

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA MECÂNICA
ENGENHARIA MECÂNICA**

GABRIEL LARIDONDU DOMINGUES

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE MATERIAIS COMPÓSITOS
COM RELAÇÃO A VARIAÇÃO DA ESPESSURA DO NÚCLEO SOB
ENSAIOS DE FLEXÃO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LONDRINA

2021

GABRIEL LARIDONDU DOMINGUES

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE MATERIAIS COMPÓSITOS
COM RELAÇÃO A VARIAÇÃO DA ESPESSURA DO NÚCLEO SOB
ENSAIOS DE FLEXÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à disciplina TCC2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Londrina como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Amadeu Lombardi Neto

LONDRINA

2021



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Londrina



Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica - COEME
Engenharia Mecânica

TERMO DE APROVAÇÃO

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE MATERIAIS COMPÓSITOS COM
RELAÇÃO A VARIAÇÃO DA ESPESSURA DO NÚCLEO SOB ENSAIOS DE
FLEXÃO**

por

GABRIEL LARIDONDU DOMINGUES

Este TCC foi apresentado em 13 de maio de 2021 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Amadeu Lombardi Neto
Prof. Orientador

Roger Nabeyama Michels
Membro titular

Kleber Yamaguti
Membro titular

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a Deus, a minha família e a minha namorada Ana Carolina Oliveira por toda força e apoio ao longo desses anos de curso.

O meu orientador Prof. Dr. Amadeu Lombardi Neto, pelos conhecimentos aprofundados a respeito do assunto desse TCC, aos membros da banca Prof. Dr. Roger Nabeyama Michels e Prof. Dr. Kleber Yamaguti pela prontidão e auxílio, bem como todos os demais professores pela sabedoria que me guiaram nesta trajetória.

Ao Técnico Ricardo Benez por me ajudar e acompanhar todo o processo experimental, e ao Técnico Filippe de Carvalho Bernardino pelo auxílio nos ensaios, não seria possível a realização desse trabalho sem a ajuda de ambos.

Aos meus amigos e colegas de faculdade pelos anos de convivência e risadas que serão lembradas para sempre.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta etapa.

RESUMO

DOMINGUES, Gabriel Laridondou. **Análise do comportamento de materiais compósitos com relação a variação da espessura do núcleo sob ensaios de flexão.** 2021. 72f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2021.

Compósitos são materiais formados pela união de outros materiais a fim de se aumentar a resistência a tração, compressão, flexão e impacto dos materiais em questão. Estrutura sanduíche é um compósito cuja geometria consiste em dois tecidos de fibra revestindo um núcleo estrutural e unidos por uma resina. Sua principal característica, teoricamente, é o aumento da resistência a flexão e leveza do conjunto, proporcionada pela baixa densidade dos tecidos de fibra e dos núcleos e pela espessura do conjunto. O presente trabalho propõe a confecção de diversos corpos de prova, utilizando núcleos estruturais de espuma de PVC Divinycell e faces compostas por camadas de tecido de fibra de carbono 200g, a fim de ensaiá-los em uma Máquina Universal de Ensaio da Shijin WDW-100E III e analisar o comportamento, a flexão, quando a espessura desses compósitos é variada, mantendo todos os demais parâmetros fixos.

Palavras-chave: Estrutura. Sanduíche. Divinycell. Fibra de carbono.

ABSTRACT

DOMINGUES, Gabriel Laridonda. **Analysis of the behavior of composite materials in relation to the variation of the core thickness under bending tests.** 2021. 72f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Mechanical Engineering. Federal Technology University of Paraná. Londrina, 2021.

Composites are materials formed by the union of other materials in order to increase the resistance to traction, compression, flexion and impact of the materials in question. Sandwich structure is a composite whose geometry consists of two fiber fabrics covering a structural core and joined by a resin. Its main characteristic, theoretically, is the increased flexural strength and lightness of the set, provided by the low density of the fiber fabrics and cores and the thickness of the set. The present work proposes the making of several specimens, using structural Divinycell PVC foam cores and faces composed of layers of 200g carbon fiber fabric, in order to test them in a Universal Testing Machine of Shijin WDW-100E III and analyze the behavior, flexion, when the thickness of these composites is varied, keeping all other parameters fixed.

Keywords: Sandwich. Strengths. Divinycell. Carbon fiber.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Madeira compensada.....	7
Figura 2 – Estrutura sanduíche simplificada.....	7
Figura 3 – Estrutura sanduíche	11
Figura 4 – Materiais do núcleo homogêneo e estruturados	13
Figura 5 – Núcleo de madeira balsa (a), espuma de PVC (b) e espuma de PET (c)	14
Figura 6 – Propriedades mecânicas do Divinycell H60	15
Figura 7 – Características técnicas do Divinycell H60.....	16
Figura 8 – Viscosidade em função do tempo (a) e a curva exotérmica (b) da resina epóxi e endurecedor AR/AH 260.....	18
Figura 9 – Tensão x deformação obtidos em ensaios de (a) tração e (b) flexão da mistura AR/AH 260.....	19
Figura 10 – Propriedades típicas de faces de sanduíches	21
Figura 11 – Esquemático do ensaio de flexão de três pontos.....	23
Figura 12 – Curvas típicas de ensaio de flexão em três pontas em materiais compósitos	24
Figura 13 – Materiais auxiliares.....	26
Figura 14 – Equipamentos de Proteção Individual	27
Figura 15 – Vinagre.....	28
Figura 16 – Molde de vidro.....	29
Figura 17 – Separação das regiões	30
Figura 18 – Cera desmoldante da Tec Glaze-N.....	30
Figura 19 – Molde com 5 aplicações de cera	31
Figura 20 – Tecido fibra de carbono biaxial CBX200	32
Figura 21 – Divinycell H60 GSP	32
Figura 22 – Tecido 100% poliéster (Peel Ply)	33
Figura 23 – Resina Epoxy AR260 e Endurecedor AH260	34
Figura 24 – Rolo de espuma	34
Figura 25 – Tela de sombreamento	36
Figura 26 – Tubo espiral (organizador de fios).....	36
Figura 27 – Plástico de PVC transparente	37
Figura 28 – Massa calafetar	37
Figura 29 – Separador de resina.....	38
Figura 30 – Bomba.....	38
Figura 31 – Manômetro da bomba	31
Figura 32 – Bomba coberta por um pano molhado	40
Figura 33 – Soprador de ar quente	41
Figura 34 – Laminação a vácuo	41
Figura 35 – Visão geral do experimento.....	42
Figura 36 – Desmolde	43
Figura 37 – Serra-fita de bancada.....	44
Figura 38 – Corpos de prova.....	44
Figura 39 – Máquina Universal de Ensaio da Shijin WDW-100E III.....	46
Figura 40 – Ensaio de Flexão.....	48
Figura 41 – Gráfico de tensão x deformação (2F0N-1).....	50
Figura 42 – Gráfico de tensão x deformação (2F0N-2).....	50
Figura 43 – Gráfico de tensão x deformação (2F1N-3).....	51
Figura 44 – Gráfico de tensão x deformação (2F1N-1).....	52

Figura 45 – Gráfico de tensão x deformação (2F1N-2).....	52
Figura 46 – Gráfico de tensão x deformação (2F2N-3).....	53
Figura 47 – Gráfico de tensão x deformação (2F2N-1).....	54
Figura 48 – Gráfico de tensão x deformação (2F2N-2).....	54
Figura 49 – Gráfico de tensão x deformação (2F3N-3).....	55
Figura 50 – Gráfico de tensão x deformação (2F3N-1).....	56
Figura 51 – Gráfico de tensão x deformação (2F3N-2).....	56
Figura 52 – Gráfico de tensão x deformação (2F3N-3).....	57
Figura 53 – Gráfico de tensão x deformação (2F2N2F-1).....	58
Figura 54 – Gráfico de tensão x deformação (2F2N2F -2).....	58
Figura 55 – Gráfico de tensão x deformação (2F2N2F -3).....	59
Figura 56 – Gráfico de tensão x deformação (6F2N-1).....	60
Figura 57 – Gráfico de tensão x deformação (6F2N-2).....	61
Figura 58 – Gráfico de tensão x deformação (6F2N-3).....	61
Figura 59 – Gráfico de tensão x deformação (8F2N-1).....	62
Figura 60 – Gráfico de tensão x deformação (8F2N-2).....	62
Figura 61 – Gráfico de tensão x deformação (8F2N-3).....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resistência e módulo da mistura AR/AH 260, em tração e flexão	19
Tabela 2 – Cronograma (2019)	67
Tabela 3 – Cronograma (2020)	67

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	7
2 OBJETIVO	9
3 JUSTIFICATIVA	10
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
4.1 COMPÓSITOS	11
4.2 ESTRUTURAS SANDUÍCHES	11
4.2.1 Núcleos	12
4.2.1.1 Tipos de núcleos	12
4.2.1.2 Exemplos de núcleos	13
4.2.1.3 Núcleo utilizado	14
4.2.2 Adesivos	16
4.2.2.1 Disponibilidade dos adesivos	16
4.2.2.2 Exemplos de adesivos	17
4.2.2.3 Adesivo utilizado	17
4.2.3 Faces	20
4.3 ENSAIOS MECÂNICOS	21
4.3.1 Ensaio de Flexão	22
5 MATERIAIS	25
5.1 MATERIAIS FUNDAMENTAIS	25
5.2 MATERIAIS AUXILIÁRES	25
5.3 MATERIAS PARA SEGURANÇA	26
6 METODOLOGIA	29
6.1 CORPOS DE PROVA	29
6.1.1 Preparação do Molde ou Superfície	29
6.1.2 Laminação Manual	31
6.1.3 Laminação a Vácuo	35
6.1.4 Desmolde	42
6.1.5 Recorte e Acabamento do Corpo de Prova	43
6.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	45
7 ANÁLISE DOS DADOS	47
7.1 CORPO DE PROVA - 2F0N	50
7.2 CORPO DE PROVA - 2F1N	51
7.3 CORPO DE PROVA - 2F2N	53
7.4 CORPO DE PROVA - 2F3N	55
7.5 CORPO DE PROVA - 2F2N2F	57
7.6 CORPO DE PROVA - 4F2N	59
7.7 CORPO DE PROVA - 6F2N	60
7.8 CORPO DE PROVA - 8F2N	61
8 CONCLUSÃO	64
9 PROBLEMAS ENCONTRADOS	65
10 SUGESTÕES DE MELHORIA	66
11 CRONOGRAMA	67
REFERÊNCIAS	68

1 INTRODUÇÃO

Um compósito estrutural é composto tanto por materiais homogêneos como por materiais heterogêneos ou compósitos, cujas propriedades dependem não somente das propriedades dos materiais constituintes, mas também do projeto geométrico dos elementos estruturais, destacando-se os compósitos laminares e os sanduíches (CALLISTER, 2002).

De acordo com Gagliardo (2010), enquanto os compósitos laminares são compostos basicamente por placas intercaladas entre si por resinas ou adesivos, como a madeira compensada, Figura 1, as estruturas sanduíches são faces finas de um material resistente, intercaladas por uma camada de outro material, geralmente de baixa densidade e resistência inferior as faces, conhecidas como núcleos, Figura 2. Em certas condições, a resistência a flexão desse conjunto pode ser maior até mesmo que a de uma placa maciça confeccionada do mesmo material e densidade que as duas faces do sanduíche.

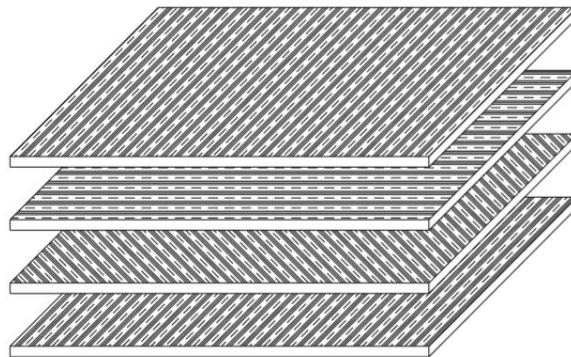


Figura 1 – Madeira compensada.

Fonte: Gagliardo (2010)

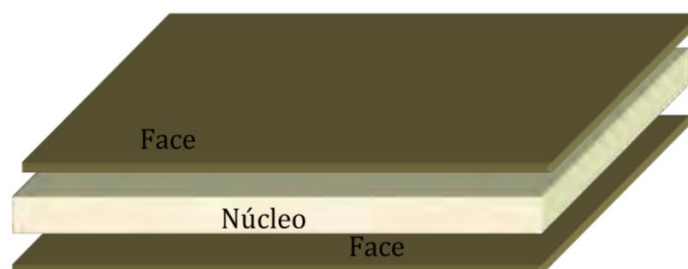


Figura 2 – Estrutura sanduíche simplificada.

Fonte: Garay (2016)

Foi na Segunda Guerra Mundial que teve início a inovação proporcionada pelas estruturas sanduíche, as quais na época eram consideradas revolucionárias. A necessidade de estruturas mais leves e resistentes na confecção de aviões de guerra propiciou o desenvolvimento das estruturas sanduíches, entretanto a falta de recursos minerais que a própria guerra proporcionou, acarretou numa busca por materiais alternativos. A solução encontrada na época veio na madeira Balsa, extremamente leve oriunda da América Latina. Ela era envolvida por placas mais resistentes também de madeira, apresentando baixo peso e elevada resistência para os padrões da época (GARAY, 2016).

O setor pioneiro em pesquisas sobre estruturas sanduíches foi a indústria aeroespacial, pois para elas o peso do avião é mais importante do que o custo para fabricação. Em contrapartida na indústria civil, mecânica e automotiva, primeiramente considera-se os custos, apesar de que o peso do conjunto afeta diretamente tanto os custos quanto o desempenho. Além de que a crescente falta de matéria-prima e o rápido esgotamento das fontes convencionais de energia aumenta a necessidade de pesquisa e avanços na utilização de estruturas mais leves, eficientes e de baixo custo (GAGLIARDO, 2010).

Apesar do uso de estruturas sanduíches estar expandindo devido a sua capacidade de combinar alta rigidez à flexão e baixo peso, eles proporcionam boas características de isolamento térmico e acústico, sendo uma boa alternativa em relação aos outros tipos mais tradicionais de construção, como por exemplo sistemas pré-fabricados de concreto e estruturas de alvenaria; pela sua durabilidade, mesmo em ambientes quimicamente agressivos; e por permitirem combinações de diversos materiais acarretando na criação de formas e peças mais complexas (CORIGLIANO, 2000).

Segundo Garay (2016), atualmente, as aplicações dessas estruturas estão presentes em diversos setores, destacando-se a indústria náutica, na confecção de barcos tanto de pequeno a grande porte. Nos aviões comerciais de grande porte, cujos se utilizam núcleos de colmeias na fabricação de peças do interior. Há também uma grande demanda na fabricação de carrocerias frigoríficas, onde são utilizadas estruturas com núcleo de poliuretano.

2 OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo central, analisar a influência da espessura nos materiais compósitos, tanto pela quantidade de camadas de faces quanto de núcleos. Para alcançar tal feito, o trabalho dispõe de ensaios de flexão com parâmetros fixos para todos os corpos de prova, tendo a espessura único parâmetro variável.

Um segundo objetivo, em paralelo ao anterior, é a busca pela simplificação e desmistificação do processo de laminação manual e a vácuo. Atualmente, estruturas sanduíches estão ligadas a projetos de alta performance e valor, logo, há necessidade de esclarecimento sobre o assunto.

3 JUSTIFICATIVA

Tanto o curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Londrina, quanto outros cursos de outras universidades, possuem diversos projetos de extensão, que por sua vez seriam beneficiados com a utilização de estruturas sanduíches em seus projetos, devido à alta resistência a tração, compressão e principalmente a flexão desses compósitos em contrapartida com o baixo peso.

Logo, há necessidade de um estudo que prioriza a confecção desses compósitos procurando simplificá-la e de uma análise que correlaciona determinadas escolhas de espessuras de núcleos e faces para estruturas sanduíches com suas respectivas resistências.

Uma segunda justificativa, da escolha do tema do trabalho em questão, está ligada ao fato de existirem diversas teses e dissertações sobre materiais compósitos, entretanto com variações do tipo de material utilizado. Não há um estudo que analise somente a espessura como parâmetro.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 COMPÓSITOS

De acordo com a teoria de Prabhakar (2005), a classe dos materiais compósitos é bastante ampla, abrangendo desde polímeros reforçados com fibras, materiais híbridos de metal e compósitos até concretos estruturais. A característica fundamental dos compósitos consiste em combinar a nível macroscópico dois ou mais materiais diferentes, cada um constituindo uma fase distinta, conhecidas como fase matriz e fase dispersa.

As propriedades dos materiais constituintes, Figura 3, orientação do reforço, razão entre volume ocupado por uma fase e o volume total do compósito, adesão entre os componentes e a geometria do reforço (forma e dimensões), são fatores que influenciam nas propriedades mecânicas do compósito (CARVALHO, 2006)

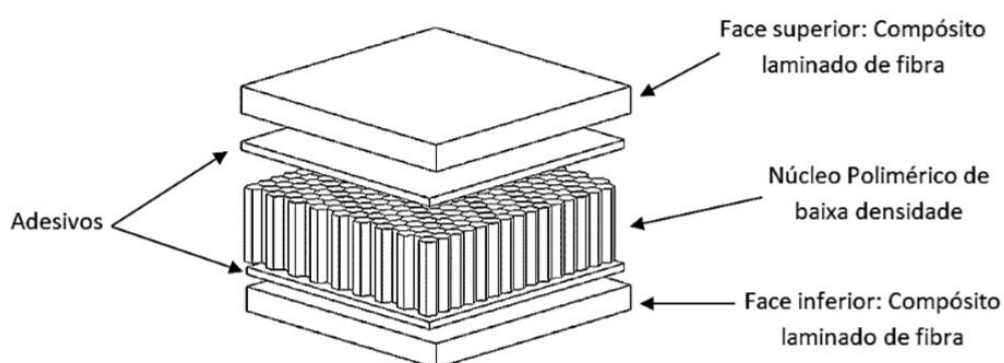


Figura 3 – Estrutura sanduíche.

Fonte: Dias, Santos, Britos, Oliveira e Taketa (2016)

4.2 ESTRUTURAS SANDUÍCHES

De acordo com Tita (2007), as faces da estrutura sanduíche possuem a função de suportar as tensões normais de tração, compressão ou cisalhamento associadas à flexão, além disso elas devem ter espessura suficiente para resistir a flambagem e avarias por impactos localizados. O núcleo por sua vez tem a função de manter as faces afastadas, ser suficientemente rígido na direção perpendicular a

elas, com a finalidade de evitar o esmagamento, e sua rigidez ao cisalhamento transversal deve ser suficientemente grande para garantir que o conjunto funcione.

4.2.1 Núcleos

O núcleo mantém as faces nas posições originais em relação ao eixo neutro do painel onde uma não deve se mover em relação à outra, provendo assim rigidez à compressão e cisalhamento. Caso o material tenha uma baixa resistência à compressão, as faces poderão se aproximar quando a estrutura estiver em flexão. Todavia se a tensão de cisalhamento do material de núcleo for insuficiente, as faces poderão escorregar em relação à outra e a estrutura não trabalhará integrada. Nesse caso, a integridade do conjunto dependeria somente da resistência individual de duas faces muito finas (GARAY, 2016).

4.2.1.1 Tipos de núcleos

De acordo com Garay (2016), existem dois principais grupos de painéis sanduíche, que são diferenciados pelo tipo de material de núcleo: núcleos homogêneos e núcleos não homogêneos ou estruturados, que por sua vez distinguem-se os núcleos canelados, os núcleos favos de mel (honeycomb) e os painéis em que as lâminas são suportadas apenas por elementos pontuais, Figura 4.

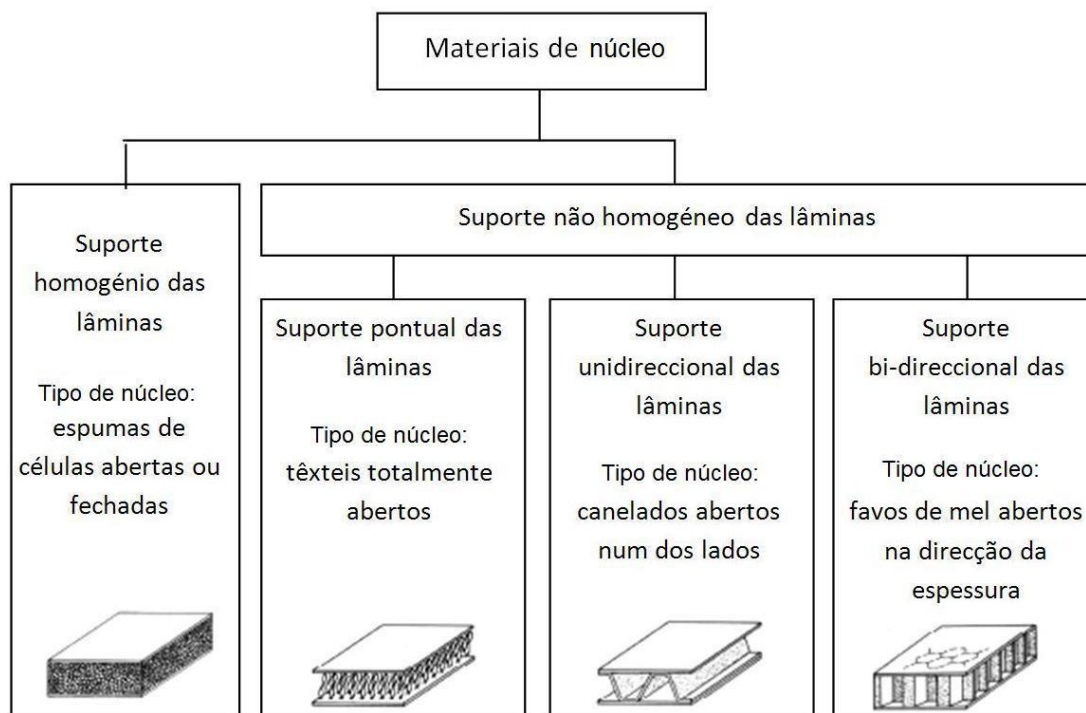


Figura 4 – Materiais do núcleo homogéneo e estruturados.

Fonte: Garay (2016)

Garay (2016) também diz que existe uma grande variedade de núcleos disponíveis para aplicação em compósitos sanduíche, sendo que cada material possui suas vantagens e desvantagens, logo devem ser avaliados de acordo com sua finalidade de aplicação. Entretanto, mesmo que as propriedades mecânicas dos materiais de núcleo sejam diferentes entre seus vários tipos, normalmente, para o mesmo material, estas propriedades variam em função da densidade.

4.2.1.2 Exemplos de núcleos

A madeira mais utilizada como núcleo é a balsa, Figura 5-a, devido ao seu baixo custo para esse tipo de produção e boas propriedades de resistência à compressão e cisalhamento. Por outro lado, sua utilização em ambientes marinhos é sempre problemática, tendo em vista que qualquer rachadura na face é suficiente para que a madeira comece a absorver água, saturando e levando ao colapso da estrutura. Além do elevado peso em relação aos outros núcleos e dificuldade em controlar a densidade, sendo que se trata de um material natural.



Figura 5 – Núcleo de madeira balsa (a), espuma de PVC (b) e espuma de PET (c).

Fonte: Nasseh (2007)

Atualmente, as espumas de PVC, Figura 5-b são, provavelmente, o tipo de núcleo mais utilizado, oferecendo grandes vantagens para a construção de compósitos de alto desempenho, alguns podendo até oferecer quase o mesmo desempenho estrutural e baixo peso dos *honeycomb*, mas com a facilidade de ser macroscopicamente sólida, permitindo assim uma laminação direta a sua superfície, a um custo menor (GARAY, 2016).

Já as espumas de PET, Figura 5-c, apresentam elevado alongamento e boa adesão, resultando em uma boa resistência ao impacto e à fadiga. Elas podem ser fabricadas à temperatura ambiente em formas simples, ou termoformadas em peças mais complexas. Apresentam boa resistência a bases e ácidos fracos como também a maioria dos solventes atuais (álcool, acetona e percloroetileno). Sua absorção de água e resina é semelhante às espumas de PVC e PU (NASSEH, 2007).

4.2.1.3 Núcleo utilizado

Durante o processo experimental, o material do núcleo utilizado na confecção de todos os corpos de prova foi o mesmo. Estabeleceu-se um padrão na seleção do material, a diferenciação ocorreu somente na espessura, ou seja, na quantidade de camadas.

O material em questão é uma espuma de PVC rígida, Divinycell, com uma densidade de 60 kg/m^3 , ideal para estruturas sanduíches com alta rigidez.

O material adquirido da E-composites, Divinycell H60, possui uma estrutura química que oferece excelentes propriedades mecânicas a um baixo peso. Amplamente utilizado, o produto possui eficiência comprovada em diversas áreas de aplicação, incluindo área náutica (lazer, militar e comercial), transporte terrestre, energia eólica, engenharia civil e outros mercados industriais. O Divinycell H60 é

ideal para aplicações sujeitas a fadiga e impacto. Outras vantagens incluem consistência de qualidade, excelente adesividade, excelente resistência química, baixa absorção de água e bom isolamento acústico e térmico. O Divinycell H60 é compatível com a maioria das resinas e processos de fabricação, com propriedades mecânicas e características técnicas listadas nas Figuras 6 e 7, respectivamente.

Propriedade	Teste	Unidade	Nominal	Mínimo
Resistência à compressão ¹	ASTM D 1621	MPa	0,9	0,7
Módulo de compressão ¹	ASTM D1621-B-73	MPa	70	60
Resistência à tração	ASTM D 1623	MPa	1,8	1,5
Módulo de tração	ASTM D 1623	MPa	75	57
Resistência ao cisalhamento	ASTM C 273	MPa	0,76	0,63
Módulo de cisalhamento	ASTM C 273	MPa	20	16
Deformação de cisalhamento	ASTM C 273	%	20	-
Densidade	ISO 845	kg/m ³	60	-

Todos os valores medidos a +23° C.

Valor Nominal é o valor médio da propriedade mecânica na densidade determinada.

Valor Mínimo é a propriedade mecânica mínima garantida que o material possui, independente de sua densidade.

¹ Propriedades medidas perpendicularmente ao plano.

Figura 6 – Propriedades mecânicas do Divinycell H60.

Fonte: http://www.marinecomposites.com.br/wp-content/uploads/datasheets/divinycell_h60.pdf

Características ¹	Unidades	Valor
Variação de densidade	%	±10
Condução térmica ²	W/(m-K)	0,029
Coefficiente de expansão linear	x10 ⁻⁶ /°C	40
Temperatura de distorção térmica	°C	+125
Temperatura de operação	°C	-200 a +70
Temperatura máxima de processamento	°C	+90
Fator de dissipação	-	0,0003
Constante dielétrica	-	1,06
Coefficiente de Poisson ³	-	0,4

¹ Valores típicos

² Condução térmica a 20° C

³ Desvio padrão de 0,045

A temperatura de operação é usualmente de -200° C a +70° C. O material pode ser utilizado para estruturas sanduíches e para uso em áreas externas.

A temperatura máxima de processamento depende do tempo, pressão e condições do processo.

Figura 7 – Características técnicas do Divinycell H60.

Fonte: http://www.marinecomposites.com.br/wp-content/uploads/datasheets/divinycell_h60.pdf

4.2.2 Adesivos

A união das faces com o núcleo pode ser por ligação adesiva ou mecânica, e possui um papel fundamental de transferência de carga, prevenindo a delaminação da estrutura (SAHA, 2008).

Essa ligação não deve ser o elemento menos resistente do painel, visto que os materiais adesivos devem ter suas propriedades mecânicas tão boas ou até mesmo melhores que as do material do núcleo.

4.2.2.1 Disponibilidade dos adesivos

De acordo com Gagliardo (2008), os adesivos são disponibilizados em diferentes formas, como líquidas, pastas, pós e filmes. Sua aplicação pode ser realizada através do auxílio de um spray, rolo, espátula ou outras formas manuais.

4.2.2.2 Exemplos de adesivos

Os adesivos mais utilizados na fabricação de estruturas sanduíches são os à base de epóxi, cuja principal característica é sua incrível adesão às mais variadas superfícies.

A maioria dos adesivos a base de resina epóxi são bicomponentes, entretanto pode-se adicionar agentes de cura latente para produzir adesivos monocomponentes.

De acordo com Gagliardo (2008), a boa capacidade das resinas epóxi de molhar superfícies diversas, contribui para a sua esplêndida adesão, considerando contração desprezível durante o processo de cura. O autor ainda afirma que através da modificação das resinas epóxi com flexibilizantes, plastificantes, cargas inertes e outros aditivos, propriedades adesivas específicas podem ser intensificadas com a finalidade de simplificar, reforçar ou melhorar o seu desempenho.

4.2.2.3 Adesivo utilizado

Esse subtópico tem como objetivo apresentar o adesivo utilizado no processo experimental.

O sistema de resina epóxi de alta performance e baixa viscosidade AR 260, juntamente com o endurecedor AH260, são ideias para laminação manual ou infusão a vácuo.

De acordo com o fornecedor, E-composites, o sistema foi desenvolvido para uma proporção de mistura 100:26, ou seja, a cada 100 g da Resina Epóxi AR 260 utiliza-se 26 g do Endurecedor AH 260.

A viscosidade de um líquido é um parâmetro muito importante a ser analisado, principalmente em laminações a vácuo. Além de auxiliar na aplicação da mistura, uma boa viscosidade garante melhor homogeneização. A Figura 8(a) apresenta um gráfico com as medições de viscosidade em função do tempo da resina epóxi e endurecedor (AR/AH 260) já formulada, realizada à temperatura de 28 ± 2 °C, de acordo com Stephanie Gonçalves Nunes em sua tese de Doutorado.

Pôde-se dividir a curva em três estágios. No primeiro momento, 0-15 min, observa-se que há uma queda na viscosidade da resina devido ao início da reação

que é exotérmica, fazendo com que a resina aqueça e sua viscosidade diminua. Entre 15-40 min, pode-se observar que a viscosidade da resina se mantém aproximadamente constante. O comportamento posterior da viscosidade da resina foi crescente, pois, à medida que a resina começa a curar, sua viscosidade tende a aumentar exponencialmente até sua completa reticulação. (NUNES, 2018).

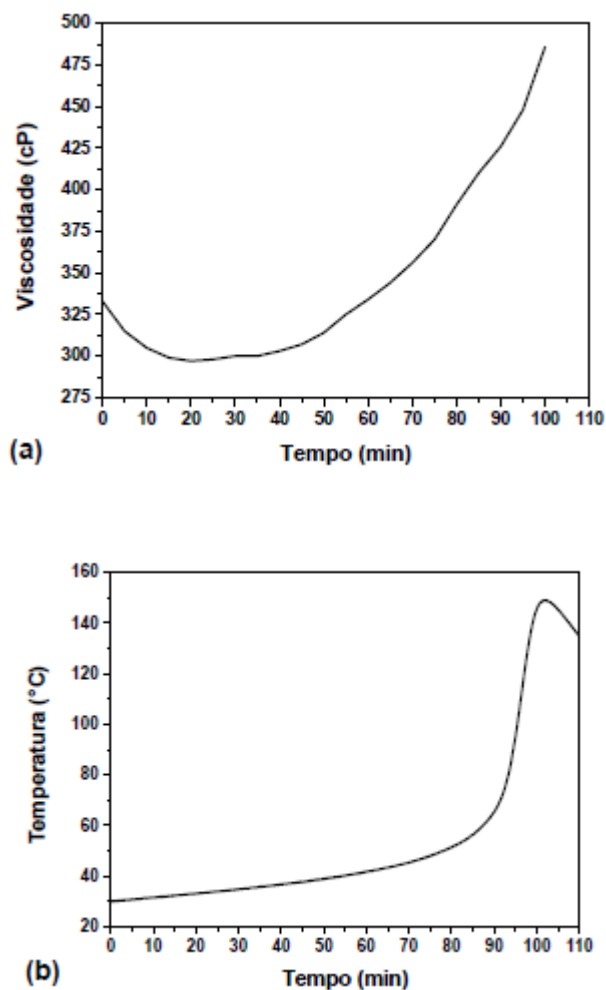


Figura 8 – Viscosidade em função do tempo (a) e a curva exotérmica (b) da resina epóxi e endurecedor AR/AH 260.

Fonte: Nunes (2018)

A Figura 8(b) apresenta a curva exotérmica de temperatura da resina epóxi AR/AH 260. Pode-se observar que a temperatura de máxima liberação de calor no processo de cura da resina epóxi AR/AH 260, a uma temperatura inicial de 30 °C, foi de aproximadamente 149 °C ($t=102$ min).

Através de ensaios de tração e flexão, Stephanie Gonçalves Nunes obteve as curvas tensão x deformação, Figura 9, das amostras da mistura AR/AH 260

ensaiada. A Tabela 1 apresenta resistência e módulo de elasticidade da resina analisada. As resistências e módulos da resina epóxi utilizada na tese de Nunes se aproximam dos valores fornecidos pelo fabricante, que são de 73,8 MPa e 3,2 GPa para tração e 119,3 MPa e 2,7 GPa para flexão, respectivamente. (NUNES, 2018).

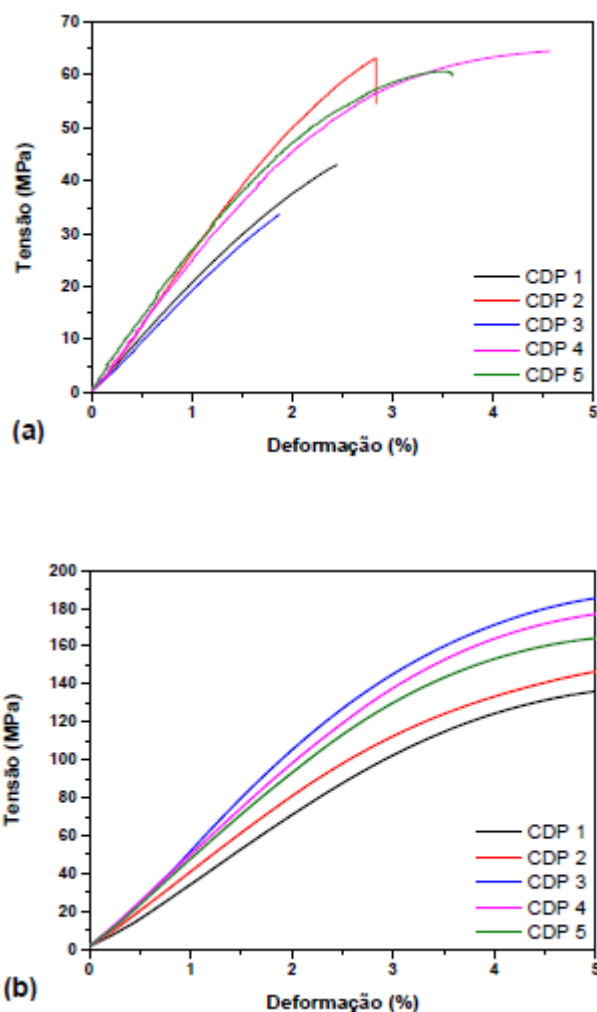


Figura 9 – Tensão x deformação obtidos em ensaios de (a) tração e (b) flexão da mistura AR/AH 260.

Fonte: Nunes (2018)

Tabela 1 – Resistência e módulo da mistura AR/AH 260, em tração e flexão

	Resistência (MPa)	Módulo (GPa)
Tração	63,2 ± 10,0	2,8 ± 0,3
Flexão	164,3 ± 20,5	4,7 ± 0,7

Além de unir as faces com o núcleo, o adesivo deve apresentar resistências mecânicas superiores as do material das faces e do núcleo.

Materiais compósitos, quando ensaiados em testes de flexão, estão sujeitos ao cisalhamento. Caso esses materiais tenham sido devidamente confeccionados, seu núcleo tende a cisalhar, ao invés do adesivo. Logo, comparando os dados da Figura 6 e da Tabela 1, é possível verificar que a mistura AR/AH 260 possui maiores resistências, tanto a flexão quanto a tração, quando comparada ao núcleo de Divinycell H60.

4.2.3 Faces

Comercialmente existem diversos materiais que são utilizados como faces de estruturas sanduíches. A Figura 10 apresenta alguns desses materiais, assim como os valores de algumas propriedades típicas.

Material	E ^(I) GPa	σ_E ^(II) MPa	ν ^(III)	ρ ^(IV) kg/m ³	Aspectos Gerais
Alumínio ^(V)					
1100-H14	70	90c ^(VI)	0,33	2.710	custo médio, resistência química
5052-H34	70	165c	0,33	2.710	custo médio, resistência a intempéries
6061-T6	70	240c,t	0,33	2.710	soldável, trabalhável alta resistência, resistência à corrosão, temperável
2024-T3	72	300t	0,33	2.710	alta resistência, resistência à corrosão, temperável
Aço carbono	200	350	0,3	7.680	baixo custo, pesado
Inox 304	190	250	0,24	7.680	alto custo, resistência à corrosão
Woven grafite/epóxi 282-F155	55	60	0,1	1.540	
Fita grafite/epóxi TXX145-F155	120	1.300	0,1	1.690	alto custo, leve
Woven kevlar/epóxi K49-285-F155	28	200c	≈0	1.400	leve, baixa resistência à compressão
Fita kevlar/epóxi	65	1.100t 250c	≈0	1.400	custo médio
Vidro/poliéster	6,5	100	0,14	1.400	custo bastante baixo
Vidro woven roving/poliéster	12	250	0,14	1.400	custo bastante baixo
Woven glass/epóxi 1581-F155	25	450	0,14	1.900	baixo custo, resistente
Fita vidro/epóxi T25- 285-F155	50	850	0,14		custo médio, resistente
Compensado/pinho	12	20	0,1	600	baixo custo
Madeira endurecida e temperada para 1000kg/m ³	4,5	25	0,1	1.000	baixo custo

Figura 10 – Propriedades típicas de faces de sanduíches.

Fonte: Mendonça (2005)

Além dos materiais descritos na Figura 10, existem outros materiais como são os casos das fibras de vidro e carbono e do tecido de *Klevar*®.

Apesar das fibras de vidro serem mais comuns, as fibras de carbono oferecem, geralmente, resistências a tração e compressão superiores aos da fibra de vidro, além de maior capacidade de flexão e menor peso.

4.3 ENSAIOS MECÂNICOS

O objetivo desta seção é apresentar os conceitos dos ensaios mecânicos monótonos de flexão nas quais foram utilizados para caracterizar os materiais compósitos analisados neste trabalho.

4.3.1 Ensaio de Flexão

De acordo com a tese de Daniel Pereira, o ensaio de flexão consiste na aplicação de uma carga crescente em determinados pontos de uma barra de geometria padronizada, a qual pode estar na condição bi apoiada ou engastada em uma das extremidades. Mede-se o valor da carga aplicada pela deformação máxima sofrida. Em materiais dúcteis, quando sujeitos a esse tipo de carga, por serem capazes de absorver grandes deformações, não fornecem resultados quantitativos qualificados para o ensaio de flexão. Portanto, o ensaio deve ser aplicado para materiais de maior rigidez. (PEREIRA, 2017).

Através dos ensaios de flexão é possível obter propriedades como tensão de ruptura em flexão (σ_f) e módulo de elasticidade em flexão (E_f). Geometria da seção, velocidade de aplicação da carga, defeitos superficiais e até mesmo a temperatura podem variar os resultados.

Dentre os ensaios de flexão, três se destacam. Existe o ensaio de três pontos, em que o corpo de prova a ser testado é apoiado nas extremidades e a carga é aplicada no centro do comprimento do mesmo; o ensaio em quatro pontos, na qual o corpo de prova a ser testado é bi apoiado nas extremidades e a carga é aplicada em dois pontos na região central do comprimento, separadas por uma distância padronizada por normas; e o método de engaste, que consiste em engastar uma das extremidades e aplicar a carga na ponta oposta do engaste. (PEREIRA, 2017).

Levando em consideração que o presente trabalho busca analisar, o ensaio de flexão em três pontos será comentado a seguir. A Figura 11 apresenta um esquemático do ensaio de flexão em três pontos. O ensaio consiste na aplicação de uma carga P no centro do corpo de prova, apoiado em dois pontos. A carga é aplicada a partir de um valor zero e aumentada lentamente até a ruptura do corpo de prova ou até um instante desejado. O valor da carga em relação ao deslocamento do ponto central consiste na resposta do ensaio. Este tipo de ensaio é aplicado à materiais frágeis, ou de elevada dureza, como o caso de compósitos. Os principais parâmetros obtidos por este ensaio são a tensão de ruptura em flexão (σ_f) e o módulo de elasticidade em flexão (E_f).

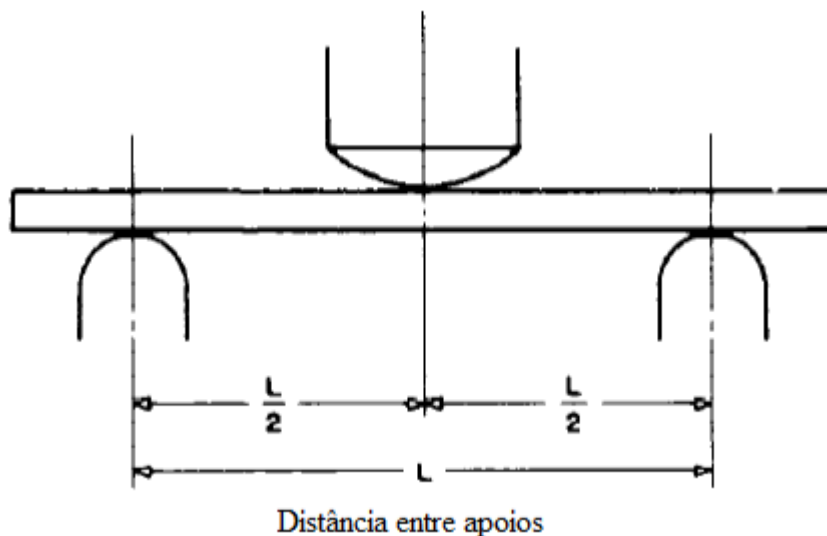


Figura 11 – Esquemático do ensaio de flexão de três pontos.

Fonte: Pereira (2017)

As equações de conversão da carga e deslocamento para tensão de flexão e deformação de flexão, assim como o módulo de elasticidade à flexão serão discutidas no capítulo 7 na seção *Análise dos Dados*.

Entretanto, segundo Daniel Pereira, a curva esperada para cada corpo de prova é apresentada na Figura 12. As curvas típicas do ensaio podem ser do tipo a, quando a ruptura ocorre antes da deformação das fibras; do tipo b, quando há deformação das fibras e a ruptura 5% de deformação após este ponto; e do tipo c, quando não há deformação das fibras e nem ruptura, neste caso o ensaio deve ser interrompido e o valor máximo registrado. (PEREIRA, 2017).

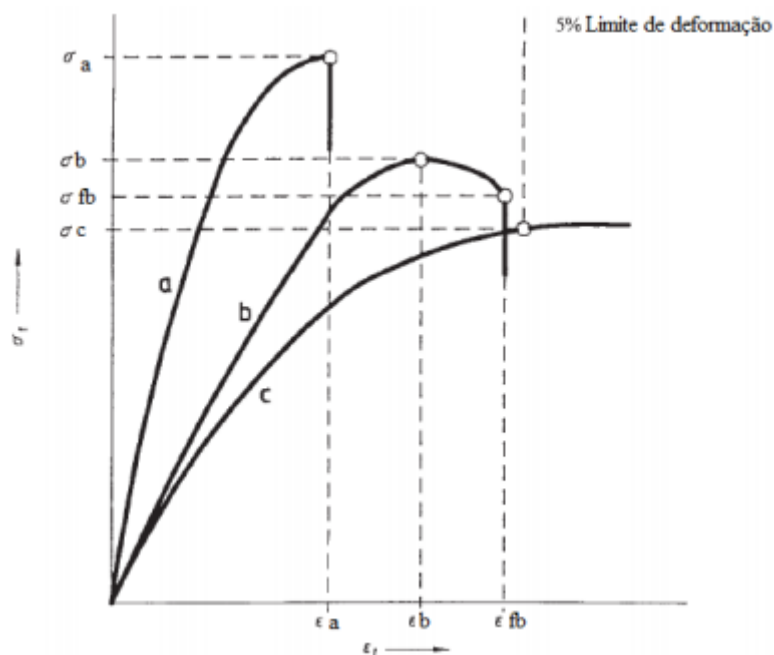


Figura 12 – Curvas típicas de ensaio de flexão em três pontos em materiais compósitos.

Fonte: Pereira (2017)

Num primeiro instante, o corpo de prova que está sendo ensaiado por flexão sofre deformação elástica, ou seja, quando se encerra a aplicação da carga, o corpo que se encontra deformado tende a voltar ao seu estado inicial sem demonstrar qualquer tipo de deformação permanente.

Após o instante de ápice da curva, a deformação provocada no corpo passa a ser a plástica. Essa deformação é permanente, ou seja, quando a carga é retirada, o corpo de prova não retorna as características iniciais.

5 MATERIAIS

5.1 MATERIAIS FUNDAMENTAIS

Os materiais fundamentais adquiridos para execução da laminação a vácuo dos compósitos, foram:

- Placa de vidro (400 x 500 x 8 milímetros);
- Cera desmoldante a base de Carnaúba (Mold Release Wax da Tec Glaze-N);
- Peel Ply;
- Tecido de fibra de carbono biaxial CBX200 (2 metros);
- Resina Epoxy AR260 e Endurecedor AH260 (1 quilograma);
- Núcleo de Divinycell H60 GSP (800 x 600 x 6 milímetros);
- Rolo de espuma;
- Tela de sombreamento (sombrite);
- Tubo espiral (organizador de fios);
- Plástico de PVC transparente;
- Massa calafetar.

Outros matérias, ferramentas e maquinários essenciais utilizados durante o experimento como paquímetro, balança de precisão, serra-fita de bancada, bomba de vácuo com mangueira e Máquina Universal de Ensaio; não necessitaram aquisição, uma vez que foram requisitados ao Departamento de Química e de Materiais da UTFPR-Londrina, e suas utilizações e manuseios foram acompanhadas por técnicos responsáveis pelos departamentos.

Todos os materiais citados são ilustrados e descritos, com suas respectivas funções e finalidades, no tópico 6.

5.2 MATERIAIS AUXILIÁRES

Os materiais adquiridos para auxiliar a confecção dos corpos de prova, que não demonstraram papel essencial na fabricação, e suas respectivas funções são:

- Espátula: auxiliar no desmolde dos corpos de prova;
- Tesoura: cortar o tecido de fibra de carbono, plástico PVC transparente, Peel Ply e sombrite;
- Fita crepe: delimitar a região de aplicação da cera desmoldante;
- Papel pardo: proteger a bancada contra a resina e evitar a contaminação dos materiais contra impurezas;
- Régua: aferir as dimensões dos materiais;
- Estilete: cortar o núcleo de Divinycell;
- Trena: aferir as dimensões dos materiais;
- Pano: aplicar a cera.

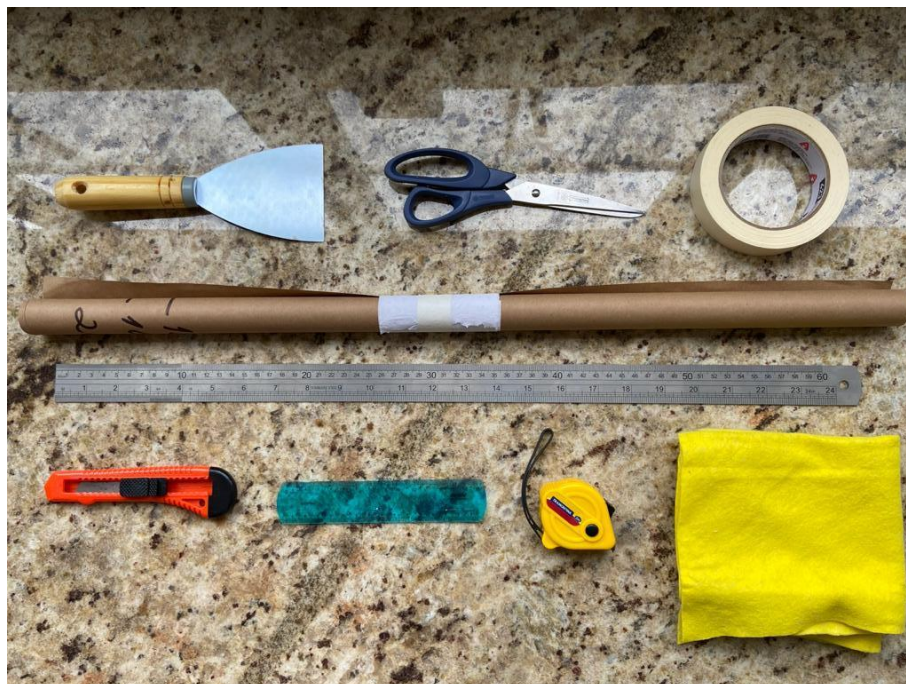


Figura 13 – Materiais auxiliares.

Fonte: Autoria própria

5.3 MATERIAS PARA SEGURANÇA

Os materiais e equipamentos de segurança, conhecidos como EPI's, utilizados para manter a segurança, foram:

- Jaleco;

- Máscara;
- Óculos de Proteção;
- Luvas de Látex;
- Luvas de Borracha Nitrílica.



Figura 14 – Equipamentos de Proteção Individual.

Fonte: Autoria própria

Conhecendo a toxicidade da resina e do perigo da mesma em contato com a pele, uma medida de segurança extra foi adicionada. A resina, quando em contato com a pele, pode causar alergias ou até mesmo feridas e queimaduras. A fim de evitar que isso acontecesse foi mantido por perto uma garrafa contendo vinagre. Lavar com água, além de não ajudar, aumenta a molhabilidade da resina e favorece sua penetração na pele. Logo, recomenda-se que lave apenas com vinagre.



Figura 15 – Vinagre.

Fonte: Autoria própria

6 METODOLOGIA

6.1 CORPOS DE PROVA

6.1.1 Preparação do Molde ou Superfície

Antes da preparação do molde, é necessário determinar qual a melhor opção de molde para o trabalho a ser realizado. Tendo em vista que o presente trabalho visa a confecção de uma grande quantidade de corpos de prova, para se obter uma maior padronização, foi utilizado um molde plano, mais especificamente uma placa de vidro. A escolha de uma superfície plana proporciona menor complexidade de fabricação, maior facilidade do desmolde e simplicidade do corpo de prova; e a escolha do vidro como material para o molde é justificada pelo fato das placas de vidro apresentarem um alto grau de qualidade e superfícies planas.

O molde utilizado pode ser observado na Figura 16, com 400 mm de largura, 500 mm de comprimento e 8 mm de espessura.



Figura 16 – Molde de vidro.

Fonte: Autoria própria

O primeiro passo foi delimitar a região que recebe a cera desmoldante da região, que durante a laminação a vácuo, recebe a massa calafetar, para que essa não seja contaminada pela cera e adere adequadamente a placa de vidro.

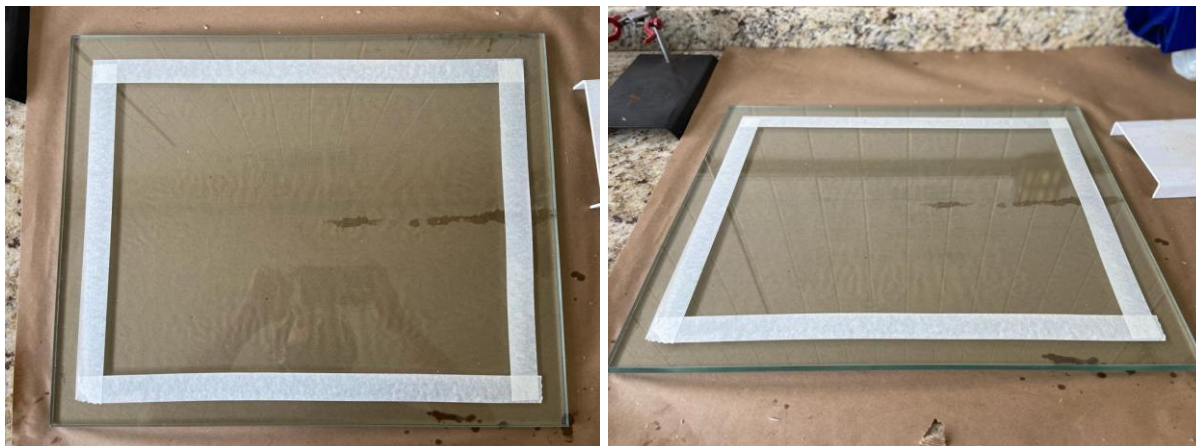


Figura 17 – Separação das regiões.

Fonte: Autoria própria

Com as regiões delimitadas, a parte interna da demarcação recebeu mãos da cera desmoldante a base de Carnaúba (Mold Release Wax da Tec Glaze-N) por meio de uma flanela (pano), ilustrada na Figura 18. De acordo com o fornecedor da cera, são necessárias 5 mãos da mesma, com intervalos de 30 minutos entre elas.



Figura 18 – Cera desmoldante da Tec Glaze-N.

Fonte: Autoria própria

A Figura 19 ilustra o momento exato da placa de vidro após receber 5 mãos de cera.



Figura 19 – Molde com 5 aplicações de cera.

Fonte: Autoria própria

6.1.2 Laminação Manual

Antes de iniciar o processo de Laminação Manual, é aconselhável preparar todo o material que será utilizado para agilizar o processo, uma vez que a resina possui um tempo de trabalho e manuseio fixo. Portanto, como primeiro passo da laminação, o tecido de fibra de carbono, o núcleo de Divynycell e o Peel Ply foram devidamente cortados.

O tecido de fibra de carbono utilizado na confecção dos corpos de prova foi o CBX200, adquirido da E-composites. O CBX200 é um tecido biaxial de fibra de carbono 50 k, com 200 g/m² e trama +45/-45, de acordo com o fornecedor. Os 2 m² adquiridos desse tecido foram recortados em partes iguais, com 140 x 120 mm.



Figura 20 – Tecido fibra de carbono biaxial CBX200.

Fonte: Autoria própria

O núcleo de Divinycell H60 GSP, também adquirido da E-composites, é uma espuma de PVC rígida com 60 kg/m^3 , ideal para estruturas sanduíches com alta rigidez. Uma placa lisa de $800 \times 600 \text{ mm}$ e 6 mm de espessura foi recortada em partes menores e iguais, com $140 \times 120 \text{ mm}$.

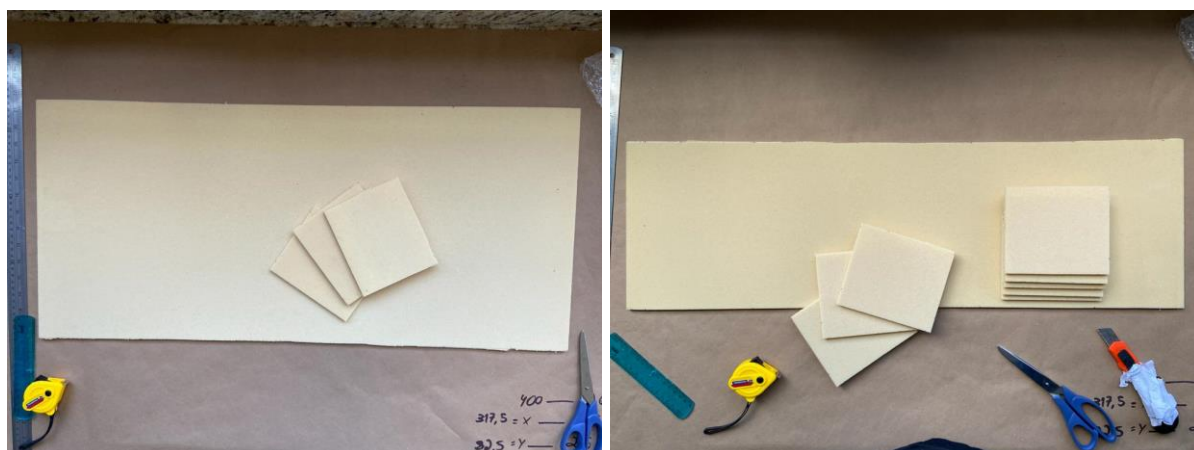


Figura 21 – Divinycell H60 GSP.

Fonte: Autoria própria

Peel Ply é um tecido desmoldante, geralmente de poliamida, que promove uma adesão secundária a fibra de carbono. A função desse tecido é auxiliar na remoção do excesso de resina presente na peça laminada durante a aplicação do vácuo, além de promover melhor acabamento superficial da peça. No presente trabalho foi utilizado um tecido 100% poliéster, recortado um pouco maior que a fibra

e o núcleo, visto que precisa ficar sobrando tecido ao redor da peça para facilitar o desmolde, entretanto, menor que a região demarcada pela fita crepe.

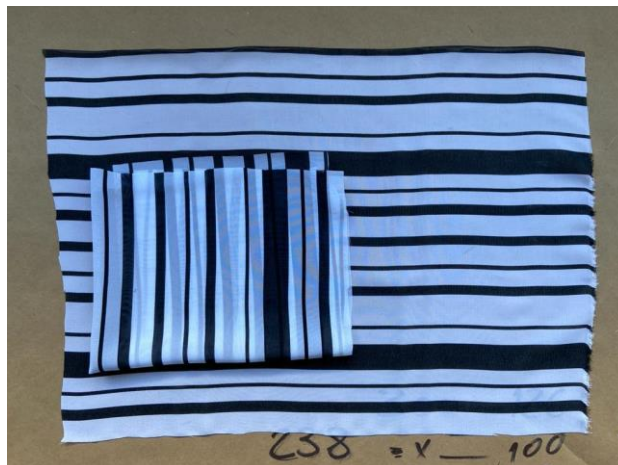


Figura 22 – Tecido 100% poliéster (Peel Ply).

Fonte: Autoria própria

Além dos recortes dos materiais acima, a mistura de resina a ser aplicada foi preparada, seguindo a proporção informada pelo fornecedor de 100:26, ou seja, utiliza-se 100 g da Resina Epoxy AR260 para 26 g do Endurecedor AH260. Uma balança de precisão foi utilizada para garantir a medida adequada, e após a medição, a mistura foi devidamente misturada a fim de garantir que toda resina entre em contato com o endurecedor e reaja adequadamente.

A quantidade de mistura de resina e endurecedor varia de acordo com a quantidade de faces e núcleos a serem laminados. Recomenda-se que se aplique a mesma proporção 1:1, ou seja, 100 g de fibra de carbono requer 100 g de mistura de resina com endurecedor. O núcleo, por se tratar de uma espuma de PVC e absorver mais resina, recomenda-se que se aplique a proporção 1:2, ou seja, 100 g de núcleo requer 200 g de mistura.



Figura 23 – Resina Epoxy AR260 e Endurecedor AH260.

Fonte: Autoria própria

Após a preparação de todo material, iniciou-se a laminação manual. Primeiramente, utilizando um rolo, Figura 24, acrescentou-se a mistura de resina sobre as cinco camadas de cera no interior da demarcação. Em seguida, posicionou-se o Peel Ply sobre a camada de resina e mais uma vez com o rolo adicionou-se resina.



Figura 24 – Rolo de espuma.

Fonte: Autoria própria

Com o Peel Ply encharcado, posiciona-se a primeira camada do tecido de fibra de carbono, e sobre a fibra foram mais uma mão de resina. As quantidades de camadas de fibra de carbono variaram de acordo com o corpo de prova, entre duas camadas e 8 camadas.

Após a adição adequada de camadas de fibra de carbono, foi a vez do núcleo. Entretanto, visto que a espuma de PVC absorve uma grande quantidade de resina, uma quantidade superior da mesma foi adicionada, garantindo assim que toda espuma receba a resina. A quantidade de núcleo de Divinycell também variou de acordo com o corpo de prova, entre 1 e 3 camadas.

Posteriormente, adicionou-se novas camadas do tecido de fibra de carbono, a mesma quantidade que foi adicionada sob as camadas de núcleo.

Encerrando a laminação manual, uma segunda camada de Peel Ply é posicionada sobre a última face.

Visto que, durante a laminação a vácuo, uma grande quantidade da resina epóxi é retirada da peça, em alguns casos é necessário um tecido que absorva esse excesso de resina, esse é o papel do filme absorvente Breather. Entretanto, visto que se trata de corpos de prova relativamente pequenos, a necessidade do filme absorvente é dispensada. O próprio Peel Ply desempenha a função de separar o inferior quanto na parte superior, logo a necessidade de adicioná-lo nas duas faces.

6.1.3 Laminação a Vácuo

Para auxiliar e disseminar o vácuo por toda a peça igualmente, posicionou-se uma camada de sombrite sobre o Peel Ply. A tela de sombreamento dificulta que o plástico transparente de PVC, no momento do vácuo, sobreponha por completo a peça. Dessa forma o ar encontra canais para percorrer quando a bomba é ligada, impedindo que forme bolhas de ar de preso.



Figura 25 – Tela de sombreamento.

Fonte: Autoria própria

Juntamente com o sombrite, foi adicionado ao redor de toda peça, mas ainda dentro das demarcações, um tubo espiral, conhecido como *organizador de fios*. A função desse tudo é semelhante do sombrite. A mangueira possui uma de suas extremidades no interior desse tudo, dessa maneira o ar é puxado por igual, independente da extremidade dos corpos de prova.



Figura 26 – Tubo espiral (organizador de fios).

Fonte: Autoria própria

Por fim, adicionou-se o filme de vácuo, cobrindo e selando toda a região limitada da peça, com exceção da região por onde sai a mangueira de vácuo. A fixação e vedação do filme de vácuo será proporcionada pela massa calafetar,

lembrando que essa massa desse ser colada na placa de vidro ao redor da demarcação de fita crepe, onde não há a cera da Carnauba.



Figura 27 – Plástico de PVC transparente.

Fonte: Autoria própria



Figura 28 – Massa calafetar.

Fonte: Autoria própria

Uma das extremidades da mangueira permaneceu no interior do tubo espiral sob o plástico de PVC, como descrito anteriormente, a outra extremidade foi ligada ao separador de resina. Esse equipamento possui a função de separar o excesso de resina que percorre a mangueira, proveniente do corpo de prova, e evitar que a resina entre na bomba. Caso não seja utilizado esse separador de resina, a bomba pode ser danificada.



Figura 29 – Separador de resina.

Fonte: Autoria própria

Na figura anterior, a mangueira azul corresponde a mangueira que liga o separador ao interior do tubo espiral, em contrapartida, a mangueira cinza conecta o separador a bomba.

Por fim, após verificar que as mangueiras estão bem conectadas, ligou-se a bomba. Com a bomba ligada é possível verificar se há alguma região entre a massa calafetar e o plástico de PVC que não está devidamente vedada.



Figura 30 – Bomba

Fonte: Autoria própria

É possível verificar, caso haja alguma entrada de ar, observando o manômetro da bomba.



Figura 31 – Manômetro da bomba.

Fonte: Autoria própria

Sem vazamento o ponteiro informa, aproximadamente, -500 mmHg, quando há vazamento o ponteiro decai, aferindo uma pressão próxima de -200 mmHg.

Após a bomba ser ligada, ele deve permanecer nesse estado por 6 horas. Durante o experimento, verificou-se um grande aquecimento da bomba. A fim de evitar qualquer imprevisto como danificação da bomba, optou-se por, de tempos em tempos, molhar um pano e sobrepor a bomba, com intuito de reduzir seu aquecimento.



Figura 32 – Bomba coberta por um pano molhado.

Fonte: Autoria própria

De acordo com o referencial bibliográfico, sabe-se que a mistura de Resina Epoxy AR260 com Endurecedor AH260 necessita de calor para reagir e iniciar o procedimento de cura da resina, endurecimento. Visto que não foi possível realizar o experimento no interior de uma estufa ou em outro ambiente com a temperatura controlada, optou-se por utilizar um soprador de ar quente sobre os corpos de prova, a fim de aumentar a temperatura.



Figura 33 – Soprador de ar quente.

Fonte: Autoria própria

O soprador, juntamente com a bomba, permaneceu ligado durante 6 horas contínuas, com uma temperatura de ar saindo do bocal do Soprador igual a 200 °C.

A Figura 34, abaixo, ilustra o exato momento em que a laminação a vácuo foi aplicada.



Figura 34 – Laminação a vácuo.

Fonte: Autoria própria

A Figura 35, abaixo, ilustra uma visão geral do experimento.



Figura 35 – Visão geral do experimento.

Fonte: Autoria própria

6.1.4 Desmolde

Após 6 horas de funcionamento da bomba e do soprador de ar quente, desligou-se ambos.

O procedimento de desmolde só ocorreu após o decorrer de 24 horas após o início do experimento, a fim de garantir que toda mistura de resina e endurecedor cure adequadamente.

O primeiro passo do desmolde equivale a retirada do plástico de PVC transparente, juntamente com a massa calafetar. Ambos não demonstraram nenhum tipo de resistência.

A peça como um todo foi facilmente retirada da placa de vidro, em função da cera aplicada no início do experimento.



Figura 36 – Desmolde.

Fonte: Autoria própria

Por outro lado, a tela de sombreamento, por ter ficado em contato com a resina excedente retirada, apresentou uma grande resistência no momento de sua remoção. A resina endureceu ao redor do sombrite e dificultou bastante sua retirada, foi necessário utilizar ferramentas como alicate e alicate de pressão para sua remoção.

Após a remoção da tela de sombreamento, o Peel Ply foi removido, também apresentando uma certa resistência.

6.1.5 Recorte e Acabamento do Corpo de Prova

Foram confeccionadas 8 placas em duas levadas de fabricação, com características diferentes entre elas em relação a quantidade de fibras e núcleos. Cada placa, de 140 x 120 mm, foi recortada em 3 partes iguais, de 100 x 40 mm, dando a origem aos corpos de provas. Tal procedimento foi realizado utilizando-se de uma serra-fita de bancada, com uma serra de pequenos dentes e alta rotação de giro.



Figura 37 – Serra-fita de bancada.

Fonte: Autoria própria

Pelo fato da serra-fita possuir uma guia de corte, os corpos de prova demonstraram medições idênticas entre si, em relação a largura e comprimento.

A Figura 38, abaixo, ilustra corpos de prova com 6 camadas de fibra de carbono por face e 2 camadas do núcleo de Divinycell de 6 mm, equivalendo a um núcleo de 12 mm.

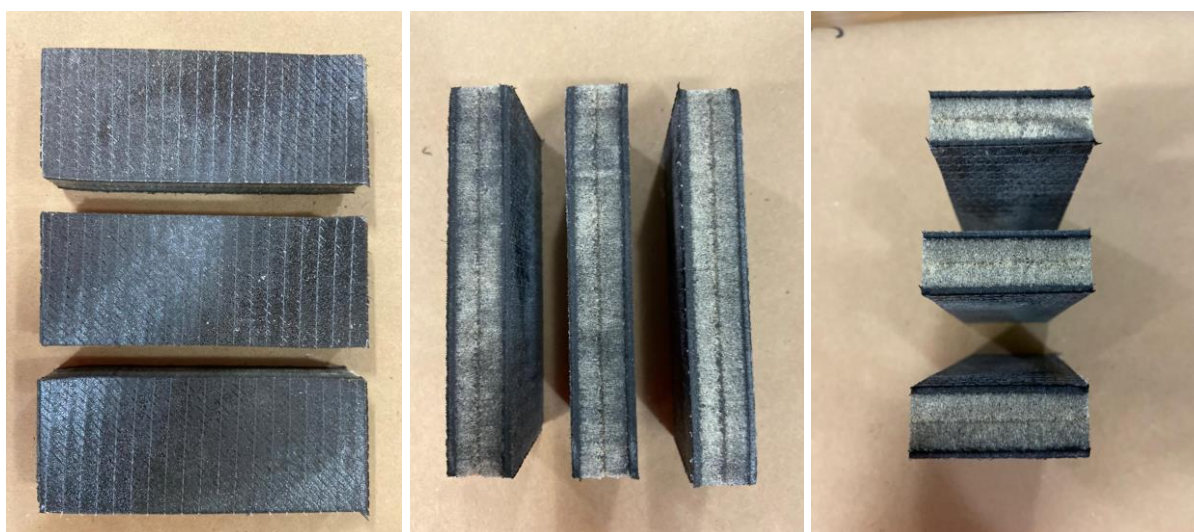


Figura 38 – Corpos de prova.

Fonte: Autoria própria

6.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Inicialmente, o ensaio de flexão em três pontos seria realizado de acordo com a norma ASTM D790. Na qual a espessura do corpo de prova é essencial para o ensaio pois ela é responsável por determinar a distância entre os pontos de apoio na máquina e a velocidade do ensaio.

A distância entre apoios, de acordo com a norma, é determinada pela Equação 1 apresentada a seguir.

$$L = 16 * d \quad (1)$$

Onde, L é a distância entre os suportes em milímetros e d é a espessura do corpo de prova, também em milímetros.

A velocidade de ensaio R , em milímetros por minuto, é determinada pela Equação 2.

$$R = \frac{ZL^2}{6d} \quad (2)$$

Onde, Z é a taxa de estiramento, de 0,01.

Deste modo, para cada corpo de prova o cálculo da distância entre os suportes e a velocidade do ensaio seriam realizados.

Entretanto, visto que o intuito do presente estudo é analisar o comportamento de materiais compósitos sob ensaios de flexão, apenas com a variação da espessura do núcleo e das faces, todos os outros parâmetros, como distância entre os suportes e velocidade de ensaio, foram preestabelecidos e fixados.

Todos os corpos de prova foram ensaiados com uma distância entre os suportes de 80 mm e uma velocidade de ensaio de 10 mm/min.

Os ensaios foram realizados com auxílio do Técnico Filipe de Carvalho Bernardino, utilizando uma Máquina Universal de Ensaio da Shijin WDW-100E III, presente no Lab. B006 da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Lodrina.



**Figura 39 – Máquina Universal de Ensaio da Shijin WDW-100E III.
Fonte: Catálogo da Time Group Inc.**

7 ANÁLISE DOS DADOS

Como foi citado no capítulo 6, *Metodologia*, foram fabricadas, em duas etapas de fabricação, 8 placas, de aproximadamente 140x120 mm. Todo o processo foi auxiliado pelo Técnico Ricardo Benez.

Essas placas diferiam-se entre si apenas pela quantidade de camadas de fibra de carbono por face e espessura do núcleo.

Em cada placa foi retirado 10 mm de cada lado, a fim de eliminar as imperfeições, deixando placas com dimensões de 120x100 mm. Cada uma dessas 8 placas deu origem a 3 corpos de provas iguais, de 40x100 mm.

Determinou-se uma amostragem de apenas 3 corpos de prova por configuração de estrutura sanduíche visto que é a quantidade mínima para se obter uma confiabilidade. Inicialmente, previa-se uma amostra com 6 corpos de prova, porém, como todo o experimento não recebeu nenhum tipo de auxílio e os materiais possuem um preço elevado, houve uma necessidade da redução da amostragem.

A Máquina Universal de Ensaio da Shijin WDW-100E III trabalha com 2 parâmetros enquanto realiza a flexão, sendo eles a carga aplicada e deslocamento do pistão superior, em cada instante de tempo. Os dois suportes inferiores são fixos na base da máquina, o que varia é o pistão superior que aplica uma determinada carga no centro do corpo de prova. Segue a Figura 40 abaixo, que ilustra esse processo de ensaio.

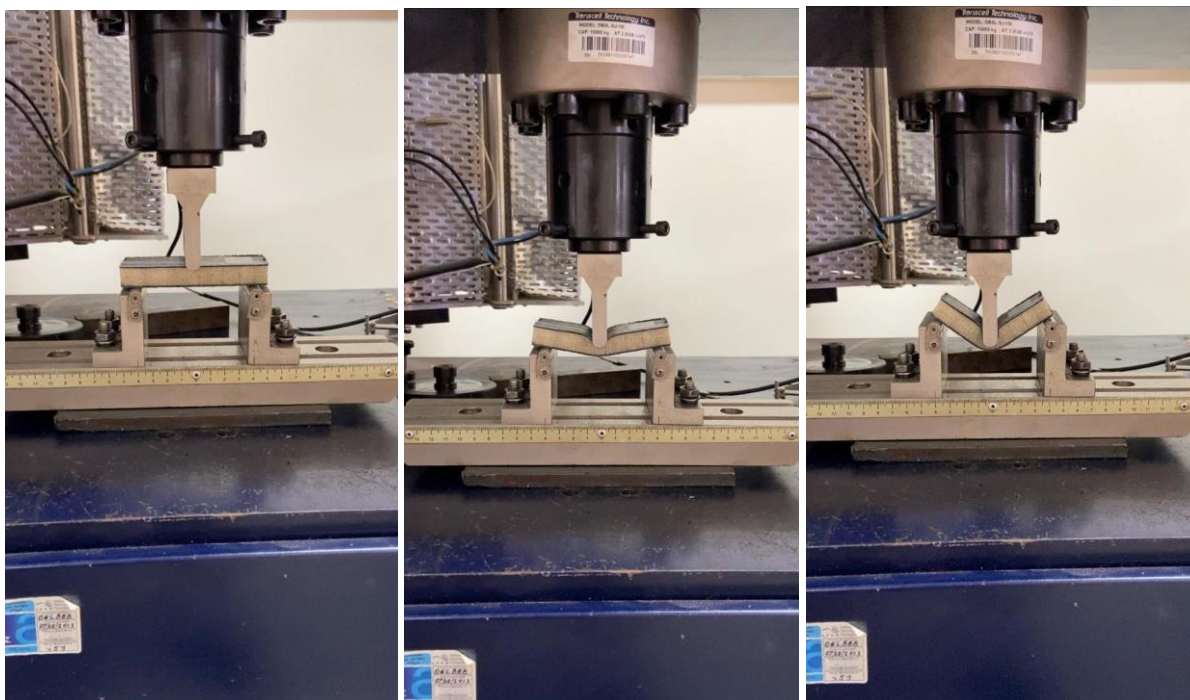


Figura 40 – Ensaio de Flexão.

Fonte: Autoria própria

Após os ensaios dos 24 corpos de prova, os dados de carga e deslocamento da Máquina de Flexão, em cada instante de tempo, de todos os corpos de prova foram compilados. Por fim os dados foram tratados com auxílio do programa Microsoft Excel®.

Segundo a ASTM D790 para se determinar a curva tensão/deformação deve-se aplicar as Equações 3 e 4 exibidas a seguir.

Para tensão,

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (3)$$

Onde, σ_f é a tensão de flexão em MPa, P é a carga aplicada em N, b é a largura do corpo de prova em mm e d é a espessura dos corpos de prova em mm. Lembrando que L , largura entre os suportes, foi preestabelecido como sendo igual a 80 mm para todos os ensaios.

Para deformação,

$$\varepsilon_f = \frac{6Dd}{L^2} \quad (4)$$

Onde, ε_f é a deformação a flexão e D o deslocamento em mm.

Deste modo, os gráficos tensão/deformação, de cada corpo de prova, foram obtidos e os módulos de elasticidade sob flexão foram analisados.

A amostragem foi dividida de acordo com a quantidade de faces e núcleos, Tabela 2, e suas análises foram feitas separadamente nos subtópicos seguintes.

Tabela 2 – Divisão dos corpos de prova

Nº	CÓDIGO	d (mm)	L (mm)	b (mm)
1	2F0N-1	1,20	80,00	40,00
2	2F0N-2	1,20	80,00	40,00
3	2F0N-3	1,20	80,00	40,00
4	2F1N-1	8,00	80,00	40,00
5	2F1N-2	8,00	80,00	40,00
6	2F1N-3	8,00	80,00	40,00
7	2F2N-1	14,75	80,00	40,00
8	2F2N-2	14,75	80,00	40,00
9	2F2N-3	14,75	80,00	40,00
10	2F3N-1	20,90	80,00	40,00
11	2F3N-2	20,90	80,00	40,00
12	2F3N-3	20,90	80,00	40,00
13	2F2N2F-1	14,95	80,00	40,00
14	2F2N2F-2	14,95	80,00	40,00
15	2F2N2F-3	14,95	80,00	40,00
16	4F2N-1	-	-	-
17	4F2N-2	-	-	-
18	4F2N-3	-	-	-
19	6F2N-1	16,80	80,00	40,00
20	6F2N-2	16,80	80,00	40,00
21	6F2N-3	16,80	80,00	40,00
22	8F2N-1	17,50	80,00	40,00
23	8F2N-2	17,50	80,00	40,00
24	8F2N-3	17,50	80,00	40,00

Importante ressaltar que como o objetivo era comparar os resultados dos ensaios de acordo com a espessura dos corpos de prova, todos os parâmetros foram fixados, com exceção da espessura. Logo, o tempo de ensaio também foi fixado em 180 segundos. Todavia, após compilar os dados, viu que não havia

necessidade analisar os dados até esse tempo predefinido. Portanto, para análise e plotagem dos gráficos utilizou-se um tempo fixo de 150 segundos.

7.1 CORPO DE PROVA - 2F0N

Os corpos de prova 2F0N são compostos por faces com dupla camada do tecido de fibra de carbono biaxial CBX200 e nenhum núcleo. Segue abaixo a ilustração gráfica do comportamento das 3 amostragens.

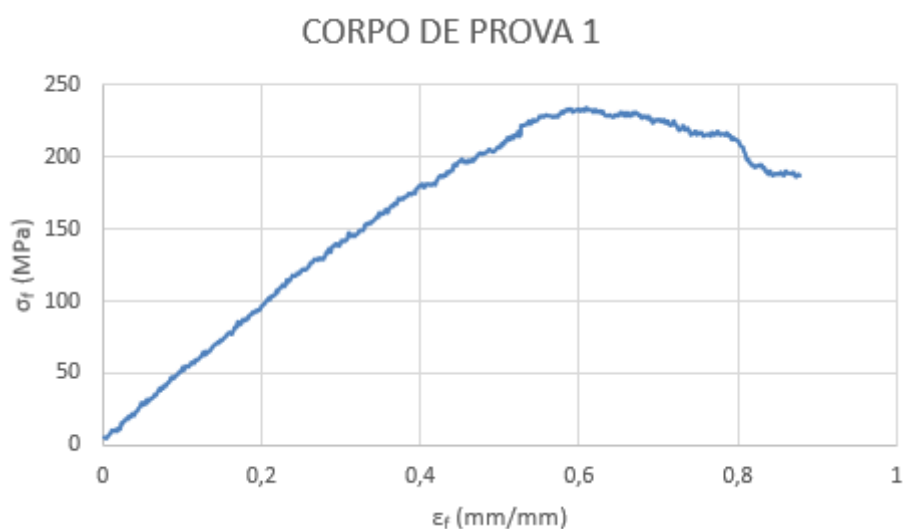


Figura 41 – Gráfico de tensão x deformação (2F0N-1).

Fonte: Autoria própria

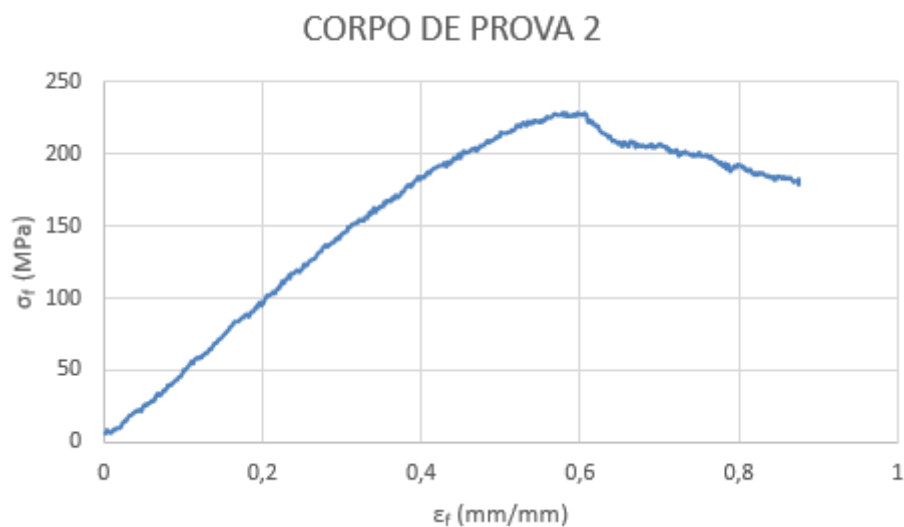


Figura 42 – Gráfico de tensão x deformação (2F0N-2).

Fonte: Autoria própria

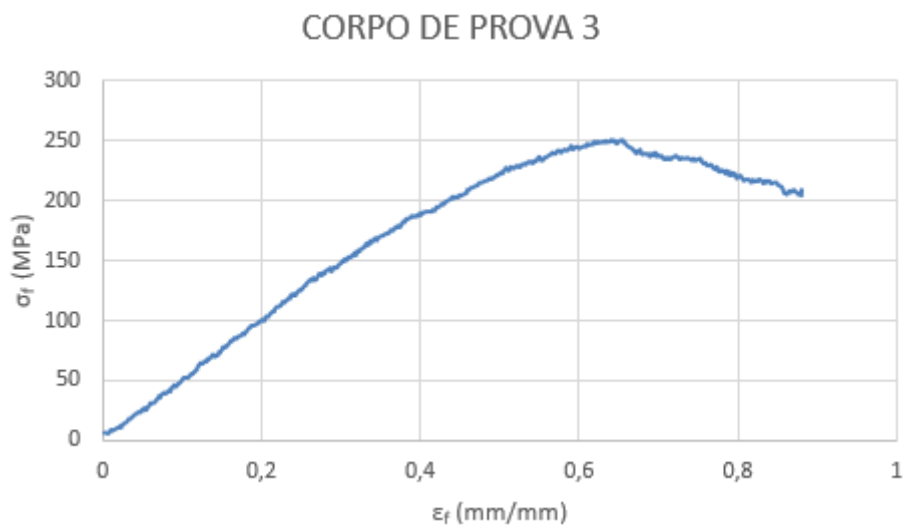


Figura 43 – Gráfico de tensão x deformação (2F0N-3).

Fonte: Autoria própria

Analisando as Figuras 41, 42 e 43, é possível notar que todos os 3 corpos de prova do tipo 2F0N resultaram em gráficos de tensão x deformação semelhantes, garantindo maior confiabilidade do processo de fabricação.

7.2 CORPO DE PROVA - 2F1N

Os corpos de prova 2F1N são compostos por faces com dupla camada do tecido de fibra de carbono biaxial CBX200 e uma camada da espuma de PVC Divinycell de 6 mm como núcleo. Segue abaixo a ilustração gráfica do comportamento das 3 amostragens.

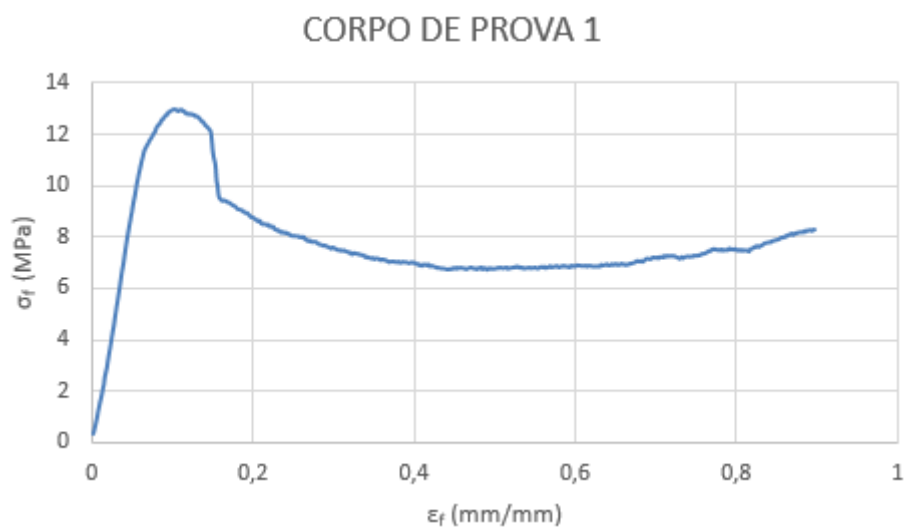


Figura 44 – Gráfico de tensão x deformação (2F1N-1).

Fonte: Autoria própria

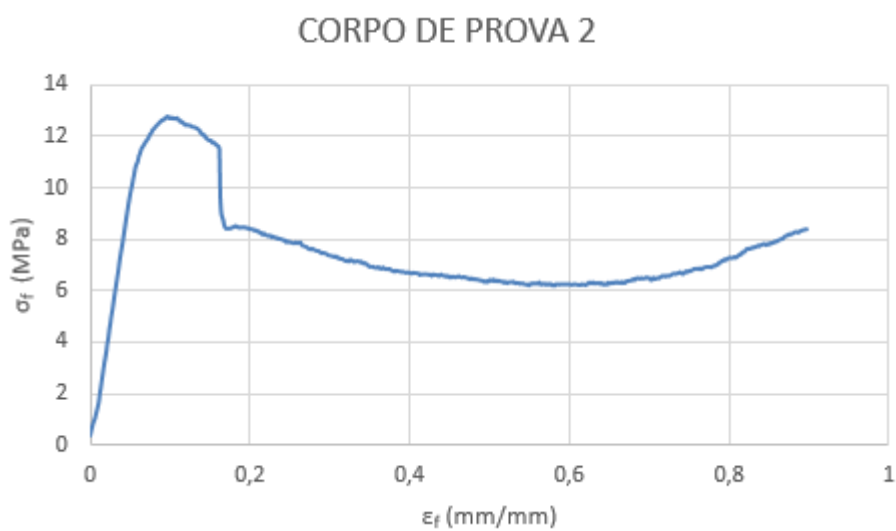


Figura 45 – Gráfico de tensão x deformação (2F1N-2).

Fonte: Autoria própria

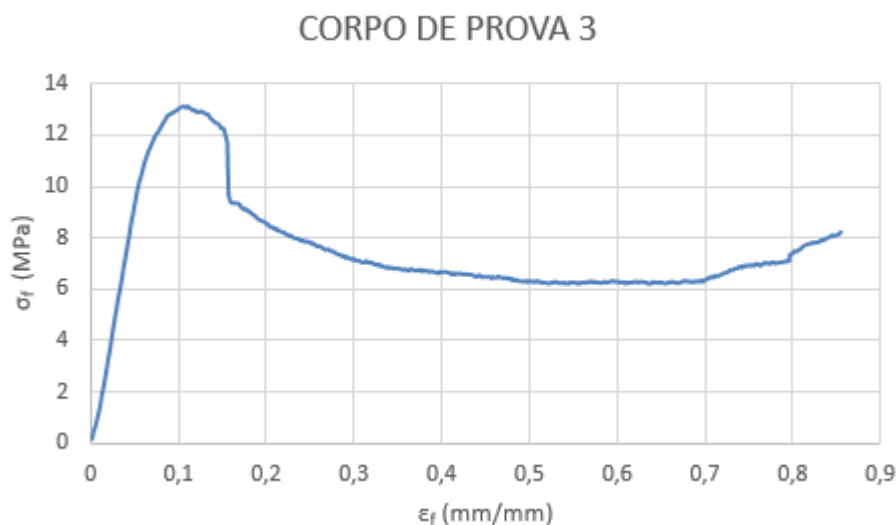


Figura 46 – Gráfico de tensão x deformação (2F1N-3).

Fonte: Autoria própria

Analisando as Figuras 44, 45 e 46, é possível notar que todos os 3 corpos de prova do tipo 2F1N também resultaram em gráficos de tensão x deformação semelhantes.

7.3 CORPO DE PROVA - 2F2N

Os corpos de prova 2F2N são compostos por faces com dupla camada do tecido de fibra de carbono biaxial CBX200 e dupla camada da espuma de PVC Divinycell de 6 mm como núcleo. Segue abaixo a ilustração gráfica do comportamento das 3 amostragens.

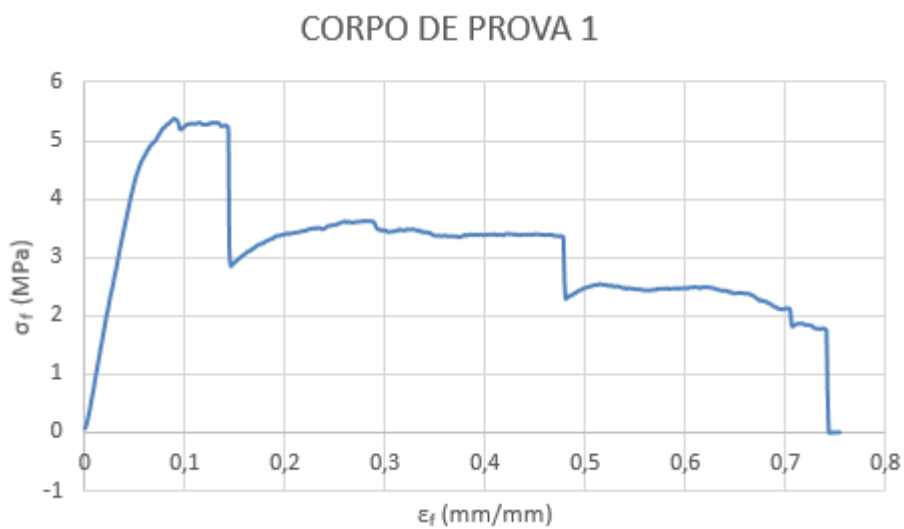


Figura 47 – Gráfico de tensão x deformação (2F2N-1).

Fonte: Autoria própria

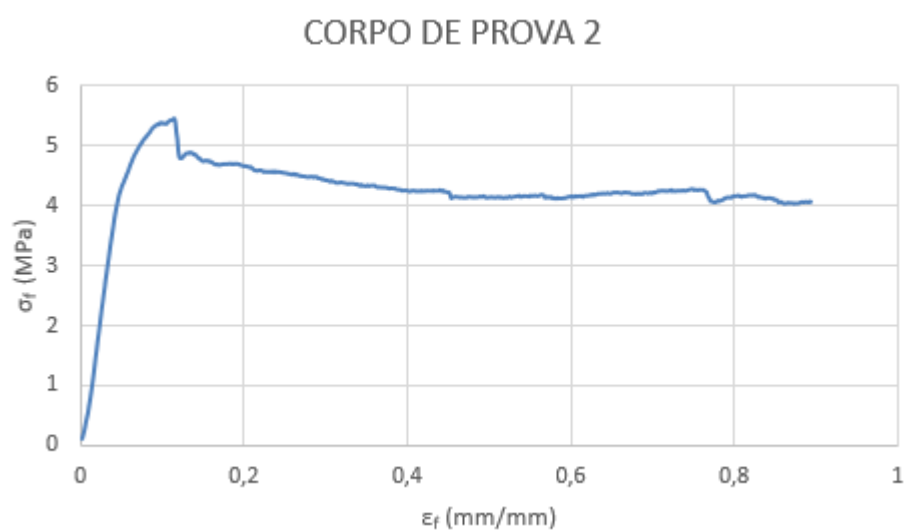


Figura 48 – Gráfico de tensão x deformação (2F2N-2).

Fonte: Autoria própria



Figura 49 – Gráfico de tensão x deformação (2F2N-3).

Fonte: Autoria própria

Na Figura 47 é possível observar uma discrepância em relação aos gráficos das Figuras 48 e 49. Logo, desconsidera-se o gráfico da Figura 47 para análise, visto que tal gráfico foge do padrão.

7.4 CORPO DE PROVA - 2F3N

Os corpos de prova 2F3N são compostos por faces com dupla camada do tecido de fibra de carbono biaxial CBX200 e tripla camada da espuma de PVC Divinycell de 6 mm como núcleo. Segue abaixo a ilustração gráfica do comportamento das 3 amostragens.

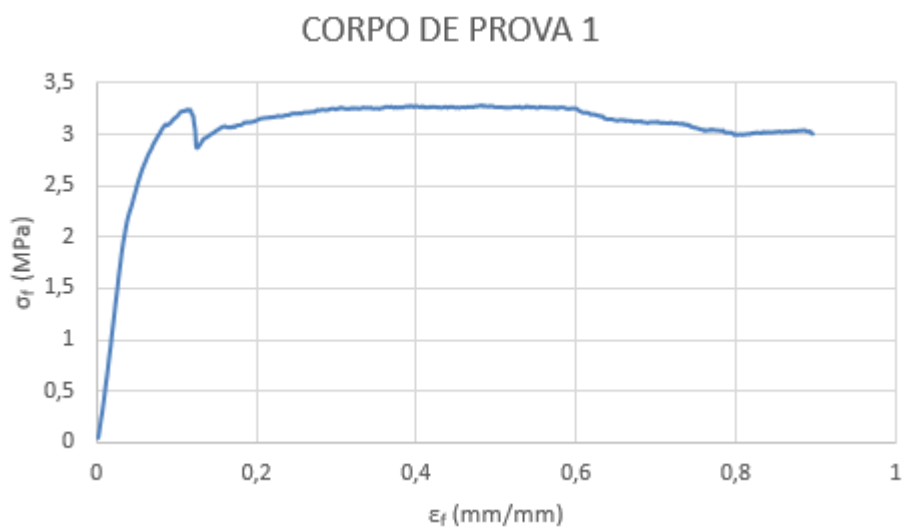


Figura 50 – Gráfico de tensão x deformação (2F3N-1).

Fonte: Autoria própria

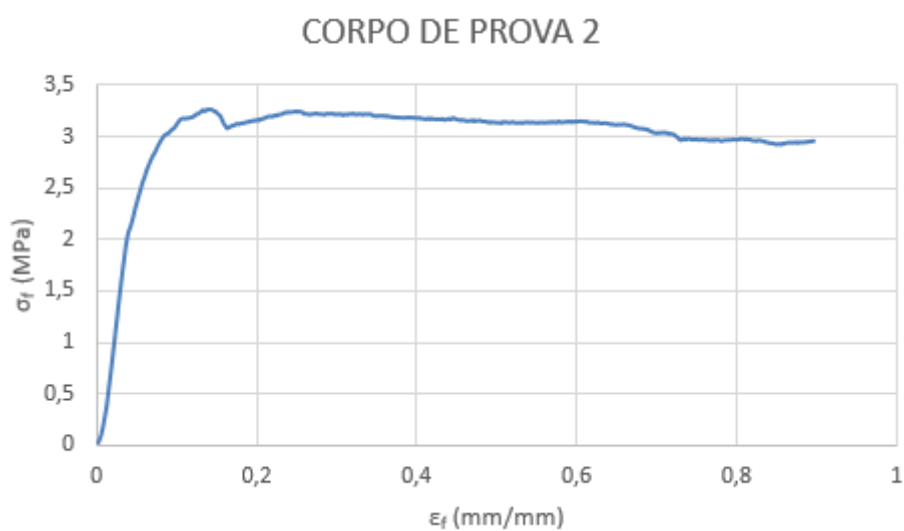


Figura 51 – Gráfico de tensão x deformação (2F3N-2).

Fonte: Autoria própria

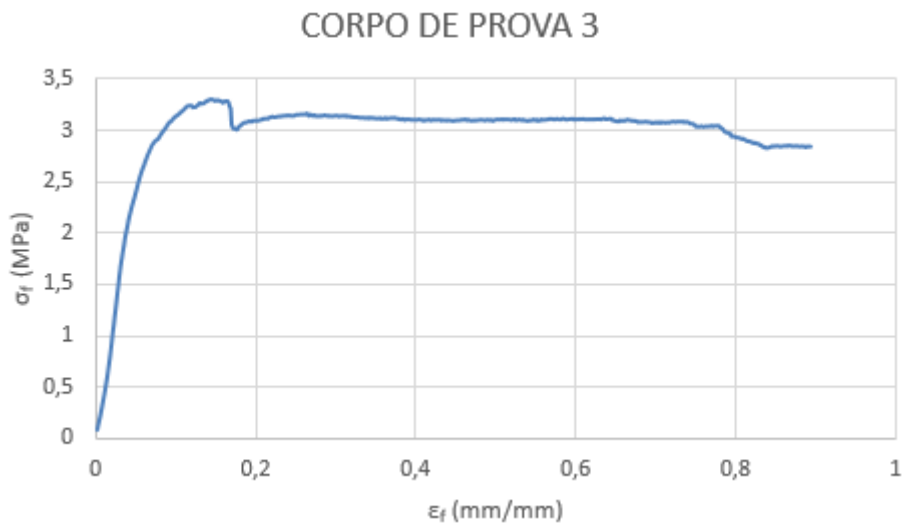


Figura 52 – Gráfico de tensão x deformação (2F3N-3).

Fonte: Autoria própria

Analisando as Figuras 50, 51 e 52, é possível notar que todos os 3 corpos de prova do tipo 2F3N resultaram em gráficos de tensão x deformação semelhantes.

7.5 CORPO DE PROVA - 2F2N2F

Os corpos de prova 2F2N2F possuem uma certa peculiaridade quando comparados aos outros. Eles são compostos por faces com dupla camada do tecido de fibra de carbono biaxial CBX200 e dupla camada da espuma de PVC Divinycell de 6 mm como núcleo. Entretanto, entre as duas camadas de 6 mm do Divinycell há uma dupla camada do tecido de fibra de carbono. Segue abaixo a ilustração gráfica do comportamento das 3 amostragens.

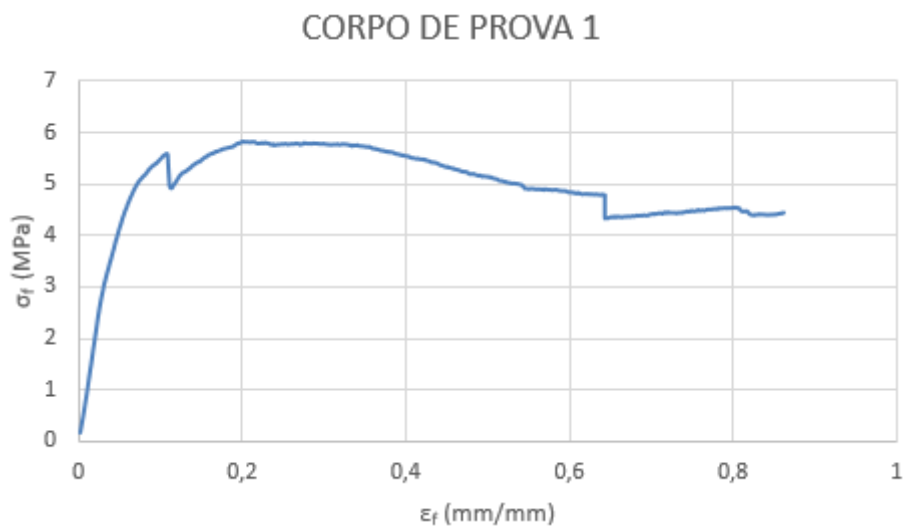


Figura 53 – Gráfico de tensão x deformação (2F2N2F-1).

Fonte: Autoria própria

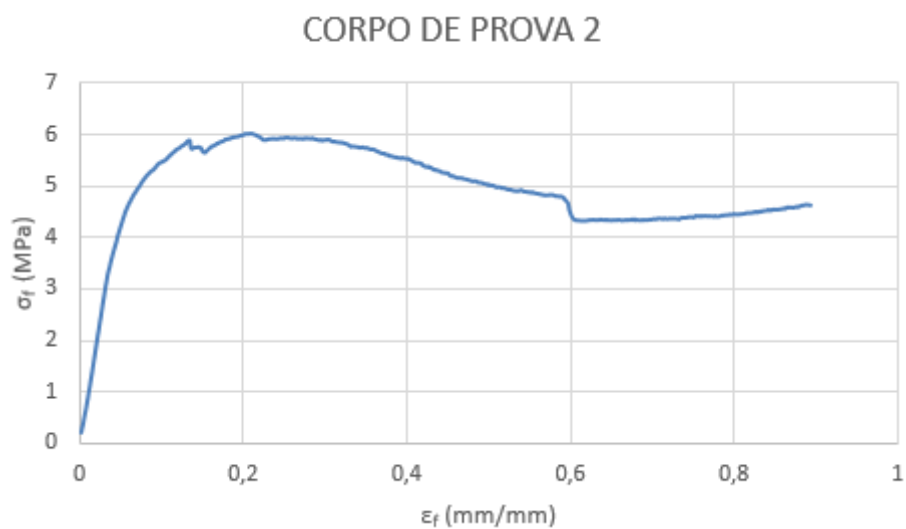


Figura 54 – Gráfico de tensão x deformação (2F2N2F-2).

Fonte: Autoria própria



Figura 55 – Gráfico de tensão x deformação (2F2N2F-3).

Fonte: Autoria própria

De acordo com as Figuras 53, 54 e 55, é possível notar que todos os 3 corpos de prova do tipo 2F3N resultaram em gráficos de tensão x deformação semelhantes.

7.6 CORPO DE PROVA - 4F2N

Os corpos de prova 4F2N são compostos por faces com quatro camadas do tecido de fibra de carbono biaxial CBX200 e dupla camada da espuma de PVC Divinycell de 6 mm como núcleo. Entretanto, ocorreu uma suposta falha durante o processo de laminação, e durante a desmoldagem da placa 4F2N as faces não haviam aderido adequadamente ao núcleo.

Suposições que justificam o ocorrido são:

- Mesmo com todo o cuidado tomado, utilizando luvas em todos os processos de manuseio dos materiais, sempre há a chance de impurezas como oleosidade da mão ou partículas de poeira impregnarem nos materiais durante a laminação. Ainda mais porque o laboratório utilizado para confecção dos corpos de prova não estava devidamente isolado do meio externo, as janelas e portas ficaram abertas para auxiliar na circulação do ar e retirar o cheiro forte da resina;

- Uma segunda possível justificativa é que a resina e o endurecedor não foram devidamente misturadas, logo uma parte da resina pode não ter recebido a proporção correta de endurecedor e não reagido adequadamente;
- Uma terceira e última justificativa é que a placa 4F2N pode não ter recebido a quantidade de calor necessária a temperatura ideal, através do soprador de ar quente, para iniciar a reação de cura da mistura de resina e endurecedor.

7.7 CORPO DE PROVA - 6F2N

Os corpos de prova 6F2N são compostos por faces com seis camadas do tecido de fibra de carbono biaxial CBX200 e dupla camada da espuma de PVC Divinycell de 6 mm como núcleo. Segue abaixo a ilustração gráfica do comportamento das 3 amostragens.

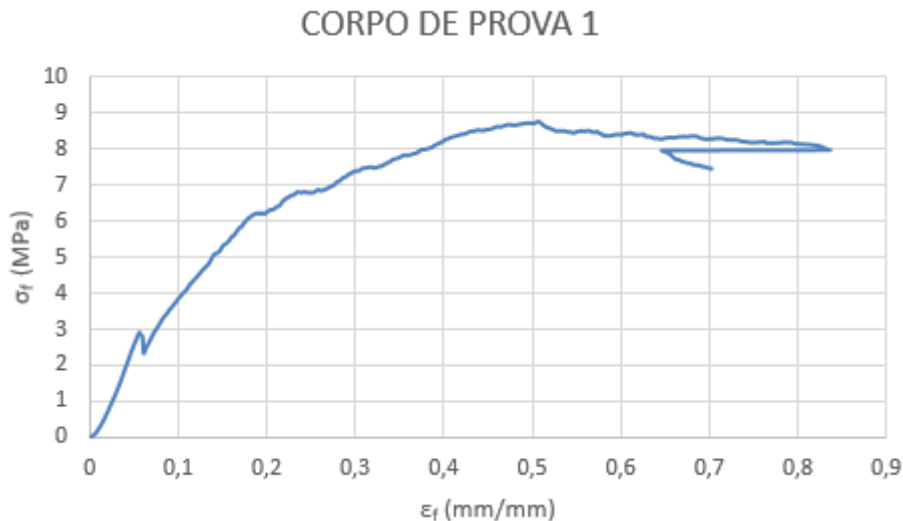


Figura 56 – Gráfico de tensão x deformação (6F2N-1).

Fonte: Autoria própria

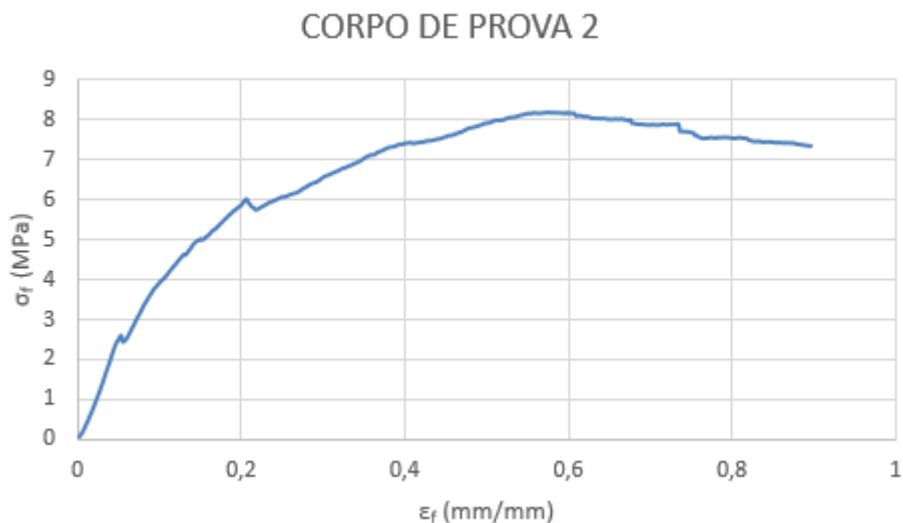


Figura 57 – Gráfico de tensão x deformação (6F2N-2).

Fonte: Autoria própria

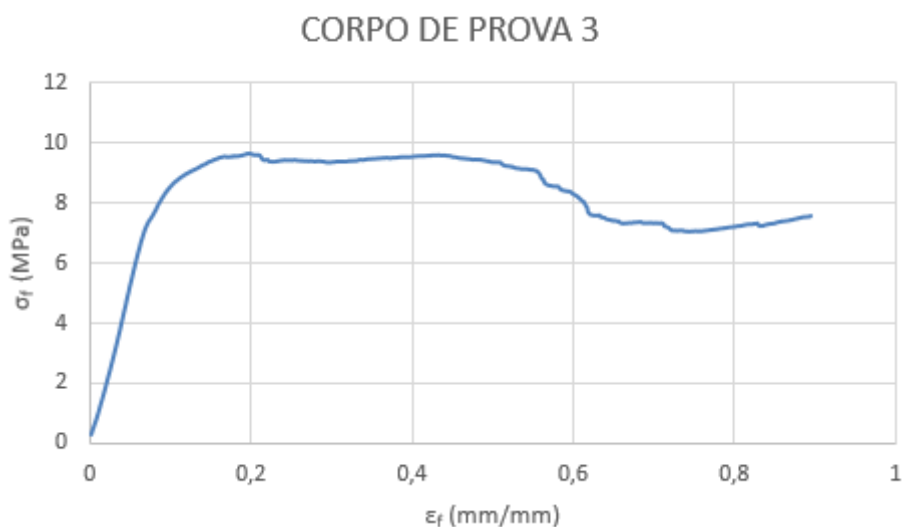


Figura 58 – Gráfico de tensão x deformação (6F2N-3).

Fonte: Autoria própria

Os gráficos das Figuras 56 e 57 apresentaram um comportamento atípico do esperado, fugindo da realidade prevista teoricamente e justificando a necessidade de uma quantidade mínima de amostragem. Logo, deve desconsiderar ambos para análise, levando em consideração apenas o gráfico ilustrado pela Figura 58.

7.8 CORPO DE PROVA - 8F2N

Os corpos de prova 6F2N são compostos por faces com oito camadas do tecido de fibra de carbono biaxial CBX200 e dupla camada da espuma de PVC

Divynycell de 6 mm como núcleo. Segue abaixo a ilustração gráfica do comportamento das 3 amostragens.



Figura 59 – Gráfico de tensão x deformação (8F2N-1).

Fonte: Autoria própria

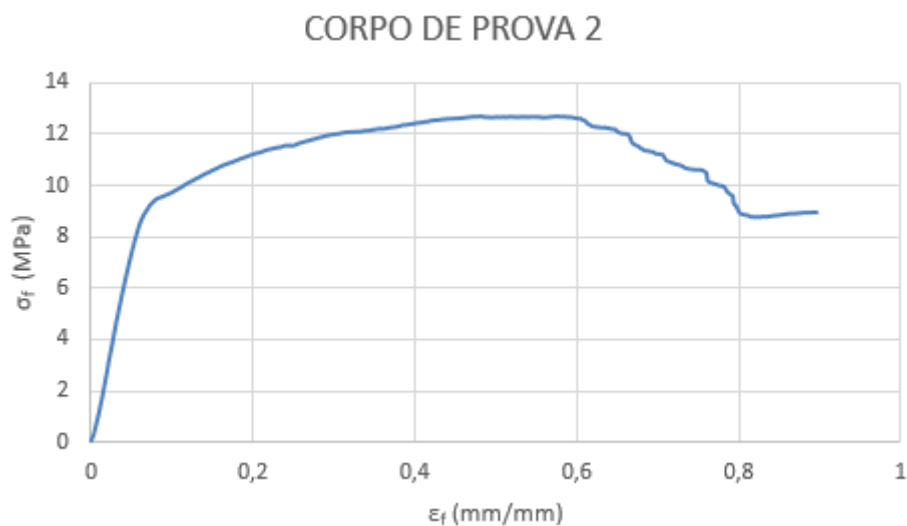


Figura 60 – Gráfico de tensão x deformação (8F2N-2).

Fonte: Autoria própria

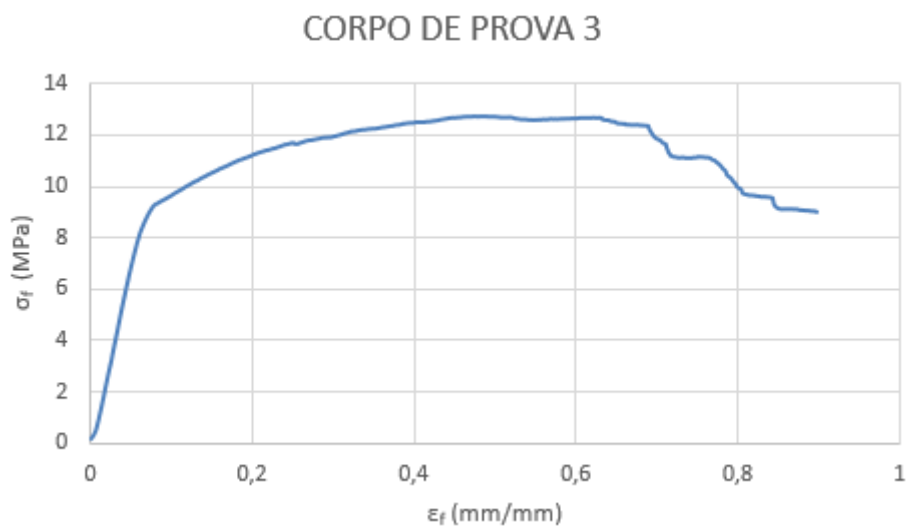


Figura 61 – Gráfico de tensão x deformação (8F2N-3).

Fonte: Autoria própria

De acordo com as Figuras 59, 60 e 61, é possível notar que todos os 3 corpos de prova do tipo 8F2N resultaram em gráficos de tensão x deformação semelhantes.

8 CONCLUSÃO

De acordo com a teoria, a espessura de um material auxilia na sua resistência a tensão de flexão. O presente trabalho tem como objetivo analisar até que ponto essa influência da espessura é benéfica ou prejudicial as propriedades de resistência a flexão do material. Os valores quantitativos dos gráficos foram utilizados apenas para comparação entre eles, visto que todos os outros parâmetros, exceto a espessura, foram fixados.

Comparando os gráficos das Figuras 44, 45 e 46 com os gráficos das Figuras 47, 48 e 49 e das Figuras 50, 51 e 52, onde a quantidade de camadas das faces foi mantido a mesma, o acréscimo de camadas de Divinycell ou o aumento da espessura do núcleo resultaram numa redução da resistência dos corpos de prova a flexão. Essa afirmação vai de encontro a prevista teoricamente. Entretanto, é possível concluir que a espessura do núcleo de um compósito aumenta sim a resistência a flexão, desde que as espessuras das faces também sejam levadas em consideração.

Isso pode ser observado quando se compara os gráficos das Figuras 47, 48 e 50 com o gráfico da Figura 58 e os gráficos das Figuras 59, 60 e 61, onde a espessura no núcleo foi mantida a mesma (2 camadas de Divinycell de 6 mm cada) mas a quantidade de camadas de fibra de carbono por face aumentou, sendo respectivamente, 2 camadas, 6 camadas e 8 camadas. Com o aumento das camadas das faces é possível afirmar que a resistência a flexão dos materiais compósitos aumentou também.

9 PROBLEMAS ENCONTRADOS

Durante o desenvolvimento do trabalho, surgiram imprevistos, principalmente no processo de fabricação.

O maior empecilho está ligado ao desmolde das placas, que dariam origem aos corpos de prova posteriormente. Pelo fato da resina necessitar de 24 horas para curar, testado experimentalmente, o Peel Ply aderiu por completo a fibra e uma camada espessa de resina foi formada sobre o Peel Ply. Unidos, esses dois acontecimentos dificultaram a remoção do Peel Ply, e como consequência foi necessário a utilização de alicates de pressão e morsa de bancada para sua retirada e conclusão do desmolde.

10 SUGESTÕES DE MELHORIA

Duas sugestões de melhoria foram levantadas ao final do trabalho.

Primeira, substituição da resina utilizada por uma que necessite de um menor tempo de cura a temperatura ambiente. Uma boa opção é a utilização do sistema epóxi Araldite LY 5052 e o Aradur 5052, disponibilizada pela Maxepoxi. Tal resina tem um tempo de cura de apenas 6 horas, em contrapartida seu valor de compra é superior. Outro empecilho da resina LY 5052 é que, atualmente no mercado, a Maxepoxi é a única vendedora e eles não possuem um sistema de entrega, cabendo ao cliente arcar com o alto valor da contratação de uma transportadora especializada em produtos químicos.

E como segunda sugestão, aumento da amostragem de corpos de prova a serem ensaiados, garantindo assim maior confiabilidade a todo o processo de fabricação, ensaio e análise.

11 CRONOGRAMA

Esta etapa conceitua as datas seguidas para a realização das tarefas ao longo de todo o trabalho de conclusão de curso TCC1 e TCC2, definidas na Tabela 3 e 4.

Tabela 3 – Cronograma (2019)

	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Desenvolvimento da proposta de projeto	■				
Orçamento dos materiais necessários					■

Fonte: Autoria própria

Tabela 4 – Cronograma (2021)

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai
Requerimento dos materiais necessários	■				
Confecção dos corpos de prova		■			
Execução dos ensaios			■		
Análise dos resultados				■	
Conclusão do trabalho escrito					■

Fonte: Autoria própria

REFERÊNCIAS

CALLISTER JÚNIOR, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

CARVALHO, L. H. DE. Propriedades Mecânicas de Tração de Compósitos Poliéster / Tecidos Híbridos Sisal / Vidro. v. 16, p. 33-37, 2006.

CORIGLIANO, A.; RIZZI, E.; PAPA, E. Experimental characterization and numerical simulations of a syntactic-foam / glass-® bre composite sandwich. **Composites Science and Technology**, v. 60, p. 2169-2180, 2000.

DIAS, C. G. B. T.; SANTOS, E. J. S.; BRITO, R. S.; OLIVEIRA, V. C. C.; TAKETA, V. M. Y. R.. ANÁLISE MECÂNICA DE ESTRUTURAS SANDUÍCHE COM DIFERENTES NÚCLEOS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 22., 2016, Natal: Cbecimat, 2016. p. 3381 - 3391.

GAGLIARDO, Debora Pierini. **ANÁLISE DE ESTRUTURAS SANDUÍCHE: PARÂMETROS DE PROJETO**. 2008. 174 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

GARAY, André Cechin. **Propriedades mecânicas de compósitos estruturas sanduíche moldadas por RTM light e simulação numérica da infiltração**. 2016. 120 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Departamento de Materiais da Escola de Engenharia da Ufrgs, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

MENDONÇA, P. T. R. **Materiais compostos & Estruturas-sanduíche: Projeto e análise**. Barueri-SP: Manole, 2005.

NASSEH, J. **Barcos – Métodos Avançados de Construção em Composites**. Rio de Janeiro: [s.n.]. v. 33.

PRABHAKAR, R. L.; BROCCINI, S.; KNOWLES, J. C. Effect of glass composition on the degradation properties and ion release characteristics of phoshate glass – polycaprolactone composites. **Biomaterials**, v. 26, n. 15, p. 2209 - 2218, 2005.

RIBEIRO JUNIOR, Elson Herlado; PENTEADO, Rosangela de Fátima Stankowitz. **Modelo para formatação de trabalhos acadêmicos da UTFPR**. Ponta Grossa, 2011. (Apostila)

SAHA, M. C.; KABIR, E.; JEELAN, S. Study of debond fracture toughness os sandwich composites with nanophased core. **Materials Letters**, v. 62, n. 4-5, p. 567-570, fev. 2008.

TITA, V. **Projeto e Fabricação de Estruturas em Material Compósito polimérico**. Notas de aula. Universidade de São Paulo, Faculdade de Engenharia Mecânica, 2007. 68p.

PEREIRA, Daniel. **Análise das propriedades de tensão e flexão de compósitos sanduíches**. 2017. 80 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal Fluminense, 2017.

SANTOS, Jayna Kátia Dionísio dos. **Resistência residual após impacto em compósitos híbridos de matriz estér vinílica reforçada por fibra de vidro e Kevlar**. 2018. 135 f. Tese (Doutorado) - Curso de Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2018.

NUNES, Stephanie Gonçalves. **Processamento por infusão a vácuo de compósitos espessos aramida/epóxi e análise do desempenho sob impacto**. 2018. 166 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.