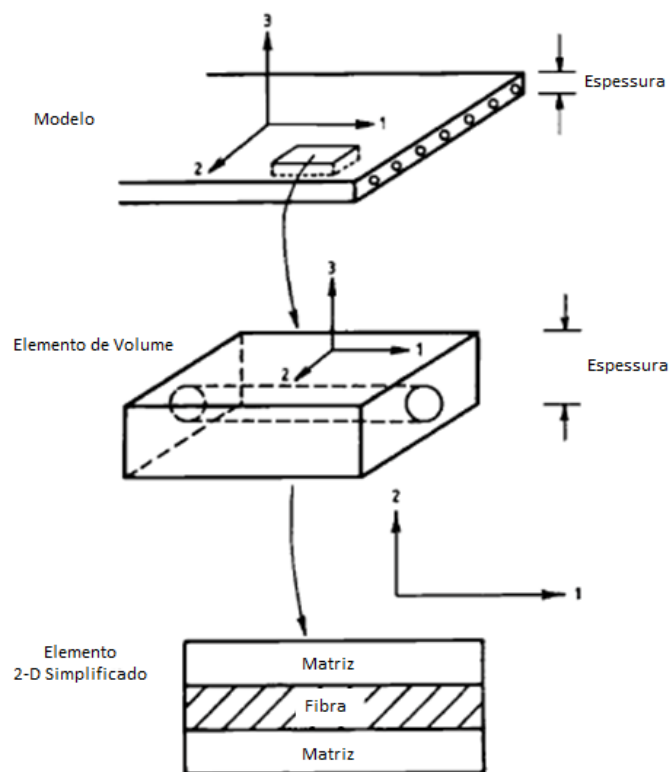


Figura 3 – Exemplificação de um material compósito [46]

A Figura 3 é um exemplo de aplicação de um compósito e como ele é obtido de os constituintes de uma lamina do material compósito.

O Polímero Reforçado de Fibra de Carbono (CFRP) é um material polimérico como o próprio nome diz e por sua consequência, por propriedade dos próprios polímeros, são materiais anisotrópicos, ou seja, eles possuem um comportamento delicado, comparativamente aos materiais metálicos, onde já existe uma definição bem instruída de seu comportamento. Esses materiais, não possuem um comportamento bem definido e não necessariamente parecidos quando analisados os planos de referência de tensões aplicadas em um corpo do material. Ou seja, os ângulos das camadas influenciam no desempenho.

O reforço vai conferir ao compósito a sua resistência mecânica e também a sua rigidez, medidos por tensão e módulo elástico do material respectivamente. Diferentemente dos materiais metálicos, como o aço e o alumínio, os compósitos são materiais anisotrópicos, o que significa em uma resistência mecânica diretamente ligada à direção de aplicação da carga experimental. Basicamente, ele depende das orientações das fibras quando são fabricados, e além disso, a proporção de fibras em relação à matriz polimérica (resina). Esses parâmetros influenciam diretamente na resistência mecânica final do seu compósito.

Existem maneiras de se determinar numericamente as características mecânicas de componentes de fibra de carbono, e neste estudo possui uma área (subcapítulo 3.1) diretamente dedicada ao cálculo numérico teórico das propriedades mecânicas da fibra de carbono.

2.2 Compósitos laminados

Em uma análise crítica da construção de laminados de materiais compósitos, alguns padrões devem ser respeitados e levados em consideração quando se querem determinar as propriedades mecânicas do compósito, como por exemplo: as características dos materiais a serem utilizados, com base nos fornecedores da matéria prima, a sequencia de empilhamento de laminas do material (Figura 4), juntamente com os ângulos de orientação das laminas a serem contextualizadas, as espessuras de cada lamina de tecido da combinação da fibra com a resina.

Existem diversas classificações de laminados, levando em consideração a sequência de empilhamento das lâminas de acordo com a orientação das fibras, ou esquema de laminação, por exemplo:

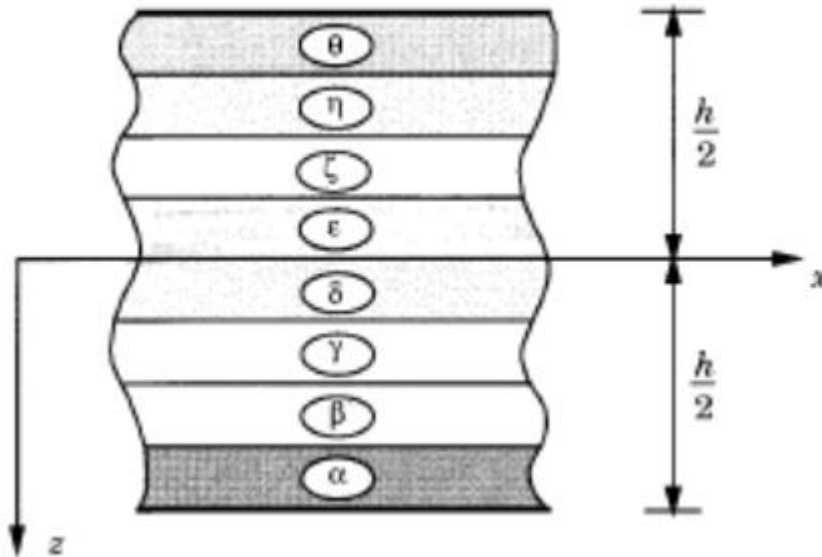


Figura 4 - Exemplo de composição de Compósitos [48]

Onde, α é a orientação, em graus, das fibras da primeira lâmina, e β a orientação das fibras da segunda lâmina, e assim sucessivamente. Em termos de angulação, todas as camadas estão distribuídas entre -90 e 90 graus e a sua orientação podem ser classificadas como na Tabela 1:

Tabela 1 - Classificação de compósitos laminados

Lamina\tipo de laminado	Angulo da Lâmina					
	Cross-ply	Angle-Ply	Simétrico	Antissimétrico	Assimétrico	Simétrico
θ	90	35	-25	90	90	45
η	0	-15	35	0	0	0
ζ	0	0	0	90	0	45
ϵ	90	90	90	0	90	0
δ	90	60	90	90	0	0
γ	0	45	0	0	0	45
β	90	-50	35	90	90	0
α	0	45	-25	0	90	45

Vale lembrar também a influência do ângulo de orientação das fibras como um fator determinante nas propriedades mecânicas do material compósito, como pode ser observado

nos gráficos da Figura 5 - Variação da resistência mecânica em função dos ângulos da lamina.

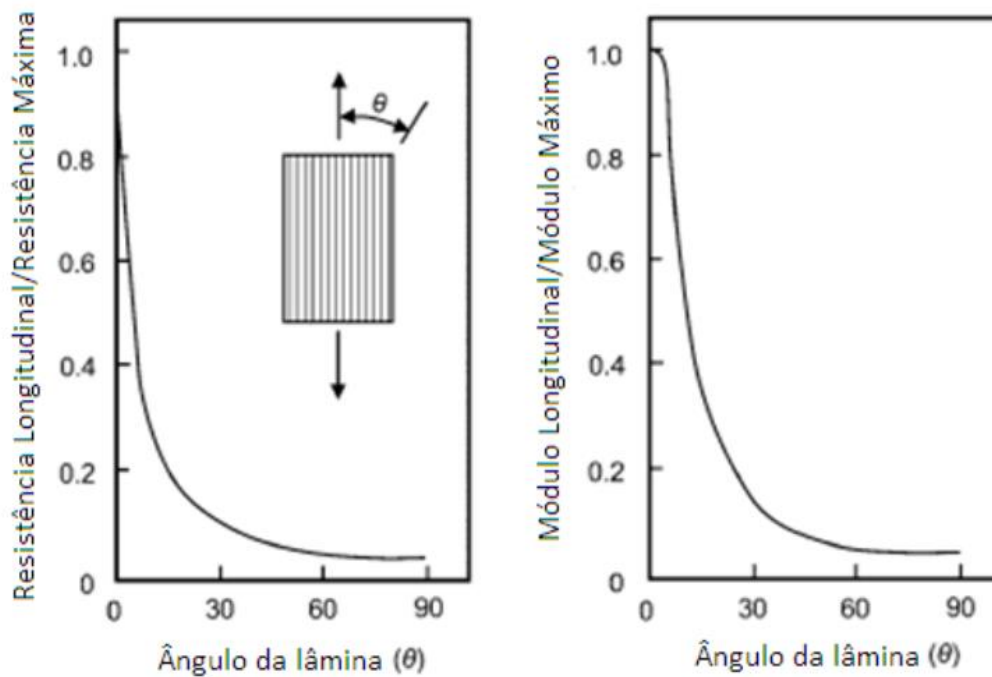


Figura 5 - Variação da resistência mecânica em função dos ângulos da lamina [49]

Com isso, pode-se concluir que o ponto forte de aplicação dos materiais compósitos, é a aplicação onde a resistência a tração da fibra vai ser mais exigida, pois é o ponto de melhor aproveitamento do material, ou seja, se a orientação das fibras está a 0 graus, a melhor aplicação possível para este tipo de alinhamento, é um carregamento longitudinal paralelo à orientação da fibra.

2.2.1 Aplicações

O ramo de aplicações de materiais compósitos só tende a crescer, pois suas características mecânicas têm condições de suprir as necessidades atuais e ainda abre espaço para desenvolvimento de novas aplicações, ou seja, em virtude de as fibras de carbono possuírem elevados valores de resistência à tração, módulo de elasticidade extremamente elevado e baixa massa específica, comparadas com outros materiais de engenharia, são utilizadas predominantemente em aplicações críticas envolvendo redução de massa.

Neste trabalho, algumas aplicações vão ser comentadas e devem ser levadas em consideração como um desenvolvimento e popularização da utilização desses materiais compósitos, indo

da aplicação mais avançada atualmente, para a mais popular e acessível ao público. Sendo as aplicações de engenharia: Aeroespacial, Automotiva e Desportiva.

No ramo da engenharia Aeroespacial, pode-se dizer que é um dos mais avançados na pesquisa sobre a utilização de materiais compósitos, devido a sua grande atuação na área do desenvolvimento e de necessidade de utilizar materiais leves. O objetivo dessa indústria é justamente abordar quesitos sejam militares, sejam comerciais no quesito de melhorar estruturalmente os materiais utilizados na construção dessas máquinas. Os materiais compósitos são particularmente atrativos para essa indústria, devido a sua excepcional relação de resistência e rigidez pela densidade do material.

Outro ponto muito favorável ao uso dos materiais compósitos, é a capacidade de formarem peças com geometrias complexas, isso acaba reduzindo não apenas o número de peças a serem fabricadas, mas também com a quantidade de juntas, que podem ser considerados pontos fracos em um componente.

Inicialmente, os materiais compósitos foram usados apenas como estruturas secundárias, mas também, com o desenvolvimento de estudos nesses tipos de materiais, começaram também a serem usados como principais estruturas, tais como asas e fuselagem.

Com o passar dos anos, a aplicação foi crescendo ainda mais, e hoje em dia cerca de 75 % da área externa de uma aeronave (Figura 6) é composta de materiais compósitos e cerca de apenas 25 % em peso.



Figura 6 - Exemplo de utilização SAAB Gripen [50]

Um caso interessante de se analisar, é o bombardeiro F18c (Figura 7) que tem por sua característica *stealth*, ou seja, indetetável por radares, houve a necessidade de adicionar materiais metálicos em sua carenagem para ser detetável.

A utilização de materiais compósitos em aeronaves comerciais é atrativa pelo facto de reduzir o peso da estrutura do avião e por consequência, reduzir o consumo de combustível e também os seus custos de produção e operação. Nesse caso, também foi iniciado pela utilização da parte traseira da estrutura das aeronaves como teste de materiais compósitos na sua estrutura, e foram avançando para a estrutura completa da traseira dos aviões, essa estrutura completa, quando comparada às de materiais metálicos, conseguiram reduzir cerca de 700kg da traseira do avião Boeing 777.

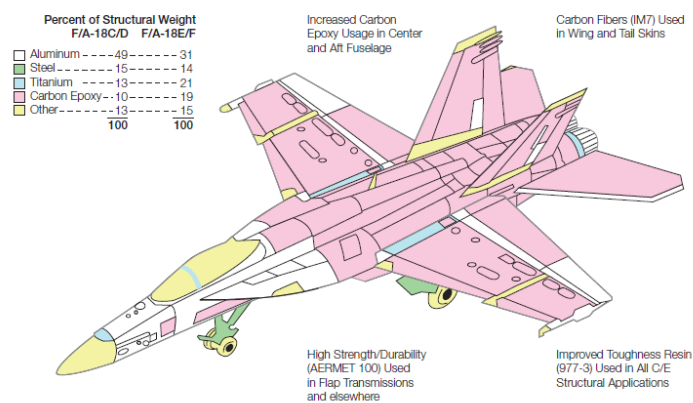


Figura 7 - Demonstração de utilização de materiais em aeronaves [32]






Em suma, os derivados de materiais compósitos devem ser mais estudados e desenvolvidos para conseguir uma aplicação mais variada e otimizada em estruturas de aeronaves. Não há dúvidas da importância fundamental desse tipo de material na estrutura de máquinas aeroespaciais e é nítido que oferecem um ganho enorme com a sua utilização.

Pensando agora no ramo da indústria automóvel as pesquisas sobre novas tecnologias de possível aplicação em seus produtos em desenvolvimento, cresce e obriga uma evolução em termos de materiais de base, eletrónicos, novos modelos, otimização de projetos, redução de custos e principalmente em relação às emissões de poluentes.

A fibra de carbono em si, vem sendo utilizada na produção de veículos por cerca de 20 anos e ainda mais comum e frequente de ser encontrada em veículos nos últimos 5 anos, principalmente em veículos de alta gama, como BMWs. A Fibra de carbono em si, é composta por filamentos de carbono e um polímero plástico em forma de resina e forma o

que é chamado hoje de material compósito. O principal ponto forte da fibra de carbono em relação aos outros materiais, é que é muito leve, em relação aos metais, e muito mais mecanicamente resistente em relação aos polímeros (vale lembrar também que não existe nenhum material metálico presente na fibra de carbono). Pode-se verificar que as características físicas dos compósitos e dos metais são significativamente diferentes e as suas principais utilizações no ramo automóvel na Tabela 2:

Tabela 2 - Materiais e suas aplicações no automóvel. [Autor]

Partes do Veículo	Estrutura (Body-in-white)	Painéis e acabamentos	Powertrain	Suspensão e Chassis	Conforto
					
Principais utilizações	Habitáculo dos passageiros	Capô do motor e tampa traseira	Motor	Chassis	Assentos
	Colunas A, B e C	Portas dianteiras e traseiras	Sistema de Exaustao	Rodas	Painel de Instrumentos
	Painel do Teto	Paralamas	Tanque de Combustível	Sistema de direção	Airbags
	Piso		Transmissão	Travões	Encaixes
Material	Aço	Aço	Alumínio	Aço	Plásticos
	Aço (AHSS)	Alumínio		Alumínio	Magnésio
	Alumínio	Fibra de vidro (GFRP)	Magnésio	Fibra de Carbono (CFRP)	Fibra de Vidro
	Fibra de carbono (CFRP)	Fibra de Carbono (CFRP)			Fibra de Carbono
% em peso no veículo	22-25%	7-8%	24-28%	22-27%	12-25%

No caso dos automóveis, uma marca que recentemente tem intensificado a utilização de materiais compósitos em seu conceito de *Body-in-White* foi a alemã BMW. Os seus mais recentes lançamentos foram os veículos denominados i3 e i8, que possuem toda a sua estrutura em Fibra de Carbono fazendo o veículo extremamente leve, que seja possível de ser considerado também um veículo elétrico, porém não teve seu sucesso de vendas, devido ao elevado preço que são pedidos nos modelos pela marca. Porém colocaram em questão que é possível ter uma produção em massa de veículos estruturalmente feitos de fibra de carbono. Em 2017 foi produzido o veículo i3 de número 100.000, um feito para a empresa, pois até então, esses tipos de estrutura estavam exclusivamente nos carros de alta performance.

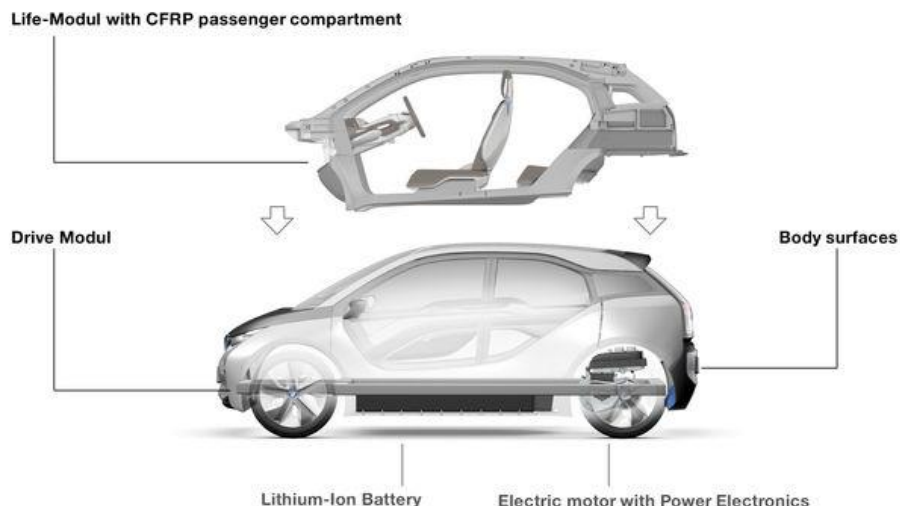


Figura 8 - Exemplo de Veículo com chassis em Fibra de Carbono

No caso do i3(Figura 8) e do i8 (Figura 9), o compartimento dos passageiros é composto por cerca de 150 partes que são feitas de *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP), um terço do número necessário para uma montagem convencional de metal estampado, enquanto a massa também é reduzida em um terço. A utilização de fibra de carbono, também possibilitou a retirada da coluna B do veículo (a que separa as portas do motorista e do passageiro do banco traseiro) o que permite um acesso mais fácil dos passageiros ao interior do veículo. A estrutura em fibra de carbono deste veículo pode ser vista quando as portas estão abertas. Com uma única carga, o i3 tem autonomia de 130 km segundo os testes da EPA, que pode ser acrescentado em até 240 km com a opção de extensor de autonomia. A potência fornecida pelas baterias chega em cerca de 170hp com um binário de 250 Nm.



Figura 9 - Carroceria em fibra de carbono do BMW i8 [66]

Pensando na parte de desempenho os compósitos de matriz poliméricas, contendo fibras de vidro, carbono e aramida, estão encontrando um grande número de aplicações na indústria dos materiais desportivos. As vantagens que eles podem contribuir são: redução de

massa, absorção de vibrações e a flexibilidade de design, que juntas contribuem à uma melhor performance, como o aumento da velocidade, maior potência e uma menor fadiga muscular e exaustão física. Existem vários tipos de aplicação dessa tecnologia, os que mais chamam a atenção são ditos na Tabela 3:

Tabela 3 - Tipos de estruturas e aplicações

Forma	Aplicação
Estruturas em forma de placas	Esquis, pranchas de surfe, pranchas de windsurf, mesas de ténis de mesa, aerofólios (desporto motorizado) e etc.
Estruturas Tubulares	Raquetes de Ténis e badminton, varas de pesca, tacos de golfe, tacos de hockey e etc.
Estruturas em casca	Todos os tipos de capacetes, pontas de tacos de golfe
Outras estruturas	Combinadas para uma variedade de veículos, espadas, cordas de escaladas e outras aplicações variadas.

Para cada uma das aplicações citadas acima na tabela, a seguir há um breve detalhamento de onde cada uma pode ser aplicada e em quais condições.

Para uma aplicação em desportos de neve (Figura 10) está ligado diretamente à segurança e desempenho dos atletas, os esquis possuem uma estrutura um pouco mais complexa, mas o material compósito está na sua estrutura. Normalmente, são acompanhados de madeira e aço, ou alumínio. Normalmente as acompanhadas de liga de alumínio, possuem um preço mais elevado.

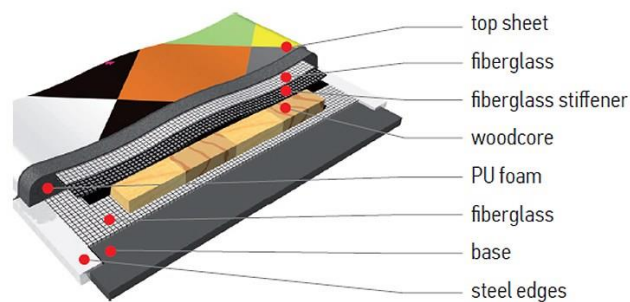


Figura 10 - Exemplo de construção de um esqui [51]

A fibra de carbono tem o efeito de dar uma maior resistência à flexão no esqui, além disso, pode dar um melhor desempenho em relação à aderência do esqui na neve, independentemente dos tipos de neve.

Também pensando nos desportos de verão, em mais precisamente o ténis hoje em dia, todas as raquetes de media gama e melhores gamas, são feitas exclusivamente de materiais compósitos, especificamente a fibra de carbono. Historicamente, a primeira empresa a disponibilizar esse tipo de raquetes leves, foi a americana Chemold em 1974. Nesse tipo de aplicação, são excelentes, por conta da absorção de impacto e vibrações, além do leve peso, o que faz com que o esportista em si, não sofra consequências muito impactantes, fazendo com que a fadiga muscular demore mais a chegar, além disso, é possível ter uma maior diversidade em termos de design (podem fazer raquetes maiores) com um peso aproximado de 350g, comparado com os 450g de raquetes mais antigas. Em comparação às raquetes de antigamente, comparando o mesmo peso, entre madeira e fibra de carbono (Figura 11), a sua área pode ser até 115 vezes maior e a tensão nos cabos pode superar em 20 a 45% em relação à madeira.



Figura 11 - Diferença construtiva entre uma raquete de tênis atual de compósito e uma antiga de madeira [Autor]

Já no âmbito dos desportos de competição de velocidade, nos últimos 10 a 15 anos, a fibra de carbono virou o principal alvo das produtoras de bicicletas de alto desempenho. Isso se deve à relação resistência x peso da fibra de carbono que nenhum outro material consegue alcançar, ou seja, as bicicletas em fibra de carbono podem ser mais leves inclusive do que os mesmos produtos em alumínio, aço ou titânio, pela mesma rigidez apresentada.

Além disso, a fibra de carbono é facilmente modificada para adquirir o seu próprio design e pode dar chances da melhor otimização aerodinâmica, ou personalização do dono. Uma bicicleta em alto desempenho (Figura 12) deve prejudicar o mínimo o atleta, devido ao seu peso, por conta do extremo esforço que é colocado neste tipo de competição. O maior problema da utilização da fibra de carbono neste tipo de aplicação, é a fragilidade de sua estrutura que pode se romper facilmente em caso de acidente, o que pode ser melhor estudada para quesitos de reparação e manutenção da fibra de carbono. O que faz com que o foco do estudo deste projeto seja justamente analisar o comportamento da reparação de fibra de carbono com a aplicação de adesivos.



Figura 12 - Aplicação de Fibra de carbono em estruturas de bicicletas

Outra grande vantagem de bicicletas feitas com esse tipo de material, é a resistência a oxidação, ou seja, pode-se lavar essa bicicleta sem ter problemas futuros com a estrutura da mesma.

2.3 Metodologias de fabrico da fibra de carbono

Para produzir os materiais compósitos reforçados com fibra de carbono, que precisam seguir determinada especificação, as fibras devem ser distribuídas uniformemente na matriz polimérica, e na maioria dos casos, também devem seguir uma determinada orientação angular das camadas da produção do material compósito em si. As principais, mais modernas e importantes metodologias de produção da fibra em si, são as seguintes: Pultrusão, a pré-impregnação e enrolamento de filamentos (*Filament Winding*).

2.3.1 Pultrusão

Este método de produção, consiste em produzir componentes que devem ter a característica de longos comprimentos, com uma secção transversal constante (tubos, vigas, etc.). Com essa metodologia, as fibras são impregnadas por uma resina termo endurecida, e são esticadas (partindo do princípio que estão em forma de bobinas antes do processo) e passam por uma prensa de pré-forma e também proporciona uma determinação da relação entre resina e fibra. Após esse processo, o material em si passa por um processo de cura da resina em uma prensa que é precisamente maquinada para dar a forma final. Este tipo de processo normalmente gera fibras com concentração de 40 a 70 por cento do volume. A matriz normalmente utilizada é a resina epoxídica, poliéster e esteres vinílicos.

A Pultrusão é um processo que pode facilmente ser automatizado, e suas capacidades de produção são relativamente altas, fazendo esse processo ser economicamente viável. Além disso, é possível produzir uma variada quantidade de formas, não tem um limite máximo de produção, isso varia com o stock a ser produzido.

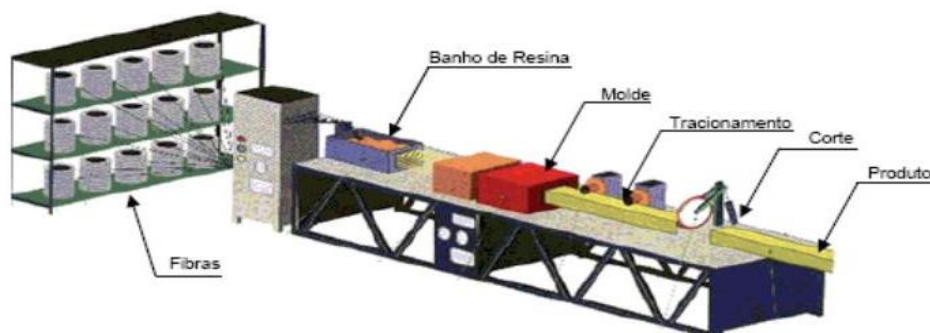


Figura 13 - Ilustração de um processo de Pultrusão [52]

2.3.2 Processo de Pré impregnação

Este processo é conhecido na indústria para um processo de pré impregnação da fibra de reforço com uma resina polimérica que está parcialmente curada. O material é fornecido em forma de fitas para o produtor, que diretamente molda e faz a cura final da resina, sem precisar de fato adicionar nenhum tipo de material. Segundo estudos, é a forma de produção e aplicação dos materiais compósitos que são mais utilizados estruturalmente.

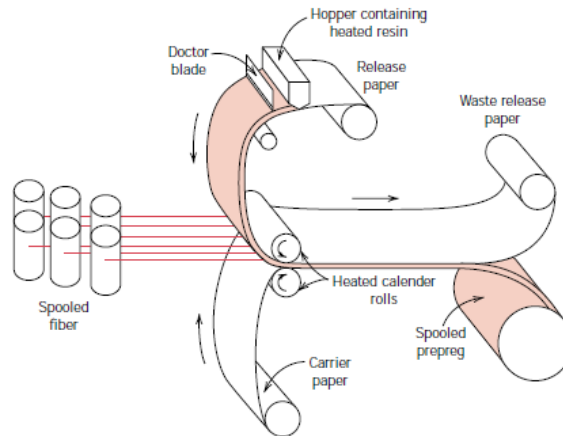


Figura 14 - Processo de Pré impregnação [53]

O processo começa com a correção das posições das fibras pelo cilindro fornecedor. Após isso, os “cabos” são envolvidos por um papel e prensados por um conjunto de cilindros quentes, processo conhecido como calandragem. Esse papel foi coberto por uma resina aquecida de viscosidade relativamente baixa, para fazer a impregnação das fibras. Um lamina é responsável por espalhar uniformemente a resina para determinar sua espessura e largura. O produto final é finalizado por uma fita de resina parcialmente curada. Esses invólucros da fibra de carbono podem ser retirados por cilindros quentes. O processo em si, utiliza a fita com uma configuração parecida com o esquema abaixo:

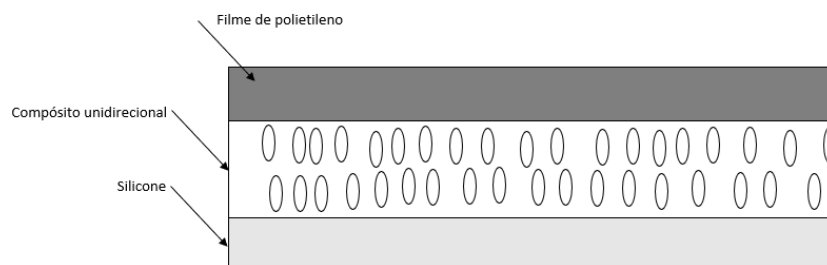


Figura 15 - Modo de fornecimento da fibra de carbono unidirecional [Autor]

O processo em si, funciona quando se alinha o material final à uma superfície que já foi modificada, e que vai dar a forma final à fibra de carbono. Para a produção em si, é feita uma sobreposição de camadas com ângulos variados e que determinam a sua característica mecânica. A última cura é feita já com a sobreposição das camadas e acontece por aquecimento e pressurização da ferramenta. Esse processo forma fibras de carbono de até 45% de resina.

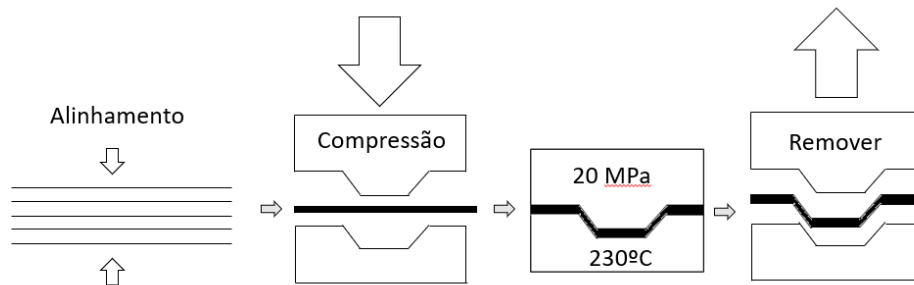


Figura 16 -Última etapa do processo de pré-impregnação [Autor]

Esse processo de produção pode ser facilmente automatizado também, para tentar reduzir custos. O que é essencial para os materiais compósitos, já que tem seu custo de produção elevado. Um exemplo de aplicação desta técnica são os aerofólios automotivos (Figura 17).



Figura 17 - Exemplo de aplicação do processo de pré-impregnação [55]

2.3.3 Processo Manual

Este processo, em suma, é uma maneira mais artesanal de como se produzir formas simples como placas e outras mais simplificadas. Se resume ao empilhamento manual de recortes feitos de um tecido pré-existente, e a cada recorte, é aplicada resina epóxi em duas direções defasadas em 90 graus. Após a aplicação da resina, coloca-se outro recorte e assim sucessivamente.

Após a aplicação da última camada de resina, devem ser colocados pesos por cima da placa, formando uma pressão. Esta etapa do processo é muito parecida com a fase final do processo da pré impregnação. Esta metodologia é a escolhida para a realização do projeto e será melhor explicada no subcapítulo 4.1 onde é explicado o processo em si.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

3. Estado da arte

O mercado de reparações de materiais compósitos é esperado para uma previsão entre 2017 e 2023 que cresça, pelo motivo de custo para a reposição de peças de compósitos, com fiabilidade técnica e viabilidade económica. Aeronaves comerciais (como por exemplo o Boeing 787 Dreamliner e o Airbus A350) mostraram um crescimento na utilização de materiais compósitos, providenciando uma oportunidade de estudo maior sobre a reparação de peças estruturais, pás de turbinas e também outros componentes. O mercado mundial de reparação de materiais compósitos passa pela aeroespacial, militar, energia, automóvel, desportos entre outros.

Devido a esta grande variedade de mercado, a reparação é categorizada por tipos, processos, finalidades e elementos do produto. Baseada no tipo de reparação, é classificada entre reparo estrutural, semi estrutural e cosmético. Baseada no processo, é categorizada entre sobreposição de material, infusão a vácuo, autoclave e outros processos. Para reparação estrutural, é indicada a reparação por autoclave, devido ao elevado desempenho do processo, porém é extremamente afetada pelo custo de operação.

Os materiais compósitos de certa forma, são uma excelente escolha para quem quer executar um projeto de redução de peso, sem comprometer a segurança estrutural. Porém, estes materiais possuem um comportamento característico que os fazem ser um pouco além de especiais. No subcapítulo 263.1 possui uma breve análise do seu comportamento.

3.1 Determinação de resistência de laminados multidirecionais

Como já referido anteriormente, o material compósito é composto por duas fases distintas (matriz e fibra) e ambas devem ser levadas em consideração para uma avaliação de suas propriedades mecânicas, afinal, o material em si, deve ter um comportamento intermédio entre os dois materiais (Figura 18), e isso pode ser caracterizado pela Lei das Misturas. (também pode ser abordado pelo modelo estatístico, porém não foi levado em consideração nesta tese.

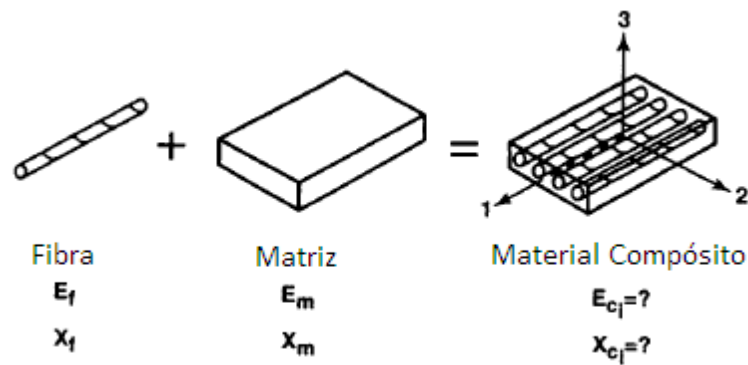


Figura 18 - Análise macromecânica do material

A lei das misturas é uma maneira simples e eficaz para estimar as resistências mecânicas dos materiais compósitos. Esta lei, basicamente, vai medir a proporcionalidade entre as misturas e a fração volumétrica presente no material a ser estudado. Isso é muito conveniente para o desenvolvimento do material em si, para controle de qualidade e seleção de materiais. Este modelo implica que a fibra e a matriz carregam entre si uma proporção igual, quando são aplicadas cargas. Ou seja, o deslocamento do compósito é igual ao deslocamento da fibra e ao deslocamento da matriz. Pelo equilíbrio de forças, pode se chegar nas equações a seguir:

$$Xf = \sigma_f \left(V_f + V_m \frac{E_m}{E_f} \right) \quad (1)$$

$$Xm = \sigma_m \left(V_m + V_f \frac{E_f}{E_m} \right) \quad (2)$$

Onde:

X é a fração volumétrica do material

σ_f é a tensão longitudinal do compósito

E é equivalente ao Módulo de Young do material na direção longitudinal

V é a fração volumétrica;

Os subscritos m e f correspondem à Matriz e Fibra;

As equações anteriores são conhecidas como as equações da Lei das Misturas e são aproximações básicas para uma representação unidirecional de resistência mecânica de um compósito. Tsai e Hahn [61] também fizeram uma comparação da resistência mecânica transversal, e pode ser encontrada em sua obra.

$$X_t = \frac{E_f E_m}{E_f V_m + E_m V_f} \quad (3)$$

Onde o subscrito t representa a direção transversal à carga aplicada.

Porém, um compósito laminado, dificilmente possui suas fibras orientadas em um único sentido, o que faz com que o laminado possua uma característica de ter camadas em angulações diferentes. Uma análise planar de um compósito multidirecional é importante para entender e definir o desenvolvimento do material.

Deve-se entender primeiro os tipos de falhas que são possíveis com esse tipo de material, seja em termos de falha transversal, seja em delaminação do material. A previsão da rotura da primeira camada e a resistência mecânica, são descritas como aproximações da engenharia, que quando comparados a resultados experimentais, são bastante aceitáveis.

A metodologia de cálculo pode ser observada em [33], onde é apresentada a metodologia exata para se determinar analiticamente algumas propriedades mecânicas de compósitos laminados, saindo da sua mais tradicional forma da lei de Hooke, de tensor de tensões, transformações de coordenadas e propriedades das camadas do compósito. Não é do interesse deste trabalho, mostrar analiticamente como se determinam as equações, mas sim, utilizá-las para que sejam obtidas as propriedades mecânicas dos laminados a serem utilizados neste estudo, e mostrar as principais características das camadas utilizadas, para a utilização de modo comparativo entre a parte numérica e experimental.

Para dar seguimento ao trabalho, a sequência de empilhamento que será estudada neste documento, é a sequência de $[0/90/45/-45/0/90]$ simétrico, pois devido à reparação, é natural que haja excentricidade em um ensaio de pura tração, o que pode gerar flexão no provete (Figura 19). As fibras mais externas do provete, foram propositalmente colocadas com as maiores resistências a tração.



Figura 19 - Explicação de aplicação de flexão [55]

De acordo com estudos de Ziu, essa flexão pode gerar deformações não desejadas na região de aplicação do adesivo, levando a uma falha prematura, porém, com esse cuidado, as deformações são diminuídas e podem dar uma vida útil maior ao material.

De forma reduzida, pode-se apresentar as propriedades calculadas a partir do seguinte conjunto de equações conforme a Tabela 4:

Tabela 4 - Equações utilizadas para cálculo de propriedades mecânicas de compósitos laminados [33]

Propriedades da Lâmina no Referencial LT			
Designação	Variável	Determinação	Unidades
Módulo da Elasticidade Longitudinal	E_L	$E_L = E_f \times v_f + E_m \times v_m$	Pa
Módulo da Elasticidade Transversal	E_T	$E_T = E_m \left[\frac{1}{(1 - v_f) + \frac{E_m}{E_f} v_f} \right]$	Pa
Coefficiente de Poisson	ν_{LT}	$\nu_{LT} = \nu_m \times v_m + \nu_f \times v_f$	Adimensional
Coefficiente de Poisson	ν_{TL}	$\nu_{TL} = \nu_{LT} \times \frac{E_T}{E_L}$	Adimensional
Módulo de Corte	G_{LT}	$G_{LT} = G_m \left[\frac{1}{(1 - v_f) + \frac{G_m}{G_f} v_f} \right]$	Pa

De acordo com as propriedades fornecidas pelos fabricantes e seguindo uma metodologia de cálculo já citada no texto [33] foi possível estimar as principais características de um modelo simplificado dos laminados compósitos, segundo esquema:

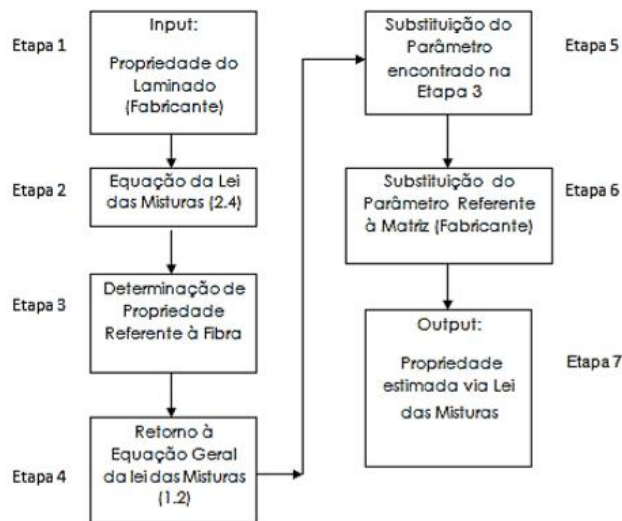


Figure 20 - Esquema de cálculo

Lembrando que o empilhamento utilizado foi o seguinte com a descrição em ângulo em referência ao eixo longitudinal (Figura 21) da peça, conforme Tabela 5:

Tabela 5 - Organização do empilhamento

Número da camada	Ângulo em graus da camada
1	0
2	90
3	-45
4	45
5	0
6	90
7	90
8	0
9	45
10	-45
11	90
12	0

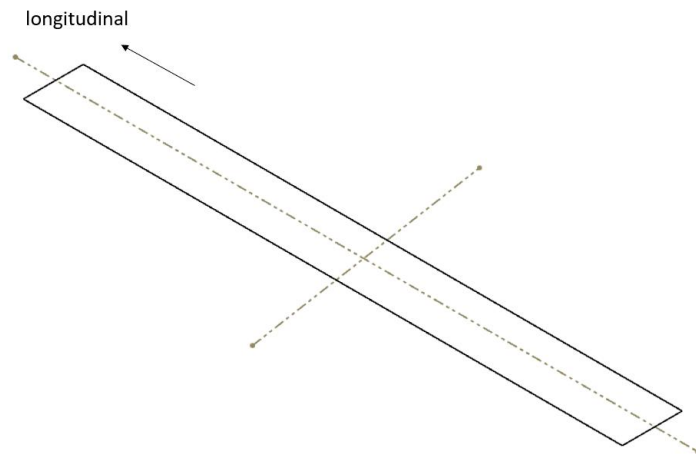


Figura 21 - Ilustração dos eixos mencionados

Para dar início a seção de cálculo, vale lembrar as seguintes propriedades, fornecidas pelo fabricante, conforme Tabela 6:

Tabela 6 - Propriedades dos materiais utilizados

Propriedades	Tecido de Fibra de Carbono T300	Resina SR1500
Módulo de Res. a Tração (Mpa)	350	80
Módulo de Elasticidade (GPa)	230	3,2
Alongamento (%)	1,5	3,9
Poisson	0,25	0,21
Densidade (g/cm ³)	1,76	4
Gramagem (g/m ²)	200	-
Espessura (mm)	0,1	-

Para o cálculo de propriedades, deve-se levar em relação a lei das misturas e consequentemente, as propriedades calculadas, derivam da percentagem utilizada de material de base e também como o material de reforço no caso dos compósitos.

$$V_f = \frac{m_f * N_{camadas}}{h_t * \rho_f} \quad (4)$$

Onde:

m_f é a gramagem do tecido utilizado

$N_{camadas}$ é o número de camadas utilizadas no tecido

h_t é a altura total do provete

ρ_f é a densidade da fibra de carbono utilizada

$$V_f = \frac{0.200 * 12}{0.0018 * 1760} = 0.6818 \%$$

Se $V_f = 0,7219$, a fração volumétrica de resina (V_r) utilizada é $V_r = (1 - V_f)$, portanto:

$$V_r = (1 - 0.7219) = 0.3182 \% \quad (5)$$

Partindo destes resultados, é possível estipular os Módulos de Elasticidade Longitudinal (E_l) e transversal (E_t), além de Módulo de Corte (GLT) e Coeficiente de Poisson (ν), demonstrados abaixo:

$$E_l = E_f V_f + E_m V_m \quad (6)$$

$$E_l = 230 * 0.6818 + 3.2 * 0.3182$$

$$E_l = 157.83 \text{ GPa}$$

Para o coeficiente de Poisson LT:

$$v_{LT} = v_m * V_m + v_f * V_f \quad (7)$$

$$v_{LT} = 0.23 * 0,2781 + 0.25 * 0.7219$$

$$v_{LT} = 0.245$$

Para o Módulo de Elasticidade Transversal (E_t):

$$E_t = E_m * \frac{1}{((1-V_f) + \frac{E_m * V_f}{E_f})} \quad (8)$$

$$E_t = 3200 * \frac{1}{(1 - 0.7219) + \frac{3200}{230000} * 0.7219}$$

$$E_t = 11.106 \text{ GPa}$$

Para o coeficiente de Poisson TL:

$$v_{TL} = v_{LT} * \frac{E_t}{E_l} \quad (9)$$

$$v_{TL} = 0.245 * \frac{11106}{166930}$$

$$v_{TL} = 0.015$$

Para cálculo de Módulo de corte (GLT) também é necessário calcularmos o módulo do corte dos materiais utilizados para a produção do provete.

$$G_m = \frac{E_m}{2*(1-\nu)} = \frac{3200}{2*(1-0.23)} = 1300.8 \text{ MPa} \quad (10)$$

$$G_f = \frac{E_f}{2*(1-\nu)} = \frac{230000}{2*(1-0.25)} = 92000 \text{ MPa} \quad (11)$$

Tendo os dois valores já calculados, o cálculo do compósito fica mais fácil e prático de ser executado.

$$G_{LT} = G_m * \frac{1}{(1-V_f) + \frac{G_m * V_f}{G_f}} \quad (12)$$

Substituindo os valores:

$$G_{LT} = 1300.8 * \frac{1}{(1 - 0.6818) + \frac{1300.8}{92000} * 0.6818}$$

$$G_{LT} = 3970 \text{ MPa}$$

É de grande importância mencionar que estas propriedades calculadas são referentes à lamina (camada), e não representam as propriedades do laminado completo, considerando as 12 camadas, pois com diferentes orientações de camada, as propriedades se alteram e como o compósito laminado se baseia na adição das camadas, para um provete, deve-se estimar o valor da união de todas as camadas e a matriz utilizada, que no caso foi a resina epóxi.

Partindo dos valores indicados no plano LT, devem-se transformar as camadas para o âmbito do referencial XY, de acordo com o eixo longitudinal, com os ângulos variando entre as camadas, conforme às equações da Tabela 7:

Tabela 7 - Mudança de direção das propriedades mecânicas [33]

Propriedades da Lâmina no Referencial XY			
Designação	Variável	Determinação	Unidades
Módulo da Elasticidade Longitudinal	E_x	$E_x(\theta) = \frac{1}{\frac{C^4}{E_L} + \frac{S^4}{E_T} + C^2 S^2 \left(\frac{1}{G_{LT}} - 2 \frac{\vartheta_{TL}}{E_T} \right)}$	Pa
Módulo da Elasticidade Transversal	E_y	$E_y(\theta) = \frac{1}{\frac{S^4}{E_L} + \frac{C^4}{E_T} + C^2 S^2 \left(\frac{1}{G_{LT}} - 2 \frac{\vartheta_{TL}}{E_T} \right)}$	Pa
Módulo de Corte	G_{xy}	$G_{xy}(\theta) = \frac{1}{4C^2 S^2 \left(\frac{1}{E_L} + \frac{1}{E_T} + 2 \frac{\vartheta_{TL}}{E_T} \right) + \frac{(C^2 - S^2)^2}{G_{LT}}}$	Pa
Relação Coeficiente de Poisson/Módulo de Corte	$\frac{\vartheta_{yx}}{E_y}$	$\frac{\vartheta_{yx}}{E_y}(\theta) = \frac{\vartheta_{TL}}{E_T} (C^4 + S^4) - C^2 S^2 \left(\frac{1}{E_L} + \frac{1}{E_T} - \frac{1}{G_{LT}} \right)$	Pa^{-1}
Coefficientes não nulos da matriz	$\frac{\eta_{yx}}{G_{xy}}$	$\frac{\eta_{yx}}{G_{xy}}(\theta) = -2CS \left\{ \frac{C^2}{E_L} - \frac{S^2}{E_T} + (C^2 - S^2) \left(\frac{\vartheta_{TL}}{E_T} - \frac{1}{2G_{LT}} \right) \right\}$	Pa^{-1}
Coefficientes não nulos da matriz	$\frac{\mu_{yx}}{G_{xy}}$	$\frac{\mu_{yx}}{G_{xy}}(\theta) = -2CS \left\{ \frac{S^2}{E_L} - \frac{C^2}{E_T} - (C^2 - S^2) \left(\frac{\vartheta_{TL}}{E_T} - \frac{1}{2G_{LT}} \right) \right\}$	Pa^{-1}

Para o cálculo das propriedades do laminado, exige uma matemática mais complexa, na formulação de matrizes, conforme a apresentação da formulação em diversos livros teóricos de compósitos laminados e inclusive, foi mais simples a estimativa das propriedades

do cálculo do laminado total, que são os resultados abaixo, com valores calculados uniformemente conforme metodologia utilizada em [33].

Para calcular as relações entre deformação e tensões, utilizasse a matriz de rigidez conforme equação: deslocamento = matriz de rigidez x tensão

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_T \\ \gamma_{LT} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_L & -\nu_{TL}/E_L & 0 \\ -\nu_{LT}/E_L & 1/E_T & 0 \\ 0 & 0 & 1/G_{LT} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_T \\ \tau_{LT} \end{Bmatrix} \quad (13)$$

Com a utilização da transformação de coordenada é possível obter a matriz de rigidez de uma lamina no plano XY, utilizando a matriz auxiliar T:

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin \theta^2 & -2 \sin \theta \cos \theta \\ \sin \theta^2 & \cos^2 \theta & 2 \sin \theta \cos \theta \\ \sin \theta \cos \theta & -\sin \theta \cos \theta & (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \end{bmatrix} \quad (14)$$

Utilizando-se da multiplicação de matrizes conforme equação 15, chega-se nas propriedades longitudinais da camada, independentemente da orientação da mesma:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = [T]^T \times \begin{bmatrix} 1/E_L & -\nu_{TL}/E_T & 0 \\ -\nu_{LT}/E_L & 1/E_T & 0 \\ 0 & 0 & 1/G_{LT} \end{bmatrix} \times [T] \times \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (15)$$

Sendo assim, chega-se na matriz de rigidez de cada camada, que é utilizada como auxílio no cálculo do laminado de forma geral, calculando a matriz Kxy, que é a multiplicação a seguir:

$$[E_{0xy}] = [K]_{XY} = [T]^T \times [K]_{LT} \times [T] \quad (16)$$

Para zero graus em GPa:

$$[K_0] = \begin{bmatrix} 158.41 & 2.39 & 0 \\ 2.39 & 9.8 & 0 \\ 0 & 0 & 3.96 \end{bmatrix}$$

Para 45 graus, em GPa:

$$[K_{45}] = \begin{bmatrix} 47.21 & 39.2 & -37.15 \\ 2.39 & 9.8 & -37.15 \\ -37.15 & -37.15 & 3.96 \end{bmatrix}$$

Para -45 graus, em GPa:

$$[K_{-45}] = \begin{bmatrix} 47.21 & 39.2 & 37.15 \\ 2.39 & 9.8 & 37.15 \\ 37.15 & 37.15 & 3.96 \end{bmatrix}$$

Para 90 graus, em GPa:

$$[K_{90}] = \begin{bmatrix} 9.8 & 2.39 & 0 \\ 2.39 & 158.41 & 0 \\ 0 & 0 & 3.96 \end{bmatrix}$$

Com essas matrizes facilitadas, torna-se possível estimar a relação do esforço aplicado com as deformações, utilizando todas as camadas do laminado.

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ T_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \epsilon_{0x} \\ \epsilon_{0y} \\ \gamma_{0xy} \end{Bmatrix} \quad (17)$$

Onde:

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n \bar{E}_{ij}^k \times e_k = A_{ji} \quad (18)$$

Ou seja, a matriz A é a soma de todos os elementos matriciais multiplicados pela sua espessura de camada, que no caso, é constante.

$$[A] = \begin{bmatrix} 129.259 & 26.434 & 0 \\ 26.434 & 129.259 & 0 \\ 0 & 0 & 3.96 \end{bmatrix}$$

Tudo isso, pode ser substituído pela seguinte equação 19:

$$[\bar{K}]_{xy} = h \times [A]^{-1} \quad (19)$$

Que é resultante da igualdade das duas equações (20 e 21), a do estado plano de tensões do laminado, com a relação tensão por deformação:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{0x} \\ \varepsilon_{0y} \\ \gamma_{0xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/\bar{E}_x & -\bar{\nu}_{yx}/\bar{E}_y & \frac{\bar{\eta}_{yx}}{\bar{G}_{xy}} \\ -\bar{\nu}_{xy}/\bar{E}_x & 1/\bar{E}_y & \frac{\bar{\mu}_{yx}}{\bar{G}_{xy}} \\ \frac{\bar{\eta}_{xy}}{\bar{G}_{xy}} & \frac{\bar{\mu}_{xy}}{\bar{G}_{xy}} & 1/\bar{G}_{xy} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \sigma_{0x} \\ \sigma_{0y} \\ \tau_{0xy} \end{Bmatrix} \quad (20)$$

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{0x} \\ \varepsilon_{0y} \\ \gamma_{0xy} \end{Bmatrix} = h \times \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{Bmatrix} \sigma_{0x} \\ \sigma_{0y} \\ \tau_{0xy} \end{Bmatrix} \quad (21)$$

Chegando à matriz de rigidez do laminado:

$$[K_{xy}] = \begin{bmatrix} 0.0145 & -0.0030 & 0 \\ -0.0030 & 0.0145 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0615 \end{bmatrix}$$

Com isso, chega-se no resultado resumido na Tabela 8 **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**

Tabela 8 - Resumo das Propriedades mecânicas no plano XY

Ex (GPa)	68.807
Ey (GPa)	68.807
Gxy(GPa)	16.265
Poisson xy	0.205
Poisson yx	0.205

3.2 Metodologias de união da Fibra de Carbono

Novas pesquisas e avanços no processo de manufatura e pensando também na tentativa de redução de custos dos materiais compósitos, devido ao aumento do seu uso em indústrias de transporte, seja automóvel, seja no campo aeroespacial. Movido também pelas novas regulamentações de emissões de poluentes, é necessária uma busca pela redução de peso dos veículos, aeronaves e afins, pois são de grande influência direta nesse quesito (Figura 22), além de tudo, os materiais compósitos oferecem um desempenho elevado em relação às suas características estruturais, e os engenheiros atualmente estão escolhendo os materiais compósitos mais comumente por se tratar de uma saída para os problemas encontrados em projetos.

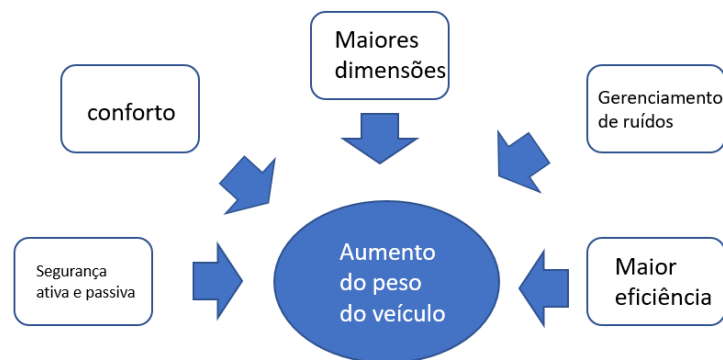


Figura 22 – Influências no peso do veículo [Autor]

Atualmente, em relação ao uso do material compósito para parte da estrutura do veículo, uma importante questão foi levantada, em relação à montagem e união das diferentes partes da estrutura. A utilização de adesivos como metodologia de união utilizada em veículos "multimateriais" tem assumido uma utilização cada vez mais relevante. Hoje em dia, é uma das principais metodologias de união de materiais, sejam do mesmo tipo ou inclusive com características construtivas completamente diferentes, sendo inclusive bastante utilizada em relação à união de materiais poliméricos.

3.2.1 Juntas mecânicas

As uniões mecânicas tradicionais envolvem a utilização de parafusos metálicos e poliméricos (Figura 23). Essa técnica tem a vantagem de montagem e desmontagem de maneira rápida, facilitando o retiro das peças unidas para avaliações de desgaste, e inclusive para a substituição das peças. Infelizmente, essa técnica de união envolve diretamente um risco de aumento de peso considerável no valor final do produto, além de ter uma influência negativa em termos de tempos de montagem e produção, agravando o custo de operação de aplicação da junta. No caso das uniões de materiais poliméricos por soldadura, normalmente estes materiais são unidos pela fusão do material (elevada temperatura) e aplicação de pressão. O calor é fornecido para fundir o material polimérico nas superfícies a serem unidas, para estabelecer uma conexão intramolecular das partículas, conhecido por difusão e o entrelaçamento das cadeiras poliméricas é o que fornece a resistência mecânica na união, as superfícies são confrontadas e pressurizadas para formar a solidificação completa da união.

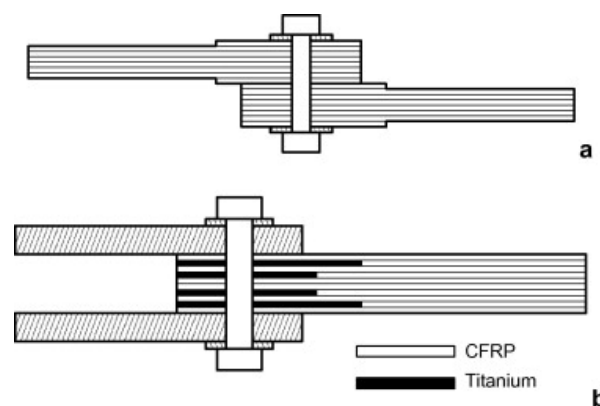


Figura 23 - Exemplo de aplicação de juntas mecânicas

Uma boa alternativa para este tipo de operação, é a utilização de materiais adesivos para efetuar o reparo desse tipo de material, levando em consideração que apesar das suas características mecânicas superiores, normalmente os materiais de fibra de carbono são muito suscetíveis à temperatura, umidade e até impactos acidentais. Importa referir que devido ao seu uso específico, a reparação deve manter as principais características mecânicas do material.

3.2.2 Junta colada

A união feita por adesivos é um processo onde um adesivo é colocado entre as duas partes (aderentes) e é o que vai transmitir as forças aplicadas entre dois componentes. Os principais benefícios da utilização de adesivos envolvem: baixo custo, flexibilidade de geometria, uma maior resistência na junta, a habilidade de isolar sons e vibrações, uma distribuição uniforme das tensões atuantes na junta, a possibilidade de juntar materiais diferentes e não haver contacto direto entre as partes a serem unidas. Tendo em consideração também os conceitos de fim de vida do produto, a utilização de adesivos termoplásticos é interessante, pois pode prolongar através de uma reparação colada, um material que não teria mais uso. Os conceitos de tensão aplicadas em uma junta colada, devem ser levados em consideração de acordo com o conceito de condição livre de tensão (abaixo), o que em algumas experiências analíticas não são considerados, porém são de grande importância no estudo do comportamento das juntas.

Os principais tipos de juntas coladas são as seguintes: Junta sobreposta simples, junta sobreposta dupla, junta sobreposta em rampa, junta sobreposta em escada. Que são exemplificadas na Figura 24:

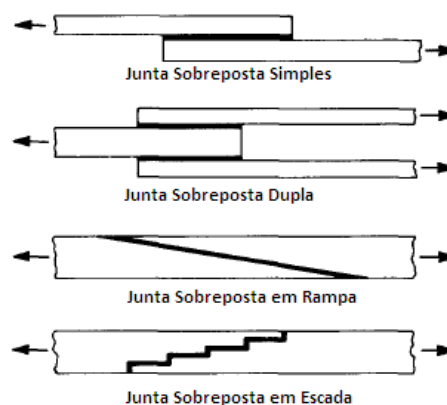


Figura 24 - Tipos de juntas adesivas

Numa junta adesiva estrutural, a carga é transferida entre os aderentes através do adesivo. A eficiência da transferência da carga depende de determinados parâmetros, como o projeto da junta, as características do adesivo e da interface do adesivo/aderente. Como se verificou, o adesivo funciona eficazmente quando solicitado em corte. Então, para se transferir eficazmente a carga entre os aderentes, estes são sobrepostos de forma que o adesivo seja carregado em corte, com um comportamento parecido com o da Figura 25.

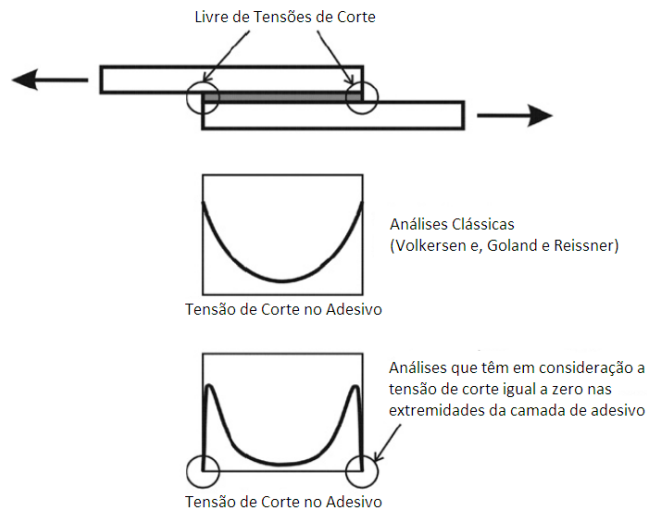


Figura 25 - Conceito de Condição Livre de Tensão (Lucas F.M. da Silva)

Existe um limite para a espessura dos aderentes a unir que podem ser carregados por uma junta simples. Com o aumento da carga, a espessura dos aderentes deve aumentar e, terá então de se passar de um projeto de uma junta simples, para a uma junta dupla e, finalmente, para as juntas sobrepostas em rampa ou em escada, o que podem ser avaliados como a Figura 26 explica o modo de fratura:

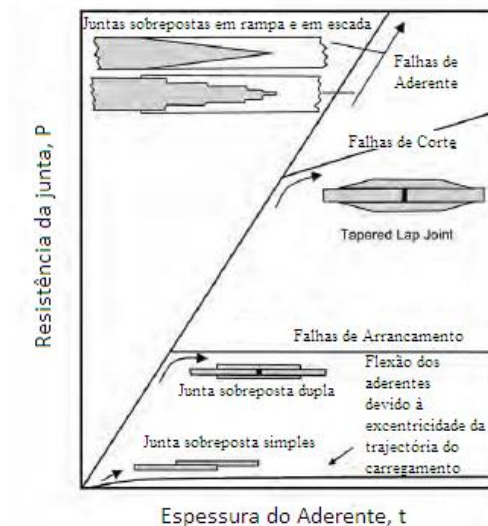


Figura 26 - Efeitos da espessura do aderente nos modos de falha das juntas colada [48]

O caminho de transferência de carga de uma junta simples é altamente excêntrico, o que causa elevadas tensões de arrancamento, devido aos momentos fletores produzidos. Portanto, estes tipos de juntas só devem ser utilizados para estruturas sujeitas a pequenas

cargas. Normalmente, estas estruturas não devem ser consideradas para o caso em que os aderentes de compósito possuam uma espessura superior a 1.8mm.

Para a união de aderentes de compósitos mais espessos devem ser utilizadas então as juntas sobrepostas em rampa e em escada, visto estas desenvolverem tensões de arrancamento desprezáveis. As juntas em rampa são usadas normalmente para reparações. Estas juntas têm a desvantagem que devido ao facto de necessitarem de um ângulo de inclinação raso para transferir a carga de forma eficaz, podem resultar em juntas muitas longas para um conjunto de aderentes espessos.

As juntas sobrepostas em escada são juntas de difícil fabrico. Então, devido aos aspetos referidos acima, para se unir aderentes de compósito com espessuras superiores a 3 mm é mais vantajoso e viável usar-se juntas mecânicas. O que não foi considerado por exemplo por Volkersen[24] (Figura 27), pois um grande inconveniente da teoria de Volkersen deve-se ao facto de esta não ter em consideração a excentricidade do carregamento, que é causada pela geometria não simétrica da junta colada adesivamente sobreposta simples. Esta excentricidade introduz momentos fletores nos aderentes que, por sua vez, conduzem ao aparecimento de deformações de flexão nos aderentes:

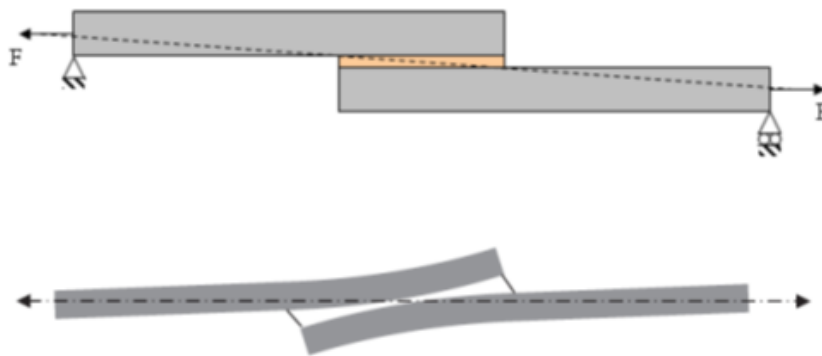


Figura 27 - Modelo de Volkersen

Já Tsai [44], propôs soluções teóricas melhoradas para juntas simples e duplas coladas adesivamente. As soluções das teorias clássicas de Volkersen e de Bruyne para juntas duplas e de Volkersen, Goland e Reissner para juntas simples, que negligenciam a deformação de corte no aderente, foram usadas como base para as análises efetuadas. Assumiu-se que a distribuição das tensões de corte através da espessura dos aderentes é linear. Estas soluções melhoradas são comparadas com as soluções originais e com resultados experimentais e numéricos. Tsai [44] mostrou que estas novas soluções fornecem

uma melhor previsão para as distribuições das tensões de corte no adesivo e os seus valores máximos, particularmente no caso de os aderentes serem de compósito.

Particularmente nos compósitos reforçados por fibras, a durabilidade da junta é determinada pela capacidade do adesivo em distribuir a carga aplicada para o material, buscando uma prevenção de falhas prematuras devido às concentrações de tensão. Além disso, a performance também é determinada pelo módulo dos materiais a serem unidos, além do módulo do adesivo aplicado. Em todos os casos, porém, é necessário que as tensões gerais aplicadas na junta se encontrem abaixo do suportado pelo adesivo, considerando um fator de segurança. Por conta do módulo relativo do substrato e do adesivo serem críticos, tanto quanto o alongamento do adesivo (Figura 28), é importante considerar algumas propriedades básicas do adesivo quando este for selecionado.

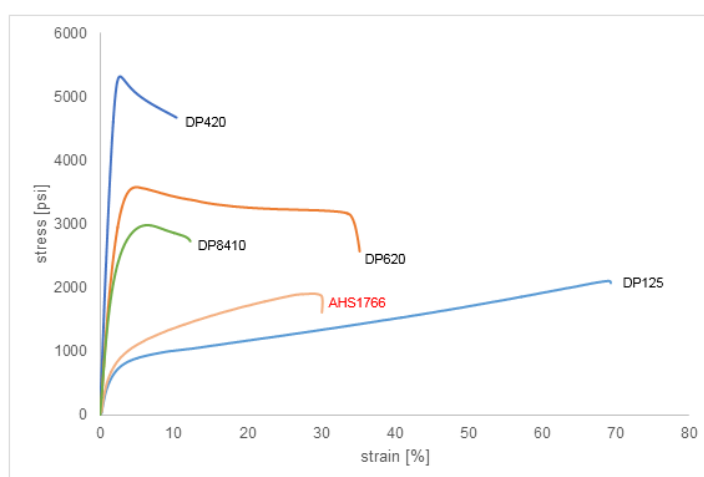


Figura 28 - Curva de tensão x deformação de adesivos [1]

A curva de tensão x deformação é importante para entender as propriedades físicas dos adesivos, e como eles respondem à aplicação de cargas. Primeiramente, o adesivo responde de maneira elástica e a tensão cresce de maneira constante. Após certo ponto, a estrutura polimérica não resiste e começa a deformar plasticamente (permanente). Dependendo da capacidade do polímero de deformação, o adesivo vai alongar-se até a sua rotura. A área abaixo das curvas, representa a energia absorvida pelo adesivo até a sua rotura.

Outro fator importante na seleção do adesivo, é a tensão suportada de corte, por cada sobreposição. Esse valor representa a adesão do adesivo na superfície do material a ser estudado, combinado com a resistência coesiva do adesivo como um polímero curado. A adesão depende sobretudo da compatibilidade entre as superfícies a serem unidas, permitindo criar uma superfície própria para a união química entre as duas partes.

Um exemplo de aplicação da metodologia de reparo, foi feito por Niedernhuber, Holtmannspötter, J e Ehrlich, I [28] em um estudo investigativo das geometrias de reparo, levando em consideração as orientações das camadas da fibra, e chegaram a conclusão que o melhor método a ser utilizado é o de chanfro ou em step fixo, reduzindo a área de reparo e mantém uma certa compatibilidade sem muitos desvios de magnitude. Neste estudo, leva-se em consideração que na aplicação aeronáutica, devido ao tamanho das peças, não pode ser realizado rapidamente o reparo, e deve-se sempre continuar a fornecer resistência estrutural à peça estudada. O reparo em si, pode ser considerado um processo dividido nas seguintes etapas: Identificação do dano, remoção de material, aplicação do método de reparo, cura, avaliação não destrutiva e tratamento final da superfície.

O material deve ser retirado seguindo um padrão, camada por camada Figura 29, formando um angulo em chanfro para a aplicação do adesivo. O reparo deve ser feito para não comprometer a transmissão do esforço entre o adesivo e a estrutura. Este chanfro pode por intermédio de equipamentos automatizados, tais como arranque de apara por máquinas CNC, laser, jato de água, etc.

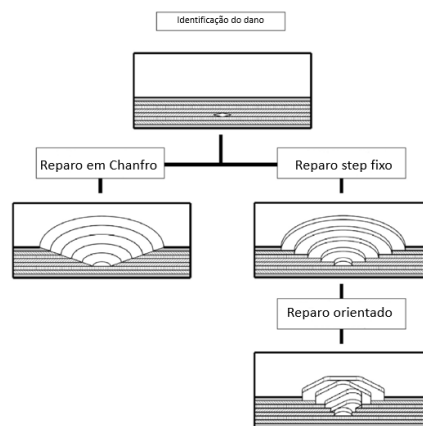


Figura 29 - Metodologias de reparo de materiais compósitos para aplicação de adesivos [28]

Os autores realizaram testes de acordo com a norma DIN EN ISO 527-4 com algumas variações de reparos, como ilustrados na Figura 30, levando em consideração que todas as amostras foram desenhadas em softwares de CAD e foram cortados em máquinas CNC, e a reparação foi realizada de acordo com as instruções do fabricante. Todas as amostras (Figura 31) foram testadas por ultrassom para ver se não havia algum tipo de defeito no fabrico.

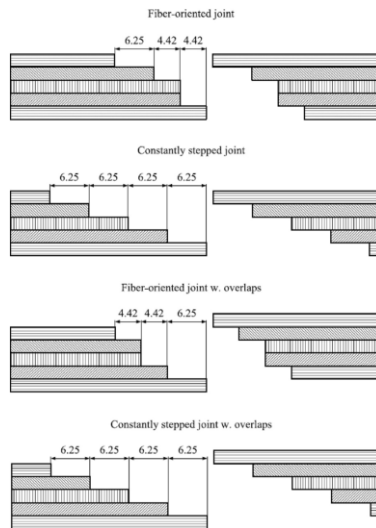


Figura 30 - Métodos de reparação com camadas e adição de materiais [28]

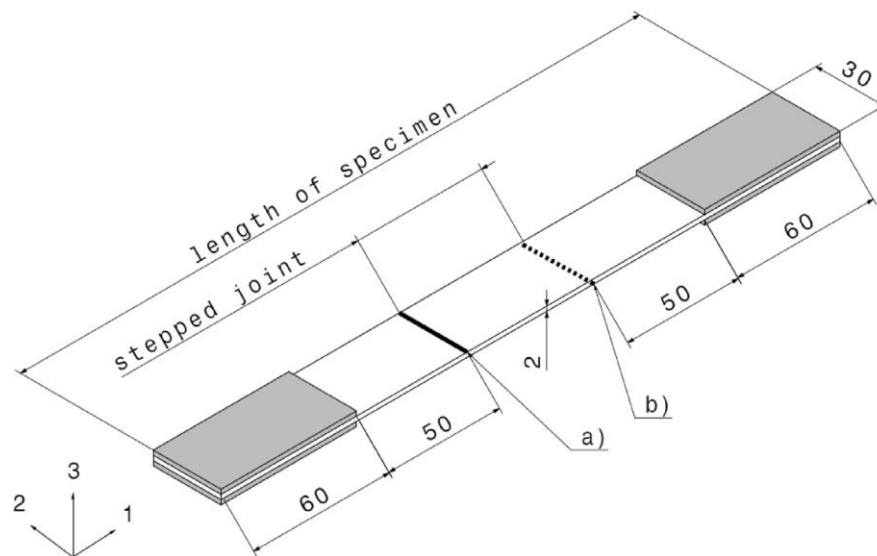


Figura 31 - Desenho informativo dos provetes utilizados no ensaio do estudo referenciado [28]

Onde (a) é a camada superior do compósito laminado e (b) a última camada do mesmo, e foram testados a ver o seu deslocamento e todos foram testados até a falha. Foi feito um levantamento estatístico de resistência a tração e rigidez Figura 32:

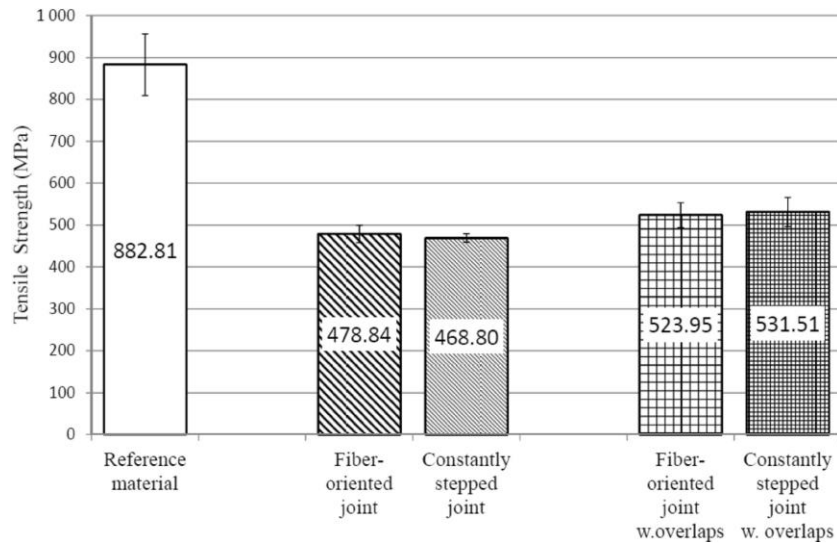


Figura 32 - Comparativo da resistência mecânica obtida [28]

Além disso, também foram executadas pelos autores as análises por elementos finitos, tridimensional e todas as propriedades mecânicas necessárias para utilizar como dados de *input* no *Ansys Workbench 14*, foram fornecidas pelo fornecedor.

O resultado final permitiu que os autores analisassem foi que a reparação orientada da fibra de carbono, consegue fornecer uma melhor resistência mecânica, mas não tem uma influência tão grande no contexto geral da reparação (Figura 33).

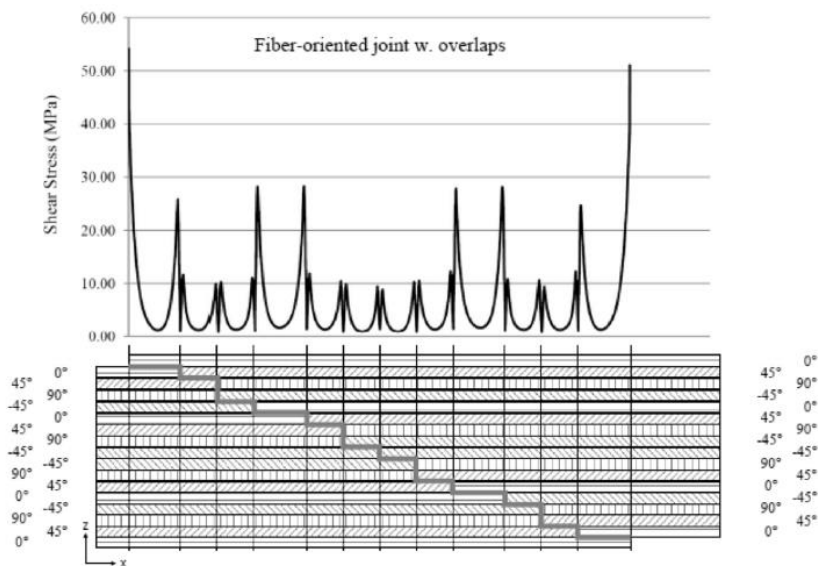


Figura 33 - Gráfico de tensão de corte em step [28]

É possível observar que os picos de tensão são justamente nas extremidades das camadas ligadas pelo adesivo, e os picos são apenas dependentes da orientação da camada

da fibra que está a ser tensionada. Uma vantagem deste método, é justamente a independência das outras camadas na transmissão do esforço.

Outro método foi patenteado nos Estados Unidos da América, por Michel Deliris [26] (US 8.475,615 B2) em 2013. Justamente pensando na reparação de materiais com indefinidas quantidades de camadas, com a adição de material e sobreposição da parte a ser reparada.

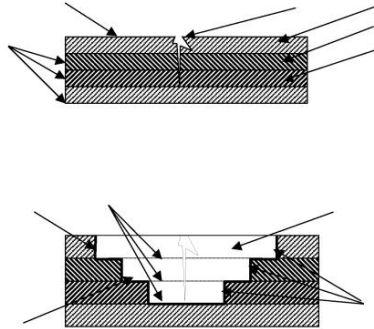


Figura 34 - Metodologia aplicada [US 8.475,615 B2]

Na Figura 34 é possível observar a identificação da falha, e como deve ser retirado o material quando possui um tipo de fratura e uma preparação de como deve ser feito o reparo, como cada camada sendo substituída pela mesma ordem de orientação das camadas do substrato original.

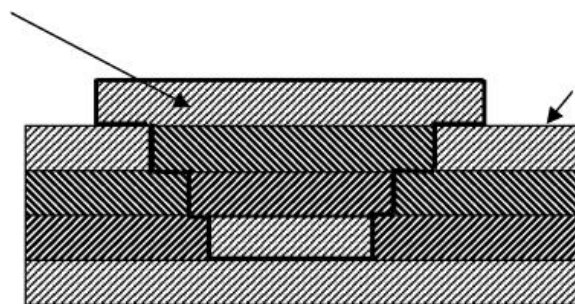


Figura 35 - Aspecto final [US 8.475,615 B2]

É possível observar na Figura 35 que a metodologia implica em uma sobreposição das camadas a serem reparadas. A reparação “*patching*” consiste em uma adição de material com a mesma espessura da estrutura original, porém o material adicionado normalmente possui um maior peso e pode gerar uma melhor adesão ao material. Essa metodologia não

garante que o material adicionado possua a mesma resistência do material antes do rompimento, mas oferece a mesma resistência da base onde é colocado. Cada camada reparada fornece exatamente a mesma orientação das fibras que o material de base. Inclusive referenciando a patente, eles sugerem que a reparação seja feita de acordo com o necessário, e deve ser maquinado com água com elevada pressão.

Nas últimas décadas, muitas pesquisas foram desenvolvidas para que fosse possível uma forma eficiente de reparação das fibras de carbono com adesivos. Existem alguns estudos (Zhang H, Motipalli J, Lam Y, Bajer A) [40] que mostram o comportamento em análises de elementos finitos do comportamento do material após reparo, assim como também é encontrado por A.M.G. Pinto, R.D.S.G. Campilho, M.F.S.F. de Moura, I.R. Mendes [30], um estudo do tipo de reparo e também da forma que a falha acontece nos materiais compósitos em fibra de carbono, levando em consideração a orientação das fibras (*scarf repair*).

Algumas estratégias de reparo são analisadas e devido às características mecânicas e físicas de materiais em fibra de carbono, não existe nenhuma tecnologia de reparo que não afete diretamente uma das suas principais características, o peso. Nas últimas décadas, houve um desenvolvimento muito grande na atividade de juntas coladas. Vale lembrar que, nas juntas coladas, quando submetidas à tração, os esforços atuantes nos adesivos são puramente de corte e trata-se de uma solução de reparo do tipo *scarf* Figura 36.



Figura 36 - Modelo em chanfro de reparo

Particularmente nas últimas décadas, este tipo de reparo é muito utilizado na indústria aeronáutica, devido à grande utilização de painéis tipo sanduiche. Além disso, oferecem uma melhor aparência e não comprometem o distúrbio aerodinâmico (essencial nesta indústria), sendo normalmente um tipo de reparação permanente.

Apesar das muitas vantagens, este tipo de reparo é considerado difícil de se realizar, isso reflete diretamente em custo, além de ser necessária uma grande área para realizar o reparo (geometria é um ponto fraco). Para conseguir realizar essa reparação, é necessário fazer maquinação na peça para retirar o material danificado, e um ângulo relativamente pequeno (aproximadamente de 10 graus). Após a retirada de material, deve-se colocar o adesivo e o material de adição simultaneamente com a cura do adesivo.

De acordo com Adams RD e Peppiat NA quanto maior a área de reparo (menor ângulo do chanfro) maior a resistência mecânica do material reparado. Além disso, quatro tipos diferentes de falha foram detetados em ensaios experimentais, variando com a temperatura, umidade e carga aplicada. E além disso foram feitos estudos em elementos finitos para cada tipo de falha, utilizando a fibra de carbono como um material elástico equivalente e um adesivo praticamente constante, tendo o adesivo falhado simultaneamente por todo o comprimento do adesivo (cedência generalizada).

Mais recentemente, com a evolução tecnológica, é possível ter uma abordagem mais precisa, e com novos modelos 3D, é possível de identificar o real comportamento tanto do compósito, quanto do adesivo. Nos modelos de estudo 2D normalmente não se leva em consideração a largura do provete, o que não representa de maneira real as forças de corte na simulação numérica, e normalmente apresentavam falhas catastróficas. Hoje já é possível observar que nos reparos, a força atua de maneira diferente ao longo do comprimento da junta colada e possui dois principais concentradores de tensão, como é possível identificar na Figura 37 (A.M.G. Pinto, R.D.S.G. Campilho, M.F.S.F. de Moura, I.R. Mendes).

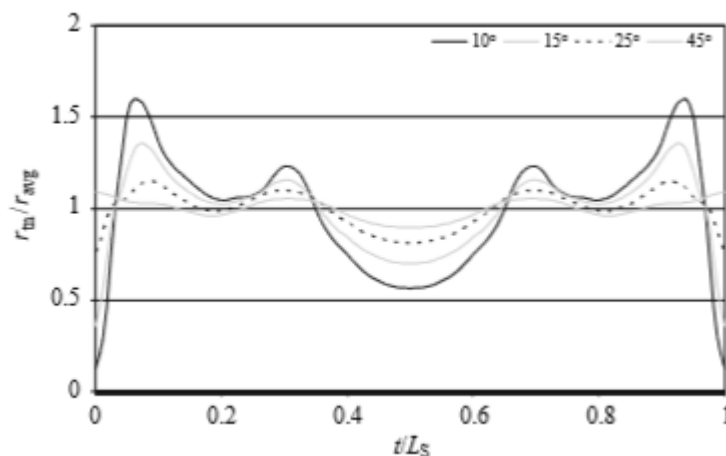


Figura 37 - Distribuição das tensões de corte ao longo de uma junta cisalhada.

Partindo deste princípio de comportamento, Cruz Almeida, S [2], fez um estudo para avaliar a variação dos parâmetros que podem afetar a zona de estudo, mais precisamente a parte das juntas coladas em *single* e *double lap*, variando as espessuras de adesivos, aderentes, o comprimento da junta, a sequência de empilhamentos, variação da carga aplicada e vários outros aspetos sobre a mesma ideia de analisar e qualificar o comportamento mecânico das juntas estudadas.

Sobre este assunto, algumas conclusões foram tiradas e devem ser consideradas para o seguimento deste trabalho, que influenciou diretamente na escolha da sequência de empilhamento, o tipo de adesivo, tipo de reparação e metodologia de trabalho.

A Tabela 9 demonstra muito bem um comparativo de pontos positivos e negativos para os tipos de juntas mecânicas e coladas:

Tabela 9 - Comparação entre metodologias de união [48]

Propriedade	Junta Mecânica	Junta Colada
Tempo de fabrico	Várias etapas, montagem da junta rápida	Poucas etapas, longo processo de cura
Preparação da superfície	Mínima	Extensiva, critica
Secções finas	Pode não ser possível	Pode ser realizado
Peso da Junta	Pesado	Leve
Aspectos externos da superfície	Saliências	Pode ser lisa
Limitações da Temperatura	Limitado pelo laminado	Adesivo pode limitar
Dano nas fibras do laminado	Pode ser importante	Não é importante
Dificuldade para inspeccionar	Fácil	Difícil
Problemas Ambientais	Pode ter corrosão galvânica	Sensibilidade ao solvente
Penetração de humidade	Sem resistência	Auto Vedante
Concentração de tensões	Significantes	Podem ser muito baixas
Carregamentos de longa duração	Efeitos de Relaxamento e de fadiga	Fluência
Sensibilidade às forças de arrancamento	Resistente	Susceptível
Sensibilidade às forças de tracção	Susceptível	Resistente
Amortecimento de vibrações	Sem amortecimento	Amortecimento intrínseco

3.2.3 Tipos de adesivos utilizados em Materiais compósitos.

Um adesivo pode ser definido como sendo um material polimérico, capaz de unir duas superfícies, e capaz de evitar que estas se separem. O adesivo é denominado de adesivo estrutural quando a carga necessária para separar as duas superfícies unidas é elevada, isto é, de tal modo que o adesivo providencia a resistência principal da estrutura. Os membros unidos pela camada adesiva são denominados de aderentes.

Existe uma variedade de adesivos de alto desempenho que são utilizados para unir componentes em materiais compósitos no mercado atualmente. Isso é devido à maior procura de materiais compósitos que são mais leves e possuem uma elevada resistência mecânica. Com isso, os adesivos passaram a ter uma maior importância nos projetos de produtos produzidos neste tipo de materiais. Os adesivos modernos são desenvolvidos com boas propriedades mecânicas com as principais características dos materiais a serem unidos e adicionam uma maior resistência no produto final. As duas principais categorias de adesivos utilizados em materiais compósitos: Estruturais ou de Engenharia e Sintéticos.

- Adesivos Estruturais: São adesivos que incluem fundamentalmente Epóxi, Poliuretano e Acrílicos. Oferecem uma boa resistência ao impacto, resistência química, possibilidades de trabalharem em temperaturas elevadas e baixa compressão.

Existem dois tipos de adesivos estruturais, os frágeis e os dúcteis. A Figura 38 mostra a relação entre os dois tipos. Note-se que o adesivo frágil tem pouca deformação plástica. Este tipo de comportamento é semelhante às características de tração ou arrancamento do adesivo, ou seja, o comportamento das tensões/deformações à saída do plano de um adesivo é predominantemente de natureza frágil.

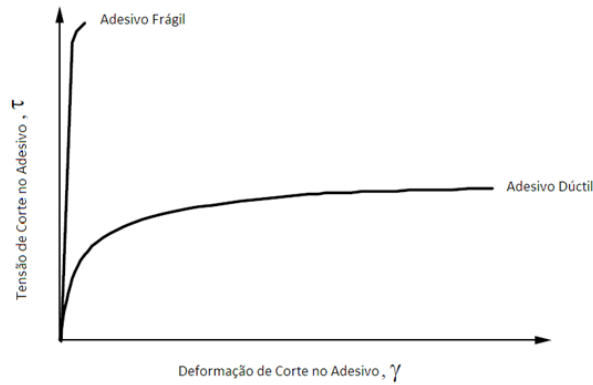


Figura 38 - Relação entre adesivos

Em geral, os adesivos estruturais são os mais usados quando é necessário juntar materiais compósitos. Os polímeros mais comuns na classe de adesivos estruturais são os epóxis e poliuretanos.

- Adesivos Sintéticos: são basicamente constituídos por termoplásticos, emulsões, e elastômeros. Possuem uma boa adesão à uma grande variedade de substratos e podem ser aplicados de forma rápida. Possuem diversas propriedades qualificadas como boas no âmbito da engenharia e são de uma relação Custo x Benefício elevada.

Para os adesivos podem ser encontrados em forma de colas, e é necessário um longo período para que a união seja feita de modo eficaz, a superfície deve ser limpa várias vezes de forma adequada e passar por um pré-tratamento. Os principais modos de falha do adesivo numa junta são fundamentalmente apresentados na Figura 39:

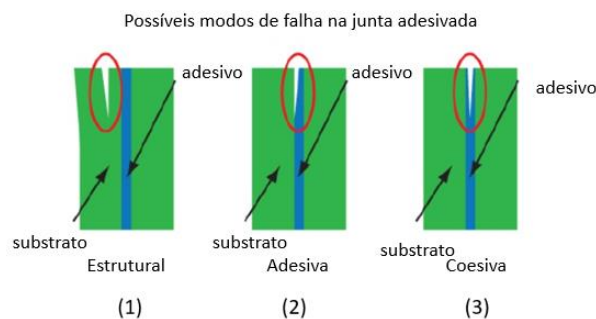


Figura 39 - Modos de falha de uma junta colada [Autor]

- (1) Estrutural: O substrato não suporta a tensão e ele mesmo entra em fratura. De um modo geral, não é motivo de preocupação quando o se pretende estudar a junta. Porém, caso a junta apresente propriedades melhores que as do material de base que se pretende unir, poderá significar que a junta se encontra sobredimensionada.

- (2) Adesiva: Acontece quando a interface entre o adesivo e o substrato são separadas. Visualmente, é possível identificar o adesivo no substrato. Normalmente este tipo de falha é devido à produção da junta deficiente, o que pode incluir: material adesivo incrustado no substrato, deficiente preparação da junta ou contaminação.
- (3) Coesiva: é o resultado de uma fratura onde é possível observar restos dos adesivos em ambas as partes dos substratos. A superfície do adesivo pode aparentar rugosa e em uma coloração mais clara do que o adesivo em si. A falha em si acontece por corte (corte) e a delaminação pode gerar a falha coesiva. Normalmente esta falha se deve ao facto de que a junta foi mal dimensionada, seja por geometria subdimensionada, seja por tensões de arrancamento. A presença de porosidade e “buracos” na camada colada, podem também serem causas de falhas por concentração de tensão.

3.2.4 Critérios de falhas em materiais compósitos laminados

A segurança na aplicação dos materiais compósitos para fins estruturais depende primordialmente da habilidade na estimativa da resistência desses materiais. Geralmente, as falhas em compósitos ocorrem devido a uma combinação de vários mecanismos, sendo, portanto, um processo complexo de acúmulo de danos no material. Apesar da importância do entendimento dos mecanismos de falha, em muitas aplicações torna-se difícil, mesmo senão impossível, detalhar cada etapa do processo de falha. Assim, em um ciclo de projeto estrutural, uma das características marcantes na fase de análise de desempenho é a seleção apropriada de um critério de falha, capaz de estimar se a estrutura está segura ou não sob um determinado estado de tensões ou deformações.

De um modo geral, a análise da falha ou da resistência tem dois principais aspetos:

- 1- Analisar um laminado a fim de estimar o carregamento máximo ou o desempenho do mesmo
- 2- Projetar um laminado para determinada situação de carregamento

Existem diversos critérios diferentes que podem ser usados, mas serão abordados apenas as teorias de Tsai-Hill e Tsai-wu.

3.2.4.1 Teoria de Tsai-hill

Esta teoria é baseada no critério da máxima energia de distorção utilizada em materiais isotrópicos, mais conhecido como Von-Mises, e partindo desta, são realizadas adaptações para os materiais anisotrópicos. A energia de distorção é apenas uma das várias parcelas de deformação aplicadas a um corpo qualquer, pois representa em partes a mudança de volume e a mudança da forma. De acordo com este critério é considerado que a falha no material só pode ocorrer quando a sua energia de distorção é ultrapassada pela aplicada. Partindo deste princípio, Tsai-Hill chega na seguinte relação matemática:

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{(S_x)^T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{22}}{(S_y)^T}\right)^2 - \frac{\sigma_{11}\sigma_{22}}{((S_x)^T)^2} + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{xy}}\right)^2 = 1. \quad (22)$$

A teoria completa sobre o assunto, pode ser observada em Engblom, J.J. *Stress and Failure Analysis of Laminated Composite Structures*, 2012.

3.2.4.2 Teoria de Tsai-Wu

A teoria de *Steve Tsai* e *Ed Wu* consiste em um critério geral de falhas em materiais ortotrópicos, quando sujeitos a uma tensão planar, que pode ser explicitada matematicamente da seguinte maneira:

$$F_{01}\sigma_1 + F_{11}\sigma_1^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 + F_{02}\sigma_2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{44}\tau_{12}^2 < 1 \quad (23)$$

Onde:

$$\begin{aligned} F_{01} &= \frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c}, & F_{11} &= \frac{1}{X_t X_c}, & F_{02} &= \frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c}, \\ F_{22} &= \frac{1}{Y_t Y_c}, & F_{12} &= -\frac{1}{2\sqrt{X_t X_c Y_t Y_c}}, & F_{44} &= \frac{1}{S^2} \end{aligned} \quad (24 \text{ a } 29)$$

Este critério de falha é utilizado para calcular um índice de falha, das tensões atuantes na geometria a ser estudada, e isso pode prever a falha da primeira camada de um compósito laminado. O que é de grande importância, pois com este critério, pode-se avaliar se a falha seria entre a resistência mecânica da fibra, ou se está sujeito a uma falha entre as fibras.

A teoria completa pode ser consultada em *Tsai, S. W. and Wu, E. M. (1971). A general theory of strength for anisotropic materials.*

3.2.4.3 Modelo da Zona Coesiva

Juntas coladas são utilizadas em vários campos da engenharia moderna, e um dos modelos utilizados para a previsão do comportamento de adesivos e suas ligações, é conhecido por Modelo da zona Coesiva (*Cohesive Zone Model*) ou CZM. Este tipo de técnica é utilizado para analisar as tensões no material adesivado, estimar as falhas e etc (Wooley e Carver). O modelo CZM tem sido utilizado na última década como uma forma de analisar dois materiais unidos por uma camada de adesivo, materiais que podem ser iguais ou diferentes, estes materiais são denominados aderentes.

Este modelo tem por base o modelo do mecanismo da fratura, que no caso gera uma separação entre duas partes e são unidos apenas por uma força coesiva tracionaria, segundo Ortiz e Pandolfi. Porém, esta zona coesiva não representa nenhum material de forma física, são representativos apenas (Figura 40). Basicamente, no estudo de elementos finitos, se trata de elementos de malha de formato triangular, que levam em consideração basicamente as propriedades específicas do adesivo utilizado na junta, ou na reparação utilizando o mesmo. Para a aplicação desta técnica, utiliza-se um modelo de separação por tração e valorizam a energia liberada em relação a tensão e corte.

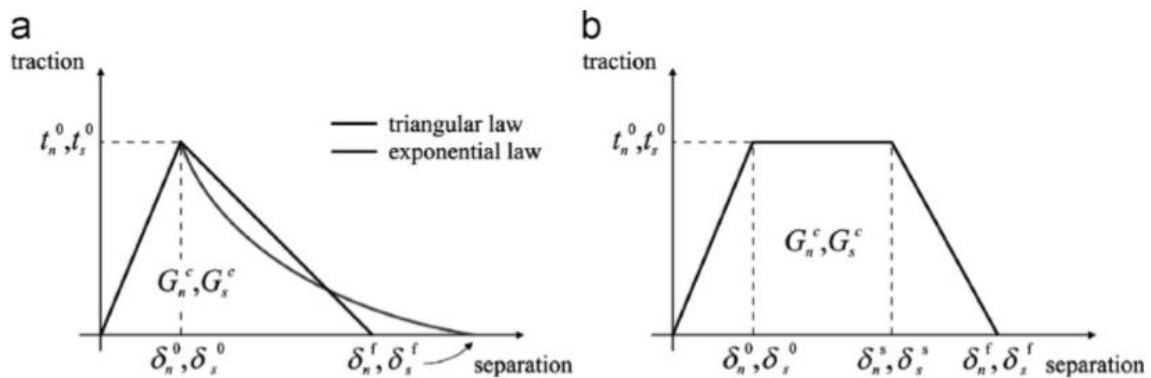


Figura 40 - Modelos CZM disponíveis no Ansys

Felizmente, atualmente, o software Ansys é visto como peça fundamental para estes tipos de estudos, pois já existe em sua biblioteca o modelo descrito, o que facilita a análise deste tipo de zona.

O modelo em si reproduz uma carga elástica que vai até seu pico devido o local da fratura normalmente utilizar relações entre tensões e trações coesivas e seus respectivos deslocamentos e conecta nós homogêneos relacionados à degradação do material. O modelo pode traduzir-se analiticamente através da seguinte equação:

$$t = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & K_{ns} \\ K_{ns} & K_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \end{Bmatrix} = K_s \quad (30)$$

Onde para camadas finas de adesivo, podem ser feitas as seguintes simplificações:

K_{nn} = Módulo de Elasticidade (E) do adesivo

K_{ss} = Módulo de corte do adesivo (G)

$K_{ns} = 0$

E para iniciação do dano, deve-se levar em consideração o critério quadrático da progressão do dano:

$$\left(\frac{G_n}{G_n^c}\right)^2 + \left(\frac{G_s}{G_s^c}\right)^2 = 1 \quad (31)$$

O intuito desta tese não é demonstrar como o conceito do CZM funciona, mas sim, como a utilização deste modelo foi utilizada. No caso deste trabalho, o modelo de zona coesiva, foi utilizado para a simulação numérica do software Ansys, na realização da simulação do modelo dos provetes já reparados e unidos por uma camada de adesivo, como mostrada na Figura 41:

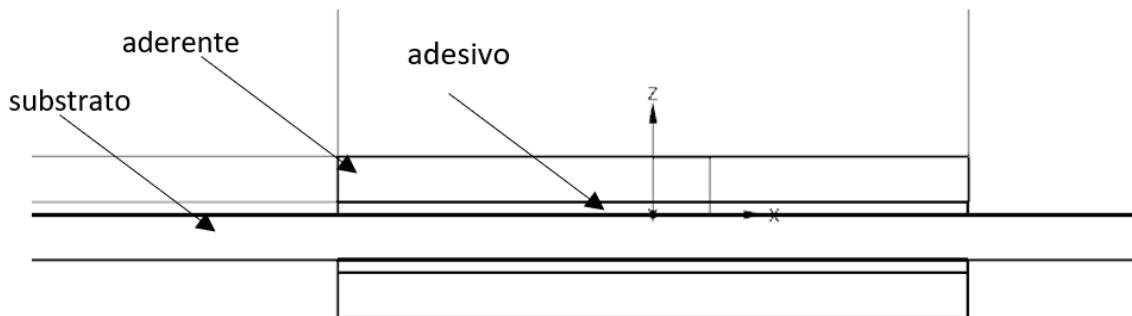


Figura 41 - Detalhe do Modelo de reparação

4. Metodologia experimental

A metodologia experimental seguida inclui a realização de ensaios laboratoriais para determinação das propriedades mecânicas dos materiais. Mediante os resultados obtidos, foi possível a utilização dos mesmos na simulação numérica realizada com recurso aos softwares de elementos finitos. O software de elementos finitos a ser utilizado é o Ansys Workbench 16, e para auxiliar a parte prática, além dos resultados obtidos por ensaios de tração nos provetes, também serão utilizados extensómetros colados nos provetes, para buscar mais detalhes sobre deformação do material e o *software* Labview (National Instruments) será utilizado para a captação dos dados necessários e produzidos pelos provetes.

4.1 Metodologia de preparação dos provetes

Neste subcapítulo, será descrita a metodologia utilizada para fabricar os provetes para os ensaios de tração para determinar características mecânicas do material a ser estudado.

Devido à oportunidade de realizar a produção dos provetes dentro dos laboratórios de materiais do departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Politécnico de Leiria, pois já existiam os materiais necessários para a realização, foi feita a escolha de ser produzido internamente.

As metodologias produtivas existentes na instituição, são as técnicas de produção à vácuo e técnicas com utilização de pressão. Com a ajuda de experimentos já feitos também internamente, a metodologia utilizada foi a produção de uma placa plana, com a orientação das camadas determinadas neste estudo, sob a metodologia de pressão, pois dava um aspeto superficial melhor e as propriedades mecânicas também parecem ser superiores devido a compactação das camadas e a resina utilizada, diminuindo a formação de porosidade no interior do laminado.

4.2 Materiais Utilizados

Para a realização das atividades de produção dos materiais a serem estudados, foram utilizados alguns materiais já existentes nos laboratórios do Instituto Politécnico de Leiria, em particular no Laboratório de Fabrico Rápido.

Os Materiais utilizados na preparação das placas que deram origem aos provetes foram os seguintes:

1. Tecido de Fibra de Carbono T300 bidirecional em 0 e 90 graus (Figura 42);
2. Resina Sicomin Epoxy Systems SR1500 (Figura 43);
3. Desmoldante PVA da REBELCO (Figura 44);
4. Endurecedor Sicomin SD2503 (Figura 43);
5. Adesivo 3M DP8805NS;



Figura 42 - Tecido de Fibra de Carbono

O material utilizado deve ser pesado Figura 42 para que os cálculos analíticos possam ser mais preciso, pois as propriedades mecânicas do compósito laminado, são influenciadas diretamente pela quantidade de material, seja fibra ou resina, utilizada na produção da placa e mais futuramente, dos provetes.

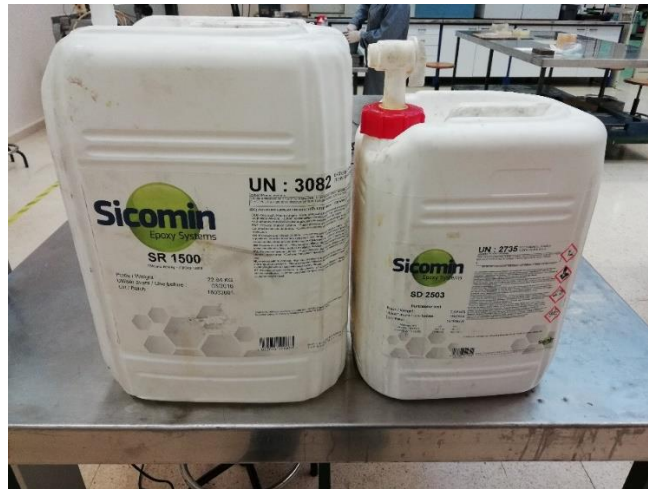


Figura 43 - Combinado de Resina e Endurecedor

As unidades utilizadas (Figura 43) foram de fornecimento do próprio Instituto Politécnico de Leiria, com as quantidades exigidas pelo fornecedor para que houvesse uma produção mais direta e simples de ser executada. Além disso, para evitar que a placa produzida ficasse grudada na mesa utilizada no laboratório de materiais, foi utilizado um desmoldante (Figura 44).

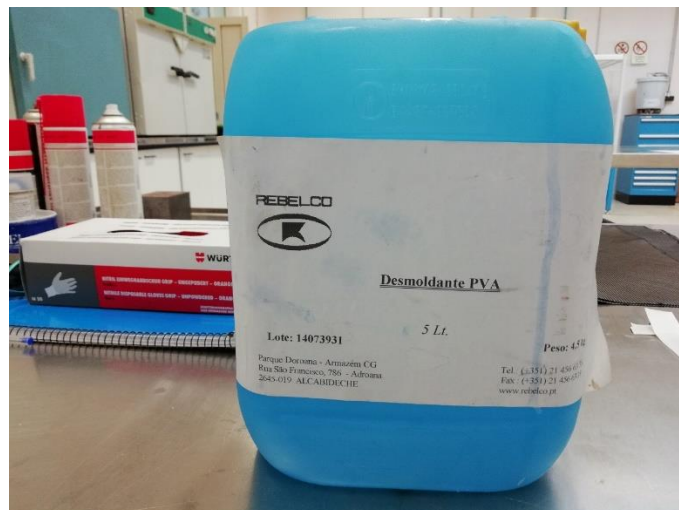


Figura 44 - Desmoldante utilizado para que a placa não aderisse à mesa de trabalho

4.3 Metodologia de Fabrico

Para a realização desta etapa, juntamente com o aluno de licenciatura Filipe Pereira, também do Instituto Politécnico de Leiria, foi fabricada uma placa de Fibra de Carbono, para facilitar a produção, e o corte dos provetes foram feitos posteriormente ao ciclo de cura da mistura da resina com endurecedor, respeitando as sugestões do próprio fabricante da resina.

Primeiramente, foi feita uma limpeza rigorosa e desengorduramento no local onde foi fabricada a placa, em uma mesa de aço inox disponibilizada no laboratório de fabrico rápido, e após a limpeza foi aplicado o desmoldante em cinco camadas cruzadas para que o material não aderisse na mesa (Figura 45) e para obter uma superfície perfeitamente plana.



Figura 45 - Local de trabalho para a produção da placa

É importante lembrar que, a placa produzida para este estudo, foi fabricada com uma dimensão de 500x400mm, o que possibilita a produção em larga escala de provetes.

Após a aplicação de cada camada do desmoldante, espera-se cerca de 15 a 20 minutos até que o produto esteja seco. Durante os intervalos de aplicação do desmoldante, foram cortadas a tesoura as camadas do tecido da fibra, do *Peel ply* e da película plástica nas dimensões citadas acima. Após cerca de duas horas de tratamento superficial, pode-se enfim começar a montagem das camadas do laminado, lembrando que neste estudo foi produzida a combinação de 6 mantas de entrelaçado de fibra de carbono, o que resulta em uma aproximação de 12 camadas unidireccionais. O compilado de camadas foi escolhido: tendo em conta a pesquisa bibliográfica realizada e o estado da arte de outros trabalhos e uma análise simples de como se proporcionar a melhor resistência mecânica após a reparação do compósito laminado. Sendo a compilação [0/90/-45/45/0/90] simétrico.

Ou seja, foram aplicadas 6 camadas de manta de fibra de carbono, e ao colocar cada camada, foi aplicada a solução de resina enriquecida por um endurecedor produzida simultaneamente, também respeitando as proporções do fabricante. No caso, foi utilizado a proporção de 33g de endurecedor para cada 100g resina (100/33). Esta etapa é crucial e a mais complexa no processo de produção da placa, pois deve-se ter muito cuidado com o alinhamento das fibras, afinal, qualquer descuido no manuseamento da manta, vai gerar um desalinhamento das fibras, o que não pode acontecer, e deve-se garantir a orientação das diferentes camadas da combinação exigida para o estudo.

Após o fim da montagem Figura 46, deve-se aplicar uma manta conhecida como *Peel ply*, que tem como principal função, impedir que impurezas se agarrem à resina, enquanto há o processo de cura e também facilita a retirada do material definitivo, após aplicação de pressão. Além do *Peel ply*, deve-se aplicar uma película de plástico grosso para que os pesos adicionados Figura 47, a maneira no processo de pressão não aderirem à resina utilizada, já que o *Peel ply* é poroso para ajudar a superfície ficar o mais plana possível.

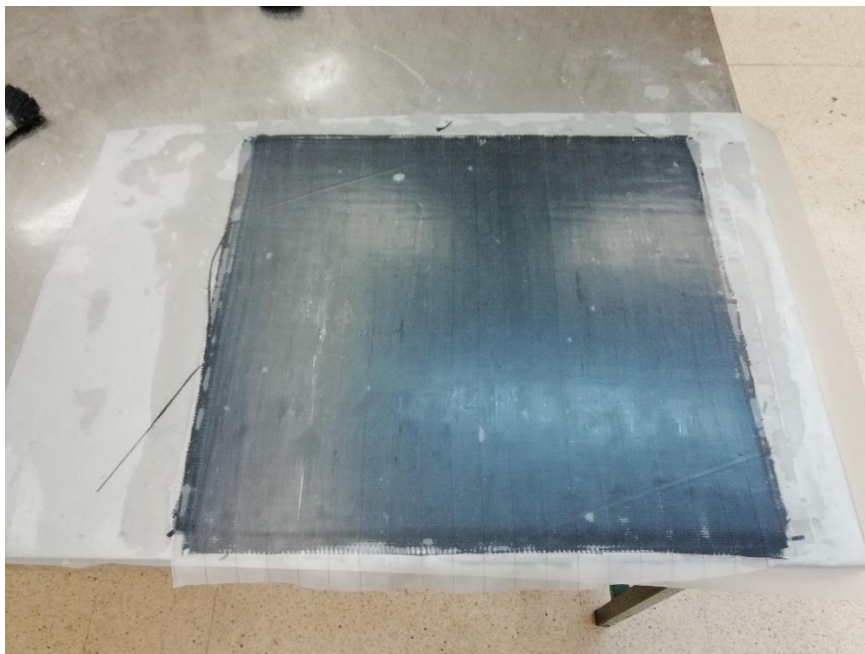


Figura 46 - Montagem completa da placa pronta a ser prensada

A seguir, a placa foi submetida à pressão, onde foram utilizados 50 kg de aço em cima do material de forma com que cobrisse toda a placa do laminado e também foi colocada uma superfície mais lisa de madeira por baixo destes pesos, para uma tentativa de dar um melhor acabamento superficial à placa e uniformizar a pressão efetuada pelos pesos em aço, em uma alusão à pressão em um processo industrializado. Este processo decorreu por 24 horas, para que houvesse parte da cura e padronização do material, para escoar o excesso de resina utilizado na fabricação.



Figura 47 - Placa de Fibra de Carbono após a prensagem

Após este período de 24 horas sob pressão, a placa produzida foi submetida a tratamento térmico para enfim terminar o processo de cura, também sugerido pelo fabricante da resina e do endurecedor, ou seja, foi colocada em um forno a 40° C Figura 48 durante um período de 24 horas.



Figura 48 - Processo de cura no forno

Após este processo de cura, a placa foi sujeita a corte de provetes (Figura 49), com a geometria adequada aos ensaios de tração, com dimensões de 250 x 25 mm (Figura 50) e espessura seria o final sujeito da placa produzido, variando com o número de camadas utilizadas para a produção da placa e a quantidade de resina utilizada também.



Figura 49 - Corte da placa nos formatos dos provetes

Após o corte da placa, pelo menos 12 provetes foram obtidos e ficaram com o aspeto final conforme Figura 51. Estes provetes foram submetidos a colagem de extensómetros, cuja as características serão descritas no capítulo 5 deste projeto.



Figura 50 - Planta do provete obtido

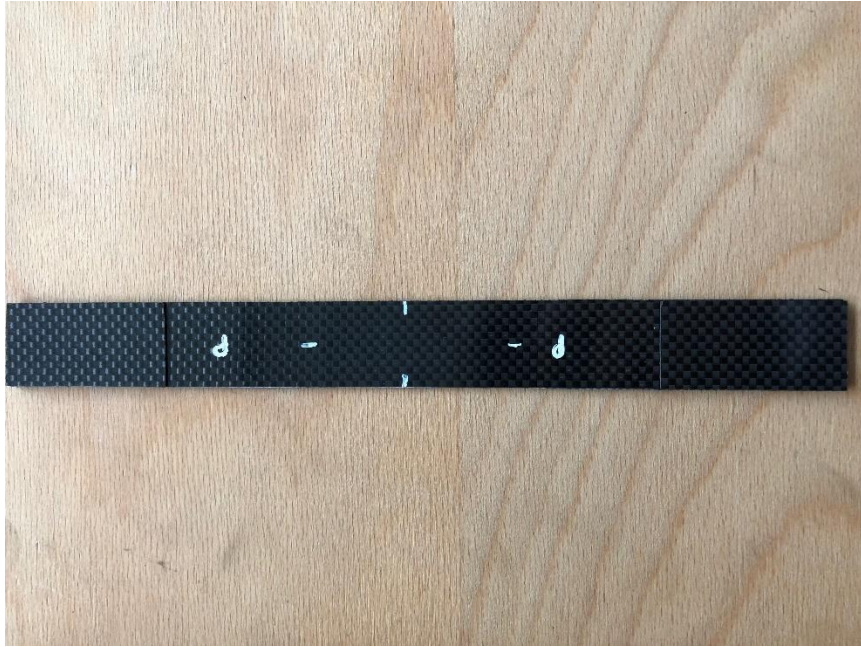


Figura 51 - Provete obtido após os cortes

4.4 Metodologia de produção de dano

Existem diversas formas de se produzir um dano controlado em casos de estudo do comportamento de determinado material. Seguindo as recomendações de E.V. Iarve, T. Breitzman, E.R. Ripberger [63], uma boa simulação de dano controlado é ter uma redução de área entre 5 e 20 por cento da área da secção transversal. De modo a produzir o referido dano, no âmbito do presente trabalho, foram efetuados furos centrais no provete (Figura 52 - Metodo de furação no provete) com o diâmetro de 5 mm (Figura 53), que corresponde a um quinto da sua área da secção transversa. Esse dano foi provocado tendo em conta diversas análises consultadas na bibliografia, nomeadamente de de Yashiro, Okabe, Toyama e Takeda et al..



Figura 52 - Metodo de furação no provete

Para a realização do furo no centro do provete, e com a ajuda de uma prensa de fixação, juntamente de uma engenho de furar, foram produzidos os furos nos provetes, com o cuidado de não ter uma velocidade de avanço transversal para que evitasse uma maior danificação tanto na resina, quanto nas fibras utilizadas no processo de produção do provete.

Ao todo, foram 10 provetes furados, tendo sido utilizados para ensaios de tração, flexão e na sua devida reparação.

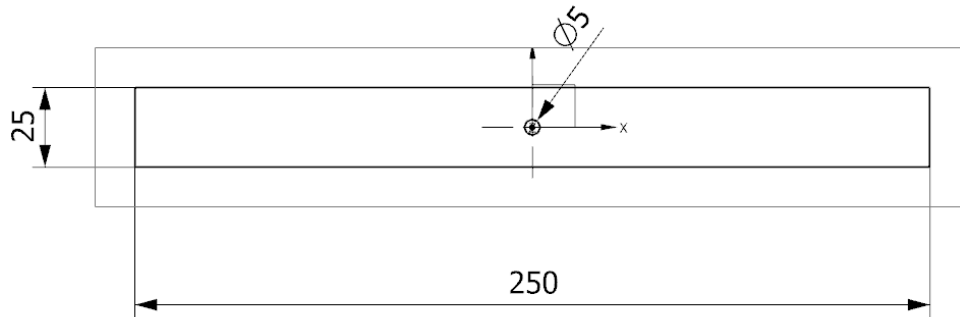


Figura 53 - Modelo de provete utilizado danificado

4.5 Metodologia de reparação

Para este trabalho, a metodologia de reparação escolhida para a realização dos testes, é o tipo de reparação chamado de *Double lap*, que consiste em uma dupla sobreposição da placa danificada, conforme a Figura 54:

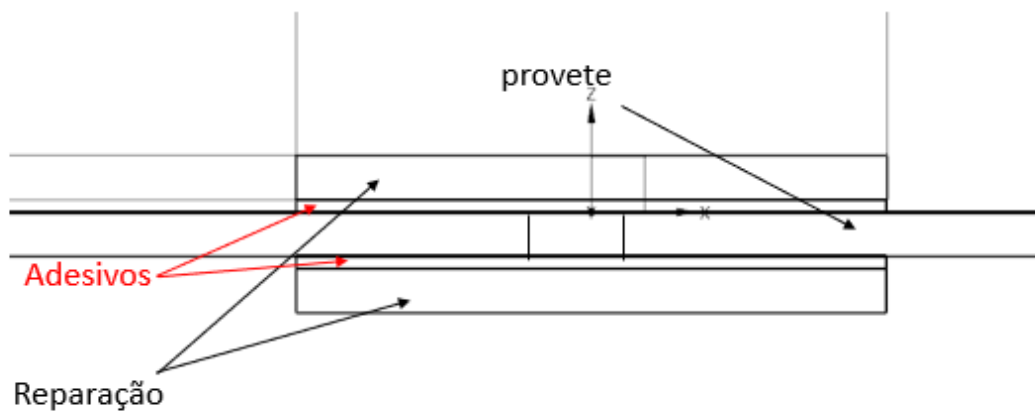


Figura 54 - Metodologia de Reparo utilizada no trabalho

Este tipo de reparação, consiste em uma adição de material de reparação, juntamente com adesivos, para que haja adesão das placas de reparação a partir de uma junta coesiva. O adesivo utilizado é o adesivo da Marca 3M modelo DP8805NS, conforme Figura 55:



Figura 55 - Adesivo utilizado para a reparação [56]

Este adesivo é bi-componente, acrílico e que tem sua característica estrutural, e por si só de acordo com o catálogo de dados técnicos deste material possui o comportamento mecânico descrito na Figura 56:

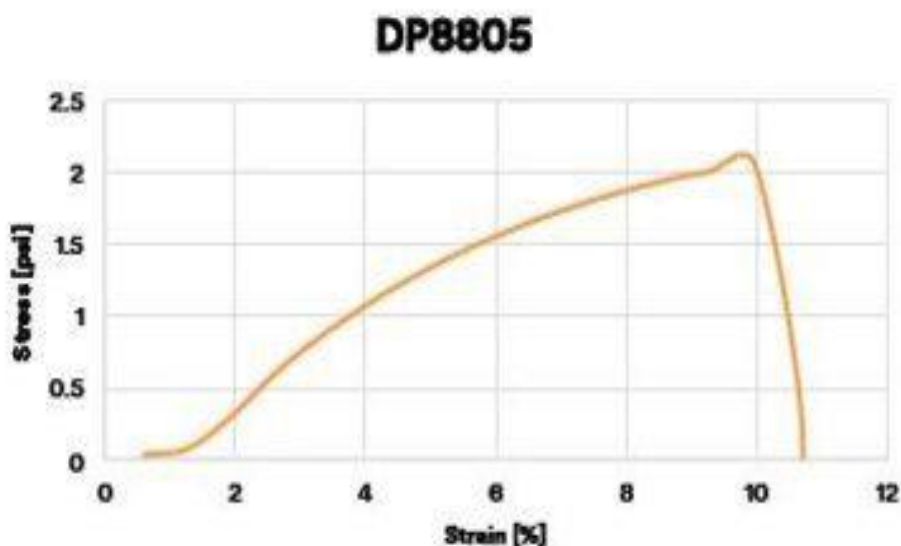


Figura 56 - Característica de comportamento Mecânico do adesivo [56]

A reparação deve ser feita a partir do furo indicado, com uma geometria otimizada para que o adesivo não sofra com as tensões atuantes. Wang, Zhou e Shi [64], chegaram a uma geometria ótima em relação às tensões atuantes. O resultado deles indica que o melhor comprimento de atuação de uma reparação colada é entre 19 e 25mm. Pois com uma menor área, todo o adesivo estará sob atuação de uma elevada carga de corte, se escolher uma área

superior às referenciadas, a área colada estará sujeita apenas a uma tensão muito pequena, mesmo quando não carregada. Então a geometria escolhida foi a de 25 mm (Figura 57).

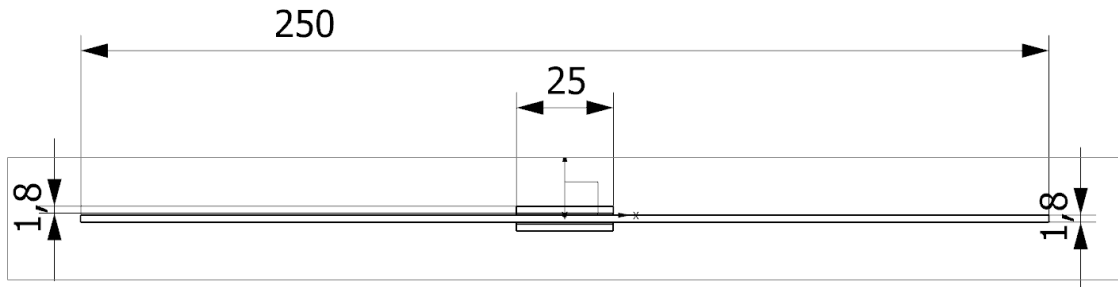


Figura 57 - Modelo de provete utilizado reparado

A Figura 58, ilustra bem a etapa final de produção da reparação do provete, onde após a aplicação do adesivo, foi deixado a temperatura ambiente por 24 horas para uma total cura do material.



Figura 58 - ilustração da etapa final da colagem da reparação

Após o período de cura do material, observando na imagem acima, para que houvesse uma pressão constante durante as 24 horas de cura, foram utilizadas molas de madeira. Um procedimento rustico, porém eficaz.

Uma grande dificuldade na reparação, devido a uma falta de ferramental adequado para a aplicação do adesivo, adaptações técnicas foram utilizadas, para uma dosagem mais precisa

e ter um maior controle da vazão do líquido adesivo e do seu material de cura, quando misturados, são unidos por uma reação química exotérmica e de acordo com o fabricante, em 10 minutos o material já consegue oferecer uma rigidez estrutural prometida. Ou seja, foram utilizados um recipiente e um misturador para provocar a união dos materiais, artesanalmente, sendo despejados em um copo plástico, e misturados com um palito de madeira, e com isso, o controle da quantidade de adesivo utilizado em cada reparação fica mais complicado de ser feito. Porém, por cautela, foram deixados por 24 horas em repouso.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

5. Extensometria

Os provetes obtidos explicados no capítulo 4, foram instrumentados através de extensómetros (*Strain Gauges*) poder ter uma outra fonte de dados do material produzido. Este capítulo vem explicar o processo de escolha e colagem do tipo de extensómetro utilizado nos ensaios.

Na Figura 59 é possível observar os materiais mínimos para que haja uma colagem bem feita dos extensómetros nos provetes, sendo os materiais principais:

- Régua ou esquadro
- Pinças para manuseamento dos terminais dos extensómetros
- Acetona para realizar uma limpeza da superfície
- Os extensómetros
- Uma cola de rápida colagem
- Esmalte de proteção dos extensómetros após a colagem



Figura 59 - Colagem de extensómetros

O processo de colagem destes extensómetros é muito delicado, pois eles são sensores capazes de recolher dados com precisão micrométrica, então alguns cuidados devem ser tomados quando se vai colar este tipo de sensor, sendo eles:

- Ter uma superfície do provete lixada para que o a cola e o extensômetro sejam bem aderidos
- Aplicar acetona para que a resina existente na superfície do material seja preparada para receber a cola
- Ajustar os extensômetros para o processo de colagem, com o auxílio de fita cola
- Ter uma precisão em relação à orientação dos extensômetros, pois se estiverem desalinhados podem dar valores diferentes do esperado
- Após a colagem, aplicar uma pressão (com cuidado para não danificar o sensor) e retirar o excesso de cola aplicada
- Retirar a fita cola auxiliar e aplicar um esmalte para proteção do sensor e deixar descansar por 24 horas

Realizar a escolha correta do tipo de extensômetro para o material a ser ensaiado, pois existem condicionais das propriedades de medição do extensômetro que podem alterar, como por exemplo a importância do coeficiente de expansão térmica, todos estes detalhes podem ser obtidos na embalagem dos extensômetros Figura 60:



Figura 60 - Extensômetros utilizados

Foram colados dois extensômetros em cada provete, um na direção longitudinal do empilhamento da fibra e outro na posição transversal ao eixo de referência do empilhamento, como pode ser observado na Figura 61.



Figura 61 - Extensómetros colados

Ter atenção também à resistência elétrica exigida pelos extensómetros para que os resultados sejam fidedignos.

Como condicional dos testes, os provetes de maior interesse foram utilizados como cobaias para a aplicação de extensómetros para avaliar o comportamento do material final. Foram utilizados dois extensómetros (um longitudinal e um na posição transversal) para avaliar principalmente o comportamento do Módulo de Elasticidade do laminado, conforme figura abaixo:

Para uma análise comportamental mais eficaz, também foram utilizados extensómetros ligados a uma placa de aquisição de dados (Figura 62 e Figura 63) , juntamente com a programação em ficheiro Labview.



Figura 62 - Placa de aquisição NI eDAQ-9172

Os extensómetros são soldados e ligados à essa placa de aquisição de dados, para a obtenção dos dados de deformação longitudinal e transversal, conforme Figura 63:

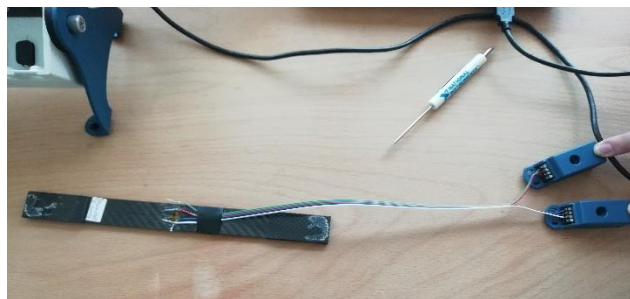


Figura 63 - Extensómetros ligados à placa de captura

Com isso, foi possível avaliar também deformações diretamente ligadas á camada exterior do material, nas direções longitudinal e transversal. Com o auxílio desta placa de aquisição de dados, os dados fornecidos pelos extensómetros foram possíveis de ser capturados via Labview e estudados via Excel.

A Figura 64 representa esquematicamente a metodologia de captação de dados utilizada no Labview, de maneira simples onde se encontram representadas as fases de calibração e registo da deformação medida pelos extensómetros ligados ao programa, para ter acesso às propriedades mecânicas do provete utilizado.

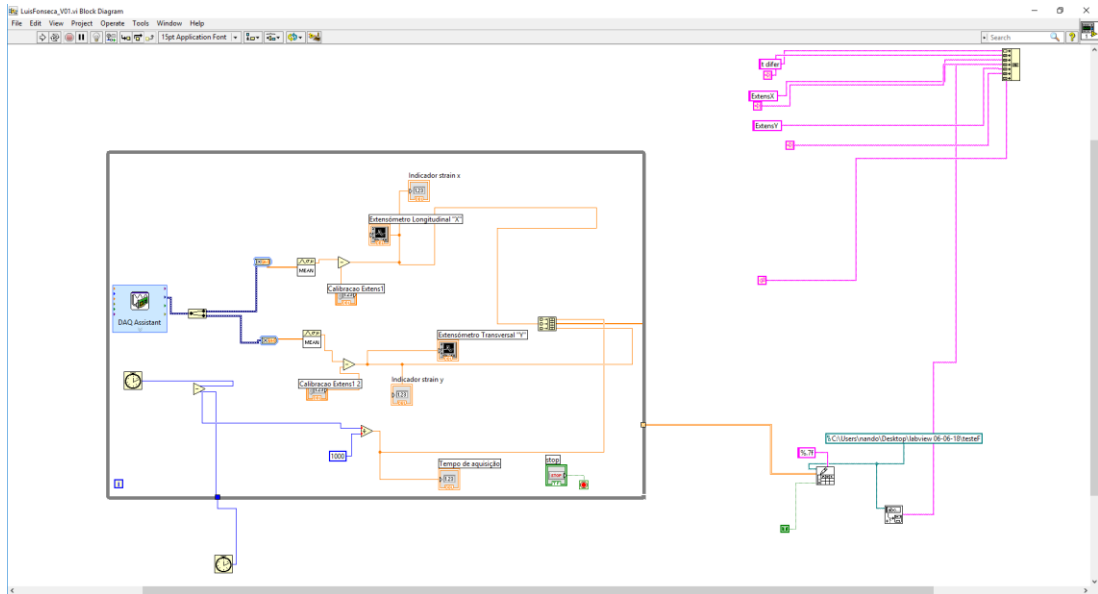


Figura 64 - Montagem de leitura dos extensômetros em LabView

É possível observar de forma gráfica na Figura 65 e mais simples, o funcionamento do programa durante o ensaio de um dos provetes, na esquerda a deformação longitudinal e na direita, a deformação transversal, conforme posicionamento dos provetes e dos extensômetros. Sempre que uma carga era aplicada, os gráficos devidamente calibrados mostram o comportamento do material em tempo real, porém não o suficiente para já gerar o gráfico final da compilação dos resultados.

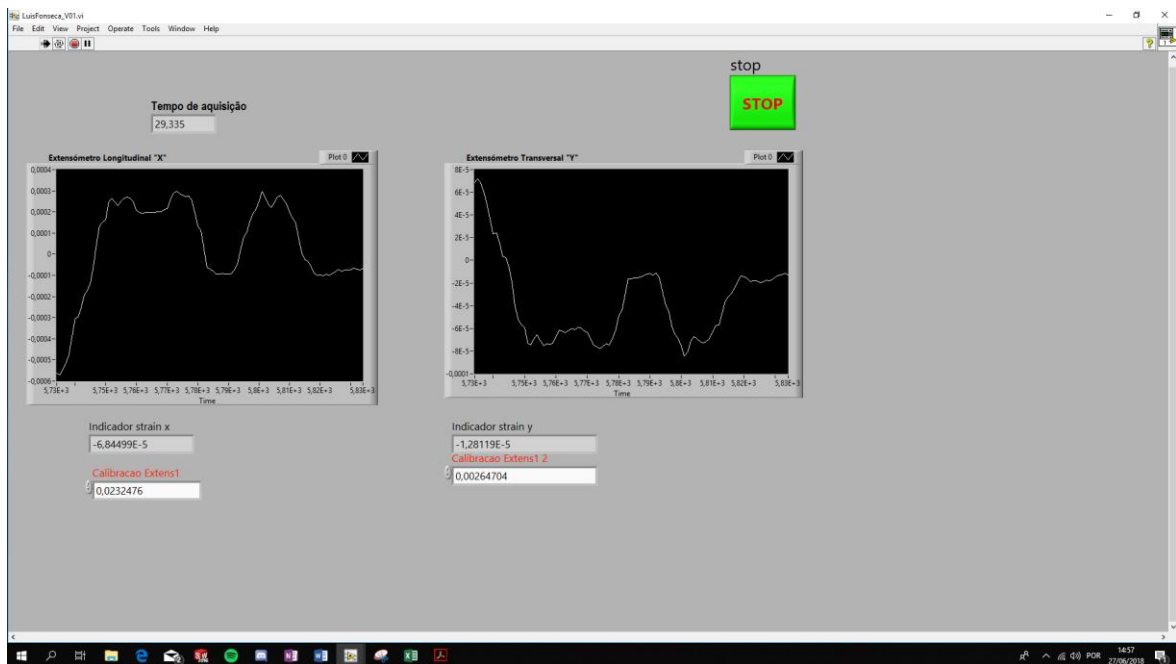


Figura 65 - Exemplo de leitura e calibração dos extensômetros

Para dados com uma maior precisão, foram utilizados extensômetros com resistência de 350 ohms, para que o provete em fibra de carbono, não sofresse alterações consideráveis em seu levantamento de dados, como é possível observar o submenu do processo de aquisição na Figura 66.

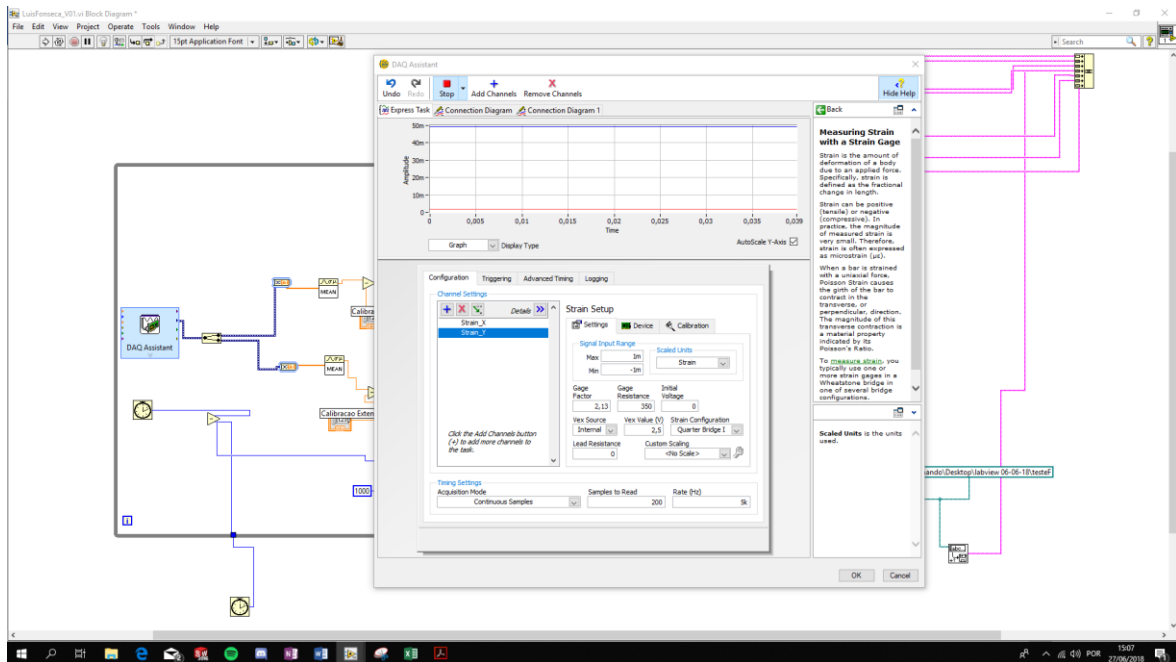


Figura 66 - Interface de configuração do extensômetro utilizado

Tratando-se de atividades em laboratório, é comum existirem imprevistos e algumas dificuldades não planejadas. Dessa forma, ao realizarmos os ensaios deste Projeto Final, nos deparamos com:

- Ajuste de montagem, alinhamento e nivelamento da máquina de ensaio universal
- Dificuldades operacionais com a utilização da máquina.
- Ajuste de produção da placa de fibra de carbono
- Falhas construtivas da placa de material
- Falhas no alinhamento do corte dos provetes
- As amarras da máquina de ensaio não agarrar no provete
- Escorregamento do provete quando submetido a cargas elevadas em tração

6. Procedimento experimental

Os Ensaio a serem utilizados para este estudo são o de Flexão e o Ensaio de tração, que consistem em analisar o comportamento do material com um carregamento transversal (corte) e um carregamento axial longitudinal, respetivamente,

6.1 Ensaio de Tração

O Ensaio de tração é realizado posicionando-se o corpo de prova nas garras da máquina de ensaio de forma a sujeitar o provete a um carregamento axial como pode ser visto na Figura 67, com uma variação gradual desta força até uma possível rutura.



Figura 67 - Ensaio de Tração

Neste tipo de ensaio, são obtidos diagramas tensão-deformação que são utilizados para determinar o módulo de elasticidade (E), além de outras propriedades mecânicas em vista.

Os ensaios de tração fora, efetuados de acordo com a norma ASTM D3039, tendo seu teor voltado para o universo dos materiais compósitos em especial a utilização na indústria de plásticos e compósitos aeroespaciais.

Esta norma em não estipula uma geometria específica para os testes serem validados, isso é de acordo com o autor e sua necessidade. Para obter uma geometria final do provete, é necessário respeitar algumas condições de ensaio, como por exemplo as dimensões das máquinas, formatos e tolerâncias de deslocamentos adequadas ao ensaio. Esta metodologia foi seguida para determinar as propriedades do material, de modo a serem utilizadas na fase de pesquisa e desenvolvimento. Porém, alguns detalhes podem conduzir a uma variação dos resultados obtidos no ensaio, como por exemplo as seguintes opções:

- **Material do corpo de prova** - Práticas indevidas na fabricação, falta de controle de alinhamento das fibras e danos causados por processos de fabricação são a principal causa na geração de dados inconsistentes/ ensaios malsucedidos em compósitos.
- **Temperatura de realização dos ensaios** – o material ser colocado em condições de temperatura não supostos.
- **Meio de ensaio** – O laboratório deve estar nas condições estabelecidas pela norma
- **Alinhamento do sistema** - O desalinhamento do sistema de fixação do provete na máquina pode gerar, durante a aplicação do esforço por parte do cabeçote da máquina, carregamentos de flexão que poderão causar falha prematura do provete, mascarando os resultados, tornando-os inconsistentes. Todas as medidas possíveis deverão ser tomadas de forma a eliminar essas tensões de resultantes.
- **Fixação nas amarras da máquina** - Altos índices de falha induzidas por fixação indevida combinadas com alta geração de dados inconsistentes são indicadores de problemas na fixação do provete.
- **Velocidade do ensaio** – Segundo a norma
- **Tempo de ensaio** – Segundo a norma
- **Vazios existentes na estrutura do material** – como se trata de um processo manual, pode ser que haja porosidade apesar de todo o esforço no fabrico da placa.
- **Fração volumétrica do reforço** - os resultados experimentais das propriedades mecânicas são dependentes desta característica, se houve adição de resina além do esperado, o resultado pode variar

A norma rege a utilização de extensômetros e indica a localização de colagem dos mesmos, além de indicar as preferências de utilização de determinados parâmetros do próprio extensômetro, como a resistência utilizada, fator de temperatura e comprimento mínimo.

Também nesta norma, é indicada a velocidade de ensaio (avaliada e utilizada em 2mm/min) e as condições de temperatura e humidade do local onde será testado o provete. Além disso, indica algumas possíveis falhas nesta metodologia, que podem ser observadas também após a execução dos ensaios Figura 68 .

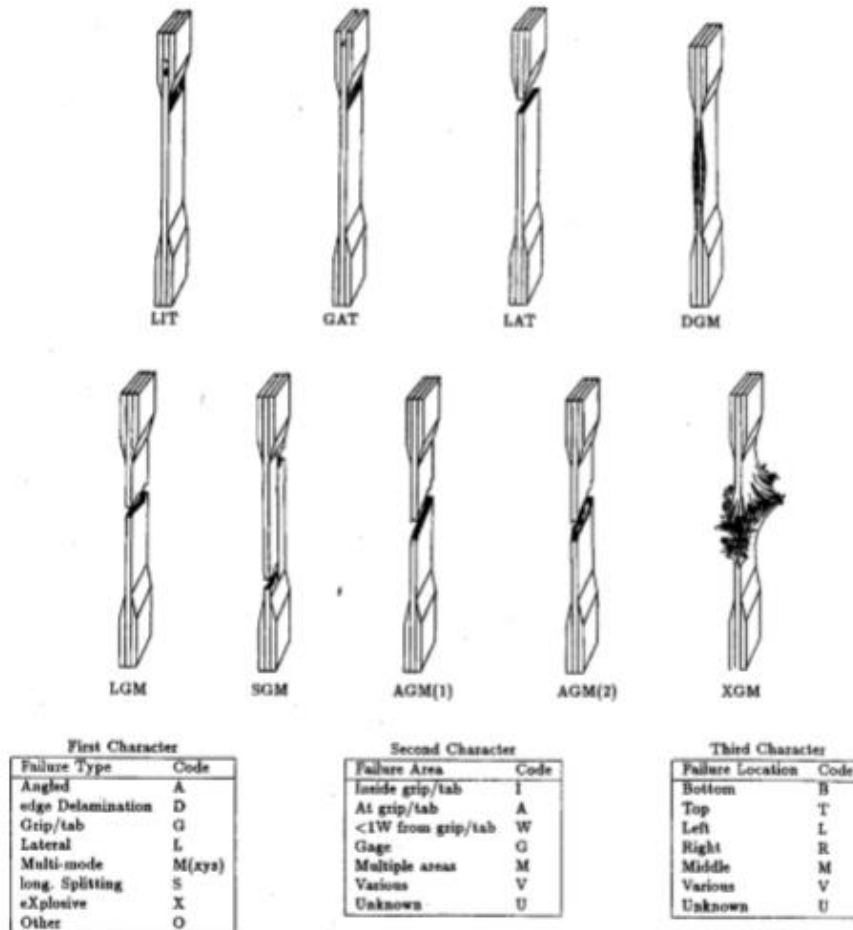


Figura 68 - Metodologias de falha da fibra de carbono em ensaios de tração

Os ensaios foram realizados em dois laboratórios distintos, nos laboratórios do Instituto Politécnico de Leiria e também nas instalações da Polipack, empresa especializada em materiais poliméricos, localizada em São Carlos, São Paulo, Brasil. Todos os ensaios possuíam a mesma configuração de sistemas de ensaio. Os Ensaio foram repetidos para assegurar a repetibilidade das operações e assegurar a consistência dos resultados obtidos.

Para ter um efeito comparativo de referência e será apresentado um cálculo analítico de acordo com as propriedades teóricas calculadas e também de medidas retiradas do provete.

$$\delta = \int_0^L \frac{P \cdot dx}{A \cdot E_{xy}} \quad (32)$$

Sendo:

δ = Deformação no eixo longitudinal

P = Força aplicada em Newton

A = Área da secção transversal do provete (25x1.8mm)

E_{xy} = Módulo de Elasticidade do Laminado no plano XY em MPa

L = Comprimento do provete (250mm)

Para o estudo do comportamento do material, foram utilizadas quatro medidas de efeito de comparação, sendo elas: o cálculo analítico, os dados experimentais retirados diretamente das máquinas de ensaio, os dados experimentais retirados dos extensómetros e a simulação numérica computacional.

6.2 Ensaio de Flexão

Este tipo de ensaio é usado para medir o Modulo de Elasticidade de um determinado material, num formato de uma viga. Este ensaio Figura 70, pode ser simplificado por uma viga bi-apoiada sujeita a uma carga transversal (P) com uma distância entre apoios de 80mm, apoios com diâmetro de 4 mm de secção e um punção de aplicação de força de 10mm de diâmetro de secção, conforme Figura 69:

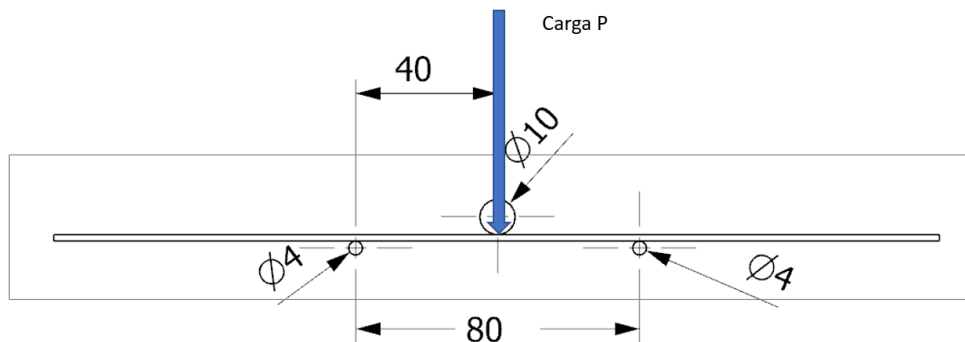


Figura 69 - Simplificação ensaio flexão

Este tipo de ensaio, permite determinar o valor do módulo de elasticidade da seguinte maneira, quando se aplica a força no centro da viga, a deflexão varia com a carga aplicada, e para cada carga aplicada, será obtida uma deformação, em função da secção transversal da viga. No caso, a parte analítica segue conforme a mecânica clássica de laminados, para determinação da flecha máxima de uma viga bi-apoiada:

$$D_{ij} = - \sum_{K=1}^n \bar{E}_{ij}^k \times \frac{Z_k^3 - Z_{k-1}^3}{3} \quad (33)$$

Onde a matriz D é obtida pela variação da resistência mecânica de cada camada aplicada no laminado, com um fator de compensação devido à influência de cada uma das camadas em relação a linha neutra da viga (verificar Figura 4).

No caso, a Matriz D_{ij} é a seguinte:

$$[D_{ij}] = \begin{bmatrix} 27,05 & 5,80926 & 1,5047 \\ 5,80926 & 45,405 & 1,5047 \\ 1,5047 & 1,5047 & 6,5759 \end{bmatrix}$$

E a relação desta matriz de rigidez com a deformação e a carga aplicada é a seguinte:

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = [D_{ij}]x \begin{Bmatrix} \frac{\delta^2 w_0}{\delta x^2} \\ \frac{\delta^2 w_0}{\delta y^2} \\ \frac{\delta^2 w_0}{\delta x \delta y} \end{Bmatrix} \quad (34)$$

O ensaio de flexão foi realizado com as três configurações diferentes de provetes (inteiro, com dano e reparado) e foram repetidos pelo menos três vezes para que houvesse uma validação dos dados adquiridos. É de referir que para este ensaio, não foram utilizados extensómetros externos, pois os mesmos foram utilizados para entender o comportamento do material nos ensaios de tração e analiticamente, com os *inputs* utilizados, é possível determinar analiticamente algumas outras propriedades de engenharia.



Figura 70 - Ilustração de um ensaio de flexão

6.3 Simulação numérica em Elementos finitos

Este subcapítulo abrange a metodologia utilizada pelo software Ansys Workbench 16 com a utilização do módulo ACP, que é especializado na metodologia de análise de materiais compósitos.

Este módulo até certo ponto, não difere de nenhum modelo de software de elementos finitos, pois é subdividido em algumas partes, conforme Figura 71:

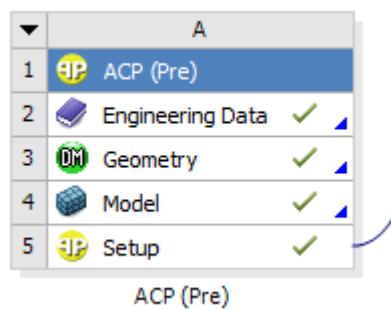


Figura 71 - Menu Ansys ACP

No submenu *Engineering Data*, é onde é feita a seleção do material. No caso deste projeto, é necessário criar um material de acordo com as propriedades mecânicas de uma lamina, que será explicado no submenu *Setup*. O *Engineering Data* (Figura 72) permite criar e editar os materiais existentes em sua biblioteca. E de acordo com as propriedades obtidas no subcapítulo 3.1, cria-se um material novo, e edita a resina epóxi existente para ter as mesmas características mecânicas do fornecedor.

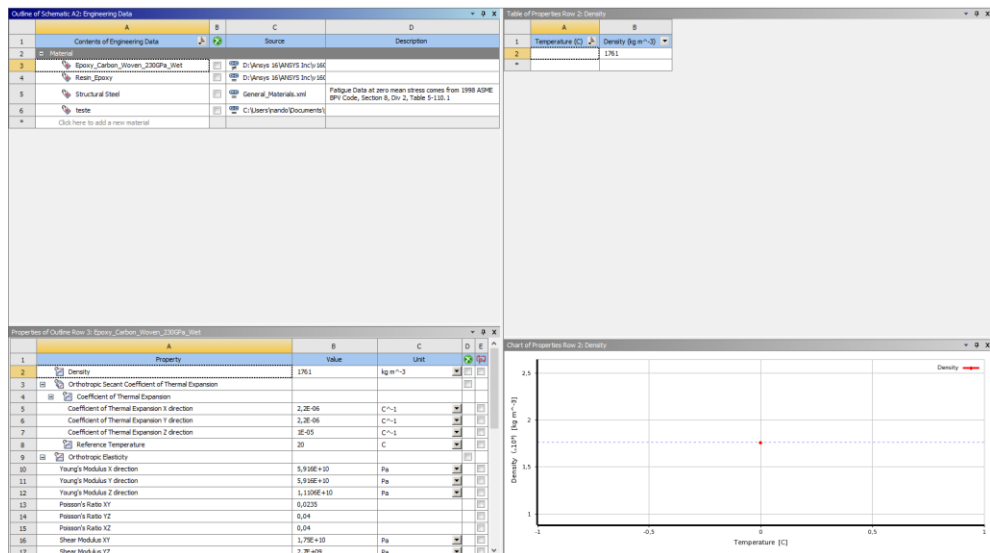


Figura 72 - Engineering Data no ACP

Após criar o material personalizado para utilização na simulação, no submenu Geometry, deve-se criar a geometria de acordo com a simulação. É possível fazer a geometria no modelador do próprio Ansys, como também é possível criar em um outro Software de CAD e importar como sólido. No exemplo da Figura 73, foi um provete como já referido anteriormente:

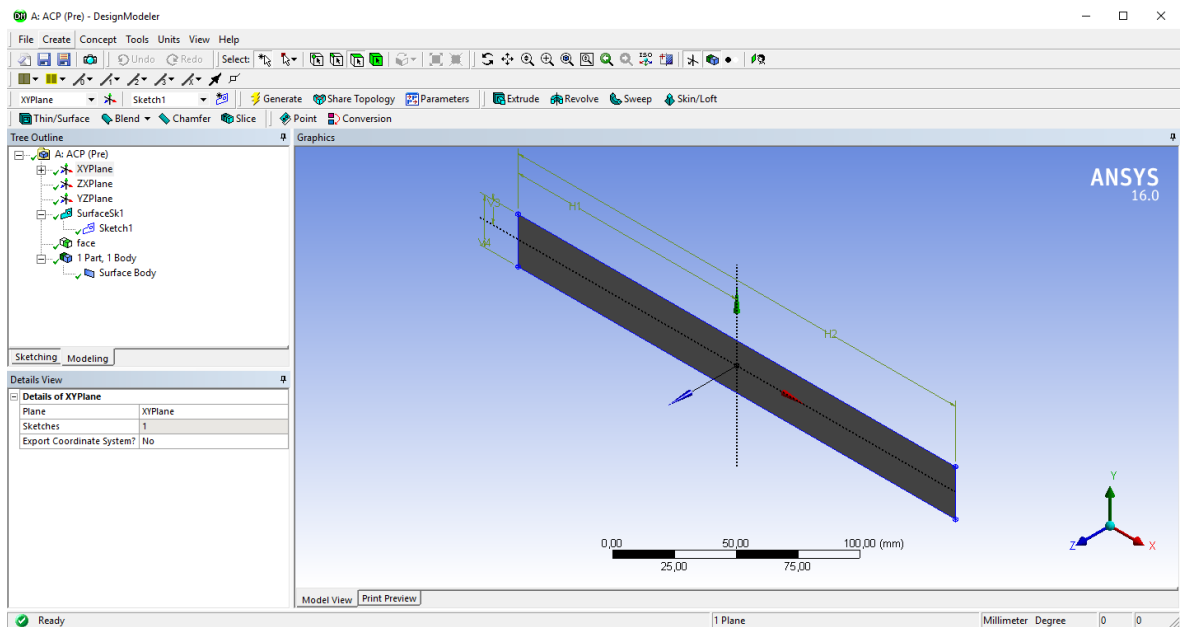


Figura 73 - Modelador de Geometria do Ansys

Após criar a geometria, faz-se o update para o submenu Model (Figura 74), onde a geometria aplicada vai receber a malha de elementos finitos, podendo regular o tamanho do elemento usado, dar nome a partes importantes em relação a geometria.

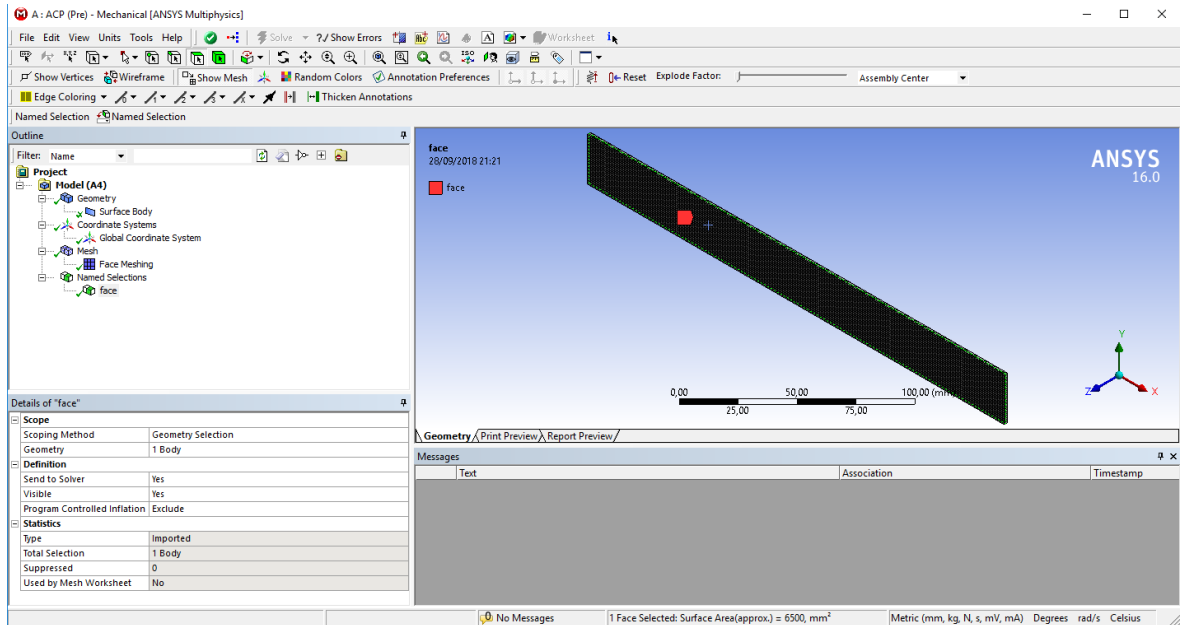


Figura 74 - Submenu Model do Ansys ACP

Após a criação da malha, no submenu Setup (Figura 75), é a parte mais importante do modulo, pois é onde se define o empilhamento utilizado, seguindo uma sequência obrigatória, para conseguir dar a real cara para o material.

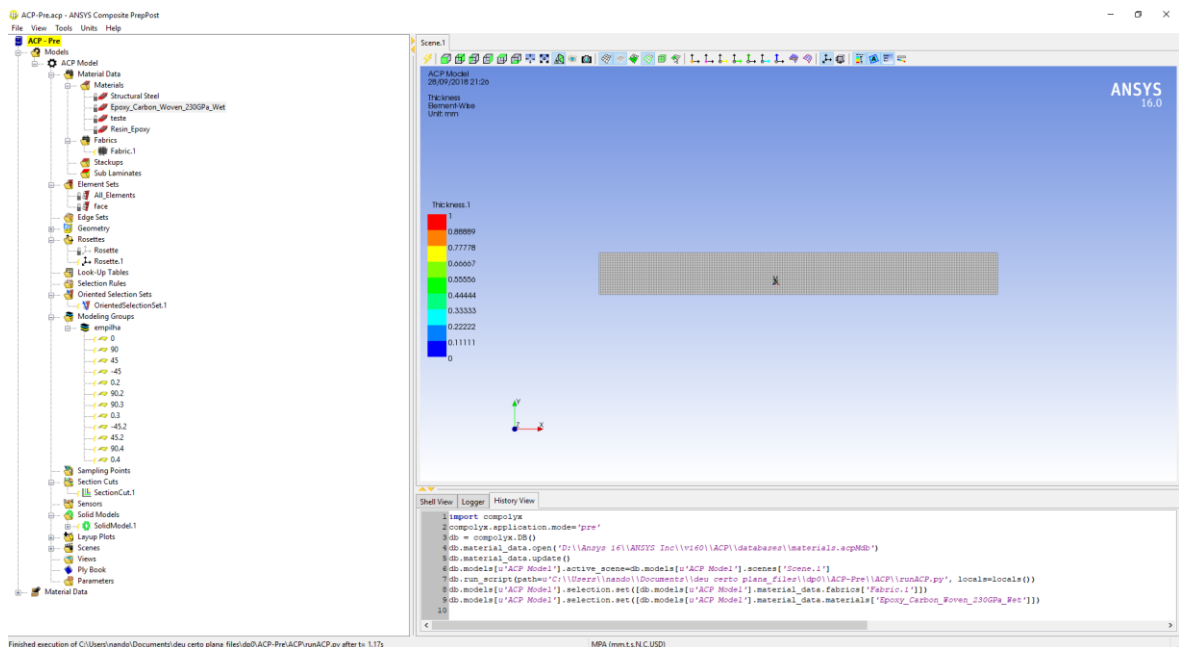


Figura 75 - Submenu Setup do Ansys ACP

A sequência que deve ser seguida é a seguinte:

- (1) Criar “fabric”, é onde se cria a lamina e escolhe o material a ser utilizado e a espessura da camada.

- (2) Criar uma Roseta em sua geometria, para que tenha uma referência dentro do sólido, na parte da angulação e orientação das camadas.
- (3) Criar “*Oriented selection set*” é onde se escolhe a geometria que vai receber o empilhamento.
- (4) Criar “*Modeling Group*”. É a parte do software onde realmente se cria as camadas e define o empilhamento. Para cada camada, deve-se escolher o material utilizado e a orientação segundo a roseta criada no item 2.
- (5) Criar um corte de secção transversal para poder realmente entender e visualizar as camadas criadas.
- (6) Criar um “*Solid Model*” é onde se cria um sólido e se escolhe a resina utilizada na produção do provete.

Após o submenu Setup, a caracterização do material está completa e para cada ensaio, deve-se criar a análise que cada simulação numérica, de acordo com o interesse do projeto, como por exemplo: determinar os constrangimentos de deslocamentos da geometria, o esforço aplicado, o tipo de resultado desejado e etc. No caso deste estudo, foram criadas situações para ensaios de tração simplificados e também ensaios de flexão simplificado. Como a velocidade de ensaio experimental é baixa, uma simulação estática Figura 76 pode ser considerada como fiel ao ensaio experimental e foi utilizada como fonte de comparação no Capítulo 1207.4

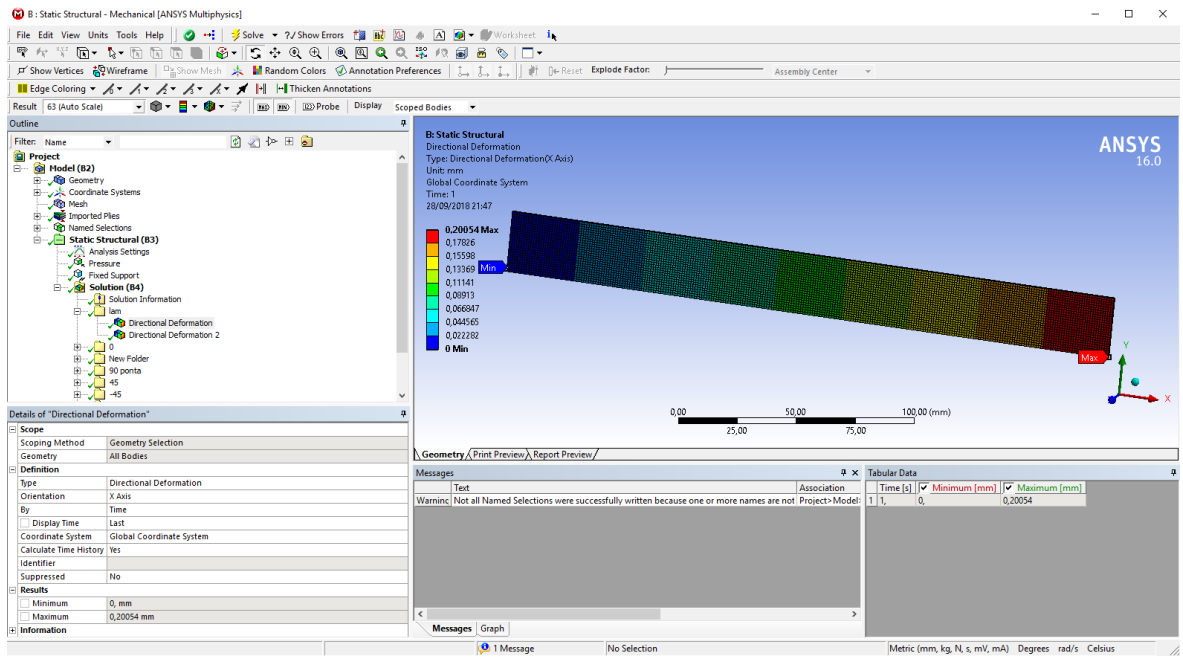


Figura 76 - Simulação estática do Ansys

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

7. Resultados

Este capítulo apresenta a análise e discussão de resultados realizada no âmbito deste projeto. Serão comparados os resultados teóricos, experimentais e também de simulação numérica.

No que diz respeito aos resultados teóricos, foram utilizadas formulações simplificadas como já expostas anteriormente para cálculo de propriedades mecânicas dos laminados, com o recurso da lei das misturas, estado plano de tensões segundo *Beer-Johnston* entre outros.

Qualquer componente deve apresentar uma geometria adequada e definida para resistir às ações (forças existentes, como peso próprio, ação do vento, etc.) impostas sobre eles. Se o material não resistir às ações e romper, diz-se que ele atingiu um estado limite último, no caso, por ruptura. Se os componentes apresentarem deslocamentos ou deformações excessivas, diz-se que a estrutura atingiu um estado limite de utilização.

As propriedades foram calculadas de acordo com as referências já citadas, são de importância geral e devem ser utilizados como parâmetros de comparação.

7.1 Cálculos Analíticos

Para poder validar e comparar com os ensaios experimentais e também com as simulações numéricas, os cálculos analíticos foram executados para poder prever o comportamento do material e julgar se tanto os ensaios, quanto as simulações numéricas estão bem feitas.

7.1.1 Cálculos analíticos em tração para todos os provetes

Para esta metodologia, foi feita uma análise da geometria, provete a provete para se entender o comportamento mecânico mais próximo do real, e no caso dos ensaios de tração, a metodologia utilizada, é a metodologia apresentada no capítulo 6.

$$\delta = \int_0^L \frac{P \cdot dx}{A \cdot E_{xy}} \quad (32)$$

Sendo:

δ = deformação no eixo longitudinal

P = Força aplicada em Newton

A = Área da secção transversal do provete (25x1.8mm)

E_x = Modulo de Elasticidade Longitudinal do Laminado no plano XY em MPa

L = Comprimento do provete (250mm)

Para facilitar a visualização (Figura 77 - Gráfico de comparação aos resultados analíticos em tração), a comparação foi feita com uma variação de 0 a 2000 N aplicados nas diferentes geometrias:

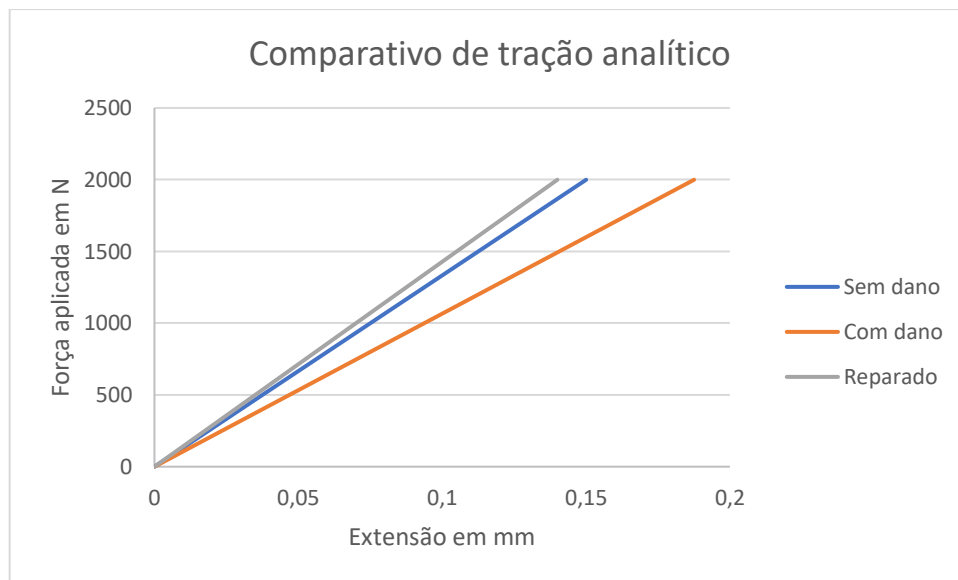


Figura 77 - Gráfico de comparação aos resultados analíticos em tração

7.1.2 Cálculos analíticos em flexão para todos os provetes

Também para cada uma das geometrias (sem dano, com dano e reparado) foi feita uma análise pela geometria de cada um, e uma estimativa da flecha foi feita. A metodologia de cálculo para os provetes em flexão pode ser vista no subcapítulo 3.1, na multiplicação de matrizes seguidas.

Para se determinar analiticamente, foram utilizadas as equações 32 e 33 como base, e podemos chegar a uma simplificação da flecha máxima obtida no provete de acordo com a manipulação adequada das matrizes [M], [D_{ji}] e [e].

Sendo assim, a flecha máxima para um provete sem dano é variável conforme a equação 34:

$$w_o = -0.03696 \times P \quad (35)$$

Sendo P a carga aplicada em N e o valor da flecha sai já em mm.

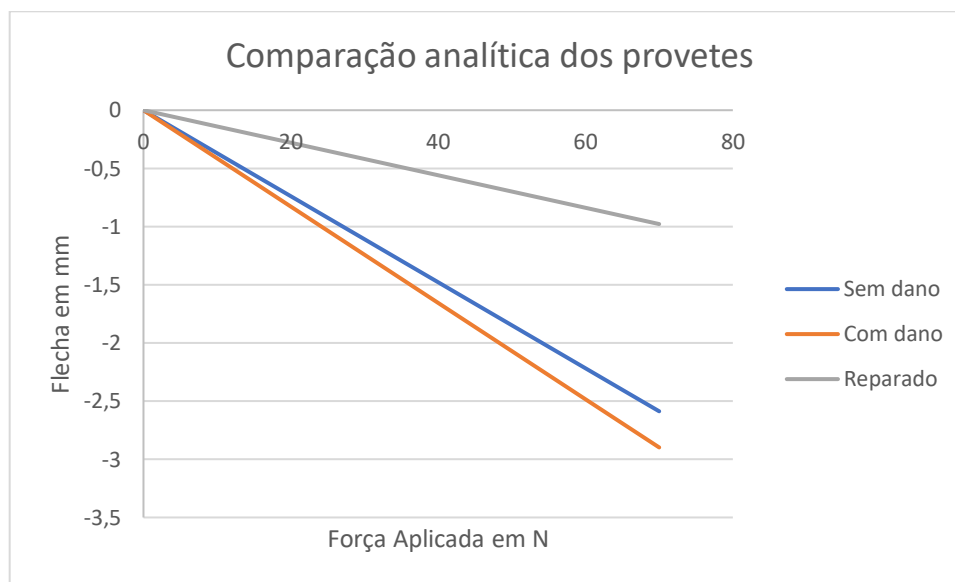


Figura 78 - Gráfico de comparação aos resultados analíticos em flexão

Na Figura 78 é possível observar que realmente o provete reparado oferece uma maior rigidez localizada à flexão do que quando comparado aos outros provetes. É nítido perceber que o dano causa um deficit na rigidez à flexão do material.

7.2 Resultados experimentais

Esta etapa do processo foi feita apenas uma recolha dos resultados dos materiais e uma comparação entre os mesmos, lembrando que todos os ensaios foram feitos na mesma metodologia,

7.2.1 Resultados experimentais em tração

O provete sem dano, foi sujeito a testes e validações no seu regime elástico, basicamente foi submetido a ensaios de tração onde a força máxima aplicada foi próxima dos 2kN (Figura 79), para poder avaliar a deformação sofrida pelo provete nessa faixa foi medido por extensómetros.

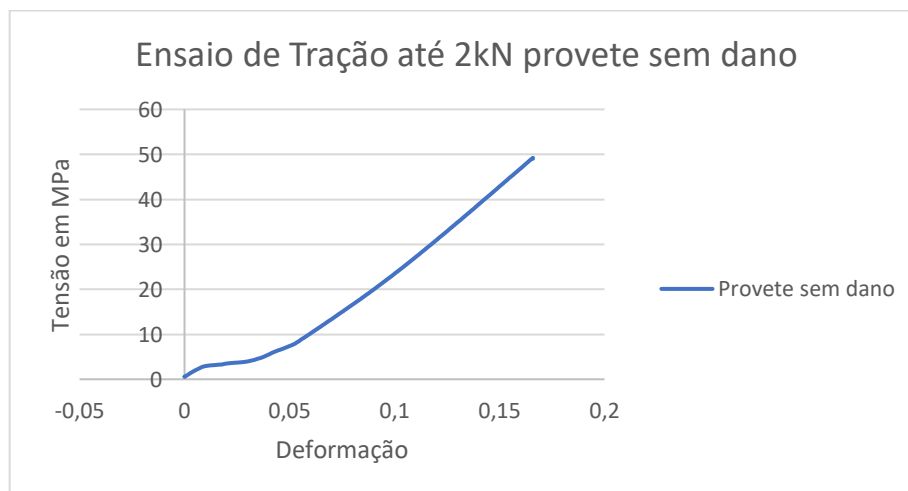


Figura 79 - Ensaio de Tração até 2 kN

Em cada provete, foram aplicados 2 extensómetros transversais entre eles, ou seja, um na direção longitudinal e outro na transversal ao eixo de orientação das fibras. Com isso, foi possível estimar o coeficiente de Poisson do material, experimentalmente.

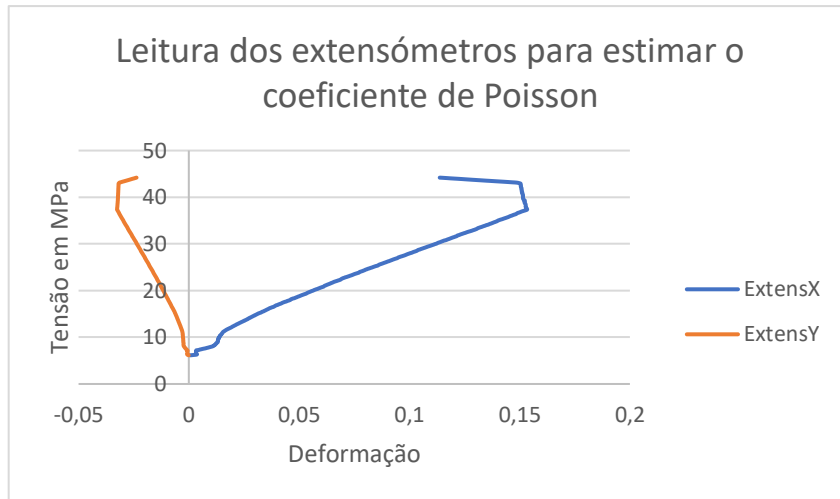


Figura 80 - Leitura dos extensómetros para estimar coeficiente de Poisson

Estimativa de cálculo do coeficiente de Poisson experimental, observando a Figura 80, utilizando a tensão de 30 MPa de referência, pode-se observar em azul a extensão no eixo longitudinal do provete e em laranja, a extensão transversal do provete, e o coeficiente de Poisson nada mais é do que a relação entre a deformação transversal pela longitudinal:

$$\nu = \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} = \frac{-0,02359}{0,11189} = 0,21083 \quad (36)$$

Nota-se que experimentalmente, o coeficiente de Poisson calculado (aproximadamente 0,20) é um pouco divergente do experimental. Para ser mais preciso o coeficiente adquirido em ensaios foi de aproximadamente 0,210.

Os ensaios de tração foram realizados em duas máquinas diferentes, pois era possível notar o escorregamento do material quando apertados pelas amarras da Máquina presente no laboratório de materiais (Zwick Z100). E em uma outra máquina (Instron 3369), presente na empresa Polypack localizada em São Paulo no Brasil, notou-se uma melhor aderência das amarras ao provete. E o resultado pode ser observado a seguir:

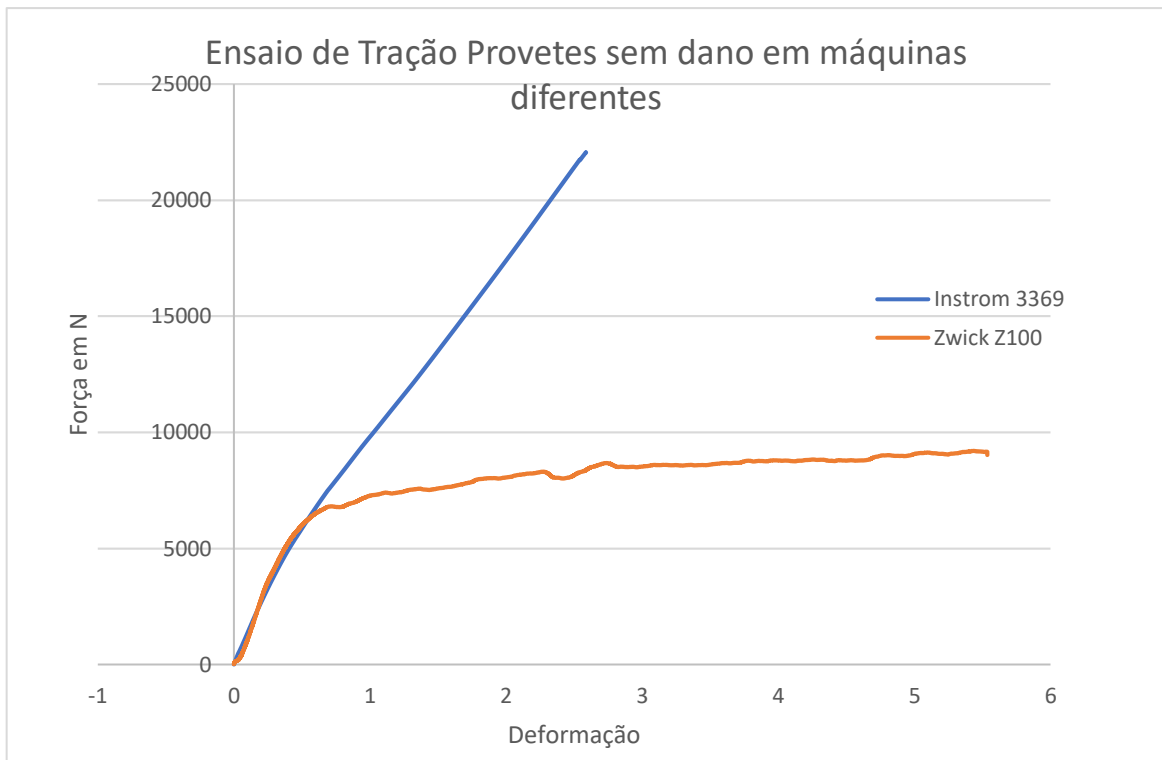


Figura 81 – Ensaio de tração

É possível observar neste gráfico (Figura 81) também, que o material mantém o mesmo comportamento até uma determinada carga aplicada (aproximadamente 6000 a 6500 N, no gráfico, próximo dos 150 MPa. Após essa carga, nota-se o escorregamento das amarras ao provete e não são obtidos resultados significativos após esta carga na Zwick (cor laranja) e não foram utilizados para análise do comportamento do material.

Nota-se que este ensaio de tração realizado na Máquina Instrom 3369, foi feito até a tensão de cedência do material e a força máxima admissível neste provete foi de 22056,4 N com uma tensão de cedência de 482.4 MPa

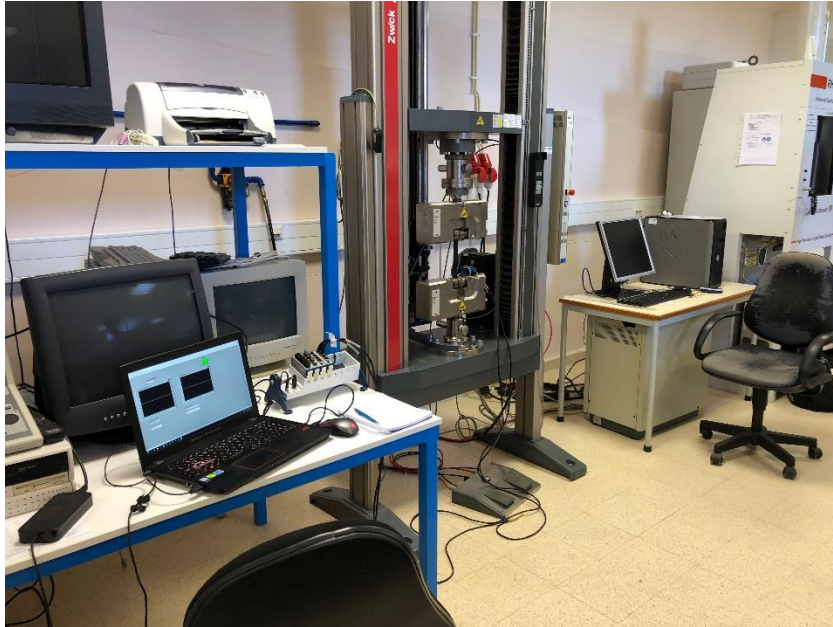


Figura 82 - Imagem ilustrativa dos ensaios com provetes sem dano, sendo acompanhados pela leitura de extensómetros

Na Figura 82 é possível observar a máquina de ensaio de tração, uma placa de captura da National Instruments e também é possível visualizar no ecrã do computador, a programação em *Labview* em funcionamento durante um dos ensaios e a falha comum a todos os provetes testados foram semelhantes à da Figura 83 - Fratura no provete sem dano.



Figura 83 - Fratura no provete sem dano

Apenas um dos provetes testados teve um tipo de fratura diferenciada, onde a rotura do provete não foi localizada no centro do mesmo, mas este tipo de falha, conforme a bibliografia, também é aceite, a falha em si, foi localizada nos extremos dos provetes, perto das amarras, e está identificado na Figura 84:



Figura 84 - Figura ilustrativa da fratura diferenciada

Para o provete com dano, não foram utilizados extensómetros, pois o comportamento do material já havia sido adquirido nos provetes sem dano.

O dano produzido no provete, segue de perto o procedimento utilizado por *E.V. Iarve, T. Breitzman, E.R. Ripberger* [63] que indica que uma boa forma de avaliar um dano num material, é reduzir de 5 a 20 % da sua secção transversal. Desta forma, o dano escolhido foi fazer um furo central no provete, de 5mm de diâmetro, para poder avaliar o comportamento do material e também utilizar como base para a aplicação de uma reparação futura.

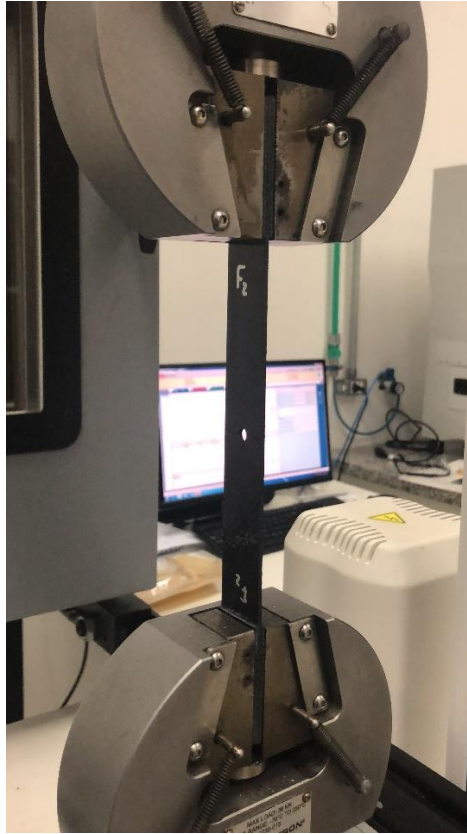


Figura 85 - Ilustração do ensaio de tração realizado no provete com furo

Com base nestes ensaios realizados com o provete danificado (Figura 85) , os seguintes resultados foram obtidos, lembrando que, apenas foi caracterizado o comportamento do material no regime elástico, tendo os ensaios sido realizados até uma carga máxima de aproximadamente 2kN (Figura 86 - Ensaio de tração no regime Elástico) . Também foram realizados ensaios até o rotura do material (Figura 88).

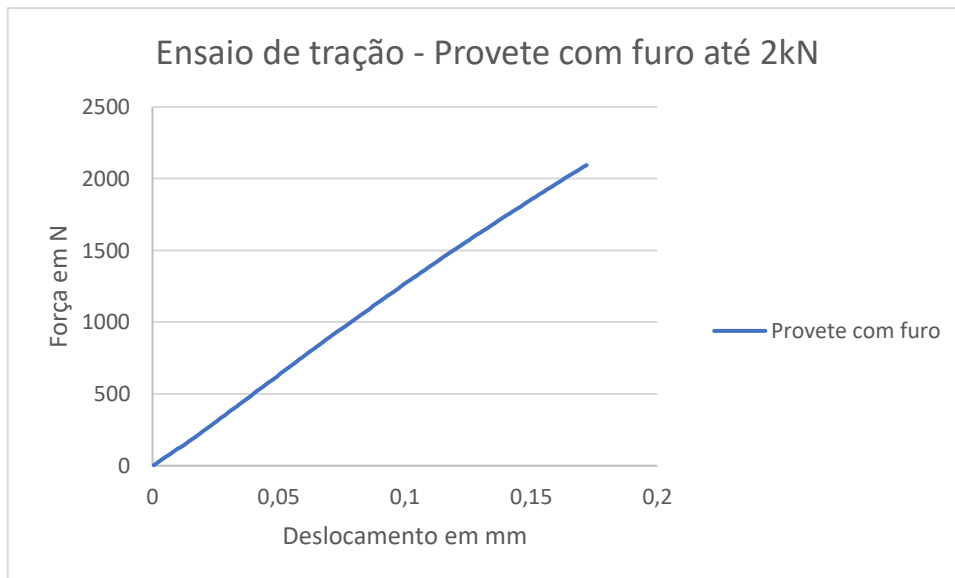


Figura 86 - Ensaio de tração no regime Elástico

Foi feito um ensaio de tração Figura 87 até a rotura do material, com uma força máxima atuante no provete de 12052,72 N e por ter uma área de concentração de tensão, é normal que as tensões atuantes sejam mais elevadas.

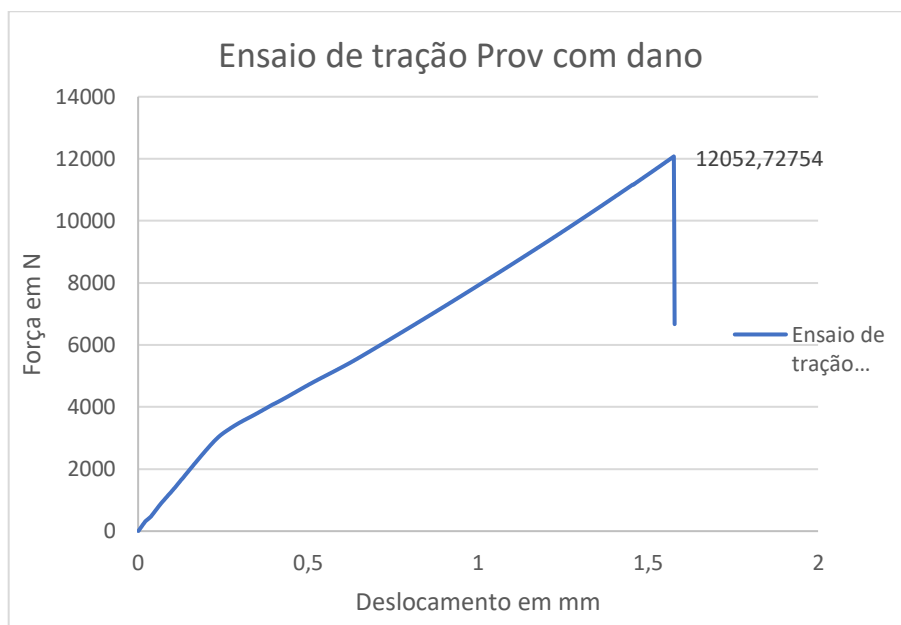


Figura 87 - Ensaio de tração até a rotura do material

Apenas para título de curiosidade, a Figura 88 representa o tipo de falha que ocorreu durante o carregamento para a validar a sua tensão de cedência, ou no caso, de rotura:



Figura 88 - Tipo de falha do material quando submetido até a rotura

A reparação do dano provocado anteriormente, é dada pela reparação do modo *Double Lap* que consiste na adição de duas placas do mesmo empilhamento que foram unidas ao provete com a simulação de dano (com o furo de 5mm) com o adesivo estrutural já citado no corpo do trabalho 3M DP8805NS e o objetivo é entender o efeito da reparação em si nos ensaios, sabendo que existe uma maior rigidez localizada (Figura 89), e qual é o principal impacto em termos de estrutura.

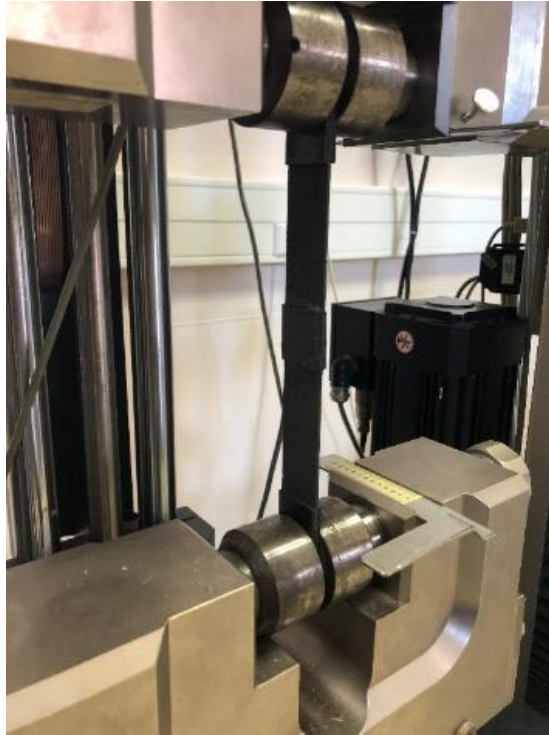


Figura 89 - Provete reparado em ensaio de tração

Uma grande curiosidade do trabalho, é em relação ao comportamento do material reparado, e assim como no ensaio de tração Figura 90 com o provete inteiro, houve uma pequena deceção em relação aos resultados, quando a força aplicada ultrapassa os 6kN, é possível notar o escorregamento das amarras no provete, e os resultados obtidos além deste valor podem não representar de maneira verídica o comportamento do material.

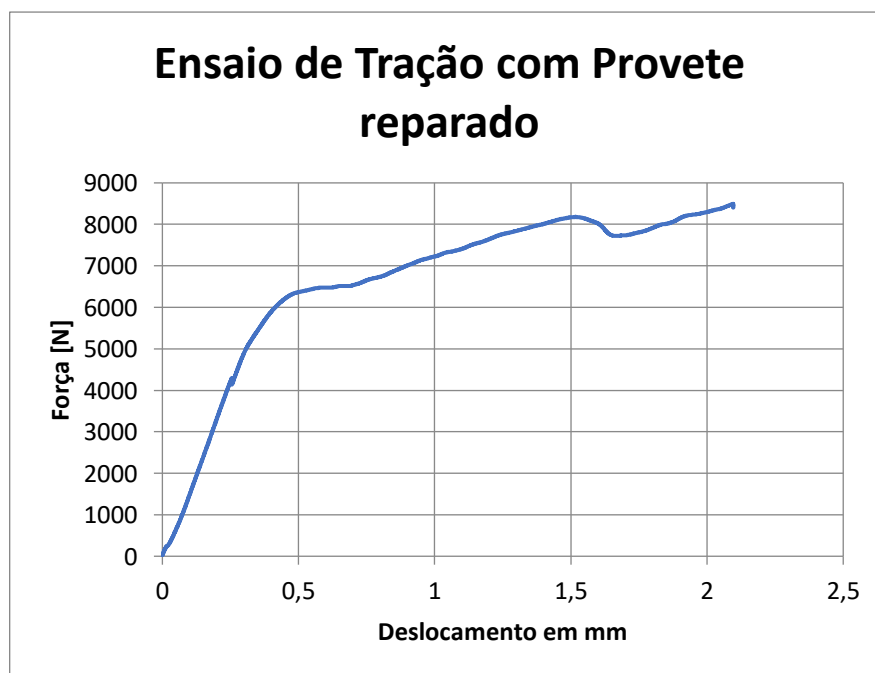


Figura 90 - Ensaio de tração com o provete reparado

Como é possível observar na Figura 91, como é de se esperar, o material inteiro sem dano tem um comportamento intermediário em relação ao provete danificado e também em relação ao provete reparado. De certa forma, a inclinação da parte inicial do gráfico pode muito bem demonstrar o efeito de cada uma das alterações impostas pelo trabalho.

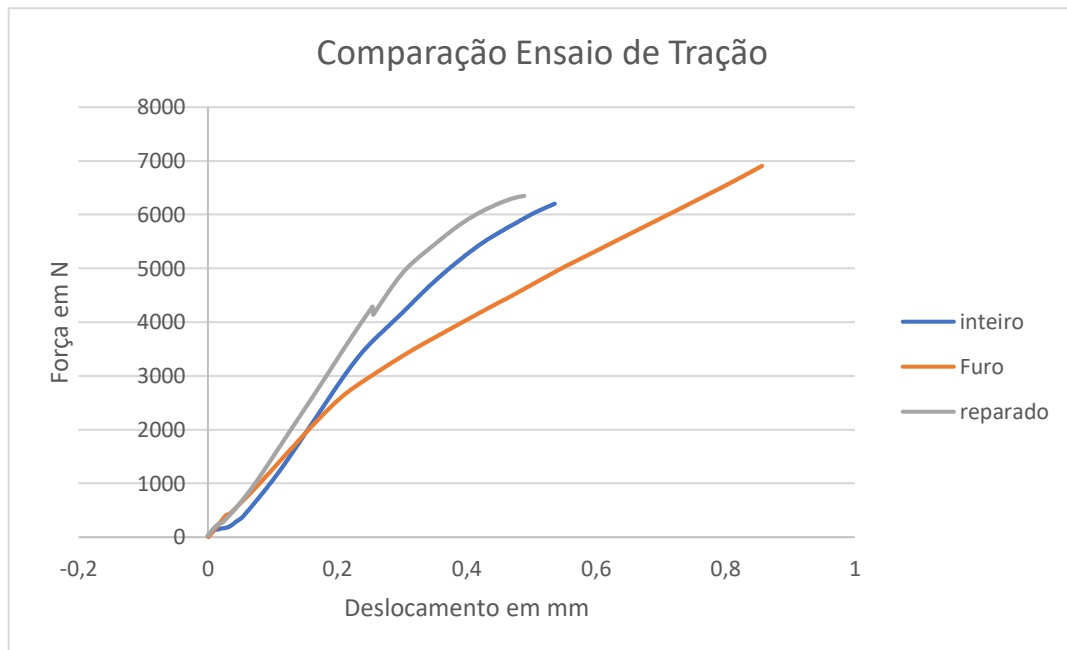


Figura 91 - Comparativo de ensaio de traçãO em regime elástico

É possível observar no gráfico acima, é possível reparar a diferença entre as condições de provete. E para ter noçãO numérica do módulo de elasticidade, o quanto foi afetado pelas alterações nos provetes pode ser observado na Figura 92.

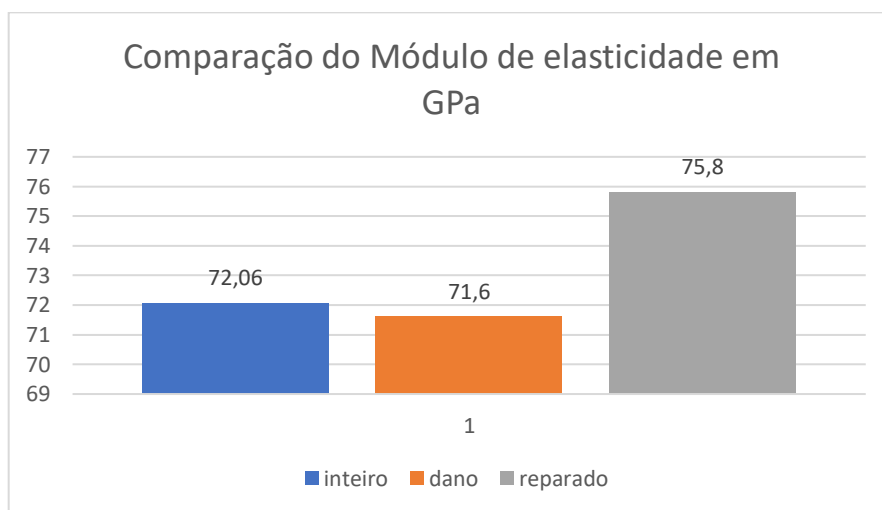


Figura 92 - Comparativo do Módulo de Elasticidade

Nesta figura é bastante intuitiva em relação à leituras das consequências das variações dos provetes ensaiados, como é de se esperar, o provete com dano, diminui seu

módulo de elasticidade quando comparado ao material sem dano, e a reparação realizada, pode-se levar a crer, que para este tipo de carregamento, o módulo de elasticidade eleva consideravelmente, ou seja, não só recuperou as propriedades mecânicas que foram perdidas com o dano, como ainda melhoraram as propriedades mecânicas quando comparado ao material sem dano.

7.2.2 Resultados experimentais em flexão

Os testes de flexão são de extrema importância para o tipo de reparação escolhida para este trabalho, pois a geometria de reparação apresenta uma maior tendência a ter uma maior rigidez estrutural quando o corpo de prova é submetido à flexão. Pois como a reparação é feita com adição do material nas superfícies, para cobrirem o dano e mais uma área de contato, o momento de inércia localizado na reparação é maior. Esta adição de material foi realizada de forma manual, com possíveis falhas na sua realização.

Para fazer a validação dos dados, o ensaio experimental foi feito, e repetido. O primeiro provete foi levado até a fratura e os outros provetes, foram testados apenas para entender o comportamento elástico do material.

Seguindo a mesma metodologia apresentada no subcapítulo dos ensaios de tração, o primeiro ensaio a ser mostrado nos resultados experimentais, será o ensaio de flexão com o provete sem dano, conforme Figura 93.

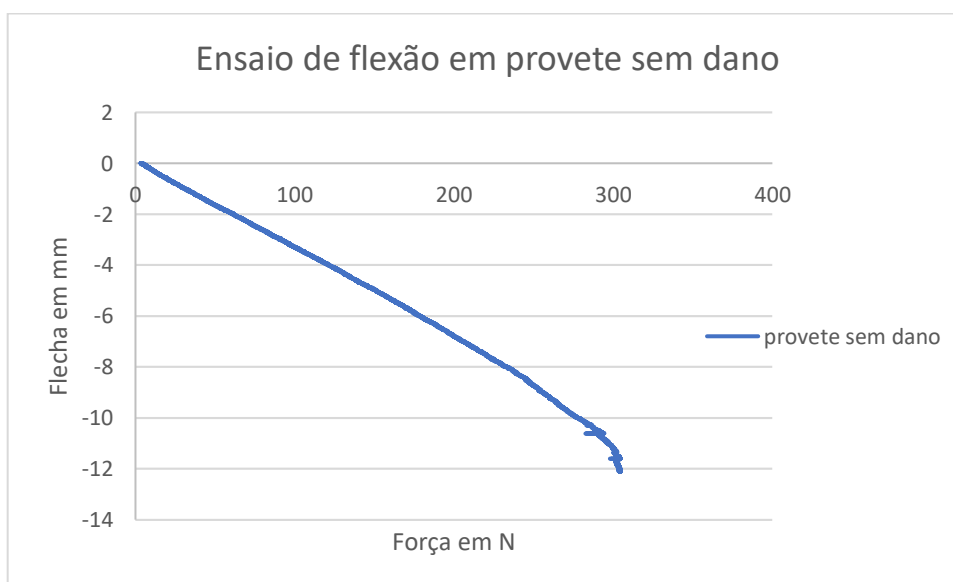


Figura 93 – Ensaio de flexão em provete sem dano

Para dar continuidade ao trabalho executado, seguindo uma mesma linha de raciocínio, o estudo agora tem como objetivo entender e explorar o comportamento mecânico do provete com dano em flexão. Para a validação experimental, o gráfico abaixo é resultante de uma média dos ensaios realizados, e são diretamente extraídos da máquina de ensaio. O resultado do teste é o observado na Figura 94:

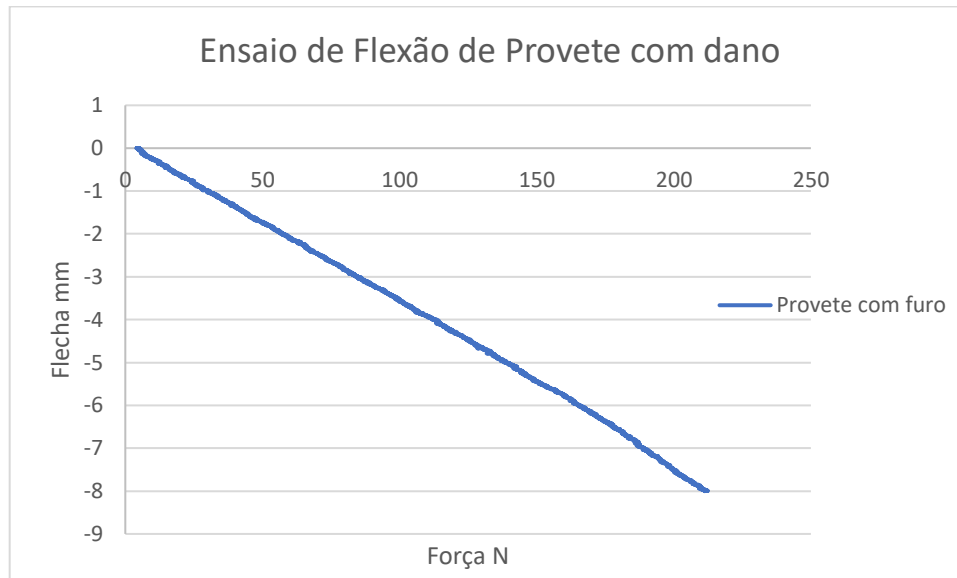


Figura 94 - Ensaio de flexão com provete danificado

Por uma análise simplista do gráfico acima, é possível observar que para os mesmos 70N aplicados na máquina de ensaio experimental, notou-se uma pequena diferença em flecha do provete, ficando em aproximadamente -2,379 mm. A previsão analítica ficou bastante próxima do resultado experimental, que foi de -2.25 mm

Para o provete reparado o ensaio foi levado pelas mesmas condições de ensaio dos provetes sem dano e com dano, porém, com o detalhe da secção transversal do local de aplicação das forças ser maior. Foram realizados 3 ensaios experimentais em tal situação, sendo o primeiro até a fratura Figura 95 , e os outros dois consequentes até uma região segura de efeito da deformação elástica, para tentar entender a modificação estrutural proposta.



Figura 95 - Ensaio de flexão com provete reparado até a fratura

Também para referência, levou-se em consideração um desmembramento do provete por partes, uma parte onde a secção transversal é apenas a do provete, e uma segunda parte onde leva-se em consideração a adição do adesivo e também das duas camadas da reparação do provete, com isso, o resultado do ensaio pode ser observado na Figura 96:

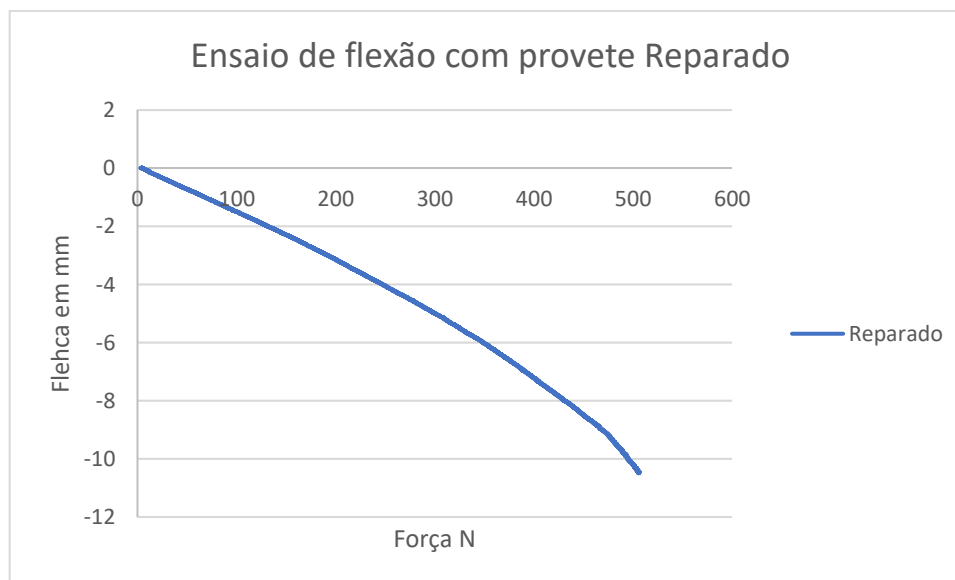


Figura 96 - Ensaio experimental do provete reparado

Para ter uma comparação completa dos provetes, utilizando o mesmo gráfico, fica bastante intuitivo perceber o comportamento de cada um nos ensaios.

É possível observar que o provete reparado adiciona uma resistência localizada a flexão onde potencializa a rigidez e resistência mecânica. A Figura 97 também mostra que, apesar do carregamento vertical ter acontecido mesmo em cima do dano causado no provete,

de certa forma apresenta um comportamento elástico muito parecido, e claramente nota-se que o fator de concentração de tensão localizado no furo diminui a resistência mecânica do mesmo à flexão, e se rompe com pelo menos 100N a menos de carga suportada.

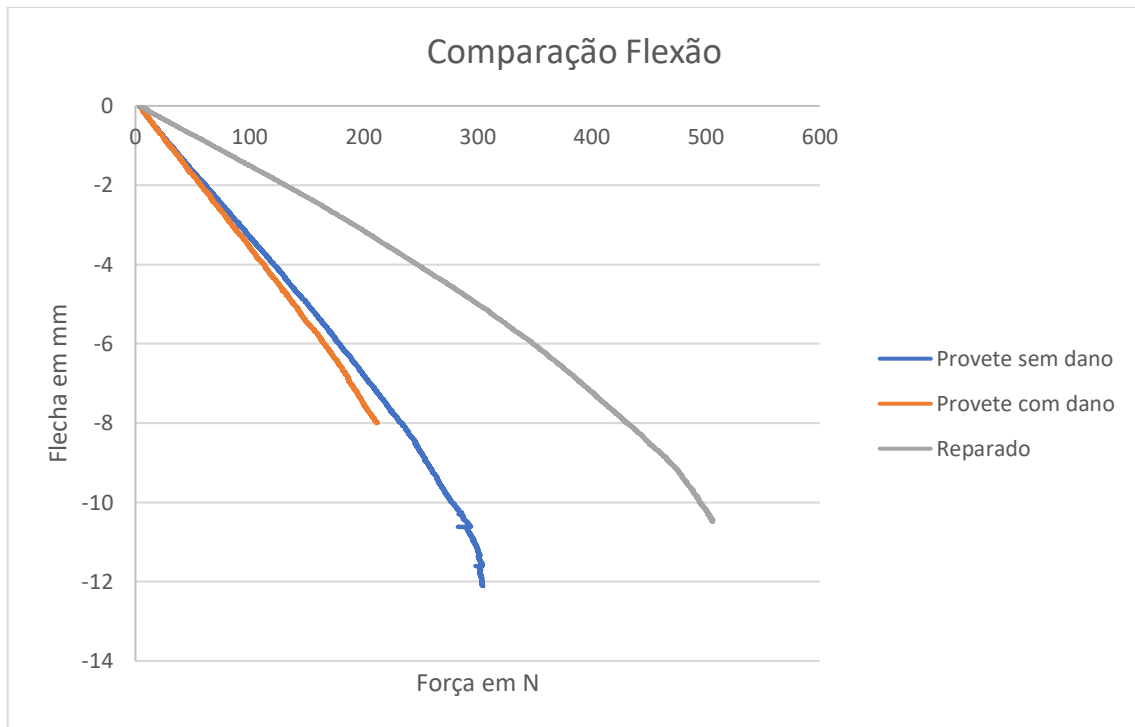


Figura 97 - Comparativo experimental dos provetes em flexão

Já em relação à reparação, é de se esperar um comportamento mecânico muito superior ao provete original, já que, além da reparação do dano provocado, houve uma adição de material e diretamente foi capaz de suprir as propriedades mecânicas e inclusive melhorá-las de certa forma. A utilização do adesivo é uma das metodologias de reparo e podemos observar pelo gráfico, a estrutura colada não foi comprometida em momento algum, tanto que, no ensaio destrutivo, assim como já é de se esperar, a falha foi no provete, nas extremidades da camada da reparação, devido ao alto teor de concentração de tensão acumulado nesta região, conforme a Figura 98 demonstra:



Figura 98 - Falha do material às beiras da reparação

Com isso, o resultado experimental da resistência a flexão do material pode ser observado pela Figura 99 :

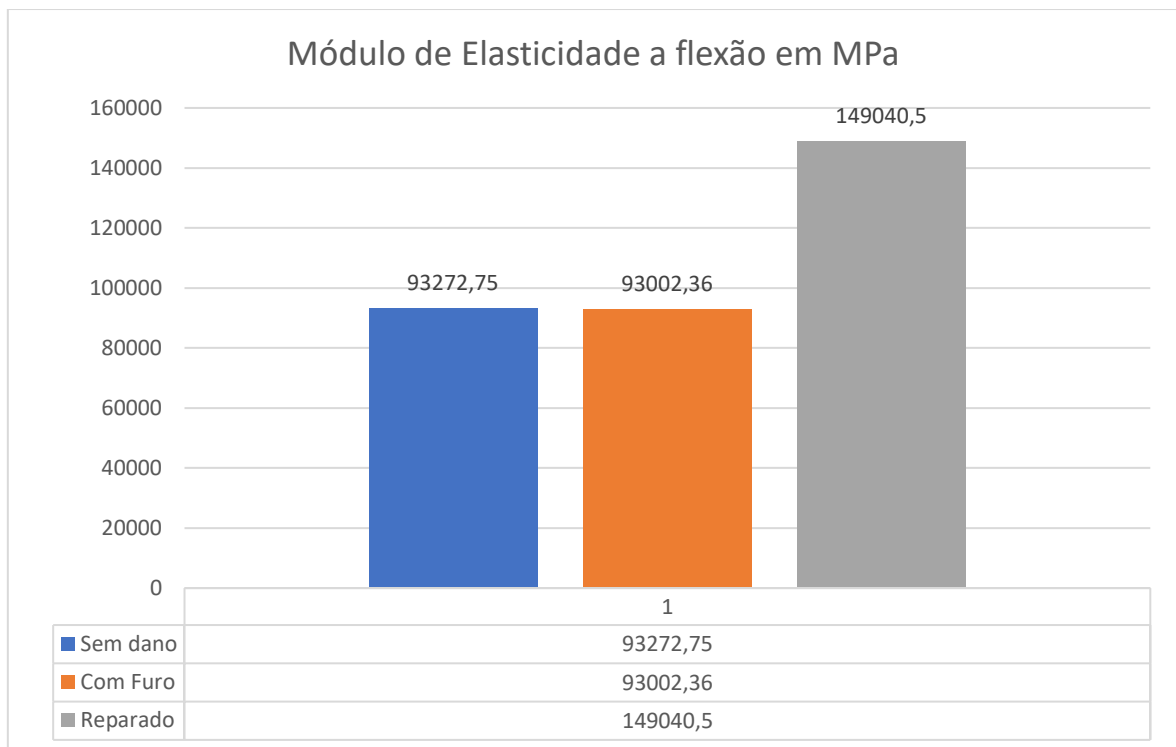


Figura 99 - Comparativo do Módulo de Elasticidade à flexão

7.3 Resultados em Simulação numérica

Com os resultados obtidos através de cálculos teóricos de algumas propriedades mecânicas, partindo dos dados fornecidos pelos fabricantes, foi possível criar a combinação de Fibra de carbono e resina epóxi utilizada nos ensaios. Os valores utilizados para dar os inputs necessários, são os valores das propriedades calculadas no plano LT, que podem ser observadas no capítulo 3 e utilizar a metodologia descrita no subcapítulo 3 do capítulo 6. a simulação numérica computacional vem no módulo ACP do software Ansys Workbench, designado exclusivamente para o estudo de materiais compósitos.

7.3.1 Resultados dos provetes em tração

A metodologia utilizada para os ensaios de tração, são ligadas diretamente a Figura 100 que é uma configuração simplificada do ensaio de tração, onde é realizado o encastramento em uma das faces laterais dos provetes e uma pressão é aplicada à face oposta ao encastramento.

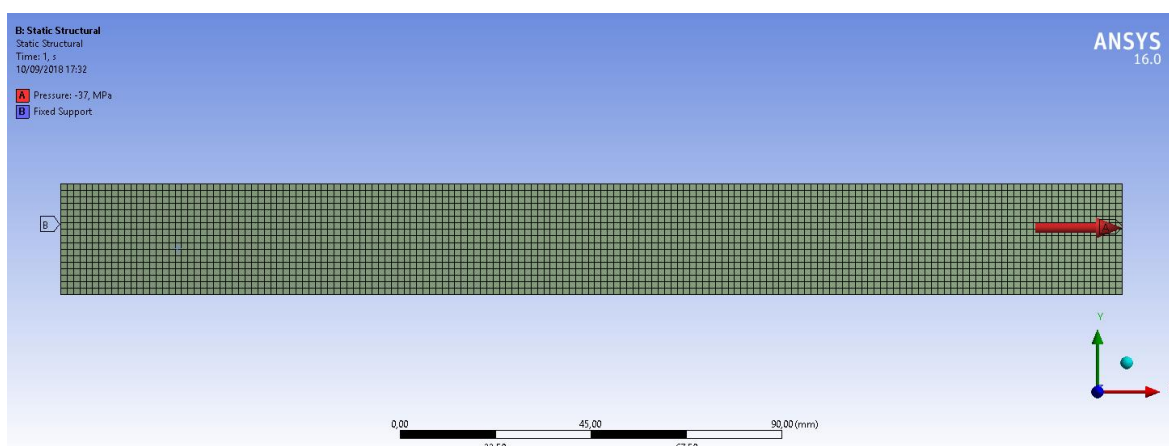


Figura 100 - Setup do carregamento do provete no Software Ansys

Para simular um ensaio de tração nas três condições de provete, as três geometrias foram criadas, cada uma com as suas características, (uma placa simples, uma placa com furo e a placa reparada) e as mesmas repetições foram executadas nas mesmas, variando as forças aplicadas entre zero e 2kN.

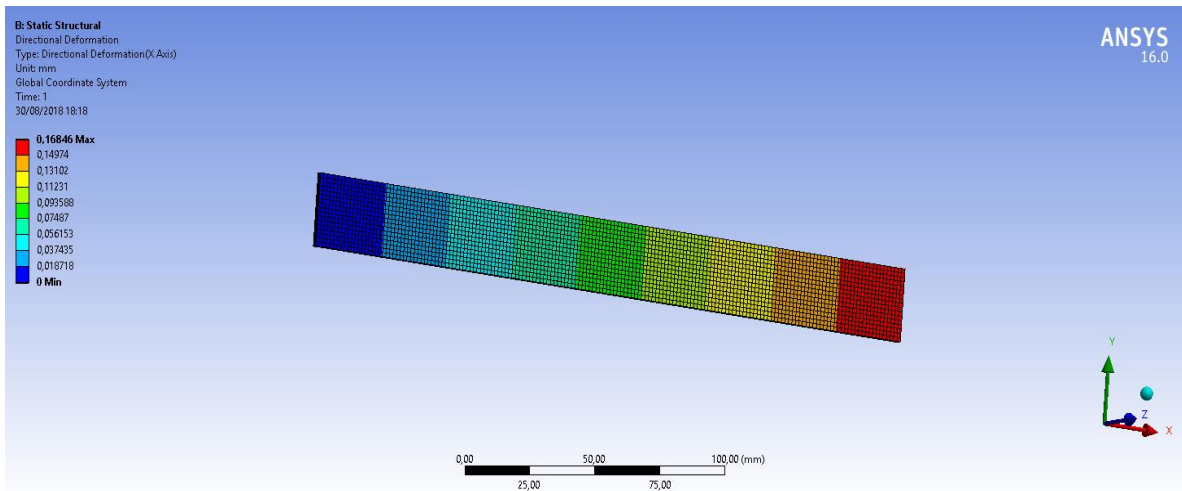


Figura 101 - Simulação numérica de um ensaio de tração simplificado

Na simulação, houve uma deformação de 0,16846 mm (Figura 101) para uma carga axial no caso, no eixo x, de 1700 N, sendo uma boa primeira impressão da proximidade dos resultados analíticos e experimentais.

Com isso, pode-se analisar as tensões atuantes por camada quando aplica-se uma força de 1700N, simulando um ensaio de tração, conforme Figura 102, assumindo que em um carregamento axial, todas as camadas sofrem a mesma deformação, incluindo a matriz, as tensões longitudinais por camada do laminado são determinadas.

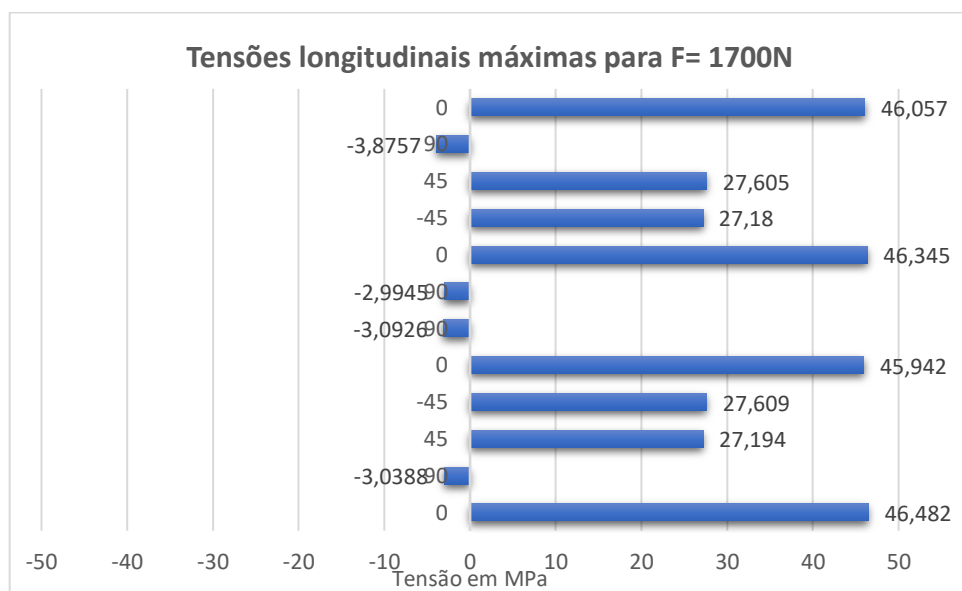


Figura 102 - Tensão Longitudinal no eixo X do laminado completo por camada

Como é possível observar e já é de certa maneira de esperar, as camadas utilizadas nos ângulos mais próximos ao longitudinal, ou seja, a zero graus, é onde o material oferece uma maior resistência, e conseqüentemente, uma maior tensão é aplicada nesta camada.

Também como é de se esperar, as camadas orientadas a 90 graus, ou seja, transversalmente ao eixo de aplicação da carga, oferecem uma menor resistência mecânica em relação à aplicação da carga.

Também foram analisadas as tensões no laminado na direção YY Figura 103, e conforme a figura x, nota-se que tiveram o comportamento inverso, ou seja, as camadas que estavam alinhadas com o carregamento XX foram as que sofreram a menor tensão YY.

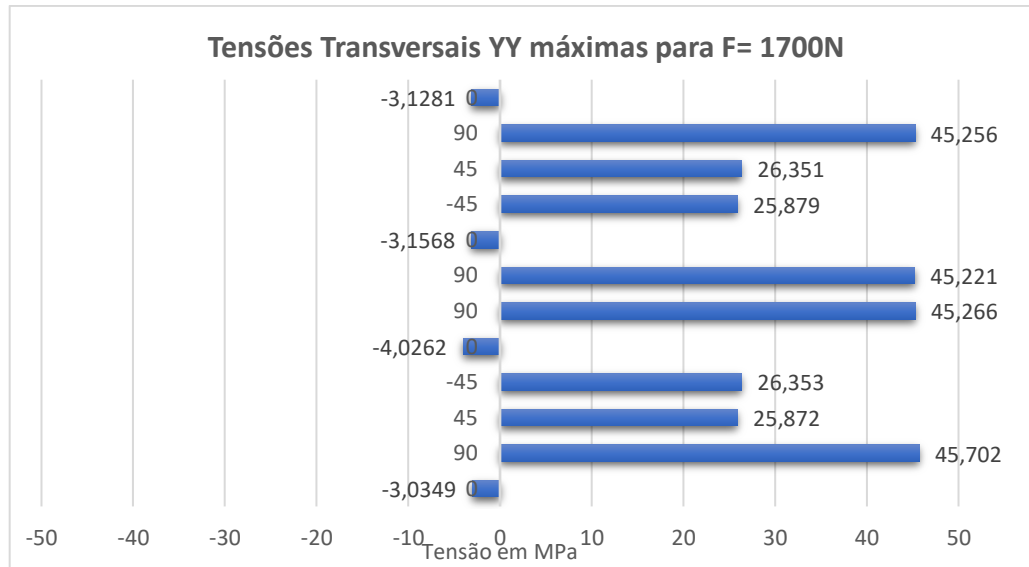


Figura 103 - Tensões na direção YY separadas por camada

Também para a força aplicada de referência (1700N) foi feita uma análise por camadas das tensões atuantes no provete com furo, e o que o furo de 5mm tem de influência na concentração de tensão, e demonstra a reação e as tensões atuantes direcionais longitudinais, em uma camada a 90 graus de orientação das fibras, como pode ser observado na Figura 104:

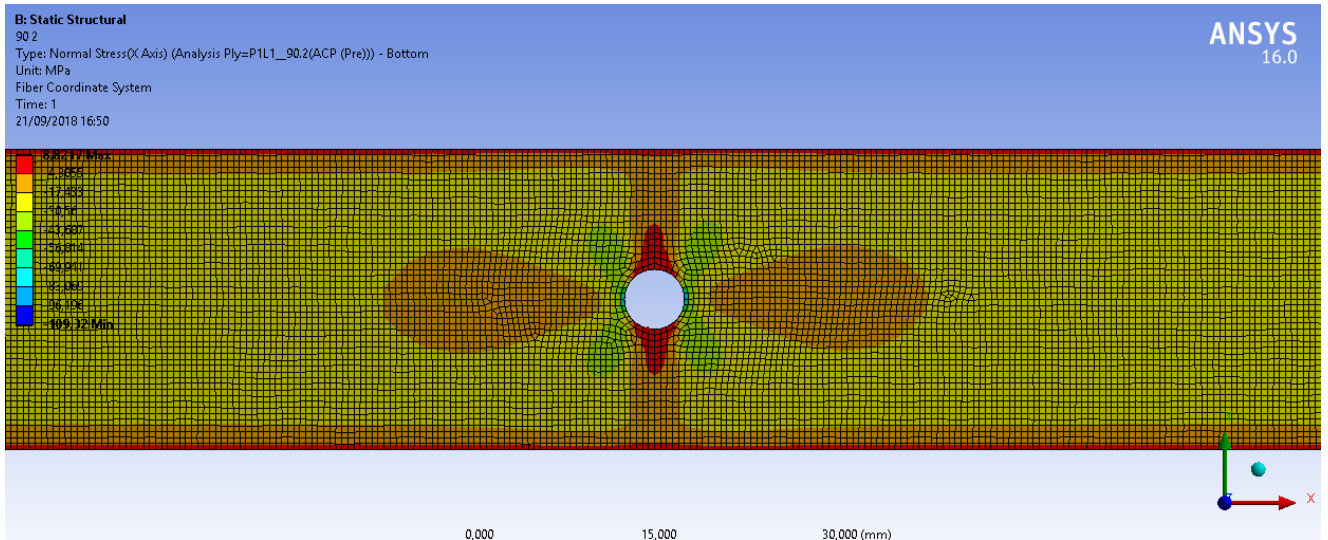


Figura 104 - Concentração de tensão em camada a 90 graus

A representação acima pode ser comparada com o oposto da mesma, ou seja, comparar com uma lamina a zero graus, também em tensão longitudinal, de acordo com a Figura 105 demonstrando as que as camadas são diferentes, mas as concentrações de tensão ao redor do furo são iguais, somente variando a sua magnitude. No caso, as laminas a zero grau demonstram um comportamento menos agressivo devido a orientação do carregamento, e não estão correndo o risco de falha.

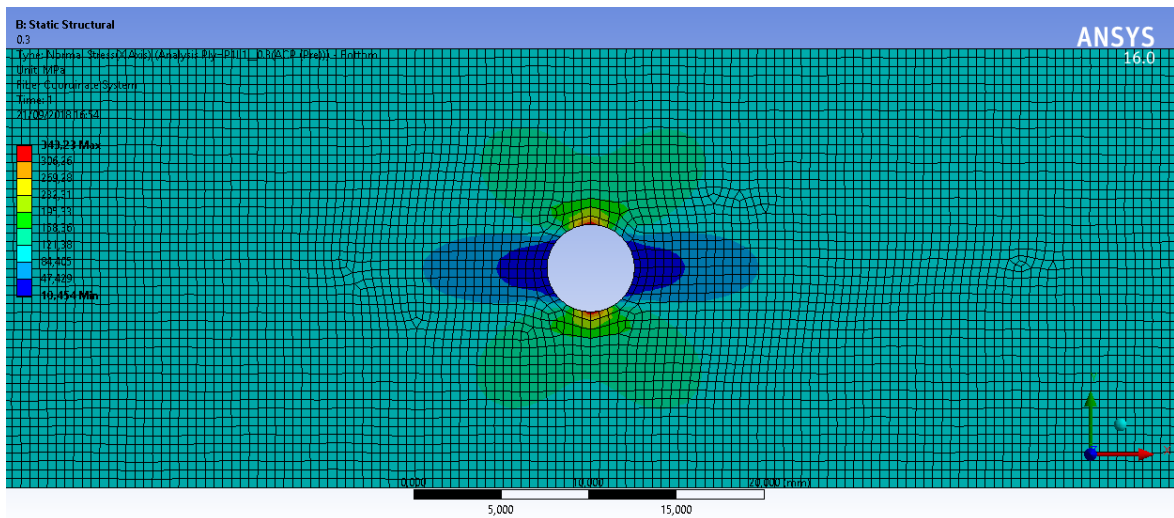


Figura 105 - Tensão atuante em lamina a zero graus

Com o estudo do comportamento do material, nas diferentes camadas, pode-se observar o efeito do furo como concentrador de tensão, e a Figura 106 demonstra na região do furo, a máxima tensão atuante na região concentrada, nas direções XX e YY.

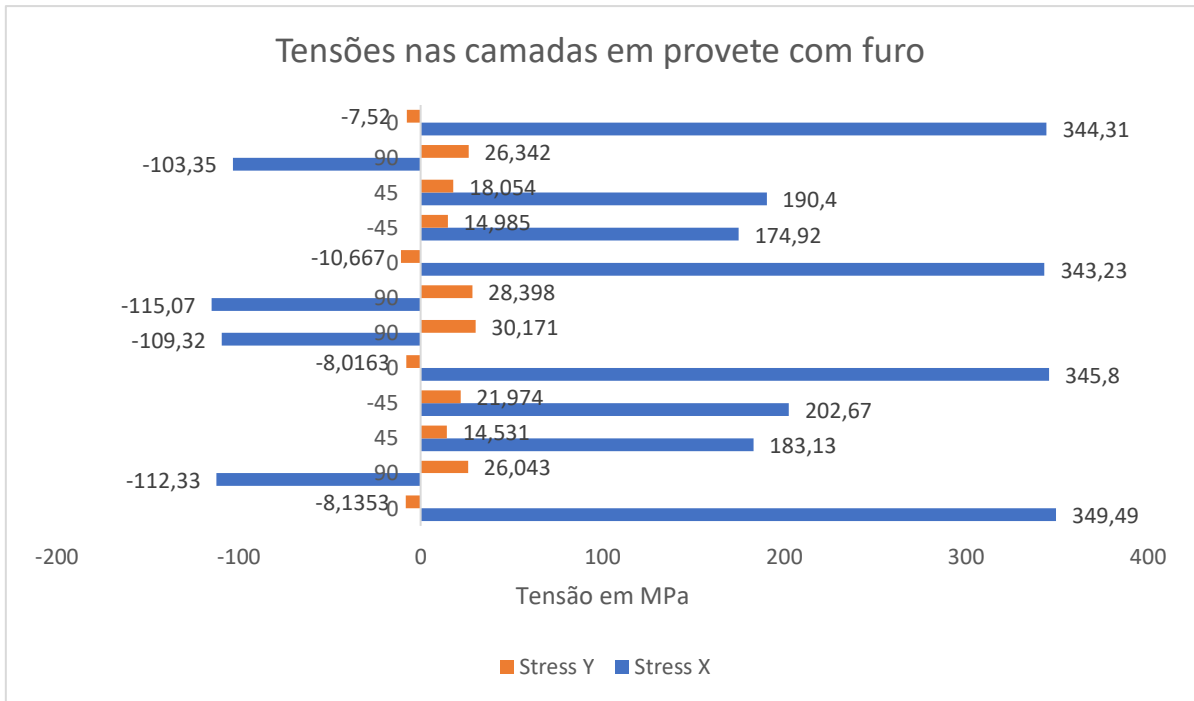


Figura 106 - Tensões máximas atuantes por camada na região do furo

Outro fator concentrador de tensão no provete, é a sua reparação. É possível observar na Figura 107 que nas proximidades da região da reparação (nas beiradas) é considerado um alto concentrador de tensão, inclusive, se analisar as tensões na região da reparação para a força aplicada de 1700 N, utilizada como referencia para todos os ensaios realizados com simulação numérica.

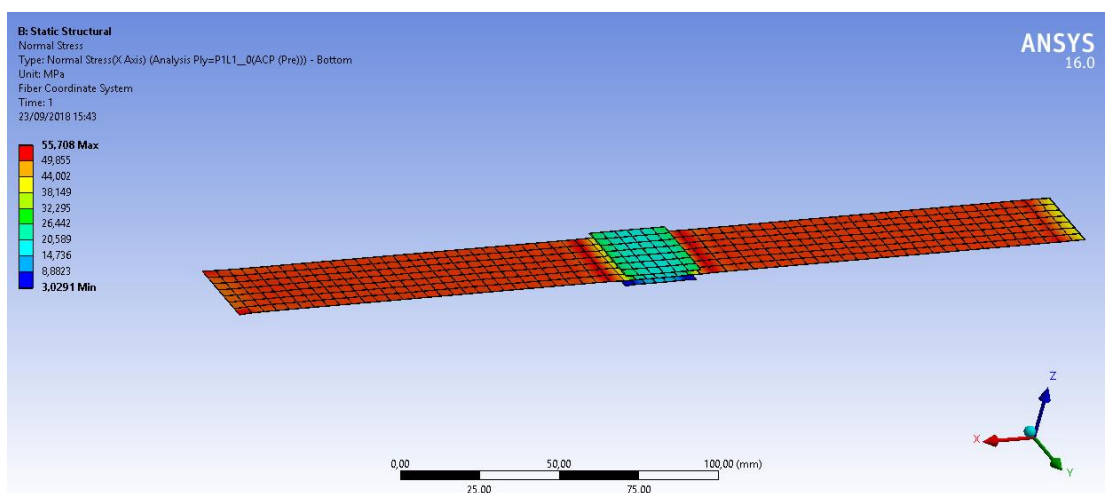


Figura 107 - Demonstração de um provete com concentrador de tensão

Também na simulação numérica é possível perceber que a região colada possui uma menor tensão atuante em si, do que em relação às suas proximidades, isso se deve ao efeito da zona de contacto, pois como já referenciado na literatura, é normal que nas extremidades

de uma junta colada, sejam localizadas as maiores tensões, por conta da tentativa de arrancamento do material, conforme Figura 108 utilizada de exemplo para uma força de tração de 1700N no provete.



Figura 108 - Tensões longitudinais na região da junta colada

Para uma análise comparativa, os três provetes foram unidos em um gráfico (Figura 109) para mostrar o efeito que cada situação de ensaio produz. Pode-se perceber, que as simulações numéricas apresentam uma coerência quando comparados aos ensaios experimentais e também ao cálculo analítico. O provete, diminui a resistência mecânica quando provocado o dano, como já é de se esperar, e sua deformação é maior para a força aplicada.

Já em relação à reparação efetuada, pode-se observar que não só reparou o dano, como ofereceu uma maior resistência mecânica ao provete, com a aplicação do adesivo e das duas camadas de sobreposição da reparação.

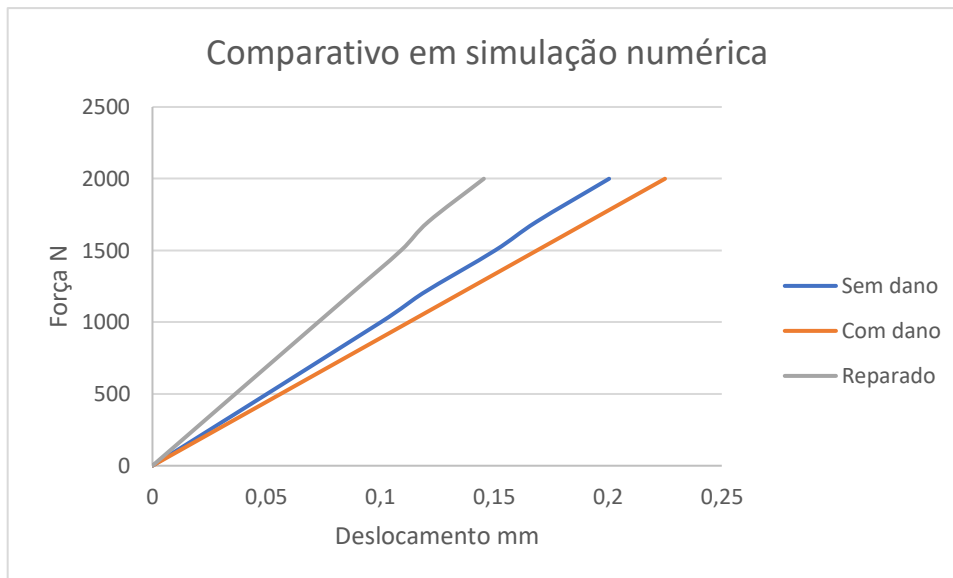


Figura 109 - Comparativo em elementos finitos dos ensaios de tração realizados

7.3.2 Resultados dos provetes em flexão

Como último comparativo a ser executado neste projeto, a comparação em análise de elementos finitos dos provetes nas três situações seguem o mesmo padrão de criação do provete para os ensaios de tração, porém a configuração de constrangimentos e carga aplicada mudam e se adaptam a este tipo de ensaio, conforme Figura 110.

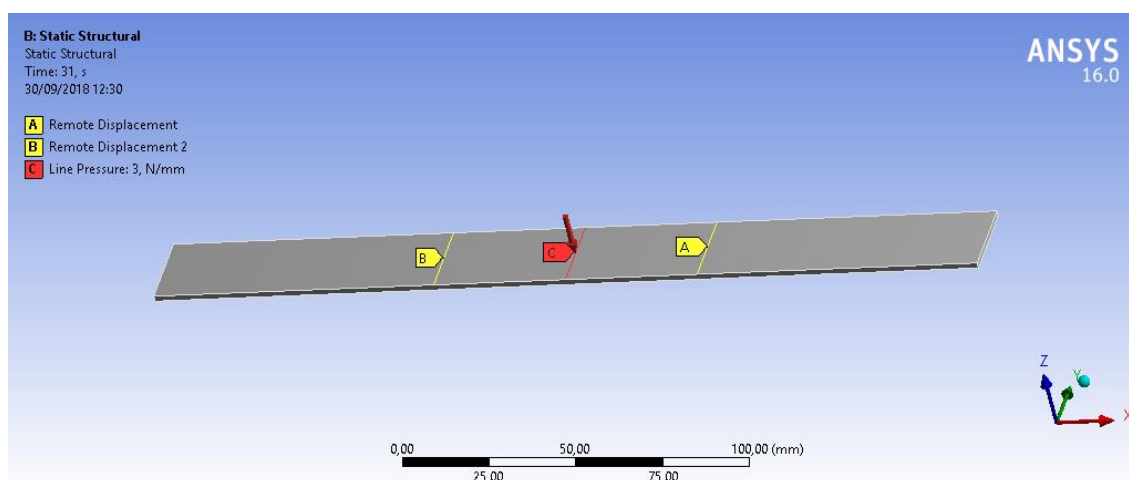


Figura 110 - Metodologia de criação dos ensaios de flexão

Para uma simulação justa, onde as linhas A e B estão marcados em amarelo, são feitas restrições de movimentos nos eixos Y e Z e todas as rotações estão livres a partir desta região. Onde se encontra em vermelho a letra C, é a linha onde se aplica a carga distribuída ao longo do provete. A força aplicada é uma resultante da simulação da carga distribuída pelo punção na máquina de ensaios.

Para cada provete, foram simuladas as cargas de uma região do início do regime elástico, variando de 10 a 70 N, e já tendo os resultados experimentais e analíticos, já se pode fazer um comparativo final sobre os provetes.

Para o provete sem dano, o resultado apresentado na Figura 111 para o caso apresentado de uma força de 70N aplicada, resultou em -2.52mm.

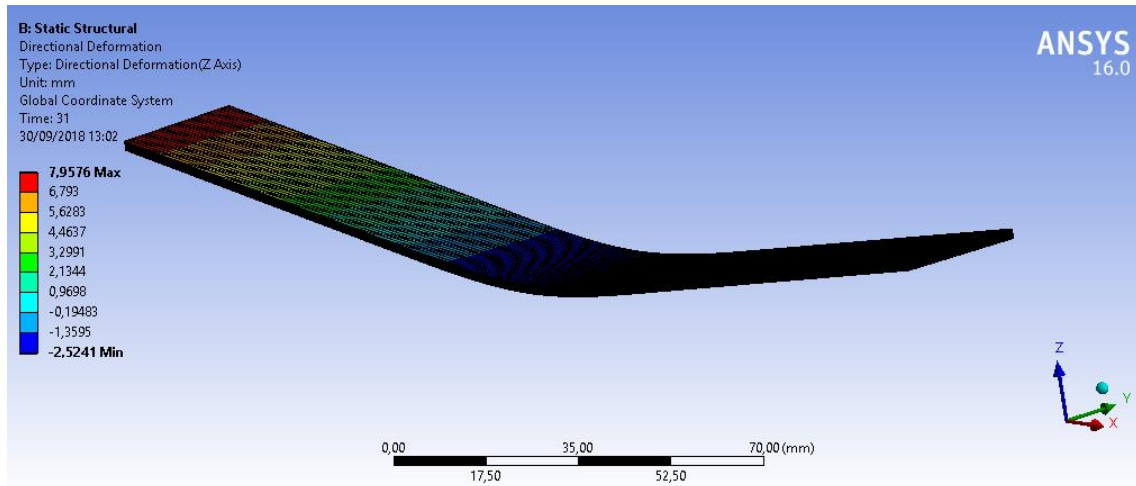


Figura 111 - Demonstração de flecha máxima para 70N em flexão

Também foi feita uma análise de convergência dos resultados, e todos os resultados finais foram apresentados com malhas de elementos finitos com 135000 elementos. Para efeito de visualização, a Figura 112 é uma demonstração dos resultados das simulações feitas para determinação da flecha máxima para as diferentes forças aplicadas.

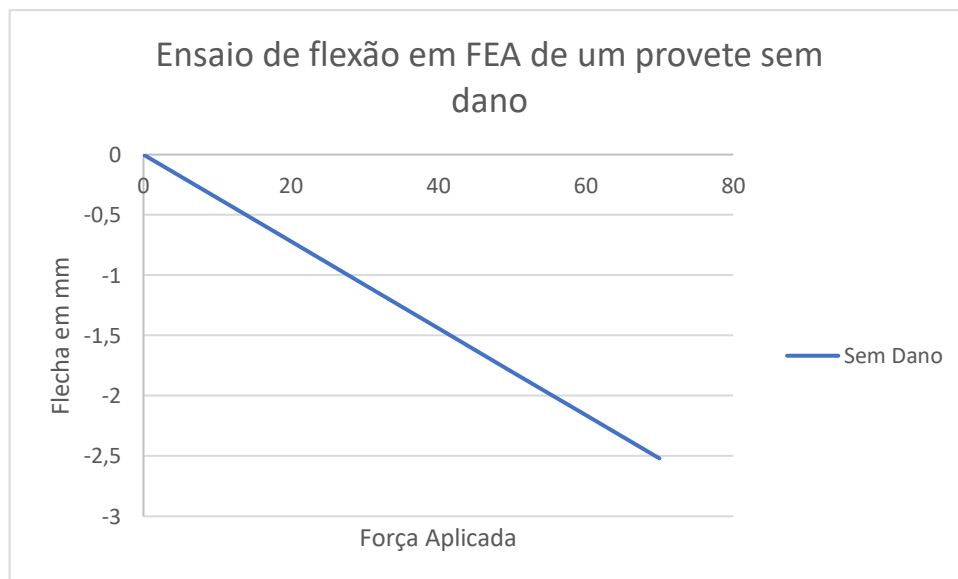


Figura 112 - Gráfico do comportamento do material em FEA

É possível observar um comportamento diferente do teórico na simulação, porém é muito próximo do resultado experimental. A simulação (Figura 113) apresenta uma flecha máxima de -2.89mm, um valor aceitável quando comparado ao analítico.

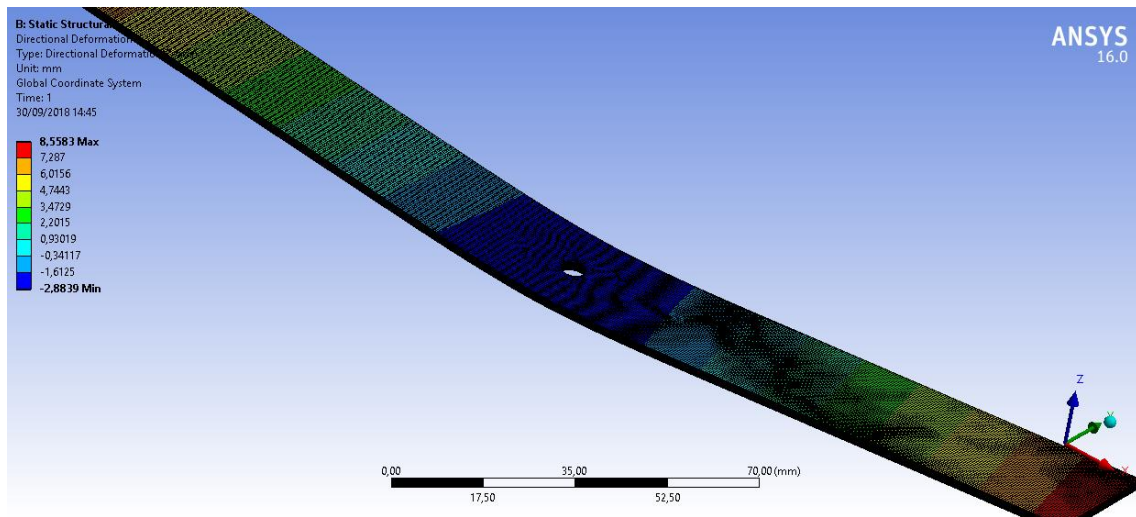


Figura 113 -Flecha em Provette com dano

O comportamento do provete furado na flexão teve o seguinte padrão conforme Figura 114:

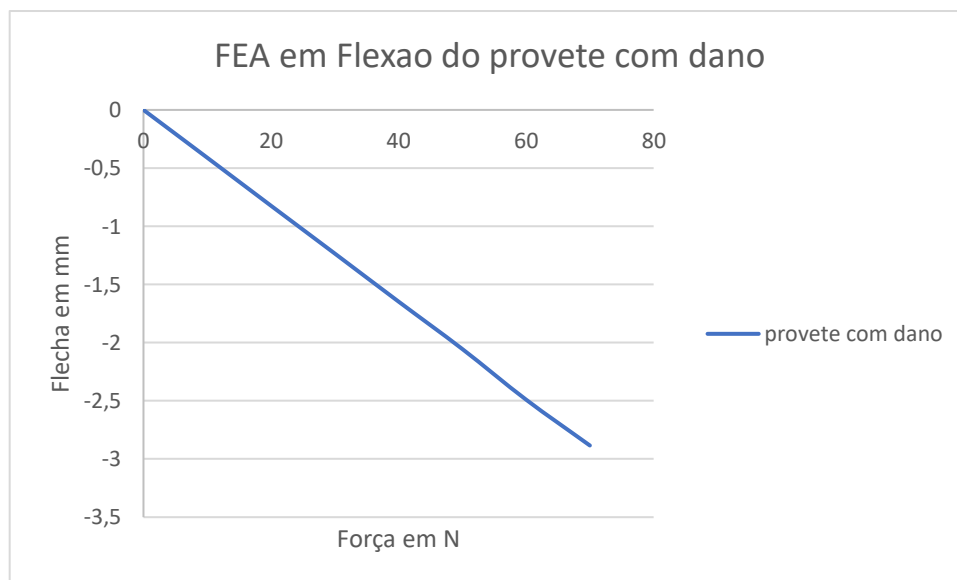


Figura 114 - Comportamento em FEA do provete com dano

É notável também que o furo funciona como um concentrador de tensões, isso pode ser notado na Figura 115:

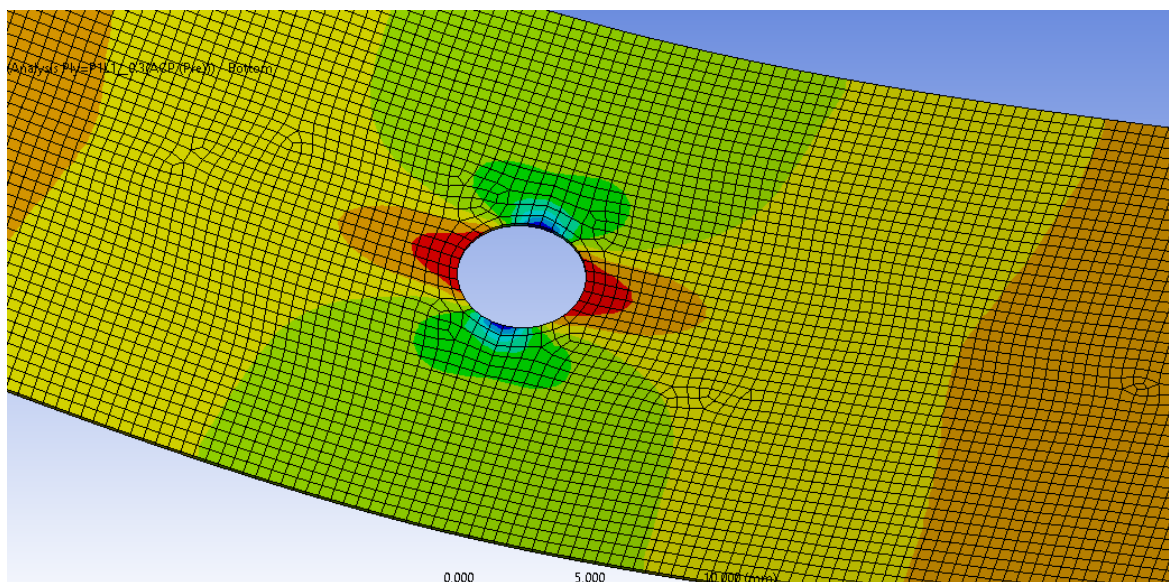


Figura 115 - Demonstração da concentração de tensão em um furo

O furo em si, tem um fator de concentração de tensão, que pode ser estimado fazendo uma relação entre as tensões atuantes nas camadas dos provetes, ambos adquiridos de maneira numérica. O valor é variável de acordo com a camada aplicada, mas a média do composto laminado é de 4,6 como fator multiplicador de tensão.

Para realizar a simulação numérica no provete reparado, a metodologia utilizada foi muito semelhante às anteriores dos ensaios de flexão. Vale lembrar que para este tipo de provete, especialmente, a simulação numérica é mais complexa devido à CZM, porém é uma boa aproximação dos elementos adesivos existentes e podem ser levados em consideração. Em relação ao comportamento na simulação (Figura 116) para a força aplicada de $P= 70\text{N}$ no centro da reparação, os deslocamentos foram descritos conforme a figura abaixo, o valor da flecha foi de $-1,02\text{mm}$.

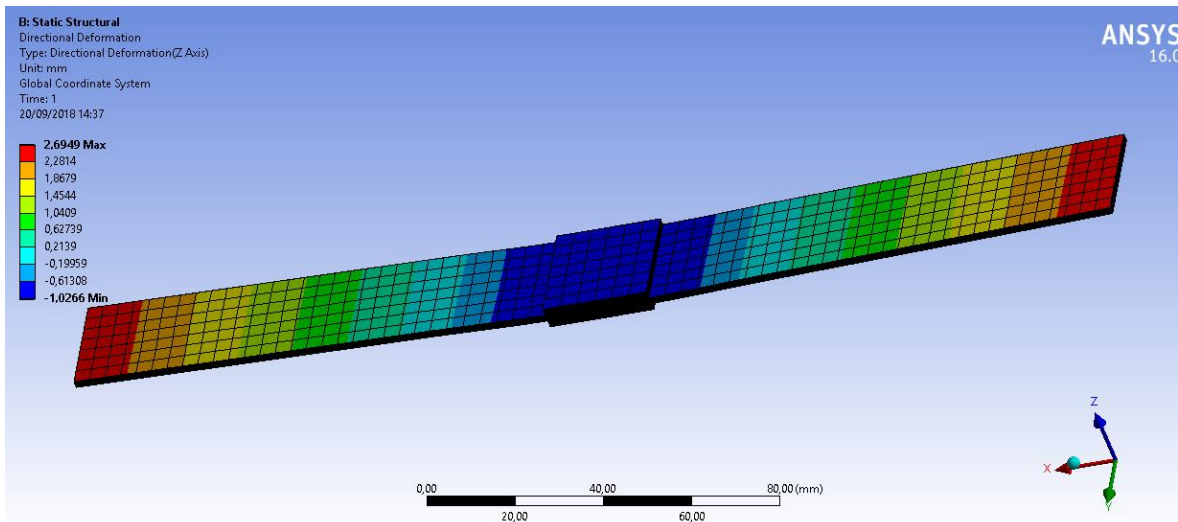


Figura 116 - Deformação para uma aplicação de 70N

Além da análise de deformação, foi feita uma análise da tensão aplicada em um teste de flexão, e conforme planejado, as extremidades da reparação consistem em um grande concentrador de tensão e as possíveis falhas, são nas proximidades da aplicação da reparação como pode ser observado na Figura 117.

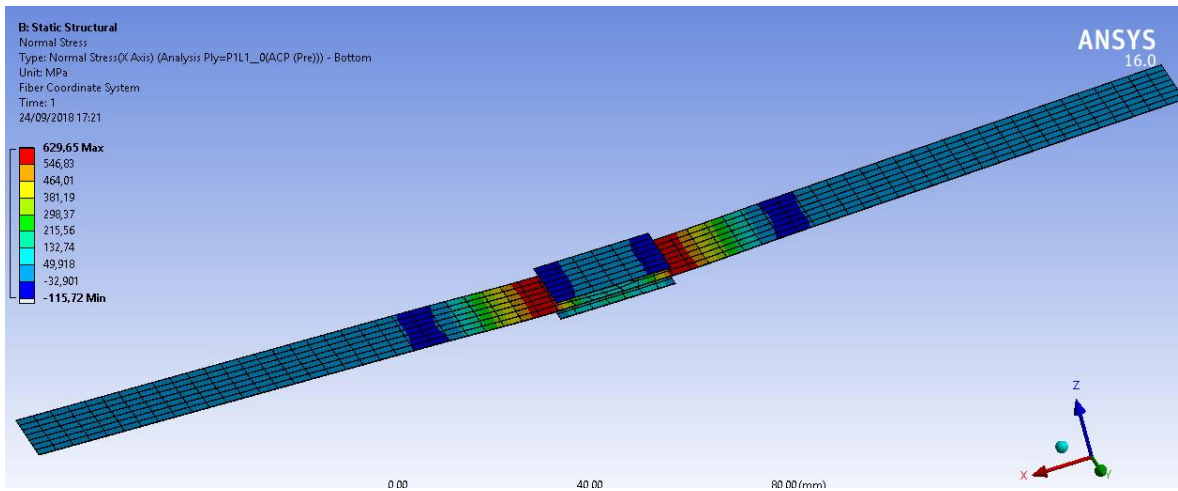


Figura 117 - Demonstração de concentradores de tensão

Um gráfico extraído das simulações feitas com uma carga de 70N, mostram que ainda está coerente ter uma maior concentração de tensão nas extremidades da junta colada, e que o comportamento segue a Figura 118:

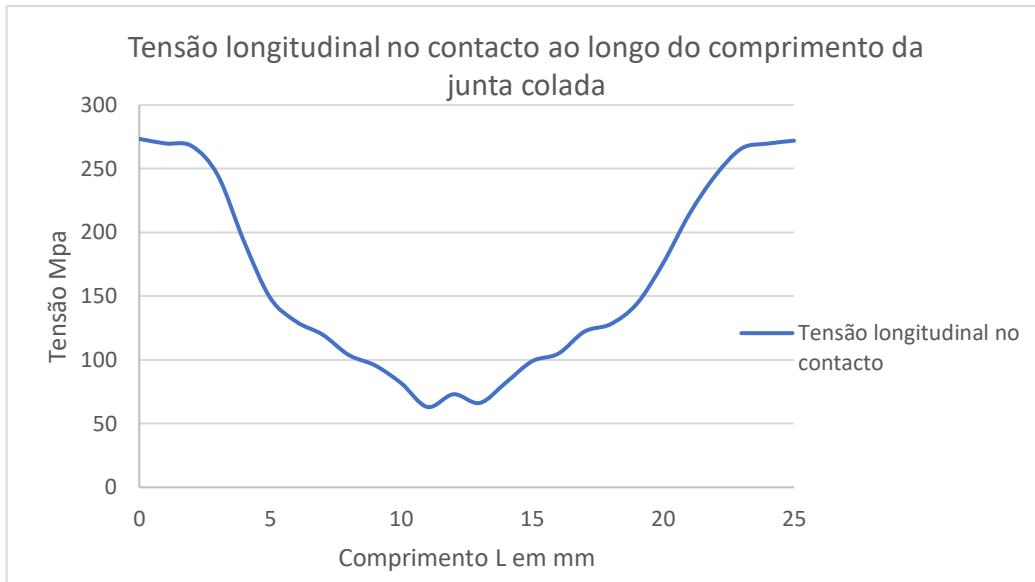


Figura 118 - Tensão na superfície colada

Com isso, também foi retirado o comportamento do material variando de acordo com a carga aplicada verticalmente, como já anteriormente explicado e é observado na Figura 119.

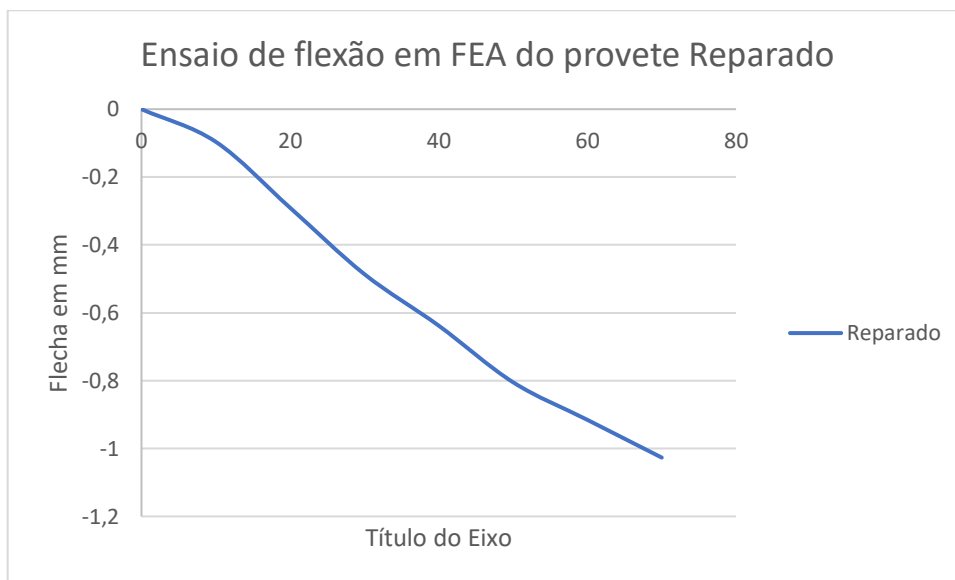


Figura 119 - Ensaio de flexão em FEA de um provete reparado

Para completar este subcapítulo, é feita uma comparação de cada tipo de provete utilizado nos ensaios em FEA, conforme Figura 120, e é possível observar a diferença de comportamento mecânico à flexão quando o provete sofre a reparação em si. Sua resistência à flexão aumenta muito quando reparado e quando possui o furo, que é um dano, mostra que realmente compromete as propriedades mecânicas inicialmente pensadas em um provete sem dano algum.

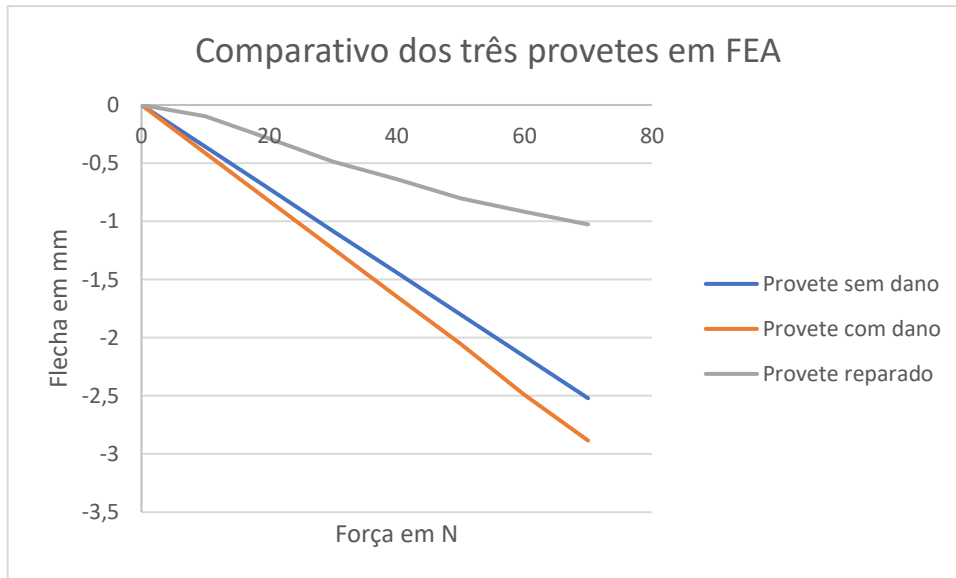


Figura 120 - Comparativo à flexão em FEA dos provetes testados

7.4 Comparativo entre os resultados

Para finalizar, será executado um estudo para entender o comportamento de cada um dos provetes, nas três maneiras realizadas (analiticamente, experimentalmente e numericamente para demonstrar a convergência dos resultados.

Esta abordagem é de grande interesse, pois pode-se analisar o real comportamento de um material compósito laminado e o quão próximo da realidade as teorias utilizadas atualmente para este tipo de estudo estão.

A (Figura 121) demonstra o comparativo para o provete sem dano em tração e a Figura 122 comparando o provete sem dano em flexão respectivamente.

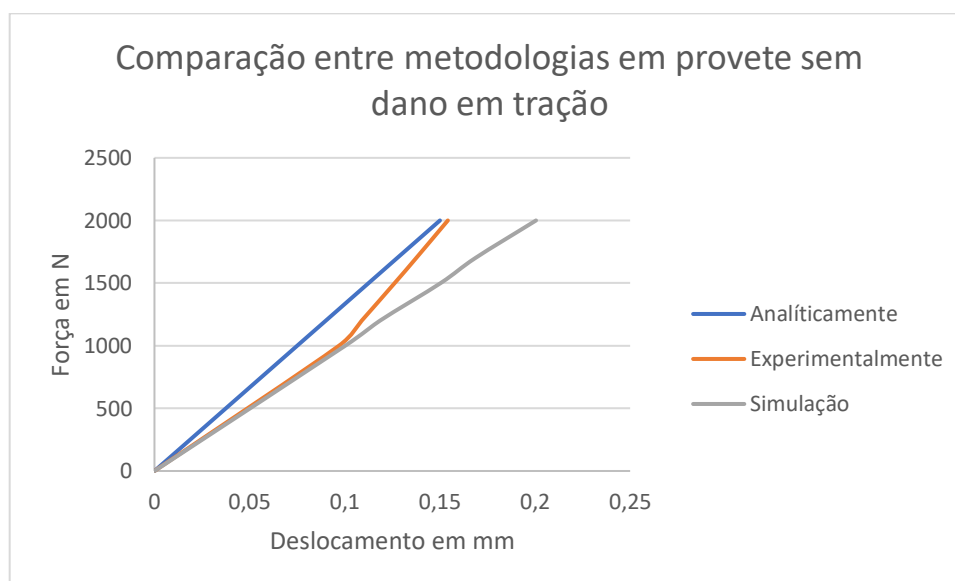


Figura 121 - Comparativo de metodologias para provete sem dano em tração

Na Figura 121 é nítido que a metodologia analítica e a simulação numérica possuem um comportamento muito parecido entre si, porém, após os 1000N a parte experimental muda radicalmente sua inclinação, o que diz respeito ao real comportamento do material.

Já na Figura 122 se observa um comportamento muito semelhante entre as três metodologias utilizadas, um pouco desfasadas do comportamento experimental, porém aceitável quando são exigidas.

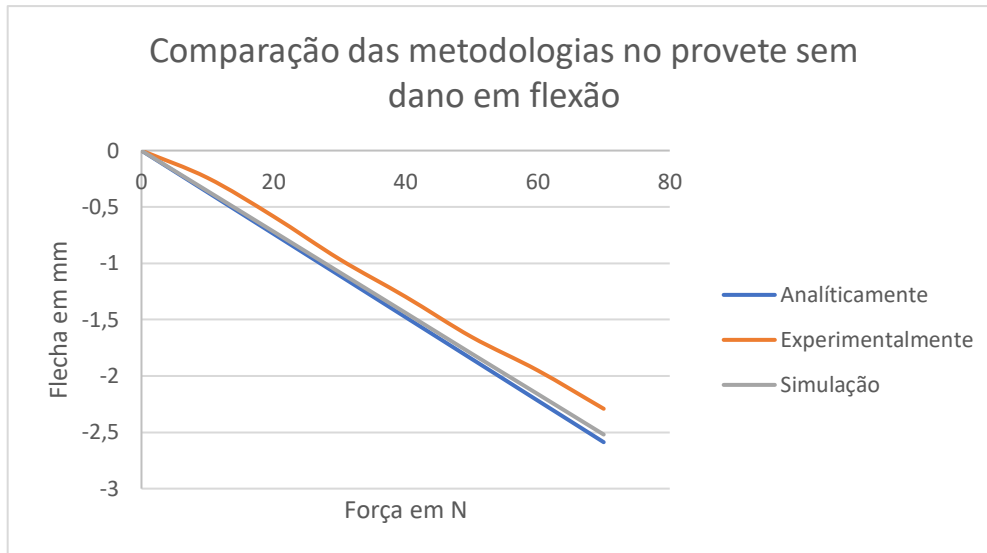


Figura 122 - Comparativo de metodologias para provete sem dano em flexão

Partindo agora para os provetes com dano pode-se observar tanto na Figura 123 e na Figura 124 que representam os ensaios de tração e flexão dos provetes com dano respectivamente, que a parte experimental diverge bastante do analítico e da simulação numérica. São resultados bastante válidos e devem ser levados em consideração em um projeto, caso seja necessário.

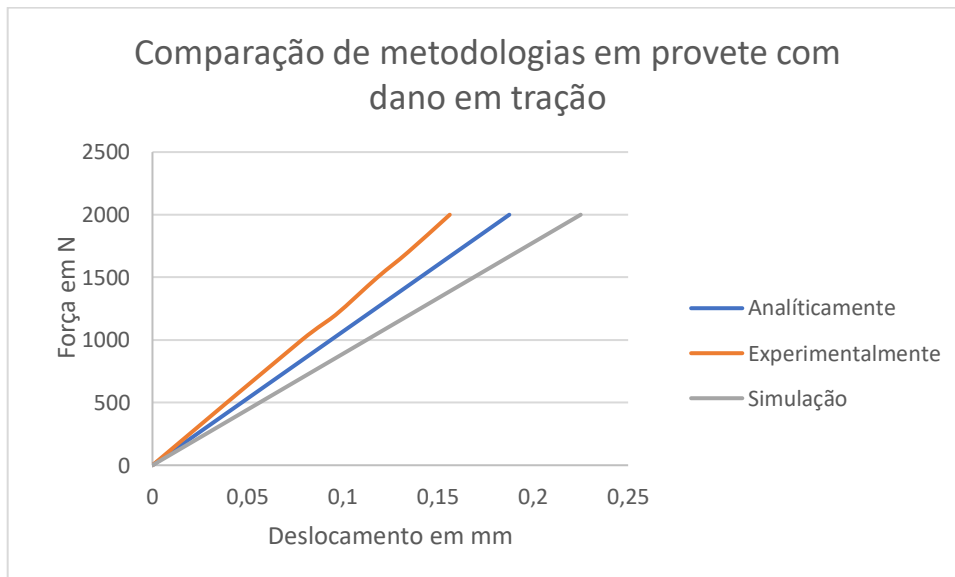


Figura 123 - Comparativo de metodologias para provete com dano em tração

Nesta Figura 123 é possível perceber o comportamento entre as três metodologias são de certa forma, quando comparados aos outros métodos, um pouco mais divergente do que se esperava.

Também nota-se um comportamento bastante divergente da parte experimental com as partes analíticas e em FEA, porém, mesmo com o dano, se for comparar o comportamento entre os provetes com e sem dano em flexão (Figura 122 e Figura 124), seguem uma divergência bastante parecida. Apesar de serem dados divergentes entre si, as metodologias analíticas e em FEA são bastante confiáveis para um estudo do comportamento do material como foi proposto neste projeto.

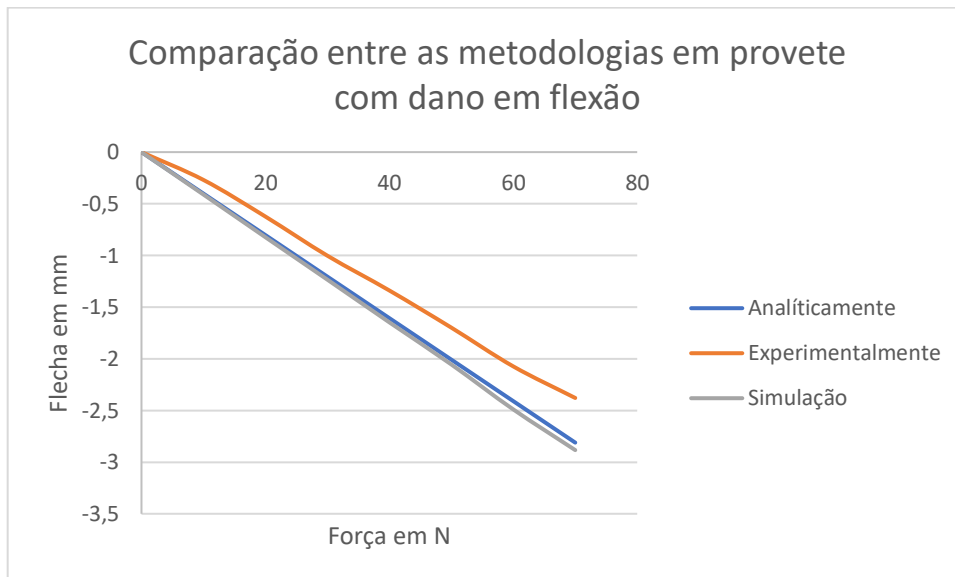


Figura 124 - Comparativo de metodologias para provete com dano em flexão

Como pode-se observar na Figura 125, a simulação numérica e a análise teórica analítica oferecem metodologias muito fiéis quando se analisa o provete reparado com a metodologia de Double Lap em ensaios de tração. Só é percebida alguma diferença em seu comportamento após 1500N de carga aplicada axialmente.

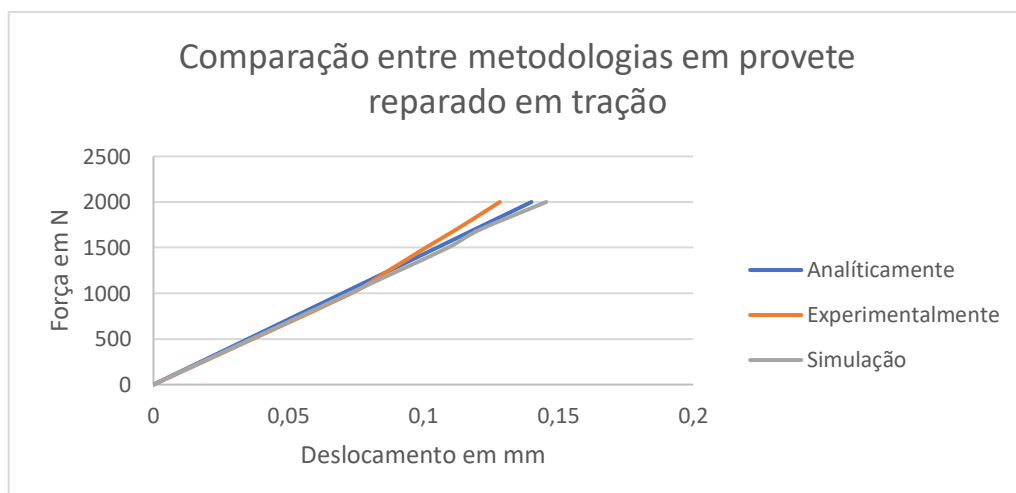


Figura 125 - Comparativo de metodologias para provete reparado em tração

E já na Figura 126, onde representam os ensaios de flexão dos provetes reparados, é nítido que a simulação numérica em FEA possui um comportamento completamente divergente dos comportamentos analíticos e experimental, isso pode se decorrer a algum erro de input quando é feita a simulação numérica de um adesivo. Na análise em modo CZM não reproduz fielmente o comportamento de um adesivo, só analisa a questão do contacto entre as superfícies e as tensões atuantes entre elas.

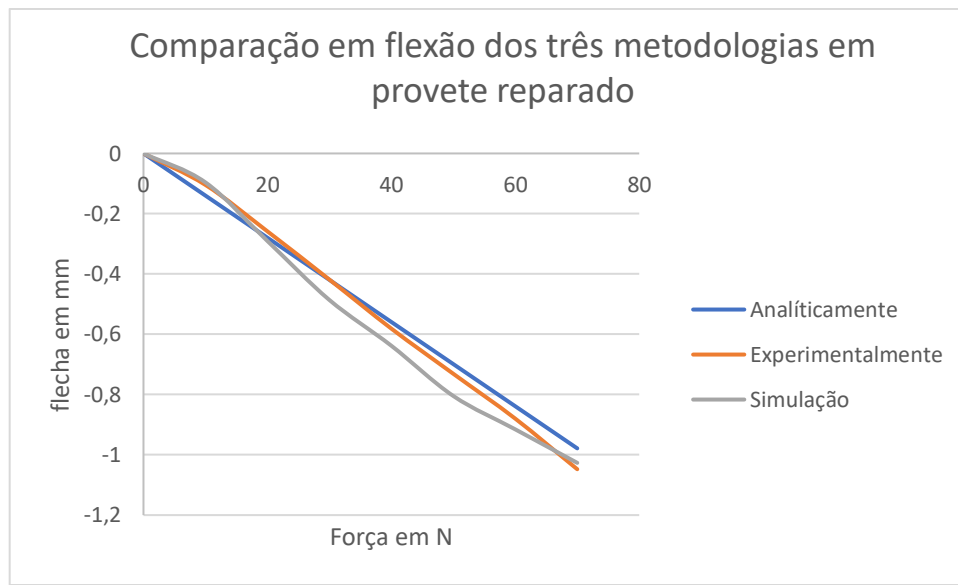


Figura 126 - Comparativo de metodologias para provete reparado em flexãõ

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

8. Conclusão

Um dos tópicos mais interessantes da indústria automóvel em relação a estruturas atualmente, é a redução da massa do veículo. Porém é importante lembrar que a massa deve ser reduzida, sem ter que comprometer o desempenho e o desafio é utilizar diferentes tipos de materiais e escolhê-los de forma correta para qualquer aplicação, ou uma otimização de combinação de vários materiais. Nesta perspectiva, pode-se pensar na técnica de juntas e reparações coladas, e na utilização de materiais compósitos. Mais precisamente deve-se pensar em metodologias que ajudem a melhorar o desempenho estrutural do veículo, e tentar perceber uma solução para eventuais problemas. Este trabalho é uma breve contribuição na área de reparação de materiais compósitos juntamente com uma breve teoria de juntas coladas e suas utilizações, passando pelas análises estruturais simples de materiais compósitos e análises de modelos em elementos finitos de reparação de compósitos através de zonas coesivas em uma simulação prática do adesivo. Além disso, uma comparação com os resultados experimentais foi apresentada e analisada.

Este projeto em si, chegou à conclusão de que, pelo dano provocado e estudado, já conhecido, os tipos de carregamentos que os provetes sofreram, a reparação de uma forma geral, apresentou resultados que melhoram a estrutura inicial, mostrando que é uma forma eficaz de se resolver um problema estrutural em materiais compósitos. As simulações numéricas foram a parte mais complexa de serem realizadas. Porém, quando validados com os resultados experimentais, nota-se que foi feito um trabalho de investigação mais próximo da realidade, acaba se tornando possível fazer uma análise comparativa.

Nota-se que o comportamento do material quando sofre um dano controlado, suas propriedades mecânicas são reduzidas, porém continuam demonstrando um bom comportamento mecânico.

Quando é feita uma reparação como a realizada neste trabalho, o principal objetivo da mesma, é poder reforçar e retomar as propriedades mecânicas que foram perdidas com o dano no material. Porém, a metodologia de Double Lap, para o caso apresentado, apresenta um excelente reforço estrutural, quando a estrutura está sujeita à flexão. E isso pode ser comprovado nos ensaios mecânicos experimentais e também nas simulações numéricas.

É possível observar também que o adesivo utilizado na reparação também pela análise de tensões numéricas feitas, respeita o comportamento mecânico esperado, e as suas extremidades, surgem como grandes concentradores de tensão.

Na simulação em flexão do provete reparado, pode-se notar uma variação do comportamento da simulação quando comparado ao analítico e também ao experimental. Esse comportamento pode justificar o critério de contacto entre os materiais utilizados.

8.1 Trabalhos futuros

Como sugestão de seguimento das pesquisas neste âmbito, existem diversos outros tipos de reparação existentes no mercado, a utilizada neste trabalho foi escolhida por diversos fatores, económicos, ferramentais e de complexidade de execução. Além de outros tipos de reparação, podem-se analisar comportamentos com outros empilhamentos, com diferentes tipos de reforços estruturais em micro e macro, ou seja, desde o laminado reforçado com outro tipo de fibra (fibra de côco, fibra de bambu, etc.) até com a reparação propriamente dita, com um menor número de camadas, já que para este estudo foi utilizado o mesmo empilhamento para reparar.

Recomenda-se também a utilização de outros softwares onde podem fazer a simulação dinâmica, como por exemplo o LSDyna. Pode-se também analisar o comportamento da reparação com diversos tipos de adesivos e tentar entender o comportamento na camada colada. Recomenda-se também utilizar outra metodologia de reparação. Ainda existe uma área abrangente neste nicho de trabalho, e podem dar mais contributos à ciência de uma forma geral, às indústrias, que também são de extremo interesse, pois lida diretamente com o preço, com o peso e *know how* dentro das empresas também.

Como sugestão de utilização na indústria automóvel, este tipo de reparação deve ser considerado, porém, melhor estudado. O maior alvo deste tipo de metodologia de reparação, pode se considerar a parte estrutural do veículo, todo o chamado *Body-in-white*, desde o *chassi* exposto, às colunas de segurança, e nas longarinas frontais.

9. Bibliografia

- [1] 3M, “Joining & Bonding of Composite Parts – The Structural Adhesive Advantage.”
- [2] S. A. da C. Almeida, “Análise Computacional de Juntas Adesivas Simples e Duplas em Materiais Compósitos,” 2012.
- [3] F. Asgari Mehrabadi, “Experimental and numerical failure analysis of adhesive composite joints,” *Int. J. Aerosp. Eng.*, no. Junho, 2012.
- [4] ASTM, “Standard test method for: Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal - to - Metal).” pp. 1–5, 1999.
- [5] M. Avalle and P. Mauri, “Comparison of different joining techniques in a crashworthiness perspective,” *Eur. Veh. Passiv. Saf. Netw.*, 2003.
- [6] M. D. Banea and L. F. M. da Silva, “Adhesively bonded joints in composite materials: An overview,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part L J. Mater. Des. Appl.*, vol. 223, no. 1, pp. 1–18, 2009.
- [7] G. Belingardi, “Recent Research Results in Composite Materials and,” vol. 40, no. 2, pp. 23–38, 2017.
- [8] R. D. S. G. Campilho and M. F. S. F. De Moura, “Modelação numérica de reparações por sobreposição simples e dupla em materiais compósitos,” *Assoc. Port. Análise Exp. Tensões*, vol. 15, pp. 103–116, 2008.
- [9] C. C. Chamis and P. L. N. Murthy, “Simplified Adhesively Procedures for Designing Bonded Composite Joints,” *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 10, no. 1, pp. 29–41, 1991.
- [10] O. Citation, O. Access, and P. Article, “Politecnico di Torino Light-weight Design of Vehicle Roof Panel for Stiffness and Crash Analyses,” no. January, 2017.
- [11] D 3039/D3039M ASTM, “Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials,” *Annu. B. ASTM Stand.*, vol. 15.03, pp. 105–116, 2000.
- [12] E. Dragoni and L. Goglio, “Adhesive stresses in axially-loaded tubular bonded joints - Part I: Critical review and finite element assessment of published models,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 47, pp. 35–45, 2013.
- [13] C. N. Duong and C. H. Wang, “Composite Repair,” *Compos. Repair*, no. April, pp. 1–13, 2007.
- [14] C. H. Ficarra and a, “Analysis of Adhesive Bonded Fiber-Reinforced Composite Joints.”

- [15] G. Gallio, "Study of an innovative joining solution for the wheel system," 2013.
- [16] R. Garcia, M. Linke, S. Neßlinger, and J. A. García-Manrique, "An infiltration strategy to repair Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) parts," *Procedia Manuf.*, vol. 13, pp. 380–387, 2017.
- [17] V. B. Giovanni Belingardi, B. M. and R. Ciardiello, and B. M. and R. Ciardiello, "Thermoplastic Adhesive for Automotive Applications," *Tools Artif. Intell.*, pp. 233–252, 2008.
- [18] J. Ji, "Lightweight Design of Vehicle Side Door," *Politec. di Torino*, 2015.
- [19] K. B. Katnam, L. F. M. Da Silva, and T. M. Young, "Bonded repair of composite aircraft structures: A review of scientific challenges and opportunities," *Prog. Aerosp. Sci.*, vol. 61, pp. 26–42, 2013.
- [20] Hart-Smith. L.J., *Adhesive-Bonded Scarf and Stepped-Lap Joints*. 1973.
- [21] J. H. Lu and J. P. Youngblood, "Adhesive bonding of carbon fiber reinforced composite using UV-curing epoxy resin," *Compos. Part B Eng.*, vol. 82, pp. 221–225, 2015.
- [22] Q. Luo and L. Tong, "Analytical solutions for adhesive composite joints considering large deflection and transverse shear deformation in adherends," *Int. J. Solids Struct.*, vol. 45, no. 22–23, pp. 5914–5935, 2008.
- [23] P. D. Magd Abdel Wahab, "THE MECHANICS OF ADHESIVES IN COMPOSITE AND METAL JOINTS."
- [24] R. Maksimainen, "PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF COMPOSITE," no. December 2015.
- [25] S. Matta, V. Chinthapenta, and M. Ramji, "A novel approach to analyse adhesive layer strain field in a stepped lap repaired carbon fiber reinforced polymer panel using digital image correlation," *J. Adhes. Sci. Technol.*, vol. 31, no. 19–20, pp. 2180–2201, 2017.
- [26] R. Michel Deleris and T. Francois Cenac, "METHOD FOR REPAIRING A WALL CONSISTING OF A PLURALITY OF LAYERS," 2013.
- [27] B. Mohamed and B. B. Bouiadjra, "Analysis of the adhesive damage for different patch shapes in bonded composite repair of corroded aluminum plate," *Struct. Eng. Mech.*, vol. 59, no. 1, pp. 123–132, 2016.
- [28] M. Niedernhuber, J. Holtmannspötter, and I. Ehrlich, "Fiber-oriented repair geometries for composite materials," *Compos. Part B Eng.*, vol. 94, pp. 327–337, 2016.
- [29] R. Options, A. Distribution, A. A. Fleets, and O. S. Aspects, "Defense Technical Information Center Compilation Part Notice TITLE: Repair Options for Airframes."

- [30] A. M. G. Pinto, R. D. S. G. Campilho, M. F. S. F. De Moura, and I. R. Mendes, "Numerical evaluation of three-dimensional scarf repairs in carbon-epoxy structures," *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 30, no. 5, pp. 329–337, 2010.
- [31] M. Qin and Y. A. Dzenis, "Analysis of single lap adhesive composite joints with delaminated adherends," *Compos. Part B Eng.*, vol. 34, no. 2, pp. 167–173, 2003.
- [32] A. Quilter, "Composites in Aerospace Applications," *Inf. Handl. Serv. Inc.*, pp. 1–5, 2004.
- [33] S. Santos, "Mecânica dos Materiais Compósitos 1.," pp. 1–14.
- [34] A. Scattina, L. Peroni, M. Peroni, and M. Avalle, "Numerical Analysis of Hybrid Joining in Car Body Applications Numerical Analysis of Hybrid Joining in Car Body," vol. 4243, no. November 2015.
- [35] R. Sengupta, S. Chakraborty, S. Bandyopadhyay, S. Dasgupta, R. Mukhopadhyay, K. Auddy, and a S. Deuri, "A Short Review on Rubber / Clay Nanocomposites With Emphasis on Mechanical Properties," *Engineering*, vol. 47, pp. 21–25, 2007.
- [36] F. Smith, "The use of composites in aerospace: past, present and future challenges," *Avalon Consult. Serv. LTD*, pp. 1–40, 2013.
- [37] S. Terminology, "Composite Materials 1," *Annu. B. ASTM Stand.*, no. June, pp. 1–6, 2004.
- [38] M. A. Wahab, "Joining Composites with Adhesives," 2016.
- [39] P. Yarrington, J. Zhang, and C. Collier, "Failure Analysis of Adhesively Bonded Composite Joints," pp. 1–23, 2005.
- [40] L. Zhang, "The application of composite fiber materials in sports equipment," *5th Int. Conf. Educ. Manag. Inf. Med.*, no. Emim, pp. 450–453, 2015.
- [41] Beckwith, A.B.S.a.S.W., *Joining Composite Materials - Mechanical or Adhesive?*
- [42] F M da Silva, L., et al., *Closed-form solutions for adhesively bonded joints.*
- [43] R.W.Cahn, P.Haasen,E.J.Kramer, *Material Science and Technology, Structure and Properties of Composites*
- [44] Tsai, M.Y., D.W. Oplinger, and J. Morton, Improved theoretical solutions for adhesive lap joints. *Int. J. Solids Structures*, 1998. 35(12): p. 1163-1185.
- [45] Tsai, S. W. and Wu, E. M. (1971). A general theory of strength for anisotropic materials. *Journal of Composite Materials*. vol. 5, pp. 58–80.
- [46] Miracle, D.B. and S.L. Donaldson, *Introduction to Composites*. ASM Metals Handbook, 2001. Volume 21 Composites

- [47] Baker, A., S. Dutton, and D. Kelly, Composite Materials for Aircraft Structures. 2nd Edition ed2004: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc.
- [48] Campbell, F.C., Structural Composite Materials. ASM International, 2010.
- [49] Jones, R.M., Mechanics of Composite Materials. Second Edition ed1999: Taylor & Francis, Inc
- [50] https://pt.wikipedia.org/wiki/Saab_JAS_39_Gripen
- [51] www.pinsdaddy.com/skistructure
- [52] <https://www.ebah.com.br/content/ABAAABa7kAF/pultrusao-arrumado>
- [53] CALLISTER, W. D., Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [54] <http://www.plastix-world.com/bmw-i3-carbon-fiber-body/>.
- [55] Zou, G.P., K. Shahin, and F. Taheri, An analytical solution for the analysis of symmetric composite adhesively bonded joints. Composite Structures, 2004. 65(3-4): p. 499-510.
- [56] <https://www.selfadhesive.co.uk/3m-scotch-weld-low-odour-acrylic-adhesive-dp8805ns.html>
- [57] Mohsen Moslemi, Cohesive Zone Parameters Selection for Mode-I Prediction of Interfacial Delamination
- [58] R. D. S. G. Campilho, M. F. S. F. de Moura, A. M. G. Pinto, D. A. Ramantani, J. J. L. Morais, J. J. M. S. Domingues, STRENGTH PREDICTION OF ADHESIVELY-BONDED SCARF REPAIRS IN COMPOSITE STRUCTURES UNDER BENDING
- [59] Manabendra Das, Erdogan Madenci and Damodar R. Ambur, Journal of Mechanics of Materials and Structures
- [60] René Kregting, Cohesive zone models towards a robust implementation of irreversible behavior, 23rd February 2005
- [61] Tsai, M.Y, Morton,J, An investigation into the stresses in double-lap adhesive joints with laminated composite adherends
- [62] Office of Aviation Research Washington, D.C. 20591,Repair of Composite Laminates
- [63] E.V. Iarve, T. Breitzman, E.R. Ripberger, Tensile failure of composite scarf repair

[64] Chun H. Wang, Andrew J. Gunnion, On the design methodology of scarf repairs to composite laminates

[65] Clayton Pereira da Silva Santos, Jorge Ricardo Ribeiro Bichara , Estudo Experimental das Propriedades Mecânicas para Compósito em Fibra de Carbono e Matriz Epóxi Pipefix (CFRP – Carbon Fiber Reinforced Polymer)

[66] <https://www.boronextrication.com/2016/03/10/2016-bmw-i8-body-structure/>

Esta página foi intencionalmente deixada em branco