

RAFAEL SERPA LEITE BALIEIRO

**Deformações em elementos estruturais de materiais compósitos reforçados por fibras em
software baseado em elementos finitos**

Guaratinguetá - SP

2017

Rafael Serpa Leite Balieiro

Deformações em elementos estruturais de materiais compósitos reforçados por fibras em software baseado em elementos finitos

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. José Elias Tomazini
Co-orientador: Me. Ramon Moreira Peres

Guaratinguetá - SP

2017

B186d Balieiro, Rafael Serpa Leite
Deformações em elementos estruturais de materiais compósitos reforçados por fibras em software baseado em elementos finitos / Rafael Serpa Leite Balieiro – Guaratinguetá, 2017.
63 f : il.
Bibliografia: f. 63

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2017.
Orientador: Prof. Dr. José Elias Tomazini
Co-orientador: Ramon Moreira Peres

1. Materiais compostos. 2. Compósitos poliméricos. 3. Simulação (Computadores). I. Título.

CDU 620.1




Luciana Máximo

Bibliotecária/CRB-8 3596

RAFAEL SERPA LETTE BALIEIRO

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"


APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA


Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. José Elias Tomazini
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins
UNESP-FEG


Me. Everton Côelho de Medeiros
Membro Externo

Dezembro de 2017

DADOS CURRICULARES

RAFAEL SERPA LEITE BALIEIRO

NASCIMENTO	02/08/1989 - GUARATINGUETÁ / SP
FILIAÇÃO	FRANCISCO DONIZETTE BALIEIRO LENI SERPA LEITE BALIEIRO
2008/2017	Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.
2009/2012	Curso de Graduação em Administração de Empresas, ensino EAD, pela Universidade Metodista de São Paulo.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus por ter me dado saúde e força para superar as adversidades.

A minha esposa, pelo amor, incentivo, apoio incondicional e pelo maior presente que se pode receber nessa vida, minha filha, que se tornou a razão de todos meus esforços e o sentido da minha vida.

Aos meus pais e avós, por todo esforço, cobrança e puxões de orelha que auxiliaram na formação do homem de bem que sou hoje.

Ao meu orientador pelo incansável suporte, por todo auxílio e tempo despendido sempre visando meu desenvolvimento.

A esta universidade, seu corpo docente, direção, administração e funcionários em geral pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar.

Aos amigos por todas as conversas, apoios e companheirismo.

RESUMO

Neste trabalho foi realizado um estudo teórico sobre materiais compósitos. Em seguida foi feito uma abordagem didática para criação de compósitos com a utilização do sistema ACP do software ANSYS. Simulações através do software foram propostos visando verificar teorias descritas nas bibliografias utilizadas e focado em detalhar formas de realizações dos ensaios e propor a utilização de um tipo de material que pode ter excelentes propriedades que vem ganhando amplo mercado de atuação.

PALAVRAS-CHAVE: Compósitos. ACP. Simulação.

ABSTRACT

In this work was made a theoretical study on composite materials. Next, was made a didactic approach to create composites using the ANSYS software's ACP system. Simulations through the software have been proposed in order to check the theories described in the bibliographies used and focused on detailing ways of accomplishment of the tests and propose the use of a type of material that can have excellent properties and that has been gaining wide market.

KEYWORDS: Composite. ACP. Simulation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Ilustração das fases distintas da madeira, um compósito natural.....	14
Figura 2 – Segmentação por mercados da utilização de compósitos de poliéster em 2011.....	15
Figura 3 – Compósitos na aeronave Tucano da Embraer.....	16
Figura 4 – Utilização de compósitos em carros McLaren.....	17
Figura 5 – Exemplo de Compósitos na Construção Civil.....	18
Figura 6 – Ilustração da ligação entre fase matriz e dispersa.....	19
Figura 7 – Classificação dos tipos de compósitos.....	21
Figura 8 – Ilustração da disposição da fase dispersa nas classes de compósitos.....	21
Figura 9 – Ilustração do concreto com suas partículas.....	22
Figura 10 – Micrografia eletrônica mostrando particulados de negro de fumo em pneu	23
Figura 11 – Representação de compósitos reforçados com fibras.....	24
Figura 12 – Ilustrações de Compósitos Estruturais Laminados.....	25
Figura 13 – Esquema mostrando a construção de um painel-sanduiche com núcleo colmeia.....	25
Figura 14 – Representações gráficas do comportamento tensão-deformação em fibras, matriz e no compósito reforçados com fibras.....	27
Figura 15 – Exemplo de uma forma comercial de fibra de vidro.....	30
Figura 16 – Exemplo de forma comercial da fibra de aramida.....	30
Figura 17 - Exemplo de forma comercial da fibra de carbono.....	31
Figura 18 – Ilustração do processo de pultrusão.....	34
Figura 19 – Ilustração do processo da fita prepreg.....	35
Figura 20 – Ilustração do processo de enrolamento filamentar.....	36
Figura 21 – Criação do compósito no ANSYS/ACP – Workbench.....	38
Figura 22 – Escolha do material para confecção do corpo de prova.....	39
Figura 23 – Criação do corpo de prova nas medidas 250x25mm.....	39
Figura 24 – Alteração das propriedades do Modelo.....	40
Figura 25 – Definição de propriedades do compósito (Espessura e Material).....	41
Figura 26 – Criação de Malhas.....	42
Figura 27 – Criação das Camadas do Compósito.....	42
Figura 28 – Definição de Propriedades da Camada.....	43

Figura 29 – Definição de Propriedades da Rosette.....	43
Figura 30 – Definição da Orientação do Conjunto de Elementos do Compósito.....	44
Figura 31 – Criação de Camadas para o Compósito.....	44
Figura 32 – Definição das Propriedades da Primeira Camada do Compósito.....	45
Figura 33 – Orientação das Fibras em cada Camada.....	46
Figura 34 – Modelagem sólida do compósito.....	46
Figura 35 – Compósito em sua forma final após modelagem.....	47
Figura 36 – Transferência do compósito criado em ACP para ensaios no Static Structural.....	48
Figura 37 – Escolha do suporte para ensaio.....	49
Figura 38 – Escolha da superfície para suporte fixo.....	49
Figura 39 – Escolha da superfície, magnitude e direção da força.....	50
Figura 40 – Escolha da solução desejada.....	51
Figura 41 – Solução do ensaio feito no exemplo.....	51
Figura 42 – Efeito da orientação das fibras na resistência à tração de compósitos de epóxi reforçados com fibras de E-glass.....	52
Figura 43 – Corpo de Prova criado para ensaio.....	53
Figura 44 – Deformação do compósito com fibras alinhadas à 0°.....	53
Figura 45 – Deformação do compósito com fibras alinhadas à 30°.....	54
Figura 46 – Deformação do compósito com fibras alinhadas à 45°.....	54
Figura 47 – Deformação do compósito com fibras alinhadas à 60°.....	54
Figura 48 – Deformação do compósito com fibras alinhadas à 90°.....	55
Figura 49 – Efeito da orientação da fibras na deformação dos compósitos.....	55
Figura 50 – Corpo de Prova para Ensaio.....	57
Figura 51 – Deformação do compósito com uma força aplicada no sentido da fibra.....	57
Figura 52 – Deformação do compósito com uma força aplicada perpendicularmente ao sentido da fibra.....	58
Figura 53 – Deformação do compósito de fibras alternadas com força aplicada horizontalmente.....	58
Figura 54 – Deformação do compósito de fibras alternadas com força aplicada verticalmente.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais requisitos da fase matriz de um compósito.....	20
Tabela 2 – Características de alguns materiais fibrosos usados como reforço.....	29

SÚMARIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVO.....	12
1.2	SINOPSE DO TRABALHO	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	MATERIAIS COMPÓSITOS.....	14
2.2	APLICAÇÕES.....	16
2.2.1	Setor aeroespacial	16
2.2.2	Setor automotivo	16
2.2.3	Setor construção civil	17
2.2.4	Células combustíveis	18
2.2.5	Outras Aplicações	18
2.3	FASES DO COMPÓSITO.....	19
2.3.1	Fase matriz	19
2.3.2	Fase dispersa	20
2.4	TIPOS DE COMPÓSITOS.....	21
2.4.1	Reforçados com partículas	22
2.4.1.1	Reforçados por partículas grandes.....	22
2.4.1.2	Reforçados por dispersão.....	23
2.4.2	Reforçados com fibras	23
2.4.3	Reforço estrutural	24
2.4.3.1	Laminados.....	24
2.4.3.2	Painéis-sanduiche.....	25
2.5	COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS.....	26
2.5.1	Fibras contínuas e alinhadas	27
2.5.2	Fibras descontínuas	28
2.6	FASE FIBRA DOS COMPÓSITOS FIBROSOS.....	28
2.6.1	Fibras de vidro	29
2.6.2	Fibras de Aramida	30
2.6.3	Fibras de Carbono	31
2.7	FASE MATRIZ DOS COMPÓSITOS FIBROSOS.....	31
2.7.1	Matriz polimérica	32
2.7.2	Matriz metálica	32

2.7.3	Matriz cerâmica	33
2.7.4	Outros tipos de matrizes	33
2.8	PRODUÇÃO DE COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS	33
2.8.1	Pultrusão	34
2.8.2	Prepreg	34
2.8.3	Enrolamento filamental	35
3	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	37
3.1	criação do composito no ANSYS	37
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
5	CONCLUSÃO	60
	REFERÊNCIAS,	62

1 INTRODUÇÃO

Com o avanço tecnológico, para melhores funcionamentos de diferentes tipos de produtos necessitamos de materiais que possuam propriedades específicas que atuem de forma interligada sem prejudicar uma as outras, cenário esse encontrado em aplicações aeroespaciais, subaquáticas e de transporte.

Um exemplo disso é o cenário aeronáutico onde se busca materiais estruturais que tenham baixas densidades, fortes, rígidos, com boas resistências à abrasão e ao impacto, e que não sejam facilmente corroídos. Entretanto o que encontra-se são materiais fortes relativamente densos, materiais rígidos com relativa baixa em sua resistência ao impacto. Outro aspecto a ser levantado é a exigência atual de produtos e equipamentos de maiores rendimentos e eficiência com baixo custo de produção e manutenção.

Tais combinações de propriedades muitas vezes não são encontradas em ligas metálicas, materiais cerâmicos ou materiais poliméricos convencionais, sendo necessário então o desenvolvimento de materiais compósitos.

Dessa forma o compósito pode ser definido como um material multifásico que visa obter as melhores propriedades de cada componente que o compõe.

1.1 OBJETIVO

O trabalho tem como objetivo apresentar uma breve discussão sobre compósitos e suas aplicações, focando a parte bibliográfica em suas fases, seus tipos, criando um enfoque naqueles reforçados com fibras.

Objetiva-se também com este trabalho apresentar um procedimento para criação de compósito utilizando sistema ACP (Pre) do software ANSYS, além de simular algumas condições teóricas sobre o material e apresentar discussões e conclusões sobre sua utilização.

1.2 SINOPSE DO TRABALHO

O trabalho está organizado da seguinte forma:

No capítulo 1 traz uma introdução sobre o tema, objetivo e estrutura do trabalho.

No capítulo 2 se baseia inteiramente em uma revisão bibliográfica sobre o assunto de forma geral, passando pelos tipos de compósitos, propriedades e finalizando com o foco desde trabalho que são os compósitos reforçados com fibras.

No capítulo 3 é realizada uma breve introdução ao método dos elementos finitos e ao Ansys. O foco do capítulo é o detalhamento dos passos para criação e modelagem de um compósito utilizando a ferramenta ACP (Pré) do software mencionado.

O capítulo 4 nos traz a seção de resultados e discussão sobre o tema, onde são propostas algumas validações de teorias através de simulações indicadas detalhadamente e com abordagem sobre o assunto.

No capítulo 5, por fim, é realizada uma conclusão sobre o assunto e finaliza-se o trabalho com as referências bibliográficas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

Os compósitos são provenientes da mistura física de dois ou mais materiais com diferentes propriedades, na qual, desta combinação, espera-se um novo produto com propriedades diferentes das encontradas nos componentes originais, características como resistências, tenacidades ou rigidez (Callister, 2008). Tal processo garante um amplo mercado nas áreas aeroespaciais, subaquáticas e transportes, como poderá ser visto no tópico 2.2 Aplicações.

Mas engana-se quem dessa forma imagina somente o compósito como material multifásico obtido artificialmente, os compósitos são também de origem natural. Tecidos ósseos, por exemplo, são compósitos formados por estruturas minerais a base de cálcio a qual contém proteínas de colágeno. Outro exemplo pode ser dado através de madeiras onde se encontram fibras celulóticas como reforço da mesma.

Figura 1 – Ilustração das fases distintas da madeira, um compósito natural



Fonte: Amabis & Martho (1995)

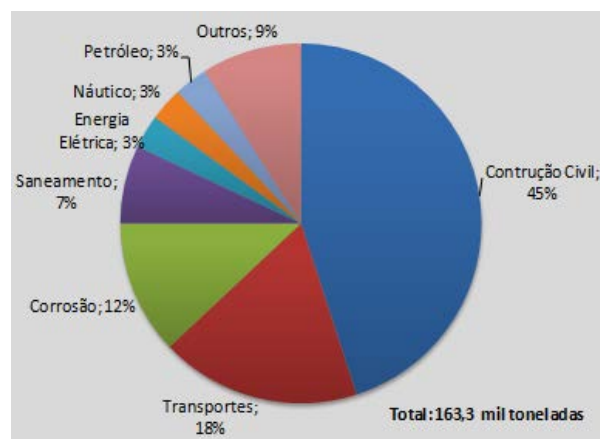
Na Figura 1 pode-se verificar a presença de seis fases distintas, a Casca Externa, formada por tecido morto e seco com intuito de proteção da árvore, a Casca Interna, com função de transporte de alimentos, o Câmbio, tecido entre a casca e o lenho, responsável pela formação de células do lenho e da casca, o Lenho Ativo, função de transporte de seiva das

raízes às folhas, o Lenho Inativo, célula morta e região mais escura da árvore responsável pela resistência da mesma e por último a Medula, tecido macio no centro onde ocorre o primeiro crescimento da árvore.

A utilização de compósitos é feita a milhares de anos, onde recursos naturais eram misturados e utilizados nas mais diversas finalidades, como paredes de barro reforçadas com feixes de palha para aumento da integridade estrutural da mesma. Entretanto a tecnologia empregada nesse tema foi desenvolvida bem depois, acredita-se que a utilização de materiais compósitos tenha tido seu início de estudos aprofundados na Segunda Guerra Mundial, através da utilização pelo exército norte-americano, embora alguns estudos apontam também a utilização de tal mecanismo em aviões Spitfire, usados por britânicos em ações contra os nazistas. Essa tecnologia foi incorporada pelo Brasil, oficialmente em 1954. Hoje, esse mercado global consome mais de 140.000 toneladas de fibras para reforços o que gira um montante de até U\$\$ 1 bilhão.

Já a Associação Brasileira de Materiais Compósitos (ABMACO), fundada em 1981, traz dados ainda mais impressionantes referente a utilização desse material. Em seus relatórios a ABMACO apresenta mais de 40.000 utilizações catalogadas em torno do mundo para compósitos em diversas aplicações, como se vê no Figura 2. Informa também o crescimento exponencial da utilização deste no mercado brasileiro com faturamentos acima de R\$700 milhões no primeiro trimestre de 2012 com um consumo superior a 55.000 toneladas de matéria-prima neste mesmo período. Estimativas apontam um consumo anual acima de 224.000 toneladas com faturamentos superiores R\$ 3.189 bilhões, sendo tal crescimento encabeçado pelos setores de transporte e agrícolas e a manutenção das altas utilizações no setor de construção civil.

Figura 2 – Segmentação por mercados da utilização de compósitos de poliéster em 2011



Fonte: ABMACO (2012)

2.2 APLICAÇÕES

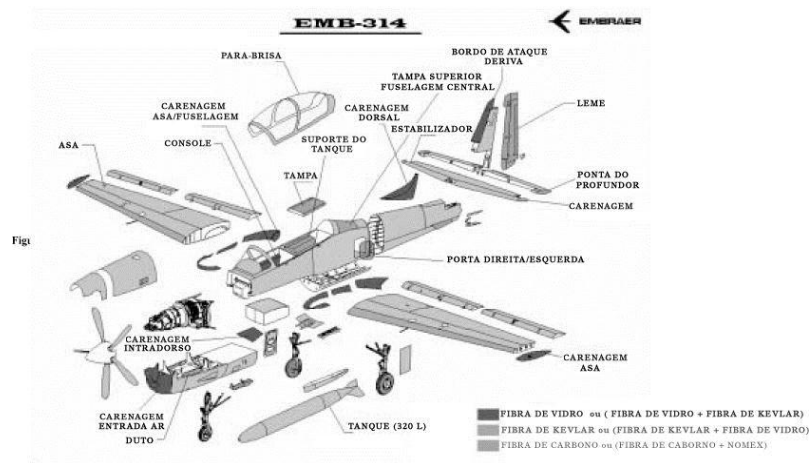
Como visto tem-se um leque muito grande da aplicabilidade de compósitos, a seguir um pouco onde tais utilizações se destacam e geram maior valor agregado aos produtos.

2.2.1 Setor aeroespacial

Devido as boas propriedades, como resistência mecânica e rigidez, os compósitos são amplamente utilizados no setor aeroespacial. Tal uso possibilitou também a flexibilidade de projetos, por exemplo em substituição ao alumínio que proporciona a redução de até 30% no peso e de até 25% no custo de peças e componentes em geral, como asas, flapes, entre outros (ITA, 2000).

Na Figura 3 tem-se a aeronave Tucano produzida pela EMBRAER, mostrando os componentes fabricados em compósitos termorrígidos, utilizando como reforço fibras de carbono, kevlar e vidro.

Figura 3 – Compósitos na aeronave Tucano da Embraer



Fonte: Centro Técnico Aeroespacial, divisão de materiais (2000)

2.2.2 Setor automotivo

Estudos já apontam a indústria automotiva futuramente como a maior usuária dos compósitos polimérico devido ao seu crescimento constante, com amplo campo de utilização em chassis e carrocerias por exemplo, compósitos já são encontrados até em discos de freios de carros da fórmula-1 e trens de alta velocidades.

Figura 4 – Utilização de compósitos em carros McLaren



Fonte: McLaren (2000)

A empresa automobilística McLaren ostenta para o mundo a fama de ser a primeira empresa a aplicar compósitos, em especial àqueles reforçados por fibras de carbono, em seus veículos, tanto no automobilismo como nos carros de rua (ITA, 2000).

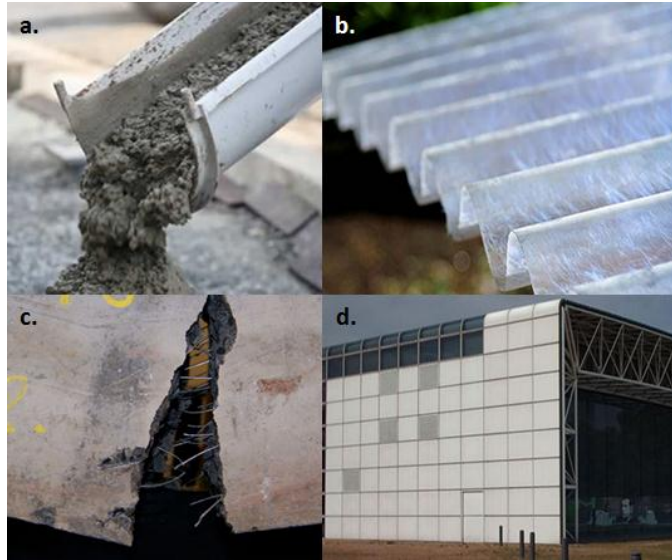
Devido sua leveza e resistência excepcionais, a empresa foi pioneira na aplicação deste material na construção do chassi (Figura 4) revolucionando a forma de construir carros de alto desempenho.

2.2.3 Setor construção civil

Setor que hoje absorve maior percentual de utilização de compósitos do mercado e que durante muito tempo teve sua utilização basicamente para reparos e adequações de pontes e edificações danificadas, tem tido crescentes avanços na manufatura de compósitos reforçados com fibras, e em estudos que visam reduzir o peso das estruturas e diminuir os riscos de desabamentos.

A construção civil abrange todos os tipos de compósitos como pode-se ver nos exemplos a seguir (Figura 5), tem-se a empregabilidade de compósitos reforçados com partículas, fibras e estruturais.

Figura 5 – Exemplo de Compósitos na Construção Civil. (a) Reforçado por partículas: Concreto; (b) e (c) Reforçados por fibras: Telhas e a mistura de Concreto com Fibras; (d) Estruturais: Fachada painéis-sanduíche



Fonte: Do Autor

2.2.4 Células combustíveis

Os compósitos também possuem aplicações como células combustíveis (exemplo de eletrodos) por apresentar propriedades específicas que protegem contra corrosão e possibilidades térmicas e elétricas.

A aplicação de compósitos de carbono reforçados com fibras de carbono em reatores de energia por fusão e fissão também é promissora por apresentar como características: baixo número atômico, baixa seção de choque com nêutrons, alta estabilidade térmica, não se funde, excelente resistência ao choque térmico, tolerância a danos por nêutrons, baixo coeficiente de expansão térmico, alta resistência mecânica, baixo módulo de Young, resistência à erosão por jateamento de plasmas e baixa liberação de gases, conforme estudo feito pelo Centro Técnico Aeroespacial em conjunto com Instituto de Aeronáutica e Espaço em 2000.

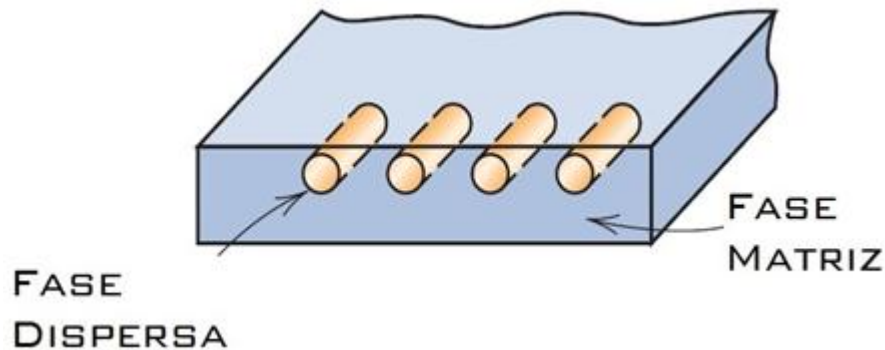
2.2.5 Outras aplicações

Compósitos vêm garantindo seu espaço também em equipamentos esportivos como tacos esportivos, bicicletas, esquis e varas de pesca. Também ganham campo em área médica com confecções de próteses, área petrolífera com construção de plataformas e equipamentos para extração de petróleo.

2.3 FASES DO COMPÓSITO

A maior parte dos compósitos são compostos de duas fases: a fase Matriz e a fase Dispersa. Em geral as propriedades do compósito são ligadas diretamente às propriedades dessas duas fases.

Figura 6 – Ilustração da ligação entre fase matriz e dispersa



Fonte: Callister (2008)

2.3.1 Fase matriz

Segundo Callister (2008), a fase matriz de um compósito é de suma importância por possuir algumas funções imprescindíveis do material, dentre elas pode-se destacar:

- Manter a coesão das fibras
- Proteger as fibras do meio envolvente
- Proteger as fibras do dano durante o manuseamento
- Distribuir o carregamento pelas fibras;
- Redistribuir o carregamento pelas fibras resistentes em caso de ruptura

Alguns requisitos são esperados da matriz quando ocorre a escolha das mesmas para o compósito, tais requisitos são trazidos na Tabela 1. Os tipos mais comuns de materiais utilizados como matriz em compósitos são os materiais Cerâmicos, Metálicos e Poliméricos.

A matriz Metálica apresenta em geral maior resistência e maior ponto de fusão, entretanto são mais pesadas. Elas podem se juntar tanto com cerâmicas quanto polímeros para formação de ligas mais resistentes ou ainda maior ponto de fusão.

A matriz Cerâmica é usada para resistência a temperaturas externas mais elevadas, entretanto perde a tenacidade. As cerâmicas são excelentes condutores térmicos e elétricos por isso são utilizadas como semicondutores. O cimento é o compósito cerâmico mais utilizado.

A matriz Polimérica tem em geral baixo ponto de fusão e baixa resistência, são usados na finalidade de endurecer ou tornar o material mais resistente. Amplamente utilizados nas áreas automotivas e aeronáutica devido sua resistência e leveza.

Tabela 1 – Principais requisitos da fase matriz de um compósito

Propriedade	Característica
Propriedades Mecânicas	Resistência à tração elevada
	Ductilidade
	Resistência ao corte
	Tenacidade
	Resistencia ao Impacto
Propriedades Térmicas	Resistências a altas temperaturas
	Boa condutividade térmica
Propriedades Químicas	Boa adesão as fibras
	Baixa absorção de umidade
Outras Propriedades	Baixo Custo
	Solidificação ou cura rápida

Fonte: Do Autor

2.3.2 Fase dispersa

A fase dispersa pode ser dividida em dois tipos, com referência à sua função: a carga de Enchimento e Reforço.

A carga de Enchimento tem como função modificar as propriedades da matriz, possui vantagens de rigidez, estabilidade térmica e dimensional, reduzir o encolhimento da peça, diminuir custos, módulo de flexão e tração e aumenta a condutividades térmica e elétrica. Entretanto apresentam desvantagens que podem ser importantes na hora da escolha, ela diminui a tenacidade, aumenta a densidade da matriz e dificulta o processamento com a redução do fluxo de material fundido (CALLISTER, 2008).

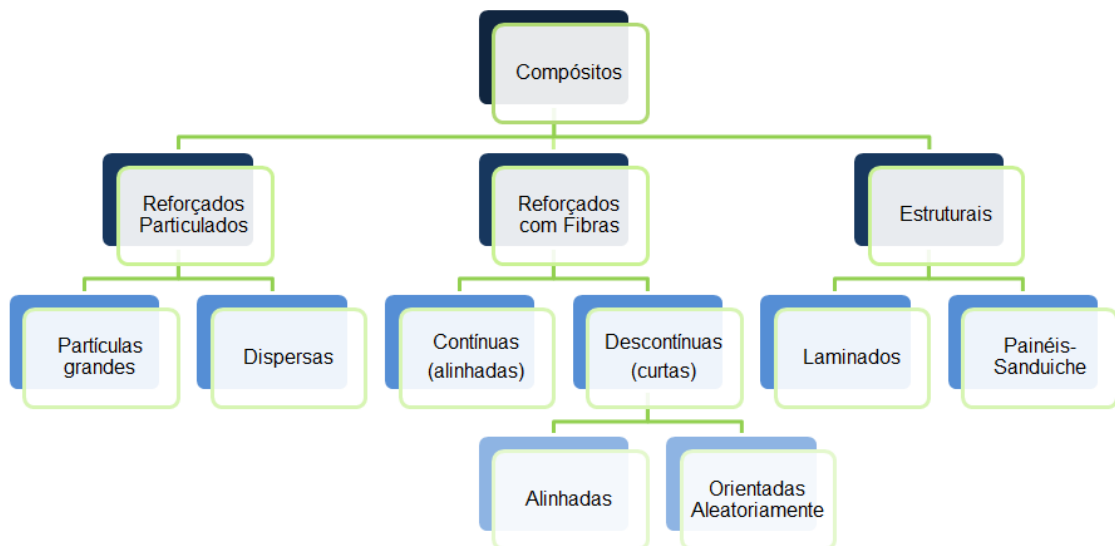
A carga de Reforço é amplamente utilizada e tem como função melhorar o desempenho mecânico da matriz. Suas vantagens são resistência a tração, rigidez, tenacidade,

flexão, estabilidade térmica e dimensional. Já suas desvantagens são o alto custo e densidade da matriz podendo causar distorção da peça e reduz o fluxo de material fundido dificultando o processamento.

2.4 TIPOS DE COMPÓSITOS

Materiais compósitos podem ser classificados em três tipos (classes), sendo eles Reforçados com Partículas, Reforçados com Fibras e os Estruturais, cada classe pode ser aberta em subclasses, como pode-se verificar na Figura 7.

Figura 7 – Classificação dos tipos de compósitos



Fonte: Do Autor

Tais classes apresentam peculiaridades que devem ser levadas em conta quando escolhido o compósito ideal para a atividade, pois já vimos que as propriedades destes dependem diretamente da fase dos constituintes, suas quantidades, geometria e orientações.

Figura 8 – Ilustração da disposição da fase dispersa nas classes de compósitos



Fonte: Scielo Portugal (2009)

2.4.1 Reforçados com partículas

Esse tipo de reforço é dividido em duas subclassificações, as Partículas Grandes e as Dispersas (reforçados por dispersão), e se diferenciam fundamentalmente pelos mecanismos de reforço e resistência.

No caso de Partículas Grandes sua fase dispersa tende a ser mais rígida que a fase matriz, apresentando como característica assim a transferência de tensão desta fase para as partículas (que devem reter parte de carga aplicada).

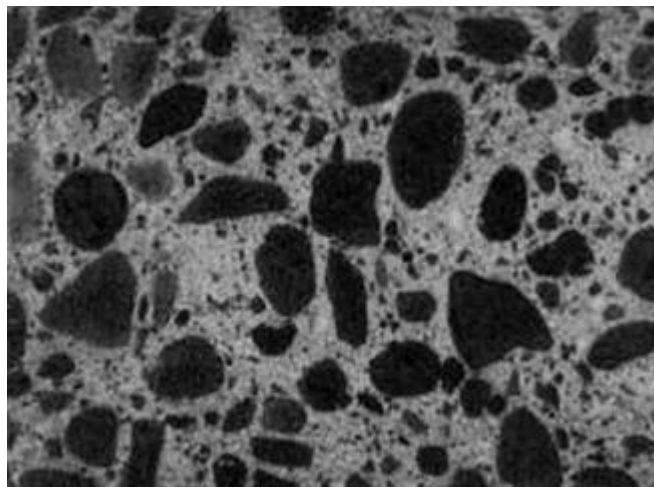
No caso de reforço por dispersão ocorre o contrário onde a fase matriz é a responsável pela absorção da carga aplicada em quase sua totalidade e as partículas inseridas, de medidas pequenas, possuem a funcionalidade de limitar deformações plásticas, o que geraria maior dureza ao compósito (ASKELAND e WRIGHT, 2015).

2.4.1.1 Reforçados por partículas grandes

Nesse caso, tem-se como melhor exemplo e de mais fácil entendimento o Concreto (Figura 9), cuja fase matriz é representada pelo cimento com característica de ser mole e dúctil e sua fase particulada ser representada por areia, brita e cascalho, agregando na dureza.

As partículas devem estar distribuídas de forma uniforme na matriz para que o reforço seja bem efetivo, e as propriedades mecânicas do compósito são melhoradas com o aumento da quantidade de particulados presentes na mistura.

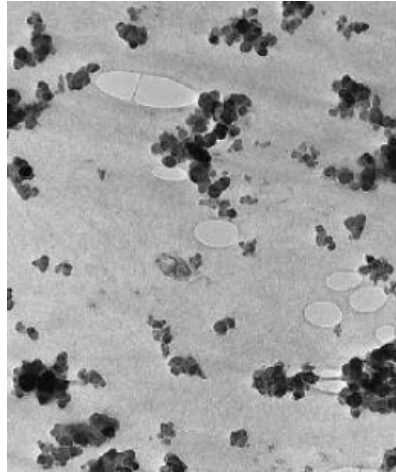
Figura 9 – Ilustração do concreto com suas partículas



Fonte: Scielo Cerâmica (2014)

Outro exemplo é o caso de pneus automotivos, onde partículas são inseridas na borracha visando melhorar tenacidade e resistência do objeto, conforme mostrado na Figura 10.

Figura 10 – Micrografia eletrônica mostrando particulados de negro de fumo em pneu



Fonte: Callister (2008)

2.4.1.2 Reforçados por dispersão

Item mais complexo que a utilização de partículas grandes, é utilizado para aumentar a resistência e o endurecimento de metais e ligas metálicas através da dispersão uniforme de particulados específicos de materiais com dureza alta e inerte, como óxidos.

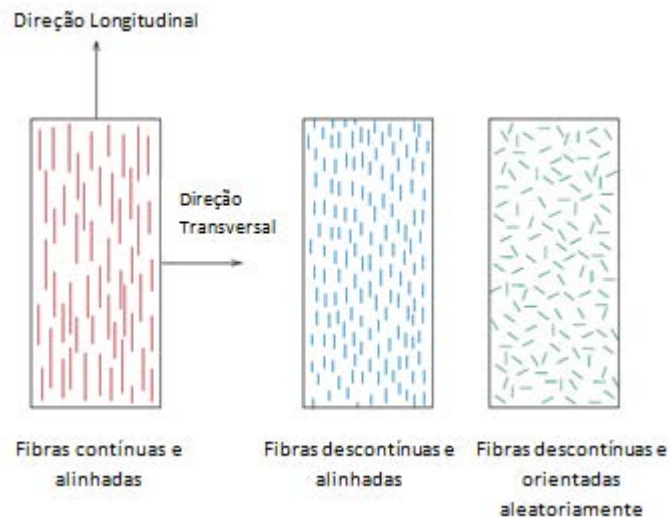
A característica principal deste modelo é a manutenção da resistência mesmo em temperaturas muito elevadas e por longos períodos de tempo, devido a não reação entre fases dispersas e matriz.

2.4.2 Reforçados com fibras

Do ponto de vista tecnológico esse tipo de compósito é o mais relevante dos três tipos por ser de modo geral o reforço mais eficiente. Esse reforço agrega ao compósito alta resistência, tenacidade e rigidez em relação ao seu peso.

Como pode-se verificar na Figura 11 (fazendo ponte também com a Figura 7), os compósitos reforçados com fibras são classificados de acordo com o comprimento das mesmas e suas características são modificadas além desse quesito, também pela aglomeração e sentido de tais fibras (CALLISTER, 2008).

Figura 11 – Representação de compósitos reforçados com fibras



Fonte: Adaptação de Callister (2008)

Estudos mais aprofundados sobre este tipo de compósito constam no item 2.5. Compósitos Reforçados com Fibras, onde se verá os motivos das influências por tamanhos de fibras e orientações, quais as peculiaridades das fases matriz e dispersas, além dos materiais mais utilizados para fabricação desses compósitos e como são produzidos.

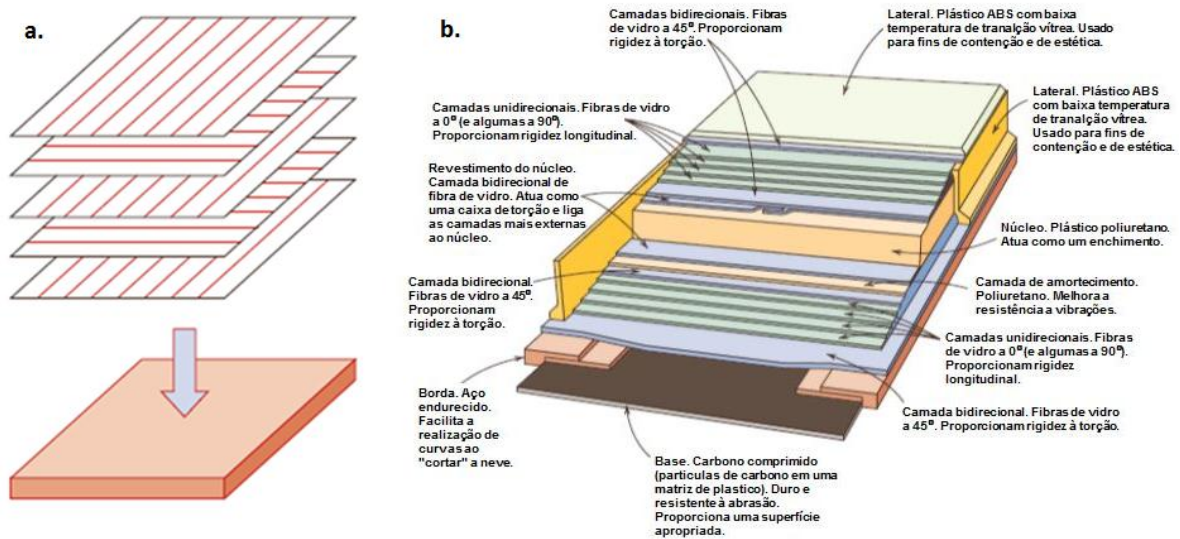
2.4.3 Reforço estrutural

Compósitos com reforços estruturais, como se presume pela própria nomenclatura, além de terem suas propriedades baseadas nos materiais constituintes, característica dos compósitos, também possui propriedades dependentes do projeto geométrico desenvolvido para o mesmo. Se vê também, na Figura 7, que pode-se dividir este tipo de compósito em dois, em Laminados e Painéis-Sanduiche.

2.4.3.1 Laminados

O reforço estrutural laminado possui este nome por ser composto por diversas laminas ou painéis bidirecionais com direção preferencial de alta resistência. As camadas são empilhadas (como visto na Figura 12a) alternando a direção preferências das laminas, garantindo assim altas resistências em diferentes direções no plano bidimensional. Um exemplo de reforço estrutural é encontrado em esquis de neve modernos (Figura 12b) (GIBSON, 1994).

Figura 12 – Ilustrações de Compósitos Estruturais Laminados: a. empilhamento de camadas com fibras orientadas; b. seção transversal de um esqui de neve com seus vários componentes.

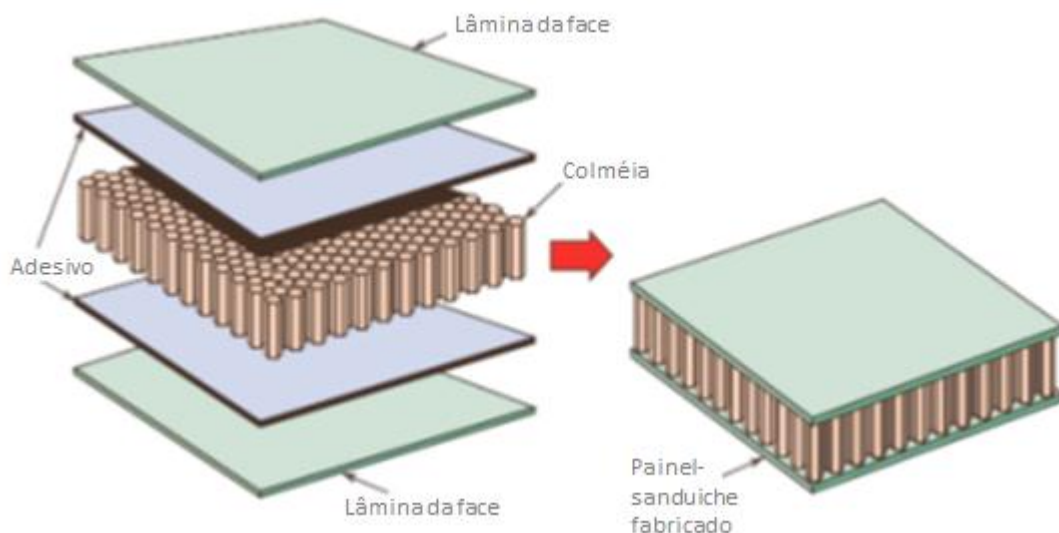


Fonte: Adaptação de Callister (2008)

2.4.3.2 Painéis-sanduiche

Esse tipo de compósito consiste em duas laminas externas, conhecidas como face, que são mais resistentes e são unidas a um núcleo, de menor rigidez e resistência, por meio de adesivo, tais projetos apresentam rigidez e resistência elevada, por esse motivo apresenta aplicações em projetos de vigas.

Figura 13 – Esquema mostrando a construção de um painel-sanduiche com núcleo colmeia



Fonte: Callister (2008)

A função da face é resistir a tensões de tração e compressão, por isso devem ser espessas o suficiente e feita de materiais rígidos, como ligas de alumínio, plásticos reforçados com fibras, titânio, aço ou madeiras compensadas. Enquanto isso, o núcleo deve ser leve e possuir módulo de elasticidade baixo, deve possuir boa resistência ao cisalhamento e flambagem, ele pode ser de três tipos: espumas rígidas, madeira ou colmeias.

A Figura 13 traz um exemplo de painel-sanduiche tipo colmeia, onde a colmeia é feita normalmente de ligas de alumínio ou aramida. A utilização desses painéis possuem um amplo campo como telhados, pisos, paredes prediais e na indústria aeroespacial e aeronáutica em asas e fuselagens.

2.5 COMPOSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS

Como foi dito anteriormente, o reforço com fibras é o tipo de compósito de maior relevância devido este apresentar maior eficiência no reforço, isso se dá devido as fibras apresentarem características ortotrópicas em nível molecular com altas resistências em certa direção, entretanto durante o processo de fabricação dessas fibras algumas falhas podem ocorrer, como microfissuras na superfície, tais falhas enfraquecem as fibras o que as deixam menos resistente que a unidade básica do material que a compõe (CALLISTER, 2008).

A eficiência desse reforço é influenciada por algumas características, como comprimento da fibra, orientação e concentração das mesmas.

O comprimento da fibra influencia para um aumento da resistência e da rigidez de um material compósito. Um comprimento crítico de fibra pode depender de uma série de variáveis tais como diâmetro de fibra, resistências mecânicas e tensões (CALLISTER, 2008).

As fibras são denominadas contínuas quando o comprimento da fibra for muito maior que esse comprimento crítico (em torno de 15 vezes esse tamanho). Quando o comprimento é inferior a esse grau as fibras são conhecidas como descontínuas ou curtas. As fibras descontínuas não apresentam melhoras significativas no compósito, com comportamento muito similar aos de compósitos particulados, para melhora na resistência dos compósitos as fibras devem ser contínuas.

Em relação a orientação das fibras elas podem ser classificadas em duas organizações, estas podem ser alinhadas paralelamente em direção única ou possuir um alinhamento aleatório. Geralmente, fibras contínuas são alinhadas (conforme primeira imagem da Figura

11) enquanto fibras descontínuas podem ser tanto alinhadas quanto aleatórias (conforme imagem (a) e (b) da Figura 11).

De acordo com Askeland e Wright, no livro *Ciência e Engenharia dos Materiais* (2015), outra característica do compósito reforçado com fibras é que massa específica do mesmo é uma mistura das massas específicas da matriz e da fibra de acordo com suas frações volumétricas, ou seja:

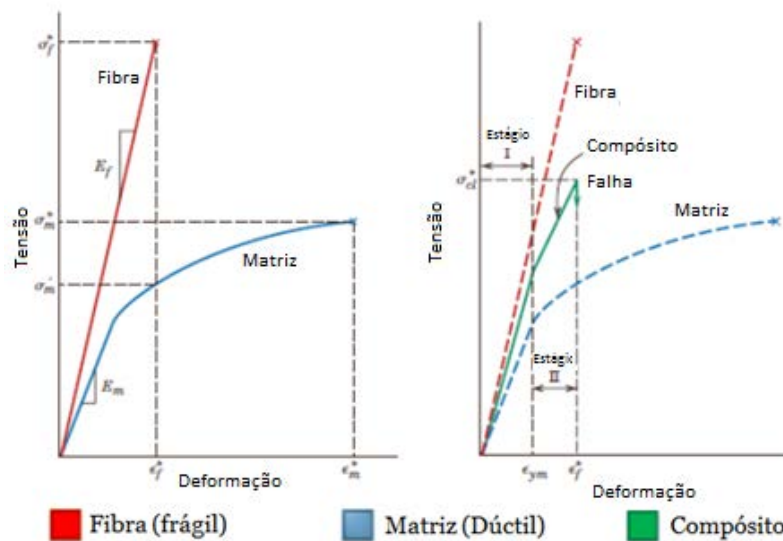
$$\rho_c = f_m \rho_m + f_f \rho_f \quad (1)$$

Além disso, os autores também dizem que se o compósito tiver fibras contínuas e unidirecionais a Equação 1 poderia ser utilizada para identificação da condutividade elétrica (substituindo o ρ pelo σ) e térmica (substituindo o ρ pelo K) do compósito.

2.5.1 Fibras contínuas e alinhadas

Nesse tipo de compósito a direção onde é aplicada a carga influencia no comportamento do mesmo. Para tensões na direção longitudinal o comportamento tensão-deformação pode ser verificado abaixo, onde pode-se analisar os comportamentos das fases matriz e da fibra separadamente, e depois a comparação com o material compósito.

Figura 14 – Representações gráficas do comportamento tensão-deformação em fibras, matriz e no compósito reforçados com fibras



Fonte: Callister (2008)

O início da falha no compósito, mostrado no gráfico à direita, se dá quando as fibras começam a se fraturar, mas a falha não inutiliza o compósito devido nem todas as fibras se fraturarem no mesmo instante, além disso, mesmo que as fibras estejam fraturadas a matriz permanece inteira, devido sua maior deformação (gráfico da esquerda), dessa forma mesmo com as fibras fraturadas elas ainda se encontram inseridas na matriz intacta e se mostra capaz de suportar certas quantidades de carga (CALLISTER, 2008).

O compósito pode também apresentar cargas aplicadas na seção transversal, o que pode gerar falhas prematuras no material, nesses casos o reforço de fibras na fase matriz gera um efeito negativo para o compósito.

2.5.2 Fibras descontínuas

Como já mencionado, as fibras descontínuas podem ser classificadas como alinhadas ou orientadas aleatoriamente. Em ambos os casos a eficiência do reforço é inferior ao obtido quando comparamos com as fibras contínuas, mesmo assim a utilização de compósitos com fibras descontínuas estão sendo utilizados amplamente no mercado, principalmente as fibras de vidro seguidas de fibras de carbono e aramidas.

A escolha do tipo de fibra para produção de compósitos irá depender de vários fatores, como a natureza da tensão aplicada e custos de fabricação. Produção de compósitos de fibras curtas além de serem mais rápidas que seu oposto, também permite obter perfis e formas mais complexas. Outro ponto que pode pesar na discussão é o custo menor para produção de compósitos de fibras descontínuas (CALLISTER, 2008).

2.6 FASE FIBRA DOS COMPÓSITOS FIBROSOS

A fibra pode ser classificada em três categorias: whiskers, arames e fibras. As Whiskers são monocristais de pequenas dimensões e altíssimo grau de perfeição o que confere resistência elevada, entretanto não são amplamente utilizadas como reforço devido ser materiais caros e de difícil ligação com a matriz. Nessa categoria tem-se como exemplos o grafite, carbetto de silício, nitreto de silício e óxido de alumínio.

Os arames são utilizados como reforços radiais de pneus, carcaças de motores e em mangueiras de alta pressão. Possuem como materiais típicos o aço, molibdênio e tungstênio.

Já as fibras propriamente ditas, são em geral de materiais cerâmicos ou poliméricos e apresentam pequenos diâmetros. As fibras são as mais utilizadas entre as demais classificações e estão entre os principais materiais vidro, aramidas e o carbono.

Tabela 2 – Características de alguns materiais fibrosos usados como reforço

Material	Densidade Relativa	Limite de Resistência à Tração [GPa (106psi)]	Resistência Específica (GPa)	Módulo de Elasticidade [GPa (106psi)]	Módulo Específico (GPa)
Whiskers					
Grafite	2,2	20	9,1	700	318
Nitreto de Silício	3,2	5,0 - 7,0	1,56 - 2,2	350 - 380	109 - 118
Óxido de Alumínio	4,0	10,0 - 20,0	2,5 - 5,0	700 - 1500	175 - 375
Carbeto de Silício	3,2	20	6,25	480	159
Fibras					
Óxido de Alumínio	4,0	1,38	0,35	379	96
Aramida (Kevlar 49™)	1,4	3,6 - 4,1	2,5 - 2,85	131	91
Carbono	1,78 - 2,15	1,5 - 4,8	0,7 - 2,7	228 - 724	106 - 407
Vidro-E	2,6	3,45	1,34	72,5	28,1
Boro	2,6	3,6	1,40	400	156
Carbeto de Silício	3,0	3,9	1,30	400	133
Arames Metálicos					
Aço de alta resistência	7,9	2,39	0,30	210	26,6
Molibdênio	10,2	2,2	0,22	324	31,8
Tungstênio	19,3	2,89	0,15	407	21,1

Fonte: Adaptação de Callister (2008)

A Tabela 2 traz informações sobre algumas características mecânicas das classes das fibras e de alguns materiais mencionados, tem-se inúmeros segmentos de fibra de diversas propriedades, desde fibras naturais, como o algodão e bambu, mas será abordado as fibras mais utilizadas.

2.6.1 Fibras de vidro

A fibra de vidro utilizada como reforço possui como característica a elevada resistência à tração, compressão, química e ao fogo, baixo custo e também possui propriedades de isolamento acústico, térmico e elétrico. Em contrapartida o seu módulo de elasticidade é baixo, assim como sua sensibilidade à abrasão e resistência à fadiga.

Diversos tipos de fibras de vidro são produzidos variando sua composição mineral com diferentes especificações, exemplar pode ser validado na Figura 15. Dentre elas podemos mencionar:

- Tipo E: é o mais utilizado por ser um dos mais resistentes, esse tipo apresenta excelentes propriedades dielétricas e mecânicas além de seu baixo custo.

- Tipo C: que apresenta excelente resistência química e é amplamente utilizado como barreiras químicas em tanques e tubos.

Além desses tipos vários outros com seus espaços no mercado, como tipo AR, ECR e vidros de alto desempenho (R, S e T) com foco principal na área aeronáutica e balística (NETO e PARDINI, 2006).

Figura 15 – Exemplo de uma forma comercial de fibra de vidro



Fonte: Interfiber (2016)

2.6.2 Fibras de aramida

A fibra de aramida é de origem orgânica e sintética obtidos por tecelagem, o aramida mais conhecida no mercado é o Kevlar, conforme pode ser visualizado na Figura 16. Apresenta como vantagem possuir baixa massa específica e condutividade térmica, elevada resistência à tração, ao impacto e química (com exceção em meios ácidos), possui boa resistência à abrasão e ao fogo com excelente comportamento sob temperaturas elevadas. Entretanto apresenta baixa resistência a compressão, elevada absorção de umidade e alto custo (WRIGHT, 2015).

Figura 16 – Exemplo de forma comercial da fibra de aramida



Fonte: Dynatech (2017)

É amplamente utilizada em cordas, coletes a prova de bala e carcaça de mísseis.

2.6.3 Fibras de carbono

Fibras de carbono, como visto na Figura 17, são obtidas através de outras fibras ricas em carbono e operações de oxidação, carbonização e grafitação. Tem como vantagem a alta resistência a tração, condutividade térmica, estabilidade dimensional, além de baixa dilatação térmica e boa condição de amortecimento. Em contrapartida, possui baixa resistência ao impacto e a compressão, apresenta baixa deformação antes da fratura (fratura frágil) e seu custo é elevado.

Figura 17 - Exemplo de forma comercial da fibra de carbono



Fonte: STFilm (2017)

Devido as características mencionadas os compósitos reforçados com fibras de carbono são utilizados em áreas aeronáutica e espaciais.

2.7 FASE MATRIZ DOS COMPÓSITOS FIBROSOS

A matriz possui algumas funcionalidades como já dito no tópico 2.3.1 deste trabalho, para compósitos fibrosos a matriz possui a função de unir as fibras e transmitir as tensões a essas, por isso a matriz deve ser de material dúctil e as fibras possuem módulos de elasticidade bem superior a matriz. Como as fibras são as responsáveis por suportar a maior parte das tensões aplicadas ao compósito, a matriz deve então protegê-las contra danos estruturais tanto provenientes de reações químicas quanto abrasões mecânicas, dessa forma prevenindo propagações de trincas e evitando falhas prematuras do compósito.

A matriz pode ser de origem metálica ou polimérica, principalmente quando se faz necessário uma maior ductilidade, ou de origem cerâmica, esta quando se deseja melhor tenacidade.

2.7.1 Matriz polimérica

Resinas poliméricas são utilizadas em larga escala como matriz de materiais compósitos com fibras como seu material de reforço. Diversas fibras podem ser utilizadas agregando boa característica ao compósito, entretanto as mais difundidas ainda são as fibras de vidro, carbono e aramida, devido boas propriedades em temperatura ambiente e baixo custo de produção alinhado a sua facilidade.

Compósitos poliméricos reforçados com fibras de vidro são utilizados com frequência em tubulações de plásticos, pisos industriais, montagens de barcos e automóveis devido estudos visando redução de peso e melhor eficiência dos combustíveis. Essas utilizações se dão devido este tipo de compósito possuir uma faixa de temperatura de trabalho limitada (geralmente até 200°C sem tratamento e até 300°C com tratamento de sílica) e por não serem muito rígidos, embora apresentem resistências elevadas (TITA, 1999).

Já os compósitos poliméricos reforçados com fibras de carbono são utilizados em motores a jato, vasos de pressão, componentes de aeronaves e equipamentos esportivos, como varas de pescar e tacos de golfe.

Os compósitos poliméricos reforçados com fibras de aramidas são utilizados em coletes e blindagens, carcaça de mísseis, cordas e até como substituto do amianto em freios automotivos.

Dentre as outras fibras incorporadas nas matrizes poliméricas as que se destacam também são o boro (utilizadas em aeronaves militares e componentes de helicópteros) e carbetos de silício e de alumina (utilizados desde raquetes de tênis à extremidades de foguetes).

2.7.2 Matriz metálica

Compósitos de matrizes metálicas apresentam uma faixa de temperatura de operação mais elevada que os compósitos poliméricos, além de não serem inflamáveis. Entretanto os compósitos metálicos são muito mais caros que seu par polimérico.

As matrizes destes compósitos mais empregadas são ligas de alumínio, magnésio, titânio e cobre. E sua utilização abrange um leque amplo vindo desde automóveis (componentes de motores com matriz de liga de alumínio e reforço de fibra de carbono e óxido de alumínio, suspensão e transmissão) a indústria aeroespacial,

2.7.3 Matriz cerâmica

Compósito de matriz cerâmica baseia-se na utilização de reforços de materiais cerâmicos incluídos em matriz também cerâmica. Assim o compósito apresenta uma boa resistência e tenacidade à fratura do compósito, também agrega ao compósito melhoria no trabalho em altas temperaturas e maior resistências térmica. Compósitos dessa classe são utilizados como ferramentas de corte de ligas metálicas duras, e se não fosse pela tendência a fratura frágil esse compósito seria mais amplamente utilizado (CALLISTER, 2008).

2.7.4 Outros tipos de matrizes

Alguns tipos de compósitos, esses mais modernos, estão sendo desenvolvidos e utilizados ainda em uma faixa pequena. Exemplos são os compósitos carbono-carbono, estes usados em motores de foguetes e automóveis de alta performance e custo alto devido sua fabricação, e os compósitos híbridos, que utilizam duas ou mais fibras em uma única matriz, dentro dessa categoria o compósito mais utilizado é o híbrido vidro-carbono com características melhores que seus compósitos separados, são utilizados em componentes de baixo peso seja equipamentos de transporte ou ortopédico (CALLISTER, 2008).

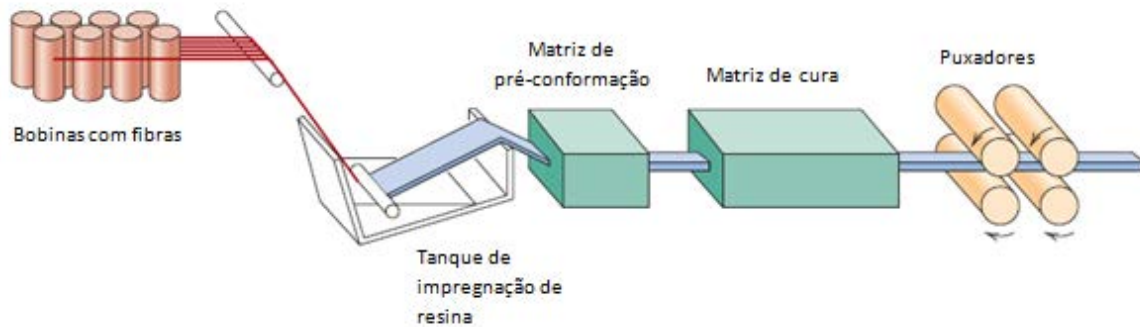
2.8 PRODUÇÃO DE COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS

Várias formas de produção podem ser mencionadas como moldagens (por contato, projeção simultânea, saco de vácuo) entre outros processos de infusão, entretanto daremos enfoque nos mais comuns hoje em dia, o Pultrusão, Prepreg e Enrolamento filamentar.

2.8.1 Pultrusão

Esse processo é esquematizado na Figura 18 e composto pelos rolos de fibras, tina de resina, moldes de pré-conformação e cura com fieiras e por fim o puxador.

Figura 18 – Ilustração do processo de pultrusão



Fonte: Callister (2008)

Este processo tem como produto final materiais de comprimento contínuo e de seção transversal constante. Ele consiste em, através dos puxadores que controlam a velocidade do processo, passar as fibras (mais comuns a fibra de vidro, aramida e de carbono) pelo tanque no qual será impregnado na mesma resina. Após esse processo a fibra com sua matriz de resina (mais utilizados para matrizes poliésteres, ésteres vinílicos e resinas epóxi) passam pela matriz de pré-conformação que através de suas feiras darão a configuração da peça e define primeiramente a quantidade de resina que permanece na fibra. A segunda matriz, de cura, possui basicamente as mesmas funcionalidades que a sua antecessora, define a forma final da peça e inicia a cura da matriz (NETO e PARDINI, 2006).

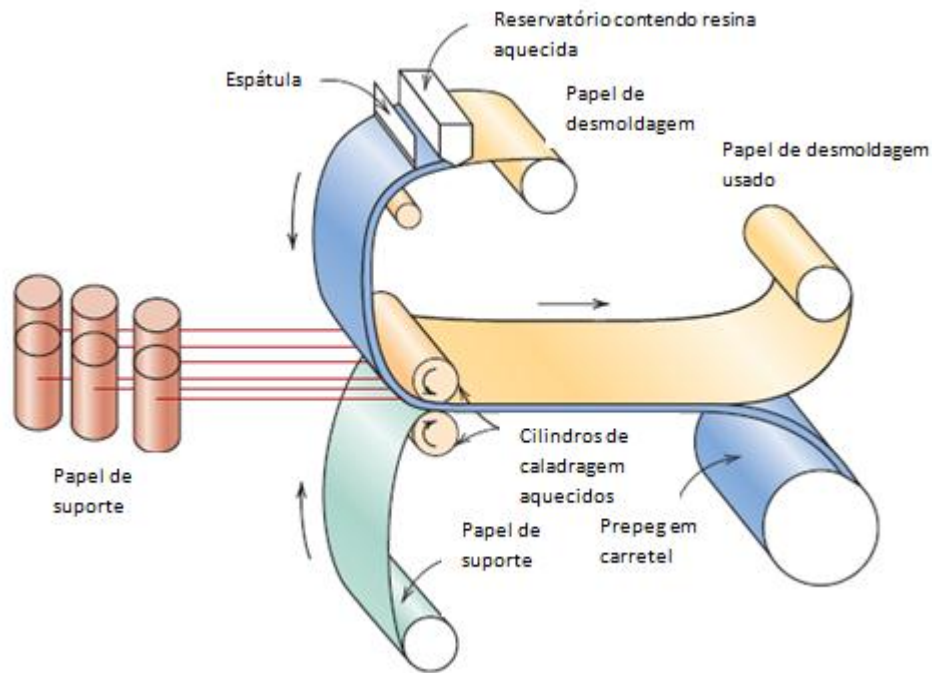
A pultrusão possui vantagens por ser um processo contínuo e facilmente automatizado, apresentar uma vasta variedade de formas para o produto final e apresentar seu comprimento final ilimitado. Seu custo é reduzido por apresentar uma forma fácil de impregnação de resina e cura, além de extrair as fibras diretas do rolo.

Entretanto podemos citar a limitação de seção constante, certo desperdício de material através da conformação do mesmo e até o alto valor das feiras como pontos desvantajosos do processo.

2.8.2 Prepreg

Nesse processo são utilizadas fibras pré-impregnadas pela fase matriz parcialmente curada. Por não necessitar a adição de resina e permitir a conformação e cura final apenas esse é o processo mais utilizado em aplicações estruturais.

Figura 19 – Ilustração do processo da fita prepreg



Fonte: Callister (2008)

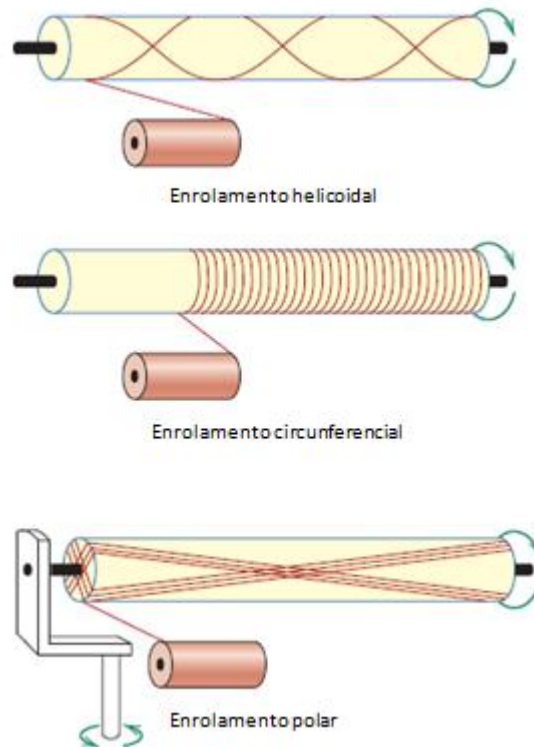
O processo de formação das fitas de prepreg inicia-se pela prensa das diversas fibras (fibras de vidro, aramida ou carbono) entre o papel de desmoldagem com uma película de resina (estas termoplásticas ou termofixas) e um papel de suporte. Dessa forma temos ao final do processo rolos de fitas de prepreg com fibras contínuas e alinhada e matriz parcialmente curada.

O processo possui algumas características que devem ser observadas para trabalho, como a temperatura de armazenagem (máximo de 0°C) e tempo de utilização minimizado. Sua utilização acontece geralmente com a utilização de varias camadas dessa fita visando espessura adequada, podendo utilizar as fibras em uma mesma direção ou alternada, e a cura final acontece com inserção de calor e pressão nas faixas, este um outro ponto que pode ser crítico devido a combinação laminada ter que aguentar as condições aplicadas para cura final (WIEDEMANN, 1986).

2.8.3 Enrolamento filamentar

Esse processo é utilizado para fabricação de componentes ocós, geralmente ovais ou circulares. Ele consiste em fibras banhadas em resinas sendo enroladas em varias orientações sobre um mandril e posterior cura do material ou em temperatura ambiente ou em um forno.

Figura 20 – Ilustração do processo de enrolamento filamentar



Fonte: Callister (2008)

Como com o uso deste processo é possível utilização de diversas formas de enrolamento (podemos verificar na Figura 20) para obtenção de características específicas esse procedimento é utilizado carcaças de motores para foguetes, tanques de armazenamentos e vasos de pressão. Mesmo com a ampliação da utilização desta forma de produção, ainda possui como pontos desvantajosos a limitação ao perfil do produto final, custo de alguns tipos e tamanhos de mandris e devido sua superfície exterior não se lisa apresentar um aspecto não muito atrativo (CALLISTER, 2008).

3 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O chamado Método dos Elementos Finitos constitui em diferentes métodos numéricos que aproximam a solução de problemas descritos tanto por equações diferenciais ordinárias quanto por equações diferenciais parciais através da divisão da geometria do problema em elementos menores, chamados elementos finitos, nos quais a aproximação da solução exata pode ser obtida por interpolação de uma solução aproximada (WAGEMAKER, 2011).

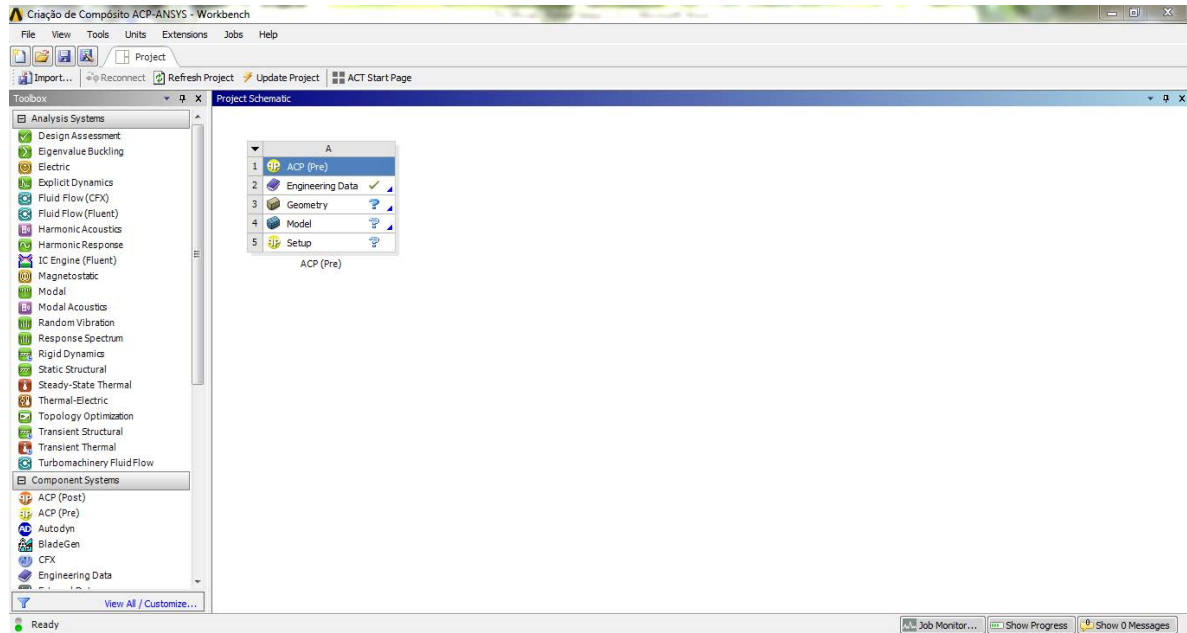
Após a década de 1950 começam a surgir os primeiros exemplares de trabalhos utilizando MEF na área da aeronáutica. Já a partir dos anos 70, além dos aumentos de publicações no campo dos elementos finitos surgem também implementos computacionais que até hoje são referência no mercado, como exemplo o ANSYS (MORAIS, 2015).

O ANSYS é uma ferramenta que se destina ao campo da engenharia que requer simulação no processo de desenvolvimento de produtos. Segundo HUEBNER (1994), todo problema de elementos finitos envolve uma sequência de passos que podem ser definidos como, pré-processamento (etapa que se é definido materiais, propriedades mecânicas e geometria do processo), processamento (obtenção de soluções através de inserção de forças, suportes, entre outras opções) e por último a etapa de pós-processamento (visualização dos resultados).

3.1 CRIAÇÃO DO COMPÓSITO NO ANSYS

Nesse tópico será descrito passo a passo as etapas para confecção de um corpo de prova de material compósito utilizando o ANSYS/ACP, sistema esse próprio para trabalhos com compósitos. O processo inicia-se com a abertura do *workbench* e escolha da opção ACP, conforme Figura 21.

Figura 21 – Criação do composto no ANSYS/ACP - Workbench

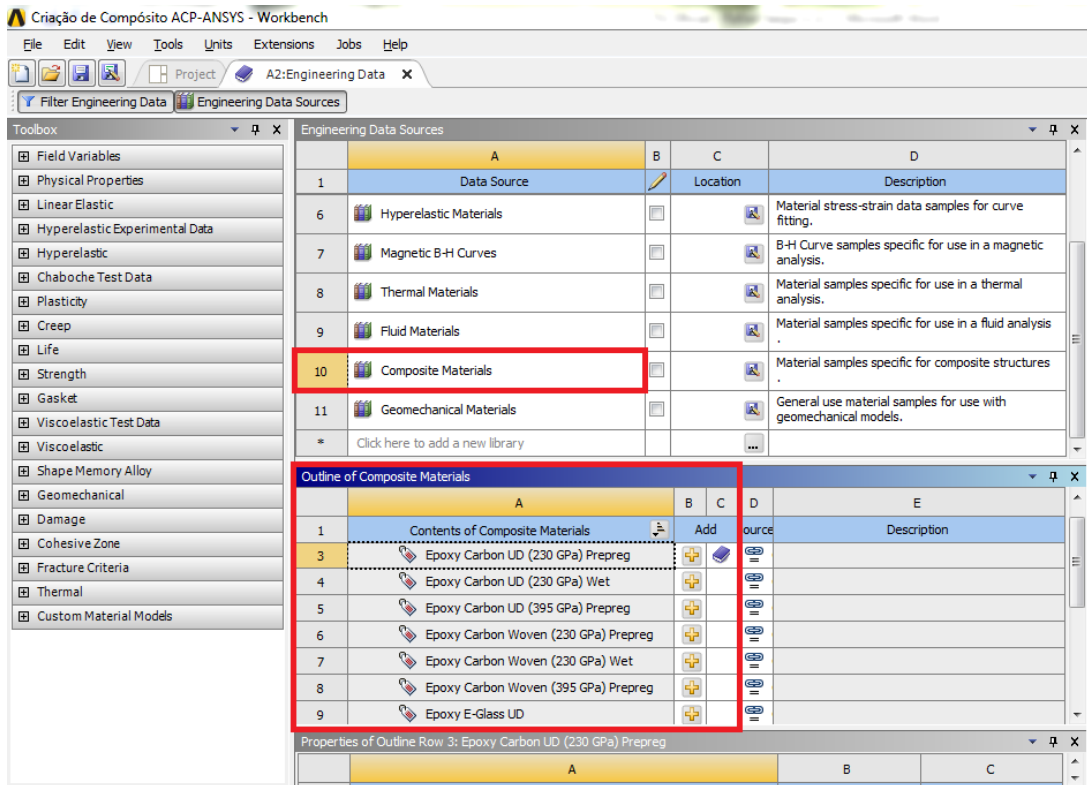


Fonte: Do autor

Primeiro campo no ACP (Pre) é o *Engineering Data* onde nele é escolhido o material para confecção do seu corpo de prova na lista de materiais já inclusos no programa. O sistema também dá a opção de incluir um novo material através da inserção das propriedades necessárias nos dados do material.

Abrindo o campo para definição do material escolhe-se na opção *Engineering Data Sources* o campo de materiais compósitos e em seguida a opção *Outline of Composite Materials* aqueles que se usará para confecção do corpo de prova, conforme pode ser visto na Figura 22.

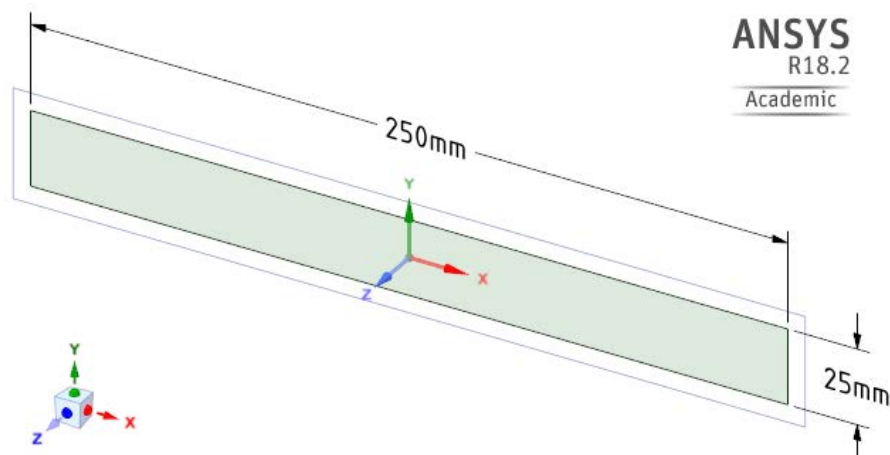
Figura 22 – Escolha do material para confecção do corpo de prova



Fonte: Do autor

Feita a escolha do material mais apropriado inicia-se o segundo campo do ACP (Pre), o *Geometry*, onde foi preparado o desenho da geometria do corpo de prova. Utilizou-se o programa SpaceClaim para realizar o desenho da geometria desejada. Tal programa é proveniente do próprio ANSYS, entretanto essa etapa também permite importar um projeto criado em outros sistemas para desenhos, como CAD e SolidWorks.

Figura 23 – Criação do corpo de prova nas medidas 250x25mm

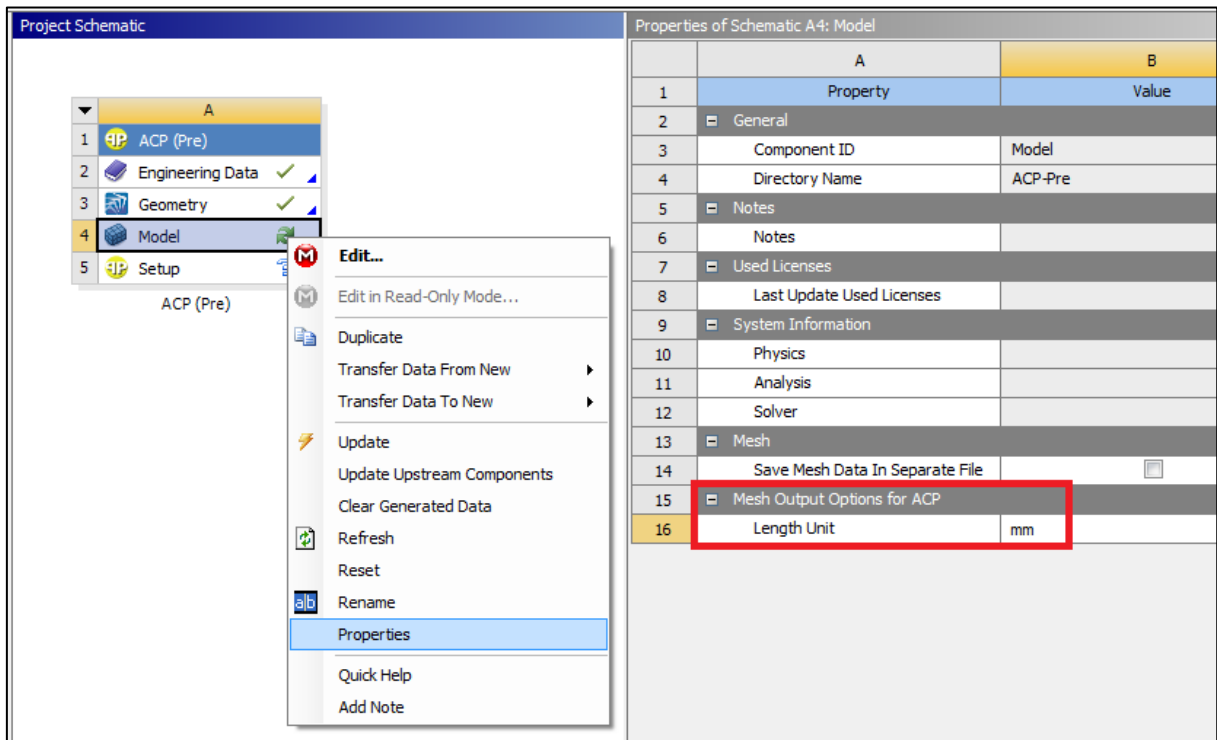


Fonte: Do Autor

A Figura 23 retrata o formato criado que dará forma ao corpo de prova do compósito, no campo seguinte, o *Model*, se dá a profundidade da geometria criada, informa-se o material da peça (daqueles selecionados no primeiro passo) e cria-se a malha da peça.

Nesta etapa, um passo muito importante é o de acessar as propriedades do *Model* e garantir que a medida de comprimento da malha esteja conforme a unidade desejada na criação, nesse caso milímetros (conforme Figura 24).

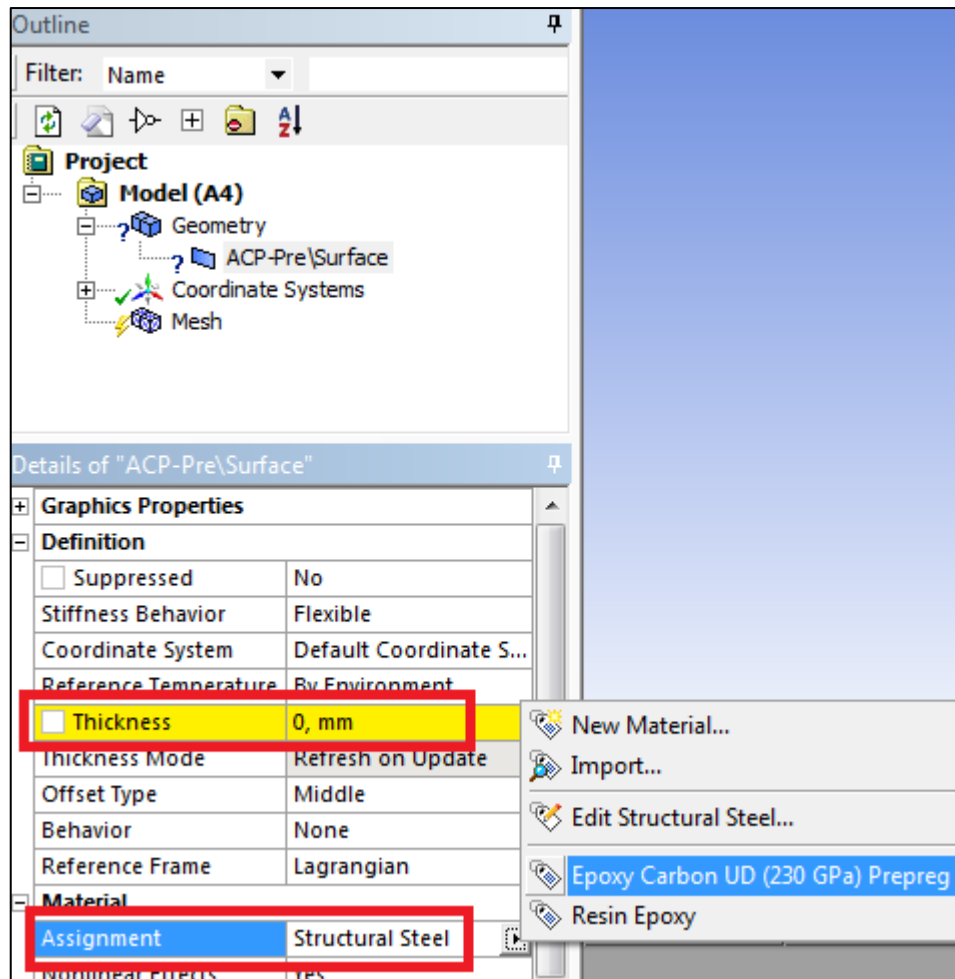
Figura 24 – Alteração das propriedades do Modelo



Fonte: Do Autor

A opção *Model* irá direcionar ao programa *Mechanical* do próprio ANSYS. Nesse programa é informado a espessura da peça na qual irá trabalhar e o material da mesma e em seguida o cria-se a malha. A Figura 25 traz os locais onde é indicado a espessura e material.

Figura 25 – Definição de propriedades do compósito (Espessura e Material)

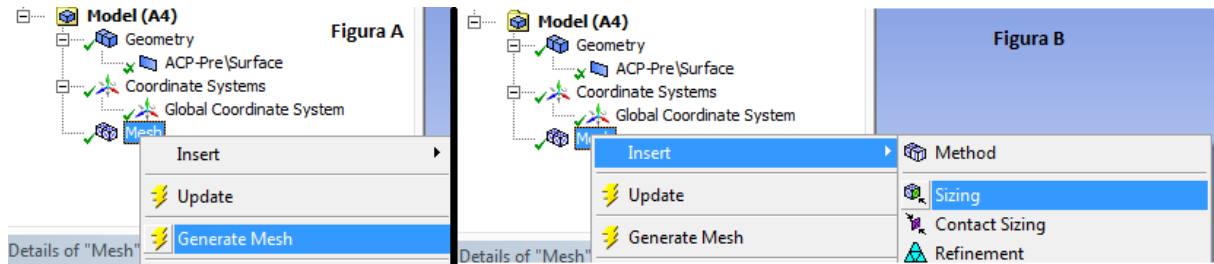


Fonte: Do Autor

A escolha nesse exemplo foi do material Epoxy Carbon UD (230 GPa) Prepreg e a espessura para o compósito será de 2mm.

Próximo passo, como dito anteriormente, é o da definição de malha. Para isso, na opção Mesh tem-se várias formas de inserir malhas no corpo de prova, uma delas é de apenas clicar com botão direito sobre Mesh e escolher uma malha genérica (*Generate Mesh*), como se pode verificar na Figura 26a. Se é necessário uma malha mais refinada pode ser realizado um processo de definição do tamanho de malha, para isso ao clicar com botão direito sobre Mesh deve-se ir na opção *Insert* e em seguida em *Sizing*, como pode ser visto na Figura 26b, nessa etapa seleciona-se a geometria que desejamos refinar malha e em seguida o tamanho de cada elementos de malha.

Figura 26 – Criação de Malhas

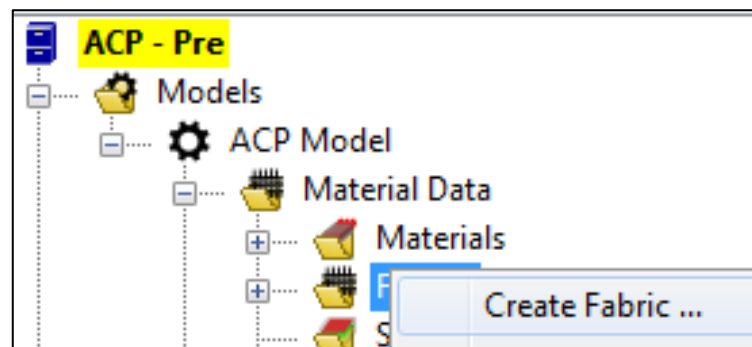


Fonte: Do Autor

O último passo no ACP Pre é o Setup, neste cria-se o compósito propriamente dito, com as definições de camadas e angulações de fibras. Mas antes da montagem tem-se que ter definido como se quer construir o compósito, nesse exemplo se quer 4 camadas iguais do material epoxy-carbon com fibras alinhadas a “60,30,0,45°” em cada camadas e envolto de resina epoxy.

Tendo isso em mente, se inicia seguindo alguns passos até o compósito finalizado onde o primeiro deles ocorre na opção *Material Data/Fabrics*. Nessa opção cria-se cada camada desejada, no exemplo precisa-se criar então uma única camada de material com espessura de 0,5mm cada (para se ter 2mm na espessura do compósito finalizado, como definido no *Mechanical*) que será utilizado 4 vezes.

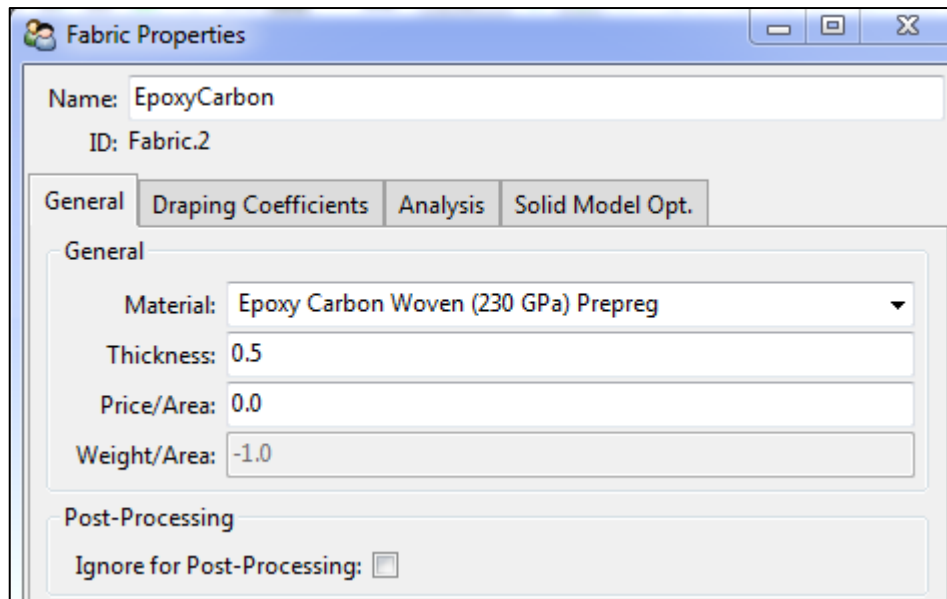
Figura 27 – Criação das Camadas do Compósito



Fonte: Do Autor

Com botão direito na opção Fabrics (Figura 27) cria-se uma camada que terão as propriedades informadas. Pode-se renomear a camada e se deve escolher o material desejado para a mesma, dentre a lista de materiais escolhidos na biblioteca do ANSYS quando iniciou-se o trabalho no ACP e define-se também a espessura que terá cada camada, como é retratado a escolha da propriedade na Figura 28.

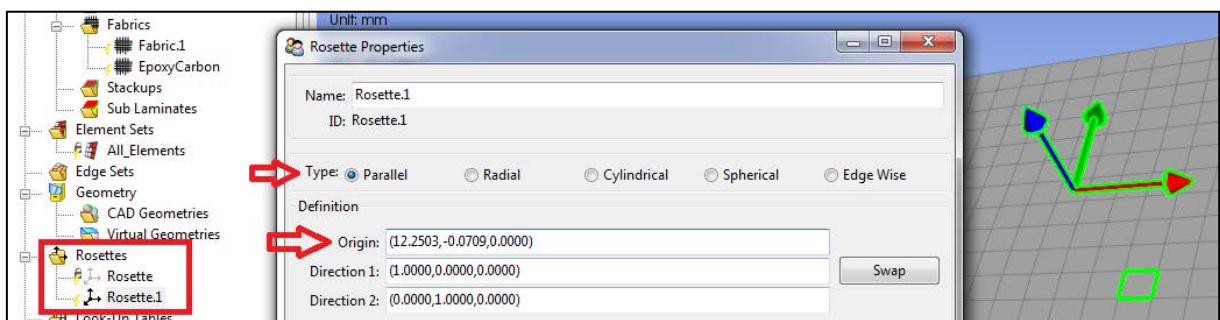
Figura 28 – Definição de Propriedades da Camada



Fonte: Do Autor

Criada a camada o segundo passo é na opção *Rosette*, nesse passo basicamente se definirá o sistema de coordenadas que será utilizado na montagem do compósito informando a origem deste e seu tipo, tipo esse que varia de acordo com o compósito desejado, nesse caso deseja-se camadas paralelas umas as outras. Cria-se uma *Rosette* da mesma forma que uma *Fabric*, com botão direito nela e na opção *Create Rosette* e definindo propriedades, como se vê na Figura 29.

Figura 29 – Definição de Propriedades da Rosette

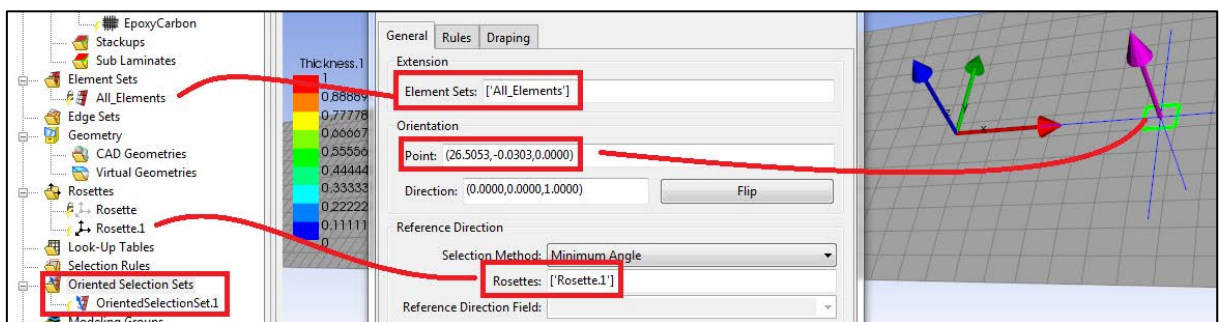


Fonte: Do Autor

No terceiro passo utiliza-se a opção *Oriented Selection Sets*, nessa opção se define algumas informações adicionais sobre as orientações dos elementos. A direção de orientação de um Conjunto de Elementos é responsável por definir a direção de empilhamento da disposição associada (Ansys Overview, 2018), ou seja, basicamente informa que todos os elementos seguiram a orientação indicada na opção.

Para isso, cria-se uma orientação como todas as demais criações, botão direito na opção e *Create Oriented Selection Sets*. Abrindo a tela de propriedades, no campo de definição do conjunto de elementos seleciona-se o conjunto base já do próprio sistema (“*All Elements*”). Na opção de orientação basta clicar na opção *Point* e selecionar o compósito (caso queira alterar a orientação inicial só clicar na opção *Flip* da propriedade). Finaliza-se informando que a Rosette desejada deve ser aquela criada na etapa anterior. Todos os passos pode-se validar na Figura 30.

Figura 30 – Definição da Orientação do Conjunto de Elementos do Compósito

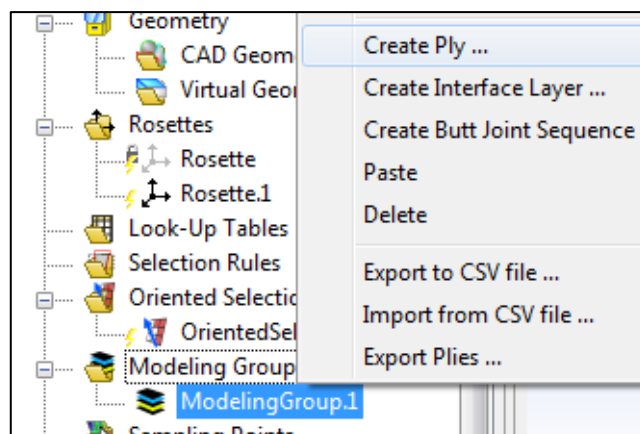


Fonte: Do Autor

Feito isso tem-se por fim que realizar a modelagem do compósito utilizando a camada base criada, orientações e indicando a angulações das fibras.

O último passo será feito na opção *Modeling Group*, criar-se-á um grupo de forma semelhante ao que está sendo realizado até o momento (botão direito e *Create Modeling Group*), a diferença se dá que após criado o grupo de trabalho deve-se criar as opções de camadas para isso dentro do grupo criado deve-se clicar com botão direito nele e criar a camada na opção *Create Ply*, como se na Figura 31.

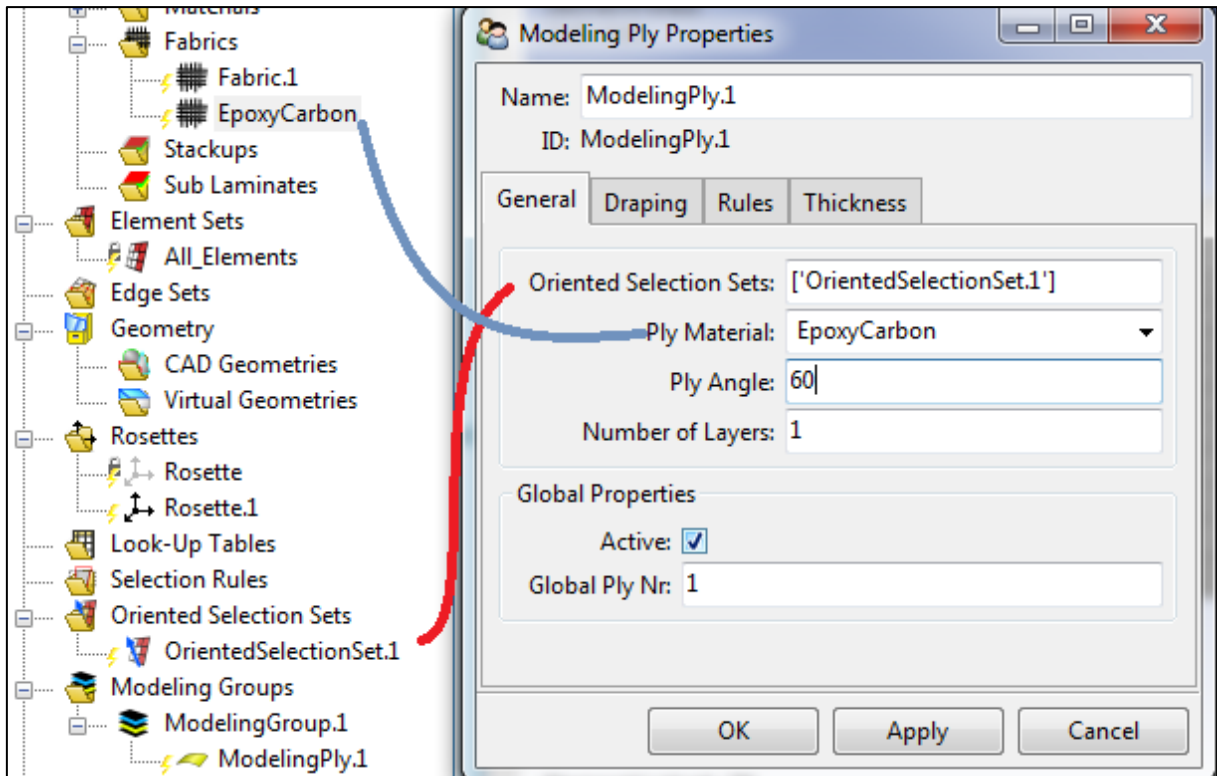
Figura 31 – Criação de Camadas para o Compósito



Fonte: Do Autor

Com a camada criada deve-se, no campo de propriedades da mesma, informar a orientação do conjunto (criado no passo anterior), material da camada (criado na etapa Fabric) e a angulação da fibra, esta primeira de 60° como definido anteriormente (60,30,0,45°). A Figura 32 traz visão de como ficam as propriedades após as alterações.

Figura 32 – Definição das Propriedades da Primeira Camada do Compósito

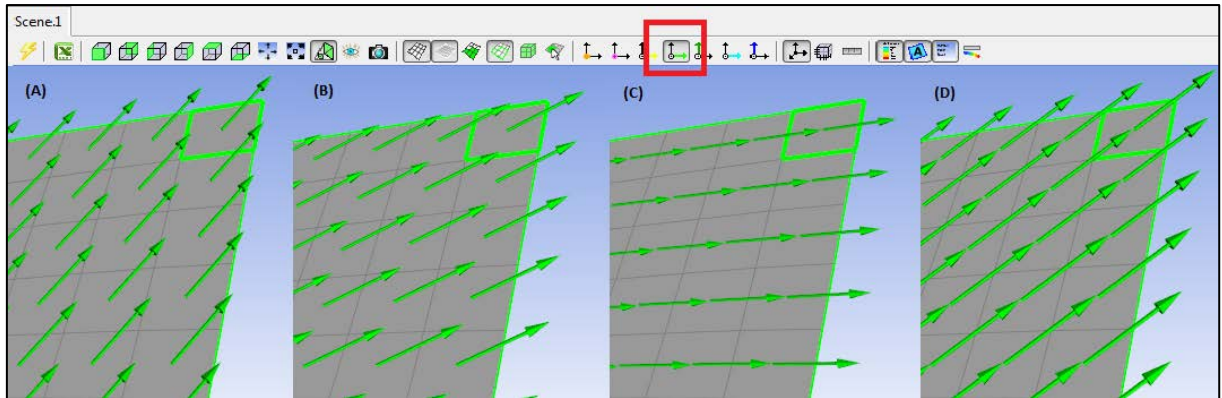


Fonte: Do Autor

A criação das demais camadas deve seguir mesma linha de comandos, se atentando apenas para alterações do ângulo da fibra.

Feito isso pode-se dar uma atualizada na montagem através da opção Update e checar a orientação das fibras, para isso deve-se habilitar a opção *Show Fiber Directions* na aba de visualização e passar por todas as camadas criadas. Na Figura 33 tem-se uma visão de como muda a orientação das fibras na camadas, onde na imagem (A) tem todas as fibras à 60°, na (B) todas à 30°, na (C) todas à 0° e por fim na imagem (D) todas as fibras orientadas à 45°.

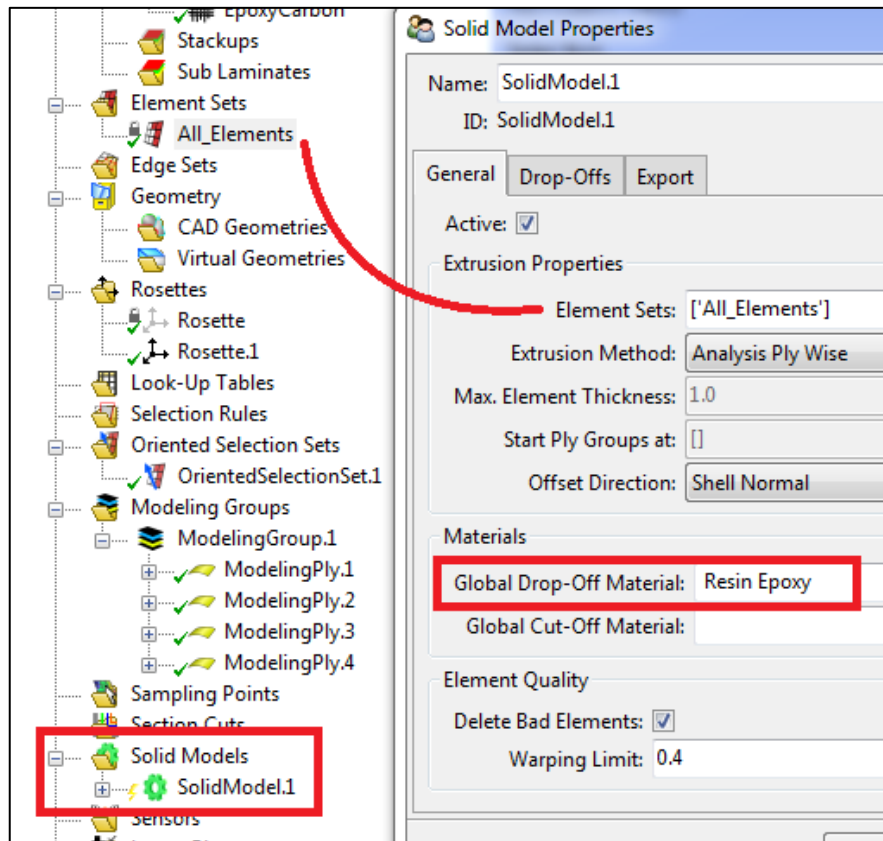
Figura 33 – Orientação das Fibras em cada Camada



Fonte: Do Autor

O processo de criação do compósito chega ao fim faltando apenas a junção de todas as camadas criadas. Para tal operação utiliza-se a opção *Solid Models* onde nele é informado apenas o grupo de elementos utilizados (novamente “All Elements”) e qual material da primeira listagem se utilizará para união dessas camadas, da biblioteca fora selecionado a resina epóxi.

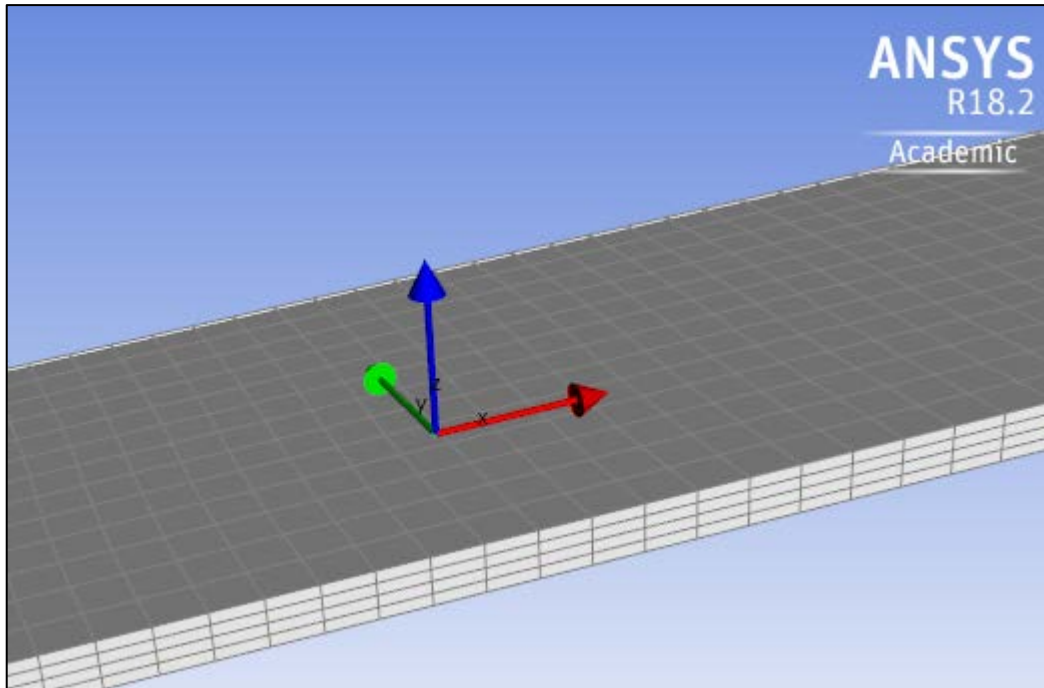
Figura 34 – Modelagem sólida do compósito



Fonte: Do Autor

Finalizado este último processo deve-se atualizar a modelagem (novamente na opção Update) e terá o compósito sólido formado, como se vê na Figura 35, o sólido apresenta as 4 camadas criadas e unidas que serão utilizadas nos ensaios com o corpo de prova, estes já realizados fora do ACP (Pre).

Figura 35 – Compósito em sua forma final após modelagem

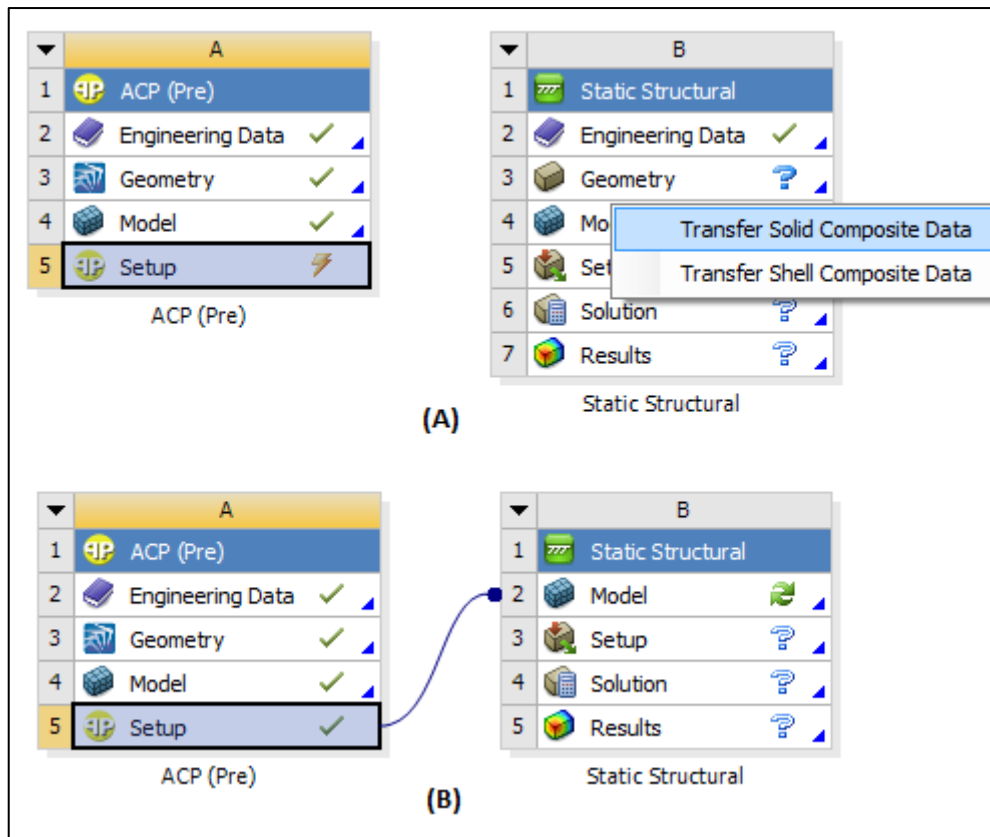


Fonte: Do Autor

Finalizado as etapas no ACP (Pre) será utilizada a ferramenta do Toolbox chamada *Static Structural* onde nela iniciará o processo de ensaio no compósito criado.

Para fazer link do compósito criado no ACP (Pre) com o sistema do *Static Structural* deve-se arrastar este para a área de trabalho, após feito isso selecionar o Setup do ACP (Pre) e arrastar este para cima da opção *Model* do *Static Structural* e como se quer analisar o compósito criado como um corpo de prova único e sólido deve-se escolher a opção *Transfer Solid Composite Data* como mostra a Figura 36a e em seguida, na Figura 36b, tem-se como fica após a transferência.

Figura 36 – Transferência do compósito criado em ACP para ensaios no Static Structural

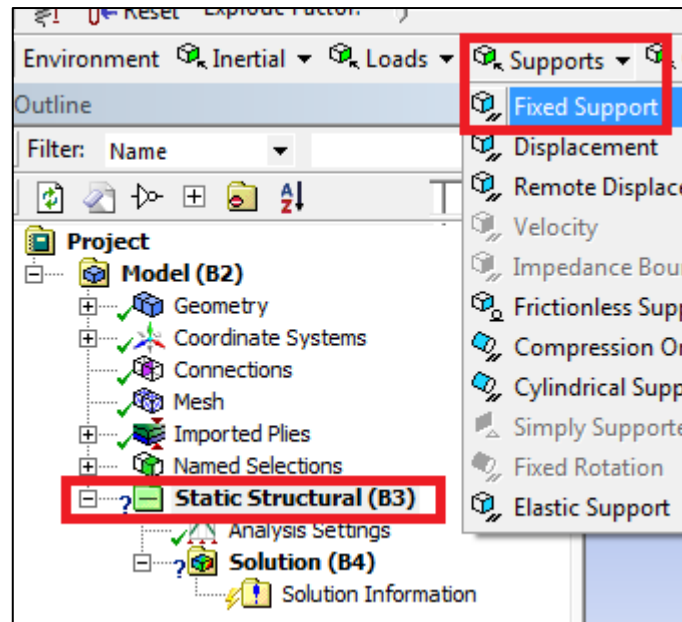


Fonte: Do Autor

Realizado a transferência deve-se atualizar (“Refresh”) no Model do Static Structural para carregar as informações e iniciar a simulação no Setup deste sistema.

No Setup, abre-se o Mechanical do Static Structural e nele irá se realizar um ensaio básico de tensão na peça, para isso coloca-se um lado do compósito engastado (suporte fixo) e no outro uma força de grandeza 100N para exemplificar.

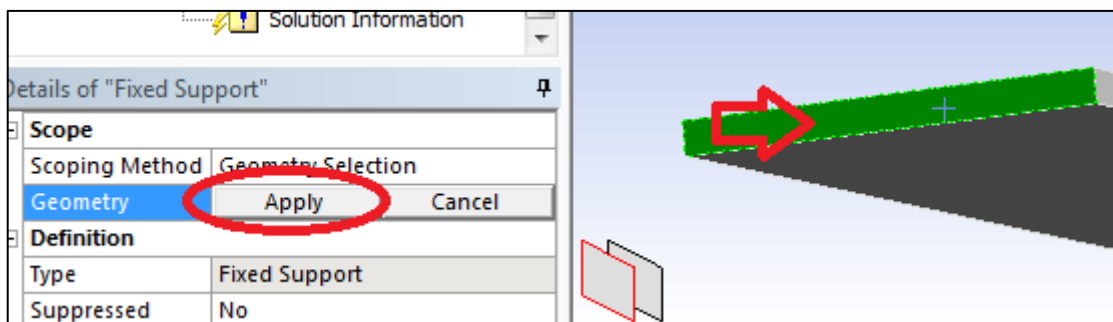
Figura 37 – Escolha do suporte para ensaio



Fonte: Do Autor

Na opção *Static Structural (B3)* no Outline do programa, acrescenta-se primeiro um suporte fixo, na opção *Supports* na barra de tarefas do programa e clicamos na opção *Fixed Support*, conforme mostra a Figura 37. Em seguida seleciona-se a superfície na qual deseja que se mantenha engastada e é dado um aceite, como mostra a Figura 38.

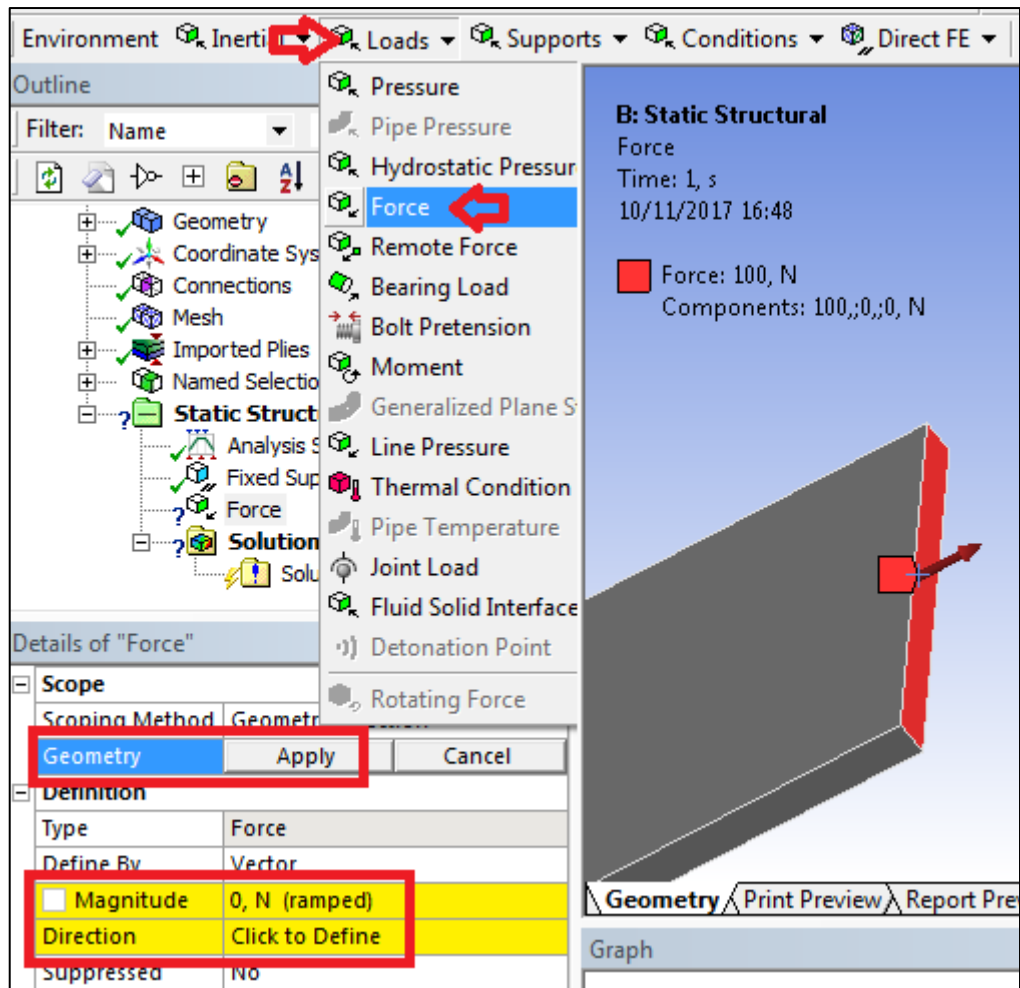
Figura 38 – Escolha da superfície para suporte fixo



Fonte: Do Autor

No outro extremo do corpo de prova coloca-se uma força de 100N, para isso deve-se ir na mesma opção *Static Structural (B3)* no Outline do programa em seguida na opção *Loads* na barra de tarefa e para finalizar escolhe-se *Force* (força). Feito isso deve-se também selecionar a superfície onde será aplicada tal força, sua magnitude e direção (Figura 39).

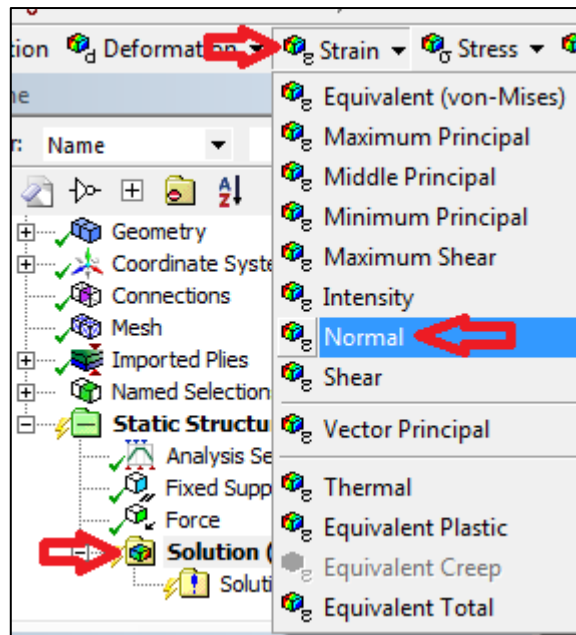
Figura 39 – Escolha da superfície, magnitude e direção da força



Fonte: Do Autor

Criado o cenário de ensaio tem-se agora que informar ao sistema o que se quer visualizar como resultado, nesse caso um ensaio de tensão. Dessa forma na opção *Solution (B4)* no Outline do programa escolhe-se a opção *Strain* na barra de tarefas do programa e em seguida uma dentre os vários tipos de tensões mostrados, no caso escolhe-se uma tensão normal, conforme mostra a Figura 40.

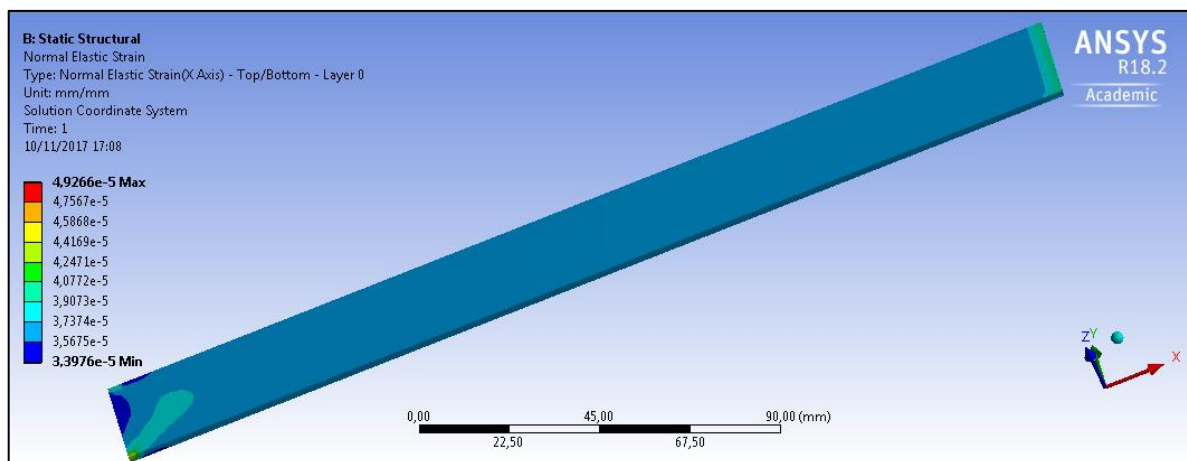
Figura 40 – Escolha da solução desejada



Fonte: Do Autor

Feito isso precisa-se apenas dar o comando para realizar o ensaio, na opção *Solve*, e analisar os dados da forma que se deseja. A Figura 41 traz o resultado desse exemplo após solucionado.

Figura 41 – Solução do ensaio feito no exemplo

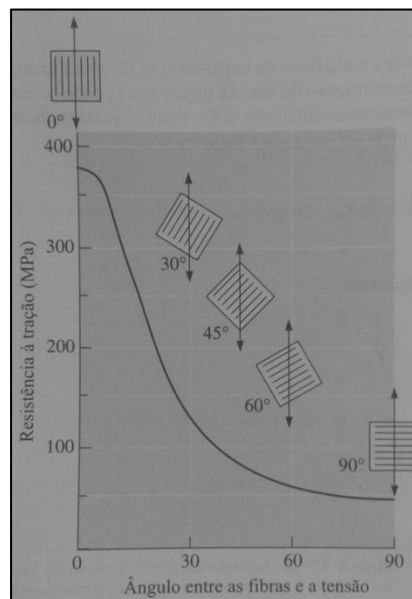


Fonte: Do Autor

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No livro *Ciência e Engenharia dos Materiais*, 3ªed. 2015, os autores Wendelin Wright e Donald Askeland, reforçam que fibras alinhadas com a direção da tensão aplicada geram boa resistência mecânica e rigidez, o que é designada como 0° , no entanto resultam em baixas propriedades se carga é aplicada perpendicular as fibras.

Figura 42 – Efeito da orientação das fibras na resistência à tração de compósitos de epóxi reforçados com fibras de E-glass



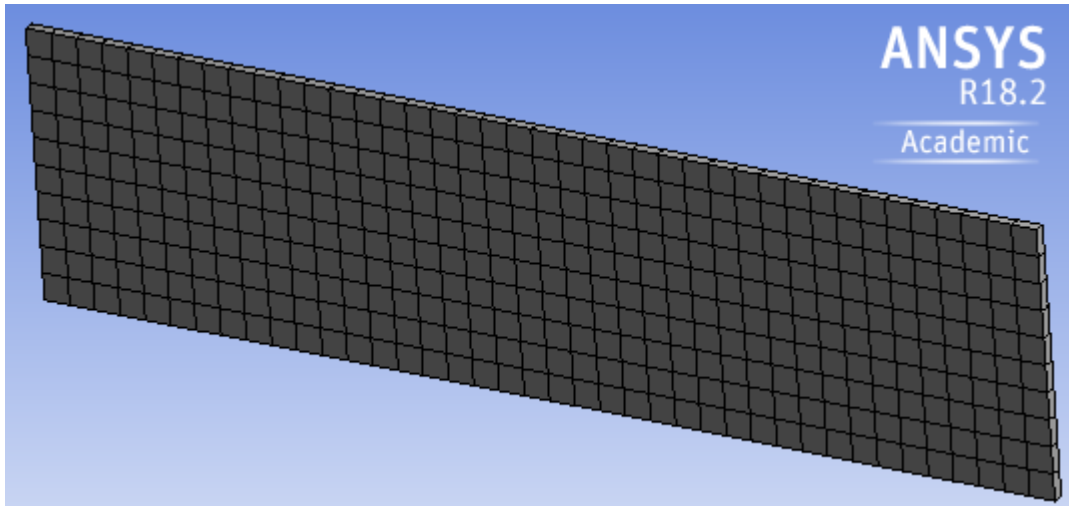
Fonte: Askeland e Wright (2015)

Descrevem também o efeito da orientação das fibras na resistência do compósito (Figura 42), esta etapa do trabalho irá realizar validação de tal teoria. Como se vê, no ensaio de tração tem-se compósitos com fibras à 0° se mostrando mais resistentes do que fibras à 30° , que por sua vez também se mostra mais resistente que fibras à 45° , estas melhores que 60° e por fim melhores que 90° . Dessa forma se for realizado um ensaio simples de tensão, como o mostrado no exemplo de criação de compósitos, deve-se esperar deformações menores em compósitos com fibra alinhadas com a força aplicada (fibras à 0°) e maiores em compósitos com fibras perpendiculares a força aplicada (fibra à 90°).

Para validar a teoria exposta no livro cria-se 5 corpos de prova, de 4 camadas retangulares e com ângulos idênticos ao livro, as propriedades respeitarão as seguintes especificações:

- Material: Compósito epóxi reforçado com fibras de E-glass
- Dimensão: 200mm x 50mm x 2mm
- Angulações: 0°, 30°, 45°, 60° e 90°

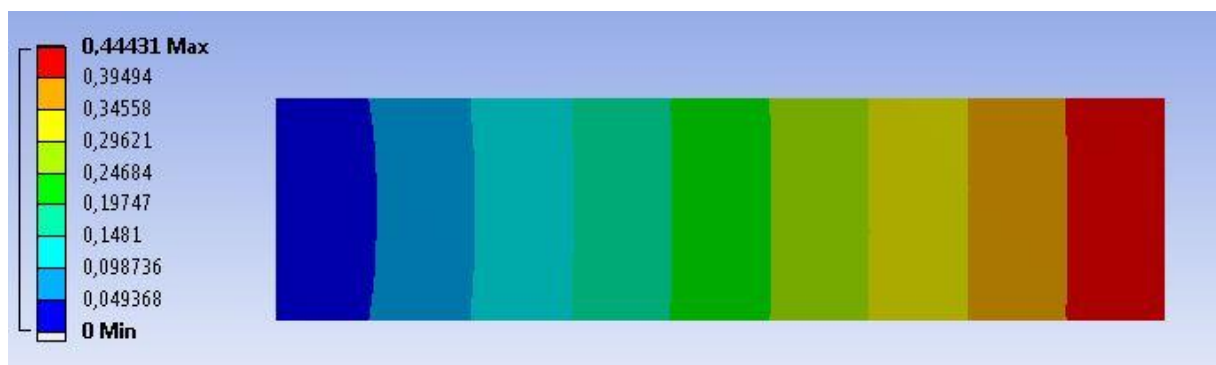
Figura 43 – Corpo de Prova criado para ensaio



Fonte: Do Autor

A Figura 43 mostra a geometria do corpo de prova criado, inicia-se com angulação à 0° para validar a deformação obtida. No ensaio utilizou-se uma força de 10.000N o que gerou no compósito uma deformação máxima de apenas 0,44mm, como se por ver na Figura 44.

Figura 44 – Deformação do compósito com fibras alinhadas à 0°, em mm.



Fonte: Do Autor

Finalizado a obtenção dos dados, realiza-se mesmo processo para fibras alinhadas à 30°, obtendo uma deformação de 1,51mm, como era de se esperar maior que a deformação do ensaio com fibras à 0°, ou seja, $d_{30^\circ} > d_{0^\circ}$, como se vê na Figura 45.

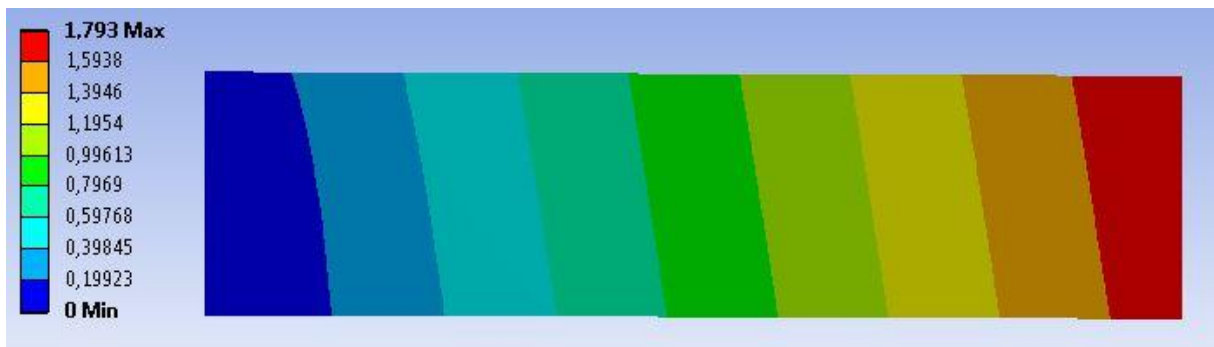
Figura 45 – Deformação do compósito com fibras alinhadas à 30°, em mm



Fonte: Do Autor

Seguindo com o intuito do ensaio, cria-se um compósito com fibras alinhadas à 45° e medi-se também sua deformação, cujo resultado pode ser validado na Figura 46 e foi conforme esperado, a deformação à 45° foi de 1,79mm, superior às deformações dos ensaios anteriores, $d_{45^\circ} > d_{30^\circ} > d_{0^\circ}$.

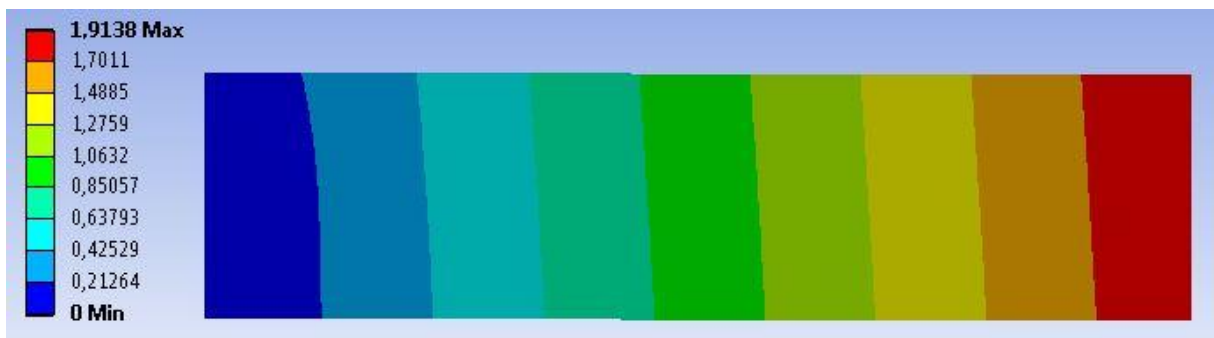
Figura 46 – Deformação do compósito com fibras alinhadas à 45°, em mm



Fonte: Do Autor

Quarto ensaio foi no compósito com fibras alinhadas à 60°, que resultou em uma deformação de 1,91mm e como fora esperado deformações ainda maiores que os ensaios anteriores, ou seja, $d_{60^\circ} > d_{45^\circ} > d_{30^\circ} > d_{0^\circ}$.

Figura 47 – Deformação do compósito com fibras alinhadas à 60°, em mm



Fonte: Do Autor

Último ensaio fecha e valida o conceito de resistência dos compósitos reforçados com fibras, onde com fibras alinhadas à 90° obtivemos uma deformação de 1,99mm, garantindo a sequencia esperada de $d_{90^\circ} > d_{60^\circ} > d_{45^\circ} > d_{30^\circ} > d_{0^\circ}$, conforme se vê na Figura 48.

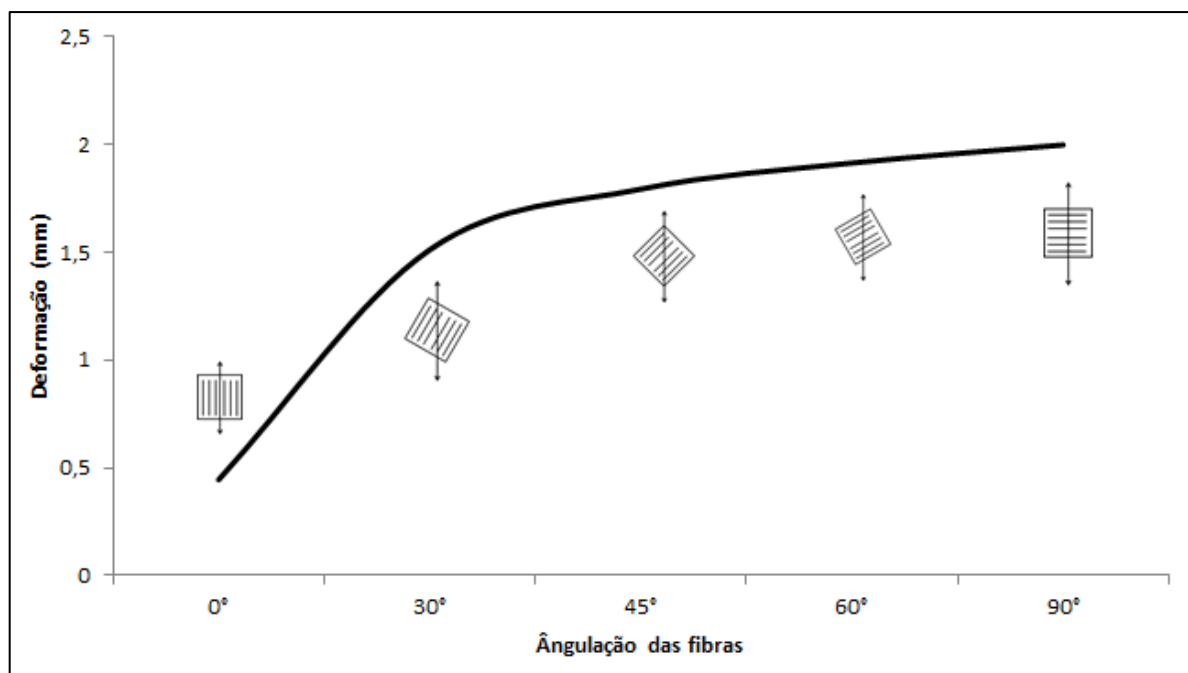
Figura 48 – Deformação do compósito com fibras alinhadas à 90°, em mm



Fonte: Do Autor

Como dito, esperava-se que a deformação apresentasse um efeito contrario ao que a Figura 42 nos trouxe, pois quanto maior fosse a resistência à tração do compósito, menor seria sua deformação, foi exatamente o que se obteve, melhores propriedades mecânicas quando a força aplicada estivesse alinhada à direção das fibras, como aborda a bibliografia.

Figura 49 – Efeito da orientação da fibras na deformação dos compósitos



Fonte: Do Autor

Observa-se no gráfico da Figura 49 claramente a coerência com o gráfico de resistência à tração versus angulação de fibra, onde neste te-se uma resistência muito próxima entre fibras anguladas à 60° e 90°. Outra característica do ensaio de resistência a tração é um espaçamento não tão grande quando se trata da resistência entre 30° e 90°, além de um salto considerável de resistência da fibra à 30° para fibra à 0°, aproximadamente 250MPa.

Quando se tem a visão de deformação, há um salto também grande quando compara-se o compósito de 0° e 30°, deformação de 0,44mm para 1,51mm. Além desta característica se vê uma deformação não tão grande quando comparamos deformação entre compósitos de fibra à 30° e 90° e uma deformação muito mais próxima quanto à deformações de compósitos com fibras à 60° e 90°.

Outra característica que os autores trazem naquele mesmo exemplar, é que os compósitos reforçados com fibras possuem uma característica de poder adaptar suas propriedades para satisfazer diferentes tipos de carregamento. Fibras longas e contínuas podem ser dispostas em várias direções na matriz, onde arranjos mais complexos (0° / ±45° / 90°) fornecem reforço em múltiplas direções, tendo um comportamento quase isotrópico.

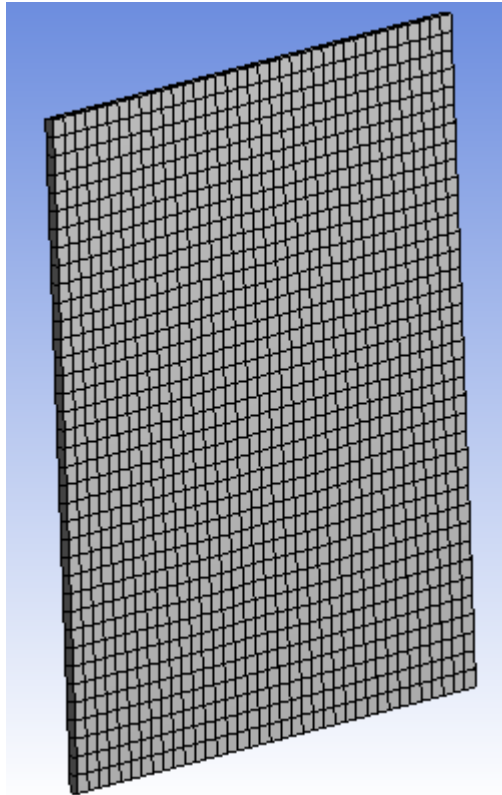
Para validação de tal afirmação cria-se um compósito de 8 camadas com todas suas fibras alinhadas a 0° e aplicando um carregamento em direções paralelas e perpendiculares à fibra, em seguida, com um compósito de fibras cruzadas com angulação de 0°/90°/+45°/-45°/-45°/+45°/90°/0° e aplicando mesmo carregamento.

Inicia-se a criação do compósito com as seguintes propriedades:

- Material: Epoxy Carbon UD (230GPa) Prepreg e Resin Epoxy
- Dimensão: 300mm x 300mm x 4mm

Seguindo os passos de modelagem cria-se um corpo de prova e refina-se sua malha (Figura 50) prosseguindo para realização dos ensaios.

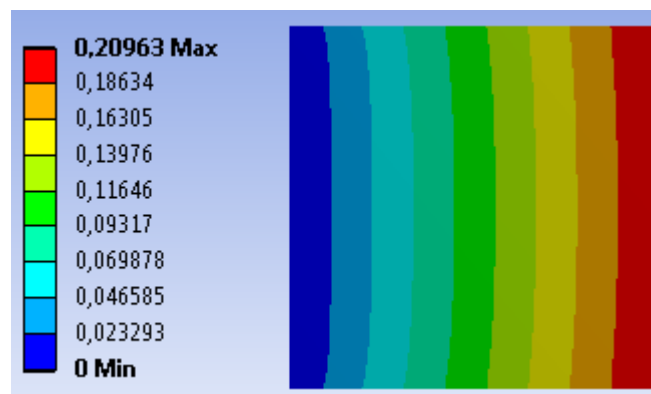
Figura 50 – Corpo de Prova para Ensaio



Fonte: Do Autor

Fixando uma das laterais do compósito e aplicando uma força , de grandeza 100kN, na outra extremidade, estas na direção da fibra para primeiro ensaio, ou seja, à 0°, apresentará uma deformação no corpo de prova como demonstrado na Figura 51.

Figura 51 – Deformação do compósito com uma força aplicada no sentido da fibra, em mm

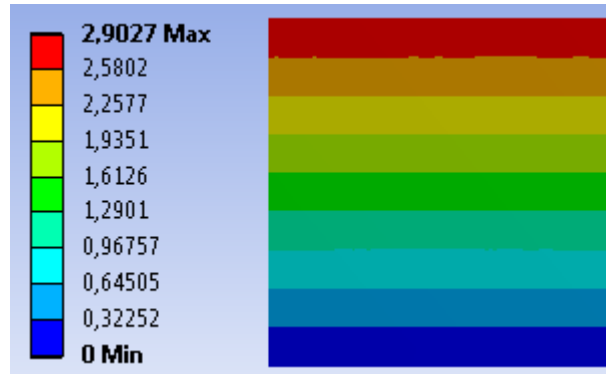


Fonte: Do Autor

A deformação obtida de aproximadamente 0,21mm na direção da fibra gera uma expectativa de que se o engastamento e a força aplicada fosse no sentido perpendicular à

angulação das fibras o compósito teria uma deformação superior. Deve-se realizar mesmo ensaio alterando então as direções do suporte fixo e da força aplicada.

Figura 52 – Deformação do compósito com uma força aplicada perpendicularmente ao sentido da fibra, em mm

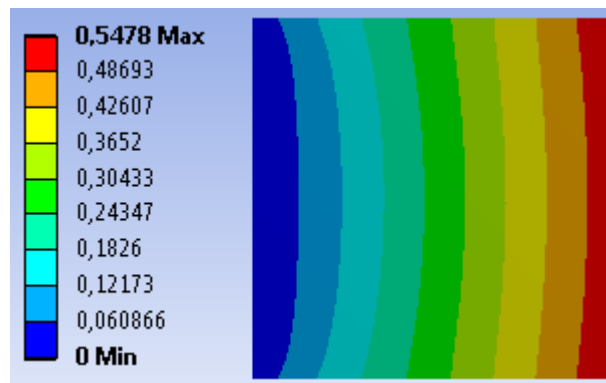


Fonte: Do Autor

Como pode-se validar na Figura 52, aplicando uma força de mesma grandeza mas no sentido oposto às fibras, tem-se uma deformação quase 14 vezes maior, o que era esperado para o ensaio, comprovando a teoria mencionada ao longo do trabalho.

Feito a primeira parte da validação da teoria, ensaia-se a segunda parte na qual é descrito que compósitos de fibras anguladas em várias direções tenderiam a um comportamento quase que isotrópico. Para isso utiliza-se mesma estrutura feita na primeira parte alterando a angulação das fibras, dessa forma pode-se comparar também os ensaios.

Figura 53 – Deformação do compósito de fibras alternadas com força aplicada horizontalmente, em mm

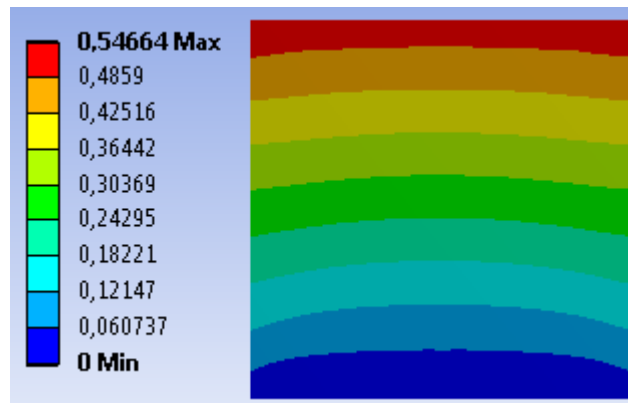


Fonte: Do Autor

Tem-se na Figura 53 o resultado da deformação do compósito com a força sendo aplicada no eixo X, horizontalmente na peça, o ensaio deu um resultado de aproximadamente 0,55mm e se coerente com a teoria o mesmo ensaio, porém com a força aplicada no sentido vertical na peça, nos daria quase a mesma deformação.

Pode-se validar, conforme é mostrado na Figura 54, que novamente a teoria foi validada pois com um resultado de deformação aproximado para 0,55mm o estado de isotropia fora propiciado.

Figura 54 – Deformação do compósito de fibras alternadas com força aplicada verticalmente, em mm



Fonte: Do Autor

A isotropia pode ser definida como uma propriedade que caracteriza substâncias que possuem mesmas propriedades físicas independentemente da direção considerada (Dicionário Português, 15ªed. 2016), verificou-se então que tal característica pode ser encontrada nos compósitos com angulações de fibras multidirecionais.

Outra parte da teoria que pode-se referenciar nos resultados é a característica do material que se alinhado em múltiplas direções tende-se à uma boa resistência em todas elas, porém se a fibra é alinhada em única direção terá nesta uma resistência ainda melhor. Foi visto nos ensaios que tendo todas as fibras alinhadas e uma força aplicada na direção da mesma tem-se uma deformação de 0,21mm, o melhor resultado nos ensaios, na sequencia viria as fibras em múltiplas direções com deformações a casa dos 0,55mm e seguida viria as fibras alinhadas perpendicularmente à aplicação da força com 2,90mm.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho iniciou-se com uma rápida explicação sobre o que são materiais compósitos, suas divisões, especificações e aplicações. Teve seu objetivo fundamentado em detalhar todas as etapas de criação de um compósito utilizando o sistema ACP do software Ansys.

Primeiramente definiu-se a forma de trabalho utilizando o ACP (Pre) passando pela escolha do material no tópico Engineering Data, pela definição de geometria no tópico Geometry, passando pela definição de espessura e refinamento de malha no item Model. Finalizou-se com a opção Setup onde foi definido o formato do compósito com criação de camadas, orientações de fibras e modelagem com compósito sólido. Após essa etapa explicou-se como realizar os ensaios no material compósito criado linkando todo trabalho realizado no ACP(Pre) ao Static Structural.

Foi realizado um primeiro experimento para validar o comportamento do compósito com a variação dos ângulos das fibras inseridas. Verificou-se que o compósito possui uma melhor resistência quando as fibras se encontram na mesma direção da tensão aplicada e em seu oposto, fibras perpendiculares à força aplicada, se encontra a posição de menor resistência. Validou-se nesse primeiro ensaio a expectativa criada após a teoria expressa no livro Ciência e Engenharia dos Materiais, 3ªed. 2015, dos autores Wendelin Wright e Donald Askeland, onde foi realizado validações sobre compósitos sob ensaio de tração e realizada também toda uma comparação de resultados baseando-se no livro e nos resultados obtidos.

Segundo ensaio abordou o comportamento isotrópico que um compósito pode assumir quando possui múltiplas direções de fibras. Ficou claro neste ensaio que quando há ciência da força aplicada e se faz conhecida sua direção de atuação, pode-se escolher um compósito que possua fibras em uma única direção, direção esta que será a mesma da força e gerará uma melhor propriedade mecânica naquele sentido.

Quando se desconhece o sentido da força aplicada ou meio de atuação do compósito desejado, pode-se utilizar um compósito de fibras multidirecionais que apresentará um comportamento isotrópico em qualquer direção, este inferior ao compósito de fibras alinhadas à direção da força aplicada, porém ainda sim caracterizando um compósito de excelentes propriedades e muito superior ao caso do compósito ter uma força aplicada perpendicularmente ao sentido das fibras.

Conclui-se que compósitos possuem amplo mercado de atuação por possuir propriedades não encontradas em seus materiais isolados e de grandezas específicas à

construção do mesmo. Conclui-se também que a utilização do software Ansys para ensaios nesses materiais pode ser ainda mais completo e exato com o desenvolvimento do sistema ACP e todos seus dados, obtidos através dos ensaios mencionados, retrataram perfeitamente o comportamento esperado e descrito em teoria o que satisfaz o intuito deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- ASKELAND, D. R.; WRIGHT, W. J. **Ciência e Engenharia dos Materiais**. 3. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2015.
- BEER, F. P.; JOHNSON JUNIOR, E. R. **Resistência dos Materiais**. 3 ed. São Paulo: Makron Books, 1996.
- CALLISTER JUNIOR, W. D. **Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução**. 7 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008
- DYNATECH, **Fibras de Aramida**. Disponível em: www.dynatech.ind.br. Acesso em: 25/10/2017
- GIBSON, R. F. **Principles of composite materials mechanics**. Nova Iorque: McGraw Hill, Inc., 1994.
- HUEBNER, K.H. **The finite element method for engineers**. New York: John Wiley & Sons, 1994.
- INTERFIBER. **Sobre a Fibra de Vidro**. Disponível em: www.interfiber.com.br/sobre-a-fibra-de-vidro/. Acesso em: 25/10/2017.
- ITA - Instituto Tecnológico de Aeronáutica. **Polímeros: ciência e tecnologia**, v.10, n. 2, São Paulo, 2000.
- MORAES, A. J. **O método dos elementos finitos e a engenharia civil: execução e controle de estruturas e fundações**. Cuiabá: Instituto de Pós-Graduação - IPOG, 2015.
- NETO, F. L.; PARDINI, L. C. **Compósitos estruturais ciência e tecnologia**. São Paulo: Edgard Bülcher, 2006.
- STFILM. **Adesivo Vinil Preto Fibra de Carbono**. Disponível em: www.stfilm.com.br/produtos/. Acesso em: 25/10/2017
- TITA, V. **Análise dinâmica teórica e experimental de vigas fabricadas a partir de materiais compósitos poliméricos reforçados**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1999.